

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΚΑΙ ΚΑΛΙΟΥ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΟΠΟΥ
ΠΡΟΣΤΕΘΗΚΑΝ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΖΕΟΛΙΘΟΣ

ΡΟΥΛΙΑΣ ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ Α.Μ. 1801

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΒΟΛΟΣ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με σκοπό να προσδιοριστούν σε πραγματικές συνθήκες αγρού η δυναμική του φωσφόρου και του καλίου σε καλλιέργεια χειμερινών σιτηρών, έπειτα από προσθήκη οργανικών υπολειμμάτων κοπριάς και ιλύος βιολογικού καθαρισμού με ταυτόχρονη χορήγηση ζεόλιθου, καθώς επίσης και ανόργανων λιπασμάτων για καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε αγρός με χαμηλό ποσοστό οργανικής ουσίας, ελαφρώς ασβεστούχο, και όχι πολύ εντατικά καλλιεργημένο κατά τα προηγούμενα χρόνια. Έπειτα, εγκαταστάθηκε πείραμα στην περιοχή του Χειμώνιου, του Βορείου Έβρου, όπου χωρίστηκαν 48 πειραματικά τεμάχια των 8 m² και υπήρξαν 4 επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση. Ο πειραματικός σχεδιασμός για τα 24 από αυτά περιελάμβανε ένα μάρτυρα, μία δόση ανόργανου λιπάσματος και 4 κλιμακούμενες δόσεις ιλύος, ενώ για τα υπόλοιπα 24 έγιναν οι ίδιες μεταχειρίσεις σε συνδυασμό με ζεόλιθο. Με βάση τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, η προσθήκη ιλύος βιολογικού καθαρισμού σε συνδυασμό με ζεόλιθο αύξησε την διαθεσιμότητα φωσφόρου, αλλά όχι και καλίου, στο έδαφος, χωρίς ωστόσο να μεταβάλλει σημαντικά τη συγκέντρωση των θρεπτικών αυτών στους σπόρους του φυτού. Επίσης, η προσθήκη ζεόλιθου σε συνδυασμό με ιλύς βιολογικού καθαρισμού βελτίωσε σημαντικά το εδαφικό pH, αύξησε την οργανική ουσία και τα NO₃-N στο έδαφος, καθώς και τη συγκέντρωση των μετάλλων Zn και Mn.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εδαφολογίας, του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνέβαλαν στη διεξαγωγή και διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας και στάθηκαν πλάι μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντωνιάδη Βασίλειο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε ως επιβλέπων καθηγητής της παρούσας εργασίας. Ο τρόπος σκέψης και εργασίας του εντός του εργαστηρίου, καθώς και η αμέριστη συμπαράσταση και καθοδήγησή που μου προσέφερε ήταν καταλυτικά ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δαναλάτο Νικόλαο και τον κ. Πετρόπουλο Σπυρίδων, Καθηγητές του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου, που με την αγάπη και τη στήριξή τους μου έδιναν δύναμη να συνεχίσω την προσπάθεια αυτή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

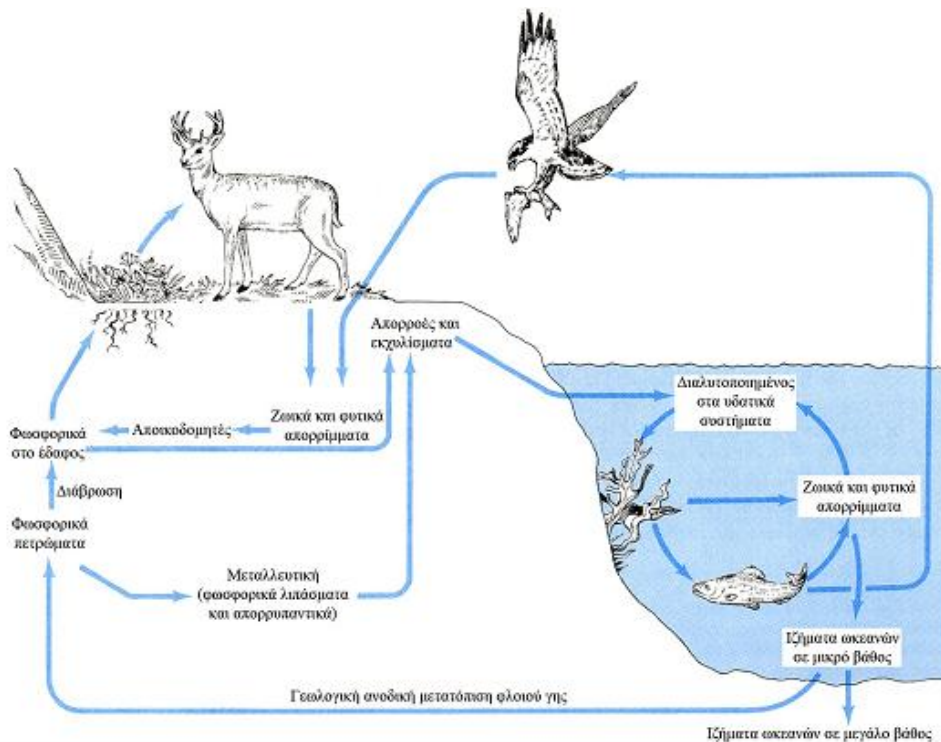
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά περί φωσφόρου	1
1.1.1 Κύκλος Φωσφόρου.....	2
1.1.2 Οι διαθέσιμες και μη διαθέσιμες μορφές του φωσφόρου.....	3
1.1.3 Η μέτρηση και η εκτίμηση του διαθέσιμου φωσφόρου κατά Olsen	4
1.2 Γενικά περί καλίου.....	5
1.2.1 Διαθέσιμες και μη διαθέσιμες μορφές καλίου	5
1.3 Τα οργανικά λιπάσματα.....	6
1.3.1 Ιλύς βιολογικών καθαρισμών.....	6
1.3.2 Η αξία της κοπριάς ως λίπασμα.....	7
1.4 Η αξία του ζεόλιθου στην καλλιέργεια	7
1.5 Κριθάρι	8
1.6 Σκοπός της εργασίας.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	10
2.1 Επιλογή αγρού και συλλογή οργανικών υπολειμμάτων	10
2.2 Πειραματικός σχεδιασμός.....	11
2.3 Μέθοδοι ανάλυσης	12
2.3.1 Εκχύλιση φυτομάζας.....	12
2.3.2 Μέθοδος μέτρησης καλίου στο φυτό	12
2.3.3 Μέθοδος μέτρησης φωσφόρου κατά Olsen στο φυτό.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	16
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά περί φωσφόρου

Ο φώσφορος στο έδαφος προέρχεται από την αποσάθρωση των ορυκτών που περιέχουν φώσφορο, τα φυτικά και ζωικά οργανικά υπολείμματα και από τις ανθρωπογενείς προσθήκες φωσφόρου με τη μορφή οργανικών ή ανόργανων λιπασμάτων. Ο φώσφορος απελευθερώνεται στο εδαφικό διάλυμα όταν τα ορυκτά που φέρουν φώσφορο διαλύονται κι έτσι ο φώσφορος που είναι δεσμευμένος στην επιφάνεια των ορυκτών του εδάφους εκλύεται στο εδαφικό διάλυμα. Αυτό που χαρακτηρίζει το φώσφορο είναι η χαμηλή διαθεσιμότητα του λόγω της αργής διάχυσης και της υψηλής σταθερότητάς του στα εδάφη. Η διατήρηση μιας υψηλής συγκέντρωσης φωσφόρου στην ριζική ζώνη μπορεί να μεγιστοποιήσει την αποτελεσματικότητα των ριζών των φυτών να κινητοποιήσουν και να αποκτήσουν το φώσφορο από την ριζόσφαιρα στο υπέργειο μέρος τους. Οι κύριες μορφές που απορροφάται είναι το πρωτεΐον ορθοφωσφορικό ιόν (H_2PO_4^-) και το δευτερεύον ορθοφωσφορικό (HPO_4^{2-}). Ο φώσφορος είναι απαραίτητος για τα φυτά, αφού αποτελεί ένα από τα δεκαέξι στοιχεία που είναι αναγκαία για την ανάπτυξη τους. Στα φυτά ο φώσφορος είναι απαραίτητος για μια σειρά φυσιολογικών λειτουργιών που εμπλέκονται με ενεργειακούς μετασχηματισμούς όπως η φωτοσύνθεση, η αναπνοή, η αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας, η κυτταρική διαίρεση και η μεγέθυνση των κυττάρων. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη φωτοσύνθεση δεσμεύεται ηλιακή ενέργεια, παρουσία χλωροφύλλης, και μετατρέπεται το CO_2 σε αντίδραση με το νερό σε O_2 και υδατάνθρακες. Κατά την αντίδραση αυτή παράγεται ενέργεια η οποία αποθηκεύεται στα φυτά με τη μορφή ATP, κύριο συστατικό της οποίας είναι ο φώσφορος. Η ATP αποτελεί διαθέσιμη πηγή ενέργειας για όλες τις άλλες αντιδράσεις που συμβαίνουν στα φυτά. Επιπλέον ο φώσφορος αποτελεί βασικό συστατικό των δομικών μονάδων του DNA και RNA. Επομένως, ως μέρος του γονιδιώματος, ο φώσφορος παίζει καίριο ρόλο τόσο στην ανάπτυξη του φυτού και των διάφορων χαρακτηριστικών του, όσο και στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων του φυτού [1].

1.1.1 Κύκλος Φωσφόρου



Εικόνα 1: Κύκλος του φωσφόρου [2]

Ο κύκλος του φωσφόρου αρχίζει με την εκχύλιση των φωσφορικών αλάτων από τα πετρώματα που βρίσκεται, μέσω του νερού της βροχής και του χιονιού και της μεταφορά αυτών στα υδατινά οικοσυστήματα. Τα φωσφορικά άλατα ενσωματώνονται στα υδρόβια φυτά και έτσι μέσω της διατροφής και στα υδρόβια ζώα. Όσον αφορά τα χερσαία οικοσυστήματα ο φώσφορος προϋπάρχει στο εδαφικό διάλυμα είτε προστίθεται με τη χρήση οργανικών ή ανόργανων φωσφορικών λιπασμάτων και έτσι γίνεται η πρόσληψή του από τα φυτά και έπειτα στα χερσαία ζώα. Ο φώσφορος επιστρέφει στα οικοσυστήματα μέσω των υπολειμμάτων των ζώων είτε με αποσύνθεση της οργανικής ύλης με τη βοήθεια των μικροοργανισμών. Ένα μεγάλο μέρος καταλήγει στους ωκεανούς και βυθίζεται ως ίζημα στον πυθμένα [3].

1.1.2 Οι διαθέσιμες και μη διαθέσιμες μορφές του φωσφόρου

Στο έδαφος ο φώσφορος απαντάται σε διάφορες χημικές μορφές, τόσο ως οργανικός όσο και ως ανόργανος. Αυτές οι δύο μορφές διαφέρουν ως προς την συμπεριφορά τους και της κινητικότητας τους στο έδαφος. Εξίσου όμως και οι δύο μορφές φωσφόρου αποτελούν πηγή τροφοδοσίας για τις ανάγκες των φυτών.

Ο ανόργανος φώσφορος αντιπροσωπεύει συνήθως το 35% έως 75% του συνολικού φωσφόρου στο έδαφος [3]. Τα πρωτογενή ορυκτά του φωσφόρου όπως αυτά των απατιτών, του στρεγκίτη και του βαρισκίτη είναι αρκετά σταθερά κι έτσι η απελευθέρωση του ανόργανου φωσφόρου από αυτά τα πετρώματα με την επίδραση των καιρικών συνθηκών δεν είναι τόσο γρήγορη όσο χρειάζεται για να καλυφθούν οι ανάγκες των φυτών σε φώσφορο. Αντίθετα τα δευτερογενή ορυκτά του φωσφόρου που περιλαμβάνουν ασβέστιο (Ca), σίδηρο (Fe) και αργίλιο (Al) ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος και των ορυκτών σωματιδίων και το pH του εδάφους. Με την αύξηση του εδαφικού pH η διαλυτότητα των φωσφορικών αλάτων σιδήρου και αργιλίου αυξάνεται, αλλά η διαλυτότητα του φωσφορικού ασβεστίου μειώνεται, εκτός από τις τιμές pH πάνω από 8. Έτσι, σε αλκαλικά εδάφη, στα οποία κατά κανόνα κυριαρχεί το ασβέστιο, ο φώσφορος εμφανίζεται με τη μορφή φωσφορικού διασβεστίου ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ή φωσφορικού τετρασβεστίου και οκ ασβεστίου $\text{Ca}_8\text{H}(\text{PO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_8(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Στα όξινα εδάφη επικρατούν συνήθως τα ιόντα Fe^{3+} και Al^{3+} και ο $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (στρεγκίτης) ή ο $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (βαρισκίτης).

Ο οργανικός φώσφορος αντιπροσωπεύει γενικά το 30% έως 65% του συνολικού φωσφόρου στο έδαφος [3]. Ο οργανικός φώσφορος υπάρχει κυρίως σε σταθεροποιημένες μορφές όπως φωσφορικές και φωσφονικές ινοσιτόλες και δραστικές μορφές ως διεστέρες ορθοφωσφορικού, ασταθείς ορθοφωσφορικοί μονοεστέρες και οργανικά πολυφωσφορικά. Ο οργανικός φώσφορος απελευθερώνεται μέσω διεργασιών ανοργανοποίησης με τη συμβολή μικροοργανισμών του εδάφους και των ριζών των φυτών. Αυτές οι διεργασίες επηρεάζονται σημαντικά από την υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία, τις φυσικοχημικές ιδιότητες και το pH του εδάφους.[4].

1.1.3 Η μέτρηση και η εκτίμηση του διαθέσιμου φωσφόρου κατά Olsen

Η μέθοδος Olsen δοκιμάστηκε για να προβλέψει την ανταπόκριση των καλλιεργειών στις εισροές φωσφορικών λιπασμάτων σε ασβεστούχα εδάφη. Η μέθοδος Olsen είναι πλέον κατάλληλη για τα ασβεστούχα εδάφη, ιδιαίτερα εκείνα με >2% ανθρακικό ασβέστιο, αλλά έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματική και για όξινα εδάφη. Η μέθοδος βασίζεται στη παρουσία των HCO_3^- , CO_3^{2-} σε διάλυμα με pH 8,5, 0,5 M NaHCO_3 ώστε να μειωθούν οι συγκεντρώσεις του διαλυτού Ca^{2+} με καθίζηση ως CaCO_3 στο εδαφικό διάλυμα και του διαλυτού Al^{3+} και Fe^{3+} με σχηματισμό Al και Fe οξυυδροξειδίων, αυξάνοντας έτσι την διαλυτοποίηση των φωσφορικών ασβεστίων. Για τα περισσότερα ελληνικά εδάφη, η εκχύλιση γίνεται κατά Olsen. Ένας γενικός κανόνας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της εκχύλισης φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα:

Αν το έδαφος έχει σύσταση	Εφαρμόζουμε όλη τη δόση λιπάσματος αν ο Olsen-P είναι	Εφαρμόζουμε τη μισή δόση λιπάσματος αν ο Olsen-P είναι	Δεν εφαρμόζουμε καθόλου λίπασμα αν ο Olsen-P είναι
Ελαφριά	<10	10-15	>15
Μέση	<15	15-20	>20
Βαριά	<20	20-25	>25

1.2 Γενικά περί καλίου

Το κάλιο αποτελεί περίπου το 2,1-2,3% του φλοιού της γης κατατάσσοντάς το στη δεκάδα των πιο άφθονων στοιχείων. Επομένως, και τα αποθέματα και του εδάφους σε κάλιο είναι γενικά μεγάλα. Το κάλιο απορροφάται από τα φυτά σε μεγαλύτερες ποσότητες από οποιοδήποτε άλλο θρεπτικό στοιχείο εκτός από το άζωτο. Η παρουσία του είναι απαραίτητη για διάφορες βιοχημικές διεργασίες που είναι υπεύθυνες για την ανάπτυξη των φυτών. Πιο συγκεκριμένα, συμμετέχει στη σύνθεση πρωτεϊνών, στο μεταβολισμό των υδατανθράκων και την ενεργοποίηση των ενζύμων. Επίσης, βοηθά στην ισορροπία κατιόντων-ανιόντων, στη μεταφορά νερού και ενέργειας. Επιπλέον, το κάλιο παίζει ρυθμιστικό ρόλο σε συνθήκες ξηρασίας, αυξημένης αλατότητας, αυξημένης τοξικότητας μετάλλων και υψηλών ή χαμηλών θερμοκρασιών. Στο εδαφικό διάλυμα το κάλιο συναντάται σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα από αυτή που έχουν ανάγκη να δεσμεύσουν τα φυτά. Παρόλα αυτά ένα μικρό ποσοστό του καλίου είναι διαθέσιμο για τα φυτά. Η περιεκτικότητα του καλίου στο έδαφος παίρνει τις χαμηλότερες τιμές της στα χονδρόκοκκα-αμμώδη εδάφη που προέρχονται από πετρώματα ψαμμίτη και χαλαζίτη, ενώ τα υψηλότερα ποσοστά περιέχονται στα λεπτόκοκκα-αργιλώδη εδάφη που προέρχονται από ορυκτά με υψηλή περιεκτικότητα σε κάλιο. Η ανεπάρκεια καλίου στα εδάφη αυξάνει την ευαισθησία των φυτών σε διάφορες ασθένειες και μολύνσεις από επιβλαβείς οργανισμούς καθιστώντας τα ευάλωτα σε συνθήκες στρες [5-7].

1.2.1 Διαθέσιμες και μη διαθέσιμες μορφές καλίου

Το μεγαλύτερο μέρος του καλίου στο έδαφος (90-98%) ενσωματώνεται στην κρυσταλλική δομή των ορυκτών και άρα δεν είναι άμεσα διαθέσιμο για την πρόσληψη από τα φυτά. Ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους ποικίλει η διαθεσιμότητα του καλίου σε αυτό. Το κάλιο στο έδαφος συχνά ταξινομείται σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με τη διαθεσιμότητά του στα φυτά. Αρχικά, υπάρχει το υδατοδιαλυτό κάλιο, το οποίο είναι άμεσα διαθέσιμο για τα φυτά και τα μικρόβια μέσω της έκπλυσης που υφίσταται το έδαφος. Δεύτερη ομάδα αποτελεί το ανταλλάξιμο κάλιο το οποίο βρίσκεται κυρίως υπό μορφή κατιόντος ηλεκτροστατικά συνδεδεμένο με την επιφάνεια ορυκτών αργίλου. Οι παραπάνω ομάδες θεωρούνται πιο εύκολα διαθέσιμες από τις άλλες δύο, αν και το ποσοστό τους στο έδαφος είναι πολύ μικρό (περίπου 0,1-0,2% υδατοδιαλυτό και 1-2% ανταλλάξιμο κάλιο). Το

υδατοδιαλυτό και το ανταλλάξιμο κάλιο είναι οι μορφές καλίου που εκχυλίζουμε στο έδαφος όταν κάνουμε εκτίμηση του διαθέσιμου καλίου, καθώς θεωρούνται εξ ολοκλήρου διαθέσιμα από τα φυτά. Στις μη διαθέσιμες ομάδες καλίου κατατάσσονται το μη ανταλλάξιμο κάλιο και οι ορυκτές μορφές καλίου, τα οποία δεν είναι πάντα άμεσα διαθέσιμα, παρά μόνο όταν το ανταλλάξιμο και το υδατοδιαλυτό κάλιο απομακρυνθούν από το έδαφος. Παρόλα αυτά η απελευθέρωση του μη ανταλλάξιμου καλίου είναι εξαιρετικά αργή ώστε να εξυπηρετήσει τις ανάγκες μιας καλλιέργειας [5, 6].

1.3 Τα οργανικά λιπάσματα

1.3.1 Ιλύς βιολογικών καθαρισμών

Η ιλύς που προέρχεται από επεξεργασία των αστικών λυμάτων αποτελεί ανανεώσιμο φυσικό πόρο με πολλά οφέλη στο περιβάλλον και στην οικονομία. Η ιλύς διακρίνεται σε πρωτοβάθμια, βιολογική και τριτοβάθμια ανάλογα με τον τύπο της επεξεργασίας των λυμάτων που μπορεί να γίνεται μηχανικά, βιολογικά ή χημικά. Η ορθή χρήση της ιλύος των αστικών λυμάτων στην γεωργία συμβάλλει στην άμεση αποκατάσταση της γονιμότητας των εδαφών λόγω του υψηλού ποσοστού σε οργανική ουσία και των απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων για το έδαφος που διαθέτει. Παρόλα τα θετικά της όμως, η ιλύς παρουσιάζει πρακτικές, τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες. Η ύπαρξη επιβλαβών ουσιών και ο ελλιπής έλεγχος στα κέντρα επεξεργασίας λυμάτων μπορεί να οδηγήσουν σε ρύπανση είτε να δημιουργήσουν μολύνσεις στις καλλιέργειες. Έτσι για να επιτευχθεί η εφαρμογή ιλύος αστικών λυμάτων χωρίς αρνητικές συνέπειες θα πρέπει να τηρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Η σωστή πληροφόρηση του αγρότη για τις ωφέλειες και τους ενδεχομένους κινδύνους της ιλύος, καθώς και η ορθή λειτουργία του κέντρου επεξεργασίας λυμάτων με συχνούς ελέγχους είναι αναγκαίες πρακτικές. Οπότε οποιαδήποτε μεταχείριση της ιλύος στη γεωργία πρέπει να αποτελεί μία αυστηρά ελεγχόμενη διαδικασία ώστε να αποφευχθούν οι δυσμενείς επιπτώσεις που ενδέχεται να προκαλέσει στο περιβάλλον είτε όσον αφορά το έδαφος είτε τον υδροφόρο ορίζοντα [8].

1.3.2 Η αξία της κοπριάς ως λίπασμα

Η κοπριά των ζώων είναι μια εξαιρετική πηγή θρεπτικών συστατικών και οργανικής ύλης για το έδαφος. Αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος της από οργανικά υλικά, καθώς και από τα απαραίτητα για την ανάπτυξη μιας καλλιέργειας θρεπτικά συστατικά (μακροστοιχεία-μικροστοιχεία). Προέρχεται από στερεά και υγρά απορρίμματα ζώων, με ή χωρίς συνοδευτικά απορρίμματα όπως άχυρο και σανό. Τα εκτρεφόμενα ζώα αποβάλλουν το μεγαλύτερο μέρος του αζώτου, του φωσφόρου και του καλίου που υπάρχει στα τρόφιμα που καταναλώνουν, ενισχύοντας έτσι με θρεπτικά συστατικά την παραγόμενη από αυτά κοπριά. Η οργανική ύλη που εναποτίθεται στο έδαφος παρουσιάζει αρκετά οφέλη για την καλλιέργεια. Αρχικά, βελτιώνει την δομή του εδάφους το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την ευκολότερη διέλευση των ριζών στο έδαφος, καθώς και την καλύτερη διαχείριση του νερού που διέρχεται από το έδαφος. Επίσης συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη αποστράγγιση του νερού επιτρέποντας την κυκλοφορία του αέρα μέσα στο έδαφος. Ακόμη συνεισφέρει στην ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων δεσμεύοντας έτσι μεγάλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών όπως ασβέστιο, μαγνήσιο και κάλιο τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Η ζωική κοπριά είναι λιγότερο πλούσια σε άζωτο, φώσφορο και κάλιο από τα συνθετικά λιπάσματα και άρα πρέπει να εφαρμόζεται σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες από αυτά [9, 10].

1.4 Η αξία του ζεόλιθου στην καλλιέργεια

Οι περισσότεροι ζεόλιθοι σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Έπειτα από μία ηφαιστειακή έκρηξη η καυτή λάβα που θα φθάσει στη θάλασσα αντιδρά με το αλάτι και το νερό, με αποτέλεσμα με την πάροδο των χρόνων να σχηματιστούν κρυσταλλικά στερεά, οι ζεόλιθοι. Στο σύνολό τους οι ζεόλιθοι σχηματίζουν μία δομή που περιλαμβάνει μία τετραεδρική διάταξη κατιόντων πυριτίου (Si^{4+}) και κατιόντων αλουμινίου (Al^{3+}) που περιβάλλονται από τέσσερα ανιόντα οξυγόνου (O^{2-}). Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της προσθήκης ζεόλιθου στην καλλιέργεια είναι η ικανότητα συγκράτησης των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος με αποτέλεσμα αυτά να ξεπλένονται αργά και σταδιακά από το έδαφος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται και τη χρήση μικρότερων δόσεων λιπάσματος και άρα την μείωση του κόστους παραγωγής των καλλιεργειών. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του ζεόλιθου είναι η ικανότητά του να ενυδατώνεται συνεχώς κάτι που έχει σημαντικό

αντίκτυπο στη διατήρηση της υγρασίας στο έδαφος και άρα στην αποτροπή της ξήρανσης των εδαφών. Επίσης λόγω του υψηλού του πορώδους μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλες ποσότητες νερού και να τις διοχετεύει στο έδαφος όταν αυτό απαιτείται. Επιπλέον η χρήση του ζεόλιθου έχει ως αποτέλεσμα την ρύθμιση του pH σε όξινα εδάφη, καθώς και τη μείωση της διαλυτότητας των βαρέων μετάλλων που θα ήταν επιβλαβή για την καλλιέργεια σε μεγάλες συγκεντρώσεις [11]. Τέλος, αν οι φυσικοί ζεόλιθοι χρησιμοποιηθούν με ζωική κοπριά μπορούν να ελαττώσουν την κακοσμία και να αυξήσουν τη συγκέντρωση αζώτου των ζωικών αποβλήτων, καθώς και να καθарίσουν το αέριο μεθάνιο που παράγεται από την αναερόβια χώνεψη της κοπριάς [8, 9].

1.5 Κριθάρι

Το κριθάρι είναι από τα πρώτα δημητριακά που καλλιεργήσε ο άνθρωπος και καταλαμβάνει αξιοσημείωτη καλλιεργητική έκταση τόσο στην Ελλάδα όσο και ολόκληρο τον πλανήτη. Έχει μεγάλη προσαρμοστικότητα σε διάφορα κλίματα λόγω της πρωιμότητάς του, αφού αποφεύγει τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες του καλοκαιριού. Οι αποδόσεις της καλλιέργειας κυμαίνονται μεταξύ 350-800 κιλών το στρέμμα. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής καταλήγει για ζωοτροφή και το υπόλοιπο για την παραγωγή βύνης για αλκοολούχα ποτά και ως συστατικό διάφορων τροφών για τον άνθρωπο. Η τελική απόδοση της παραγωγής κριθαριού καθορίζεται από τον αριθμό των κόκκων ανά μονάδα επιφάνειας και από το βάρος τους. Άρα οι παράγοντες που συμβάλλουν θετικά σε αυτούς τους συντελεστές βελτιώνουν και την τελική απόδοση του προϊόντος. Στους παράγοντες μπορούν να συμπεριληφθούν οι κλιματολογικές συνθήκες που θα επικρατήσουν στην καλλιεργητική περίοδο, το γενετικό υλικό που θα επιλεγεί να είναι το καταλληλότερο, οι καλλιεργητικές πρακτικές που θα ακολουθήσει ο κάθε καλλιεργητής σε συνδυασμό με την φυτοπροστασία της καλλιέργειας, καθώς και οι εδαφικές απαιτήσεις που θα κρίνουν και το πρόγραμμα λίπανσης που θα ακολουθηθεί. Το κριθάρι διαδέχεται τρεις ξεχωριστές φυσιολογικές φάσεις μέχρι το τελικό προϊόν. Το βλαστικό στάδιο που ξεκινάει με τη σπορά και καταλήγει στην έναρξη του καλαμώματος, το αναπαραγωγικό στάδιο που αρχίζει με την εμφάνιση του πρώτου κόμβου και διαρκεί μέχρι το τέλος της άνθησης και το στάδιο γεμίσματος του κόκκου που ξεκινάει με το τέλος της άνθησης έως την ωρίμανση των κόκκων [12].

1.6 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας ήταν να δοκιμασθεί σε πραγματικές συνθήκες αγρού η δυναμική του φωσφόρου και του καλίου σε καλλιέργεια χειμερινών σιτηρών ύστερα από προσθήκη οργανικών υπολειμμάτων κοπριάς και ιλύος βιολογικού καθαρισμού, καθώς και ζεόλιθου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Επιλογή αγρού και συλλογή οργανικών υπολειμμάτων

Επιλέχθηκε ένας αγρός για την εγκατάσταση του πειραματικού με έδαφος με χαμηλό ποσοστό οργανικής ουσίας, ελαφρώς ασβεστούχο (για να έχει ρυθμισμένο pH) και όσο το δυνατό όχι πολύ εντατικά καλλιεργημένο κατά τα προηγούμενα χρόνια (έτσι ώστε τα επίπεδα φωσφόρου να μην είναι υψηλά). Επιλέχθηκε αγρός στην περιοχή του Χειμώνιου, βόρεια του Έβρου, ο οποίος πληρούσε τα παραπάνω κριτήρια. Η εγκατάσταση της καλλιέργειας κριθαριού έγινε από ομάδα του Τμήματος Αγροτικής Ανάπτυξης (έδρα, Ορεστιάδα) του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης. Από κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις του κάμπου της Ορεστιάδας συλλέχθηκαν ποσότητες «χωνεμένης» κοπριάς και τοποθετήθηκαν σε λινά τσουβάλια. Επίσης ποσότητες ύλους βιολογικού καθαρισμού Ορεστιάδας παραδόθηκαν στο χώρο του πειραματικού αγρού από κλιμάκιο της ΔΕΥΑΟ. Πριν από την εφαρμογή τους στον πειραματικό αγρό, λήφθηκαν δείγματα σε πλαστικές σακούλες. Στο Εργαστήριο Γεωργίας του Τμήματος Αγροτικής Ανάπτυξης εκτιμήθηκε η υγρασία τους για να υπολογιστεί η ακριβής ποσότητα εφαρμογής. Αυτό έγινε κατά την καλλιεργητική περίοδο Οκτώβριος 2016 (σπορά) έως Ιούνιο 2017 (συγκομιδή). Ελήφθησαν εδαφικά δείγματα από τον αγρό, τα οποία αεροξηράθηκαν στο Εργαστήριο Γεωργίας του Τμήματος Αγροτικής Ανάπτυξης, λειοτριβήθηκαν και κοσκινίστηκαν από κόσκινο με ανοίγματα 2 mm. Τα αεροξηραμένα και κοσκινισμένα δείγματα απεστάλησαν στο Εργαστήριο Εδαφολογίας του Τμήματός μας και αναλύθηκαν για τις εξής παραμέτρους: Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, ανθρακικό ασβέστιο, οργανική ουσία, pH, φώσφορος κατά Olsen, ανταλλάξιμο κάλιο και κοκκομετρικής σύστασης (μέτρηση άμμου ύλους και αργίλου). Ομοίως απεστάλησαν δείγματα σιταριού που συγκομίστηκαν στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, τα οποία ξηράθηκαν σε φούρνο στους 70 °C έως την μη περαιτέρω απώλεια βάρους και κονιορτοποιήθηκαν. Τα κονιορτοποιημένα δείγματα αναλύθηκαν στο Εργαστήριο Εδαφολογίας για την περιεκτικότητά τους σε φώσφορο και κάλιο με τη μέθοδο της ξηρής αποτέφρωσης.

2.2 Πειραματικός σχεδιασμός

Στον επιλεγμένο αγρό στην περιοχή του Χειμώνιου Β Έβρου χωρίστηκαν 48 πειραματικά τεμάχια των 8 m² το καθένα. Υπήρξαν 4 επαναλήψεις σε κάθε μεταχείριση:

Μεταχείριση C: Μάρτυρας (καμία προσθήκη από κανένα υλικό)

Μεταχείριση F: Λίπασμα με το οποίο χορηγήθηκαν 24 λιπαντικές μονάδες N (kg N στρ⁻¹)

Μεταχείριση SS1: Ιλύς βιολογικών καθαρισμών με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹)

Μεταχείριση SS2: Ιλύς βιολογικών καθαρισμών με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹)

Μεταχείριση SS3: Ιλύς βιολογικών καθαρισμών με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹)

Μεταχείριση SS4: Ιλύς βιολογικών καθαρισμών με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹)

Μεταχείριση C-Z: Μάρτυρας χωρίς χορήγηση άλλου υλικού εκτός από την χορήγηση ζεόλιθου

Μεταχείριση F-Z: Λίπασμα με το οποίο χορηγήθηκαν 24 λιπαντικές μονάδες N (kg N στρ⁻¹)

Μεταχείριση SS1-Z: Ιλύς βιολογικών καθαρισμών με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹) και παράλληλη χορήγηση ζεόλιθου

Μεταχείριση SS2-Z: Ιλύς βιολογικών καθαρισμών με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹) και παράλληλη χορήγηση ζεόλιθου

Μεταχείριση SS3-Z: Ιλύς βιολογικών καθαρισμών με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹) και παράλληλη χορήγηση ζεόλιθου

Μεταχείριση SS4-Z: Ιλύς βιολογικών καθαρισμών με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹) και παράλληλη χορήγηση ζεόλιθου

Η χορήγηση ζεολίθου ήταν στο ύψος των 100 kg ανά στρέμμα.

2.3 Μέθοδοι ανάλυσης

2.3.1 Εκχύλιση φυτομάζας

Κατά τη διαδικασία αυτή η φυτομάζα εκχυλίζεται και προσδιορίζονται ποσοτικά όλα τα μη πτητικά συστατικά (πτητικά είναι ο C και το N), όπως ο P και το K.

Ξηρή καύση φυτικού ιστού

Ο σκοπός της καύσης των φυτικών ιστών πραγματοποιείται για την καταστροφή της οργανικής ουσίας τους σε υψηλή θερμοκρασία.

Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται είναι HCl 20% v/v. Ανά 50 mL τελικού διαλύματος διαλύεται πυκνό HCl σε αποσταγμένο νερό 20 mL.

Η καύση τελείται σε χωνευτήριο πορσελάνης, όπου τοποθετούνται 0,5 g αλεσμένου φυτικού ιστού και στη συνέχεια καίγονται για πέντε ώρες σε ηλεκτρικό φούρνο, σε θερμοκρασία 500°C.

Η εκχύλιση συντελείται εφόσον ψυχθούν οι κάψες αποτέφρωσης. Λαμβάνεται η τέφρα του φυτικού ιστού με 20 mL 20 % HCl σε ογκομετρική φιάλη των 50 mL και, αφού προστεθεί μέχρι την χαραγή απιονισμένο νερό, τοποθετείται σε μπουκαλάκια τύπου falcon.

2.3.2 Μέθοδος μέτρησης καλίου στο φυτό

Σε ογκομετρική φιάλη των 25 mL τοποθετούνται 1,25 mL (αραίωση X20) που προσλήφθηκαν από το πυκνό διάλυμα στο falcon των 50 mL.

Με τη χρήση φλογοφωτόμετρου, μετράται το K απευθείας από το αραιό διάλυμα των 25 mL. Το ανταλλάξιμο κάλιο δίνεται από τον τύπο:

$$K, \text{ mg kg}^{-1} \text{ φυτού} = A/B$$

- A: συγκέντρωση K σε mg L⁻¹ από το φλογοφωτόμετρο
- B: βάρος του εδάφους σε γραμμάρια

2.3.3 Μέθοδος μέτρησης φωσφόρου κατά Olsen στο φυτό

Ο λόγος επιλογής της παρακάτω μεθόδου είναι ότι θεωρείται η πιο κατάλληλη για να εφαρμοστεί στα ελληνικά εδάφη, καθώς δεν επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες και διατηρείται η σταθερότητα του χόματος για 24 ώρες.

Παρασκευή Αντιδραστηρίων

- Αντιδραστήριο A

Αρχικά γίνεται αραιώση μολυβδαινικού αμμωνίου $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, τρυγικού καλίου-αντιμονυλίου $\text{KSbO}\cdot\text{C}_4\text{H}_4\text{O}$ και θεικού οξέος H_2SO_4 . Διαλύονται 12 g μολυβδαινικού αμμωνίου σε περίπου 250 mL αποσταγμένο νερό. Επίσης 0,29 g τρυγικού καλίου-αντιμονυλίου σε περίπου 100 mL αποσταγμένο νερό και, 140 mL πυκνό θεικό οξύ σε ογκομετρική φιάλη του 1 L όπου συμπληρώνεται αποσταγμένο νερό μέχρι τη χαραγή. Στη συνέχεια, τα τρία αντιδραστήρια τοποθετούνται σε ογκομετρική φιάλη των 2 L και συμπληρώνεται αποσταγμένο νερό μέχρι τη χαραγή. Τέλος ανακινείται καλά και μεταφέρεται σε πλαστική φιάλη όπου και αποθηκεύεται. Το μείγμα αποτελεί το Αντιδραστήριο A.

- Αντιδραστήριο B

Παραλαμβάνονται 200 mL από το Αντιδραστήριο A και προστίθεται 1 g ασκορβικού οξέος. Το μείγμα που προκύπτει αποτελεί το Αντιδραστήριο B και έχει κίτρινο χρώμα.

Παρασκευή διαλύματος 5 ppm P

Σε ογκομετρική φιάλη των 100 mL τοποθετούνται 10 mL από stock solution 1000 ppm P (1000 mg P L^{-1}) και συμπληρώνεται με απιονισμένο νερό μέχρι τη χαραγή. Στη συνέχεια παραλαμβάνονται 5 mL από την ογκομετρική φιάλη και τοποθετούνται σε άλλη, των 100 mL, η οποία συμπληρώνεται με απιονισμένο νερό μέχρι τη χαραγή. Σε αυτή την ογκομετρική φιάλη η συγκέντρωση του P είναι 5 ppm (5 mg P L^{-1}). Για την παρασκευή stock solution 1000 ppm P ζυγίζονται 0,38 g ευδιάλυτου φωσφορικού

άλατος NaH_2PO_4 και διαλύονται σε ογκομετρική φιάλη των 100 mL. Στη συνέχεια, παρασκευάζεται το διάλυμα 5 ppm P όπως αναφέρεται παραπάνω.

Ανάπτυξη χρώματος και μέτρησης

Σε ογκομετρική φιάλη των 25 mL τοποθετούνται 1,25 mL του εκχυλισμένου φυτικού ιστού από το πυκνό διάλυμα του falcon των 50 mL. Κατόπιν συμπληρώνεται ως τη χαραγή με απιονισμένο νερό.

Έπειτα σε ογκομετρική φιάλη των 25 mL τοποθετούνται 5 mL του παραπάνω εκχυλίσματος και προστίθενται 2 mL NaOH συγκέντρωσης 1 M.

Σταδιακά, για να μην αφρίσει σε μεγάλο βαθμό το δείγμα, προστίθενται περίπου 4 mL αραιό HCl και γίνεται ανάδευση μέχρι να σταματήσει ο αφρισμός.

Στη συνέχεια προστίθενται 2,5 mL αντιδραστήριο B και συμπληρώνεται με νερό μέχρι τη χαραγή.

Με το πέρασ 30 λεπτών το χρώμα θα έχει αναπτυχθεί.

Ανάπτυξη χρώματος για τη δημιουργία καμπύλης βαθμονόμησης

Για τη χάραξη καμπύλης βαθμονόμησης χρησιμοποιούνται 6 ογκομετρικές φιάλες των 25 mL στις οποίες θα αναπτυχθεί χρώμα από διαλύματα γνωστής συγκέντρωσης, με την ακόλουθη διαδικασία.

Στις ογκομετρικές φιάλες των 25 mL προστίθενται 2 mL NaOH συγκέντρωσης 1 M.

Σταδιακά, για να μην αφρίσει σε μεγάλο βαθμό το δείγμα, προστίθενται περίπου 4 mL αραιό HCl και γίνεται ανάδευση μέχρι να σταματήσει ο αφρισμός.

Στη συνέχεια προστίθενται 2,5 mL αντιδραστήριο B.

Ύστερα προστίθενται διαδοχικά στις 6 φιάλες 0, 0.5, 1, 2, 4, 6 mL διαλύματος 5 ppm P. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται πρότυπα διαλύματα με συγκέντρωση φωσφόρου 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 και 1.2 ppm (mg P L^{-1}), αντίστοιχα.

Τέλος οι φιάλες συμπληρώνονται με νερό μέχρι τη χαραγή και με το πέρας 30 λεπτών το χρώμα έχει αναπτυχθεί.

Μέτρηση εκχύλισματος

Με τη χρήση φασματοφωτομέτρου σε μήκος κύματος 882 nm μετράται το διάλυμα στο οποίο αναπτύχθηκε το κυανό χρώμα (και το άγνωστο και το πρότυπο γνωστής συγκέντρωσης).

Εφαρμόζεται ο τελικός τύπος: $Olsen-P=200(A/B) \text{ mg kg}^{-1}$ εδάφους.

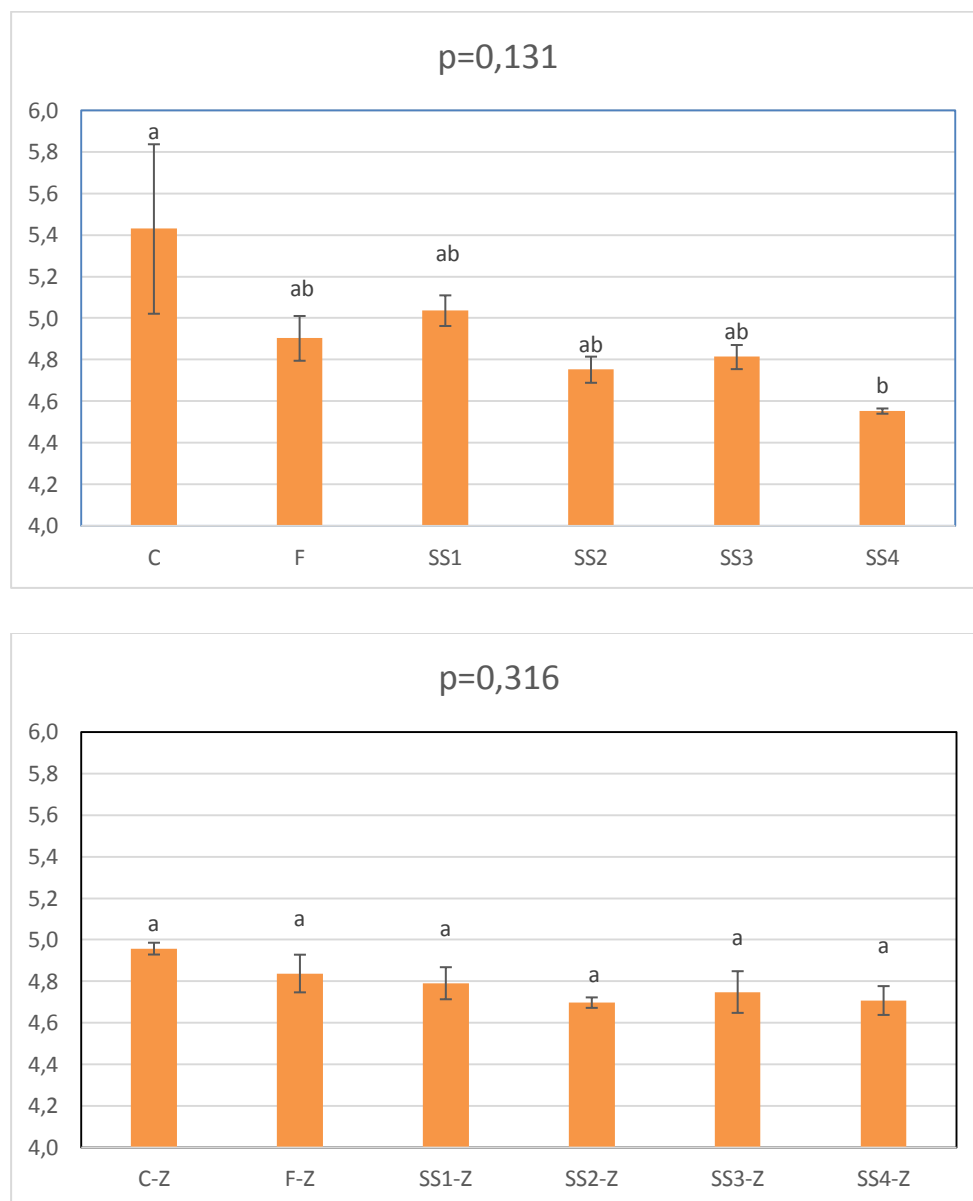
A: ppm P στο εκχύλισμα (αυτό που μετράμε στο φασματοφωτόμετρο)

B: βάρος εδάφους σε g.

Έλεγχος ποιότητας δεδομένων και στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων

Για την αποφυγή οποιασδήποτε επιμόλυνσης κατά την εκχύλιση και τη ανάλυση, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις επαναλήψεις για κάθε πειραματική μεταχείριση και έγινε χρήση λευκού προσδιορισμού σε κάθε περίπτωση μέτρησης και ανάλυσης. Έτσι επετεύχθη ο έλεγχος της ποιότητας των εργαστηριακών δεδομένων. Στους μέσους όρους των επαναλήψεων κάθε μεταχείρισης του πειράματος έγινε ανάλυση της παραλλακτικότητας (ANOVA, Analysis Of Variance). Η ελάχιστη σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων εκτιμήθηκε με το τεστ LSD (Least Significant Difference) για επίπεδο σημαντικότητας τουλάχιστον $p < 0,05$. Η ANOVA και το τεστ LSD, καθώς και οι συσχετίσεις μεταξύ διαφόρων παραγόντων έγιναν με τη χρήση του στατιστικού πακέτου STATGRAPHICS. Τα σχήματα και οι καμπύλες χαράχθηκαν στο MS Excel.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ



Σχήμα 1. Τιμές pH στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεολίθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεολίθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση ύλους βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση ύλους βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση ύλους βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση ύλους βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

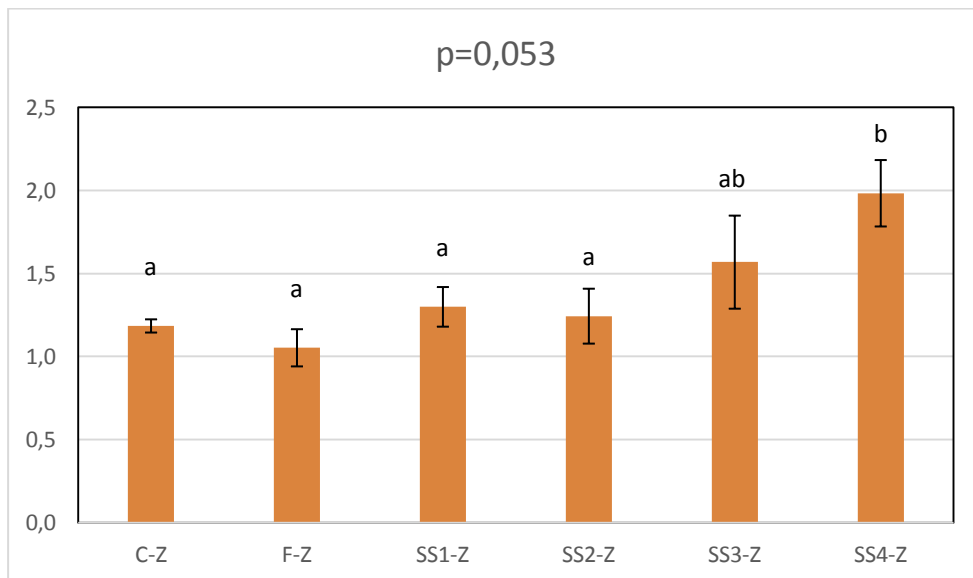
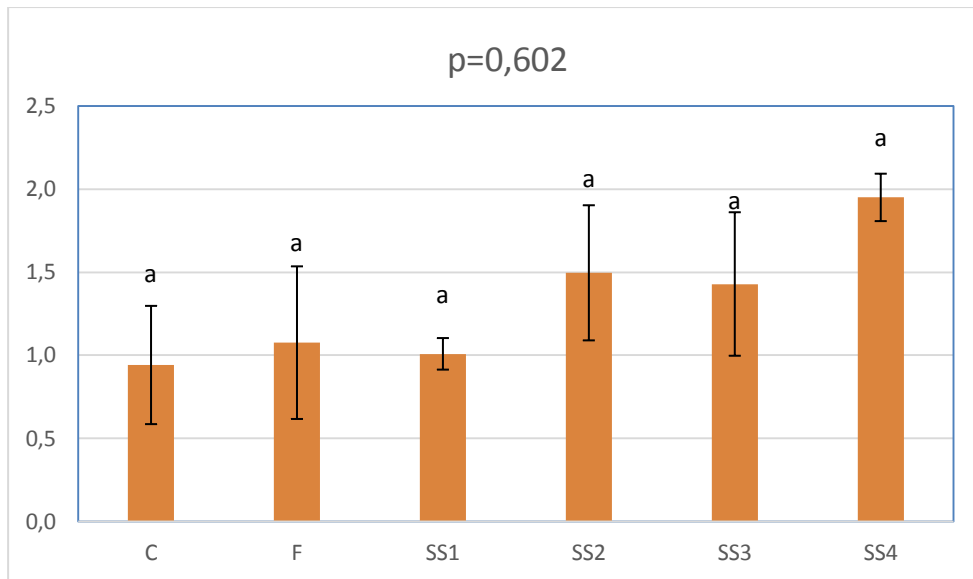
Όσο αφορά το pH του εδάφους (Σχήμα 1), βρήκαμε ότι το έδαφος ήταν όξινο (μεταχείριση μάρτυρα C) με τιμή pH= 5,4. Η τιμή του pH μειώθηκε με την προσθήκη

του λιπάσματος (μεταχείριση F), αλλά η μείωση δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Με την κλιμακούμενη προσθήκη ιλύος βιολογικών καθαρισμών (IBK) το pH μειώθηκε περαιτέρω, με την μεταχείριση της υψηλής χορήγησης IBK (SS4) να διαφέρει σημαντικά σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ οι υπόλοιπες μεταχειρίσεις προσθήκης IBK δεν είχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές σε σχέση με τον μάρτυρα. Με την προσθήκη του ζεόλιθου, το pH μειώθηκε από την τιμή 5,4 (μεταχείριση C) στην τιμή 4,95 (μεταχείριση CZ), αλλά αυτή η διαφορά δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Στις μεταχειρίσεις ζεολίθου δεν σημειώθηκε μείωση της τιμής του pH με την προσθήκη IBK, σε αντίθεση με εκείνες χωρίς τη χορήγηση ζεόλιθου.

Η μείωση του pH που παρατηρήθηκε με την προσθήκη IBK μπορεί να οφείλεται στη διεργασία της νιτροποίησης. Πιο συγκεκριμένα το αμμωνιακό άζωτο που περιέχεται στη IBK οξειδώνεται ταχύτατα σε νιτρικό άζωτο, εκλύοντας στο έδαφος 2 mol H^+ , τα οποία αυξάνουν την οξύτητα του εδάφους ($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$). Αυτό είναι κάτι που βρήκαν και οι Bourgioug et al. (2018) σε μια εργασία στην οποία μελέτησαν τις επιδράσεις της IBK σε ορισμένες ιδιότητες του εδάφους, συμπεριλαμβανομένου και του pH. Παρόμοια αποτελέσματα βρήκαν και οι Dede et al. (2013) σε μία εργασία τους όπου το pH μειώθηκε σημαντικά με την προσθήκη της υψηλότερης δόσης IBK στο έδαφος που διεξήχθη το πείραμα [13,14].

Με την προσθήκη ζεόλιθου το pH παρέμεινε σταθερό και αυτό πιθανότατα να οφείλεται στην ικανότητα του ζεόλιθου να δεσμεύει αμμωνιακά ιόντα αποτρέποντας έτσι την μείωση του pH στο εδαφικό διάλυμα. Συγκεκριμένα οι ζεόλιθοι περιέχουν ανταλλάξιμα κατιόντα όπως K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} στη δομική τους κατασκευή και μπορούν έτσι να αντικαταστήσουν τα ιόντα NH_4^+ . Παρόμοια αποτελέσματα βρήκαν και οι Zhihong Ye et al. (2015) σε μία εργασία όπου παρατηρήθηκε η δέσμευση αμμωνιακών ιόντων με την προσθήκη ζεόλιθου σε διάφορα pH, φτάνοντας στο συμπέρασμα ότι ο φυσικός ζεόλιθος είναι αποτελεσματικός για την αφαίρεση αμμωνιακών ιόντων. Σε μία ακόμη εργασία των Genethliou et al. (2020) προτείνεται ακόμη και η χρήση ζεόλιθου που έχει δεσμεύσει αμμωνιακά ιόντα ως λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης $\text{NH}_4^+\text{-N}$ για το εδαφικό διάλυμα [15,16].

Επομένως συμπεραίνουμε πως με την προσθήκη IBK προστέθηκαν στο έδαφος αμμωνιακά ιόντα τα οποία δεσμεύτηκαν από το ζεόλιθο που προστέθηκε ταυτόχρονα, διατηρώντας έτσι το pH σταθερό.

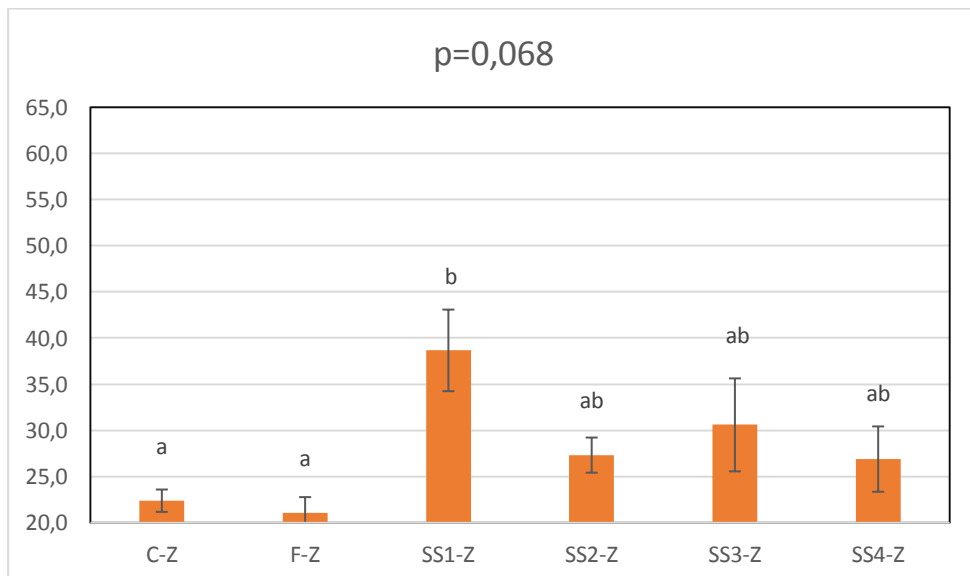
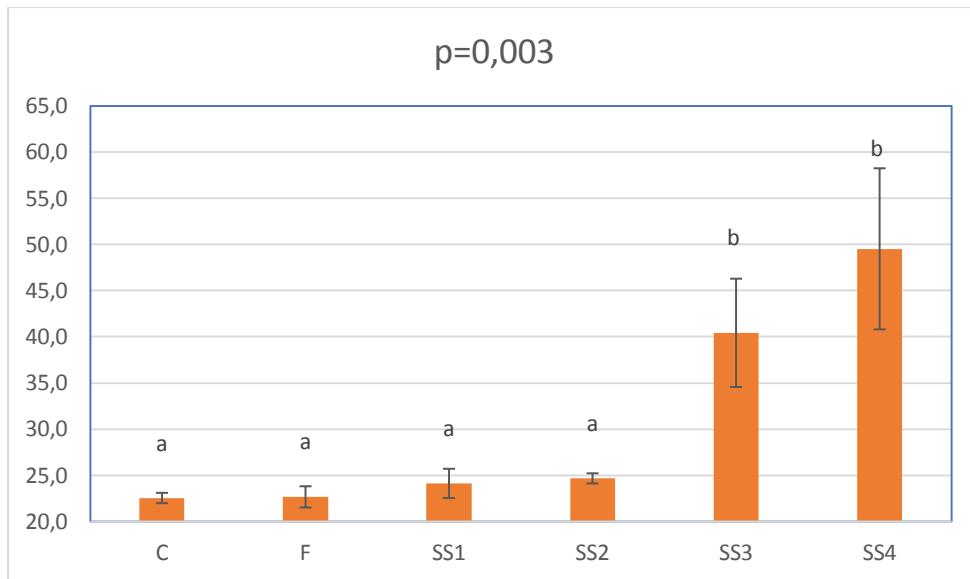


Σχήμα 2. Τιμές οργανικής ουσίας στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεόλιθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεόλιθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά την οργανική ουσία του εδάφους (Σχήμα 2), διαπιστώθηκε πως με την προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F) η τιμή της οργανικής ουσίας δεν παρουσίασε κάποια στατιστική διαφορά. Έπειτα, με τις κλιμακούμενες προσθήκες IBK στο έδαφος η τιμή της οργανικής ουσίας αυξήθηκε χωρίς σημαντική στατιστική διαφορά σε σχέση με τον μάρτυρα. Με την προσθήκη ζεόλιθου, η τιμή της οργανικής ουσίας αυξήθηκε, αλλά αυτή η διαφορά δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Παρόλα αυτά η τιμή

της οργανικής ουσίας αυξήθηκε με τις προσθήκες IBK με σημαντική στατιστική διαφορά την μεταχείριση υψηλής προσθήκης IBK (SS4), όπου η τιμή της οργανικής ουσίας διέφερε σημαντικά από τον μάρτυρα.

Η τιμή της οργανικής ουσίας δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντική διαφορά με τις προσθήκες IBK. Αντίθετα, με την προσθήκη IBK σε συνδυασμό με ζεόλιθο η τιμή της οργανικής ουσίας αυξήθηκε. Σε παρόμοια αποτελέσματα καταλήγουν και οι Cairo et al. (2017), οι οποίοι πραγματοποίησαν πείραμα με σκοπό να εκτιμήσουν την επίδραση του ζεόλιθου και του συνδυασμού του με ανόργανα και οργανικά λιπάσματα στην ποιότητα του εδάφους και την απόδοση της καλλιέργεια ζαχαροκάλαμου. Πιο συγκεκριμένα, παρατήρησαν ότι ο ζεόλιθος μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με οργανικά λιπάσματα οδήγησαν σε σημαντική αύξηση της οργανικής ουσίας. Επίσης, οι Minardi et al. (2020) σε εργασία τους με θέμα την προσθήκη οργανικού λιπάσματος και ζεόλιθου για την βελτίωση των χημικών ιδιοτήτων του εδάφους, συμπέραναν ότι ο ζεόλιθος βελτιώνει σημαντικές ιδιότητες του εδάφους και κατ' επέκταση αυξάνει την οργανική ουσία του εδάφους [17,18].



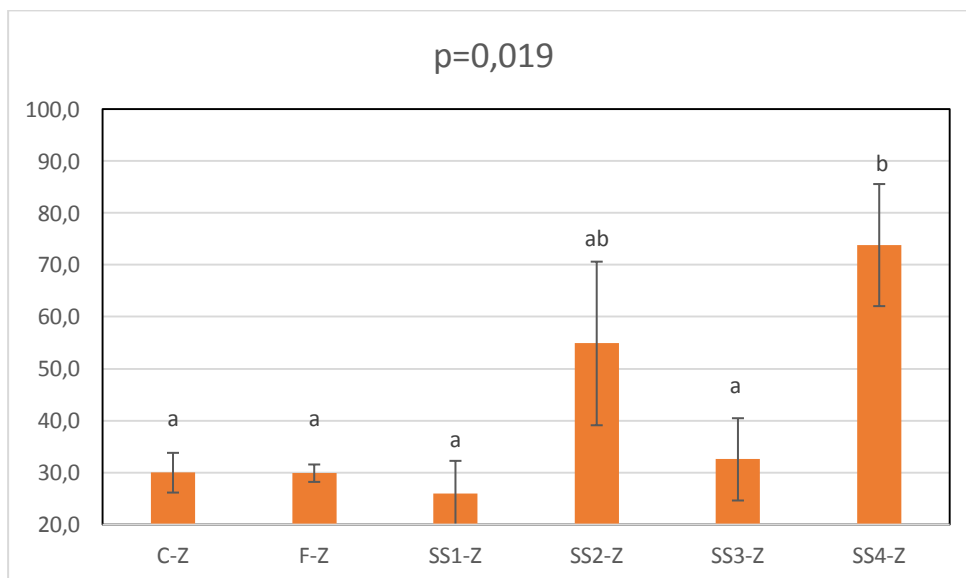
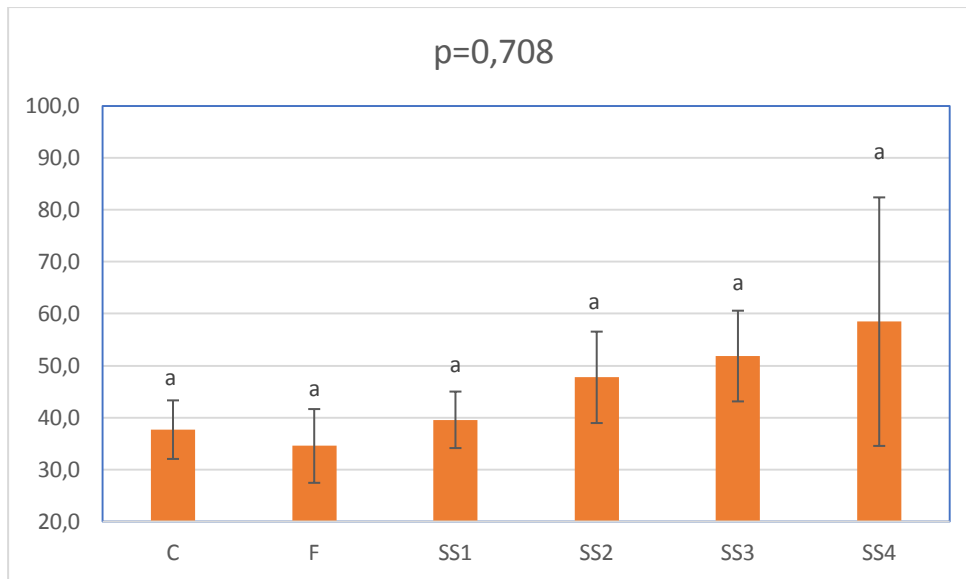
Σχήμα 3. Τιμές NO₃-N στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεόλιθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεόλιθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά το NO₃-N του εδάφους (Σχήμα 3), βρήκαμε πως με την προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F) η τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση C) δεν μεταβλήθηκε. Το ίδιο συνέβη και με τις δύο πρώτες δόσεις IBK (SS1, SS2). Ωστόσο με την προσθήκη της τρίτης (SS3) και της τέταρτης και υψηλότερης δόσης (SS4) IBK η τιμή του NO₃-N αυξήθηκε. Η αύξηση αυτή παρουσίασε σημαντική στατιστική διαφορά σε σχέση με το μάρτυρα. Με την προσθήκη ζεόλιθου τόσο ο μάρτυρας (μεταχείριση CZ)

όσο και η προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση FZ) με ζεόλιθο δεν παρουσίασαν σημαντικές μεταβολές στις τιμές τους. Με την προσθήκη των κλιμακούμενων δόσεων IBK παρουσιάστηκαν διαφορές στις τιμές χωρίς να είναι στατιστικά σημαντικές, με εξαίρεση την πρώτη και μικρότερη δόση IBK (SS1) να παρουσιάζει σημαντική στατιστική διαφορά σε σχέση με τον μάρτυρα

Η τιμή του $\text{NO}_3\text{-N}$ αυξήθηκε σημαντικά όταν προστέθηκαν οι δύο μεγαλύτερες δόσεις IBK. Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία τα οργανικά λιπάσματα περιέχουν σημαντικές ποσότητες θρεπτικών στοιχείων, συμπεριλαμβανομένου και αζώτου. Επομένως η παραπάνω αύξηση ήταν αναμενόμενη να παρατηρηθεί στις μεγαλύτερες δόσεις IBK. Σε παρόμοιο αποτέλεσμα οδηγήθηκε η έρευνα των Castro et al. (2009), όπου μελετήθηκε η περιεκτικότητα νιτρικών σε καλλιέργεια μαρουλιών έπειτα από εφαρμογή IBK και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σημειώνεται σημαντική αύξηση του αζώτου κατόπιν προσθήκης IBK. Ακόμη οι de las Heras et al. (2005) σε μελέτη τους για τις επιδράσεις της εφαρμογής IBK στο έδαφος και στα φυτά, συμπέραναν πως όσο μεγαλύτερη είναι η δόση IBK τόσο ευνοείται η απορρόφηση αζώτου από τους φυτικούς ιστούς [19,20].

Η προσθήκη ζεόλιθου σε συνδυασμό με την προσθήκη δόσεων IBK αρχικά αύξησε τις τιμές $\text{NO}_3\text{-N}$ και στη συνέχεια τις σταθεροποίησε. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην ικανότητα του ζεόλιθου ως αλκαλικό ορυκτό να ρυθμίζει την οξύτητα του εδάφους και άρα να ευνοεί την διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων όπως είναι και το άζωτο [21].

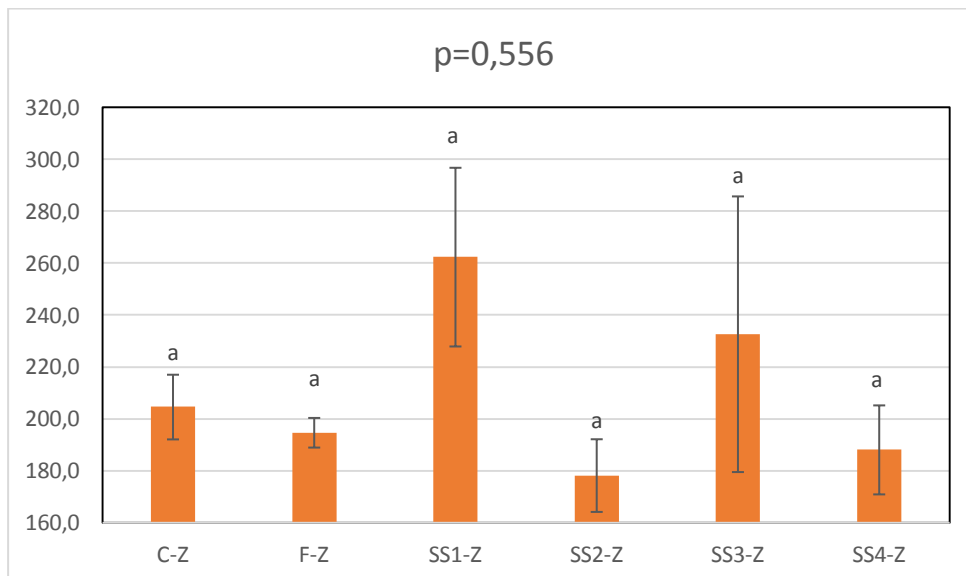
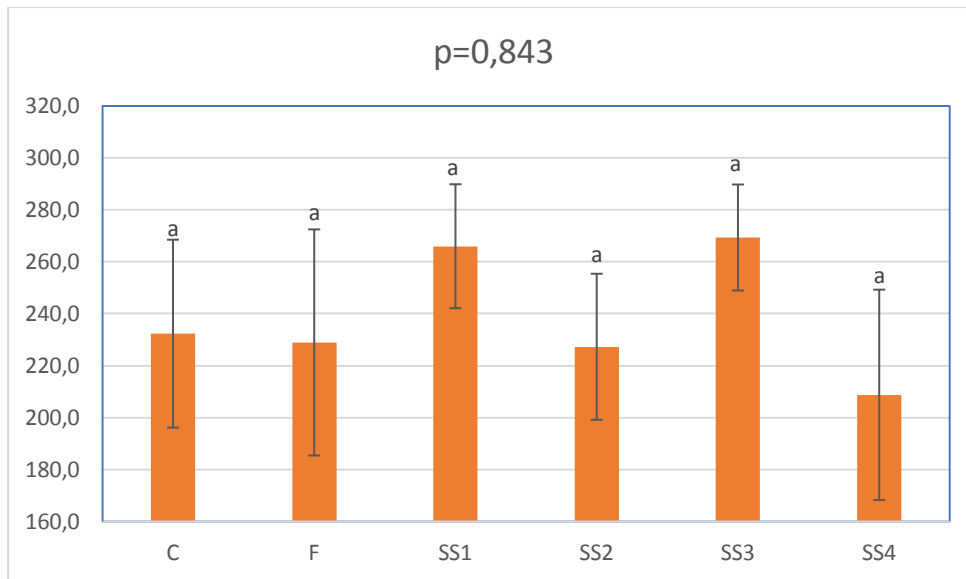


Σχήμα 4. Τιμές εκχυλίσμου P στο έδαφος κατά Olsen στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεόλιθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεόλιθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά τον εκχυλίσμο P κατά Olsen του εδάφους (Σχήμα 4), βρήκαμε ότι με την προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F) οι τιμές δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά ενώ με τις κλιμακούμενες προσθήκες IBK αυξήθηκαν, χωρίς όμως οι μεταβολές αυτές να είναι στατιστικά σημαντικές σε σχέση με τον μάρτυρα. Με την προσθήκη ζεόλιθου η τιμή του εκχυλίσμου P κατά Olsen (μεταχείριση C) δεν παρουσίασε σημαντικές

μεταβολές (μεταχείριση CZ). Με την προσθήκη των δόσεων IBK με ζεόλιθο δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές εκτός από την προσθήκη της δεύτερης δόσης IBK (μεταχείριση SS2), χωρίς αυτή να έχει σημαντική στατιστική μεταβολή. Με την προσθήκη της υψηλότερης δόσης IBK (μεταχείριση SS4) η στατιστική διαφορά ήταν σημαντική σε σχέση με τον μάρτυρα και σε αντίθεση με τις προσθήκες IBK χωρίς ζεόλιθο.

Οι τιμές του φωσφόρου δεν παρουσίασαν την αναμενόμενη αύξηση με την προσθήκη των δόσεων IBK και παρέμειναν σχετικά σταθερές. Εν αντιθέσει, η προσθήκη ζεόλιθου σε συνδυασμό με την προσθήκη δόσεων IBK συνέβαλλε στην αύξηση των τιμών του φωσφόρου. Αυτό πιθανόν οφείλεται στην ικανότητα του ζεόλιθου να απορροφά ιόντα φωσφόρου λόγω της πορώδους δομής του. Σε αυτό συμφωνούν και οι Choo Kim Lim Nuriati Lisa et al. (2020) οι οποίοι πραγματοποίησαν μελέτη σχετικά με την επίδραση της προσθήκης ζεόλιθου στη διαθεσιμότητα ορισμένων θρεπτικών σε καλλιέργεια παπάγιας. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η προσθήκη ζεόλιθου αυξάνει τη διαθεσιμότητα νιτρικών, φωσφόρου και καλίου στην καλλιέργεια, καθώς το ορυκτό αυτό έχει την ικανότητα να βελτιώνει το pH και έτσι να τα καθιστά διαθέσιμα για το φυτό [21].

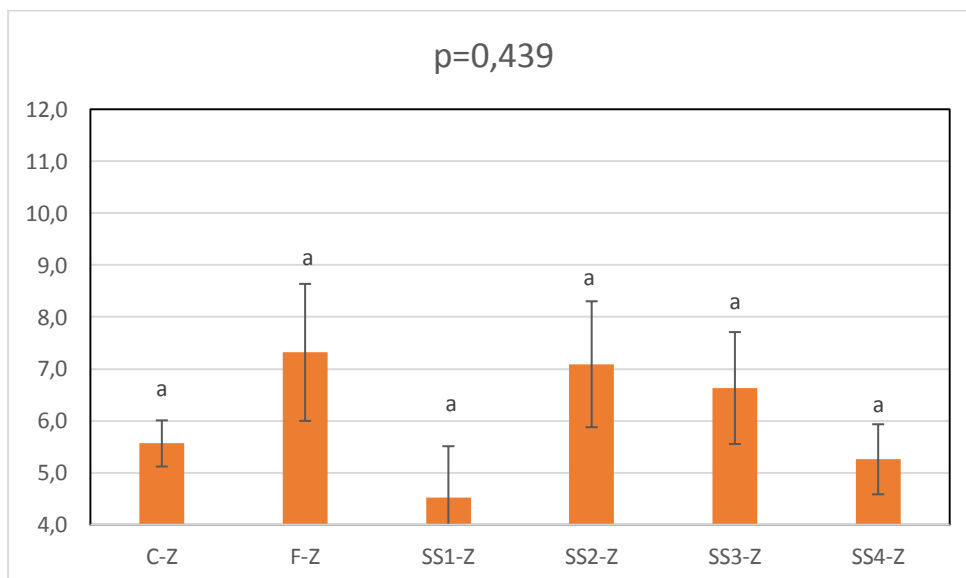
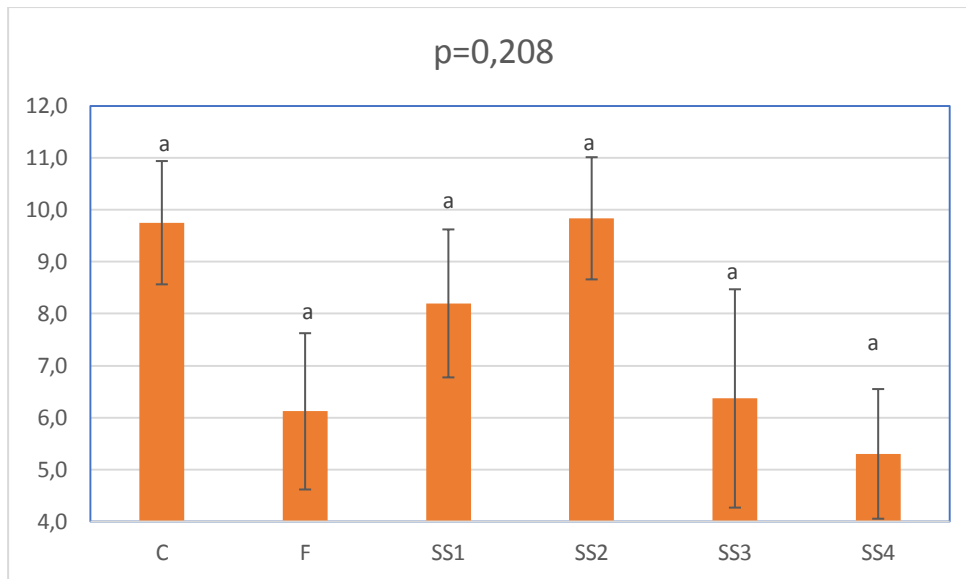


Σχήμα 5. Τιμές εκχυλίσμου Κ του εδάφους ως ανταλλάξιμο στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεόλιθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεόλιθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά το εκχυλίσμο Κ στο έδαφος ως ανταλλάξιμο (Σχήμα 5), βρήκαμε ότι τόσο η προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F) όσο και οι κλιμακούμενες προσθήκες IBK δεν παρουσίασαν σημαντικές στατιστικές διαφορές σε σχέση με τον μάρτυρα (μεταχείριση C). Η αρχική τιμή του εκχυλίσμου Κ του εδάφους ως ανταλλάξιμο (μεταχείριση C) δεν μεταβλήθηκε σημαντικά μετά από την προσθήκη ζεόλιθου

(μεταχείριση CZ). Παρόμοια αποτελέσματα βρέθηκαν και έπειτα από την προσθήκη ζεόλιθου με λίπασμα (μεταχείριση FZ) και ζεόλιθου με τις δόσεις IBK, όπου ούτε και εκεί υπήρξαν σημαντικές στατιστικές διαφορές σε σχέση με τον μάρτυρα (μεταχείριση CZ).

Οι τιμές του καλίου δεν παρουσίασαν κάποια σημαντική μεταβολή με την προσθήκη των δόσεων IBK όπως αναμενόταν, κι αυτό πιθανός να οφείλεται στην πολύ ισχυρή δεσμευτική ικανότητα μεταξύ του καλίου και των ορυκτών της αργίλου. Επίσης όπως διατυπώνουν και οι Zötb et al. (2014), τα κατιόντα H^+ παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διαθεσιμότητα του καλίου. Άρα η βελτίωση του pH έχει άμεση συσχέτιση με την διαθεσιμότητα καλίου. Με την προσθήκη IBK το έδαφος έγινε πιο όξινο, μειώνοντας το pH και πιθανός αυτό να είχε επίδραση στην διαθεσιμότητα του καλίου. Η προσθήκη ζεόλιθου δεν φάνηκε να έχει κάποια σημαντική επίδραση στις τιμές του καλίου παρόλο που το pH παρέμεινε σταθερό. Σύμφωνα με τον Gholizadeh (2008) οι ζεόλιθοι δεσμεύουν K^+ όπως και NH_4^+ τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορείς θρεπτικών στοιχείων. Επίσης ορισμένοι φυσικοί ζεόλιθοι περιέχουν σημαντικές ποσότητες ανταλλάξιμου καλίου που μπορούν να το αποδεσμεύουν με αργούς ρυθμούς στο έδαφος. Οι Rabai et al. (2013) αναφέρουν πως ο ζεόλιθος μπορεί επίσης να ευνοεί την απελευθέρωση διαλυτού P όταν τα κατιόντα Ca^{2+} ανταλλάσσονται με τα NH_4^+ ή τα K^+ [22, 23].

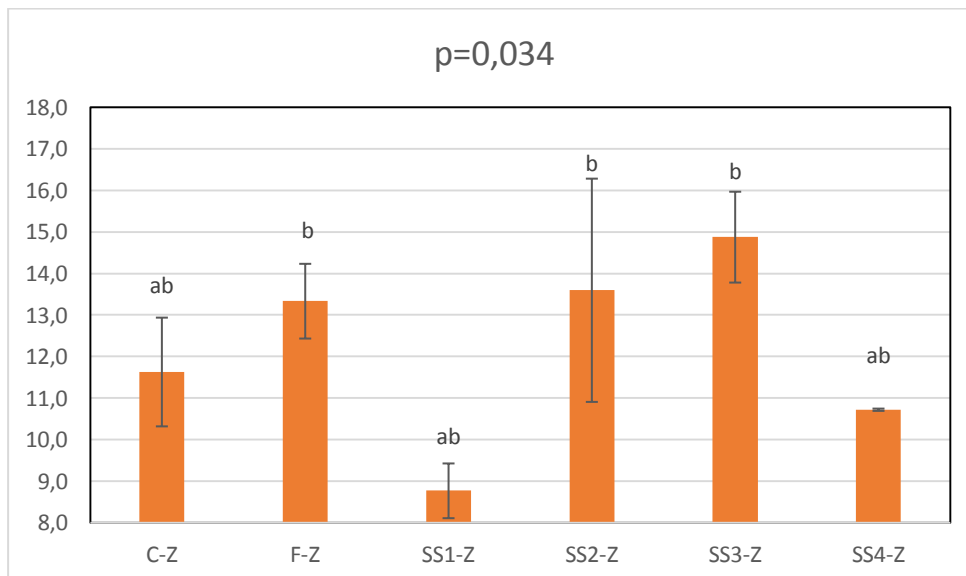
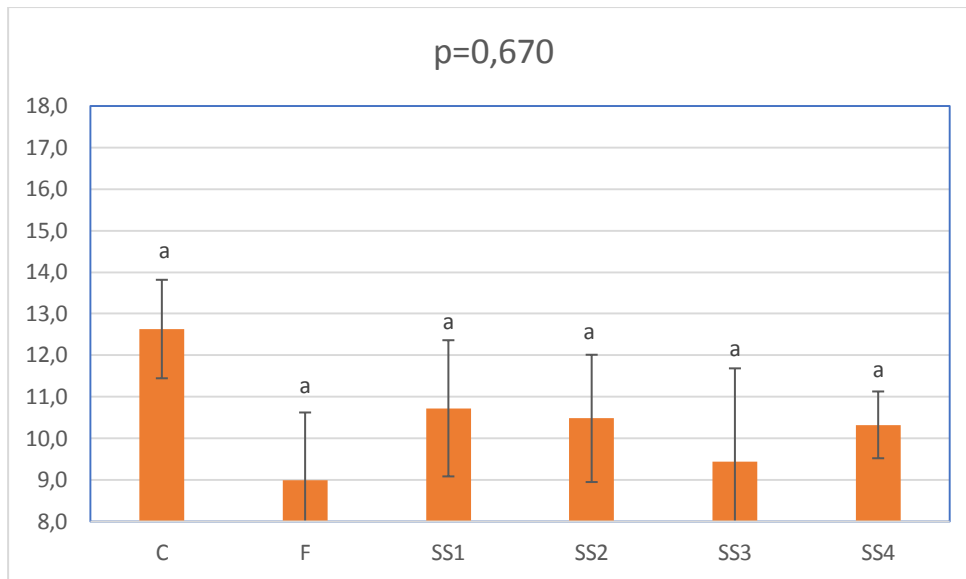


Σχήμα 6. Τιμές εκχυλίσμου Fe στο έδαφος στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεόλιθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεόλιθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά τον εκχυλίσμο Fe του εδάφους (Σχήμα 6), βρήκαμε πως η προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F) δεν παρουσίασε σημαντικές στατιστικές μεταβολές σε σχέση με τον μάρτυρα (μεταχείριση C). Οι κλιμακούμενες προσθήκες IBK δεν παρουσίασαν επίσης σημαντικές στατιστικές διαφορές σε σχέση με τον μάρτυρα. Η προσθήκη ζεόλιθου τόσο με την εφαρμογή του με λίπασμα (μεταχείριση FZ) όσο και

με τις κλιμακούμενες δόσεις IBK δεν έδωσαν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα σε σχέση με τον μάρτυρα (μεταχείριση CF)

Οι τιμές του εκχυλισμένου σιδήρου δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά με τις προσθήκες των δόσεων IBK. Αντίθετα σε έρευνα που διεξήγαγαν οι Toth et al. (2019) κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η προσθήκη IBK έχει σημαντική επίδραση στην διόρθωση της έλλειψης του Fe στο έδαφος. Με την προσθήκη ζεόλιθου οι τιμές του εκχυλισμένου σιδήρου δεν παρουσίασαν σημαντικές μεταβολές. Παρόλ' αυτά σε έρευνα των Koushafar et al. (2011) διαπιστώθηκε πως όσο μεγαλύτερες ήταν οι δόσεις φυσικού ζεόλιθου τόσο μειωνόταν η αλατότητα και οι συγκεντρώσεις των Fe, Zn, Cu, Cd με την προσθήκη οργανικών λιπασμάτων [24,25].

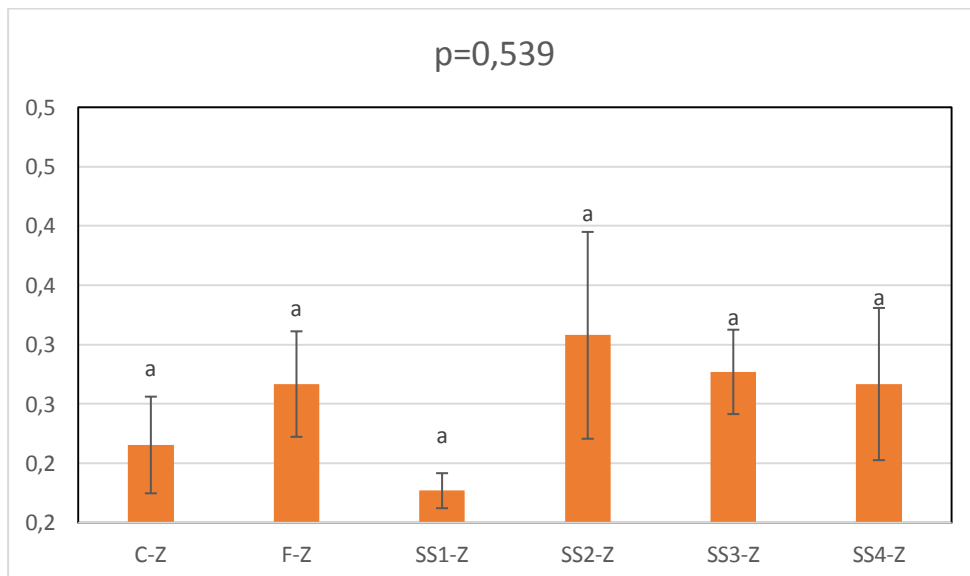
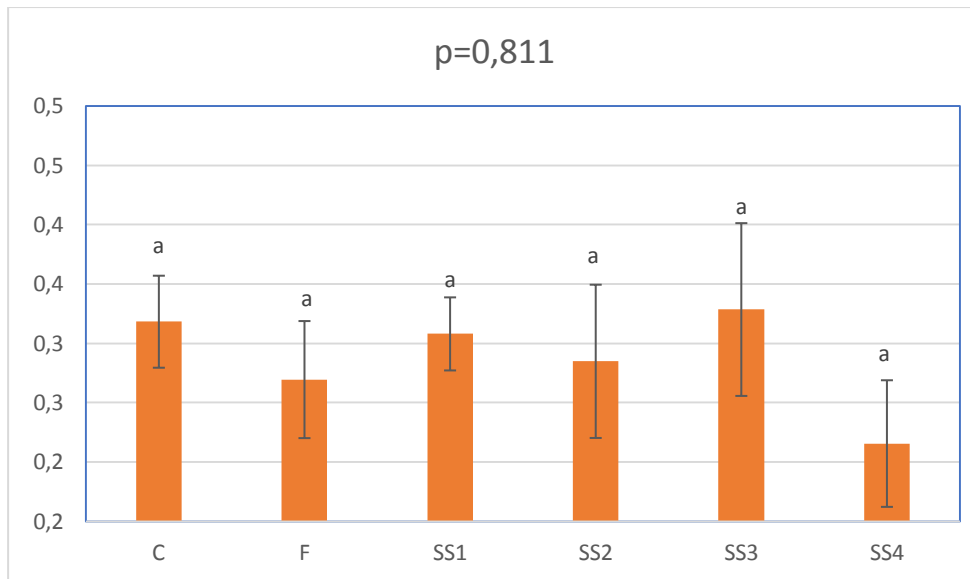


Σχήμα 7. Τιμές εκχυλίσμου Mn στο έδαφος στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεολίθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεολίθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά το εκχυλίσμο Mn του εδάφους (Σχήμα 7), βρήκαμε ότι η προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F) δεν μεταβλήθηκε σημαντικά σε σχέση με το μάρτυρα (μεταχείριση C). Έπειτα από την προσθήκη των κλιμακούμενων δόσεων IBK δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές στατιστικές διαφορές σε σχέση με τον μάρτυρα. Με την προσθήκη ζεολίθου η τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση CZ) παρουσίασε αύξηση, χωρίς να έχει σημαντική στατιστική σημασία. Με την προσθήκη όμως του λιπάσματος σε

συνδυασμό με ζεόλιθο η τιμή εμφάνισε σημαντική στατιστική διαφορά (μεταχείριση FZ). Επίσης με τις κλιμακούμενες δόσεις IBK με ζεόλιθο οι τιμές παρουσίασαν μεταβολές, με τη δεύτερη (SS2) και τρίτη δόση (SS3) IBK να είναι στατιστικά σημαντικές σε σχέση με το μάρτυρα (μεταχείριση CZ).

Οι τιμές του εκχυλισμένου μαγγανίου δεν παρουσίασαν σημαντικές μεταβολές με τις προσθήκες των δόσεων IBK. Η προσθήκη όμως ζεόλιθου συνέβαλε σημαντικά στην αύξηση των τιμών του Mn. Παρόμοια αποτελέσματα βρήκαν και οι Zorpas et al. (2000) σε πείραμά τους όπου μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της λυματολάσπης σε συνδυασμό με ζεόλιθο, καθώς και την απορρόφηση μετάλλων. Συγκεκριμένα παρατήρησαν ότι οι συγκεντρώσεις Cr, Ni, Mn, Mb και Zn φάνηκαν να αυξάνονται, ενώ οι συγκεντρώσεις των Cu και Fe να μειώνονται [26].

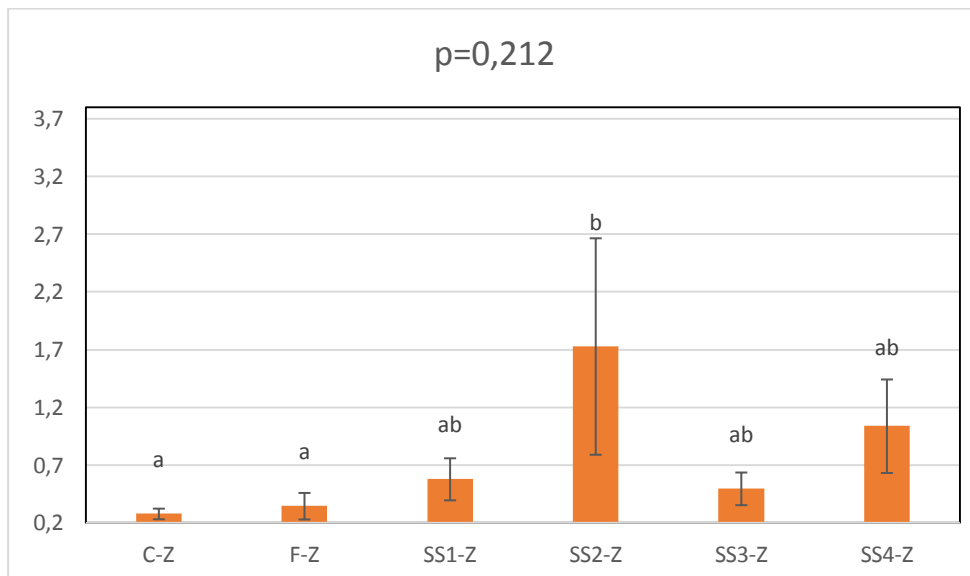
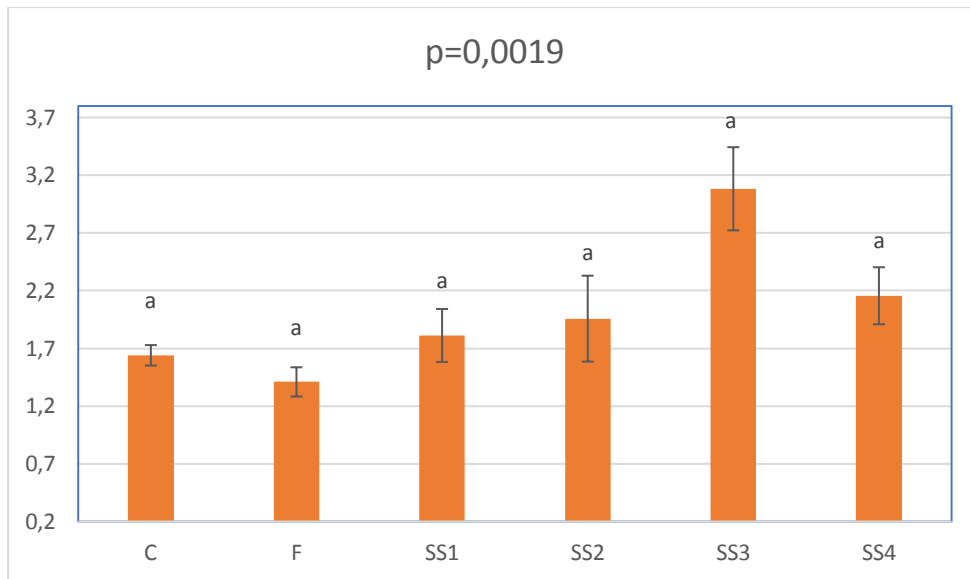


Σχήμα 8. Τιμές εκχυλίσμου Cu στο έδαφος στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεόλιθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεόλιθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά τις τιμές του εκχυλίσμου Cu στο έδαφος (Σχήμα 8), βρήκαμε πως οι τιμές του μάρτυρα (μεταχείριση C) δεν παρουσίασαν μεταβολές έπειτα από την προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F). Χωρίς στατιστικά σημαντικές διαφορές εμφανίστηκαν και οι τιμές των κλιμακούμενων δόσεων IBK σε σχέση με το μάρτυρα. Η προσθήκη ζεόλιθου δεν μετέβαλε σημαντικά την τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση CZ), καθώς επίσης και η προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση FZ) και οι δόσεις IBK

με ζεόλιθο δεν παρουσίασαν κάποια σημαντική στατιστική διαφορά σε σχέση με τον μάρτυρα.

Οι τιμές του εκχυλίσμου Cu στο έδαφος δεν παρουσίασαν κάποια σημαντική μεταβολή. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι η διαθεσιμότητα του Cu εξαρτάται περισσότερο από τις τιμές του pH, παρά από τις ποσότητες IBK που προστίθενται. Έτσι εφόσον το pH που ήταν ήδη χαμηλό μειώθηκε περαιτέρω με την προσθήκη IBK δεν βελτιώθηκε η διαθεσιμότητα του Cu. Ομοίως η προσθήκη ζεόλιθου σε συνδυασμό με τις δόσεις IBK δεν επηρέασαν σημαντικά τις τιμές του Cu, καθώς το pH παρέμεινε σταθερό όμως σε χαμηλές τιμές.

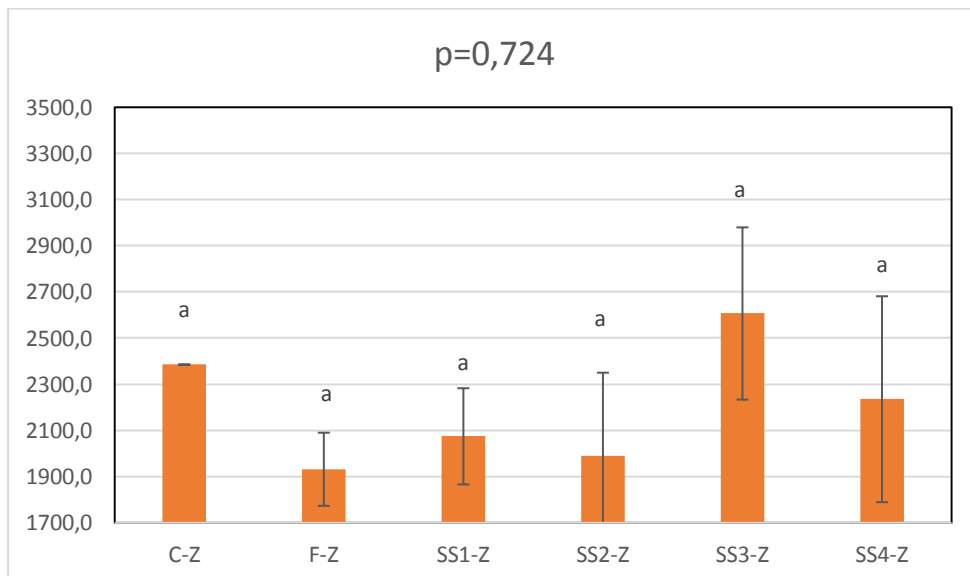
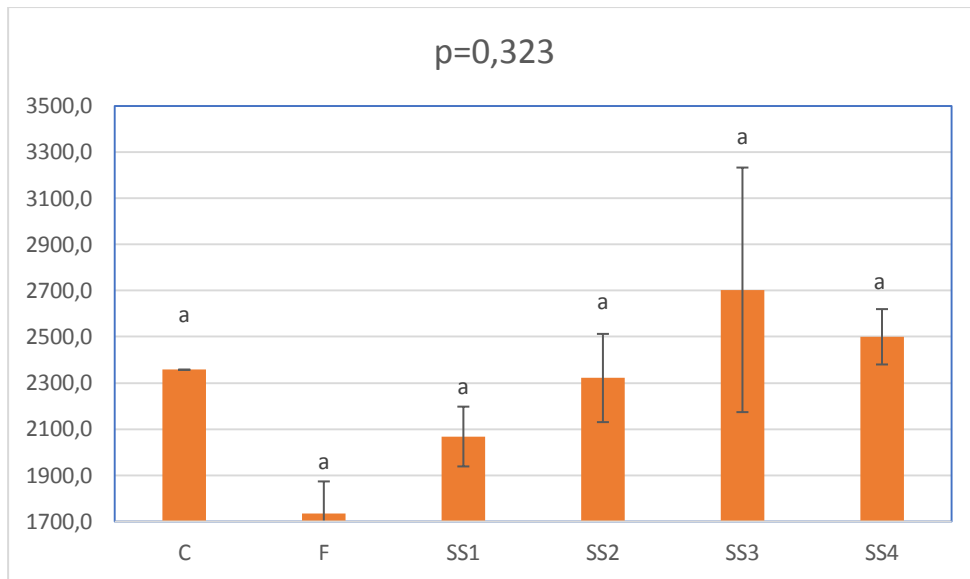


Σχήμα 9. Τιμές εκχυλίσμου Zn στο έδαφος στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεολίθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεολίθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS2= δεύτερη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS3= τρίτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹), SS4= τέταρτη δόση υλός βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ⁻¹). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά την τιμή του εκχυλίσμου Zn στο έδαφος (Σχήμα 9), βρήκαμε πως η τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση C) δεν μεταβλήθηκε σημαντικά ύστερα από την προσθήκη του λιπάσματος (μεταχείριση F), καθώς και έπειτα από τις κλιμακούμενες δόσεις IBK δεν παρουσιάστηκε κάποια σημαντική στατιστική διαφορά σε σχέση με την τιμή του μάρτυρα. Με την χορήγηση ζεολίθου η τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση CZ) δεν μεταβλήθηκε σημαντικά, ούτε έπειτα από την προσθήκη του λιπάσματος με ζεολίθο

(μεταχείριση FZ). Ωστόσο βρέθηκαν διαφορές στις τιμές με τις προσθήκες των δόσεων IBK χωρίς στατιστική σημασία, εκτός από τη δεύτερη δόση IBK (SS2) όπου εκεί οι διαφορές ήταν στατιστικά σημαντικές σε σχέση με τον μάρτυρα.

Όμοια με το Mn, έτσι και ο εκχυλίσμος Zn με τις προσθήκες των δόσεων IBK δεν παρουσίασε κάποια σημαντική μεταβολή, ενώ με την προσθήκη ζεόλιθου συνδυαστικά με IBK παρουσίασε σημαντικές μεταβολές. Όπως προαναφέρθηκε οι Zorpas et al. (2000) συμπέραναν μέσω της έρευνάς τους ότι ο Zn αυξάνεται με την προσθήκη ζεόλιθου σε συνδυασμό με λυματολάσπη. Επίσης, οι Iskander et al. (2011) μελετώντας την απορρόφηση Mn και Zn παρουσία ζεόλιθου, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο ζεόλιθος έχει τη δυνατότητα να δεσμεύει βαρέα μέταλλα στην επιφάνειά του, όπως το Mn και ο Zn, ρυθμίζοντας με αυτό τον τρόπο τη διαθεσιμότητά τους στο έδαφος, ελευθερώνοντάς τα βραδέως [26,27].

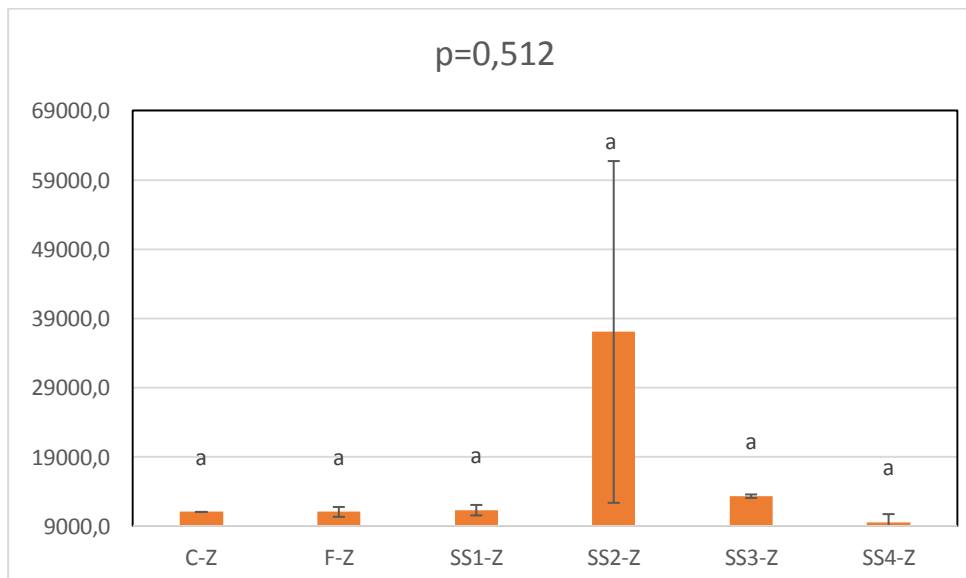
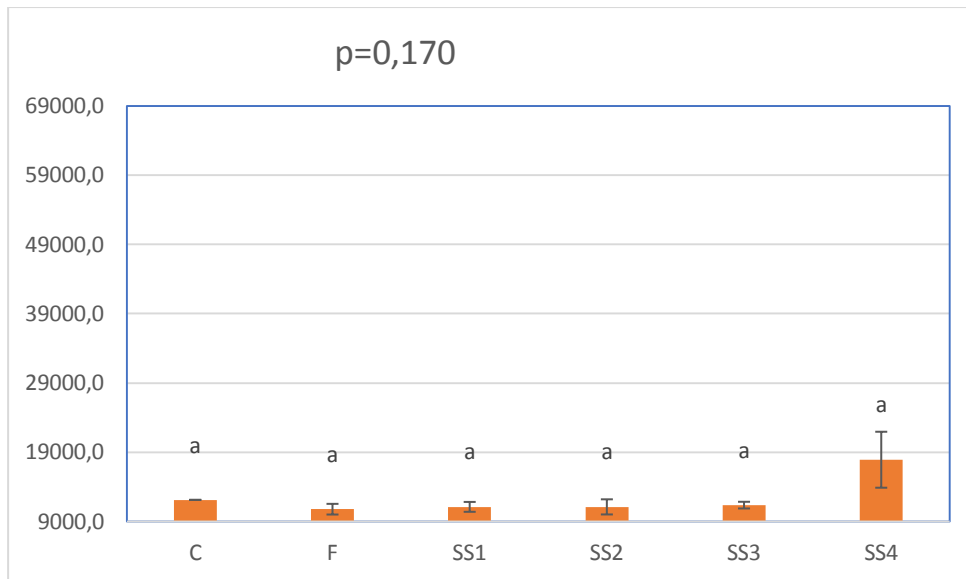


Σχήμα 10. Τιμές P σπόρων φυτού στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεόλιθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεόλιθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ^{-1}), SS2= δεύτερη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ^{-1}), SS3= τρίτη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ^{-1}), SS4= τέταρτη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ^{-1}). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά τις τιμές του P στους σπόρους του φυτού, βρέθηκε πως η τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση C) δεν παρουσίασε σημαντικές στατιστικές διαφορές έπειτα από την προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F). Επίσης δεν βρέθηκαν σημαντικές στατιστικές διαφορές με την χορήγηση των δόσεων IBK σε σχέση με την τιμή του μάρτυρα. Παρόμοια αποτελέσματα υπήρξαν και με την προσθήκη του ζεόλιθου όπου η τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση CZ) δεν παρουσίασε σημαντική στατιστική διαφορά

με την προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση FZ), ούτε έπειτα από τη χορήγηση των κλιμακούμενων δόσεων IBK.

Όπως προαναφέρθηκε στο Σχήμα 4 ο P στο έδαφος δεν παρουσίασε κάποια σημαντική μεταβολή στις τιμές του, με εξαίρεση την υψηλότερη δόση IBK σε συνδυασμό με ζεόλιθο, όπου αυξήθηκε σημαντικά. Ομοίως οι τιμές του P στους σπόρους του φυτού δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά με καμία προσθήκη IBK παρουσία ή όχι ζεόλιθου. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκέντρωση του P στο έδαφος ήταν επαρκής για την φυσιολογική ανάπτυξη του φυτού και την παραγωγή των σπόρων κι έτσι δεν προσλήφθηκε επιπλέον P, όταν υπήρξε αύξηση της συγκέντρωσης P στο έδαφος.



Σχήμα 11. Τιμές K σπόρων φυτού στις μεταχειρίσεις του πειράματος χωρίς προσθήκη ζεόλιθου (πάνω γράφημα) και με προσθήκη ζεόλιθου (κάτω γράφημα). Οι μεταχειρίσεις φαίνονται στον άξονα x, και είναι οι εξής: C= μάρτυρας, F= ανόργανο λίπασμα, SS1=πρώτη (χαμηλότερη) δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 6 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ^{-1}), SS2= δεύτερη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 12 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ^{-1}), SS3= τρίτη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 18 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ^{-1}), SS4= τέταρτη δόση ιλύος βιολογικού καθαρισμού με χορήγηση 24 λιπαντικών μονάδων N (kg N στρ^{-1}). Ο δείκτης Z στις μεταχειρίσεις του δεύτερου γραφήματος δείχνει την προσθήκη ζεολίθου.

Όσον αφορά την τιμή του K στους σπόρους του φυτού, βρήκαμε ότι η προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση F) δεν μετέβαλε σημαντικά την τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση C). Οι κλιμακούμενες δόσεις IBK δεν εμφάνισαν κάποια σημαντική στατιστική διαφορά στις τιμές τους σε σχέση με την τιμή του μάρτυρα. Με την προσθήκη ζεόλιθου η τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση CZ) δεν παρουσίασε σημαντική στατιστική διαφορά σε σχέση με το μάρτυρα χωρίς ζεόλιθο (μεταχείριση C). Με την προσθήκη λιπάσματος (μεταχείριση FZ) και των κλιμακούμενων δόσεων IBK με ζεόλιθο δεν παρουσιάστηκε σημαντική στατιστική διαφορά στις τιμές τους σε σχέση με την τιμή του μάρτυρα (μεταχείριση CZ).

Παρόμοια με το P ήταν και τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν αναφορικά με το K. Πιο συγκεκριμένα, όπως σημειώθηκε και στο Σχήμα 5 η συγκέντρωση του K στο έδαφος δεν μεταβλήθηκε σημαντικά με τις προσθήκες των δόσεων IBK με ή χωρίς ζεόλιθο. Έτσι και στη συγκέντρωση K στους σπόρους δεν υπήρξε σημαντική μεταβολή. Όπως και στο φώσφορο, αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι το διαθέσιμο K ήταν επαρκές για την καλλιέργεια και την παραγωγή σπόρων, γι αυτό και δεν υπήρξε περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης K στους σπόρους.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η προσθήκη των δόσεων IBK δεν αύξησε σημαντικά τον εκχυλίσμο P του εδάφους, ωστόσο σε συνδυασμό με ζεόλιθο τα επίπεδα P αυξήθηκαν σημαντικά.
- Οι τιμές του ανταλλάξιμου K στο έδαφος δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά με την προσθήκη των δόσεων IBK παρουσία ή όχι ζεόλιθου.
- Οι συγκεντρώσεις P και K στους σπόρους δεν μεταβλήθηκαν σημαντικά με καμία προσθήκη IBK με ή χωρίς ζεόλιθο, γεγονός που δείχνει πως οι συγκεντρώσεις εδαφικού P και K δεν συσχετίζονται σημαντικά με τις αντίστοιχες στους σπόρο.
- Η προσθήκη IBK μείωσε σημαντικά το εδαφικό pH, ενώ συνδυαστικά με ζεόλιθο το pH παρέμεινε σταθερό.
- Η οργανική ουσία δεν παρουσίασε την αναμενόμενη αύξηση με προσθήκη IBK, ενώ με τη χορήγηση και ζεόλιθου η τιμή της αυξήθηκε σημαντικά.
- Οι τιμές των NO₃-N αυξήθηκαν σημαντικά με την προσθήκη IBK με ή χωρίς ζεόλιθο, γεγονός που δείχνει τη μεγάλη σημασία της IBK στη χορήγηση σημαντικών ποσοτήτων θρεπτικών στο έδαφος.
- Η χορήγηση ζεόλιθου σε συνδυασμό με IBK αύξησε σημαντικά τις συγκεντρώσεις του εκχυλίσμου Mn και του εκχυλίσμου Zn στο έδαφος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.** Mullins, G. (2018). Phosphorus, Agriculture & the Environment. Virginia Cooperative Extension Publications, 424-029.
- 2.** Δρ. Τσέζος Μάριος, Δρ. Ρεμουντάκη Εμμανουέλα. (2010). Περιβάλλον Ι Εισαγωγή στην Επιστήμη & Τεχνολογία Προστασίας του Περιβάλλοντος. Σημειώσεις, Ε.Μ.Π.. Αθήνα.
- 3.** Θεριός, Ι. (1996). Ανόργανη Θρέψη και Λιπάσματα. Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη, σ. 64-67
- 4.** Jianbo Shen, Lixing Yuan, Junling Zhang, Haigang Li, Zhaohai Bai, Xinping Chen, Weifeng Zhang, and Fusuo Zhang. (2011). Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology*, 156 (3), 997-1005.
- 5.** John L. Havlin, James D. Beaton, Samuel L. Tisdale, Werner L. Nelson. (2005). *Soil Fertility and Fertilizers*, 7th Edition. Pearson Education, p. 199-201.
- 6.** Christian Zörb, Mehmet Senbayram, Edgar Peiter. (2014). Potassium in Agriculture -- Status and Perspectives. *Plant Physiology*, 171, 656–669.
- 7.** Hasanuzzaman, M. Bhuyan, M.H.M.B. Nahar, K. Hossain, M.S. Mahmud, J.A. Hossen, M.S. Masud, A.A.C. Moumita Fujita, M. (2018). Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. *Agronomy*, 8 (3), 31.
- 8.** Καλαβρουζιώτης, Ι. (2014). Αειφορική Διαχείριση Εδαφικών Πόρων και Αποβλήτων. Εκδόσεις Τζιόλας. Θεσσαλονίκη, σ. 210-211
- 9.** Frederich A. Mumpton. (1999). La roca magica: Uses of Natural Zeolites in Agriculture and Industry. *PNAS*, 96 (7), 3463–3470.

10. John H. Sultenfuss, William J. Doyle. (1999). Better Crops with Plant Food, Phosphorus, for Agriculture. IPNI, 83 (1).
11. Mohau Moshoeshoe, Misael Silas Nadiye-Tabbiruka, Veronica Obuseng. (2017). A Review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites. American Journal of Materials Science, 7 (5), 196-221.
12. <https://www.yara.gr/threpsi-lipansi/lipansi-krithari/stadia-anaptyksis-krithari/>
13. Bourioug Mohamed, Krouna Mounia, Abouabdillah Aziz, Harraq Ahmed, Bouabid Rachid, Aleya Lotfi. (2018). Sewage sludge used as organic manure in Moroccan sunflower culture: Effects on certain soil properties, growth and yield components. Science of the Total Environment, 627, 681-688.
14. Dede Gulgun, Özdemir Saim, Dede Hulusi Omer, Altundag Huseyin, Dundar S. Mustafa, Kiziloglu Tulay Fatma, Kiziloglu Tulay Fatma. (2015). Effects of sewage sludge on nutrient availability for kiwi fruits under high pH soil conditions. Fresenius Environmental Bulletin, 24 (5A).
15. Genethliou C., Triantaphyllidou I.E., Giannakis D., Papayianni M., Sygellou L., Tekerlekopoulou A.G., Koutsoukos P., Vayenas D.V. (2020). Simultaneous removal of ammonium nitrogen dissolved chemical oxygen demand and color from sanitary landfill leachate using natural zeolite. Journal of Hazardous Materials, 406,124679.
16. Zhihong Ye, Jiawen Wang, Lingyu Sun, Daobin Zhang & Hui Zhang. (2015). Removal of ammonium from municipal landfill leachate using natural zeolites. Environmental Technology, 36(23), 2919-2923.
17. Cairo Cairo Pedro, Joaquin Machado de Armas, Artiles Torres Pedro, Martin Diaz Bladimir, Carrazana Jimenez Rafael, Lopez Rodriguez Oralia. (2017). Effects of zeolite and organic fertilizers on soil quality and yield of sugarcane. Australian Journal of Crop Science, 11(06), 733-738.

18. Minardi Slamet, Haniati Luthfa Isna, Nastiti Lantip Husna Alif. (2020). Adding manure and zeolite to improve soil chemical properties and increase soybean yield. *SAINS TANAH-Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 17(1), 1-6.
19. Castro E., Manas M.P., De Las Heras J. (2009). Nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.) after fertilization with sewage sludge and irrigation with treated wastewater. *Food Additives and Contaminants*, 26(2), 172-179.
20. De Las Heras J., Labrador Juana, Manas Pilar. (2005). Effects of Several Applications of Digested Sewage Sludge on Soil and Plants. *Journal of Environmental Science and Health*, 40(2), 437-451.
21. Choo Kim Lim Nuriati Liza, Osumanu Haruna Ahmed, Shaidatul Azdawiyah Abdul Talib, Ghani Abdul Zabawi Mohamad, Sekot Shamsiah. (2020). Clinoptilolite Zeolite on Tropical Peat Soils Nutrient, Growth, Fruit Quality, and Yield of *Carica papaya* L. cv. Sekaki. *Agronomy*, 10(9), 1320.
22. Gholizadeh, A. (2008). Zeolite slow release fertilizer: A brief review. *Iran International Zeolite Conference*, 08, 014.
23. Rabai A. Krystle, Osumanu H. Ahmed, Susilawati Kasim. (2013). Use of formulated nitrogen, phosphorus, and potassium compound fertilizer using clinoptilolite zeolite in maize (*Zea mays* L.) cultivation. *PLANT SCIENCE*, 25(9), 713-722.
24. Tóth B., Moloi M. J. (2019). The use of industrial waste materials for alleviation of iron deficiency in sunflower and maize. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8, 145-151.
25. Koushafar M., Khoshgoftarmanesh A. H., Aghili F. (2011). Natural zeolite reduces salinity and heavy metal availability of compost produced from sewage sludge-rose residue mixture. *Journal of Residuals Science and Technology*, 8, 9-14.
26. Zorpas A. Antonis, Kapetanios Evangelos, Zorpas A. Giovanis, Karlis Panagiotis, Vlyssides Apostolos, Haralambous Ioanna, Loizidou Maria. (2000).

Compost produced from organic fraction of municipal solid waste, primary stabilized sewage sludge and natural zeolite. *Journal of Hazardous Materials*, B77, 149-159.

27. Iskander A. L., Khalid E. M., Sheta A. S. (2011). Zinc and manganese sorption behavior by natural zeolite and bentonite. *Annals of Agriculture Science*, 56, 43-48.