



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Σχολή Γεωπονικών Επιστημών

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Εδαφολογίας

Πτυχιακή Διατριβή

«Καλλιέργεια σπανακιού (*Spinacia oleracea*) σε έδαφος όπου προστέθηκαν
υπολείμματα της εκτροφής του εντόμου *Tenebrio molitor* ως εδαφοβελτιωτικό υλικό»

Ελευθερία Δεληγιαννίδου

Επιβλέπων καθηγητής: Βασίλειος Αντωνιάδης

Βόλος, 2023

«Καλλιέργεια σπανακιού (*Spinacia oleracea*) σε έδαφος όπου προστέθηκαν υπολείμματα της εκτροφής του εντόμου *Tenebrio molitor* ως εδαφοβελτιωτικό υλικό»

“Cultivation of spinach (*Spinacia oleracea*) in a soil where *Tenebrio molitor* frass has been amended as soil improver”

Ελευθερία Δεληγιαννίδου

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Αντωνιάδης Βασίλειος (Επιβλέπων Καθηγητής): Καθηγητής Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Λεβίζου Ευθυμία (Μέλος): Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Φυσιολογίας Φυτών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Αθανασίου Χρήστος (Μέλος): Καθηγητής Εντομολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Υπεύθυνη δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ.

Ελευθερία Δεληγιαννίδου

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ βαθύτατα τον επιβλέποντα Καθηγητή της πτυχιακής μου διατριβής κύριο Αντωνιάδη Βασίλειο για τη διαρκή καθοδήγηση και στήριξη κατά τη διάρκεια του πειράματος και της συγγραφής του κειμένου. Τον ευχαριστώ θερμά για τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε για την επίλυση αποριών, την επεξήγηση εννοιών και για τις υποδείξεις και διορθώσεις καθ' όλη τη συγγραφική διαδικασία.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του εργαστηρίου Εδαφολογίας και ιδιαίτερα την Υποψήφια Διδάκτορα Γραμμένου Ασπασία και τη Δρ. Μόλλα Αικατερίνη για την προθυμία τους και την πολύτιμη βοήθειά τους στην πραγματοποίηση των εργαστηριακών αναλύσεων για τις ανάγκες του πειράματος.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Φυσιολογίας Φυτών του Τμήματος κυρία Λεβίζου Ευθυμία για την παροχή των φυτών σπανακιού, την καταλυτική συνδρομή της κατά την προετοιμασία του πειράματος και τη συμμετοχή της στην τριμελή εξεταστική επιτροπή. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Καθηγητή Εντομολογίας του Τμήματος κύριο Αθανασίου Χρήστο για την παροχή του insect frass καθώς και για τη συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αδιάκοπη στήριξη και αγάπη τους κατά την πενταετή φοίτησή μου στο Τμήμα και τον Θεό για τη δύναμη και το κουράγιο που μου χαρίζει καθημερινά. Με όλη μου την καρδιά ευχαριστώ ιδιαιτέρως τους γονείς μου, Έλσα και Γρηγόρη, και την αδελφή μου, Ευγενία, γιατί με στηρίζουν πάντα χωρίς δεύτερη σκέψη και δεν παύουν ούτε στιγμή να πιστεύουν σε εμένα.

Στους γονείς και στην αδελφή μου
ως ένα ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης

Περιεχόμενα

Περίληψη	viii
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1. Θρεπτικά στοιχεία.....	1
1.1.1. Άζωτο.....	1
1.1.2. Φωσφόρος.....	7
1.1.3. Κάλιο.....	11
1.2. Οργανικά Υπολείμματα	13
1.3. Χρήση του insect frass.....	18
1.4. Καλλιέργεια σπανακιού	23
1.5. Σκοπός της εργασίας.....	29
Κεφάλαιο 2. Υλικά και Μέθοδοι	30
2.1. Πειραματικός σχεδιασμός.....	30
2.2. Μέθοδοι ανάλυσης.....	32
2.2.1. Φυτό.....	32
2.2.1.1. Συγκομιδή	32
2.2.1.2. Μέτρηση ολικού αζώτου (N).....	32
2.2.1.3. Μέτρηση φωσφόρου (P).....	35
2.2.1.4. Μέτρηση καλίου (K).....	37
2.2.2. Έδαφος.....	37
2.2.2.1. Δειγματοληψία – Προκατεργασία εδάφους.....	37
2.2.2.2. Μέτρηση pH	38
2.2.2.3. Μέτρηση αγωγιμότητας.....	38
2.2.2.4. Μέτρηση οργανικής ουσίας με υγρή οξείδωση	38
2.2.2.5. Μέτρηση νιτρικών	39
2.2.2.6. Μέτρηση καλίου (K).....	40

2.2.2.7. Μέτρηση φωσφόρου (P)	41
2.3. Στατιστική επεξεργασία	41
Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	43
3.1. Αναλύσεις στο έδαφος	43
3.1.1. pH εδάφους	43
3.1.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα εδάφους (EC)	46
3.1.3. Συγκέντρωση οργανικής ουσίας στο έδαφος	48
3.1.4. Συγκέντρωση νιτρικών στο έδαφος	50
3.1.5. Συγκέντρωση καλίου (K) στο έδαφος	52
3.1.6. Συγκέντρωση φωσφόρου (P) στο έδαφος	54
3.2. Αναλύσεις στο φυτό.....	56
3.2.1. Συγκέντρωση καλίου (K) στα φυτά	56
3.2.2. Συγκέντρωση φωσφόρου (P) στα φυτά	58
3.2.3. Συγκέντρωση ολικού αζώτου (N) στα φυτά	61
Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα.....	63
Βιβλιογραφία	63
Παράρτημα	68
Φωτογραφίες	69

Περίληψη

Με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού η βιομηχανία εκτροφής εντόμων εξελίσσεται συνεχώς. Εκτός από την παραγωγή τροφής οδηγεί και στην παραγωγή παραπροϊόντων όπως είναι τα απεκκρίματα και εκδύματα εντόμων τα οποία αποτελούν το insect frass. Το insect frass συνιστά ένα οργανικό λίπασμα και εδαφοβελτιωτικό το οποίο με την εφαρμογή του στις καλλιέργειες προσφέρει μεγάλες αποδόσεις και θρεπτικά στοιχεία με την ταυτόχρονη θρέψη του εδάφους. Επιπλέον υφίσταται ταχύτατη ανοργανοποίηση, παρέχοντας έτσι τα θρεπτικά στοιχεία σε διαθέσιμη μορφή στην καλλιέργεια. Χάρη σε αυτά τα χαρακτηριστικά έχει αποδειχθεί πως καθίσταται δυνατή η μερική ή ολική αντικατάσταση των συμβατικών λιπασμάτων με το insect frass. Ωστόσο, υπάρχει ακόμα ανάγκη για περαιτέρω έρευνα του insect frass σε καλλιέργειες μεγαλύτερης έκτασης και διάρκειας. Σκοπός αυτής της εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της δράσης του insect frass από το έντομο *Tenebrio molitor* σε καλλιέργεια σπανακιού (*Spinacia oleracea*). Επίσης μελετήθηκε και η δυνατότητά του να αντικαταστήσει ένα συμβατικό χημικό λίπασμα. Πραγματοποιήθηκαν 5 μεταχειρίσεις: Αρνητικός μάρτυρας-NC (χωρίς προσθήκη insect frass ή ανόργανου λιπάσματος), θετικός μάρτυρας-PC (μόνο προσθήκη ανόργανου λιπάσματος) και μεταχειρίσεις insect frass σε δόσεις 0,25%, 0,5% και 1% στο έδαφος. Το πείραμα διήρκησε 60 ημέρες και την τελευταία ημέρα πραγματοποιήθηκε η συγκομιδή του φυτικού τμήματος και η δειγματοληψία εδάφους. Ακολούθησαν οι αναλύσεις στο έδαφος για το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), τις συγκεντρώσεις σε οργανική ουσία, τα νιτρικά, τον P και το K του εδάφους. Στο φυτικό τμήμα, υπέργειο και υπόγειο, έγιναν οι αναλύσεις για την εύρεση της συγκέντρωσης ολικού N, P και K. Με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος, η προσθήκη insect frass προκάλεσε κατά κύριο λόγο την αύξηση του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της οργανικής ουσίας και των συγκεντρώσεων P και K του εδάφους. Αντιθέτως όσον αφορά το φυτό, αν και προκάλεσε την αύξηση του ολικού N, δεν οδήγησε στην αύξηση των συγκεντρώσεων P και K στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα του φυτού. Συμπερασματικά η χρήση του insect frass από *Tenebrio molitor* σε καλλιέργεια σπανακιού *Spinacia oleracea* ως οργανικό λίπασμα και εδαφοβελτιωτικό είναι αρκετά υποσχόμενη με πολύ θετική δράση στις αποδόσεις της καλλιέργειας και στη θρέψη του εδάφους.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1. Θρεπτικά στοιχεία

1.1.1. Άζωτο

Βιογεωχημικός κύκλος

Ο παγκόσμιος βιογεωχημικός κύκλος του αζώτου αφορά τις τεράστιες φυσικές ροές του αζώτου από την ατμόσφαιρα προς τα χερσαία και θαλάσσια οικοσυστήματα. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μέσω της βιολογικής δέσμευσης του N, κατά την οποία το μη ενεργό μοριακό άζωτο ανάγεται σε αμμωνιακές ενώσεις. Ο κύκλος αυτός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μικροβιακή δραστηριότητα που συμβαίνει στο έδαφος και διαθέτει ουσιαστικά 3 «πηγές»: την ατμόσφαιρα, τις ανόργανες και οργανικές ενώσεις του N (Fowler et al. 2013, Brown 2016).

Το N είναι το 4^ο πιο άφθονο στοιχείο στη βιομάζα του κυττάρου καθώς καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ατμόσφαιρας και η προσφορά του στη βιόσφαιρα και στη ζωή του κυττάρου είναι αδιαμφισβήτητη (Stein and Klotz 2016). Είναι απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο για τα φυτά και η έλλειψη ή η περίσσεια του επηρεάζει σε πολύ υψηλό βαθμό τα οικοσυστήματα παγκοσμίως (Butnariu 2018). Για κάθε μορφή ζωής και για την περάτωση των γεωργικών δραστηριοτήτων, με υψηλές αποδόσεις καλλιεργειών, είναι αναγκαία η συνεχής παροχή του ενεργού αζώτου, ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή τροφής για την κάλυψη των αναγκών του όλο και περισσότερο αυξανόμενου ανθρώπινου πληθυσμού (Fowler et al. 2013).

Ο κύκλος του N αποτελείται από 5 διαδικασίες οι οποίες οδηγούν στο μετασχηματισμό του N σε διαφορετικές μορφές. Αυτές είναι οι: αμμωνιοποίηση, νιτροποίηση, απονιτροποίηση, αναερόβιος οξείδωση αζώτου και η καταλυόμενη αλληλομετατροπή μεταξύ νιτρικών και νιτρικών. Το ενεργό N ολοκληρώνει τη ροή του στη βιόσφαιρα μέσω της ανοργανοποίησης και αφομοίωσης της οργανικής ουσίας από τα κύτταρα (Stein and Klotz 2016).

Αρχική παροχή N

Η παροχή N_r, δηλαδή ενεργού αζώτου, στο περιβάλλον γίνεται μέσω της παραγωγής NO_x, ή οξειδίων του αζώτου, από κεραυνούς και μέσω της ανθρώπινης δραστηριότητας (Fowler et al. 2013). Το ατμοσφαιρικό άζωτο δεσμεύεται μέσω της φυσικής απομάκρυνσής του από την ατμόσφαιρα χάρη στη φωτοχημική και ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (Ibanez et al. 2007, Πολυράκης 2013). Στην ατμόσφαιρα βασικό ρόλο στη φωτοχημική παραγωγή του όζοντος και άλλων βασικών οξειδωτικών κατέχουν τα NO_x (Fowler et al. 2013). Αφού τα NO_x οξειδωθούν και σχηματίσουν NO₃⁻, τελικά καταλήγουν στον σχηματισμό HNO₃ μέσω της αντίδρασής τους με το νερό της βροχής. Το HNO₃ αφού αντιδράσει με τα ορυκτά του εδάφους σχηματίζει τελικά τα νιτρικά άλατα. Το άζωτο που περιέχεται στα νιτρικά απορροφάται από τα φυτά και αποτελεί δομικό στοιχείο για τη σύνθεση φυτικών πρωτεϊνών (Ibanez et al. 2007, Πολυράκης 2013). Η δέσμευση του αζώτου γίνεται με την πρόσληψή του από τα φυτά σε μορφή νιτρικού ανιόντος NO₃⁻ ή σε μορφή αμμωνιακού κατιόντος NH₄⁺.

Σπανιότερα πραγματοποιείται η πρόσληψη N απ' ευθείας από την ατμόσφαιρα από ελάχιστους και συγκεκριμένους οργανισμούς στο έδαφος. Αυτή η δέσμευση στα χερσαία οικοσυστήματα επιτυγχάνεται με τη δράση αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων, όπως εκείνα του γένους *Rhizobium*, τα οποία σχηματίζουν ριζικά φυμάτια και συμβιώνουν με τις ρίζες των ψυχανθών. Το φυτό παρέχει υδατάνθρακες στα βακτηριοειδή, ενώ τα βακτηριοειδή παρέχουν στο φυτό αμμωνία (NH₃), με αποτέλεσμα να προκύπτει μια συμβιωτική σχέση αμοιβαιότητας (Brown 2016).

Οι ακτινομύκητες ή νηματώδη βακτήρια του γένους *Frankia* αποτελούν μια άλλη κατηγορία συμβιωτικών αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων με ακτινορριζικά φυτά. Συγκεκριμένα οι σχέσεις αυτές δημιουργούνται συνήθως μεταξύ βακτηρίων και δένδρων ή θάμνων. Υπάρχει και η περίπτωση τα αζωτοδεσμευτικά βακτήρια να μη συμβιώνουν με φυτά, όπως είναι τα ελεύθερα βακτήρια του γένους *Azotobacter*.

Στα υδάτινα οικοσυστήματα η βιολογική δέσμευση γίνεται από φωτοσυνθετικά κυανοβακτήρια, λειχήνες, ελεύθερα βακτήρια και το διάτομο *Rhopalodia*, τα οποία ανθίζουν την άνοιξη και το φθινόπωρο με αποτέλεσμα εκείνες τις εποχές να αυξάνεται και ο ρυθμός αζωτοδέσμευσης (Ibanez et al. 2007, Πολυράκης 2013, Brown 2016). Για την αζωτοδέσμευση απαραίτητη είναι η παρουσία του ενζύμου αζωτάση και επιπλέον

ενέργειας. Η συμβιωτική δέσμευση του ατμοσφαιρικού N παρέχει τα μεγαλύτερα ποσοστά δέσμευσής του από οποιοδήποτε άλλο τρόπο δέσμευσης (Brown 2016).

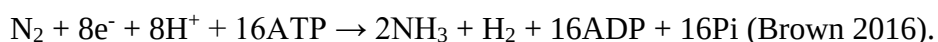
Η δέσμευση και η αναγωγή του N είναι διαδικασίες οι οποίες παρέχουν αμμωνία στους έμβιους οργανισμούς. Η αμμωνία θα οδηγήσει στη σύνθεση όλων των απαραίτητων αζωτούχων βιοχημικών ουσιών για τα ζωντανά κύτταρα.

Η κατανάλωση των φυτών από φυτοφάγα ζώα οδηγεί στη μετατροπή των φυτικών πρωτεϊνών σε ζωικές. Έπειτα οι αποικοδομητές, βακτήρια, μύκητες και ακτινομύκητες, μετατρέπουν την οργανική ύλη των νεκρών οργανισμών ή τα απεκκρίματά τους σε απλούστερα συστατικά. Συγκεκριμένα το οργανικό άζωτο των πρωτεϊνών της νεκρής οργανικής ύλης μετατρέπεται σε αμμωνία και αμμωνιακό κατιόν (NH_4^+), μέσω της διαδικασίας της αμμωνιοποίησης. Με το τέλος αυτής της διαδικασίας, το άζωτο επιστρέφει στο έδαφος με τη μορφή αμμωνίας, ουρίας και ουρικού οξέος.

Η αμμωνιακή μορφή του αζώτου δε χρησιμοποιείται από πολλούς οργανισμούς, αλλά μέσω της νιτροποίησης της από αυτότροφα βακτήρια, η αμμωνία στο έδαφος οξειδώνεται σε νιτρώδη, από βακτήρια του γένους *Nitrosomonas*, και τελικά σε νιτρικά, από βακτήρια του γένους *Nitrobacter*. Η διαδικασία αυτή έχει ως συνέπεια την ελεύθερη διάχυση των ιόντων στο εδαφικό διάλυμα. Από εκεί είναι διαθέσιμα για απορρόφηση από τα φυτά, με κίνδυνο όμως να υποστούν έκπλυση στα υπόγεια ύδατα. Η διεργασία αυτή ονομάζεται νιτροποίηση και πραγματοποιείται αποκλειστικά σε αερόβια περιβάλλοντα.

Η νιτρική μορφή του αζώτου προσλαμβάνεται από τα φυτά και εκεί ανάγεται σε αμμωνιακό άζωτο, το οποίο έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε αμινοξέα (Ibanez et al. 2007, Πολυράκης 2013).

Η παραγωγή αμμωνίας από μοριακό άζωτο (N_2) από αζωτοδεσμευτικά βακτήρια καταλύεται από το ενζυμικό σύμπλοκο νιτρογενάσης, το οποίο αποτελείται από μία αναγωγάση και μία νιτρογενάση, και πραγματοποιείται με την εξής αντίδραση:



Κατά την αναγωγή των νιτρικών τα φυτά προσλαμβάνουν, μέσω των ριζών, τα νιτρικά από το έδαφος. Στη συνέχεια τα νιτρικά μετακινούνται στους βλαστούς, οι οποίοι συνιστούν τις κύριες θέσεις αναγωγής. Στο κυτταρόπλασμα τα νιτρικά

ανάγονται σε νιτρώδη, με το ένζυμο της αναγωγής του νιτρικού. Τέλος στους χλωροπλάστες τα νιτρώδη ανάγονται σε αμμωνία, με το ένζυμο αναγωγής του νιτρώδους (Brown 2016).

Έπειτα το δεσμευμένο άζωτο μετατρέπεται, εξαιτίας της δράσης ορισμένων μικροοργανισμών, σε ένα μεγάλο φάσμα αμινοξέων και οξειδωμένων ενώσεων, όπου τελικά επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως μοριακό άζωτο μέσω της μικροβιακής απονιτροποίησης σε εδάφη, γλυκά και θαλάσσια νερά και ιζήματα (Fowler et al. 2013). Τη διαδικασία αυτή την προκαλούν τα απονιτροποιητικά βακτήρια όπως εκείνα του γένους *Pseudomonas* (Ibanez et al. 2007). Η διαδικασία της απονιτροποίησης πραγματοποιείται συνήθως υπό αναερόβιες συνθήκες και κυρίως σε πλημμυρισμένα εδάφη (Brown 2016). Ακόμη, μετά την απονιτροποίηση υπάρχει εκπομπή υποξειδίου του αζώτου (N_2O), το οποίο συμβάλλει στην ισορροπία μεταξύ της ακτινοβολίας στη Γη και του στρώματος του όζοντος στη στρατόσφαιρα, όπου το N_2O καταστρέφεται με τη φωτόλυση (Fowler et al. 2013).

Το άμεσα διαθέσιμο ανόργανο N στα φυτά, εάν δεν αφομοιωθεί από αυτά, μέσω της νιτροποίησης ή απονιτροποίησης μετατρέπεται σε αέριες μορφές: N_2 , N_2O , NO. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και το στάδιο οξείδωσης (Fowler et al. 2013).

Χημική συμπεριφορά στο έδαφος - Μετατροπές N στο έδαφος - Διαθεσιμότητα στα φυτά

Το εδαφικό N βρίσκεται στο μεγαλύτερο ποσοστό του σε οργανική μορφή και συγκεκριμένα το μεγαλύτερο μέρος αυτής της μορφής είναι οι αμινομάδες $R-NH_2$. Αυτή η μορφή προστατεύει το N από την έκπλυσή του αλλά το καθιστά επίσης μη άμεσα διαθέσιμο στα φυτά (Butnariu 2018). Η μετατροπή του οργανικού N σε ανόργανο γίνεται μέσω της αποσύνθεσης των φυτικών υπολειμμάτων (Brady and Weil 2011).

Άμεσα διαθέσιμη στα φυτά είναι η μορφή NH_4^+ , η οποία μπορεί μετέπειτα να οξειδωθεί σε NO_3^- . Το οργανικό άζωτο προσλαμβάνεται πρώτα από τους μικροοργανισμούς του εδάφους σε μορφή αμίνης και προκύπτουν πιο απλές ενώσεις αμίνης. Μέσω της ενζυματικής διαδικασίας της ανοργανοποίησης του εδαφικού N

καταλύεται η υδρόλυση των αμινομάδων και η απελευθέρωση των αμμωνιακών κατιόντων (Butnariu 2018). Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από την αναλογία C/N, την περιεκτικότητα αζώτου, λιγνίνης, κυτταρίνης και ATP, την οργανική ουσία του εδάφους, τη μικροβιακή αναπνοή και βιομάζα και την αντίστοιχη περιεκτικότητα N του εδαφικού μικροβιώματος (Bengtsson et al. 2003).

Η ετήσια ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου του εδάφους ανέρχεται στο 1,5-3,5%. Το ποσοστό αυτό οδηγεί στην επαρκή παροχή ανόργανου N για τη φυσιολογική ανάπτυξη της βλάστησης στους περισσότερους τύπους εδαφών, όχι όμως σε εδάφη με χαμηλή οργανική ουσία. Εάν η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία είναι γνωστή υπάρχει δυνατότητα πρόβλεψης της ποσότητας αζώτου που θα προκύψει από την ανοργανοποίηση σε μία καλλιεργητική περίοδο (Butnariu 2018). Αντίθετη διαδικασία της ανοργανοποίησης είναι η ακινητοποίηση και αφορά τη μετατροπή NO_3^- και NH_4^+ σε οργανικές μορφές ως ενσωμάτωσή τους στους μικροοργανισμούς του εδάφους. Η ακινητοποίηση είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με αβιοτικές και βιολογικές διεργασίες. Οι αβιοτικές αντιδράσεις είναι οι χημικές αντιδράσεις με την οργανική ύλη με υψηλό λόγο C/N, διαδικασίες ιδιαίτερα σημαντικές για τα δάση (Brady and Weil 2011, Butnariu 2018). Η ανοργανοποίηση και η ακινητοποίηση πραγματοποιούνται ταυτόχρονα στο έδαφος και εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες (Butnariu 2018).

Για τον καθορισμό των ρυθμών ανοργανοποίησης, ακινητοποίησης και νιτροποίησης, λαμβάνεται υπόψιν η αναλογία C/N. Η μεγάλη βαρύτητα αυτού του παράγοντα, οφείλεται στο ότι συνήθως το έδαφος διαθέτει υψηλότερη αναλογία C/N συγκριτικά με τα ετερότροφα βακτήρια τα οποία κατοικούν σε αυτό. Εδάφη με υψηλή αναλογία C/N χαρακτηρίζονται από την ταχεία ακινητοποίηση του N. Αντίστοιχα, εκείνα με χαμηλή αναλογία χαρακτηρίζονται από αργή ακινητοποίηση και πλεόνασμα NH_4^+ , λόγω της απαμίνωσης πηγών οργανικού άνθρακα (Bengtsson et al. 2003).

Λειτουργίες στο φυτό

Όταν το N υπάρχει σε επαρκείς ποσότητες στο φυτό, προωθείται η αύξηση και ανάπτυξη των ριζών καθώς και η πρόσληψη των υπόλοιπων θρεπτικών στοιχείων (Brady 2011). Η έλλειψη N αποτελεί περιοριστικό παράγοντα της ανάπτυξης και της αύξησης του φυτού. Για την κάλυψη των τροφικών αναγκών του πληθυσμού η

επάρκεια N είναι αναγκαία και εξασφαλίζεται με τη χρήση κοπριάς και χημικών λιπασμάτων, παραγόμενα με τη διαδικασία Haber-Bosch (Hirel and Krapp 2021).

Φυτό με επαρκή ποσότητα N εμφανίζει βαθύ πράσινο χρωματισμό των φύλλων και αυξάνει το μέγεθος των σπόρων σιτηρών, την περιεκτικότητα πρωτεϊνών στα φύλλα και στα σπέρματα, τη σπαργή και την περιεκτικότητα σε νερό των φυλλωδών λαχανικών. Υγιή φύλλα περιέχουν 2,5-5% άζωτο το οποίο λειτουργεί ως απαραίτητο συστατικό των αμινοξέων, ενζύμων, νουκλεϊκών οξέων και συμμετέχει στον μεταβολισμό των υδατανθράκων στα φυτά (Brady and Weil 2011).

Σε ένα πρώτο στάδιο διαχείρισης αζώτου από το φυτό, από τη βλάστηση έως την ανθοφορία, παρατηρείται η απορρόφηση και η αφομοίωση ανόργανου N μέσω των νεαρών ριζών και των φύλλων. Το ανόργανο N που αφομοιώνεται βρίσκεται σε μορφή νιτρικών και αμμωνίας και χρησιμοποιείται από το φυτό για τη βιοσύνθεση αμινοξέων. Τα αμινοξέα αυτά με τη σειρά τους θα συνθέσουν τις πρωτεΐνες και κυρίως τα ένζυμα που συμμετέχουν στο σχηματισμό της δομής του φυτού και των κυτταρικών εξαρτημάτων και κυρίως στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης.

Τα αμινοξέα έπειτα θα παρέχουν το N για τη σύνθεση των νουκλεϊκών οξέων και όλων των μορίων που περιέχουν N όπως είναι οι ορμόνες. Οι πρωτεΐνες θα αποτελέσουν τα δομικά στοιχεία των φυτών και θα λειτουργήσουν ως συστατικά των κυττάρων τους. Γενικά η διαδικασία αυτή επιτρέπει την πρόσληψη και μεταφορά αλάτων και την αφομοίωση C και N κατά το τέλος του κύκλου ζωής του φυτού έως τον σχηματισμό των αναπαραγωγικών οργάνων.

Κατά τη δεύτερη φάση διαχείρισης N από το φυτό επικρατούν κυρίως οι γηραιότεροι ιστοί, οι οποίοι εξάγουν οργανικούς μεταβολίτες για την εξασφάλιση δημιουργίας νέων βλαστικών και αποθηκευτικών οργάνων όπως είναι οι σπόροι. Με αυτόν τον τρόπο επιδιώκεται η παροχή θρεπτικών στοιχείων κατά τη βλάστηση και την ανάπτυξη δενδρυλλίου (Hirel and Krapp 2021).

Σε περίπτωση τροφопενίας αζώτου μπορεί να προκληθεί χλώρωση των φύλλων, ιδιαίτερα των γηραιότερων που βρίσκονται κοντά στη βάση του φυτού. Σε περίπτωση έντονης τροφопενίας προκαλείται ολικός μεταχρωματισμός των φύλλων σε κίτρινο ή καφέ χρώμα και ακολουθεί η πτώση τους από το φυτό (Taiz and Zeiger 2010). Τα πιο νεαρά φύλλα ενδέχεται διατηρήσουν το πράσινο χρώμα τους καθώς το N είναι ευκίνητο στοιχείο (Blake 2008). Σε ορισμένα φυτά, όπως η ντομάτα και το καλαμπόκι,

η τροφοπενία N μπορεί να εμφανιστεί με τον πορφυρό χρωματισμό των φύλλων, μίσχων και βλαστών λόγω της περίσσειας υδατανθράκων που συμμετέχουν στη σύνθεση ανθοκυανών και στη συσσώρευσή τους. Είναι πιθανή και η ξυλοποίηση βλαστών, λόγω της συσσώρευσης υδατανθράκων που δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στη σύνθεση ενώσεων που περιέχουν N (Taiz and Zeiger 2010).

1.1.2. Φωσφόρος

Βιογεωχημικός κύκλος

Οι γεωχημικές διεργασίες καθορίζουν τη μακροπρόθεσμη διάθεση P μεταξύ των χερσαίων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων, ενώ η βιολογικές διεργασίες καθορίζουν τη βραχυπρόθεσμη διάθεσή του, καθώς ο διαθέσιμος P στα φυτά προέρχεται κατά κύριο λόγο από την οργανική ύλη του εδάφους (Cross and Schlesinger 1995).

Περίπου το 5% του συνολικού εδαφικού P είναι άμεσα διαθέσιμο στα φυτά, ενώ το υπόλοιπο όχι. Οι μη διαθέσιμες μορφές του P σχετίζονται με πρωτογενή και δευτερογενή ορυκτά P, με την οργανική μορφή του P και με τη δέσμευσή τους σε ορυκτά του εδάφους (Hou et al. 2018). Στο εδαφικό διάλυμα η ποσότητα του P μπορεί να λάβει τιμές από 0,001 mg/L, στα πολύ άγονα εδάφη, έως και 1 mg/L, σε πλούσια εδάφη με επαρκή λίπανση (Brady and Weil 2011). Η πλειοψηφία του P στο έδαφος είναι σε οργανική μορφή και συνεπώς αδιάλυτη και μη διαθέσιμη στα φυτά.

Βασική πηγή του φωσφόρου αποτελούν τα πετρώματα, τα οποία έπειτα από αποσάθρωση απελευθερώνουν τα φωσφορικά ιόντα και κυρίως τα H_2PO_4^- και HPO_4^{2-} που ονομάζονται ορθοφωσφορικά. Έπειτα τα ιόντα αυτά εισέρχονται στα φυτά μέσω του ριζικού τους συστήματος, ή/και μέσω των μυκόρριζων για την ταχύτερη μετακίνησή τους, ώστε τελικά να προσληφθούν από βακτήρια, μύκητες και ανώτερα φυτά ως βιομάζα. Τα φυτά θα καταναλωθούν στη συνέχεια από τα φυτοφάγα είδη ως τροφή και με αυτόν τον τρόπο τα φωσφορικά ιόντα θα γίνουν μέρος της τροφικής αλυσίδας (Cross and Schlesinger 1995, Πολυράκης 2003, Brady and Weil 2011). Σε εδάφη με πολύ χαμηλή συγκέντρωση P αναπτύσσεται σε μεγαλύτερο βαθμό η συμβιωτική σχέση ρίζας-μυκόρριζων, για την πρόσληψη P (Brady and Weil 2011).

Ο Ρ εντοπίζεται επιπλέον στη λιθόσφαιρα, αν και σε μικρή ποσότητα, σε ανόργανη μορφή σε ενώσεις όπως εκείνες του απατίτη και σε οργανική μορφή στα νουκλεϊκά οξέα, φωσφολιπίδια και στην ινοσιτόλη (Θερίος 2005).

Στους φυτικούς ιστούς υπάρχει Ρ, ο οποίος επιστρέφει στο έδαφος έπειτα από την αποσύνθεση φυτικών υπολειμμάτων και αποβλήτων. Αυτή η διαδικασία της αποσύνθεσης καταλύεται από μικροοργανισμούς, οι οποίοι δεσμεύουν μέρος του Ρ στα κύτταρά τους, ενώ μέρος του Ρ απελευθερώνεται λόγω της ανοργανοποίησης, κατά την οποία οι μορφές Ρ καθίστανται ανόργανες, διαλυτές και δυνατόν να προσληφθούν από τα φυτά (Brady and Weil 2011). Αναλόγως τη διαθεσιμότητα του Ρ καθορίζεται και ο βαθμός της ανοργανοποίησης και ακινητοποίησής του. Η ακινητοποίηση του οργανικού Ρ σε ποσοστό 20-50% επέρχεται όταν η ποσότητα του διαθέσιμου Ρ είναι περιορισμένη (Cross and Schlesinger 1995).

Η διάθεση του Ρ στο περιβάλλον εξαρτάται από τη μεταφορά του μέσω των υδάτων. Εξαίρεση αποτελούν τα οικοσυστήματα με μεγάλη έλλειψη Ρ στα οποία η παροχή του εξασφαλίζεται με τη μεταφορά σκόνης (Filippelli 2008). Μέρος του Ρ περιέχεται στα αποχωρήματα θαλάσσιων πτηνών (guano) και στα αλιεύματα (Πολυράκης 2003, Θερίος 2005). Τα φυτά όταν αποσυντίθενται απελευθερώνουν Ρ ξανά στο περιβάλλον. Η διαταραχή στον κύκλο του Ρ, η οποία έχει προκληθεί από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, έχει οδηγήσει στην ενίσχυση του φαινομένου του ευτροφισμού, λόγω της συσσώρευσης θρεπτικών αλάτων, νιτρικών και φωσφορικών στα υδάτινα οικοσυστήματα (Πολυράκης 2003).

Χημική συμπεριφορά στο έδαφος - Μετατροπές τους στο έδαφος-Διαθεσιμότητα στα φυτά

Στο έδαφος συναντάται ως οργανικός και ανόργανος Ρ. Ο ανόργανος Ρ όταν είναι δεσμευμένος με ενώσεις του Ca επικρατεί σε αλκαλικά εδάφη ενώ όταν είναι δεσμευμένος με ενώσεις Fe ή Al επικρατεί σε όξινα εδάφη. Η παροχή του στο έδαφος γίνεται με αργό ρυθμό. Ο οργανικός Ρ μπορεί να ανήκει στο ενεργό, βραδύ ή μη ενεργό κλάσμα της οργανικής ύλης του εδάφους (Brady and Weil 2011). Το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού Ρ συναντιέται στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους (Θερίος 2005).

Από το εδαφικό διάλυμα μπορεί να υπάρξουν απώλειες του P μέσω της πρόσληψής του από τα φυτά και της έκπλυσής του στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Οι απώλειες μέσω έκπλυσης αν και είναι περιορισμένες εξαιτίας της ισχυρής προσρόφησης των διαλυτών ανόργανων μορφών P από τα ορυκτά, είναι ικανές να προκαλέσουν το φαινόμενο του ευτροφισμού. Οι απώλειες υφίστανται επιπλέον λόγω της απορροής των επιφανειακών υδάτων και της εδαφικής διάβρωσης με την απομάκρυνση των τεμαχιδίων του εδάφους που περιέχουν P. Δεν παρατηρούνται απώλειες P σε αέρια μορφή, μέρος του P μόνο μπορεί να διαφύγει με την αέρια μορφή φωσφίνης-PH₃ (Brady and Weil 2011).

Λόγω της μικρής διαλυτότητας του P, μειώνεται και η διαθεσιμότητά του στο εδαφικό διάλυμα. Η έλλειψή του σε αργιλώδη εδάφη πιθανώς οφείλεται στη δέσμευση του P στο κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών την αργίλου, με συνέπεια την αδυναμία εκχύλισής του με άλατα ή χρήσης του από φυτικούς οργανισμούς λόγω της ιδιαίτερα υψηλής ρυθμιστικής τους ικανότητας. Όμως στο εδαφικό διάλυμα είναι δυνατή η απελευθέρωση του P από τα κολλοειδή του εδάφους (Θεριός 2005). Οι εισροές P σε καλλιεργούμενα εδάφη πραγματοποιούνται μέσω της λίπανσης. Η προσθήκη κοπριάς συμβάλλει στην προσθήκη διαλυτού οργανικού φωσφόρου. Στα εδάφη επικρατούν ευρέως οι εξής οργανικές μορφές του P: τα φωσφορικά ή οι φωσφορικοί εστέρες, τα νουκλεϊκά οξέα και τα φωσφολιπίδια (Brady and Weil 2011).

Ο οργανικός φωσφόρος υπόκειται σε μια διαδικασία που ονομάζεται ανοργανοποίηση, η οποία εξαρτάται από την αναλογία C/N/P του εδάφους, με τη βέλτιστη να είναι η 100/10/1. Σε περίπτωση που η σχέση C/P είναι μικρότερη ή ίση του λόγου 200/1 πραγματοποιείται ανοργανοποίηση του P, ενώ εάν είναι μεγαλύτερη του λόγου 300/1 τότε προκαλείται η ακινητοποίηση του P (Θεριός 2005). Η ανοργανοποίηση εξαρτάται επίσης και από τις συνθήκες που ελέγχουν την αποδόμηση της οργανικής ύλης όπως είναι η θερμοκρασία. Το γεγονός ότι η οργανική ουσία που υφίσταται γρήγορη αποδόμηση μειώνεται συνεχώς, απαιτεί επιπλέον προσθήκη P στο έδαφος ώστε να μη μειωθούν οι υψηλοί ρυθμοί ανοργανοποίησής του (Brady and Weil 2011).

Η συγκράτηση του P στο έδαφος είναι μεγαλύτερη στα ορυκτά της αργίλου τύπου 1:1 και η δέσμευσή του είναι μεγαλύτερη σε εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε каолинίτη, με υψηλή βροχόπτωση και με υψηλή θερμοκρασία. Η απορρόφηση του

P γίνεται παθητικά με διάχυση και με ενεργητική ρόφηση. Ανάλογα με την τιμή του pH επικρατεί μία από τις εξής διαφορετικές μορφές του P: H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} και PO_4^{3-} , οι δύο πρώτες εκ των οποίων εντοπίζονται σε εδάφη που έχουν φυσιολογικά pH. Το H_2PO_4^- επικρατεί σε όξινα εδάφη, ενώ το HPO_4^{2-} σε αλκαλικά. Ο P είναι περισσότερο διαθέσιμος και απορροφάται ταχύτερα σε τιμή όξινου εδαφικού pH 5,5-7 και συνεπώς όταν βρίσκεται στη μορφή H_2PO_4^- . Η αύξηση του pH και άρα η αύξηση των OH^- αναστέλλει την απορρόφηση των H_2PO_4^- και HPO_4^{2-} .

Η οργανική ουσία του εδάφους αυξάνει τη διαθεσιμότητα του P εξαιτίας της παραγωγής CO_2 και H_2CO_3 τα οποία προκαλούν τη μείωση του pH. Αύξηση της απορρόφησης του P παρατηρείται επίσης λόγω προσβολής των ριζών από βακτήρια, παρουσίας κατιόντων και υψηλής συγκέντρωσης P. Αντιθέτως η υδατική καταπόνηση του φυτού μειώνει την απορρόφηση του P (Θερίος 2005).

Λειτουργίες στο φυτό

Έπειτα από την πρόσληψη του φωσφορικού ανιόντος από το φυτό, ακολουθεί η ενσωμάτωσή του σε οργανικές ενώσεις. Το φωσφορικό ανιόν PO_4^{3-} αποτελεί μέρος των φωσφορικών σακχάρων, τα οποία είναι οι ενδιάμεσες ενώσεις μεταξύ αναπνοής-φωτοσύνθεσης και των φωσφολιπιδίων στις μεμβράνες των φυτών. Αποτελεί συστατικό των νουκλεοτιδίων, τα οποία συμμετέχουν στον ενεργειακό μεταβολισμό και δομούν τα DNA και RNA (Taiz and Zeiger 2010). Η ATP-Τριφωσφορική Αδενοσίνη παίζει καθοριστικό ρόλο στον κύκλο του Calvin. Η δέσμευση των κλώνων της διπλής έλικας του DNA είναι εφικτή χάρη στις γέφυρες του φωσφορικού εστέρα. Οι μεμβράνες του κυτταρικού τοιχώματος δομούνται από τα φωσφολιπίδια (Filippelli 2008). Η χρήση του P από τα φυτά οδηγεί στη σύνθεση ATP, ουσία απαραίτητη για τη μεταφορά και αποθήκευση ενέργειας εντός του κυττάρου (Πολυράκης 2003).

Ο P αποθηκεύεται στο φυτό είτε με το να λάβει αποθησαυριστικό ρόλο στα χυμοτόπια είτε με τη σύνθεση φωσφορούχων ενώσεων στα κύτταρα (Θερίος 2005). Συγκεκριμένα αποθηκεύεται στο φυτικό οξύ, το οποίο βρίσκεται στους σπόρους των φυτών. Το οξύ αυτό συνιστά ένωση των φωσφορικών της ινοσιτόλης (Brady and Weil 2011). Στα ανώτερα φυτά ο P επικρατεί με τη μορφή φυτικού οξέος η οποία αποτελεί το 70% του ολικού φωσφόρου των σπερμάτων. Συναντάται σε μεγάλο ποσοστό στις πατάτες και σε μικρό στα πράσινα μέρη των φυτικών ιστών. Η φυτάση είναι ένζυμο

που προκαλεί την υδρόλυση του φυτικού οξέος με αποτέλεσμα να μη μεταφέρεται έξω από σπέρματα που βλαστάνουν (Θερίος 2005).

Ο Ρ είναι ευκίνητο στοιχείο μέσα στο φυτό και σε περίπτωση τροφοπενίας εμφανίζεται μωβ ή σκούρος μεταχρωματισμός των φύλλων λόγω ύπαρξης ανθοκυανών και δυσκαμψία του ελάσματός τους (Blake 2008). Επιπλέον, παρεμποδίζεται η ανάπτυξη των νεαρών φύλλων, ενισχύεται ο κακός σχηματισμός τους, η δημιουργία νεκρωτικών κηλίδων και η απώλεια του πράσινου χρώματός τους. Πιθανά επιπλέον συμπτώματα αποτελούν οι καχεκτικοί βλαστοί, ο θάνατος γηραιότερων φύλλων και η καθυστέρηση της ωρίμανσης (Taiz and Zeiger 2010).

1.1.3. Κάλιο

Βιογεωχημικός κύκλος

Το κάλιο εντοπίζεται σε μεγάλο αριθμό ορυκτών και κυρίως σε συλβίτη (KCl). Ο Καναδάς διαθέτει το 37% των παγκόσμιων αποθεμάτων. Εντοπίζεται στα πρωτογενή ορυκτά: μοσχοβίτης, βιοτίτης και σε άλλα φυλλόμορφα της ομάδας των μαρμαρυγιών (Θερίος 2005). Οι άστριοι αποτελούν κύριο συστατικό του γρανίτη και με την υδρόλυσή τους απελευθερώνουν τα: K^+ , Na^+ και Ca^{2+} , στοιχεία που απαιτούνται σε σημαντική συγκέντρωση στο φυτό. Από τα παραπάνω ανιόντα, εκείνο του K^+ εμφανίζει τη μεγαλύτερη σταθερότητα στα διαλύματα νερού των κυττάρων και κατά συνέπεια ελέγχει διαδικασίες οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για το φυτό (Sardans 2021) καθώς και για την ανάπτυξη και αύξηση των φυτών και φυσιολογικών λειτουργιών σχετικά με την υγεία και ανθεκτικότητά τους σε βιοτικό και αβιοτικό στρες (Oosterhuis et al. 2014).

Υπάρχει και η περίπτωση έκπλυσης του Κ και η κατάληξή του στη θάλασσα καθώς και η δέσμευσή του στα κολλοειδή της αργίλου (Θερίος 2005). Από όλα τα θρεπτικά στοιχεία η καλλιέργεια χρειάζεται το Κ στις μεγαλύτερες ποσότητες, μετά το Ν, ιδιαίτερα κατά την αναπαραγωγική ανάπτυξη του φυτού. Συγκεκριμένα θα πρέπει να καταλαμβάνει το 2-5% του ξηρού βάρους του φυτού. Η πρόσληψή του από την καλλιέργεια εξαρτάται από το καλλιεργούμενο είδος, τη διαθεσιμότητα K^+ στο έδαφος, τις συνθήκες κατά την περίοδο ανάπτυξης και τις καλλιεργητικές τεχνικές (Oosterhuis

et al. 2014). Επιπλέον είναι το στοιχείο με τη μεγαλύτερη κινητικότητα όσον αφορά τις μεταφορές μεταξύ μικρών αλλά και μεγάλων αποστάσεων μεταξύ ξυλώματος και φλοιώματος. Εντός του φυτού δε λαμβάνει οργανική μορφή αλλά επικρατεί ως κατιόν (Oosterhuis et al. 2014, Sardans 2021). Το κάλιο μαζί με το ασβέστιο είναι τα πιο άφθονα κατιόντα που υπάρχουν στα φυτικά κύτταρα. Το K δε σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τις διαδικασίες των μεταβολικών μονοπατιών καθώς δεν αποτελεί μέρος των μοριακών ή μεγαλομοριακών δομών του φυτού. Για τον λόγο αυτό και λόγω του ότι υφίσταται ταχύτατη έκπλυση εξαιτίας της υψηλής διαλυτότητάς του δεν υπάρχει σε σημαντικές ποσότητες στην οργανική ύλη του εδάφους (Sardans 2021).

Στα φυτά αποθηκεύεται στο κυτταρόπλασμα και στο κενοτόπιο. Ελέγχει την ενεργοποίηση διάφορων ενζύμων, με την πρόσδεσή του σε συγκεκριμένη θέση της πρωτεΐνης, την εξουδετέρωση μοριακών ανιόντων, τη σταθεροποίηση του pH και τον έλεγχο του οσμωτικού δυναμικού των κυττάρων. Η διαθεσιμότητά του επηρεάζει τη δράση του (Oosterhuis et al. 2014) και για να εξασφαλιστεί στα φυτά πραγματοποιείται η μεταφορά K^+ από τα βαθύτερα προς τα πιο επιφανειακά στρώματα μέσω του υδραυλικού ανελκυστήρα που προκαλεί την αύξηση της ικανότητας συγκράτησης K^+ (Sardans 2021).

Χημική συμπεριφορά στο έδαφος - Μετατροπές τους στο έδαφος - Διαθεσιμότητα στα φυτά

Το K^+ εντοπίζεται διαλυμένο σε εδαφικό διάλυμα, προσροφημένο στην άργιλο και στην οργανική ουσία και τέλος συγκρατημένο σε κρυσταλλικές δομές σχηματιζόμενες από τεμαχίδια της αργίλου ή πρωτογενή πυριτικά ορυκτά. Από το ολικό κάλιο του εδάφους, 0,1-0,2% είναι σε μορφή διαλύματος και άμεσα διαθέσιμο στα φυτά, 1-2% είναι σε ανταλλάξιμη μορφή, ενώ 91-99% είναι σε μη διαθέσιμη μορφή. Αν και η ποσότητα K^+ είναι μεγαλύτερη στο φυτό από εκείνες των N και P, τελικά η διαθέσιμη ποσότητα στα φυτά είναι χαμηλότερη λόγω της εύκολης έκπλυσής του. Η μη διαθέσιμη μορφή του εντοπίζεται στις κρυσταλλικές δομές μαρμαρυγία και άστριου ενώ η ανταλλάξιμη είναι προσροφημένη σε άργιλο και οργανική ουσία. Η διαθεσιμότητα του κατιόντος εξαρτάται από το βαθμό έκπλυσής του και από την περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο (Sardans 2021). Η δέσμευση του K λαμβάνει χώρα στον ενδοστοιβαδικό χώρο των 2:1 ορυκτών της αργίλου και κυρίως στον

ιλλίτη. Τα NH_4^+ και K^+ έχουν τη δυνατότητα δέσμευσης στον ίδιο χώρο, γεγονός που οδηγεί το NH_4^+ να έχει επιρροή στη δέσμευση και απελευθέρωση του K^+ και το K^+ να εμποδίζει την απελευθέρωση του NH_4^+ που έχει δεσμευτεί.

Η δέσμευση του K μειώνει την έκπλυσή του και άρα τις απώλειές του και συμβάλλει στη βραδεία απελευθέρωσή του. Η καλιούχος λίπανση έχει αντίκτυπο στη διαδικασία της νιτροποίησης καθώς όσο αυξάνεται η ποσότητα του K που προστίθεται στο έδαφος τόσο μειώνεται η ταχύτητα νιτροποίησης. Γενικά ο κύκλος του K είναι ανοιχτός με μεγάλες ποσότητες αυτού του θρεπτικού να καταλήγουν στις θάλασσες (Θερίος 2005).

Λειτουργίες στο φυτό

Εντός του φυτού βρίσκεται στη μορφή κατιόντος K^+ και ρυθμίζει το οσμωτικό δυναμικό των κυττάρων καθώς και την ενεργοποίηση ενζύμων εμπλεκόμενων στην αναπνοή και φωτοσύνθεση (Taiz and Zeiger 2010). Επίσης επιταχύνει τη μεταφορά φωτοσυνθετικών προϊόντων από τα φύλλα (Blake 2008).

Η τροφопενία K προκαλεί την εμφάνιση των συμπτωμάτων στα γηραιότερα φύλλα που βρίσκονται προς τη βάση καθώς το K είναι ευκίνητο στοιχείο. Οδηγεί στην χλώρωση των φύλλων περιφερειακά ή με στίγματα και τελικά στη νέκρωση περιφερειακά, στις κορυφές τους και ενδιάμεσα από τις νευρώσεις. Το κατσάρωμα και το ζάρωμά τους είναι επίσης πιθανά, οι βλαστοί καχεκτικοί και με κοντά μεσογονάτια διαστήματα (Taiz and Zeiger 2010). Τέλος το έλασμα ορισμένων οσπρίων μπορεί να εμφανίσει λευκές κηλίδες (Blake 2008).

1.2. Οργανικά Υπολείμματα

Ήδη πριν από χιλιάδες χρόνια πραγματοποιούνταν η προσθήκη οργανικών υπολειμμάτων στο έδαφος για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του και για την καλύτερη ανάπτυξη των φυτών (Carpio et al. 2021). Μέσω της ανθρώπινης επέμβασης στο περιβάλλον παράγονται οργανικά υπολείμματα από τις εκτροφές ζώων, τις καλλιέργειες και τον αστικό, βιομηχανικό και αγροτικό τομέα. Ανάλογα με ορισμένους

παράγοντες καθορίζεται και ποικίλλει ο τύπος αποβλήτου. Οι παράγοντες αυτοί είναι πολλοί, ορισμένοι από τους οποίους είναι οι εξής: η διαδικασία παραγωγής, η διαχείριση των παραπροϊόντων, το επίπεδο επεξεργασίας, το είδος και η ηλικία των ζώων, η διαχείριση της παραγόμενης βιομάζας και τα προγράμματα διατροφής (Higashikawa et al. 2010). Τα απόβλητα αυτά συμβάλλουν στην παραγωγή καλλιέργειας με αυξημένη απόδοση και ποιότητα. Η αντίδραση της καλλιέργειας έπειτα από την εφαρμογή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ο τύπος εδάφους και οι κλιματικές συνθήκες (Parr and Colacicco 1987). Κυρίαρχο ρόλο στην επίδρασή τους στο εδαφικό περιβάλλον παίζουν τα χαρακτηριστικά των υπολειμμάτων (Higashikawa et al. 2010, Carpio et al. 2021).

Τα οργανικά υπολείμματα μπορεί να είναι η ζωική και πράσινη κοπριά, τα φυτικά υπολείμματα από τις καλλιέργειες και οι κομπόστες (Parr and Colacicco 1987). Με το να μην απορρίπτονται αλλά να αξιοποιούνται αποφεύγεται η δυσανάλογη διάθεσή τους, μειώνεται η χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υφίσταται η ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων και ενέργειας (Higashikawa et al. 2010) και αυξάνεται η παραγωγικότητα, το όργωμα και η γονιμότητα του εδάφους (Parr and Colacicco 1987). Η εφαρμογή τους επηρεάζει τη χημεία και τον μικροβιακό πληθυσμό του εδάφους, βελτιώνει την οργανική του ουσία, παρέχει πλήθος μακρο- και μικροθρεπτικών που προωθούν την ανάπτυξη της καλλιέργειας και των μικροβίων, επηρεάζει το εδαφικό pH και αυξάνει την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Οι διεργασίες αυτές επηρεάζουν άμεσα τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών, τη μικροβιακή δραστηριότητα και τελικά τη γονιμότητα του εδάφους (Carpio et al. 2021). Με την προσθήκη οργανικών υπολειμμάτων ακολουθείται ο νόμος της φθίνουσας απόδοσης, δηλαδή παρατηρείται η μέγιστη απόδοση παραγωγής με την πρώτη προσθήκη τους ενώ οι επιπλέον προσθήκες υπολειμμάτων συνοδεύονται με αποδόσεις μικρότερου μεγέθους (Parr and Colacicco 1987).

Η χρήση των οργανικών υπολειμμάτων ήταν διευρυμένη μέχρι και την εμφάνιση των χημικών σκευασμάτων. Τα χημικά σκευάσματα πρόσφεραν μεγάλες αποδόσεις καλλιέργειας με μικρό κόστος αγοράς και έτσι προτιμήθηκε η χρήση τους από τους παραγωγούς έναντι των οργανικών υπολειμμάτων.

Ορισμένα οργανικά υπολείμματα ενισχύουν τη δράση των αζωτούχων λιπασμάτων, γεγονός που φανερώνεται στις αυξημένες αποδόσεις έπειτα από τον

συνδυασμό των δύο παρά την ξεχωριστή εφαρμογή τους. Επιπλέον έχουν μεγαλύτερο θετικό αντίκτυπο στη γονιμότητα του εδάφους έναντι των χημικών λιπασμάτων λόγω της βραδείας απελευθέρωσης των συστατικών των N και P, παρά το γεγονός ότι οι ρυθμοί αποσύνθεσης και ανοργανοποίησης των οργανικών υπολειμμάτων είναι ασταθείς (Parr and Colacicco 1987).

Στα φυτικά υπολείμματα η έκπλυση N πραγματοποιείται σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με εκείνον στα λιπάσματα και η διάβρωση του εδάφους και η απώλεια νερού μέσω της εξάτμισης περιορίζονται. Ανάλογα με το είδος του φυτού καθορίζεται το περιεχόμενο των θρεπτικών στοιχείων που θα υπάρχει στα φυτικά υπολείμματα που θα παραχθούν. Τα θρεπτικά στοιχεία στα υπολείμματα απελευθερώνονται και διατίθενται στις επόμενες καλλιέργειες μέσω της αποσύνθεσης και ο βαθμός παροχής τους εξαρτάται από την αναλογία C/N της συγκεκριμένης καλλιέργειας. Εάν ισχύει $C/N > 40$, τότε η ανοργανοποίηση γίνεται με πολύ αργό ρυθμό, εάν ισχύει ότι $15 < C/N < 25$ τότε η διαδικασία πραγματοποιείται με τον βέλτιστο ρυθμό, ενώ εάν η αναλογία C/N είναι πάρα πολύ υψηλή, υφίσταται η μικροβιακή ακινητοποίηση του N (Torma et al. 2017).

Για τον καθορισμό των δυνατοτήτων και περιορισμών των οργανικών υπολειμμάτων είναι αναγκαίος ο χαρακτηρισμός τους και η γνώση του χημικού και φυσικού προφίλ τους καθώς αυτό ποικίλλει εξαιτίας της ετερογένειας που παρατηρείται στη σύνθεσή τους, ακόμα και σε εκείνα κοινής προέλευσης (Higashikawa et al. 2010, Carpio et al. 2021). Ακόμη σημαντική είναι και η γνώση του περιεχομένου των υπολειμμάτων σε θρεπτικά στοιχεία ώστε να εφαρμόζεται η απαραίτητη ποσότητα θρεπτικών μέσω των λιπασμάτων στην καλλιέργεια. Έτσι θα είναι δυνατόν να αποφευχθεί η επιπλέον οικονομική επιβάρυνση για την αγορά τους και η ρύπανση από την εφαρμογή μεγαλύτερων ποσοτήτων των λιπασμάτων που δεν είναι απαραίτητα για την καλλιέργεια (Torma et al. 2017).

Τα οργανικά υπολείμματα δε θεωρούνται πλήρως ασφαλή κυρίως εξαιτίας του περιεχομένου τους σε βαρέα μέταλλα (Rodríguez-Espinosa et al. 2023), διαλυτά άλατα και επικίνδυνα οργανικά χημικά με δυσμενείς επιπτώσεις στα εδάφη, στα φυτά, στα ζώα και στον άνθρωπο (Parr and Colacicco 1987). Ορισμένες καταγεγραμμένες αρνητικές επιπτώσεις αφορούν την αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα και αλάτωση του εδάφους, τη μείωση της ανθεκτικότητας των εδαφικών βακτηρίων και την

απελευθέρωση ρύπων στο έδαφος και στα ύδατα (Carpio et al. 2021). Η εφαρμογή των οργανικών υπολειμμάτων θα πρέπει να πραγματοποιείται με βάση την εκάστοτε ισχύουσα νομοθεσία περί της σύνθεσης και χρήσης τους για την αποφυγή της ρύπανσης, κυρίως της εδαφικής, και του φαινομένου του ευτροφισμού (Higashikawa et al. 2010).

Θρέψη φυτών

Μια καλλιέργεια είναι δυνατόν να έχει μεγαλύτερες αποδόσεις όταν η εφαρμογή των οργανικών υπολειμμάτων πραγματοποιείται ακριβώς τη στιγμή που υπάρχει ανάγκη να εμπλουτιστεί με θρεπτικά στοιχεία. Η αύξηση των αποδόσεων οφείλεται στην ταχεία παροχή των θρεπτικών στοιχείων από τα οργανικά υπολείμματα προς την καλλιέργεια (Rodríguez-Espinoza et al. 2023).

Το περιεχόμενο των οργανικών υπολειμμάτων χαρακτηρίζεται από οργανική ύλη και μακροστοιχεία αλλά και από επιπλέον θρεπτικά όπως S, Fe και Mg, μικροστοιχεία και κυρίως Cu, B, Zn, Mn και Mo και συχνά ασβέστη (Parr and Colacicco 1987). Η δράση των υπολειμμάτων δύναται να προκαλέσει την άμεση διέγερση της ανάπτυξης των μικροβίων και της βιομάζας με την παροχή ενέργειας και θρεπτικών ή την έμμεση προώθηση της ανάπτυξης των φυτών και των ριζικών εκκρίσεων στη ριζόσφαιρα. Λόγω αυτής της μεγάλης μικροβιακής δραστηριότητας συνεπάγεται η αυξημένη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών και υποστρωμάτων. Τα οργανικά υπολείμματα έχουν μακροπρόθεσμα θετικό αντίκτυπο στην υγεία του εδάφους και συμβάλλουν στην περάτωση διάφορων διαδικασιών στο οικοσύστημα. Ωστόσο η φύση και η σταθερότητα της οργανικής τους ύλης θα καθορίσει τη μικροβιακή απόκριση έπειτα από την εφαρμογή τους (Carpio et al. 2021).

Η ποσότητα των οργανικών υπολειμμάτων που παραμένουν στον αγρό εξαρτάται από την καλλιέργεια. Η μεγαλύτερη ποσότητα παράγεται από καλλιέργειες ελαιούχων σπόρων ενώ η μικρότερη από ριζικές. Τα φυτικά υπολείμματα προσφέρουν μεγάλη δυνατότητα παροχής θρεπτικών στοιχείων. Ιδίως εκείνα που προέρχονται από καλλιέργειες ψυχανθών καλύπτουν τις ανάγκες της επόμενης καλλιέργειας σε N. Ο P εμφάνιζε μεγαλύτερη σταθερότητα στα φυτικά υπολείμματα όσον αφορά την περιεκτικότητά του, ενώ τα N και K εμφάνιζαν μεγαλύτερη ποικιλία. Τα θρεπτικά

στοιχεία που κινούνται από τα φυτικά υπολείμματα στο έδαφος και έχουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο στη θρέψη του εδάφους είναι τα N και K (Torma et al. 2017).

Εμπλουτισμός εδάφους με OM

Η οργανική ουσία του εδάφους αποτελεί την κύρια ιδιότητά του καθώς προσφέρει στήριξη και σχετίζεται με τις βιολογικές, χημικές και φυσικές πτυχές της εδαφικής γονιμότητας και υγείας. Στο έδαφος καθιζάνει CO₂ από την ατμόσφαιρα μετριάζοντας με αυτόν τον τρόπο τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Carpio et al. 2021). Τα φυτικά υπολείμματα απαρτίζουν, μαζί με τη μικροβιακή βιομάζα, την οργανική ουσία του εδάφους και είναι καθοριστικά για την πραγματοποίηση της χουμοποίησης στα χερσαία οικοσυστήματα. Έχουν πολύπλοκη σύνθεση και αποτελούνται κυρίως από: πολυσακχαρίτες, λιγνίνη, βιοπολυμερή και ταννίνες. Το πλήθος και η σύνθεση των παραπάνω στοιχείων εξαρτάται από το φυτικό είδος και τον ιστό στον οποίο βρίσκονται (Kögel-Knabner 2002).

Με την παραμονή των οργανικών υπολειμμάτων στο έδαφος υφίσταται η βελτίωση της οργανικής ύλης του εδάφους με την παροχή σε αυτό: άνθρακα, μικροστοιχείων και μακροστοιχείων, με τα N και P να είναι τα επικρατέστερα (Torma et al. 2017). Επιπλέον οι φυσικές εδαφικές ιδιότητες επηρεάζονται θετικά μέσω της προσθήκης εξωγενούς οργανικής ουσίας στο έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η εδαφική δομή καθώς και η ικανότητα συγκράτησης του νερού του εδάφους και παρατηρείται η δραστηριοποίηση των μικροβίων και κυρίως η ανάπτυξη των υφών που συμβάλλουν στη σταθεροποίηση των αδρανών του εδάφους. Το εδαφικό πορώδες υφίσταται αύξηση ενώ η επιφανειακή κρούστα και η φαινόμενη πυκνότητα υφίστανται μείωση. Καθώς επηρεάζεται η κατανομή και η σύνδεση των σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών και η ολική επιφάνεια εντός του εδάφους αυξάνονται και οι διαθέσιμες οικοθέσεις για αποικισμό από κάποιο είδος (Carpio et al. 2021).

Χρήσεις

Η εφαρμογή των οργανικών υπολειμμάτων στα εδάφη είναι αναγκαία για την προστασία τους από: τη διάβρωση, την απώλεια θρεπτικών στοιχείων και τη μείωση της οργανικής ύλης. Αυτά προσφέρουν θρεπτικά στοιχεία στην καλλιέργεια με τη

δράση τους ως λιπάσματα αλλά και βελτιώνουν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, φανερώνοντας την επιπλέον δράση τους ως εδαφοβελτιωτικά. Η εδαφοβελτιωτική τους δράση είναι υπεύθυνη για την αυξημένη: διηθητικότητα, ικανότητα συγκράτησης και περιεκτικότητας νερού, αερισμού και διαπερατότητας εδάφους, μήκους ρίζας και για τη μειωμένη: κρούστα εδάφους, φαινόμενης πυκνότητας, απορροής και διάβρωσης. Υπάρχει και η δυνατότητα αξιοποίησης των φυτικών υπολειμμάτων ως καύσιμα, ίνες και τροφή για ζώα.

Η αποδοτικότερη χρήση των οργανικών υπολειμμάτων όσον αφορά τη βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους και την ανάπτυξη των φυτών, μπορεί να επιτευχθεί με τη βελτίωση των μεθόδων συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας της ζωικής κοπριάς (Parr and Colacicco 1987). Έτσι, οι απώλειες N που παρατηρούνται κατά την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης στις διαδικασίες αυτές θα περιοριστούν με την προσθήκη γύψου ή απλού υπερφωσφορικού ή κατά τη μείωση του pH στο κομπόστ (Parr and Colacicco 1987, Higashikawa et al. 2010). Επίσης αξιοποιούνται στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους όταν η απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων που περιέχουν πραγματοποιείται τη στιγμή που η καλλιέργεια έχει τη μεγαλύτερη ανάγκη. Ο έλεγχος της απελευθέρωσης των θρεπτικών στοιχείων μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή των υπολειμμάτων στην καλλιέργεια την κατάλληλη χρονική στιγμή, με τη διαχείρισή τους μέσω της κομποστοποίησης και με τον τρόπο εφαρμογής τους (Parr and Colacicco 1987).

1.3. Χρήση του insect frass

Λόγω του αυξανόμενου ανθρώπινου πληθυσμού του πλανήτη οι απαιτήσεις σε τροφή είναι αυξημένες. Έως το 2050 ο παγκόσμιος πληθυσμός υπολογίζεται να ανέρχεται στα 9.700.000.000 και η παραγωγή τροφής να σημειώνει αύξηση κατά 70%. Η παραγωγή τροφής λοιπόν για την κάλυψη των διατροφικών αναγκών σε ζωική πρωτεΐνη στρέφεται προς τη μαζική παραγωγή εντόμων ως τροφή και ζωοτροφή, με το έντομο *Tenebrio molitor* να είναι από τα πιο ευρέως παραγόμενα. Το insect frass αποτελεί παραπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής εντόμων (Poveda 2021).

Πιο συγκεκριμένα η εκτροφή εντόμων εκτός από το να μετατρέπει βιοαπόβλητα σε βιομάζα, παράγει και η ίδια απόβλητα: τα απεκδύματα των εντόμων ή *exuviae* και τα απεκκρίματά τους ή *insect frass* (Dicke 2018). Τα σκαθάρια της οικογένειας *Tenebrionidae* όπως τα *superworms* (*Zophobas morio*) και τα *mealworms* (*Tenebrio molitor*) όταν βρίσκονται στο στάδιο του σκουληκιού (*worm*) μπορούν να παράγουν *insect frass* πλούσιο σε άζωτο, καθιστώντας έτσι δυνατή τη χρήση του ως λίπασμα. Επιπλέον τα έντομα αυτά είναι πλούσια σε χιτίνη, μια ουσία που προωθεί την ανάπτυξη των φυτών και των αποδόσεων της καλλιέργειας (Koh et al. 2020).

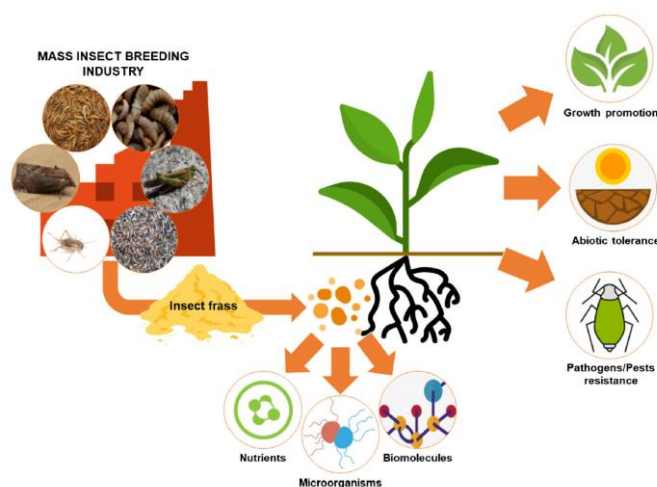
Το *insect frass* παράγεται σε ποσότητα έως και 40 φορές μεγαλύτερη από εκείνη της ζωικής βιομάζας (Poveda 2021), περιέχει πολλούς ωφέλιμους μικροοργανισμούς και μεγάλες ποσότητες N, P, K, ίσες με εκείνες στις κοπριές ζωικής προέλευσης, ενώ εντοπίζονται και μικρές ποσότητες ιχνοστοιχείων, όπως Cu και Zn (Houben et al. 2020). Τα παραπάνω καθιστούν τη χρήση του ως οργανικό λίπασμα μία βιώσιμη εναλλακτική έναντι των συμβατικών χημικών λιπασμάτων. Η χρήση του ενισχύει την κυκλική οικονομία και την ανάπτυξη βιώσιμων αγροτικών τεχνικών μαζί με την παράλληλη αποκατάσταση της υγείας του εδάφους (Poveda 2021).

Στα οργανικά λιπάσματα δεν είναι πάντα δυνατή η βραχυπρόθεσμη αύξηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων στα φυτά και της παραγωγικότητας της καλλιέργειας εξαιτίας ποικίλων λόγων όπως η ακινητοποίηση. Τα οργανικά λιπάσματα, σε αντίθεση με τα ανόργανα, έχουν αμφίβολο αντίκτυπο στην απόδοση της παραγωγής της καλλιέργειας. Αυτό οφείλεται στη μειωμένη εισροή θρεπτικών σε μορφές ήδη διαθέσιμες για την καλλιέργεια και στο ότι τα ποσά N που παρέχουν εξαρτώνται από τη χημική σύνθεση των οργανικών λιπασμάτων, το περιεχόμενό τους σε N, την αναλογία C:N και τα στοιχεία του ασταθούς C, δηλαδή ημικυτταρίνη, κυτταρίνη και λιγνίνη. Το *insect frass* όμως, σε αντίθεση με τα οργανικά λιπάσματα, χαρακτηρίζεται από την υψηλή βραχυπρόθεσμη διάθεση του N στην καλλιέργεια (Houben et al. 2021). Έχει επίσης την ικανότητα να προωθήσει την ανάπτυξη του φυτού και να μειώσει τη χρήση των ορυκτών λιπασμάτων και τις επιπτώσεις της εντατικής γεωργίας (Watson et al. 2022). Για να αποφευχθούν οι αρνητικές επιπτώσεις λόγω της συσσώρευσής του είναι δυνατή η χρήση του για την επεξεργασία του *biochar*. Ακόμη λόγω του υψηλού θρεπτικού περιεχομένου του μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως τροφή ιχθύων.

Συγκριτικά με τα οργανικά λιπάσματα ζωικής προέλευσης η ποικιλομορφία του μικροβιώματος του insect frass και η σταθερότητά του κατά την αποθήκευση είναι μεγαλύτερες. Επιπλέον η περιεκτικότητά του σε υγρασία είναι χαμηλότερη, καθιστώντας το έτσι ευκολότερο στη χρήση. Το insect frass απολυμαίνεται για την αποφυγή ανάπτυξης επιβλαβών μικροοργανισμών για την υγεία, διαδικασία που πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω όσον αφορά τις επιπτώσεις της στις ιδιότητές του (Poveda 2021). Μέσω του insect frass, το μικροβίωμα του φυτού αλληλεπιδρά με εκείνο του εντόμου, με αποτέλεσμα οι μικροοργανισμοί από την εντερική μικροχλωρίδα να μεταφέρονται στις ρίζες του φυτού. Με αυτόν τον τρόπο, σε περίπτωση που το insect frass είναι μολυσμένο, είναι δυνατή η μεταφορά παθογόνων προς στο φυτό και τελικά στο παραγόμενο προϊόν με κίνδυνο για την υγεία των καταναλωτών.

Έχουν ήδη καταγραφεί περιπτώσεις επιμόλυνσης της επιφάνειας φρέσκων προϊόντων με στελέχη βακτηρίων *E. coli* και *Salmonella* (Osimani et al. 2018).

Εικόνα 1 Το insect frass που προκύπτει από τη μαζική παραγωγή εντόμων για τη χρήση του ως ζωοτροφή, τρόφιμο και οργανικό λίπασμα στη βιώσιμη γεωργία και τα οφέλη χρήσης του (Poveda 2021).



Ιδιότητες

Ως οργανικό λίπασμα δεν έχει υπολειμματικότητα και εμπλουτίζει το έδαφος με θρεπτικές ουσίες, κυρίως με N, εύκολα αφομοιώσιμες από τους φυτικούς ιστούς. Ενισχύει την ανάπτυξη των φυτών μέσω της μεταφοράς βιομορίων και μικροοργανισμών, παρέχει αντοχή εναντίον παθογόνων και ενεργοποιεί την άμυνα εναντίον παραγόντων καταπόνησης και μασητικών εντόμων αλλά όχι μυζητικών (Poveda 2021). Πιθανώς η αύξηση της διαθεσιμότητας N να οφείλεται και στην προώθηση του turnover του αζώτου από την οργανική ύλη εξαιτίας της αυξημένης

μικροβιακής δραστηριότητας (Houben et al. 2021). Το insect frass που προκύπτει από το *Tenebrio molitor*, χάρη στην ταχεία ανοργανοποίησή του και στην παρουσία θρεπτικών ουσιών σε διαθέσιμη μορφή για τα φυτά, καθίσταται ως αποτελεσματικό λίπασμα για την παροχή N, P και K στην καλλιέργεια. Επιτυγχάνει την αύξηση της βιομάζας και της θρεπτικής της αξίας καθώς και τη διέγερση της μικροβιακής δραστηριότητας του εδάφους (Poveda 2021). Προσφέρει στο έδαφος καλύτερη ικανότητα συγκράτησης του νερού (Watson et al. 2022) και ενεργοποιεί τη δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων (Houben et al. 2021). Πρέπει επιπλέον να σημειωθεί πως το insect frass που παράγεται από ένα είδος εντόμου δεν έχει τις ίδιες επιδράσεις σε όλους τους τύπους καλλιεργειών (Poveda 2021). Έπειτα από την ενσωμάτωση του insect frass στο έδαφος η απελευθέρωση των θρεπτικών στοιχείων είναι περισσότερο ομοιογενής και εκτεταμένη από εκείνη που προκαλούν τα συμβατικά λιπάσματα (Houben et al. 2020).

Ο τρόπος παροχής θρεπτικών στοιχείων από το insect frass δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητός (Houben et al. 2021). Μετά την ενσωμάτωσή του στο έδαφος ακολουθεί η ταχύτατη ανοργανοποίησή του, καθώς το περιεχόμενό του σε ασταθή C (labile C) είναι υψηλό, ενώ σε μη ασταθή C (non-labile C) είναι χαμηλό (Houben et al. 2021). Η εφαρμογή του προκαλεί την ανταλλαγή θρεπτικών στοιχείων μεταξύ φυτού και εδάφους. Τα θρεπτικά αυτά στοιχεία είναι εύκολα αφομοιώσιμα από το ριζικό σύστημα μετά την απελευθέρωσή τους. Τα N και P υπάρχουν σε υψηλές ποσότητες στις απεκκρίσεις των εντόμων και άρα στο insect frass. Ως αποτέλεσμα προάγεται η ανάπτυξη των φυτών, η αύξηση της ολικής συγκέντρωσης αζώτου και η συσσώρευση ανόργανου και αμμωνιακού αζώτου στα φύλλα. Ωστόσο έπειτα από την εφαρμογή τους σε δένδρα έχει παρατηρηθεί η αύξηση της συγκέντρωσης των αμινοξέων και πρωτεϊνών, ως ενίσχυση του συστήματος άμυνας, αντί εκείνης του N (Poveda 2021). Η προσθήκη insect frass στο έδαφος έχει πολύ θετικό αντίκτυπο στη γονιμότητα του εδάφους, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας θρεπτικών ουσιών και ασταθούς C (Houben et al. 2020).

Πίνακας 1 Χημικός χαρακτηρισμός του mealworm frass (Houben et al. 2020)

Organic C g kg ⁻¹	Total N g kg ⁻¹	Total K g kg ⁻¹	Total P g kg ⁻¹	Total Cu mg kg ⁻¹	Total Zn mg kg ⁻¹
393	50	17	20	10	94.2
pH	EC dS m ⁻¹	Soluble fraction %Corg	Hemicellulose-like fraction %Corg	Cellulose-like fraction %Corg	Lignin-like fraction %Corg
5.8	5.3	49.3	31	15.2	4.4

Η διαθεσιμότητα και το περιεχόμενο του insect frass εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες συνιστά η σύνθεση της τροφής των larvae ή larval feedstock (Watson et al. 2022), η οποία θα καθορίσει το θρεπτικό περιεχόμενο του insect frass και τη δυνατότητα αξιοποίησής του ως λίπασμα (Poveda 2021). Η διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων του insect frass επηρεάζεται πιθανώς από την επεξεργασία και αποθήκευσή του (Watson et al. 2022).

Το insect frass μπορεί να παραγάγει χημικές ενώσεις που γίνονται αντιληπτές από άλλα έντομα επηρεάζοντας έτσι τις αποικίες τους (Osimani et al. 2018).

Χρήση τους ως εδαφοβελτιωτικό

Αμέσως μετά την ενσωμάτωση του insect frass στο έδαφος πραγματοποιείται ταχύτατα η αποσύνθεσή του και η ανοργανοποίηση των C και N. Έπειτα οι ρυθμοί μειώνονται. Πιθανώς οι αρχικοί υψηλοί ρυθμοί ανοργανοποίησης να οφείλονται στην υψηλή συγκέντρωση ασταθούς C που προκαλεί την έντονη μικροβιακή δραστηριότητα (Houben et al. 2020, Gebremikael et al. 2022, Watson et al. 2022). Η παροχή του C στο φυτό είναι άμεση ενώ εκείνη των N-P-K έμμεση με την απελευθέρωσή τους ελέγχεται από τις εκκρίσεις των ριζών. Επιπρόσθετα το insect frass επιφέρει τη σημαντική μείωση του εδαφικού pH, πιθανώς λόγω της όξινης φύσης του και της ταχείας αποσύνθεσής του που οδηγεί στην απελευθέρωση CO₂ και οργανικών οξέων. Οι συγκεντρώσεις P και K καταγράφηκαν υψηλότερες πρώτα στις μεταχειρίσεις με τα χημικά λιπάσματα και έπειτα σε εκείνες με το insect frass. Η παροχή των θρεπτικών αυτών στοιχείων είναι το ίδιο ικανοποιητική και στις δύο περιπτώσεις. Το ότι οι μικρότερες συγκεντρώσεις P και K εντοπίζονται στις μεταχειρίσεις του μάρτυρα φανερώνει πως τα στοιχεία αυτά υπήρχαν ήδη σε διαθέσιμη μορφή κατά την εφαρμογή του χημικού λιπάσματος και του insect frass (Houben et al. 2020). Καθώς μεγάλο μέρος του οργανικού N του insect frass είναι ουρεϊκό καθίσταται κατάλληλο στη χρήση του ως λίπασμα αργής απελευθέρωσης (Watson et al. 2022).

Μερικά πειράματα φανερώνουν και τις αρνητικές επιδράσεις του insect frass στις διαδικασίες του εδάφους και στην ανάπτυξη του φυτού. Έχει καταγραφεί πως όταν εφαρμόζεται σε μεγάλη ποσότητα μπορεί να προκαλέσει τη συσσώρευση νιτρικών, την αναστολή βλάστησης σπόρων, είτε λόγω αλατότητας είτε εξαιτίας της τοξικότητας από την αμμωνία, και την αδυναμία αντιμετώπισης αβιοτικών καταπονήσεων (Watson et

al. 2022). Επιπλέον η ταχύτατη ανοργανοποίησή του μπορεί να επιφέρει αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες και να προκαλέσει σημαντική απώλεια N στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα (Houben et al.2021, Watson et al. 2022). Όσον αφορά την προσθήκη του στην καλλιέργεια, όταν γίνεται πολύ πριν τη σπορά ή σε μεγαλύτερη ποσότητα από την αναγκαία, ενδέχεται να προκαλέσει, ως γνωστόν για τα οργανικά λιπάσματα, σημαντική απώλεια ανοργανοποιημένου N. Για αυτό είναι σημαντική η εφαρμογή του insect frass στην απαραίτητη ποσότητα και κατά τη σπορά (Houben et al. 2021).

Για τους παραπάνω λοιπόν λόγους είναι αναγκαία η περαιτέρω μελέτη της χρήσης του insect frass σε μεγαλύτερη κλίμακα, σε πλήθος καλλιεργειών και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ώστε να επιβεβαιωθεί η αειφόρος χρήση του όσον αφορά την παροχή N (Houben et al.2021, Watson et al. 2022).

1.4. Καλλιέργεια σπανακιού

Γεωγραφική εξάπλωση

Το σπανάκι (*Spinacia oleracea* L.) είναι λαχανικό ή κηπευτικό φυτό και ανήκει στα φυλλώδη λαχανικά, τα οποία καλλιεργούνται για τη βρώση τόσο του φυλλώματος όσο και του τρυφερού βλαστού τους. Πλέον ανήκει στην οικογένεια Amaranthaceae και υποοικογένεια Chenopodiaceae μαζί με το βλίτο, σέσκουλο και παντζάρι (Σάββας 2016). Τα κηπευτικά αυτής της οικογένειας είναι πολύ πλούσια σε θρεπτικά στοιχεία (Ολύμπιος 2019). Η συστηματική κατάταξη του σπανακιού είναι η εξής:

Εικόνα 2 Συστηματική κατάταξη του σπανακιού - *Spinacia oleracea* L. (ITIS 2023).

Taxonomic Hierarchy	
Kingdom	Plantae – plantes, Planta, Vegetal, plants
Subkingdom	Viridiplantae – green plants
Infra kingdom	Streptophyta – land plants
Superdivision	Embryophyta
Division	Tracheophyta – vascular plants, tracheophytes
Subdivision	Spermatophytina – spermatophytes, seed plants, phanerogames
Class	Magnoliopsida
Superorder	Caryophyllanae
Order	Caryophyllales
Family	Amaranthaceae – pigweed, amaranthes
Genus	Spinacia L. – spinach
Species	<i>Spinacia oleracea</i> L. – spinach

Σύμφωνα με τον Vavilon (1992), το κέντρο διασποράς του σπανακιού εξαπλώνεται στην περιοχή της κεντρικής Ασίας και πιθανότατα στην Περσία. Έχει καταγραφεί η ύπαρξή του μόνο ως καλλιεργούμενο φυτό, του οποίου η καλλιέργεια πιθανότατα να ξεκίνησε κατά την περίοδο της ελληνικής και ρωμαϊκής κυριαρχίας. Σύμφωνα με τον De Candolle (1885) το σπανάκι πιθανολογείται να προέρχεται από το αυτοφύες σε χώρες της κεντρικής και ανατολικής Ασίας, *Spinacia tetrandra*.

Το 94,9% της παγκόσμιας παραγωγής σπανακιού παράγεται στην Ασία, με την Κίνα να παράγει το 90%. Στην Ελλάδα η παραγωγή σπανακιού είναι σημαντική και θα ήταν δυνατόν να πραγματοποιούνταν σημαντικές εξαγωγές σπανακιού την περίοδο του χειμώνα για τις βορειότερες χώρες της Ευρώπης, χάρη στην υψηλή ποιότητα του παραγόμενου σπανακιού το οποίο καλλιεργείται σε συνθήκες ηλιοφάνειας και ήπιων θερμοκρασιών (Ολύμπιος 2019). Η καλλιέργεια σπανακιού στην Ελλάδα ανέρχεται στα 41.000 στρέμματα σε υπαίθριες καλλιέργειες με συνολική παραγωγή τους 44.000 τόνους (ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2007).

Θρεπτικό περιεχόμενο

Η θρεπτική αξία του σπανακιού ανά 100 g νωπού προϊόντος φανερώνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2 Σύσταση θρεπτικών στοιχείων ανά 100g ώριμου σπανακιού (USDA, 2021).

Θρεπτικό στοιχείο	Περιεκτικότητα ανά 100 g edwdimou tmimatos
Νερό	91,4%
Θερμίδες	23 Kcal
Υδατάνθρακες	3,63%
Λίπη	0,39%
Πρωτεΐνες	2,86%
Βιταμίνη Α	9377 IU
Βιταμίνη Β1	0,078 mg
Βιταμίνη Β2	0,189 mg
Βιταμίνη Β3	0,724 mg
Βιταμίνη Β5	0,065 mg

Βιταμίνη B6	0,195 mg
Βιταμίνη B9	194 mg
β-καροτένιο	5626 mg
Βιταμίνη C	28,1 mg
Βιταμίνη E	2,03 mg
Βιταμίνη K	482,9 mg
Ca	99 mg
Fe	2,71 mg
Mg	79 mg
P	49 mg
K	558 mg
Na	79 mg
Zn	0,53 mg
Cu	0,13 mg
Se	1 mg
Mn	0,897 mg

Στα φυλλώδη λαχανικά το ασβέστιο εντοπίζεται σε αξιόλογες ποσότητες. Το σπανάκι είναι σημαντική πηγή των βιταμινών A, K, B9 και C (Σάββας 2016). Έχει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε φαινολικά οξέα από όλα τα φυλλώδη λαχανικά, μαζί με το μπρόκολο. Ακόμη συνιστά ένα από τα πιο πλούσια φυτά σε καροτενοειδή και λουτεΐνη, ουσίες που δρουν υπέρ της πρόληψης της εκφύλισης της ωχράς κηλίδας και του καταρράκτη (Roberts and Moreau 2016). Διαθέτει μεγάλα ποσοστά σιδήρου, φλαβονοειδών, νιασίνης, σαπωνινών και αλάτων ιωδίου. Αν και το περιεχόμενο του σπανακιού είναι πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία και βιταμίνες, περιέχει επίσης και μεγάλο ποσοστό οξαλικών και φυτικών οξέων, τα οποία οδηγούν στη μικρή απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων.

Όταν η καλλιέργειά του πραγματοποιείται με έντονη αζωτούχο λίπανση, χαμηλή ένταση φωτός και μειωμένη θερμοκρασία πραγματοποιείται συσσώρευση των νιτρικών στο φυτό τα οποία μεταφέρονται στον άνθρωπο με την κατανάλωση. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν συγκεκριμένα όρια όσον αφορά τη συγκέντρωσή τους στο φυτό, τα οποία εάν ξεπεραστούν καθιστούν την κατανάλωσή τους μη ασφαλή (Χα και Πετρόπουλος 2014).

Βοτανικά Χαρακτηριστικά

Η ρίζα του φτάνει σε βάθος 45 έως 60 εκατοστών και έτσι καθίσταται επιπολαιόριζο (Σάββας 2016). Είναι ετήσιο φυτό με ύψος έως και 30 cm, έχει κοντό βλαστό ο οποίος όταν μεγαλώνει φέρει το ανθικό στέλεχος και τα φύλλα, τα μεγαλύτερα από τα οποία εντοπίζονται στη βάση του φυτού. Τα φύλλα είναι απλά με σπειροειδή διάταξη και σχηματίζουν ροζέτα. Ορισμένα επιπλέον χαρακτηριστικά των φύλλων είναι τα εξής: στενά, αιχμηρά, λειόχειλα, παχιά, πλατιά, τρυφερά, με βαθύ πράσινο χρώμα.

Ανάλογα με την επιφάνεια του φύλλου το σπανάκι κατατάσσεται σε 3 τύπους: τον savoy - φύλλα με κυματιστή επιφάνεια, τον semi-savoy - φύλλα με ελαφρά κυματιστή επιφάνεια και τον flat/smooth leafed - φύλλα με λεία επιφάνεια. Το σχήμα του ελάσματος ποικίλλει από τριγωνικό έως ελλειπτικό, με τη βάση του να είναι λοβωτή και να εξαρτάται από την ποικιλία (Χα και Πετρόπουλος 2014).

Τα φύλλα όσο είναι ενωμένα με το μητρικό φυτό φωτοσυνθέτουν, ενώ όταν αποκοπούν από αυτό διακόπτεται η ροή νερού στο αποκομμένο μέρος το οποίο πλέον σπάνια φωτοσυνθέτει. Υπάρχουν περίπου 82 ποικιλίες σπανακιού και το μεγαλύτερο ποσοστό εκείνων που καλλιεργούνται σήμερα ανήκουν στα υβριδικά είδη (Roberts and Moreau 2016).

Ανήκει στα σταυρογονιμοποιούμενα ανεμόφιλα φυτά (Σάββας 2016) και είναι δίοικο και δικλινές. Ωστόσο υπάρχουν και ποικιλίες μόνοικων, μόνοικων δικλινών ή τέλειων φυτών σπανακιού. Τα τελευταία είναι σπάνια. Τα αρσενικά διαθέτουν περιάνθιο με 2-5 λοβούς και 3-5 στήμονες ενώ τα θηλυκά στερούνται περιανθίου αλλά περιβάλλονται από 2-4 βρακτιοειδή φύλλα. Τα φύλλα αυτά θα καλύψουν με σκληρό, και μερικές φορές αγκαθωτό, περίβλημα τον καρπό που θα παραχθεί, ο οποίος θα είναι μονοσπέρμιο κάρυο. Οι ποικιλίες που συναντιούνται στο εμπόριο έχουν λείους καρπούς. Ο βιολογικός κύκλος του σπανακιού διαθέτει 2 στάδια. Το πρώτο είναι εκείνο της ανάπτυξης των φύλλων, με σύντομη διάρκεια 35-40 ημερών και το δεύτερο είναι το αναπαραγωγικό. Το δεύτερο στάδιο αποφεύγεται κατά την παραγωγή και το εμπόριο των φύλλων του σπανακιού, ενώ επιδιώκεται για τη σποροπαραγωγή (Χα και Πετρόπουλος 2014). Για αυτό και η συγκομιδή του σπανακιού για την κατανάλωση των φύλλων του πραγματοποιείται στο στάδιο της ροζέτας (Σάββας 2016).

Απαιτήσεις σε κλίμα και έδαφος

Είναι λαχανικό ψυχρής εποχής, δηλαδή κατάγεται από περιοχές με ψυχρότερο κλίμα (Σάββας 2016). Καλλιεργείται σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο και αναπτύσσεται σε κλίμα ψυχρό και υγρό και σε χαμηλές θερμοκρασίες (Ολύμπιος 2019). Αναπτύσσοντας αντοχή έως και τους -9°C καθίσταται πολύ ανθεκτικό στον παγετό, κατά το βλαστικό στάδιο, χωρίς να προκαλούνται σοβαρές ζημιές. Είναι δυνατόν να αναπτυχθεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες περίπου $7-12^{\circ}\text{C}$, με την άριστη να επιτυγχάνεται στους $18-30^{\circ}\text{C}$. Όταν επικρατούν θερμοκρασίες άνω των 27°C ελαττώνεται η βλαστική ανάπτυξη του φυτού (Χα και Πετρόπουλος 2014, Σάββας 2016). Με βάση τη γνώση των απαιτήσεων του σπανακιού σε θερμοκρασία, μπορεί να υπολογιστεί η εποχή σποράς ή φύτευσης σε μια περιοχή καθώς και ο καθορισμός των προγραμμάτων αμειψισποράς. Συνήθως στην Ελλάδα η σπορά πραγματοποιείται μέσα καλοκαιριού έως και το φθινόπωρο με σκοπό η παραγωγή να συγκομιστεί φθινόπωρο ή χειμώνα και έως τα μέσα άνοιξης (Σάββας 2016). Επίσης η καλύτερη περίοδο συγκομιδής είναι εκείνη κατά την οποία οι φυτικοί ιστοί έχουν συγκρατήσει το μέγιστο ποσοστό υγρασίας και βρίσκονται σε σπαργή. Ο παράγοντας αυτός παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της περιόδου συγκομιδής ιδιαίτερα για τα φυλλώδη λαχανικά που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα υγρασίας και λόγω των επιδράσεων του περιβάλλοντος στη σπαργή (Σφακιωτάκης 2004).

Το σπανάκι έχει μέτρια ευαισθησία στην αλατότητα. Είναι φυτό μεγάλης φωτοπεριόδου, η οποία επηρεάζει την ποιότητα του τελικού προϊόντος, και συνεπώς η άνθισή του επιτυγχάνεται με την προϋπόθεση πως η διάρκεια της ημέρας θα είναι μεγάλη (Σάββας 2016). Συνίσταται η καλλιέργειά του σε εδάφη που είναι ελαφριά, γόνιμα, διαθέτουν ικανοποιητική ικανότητα συγκράτησης υγρασίας και περιέχουν μεγάλα ποσοστά οργανικής ουσίας. Οι επιθυμητές τιμές pH εδάφους κυμαίνονται μεταξύ 6,5-7 (Χουλιάρης 2003) καθώς τα φυτά παρουσιάζουν ευαισθησία στην οξύτητα του εδάφους.

Ο πολλαπλασιασμός του σπανακιού πραγματοποιείται αποκλειστικά με σπόρο και απευθείας στο χωράφι. Η καλλιέργεια έχει ανάγκη από μέτρια λίπανση και συνίσταται και η ετήσια προσθήκη κοπριάς. Επιπλέον ως φυτό ταχείας ανάπτυξης παρουσιάζει πολύ μεγάλη ευαισθησία στην καταπόνηση όταν υπάρχει έλλειμμα νερού.

Όσον αφορά τη σπορά του σπανακιού, πραγματοποιείται στην Ελλάδα από μέσα Αυγούστου έως αρχές Φεβρουαρίου (Χα και Πετρόπουλος 2014). Συγκεκριμένα στις εύκρατες περιοχές η σπορά γίνεται τέλη καλοκαιριού με χειμώνα έως και τις αρχές καλοκαιριού του επόμενου έτους, ενώ στις βορειότερες αργά την άνοιξη έως και το καλοκαίρι με φθινόπωρο και εάν γίνεται σε θερμοκήπιο πραγματοποιείται κατά τους χειμερινούς μήνες ελλείψει θέρμανσης (Ολύμπιος 2019). Η ωρίμανση της καλλιέργειας ολοκληρώνεται σε 37-70 ημέρες από τη σπορά (Χα και Πετρόπουλος, 2014).

Για τη διατήρηση και αποθήκευσή του απαιτεί άμεση ψύξη μετά τη συγκομιδή, εξαιτίας της έντονης διαπνοής που έχει. Πρέπει να δίνεται προσοχή και στον αποθηκευτικό χώρο καθώς είναι φυτό ιδιαίτερα ευαίσθητο στο αιθυλένιο (Χα και Πετρόπουλος 2014). Λόγω του γεγονότος ότι τα θρεπτικά αποθέματα είναι περιορισμένα στα φυλλώδη λαχανικά, έχουν περιορισμένο χρόνο συντήρησης και απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες για το μέγιστο περιορισμό απωλειών εξαιτίας της αναπνοής (Σφακιωτάκης 2004).

Χρήσεις

Μια διατροφή πλούσια σε φρούτα και λαχανικά, ιδιαίτερα φυλλώδη, θωρακίζει τον ανθρώπινο οργανισμό εναντίον χρόνιων ασθενειών, παχυσαρκίας και καρδιαγγειακών νόσων.

Χρησιμοποιείται για την ανθρώπινη κατανάλωση σε ωμή ή μαγειρεμένη μορφή (Roberts and Moreau 2016). Ο τύπος savoy προορίζεται για νωπή κατανάλωση και είναι αρκετά δημοφιλής, ο τύπος semi-savoy για μεταποίηση και νωπή κατανάλωση ενώ ο flat/smooth-leaved για κονσερβοποίηση, προϊόντα κατάψυξης, παιδικές τροφές και τρόφιμα που υπόκεινται σε επεξεργασία (Χα και Πετρόπουλος 2014).

Το σπανάκι περιέχει φαινολικές ενώσεις, οι οποίες δρουν ως: μόρια σηματοδότησης, αντιοξειδωτικές ουσίες και έναντι μικροβίων, ιών και μυκήτων. Επιπλέον τα φυτοχημικά και οι βιοδραστικές ενώσεις που περιέχει, έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν τις δραστικές ρίζες οξυγόνου, ώστε να μην προκληθεί οξειδωτική βλάβη σε μακρομόρια, και να ρυθμίζουν την έκφραση και δραστηριότητα των γονιδίων που συμμετέχουν στο μεταβολισμό, στον πολλαπλασιασμό, στη φλεγμονή και στην αντιοξειδωτική άμυνα. Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά το

σπανάκι διαθέτει ιδιότητες εναντίον του καρκίνου και της παχυσαρκίας, καθίσταται ως τρόφιμο με χαμηλό γλυκαιμικό δείκτη και μειώνει το επίπεδο των λιπιδίων και των λιποπρωτεϊνών στον οργανισμό (Roberts and Moreau 2016). Τέλος προσφέρει τόνωση, καταπράυνση και διαθέτει δράση: διουρητική, κατά της αναιμίας και υπέρ της ομαλής λειτουργίας του εντέρου (Χα και Πετρόπουλος 2014).

Μολονότι το σπανάκι διαθέτει πολλά ευεργετικά χαρακτηριστικά, η κατανάλωσή του δεν είναι τόσο ευρεία όσο εκείνης των υπόλοιπων φυλλωδών λαχανικών (Roberts and Moreau 2016).

1.5. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη των υπολειμμάτων της εκτροφής του εντόμου *Tenebrio molitor*, ως εδαφοβελτιωτικό υλικό σε καλλιέργεια σπανακιού (*Spinacia oleracea*). Για τον λόγο αυτό συλλέχθηκαν πληροφορίες από τη βιβλιογραφία για: τους βιογεωχημικούς κύκλους θρεπτικών, αναγκαίων για το φυτό, τα οργανικά υπολείμματα, τα αποχωρήματα εντόμων-insect frass και την καλλιέργεια σπανακιού. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα λοιπόν φανερώθηκαν τα οφέλη της χρήσης του insect frass ως οργανικό λίπασμα σε ορισμένες καλλιέργειες είτε με τη μεμονωμένη εφαρμογή του είτε μαζί με την εφαρμογή συμβατικών χημικών λιπασμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις εξαιρέθηκαν ή μειωνόταν η τελική εισροή χημικών λιπασμάτων με την παράλληλη αξιοποίηση του παραπροϊόντος μιας ολοένα αναπτυσσόμενης βιομηχανίας, εκείνης της εκτροφής εντόμων. Οι εφαρμογές αυτές φανέρωσαν αυξήσεις στις αποδόσεις της καλλιέργειας με την ταυτόχρονη θρέψη του φυτού και προστασία του εδάφους καθώς και της γονιμότητας και του μικροβιώματός του. Ωστόσο, εντοπίστηκαν και σημαντικά μειονεκτήματα κατά τη χρήση του insect frass που σχετίζονται με το περιεχόμενό του σε ουσίες που προσβάλλουν το έδαφος και την καλλιέργεια όπως είναι τα βαρέα μέταλλα και ορισμένοι παθογόνοι μικροοργανισμοί. Για αυτόν τον λόγο έγινε αντιληπτή η ανάγκη περαιτέρω μελέτης της εφαρμογής του σε μεγαλύτερες εκτάσεις καλλιέργειας στον αγρό και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Κεφάλαιο 2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1. Πειραματικός σχεδιασμός

Μελετήθηκε η χρήση του insect frass από το έντομο *Tenebrio molitor*, ως εδαφοβελτιωτικό υλικό, σε καλλιέργεια σπανακιού (*Spinacia oleracea*), με την εφαρμογή του να πραγματοποιείται σε διαφορετικές δόσεις.

Το πείραμα διεξήχθη στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η παροχή του insect frass που χρησιμοποιήθηκε έγινε από το Εργαστήριο Εντομολογίας του Τμήματος. Συνολικά υπήρξαν 5 μεταχειρίσεις, καθεμία από τις οποίες διέθετε από 10 φυτοδοχεία με σπανάκι, Συνεπώς συνολικά υπήρξαν 50 φυτοδοχεία με φυτά σπανακιού, εκ των οποίων τα 49 φυτά επιβίωσαν. Σε όλα τα φυτοδοχεία από όλες τις μεταχειρίσεις πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες εδαφολογικές και φυλλοδιαγνωστικές αναλύσεις για τους σκοπούς του πειράματος.

Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ήδη κατεργασμένο και εφαρμόστηκε έπειτα από προσμίξεις σε κάθε φυτοδοχείο. Η 1^η μεταχείριση αφορούσε το Negative Control (NC) και αποτελούταν από έδαφος και περλίτη, η 2^η αφορούσε το Positive Control (PC) και εκτός από έδαφος και περλίτη περιείχε και ψεκασμούς εμπορικού χημικού σκευάσματος. Οι προσμίξεις των υπόλοιπων τριών μεταχειρίσεων περιείχαν το έδαφος, τον περλίτη και το insect frass σε τρεις διαφορετικές δόσεις. Η αναλογία περλίτη:εδάφους που προστέθηκε ήταν 50:50 και είχε ως σκοπό τη βελτίωση του πορώδους του εδάφους.

Οργάνωση και προετοιμασία του πειράματος

Αρχικά επιλέχθηκαν 50 φυτοδοχεία με οπές αποστράγγισης και 50 πιάτα αποστράγγισης. Στη βάση του φυτοδοχείου τοποθετήθηκε διηθητικό χαρτί, ώστε να περιοριστούν οι απορροές θρεπτικών στοιχείων, νερού και εδάφους.

Εντός των φυτοδοχείων προστέθηκε το κατάλληλο μείγμα εδάφους ανάλογα με τη μεταχείριση. Συγκεκριμένα υπήρχαν 5 διαφορετικές μεταχειρίσεις, με 10

φυτοδοχεία ανά μεταχείριση, με τις εξής ονομασίες και τα αντίστοιχα μείγματα εδάφους:

- Negative Control (NC): 800 mL εδάφους και 800 mL περλίτη
- Positive Control (PC): 800 mL εδάφους, 800 mL περλίτη και ψεκασμοί υπέργειου τμήματος φυτού με χημικό λίπασμα
- Insect frass 0,25%: 800 mL εδάφους, 800 mL περλίτη και 2,5 g Frass
- Insect frass 0,50%: 800 mL εδάφους, 800 mL περλίτη και 5 g Frass
- Insect frass 1%: 800 mL εδάφους, 800 mL περλίτη και 10 g Frass

Για την παραγωγή του μείγματος εδάφους τα συστατικά κάθε μεταχείρισης αναμειγνύονταν σε ένα δοχείο και όταν το μείγμα ήταν ομοιογενές και λάμβανε την τελική του μορφή, μοιραζόταν στα αντίστοιχα φυτοδοχεία της μεταχείρισης. Τα φυτοδοχεία τοποθετήθηκαν σε σειρές ανά μεταχείριση. Έπειτα ακολούθησε η titλοδότηση των φυτοδοχείων με το όνομα της μεταχείρισης και τον αριθμό του φυτοδοχείου.

Στα φυτά της μεταχείρισης PC πραγματοποιήθηκαν συνολικά 4 ψεκασμοί με χημικό αζωτούχο λίπασμα ως εξής:

- Την ημέρα 4 του πειράματος έγινε ψεκασμός με λίπασμα 30-10-10 ποσότητας 50mL
- Την ημέρα 10 του πειράματος έγινε ψεκασμός με λίπασμα 26-0-0 ποσότητας 50mL
- Την ημέρα 27 του πειράματος έγινε ψεκασμός με λίπασμα 26-0-0 ποσότητας 50mL
- Την ημέρα 50 του πειράματος έγινε ψεκασμός με λίπασμα 26-0-0 ποσότητας 50mL

Τα φυτά σπανακιού (*Spinacia oleracea*) που χρησιμοποιήθηκαν για τις απαιτήσεις του πειράματος, χορηγήθηκαν από το Εργαστήριο Μορφολογίας και Ανατομίας Φυτών του Τμήματος, ως ήδη ανεπτυγμένα φυτά έτοιμα για μεταφύτευση. Συνεπώς με την παραλαβή τους πραγματοποιήθηκε η μεταφύτευσή τους στα φυτοδοχεία και ακολούθησε το πρώτο πότισμα των φυτών, με την πλήρωση του φυτοδοχείου σε νερό. Η άρδευση κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκε με βάση τις ανάγκες του φυτού σε νερό.

2.2. Μέθοδοι ανάλυσης

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά τα σκεύη, αντιδραστήρια και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των αναλύσεων και τη λήψη των αποτελεσμάτων. Οι αναλύσεις των φυτικών και εδαφικών δειγμάτων διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Εδαφολογίας του Τμήματος.

2.2.1. Φυτό

2.2.1.1. Συγκομιδή

Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις που βρίσκονταν τα φυτοδοχεία. Από τα 50 φυτά επιβίωσαν τα 49 και συνεπώς οι αναλύσεις έγιναν σε εκείνα. Ολόκληρο το φυτό μαζί με το ριζικό σύστημα αφαιρέθηκε από τα φυτοδοχεία κατά τη συγκομιδή, ξεπλύθηκε με νερό ώστε να απομακρυνθούν τα εδαφικά τεμαχίδια που υπήρχαν προσκολλημένα σε αυτό και μεταφέρθηκε στο εργαστήριο.

Εκεί το φυτικό υλικό πλύθηκε με απιονισμένο νερό, τοποθετήθηκε σε χάρτινες σακούλες με την ονομασία της κάθε επανάληψης για κάθε μεταχείριση και τελικά τοποθετήθηκε σε φούρνο για 2-3 ημέρες στους 70 °C για να απομακρυνθεί όλη η περιεχόμενη υγρασία του φυτού. Ακολούθησε η κονιορτοποίηση του αποξηραμένου φυτικού υλικού σε γουδί και η αποθήκευση του παραγόμενου κονιορτοποιημένου υλικού σε φιαλίδια τύπου falcon έως τη χρήση του στις αναλύσεις του φυτικού υλικού.

2.2.1.2. Μέτρηση ολικού αζώτου (N)

Το ολικό άζωτο των φυτών μετρήθηκε στο υπέργειο και υπόγειο μέρος των φυτών. Συνολικά υπολογίστηκε σε 38 φυτικά δείγματα, 19 του υπέργειου και 19 του υπόγειου φυτικού τμήματος. Υπολογίστηκε η τιμή του ολικού αζώτου σε 3 μεικτές επαναλήψεις για τη μεταχείριση του Negative Control (NC) και σε 2 μεικτές

επαναλήψεις για τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, λόγω περιορισμένης ποσότητας δείγματος.

Ο υπολογισμός του ολικού αζώτου πραγματοποιήθηκε κατά Kjeldahl, διαδικασία η οποία περιλαμβάνει κατά σειρά τις διαδικασίες της πέψης, της απόσταξης και της ογκομέτρησης.

Κατά την πέψη χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες πέψης 500 mL, πυκνό διάλυμα H_2SO_4 , ταμπλέτες Kjeltab σεληνίου, οι οποίες περιέχουν 200 mg CuSO_4 και 10 g K_2SO_4 , και ταμπλέτες antifoam, για την αποφυγή έντονου αφρισμού των δειγμάτων στην πέψη.

Σε ζυγαριά ακριβείας ζυγίστηκαν για κάθε δείγμα 0,5 ή 1 g μείγματος κονιορτοποιημένων φυτών, ανάλογα με τη διαθέσιμη ποσότητά τους. Αυτή η ποσότητα κάθε δείγματος καταγράφηκε ακριβώς και προστέθηκε σε σωλήνα πέψης. Εντός κάθε σωλήνα πέψης προστέθηκαν επίσης 20 mL πυκνού διαλύματος H_2SO_4 , 2 ταμπλέτες Kjeltab σεληνίου και 1 ταμπλέτα antifoam. Οι σωλήνες πέψης τοποθετήθηκαν έπειτα σε block πέψης, μαζί με το standard διάλυμα το οποίο περιείχε τα ίδια συστατικά που προστέθηκαν και στους υπόλοιπους σωλήνες πέψης εκτός του φυτικού δείγματος. Πριν την έναρξη του προγράμματος πέψης, ο απαγωγός τέθηκε σε λειτουργία και κάθε σωλήνας πωματίστηκε με ογκομετρική φιάλη 50 mL ώστε να πραγματοποιηθεί η υγροποίηση και η συλλογή των αναθυμιάσεων. Έπειτα έγινε εκκίνηση του Προγράμματος 1 στο block πέψης στο Εργαστήριο Εδαφολογίας του Τμήματος, το οποίο περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Προθέρμανση στους 150 °C για 10 λεπτά
- Πέψη στους 290 °C για 10 λεπτά
- Πέψη στους 420 °C για 50 λεπτά, έως τον αποχρωματισμό των δειγμάτων

Κατά την πέψη επιτυγχάνεται η ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου και η παραγωγή θειικής αμμωνίας. Με το τέλος της διαδικασίας της πέψης, οι σωλήνες πέψης ανασηκώθηκαν από το block ώστε η θερμοκρασία των δειγμάτων να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου, τοποθετήθηκαν σε falcon και πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της απόσταξης.

Η απόσταξη πραγματοποιήθηκε στο σύστημα αυτόματης απόσταξης της συσκευής Kjeldahl. Αρχικά τέθηκε σε λειτουργία η συσκευή ώστε να προθερμανθεί

για 3 min. Πριν την απόσταξη των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε απόσταξη σε standard δείγμα για την προετοιμασία της συσκευής και την απομάκρυνση πιθανών υπολειμμάτων από προηγούμενη χρήση. Ακολούθησε η προσθήκη 50 mL απιονισμένου H_2O εντός των σωλήνων πέψης κάθε εκχυλισμένου φυτικού δείγματος.

Έγινε έπειτα η μεταφορά του κάθε δείγματος σε καθαρό σωλήνα πέψης και η τοποθέτησή του στην υποδοχή της συσκευής. Για κάθε απόσταξη δείγματος προστέθηκαν 25 mL βορικού οξέος 4% (H_3BO_3 4%) σε κωνική φιάλη των 250 mL, η οποία τοποθετήθηκε έπειτα στην αντίστοιχη υποδοχή της συσκευής απόσταξης. Το βορικό οξύ δημιούργησε σύμπλοκα με την πτητική αμμωνία που προέκυψε από την πέψη, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην παραλαβή της, στην αποφυγή διαφυγής της σε αέρια μορφή και στη σταθεροποίησή της. Επιπλέον η συσκευή διέθετε 2 λάστιχα εκ των οποίων το πρώτο βυθίστηκε εντός ενός μπετονιού με διάλυμα alkali (40% NaOH) και το δεύτερο εντός ενός μπετονιού με απιονισμένο νερό. Η θειική αμμωνία $((NH_4)_2SO_4)$ αντέδρασε με περίσσεια καυστικού νατρίου (NaOH) και παρήγαγε αμμωνία (NH_3). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη συγκράτηση της αμμωνίας στο απόσταγμα που τελικά παραλήφθηκε στην κωνική φιάλη στο τέλος της απόσταξης.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη εκκίνηση της συσκευής και η διαδικασία της απόσταξης διήρκησε 5 min. Με το τέλος της απόσταξης λήφθηκαν για κάθε δείγμα 120-150 mL αποστάγματος εντός της κάθε κωνικής φιάλης.

Η ογκομέτρηση αποτελεί το τελικό βήμα στη διαδικασία που πραγματοποιείται για τη μέτρηση του ολικού αζώτου του φυτικού δείγματος και αφορά την εξουδετέρωση της αμμωνίας με οξύ για την παραγωγή άλατος.

Το απόσταγμα που παραλήφθηκε και βρισκόταν εντός της κωνικής φιάλης είχε διαφανές χρώμα. Έπειτα από την προσθήκη 5 σταγόνων μεικτού δείκτη από πράσινο bromocresol και κόκκινο methyl εντός της κωνικής φιάλης, το διάλυμα έλαβε πράσινο χρωματισμό. Στην προχοΐδα τοποθετήθηκε 0,1103 N H_2SO_4 και ο όγκος του οξέος καταγράφηκε ακριβώς (V_A). Καθ' όλη τη διάρκεια της ογκομέτρησης, το διάλυμα εντός της κωνικής φιάλης αναδευόταν συνεχώς με μαγνητικό αναδευτήρα. Η εκκίνηση της ογκομέτρησης πραγματοποιήθηκε με την απελευθέρωση σταγόνων οξέος από την προχοΐδα εντός της κωνικής φιάλης και η διαδικασία ολοκληρώθηκε όταν το διάλυμα της κωνικής φιάλης έλαβε ροζ χρώμα. Τότε έγινε και η καταγραφή ξανά της ένδειξης του όγκου της προχοΐδας (V_B) και υπολογίστηκε η διαφορά μεταξύ της αρχικής και

τελικής τιμής ($V_A - V_B$) με αποτέλεσμα να προκύψουν τα mL οξέος που χρησιμοποιήθηκαν για την ογκομέτρηση κάθε δείγματος.

Ο τελικός υπολογισμός του ολικού αζώτου για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκε με τον εξής τύπο: $N\% = [1,401 \cdot N_A \cdot (V_A - V_B)] / S$, όπου N_A είναι η κανονικότητα του διαλύματος ογκομέτρησης, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με 0,1103 και S είναι το βάρος του φυτικού δείγματος που προστέθηκε στους σωλήνες πέψης σε g.

2.2.1.3. Μέτρηση φωσφόρου (P)

Ο φωσφόρος μετρήθηκε σε φυτά από 5 επαναλήψεις κάθε μεταχείρισης, συνολικά δηλαδή σε 25 φυτά. Από κάθε φυτό λήφθηκε το υπέργειο και υπόγειο μέρος, για το καθένα από τα οποία υπολογίστηκε ο P, έχοντας ως αποτέλεσμα 50 μετρήσεις συνολικά για τον P.

Πρώτα πραγματοποιήθηκαν οι ζυγίσεις 0,1 g για κάθε δείγμα φύλλου-βλαστού και 0,1 g για κάθε δείγμα ρίζας σπανακιού. Αρχικά η ποσότητα φυτικού υλικού που ζυγίστηκε, τοποθετήθηκε σε πορσελάνινες κάψες, οι οποίες μεταφέρθηκαν στον φούρνο όπου και παρέμειναν για 5 h στους 500°C, ώστε να υποστούν αποτέφρωση. Την επόμενη ημέρα, όταν τα δείγματα είχαν φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου, έγινε η παραλαβή της τέφρας των φυτικών δειγμάτων με τη χρήση 15 mL HCl 20%. Ακολούθησε η διήθηση του διαλύματος που είχε παραληφθεί σε ογκομετρική φιάλη των 50 mL και με το τέλος της διήθησης έγινε η πλήρωση αυτής της φιάλης με απιονισμένο νερό, μέχρι ο τελικός όγκος να γίνει 50 mL. Αφού ανακινήθηκε καλά, το πυκνό διάλυμα κάθε δείγματος αραιώθηκε κατά 20 φορές. Το πυκνό και αραιό δείγμα κάθε επανάληψης που μετρήθηκε διατηρήθηκε σε φιαλίδιο τύπου falcon.

Η μέτρηση του φωσφόρου έγινε με την ανάπτυξη κυανού χρώματος στα αραιωμένα δείγματα αποτεφρωμένου φυτικού ιστού που δημιουργήθηκαν παραπάνω και σε standard δείγματα.

Αρχικά αναπτύχθηκε το κυανό χρώμα των standard δειγμάτων σε ογκομετρικές φιάλες των 25 mL. Χρησιμοποιήθηκαν 6 φιάλες συνολικά στην καθεμία από τις οποίες

προστέθηκε διαφορετική ποσότητα διαλύματος 5 ppm P. Αναλυτικότερα, η διαδικασία ήταν η εξής:

- Στη φιάλη η οποία είχε τιτλοδοτηθεί με τον αριθμό 1 προστέθηκαν 0 mL διαλύματος 5 ppm P και το πρότυπο διάλυμα είχε τελικά συγκέντρωση P 0 ppm
- Στη φιάλη η οποία είχε τιτλοδοτηθεί με τον αριθμό 2 προστέθηκαν 0,5 mL διαλύματος 5 ppm P και το πρότυπο διάλυμα είχε τελικά συγκέντρωση P 0,1 ppm
- Στη φιάλη η οποία είχε τιτλοδοτηθεί με τον αριθμό 3 προστέθηκαν 1 mL διαλύματος 5 ppm P και το πρότυπο διάλυμα είχε τελικά συγκέντρωση P 0,2 ppm
- Στη φιάλη η οποία είχε τιτλοδοτηθεί με τον αριθμό 4 προστέθηκαν 2 mL διαλύματος 5 ppm P και το πρότυπο διάλυμα είχε τελικά συγκέντρωση P 0,4 ppm
- Στη φιάλη η οποία είχε τιτλοδοτηθεί με τον αριθμό 5 προστέθηκαν 4 mL διαλύματος 5 ppm P και το πρότυπο διάλυμα είχε τελικά συγκέντρωση P 0,8 ppm
- Στη φιάλη η οποία είχε τιτλοδοτηθεί με τον αριθμό 6 προστέθηκαν 5 mL διαλύματος 5 ppm P και το πρότυπο διάλυμα είχε τελικά συγκέντρωση P 1,0 ppm

Έπειτα σε καθεμία από τις 6 παραπάνω φιάλες προστέθηκαν 2,5 mL ασκορβικού οξέος. Ακολούθησε η προσθήκη 11 mL 1 M NaOH σε κάθε φιάλη ώστε το pH να ρυθμιστεί στην τιμή 7. Τέλος πραγματοποιήθηκε η προσθήκη H₂O έως τη χαραγή, με το διάλυμα κάθε φιάλης να έχει τελικό όγκο 25 mL. Αφού τα δείγματα αφέθηκαν για 30 min ώστε το κυανό χρώμα να αναπτυχθεί σε αυτά, ακολούθησε η μέτρηση της συγκέντρωσης P στο φασματοφωτόμετρο και σχεδιάστηκε η καμπύλη βαθμονόμησης.

Ακολούθησε η ανάπτυξη κυανού χρώματος στα εκχυλίσματα αποτέφρωσης και η μέτρησή τους στο φασματοφωτόμετρο. Χρησιμοποιήθηκαν ξανά ογκομετρικές φιάλες των 25 mL στην καθεμία από τις οποίες προστέθηκαν: ποσότητα εκχυλίσματος αποτεφρωμένου φυτικού ιστού και 2,5 mL της χρωστικής, δηλαδή ασκορβικού οξέος. Όσον αφορά την ποσότητα εκχυλίσματος που προστίθετο, καθοριζόταν ανάλογα με το

μέρος του φυτού που τίθετο σε ανάλυση και ήταν 1 mL για το υπέργειο μέρος του φυτού και 10 mL του για το υπόγειο μέρος του φυτού.

Σειρά είχε η ρύθμιση του pH στην τιμή 7 με την προσθήκη 5 σταγόνων 1 M NaOH και 3 σταγόνων HNO₃ σε κάθε φιάλη. Τέλος πραγματοποιήθηκε η προσθήκη H₂O έως τη χαραγή με το διάλυμα κάθε φιάλης να λαμβάνει τελικό όγκο 25 mL. Αφού τα διαλύματα παρέμειναν σε ηρεμία για 30 min μετρήθηκε η περιεκτικότητά τους σε P στο φασματοφωτόμετρο. Εάν κατά τη μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο κάποια δείγματα εμφάνιζαν πολύ υψηλή τιμή απορρόφησης, ακολουθούσε η επιπλέον αραιώσή τους σε ογκομετρική φιάλη των 25 mL με την προσθήκη 1 mL εκχυλίσματος.

2.2.1.4. Μέτρηση καλίου (K)

Τα δείγματα τα οποία είχαν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του P, αφού αραιώθηκαν κατά 20 φορές, χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του K στο φλογοφωτόμετρο. Πρώτα έγινε η βαθμονόμηση του οργάνου με την εμβάπτιση του ηλεκτροδίου του σε διαλύματα K γνωστής συγκέντρωσης. Με το τέλος της βαθμονόμησης ακολούθησε η εμβάπτιση του ηλεκτροδίου του φλογοφωτόμετρου σε κάθε δείγμα με φυτικό ιστό.

2.2.2. Έδαφος

2.2.2.1. Δειγματοληψία – Προκατεργασία εδάφους

Πραγματοποιήθηκε μία δειγματοληψία εδάφους καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και συγκεκριμένα την ημέρα 60 από την έναρξη του πειράματος η οποία ήταν και η ημέρα συγκομιδής του υπέργειου και υπόγειου τμήματος του σπανακιού.

Το δείγμα του εδάφους ζύγιζε περίπου 100 g και παραλήφθηκε από διαφορετικά σημεία του φυτοδοχείου. Έπειτα τοποθετήθηκε σε τιτλοδοτημένη χάρτινη σακούλα. Τα 49 εδαφικά δείγματα που λήφθηκαν συνολικά, ένα για κάθε επανάληψη κάθε μεταχείρισης, τοποθετήθηκαν σε δωμάτιο. Εκεί παρέμειναν για αρκετές

εβδομάδες ώστε να μην περιέχουν τελικά καθόλου υγρασία τη στιγμή της ανάλυσής τους. Αφού τα εδαφικά δείγματα αποξηράνθηκαν, πραγματοποιήθηκε το κοσκίνισμά τους με τη χρήση κόσκινου με ανοίγματα 2 mm. Αυτά τα κοσκινισμένα δείγματα αποθηκεύτηκαν σε πλαστικά δοχεία και χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις εδάφους που πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια.

2.2.2.2. Μέτρηση pH

Αρχικά ζυγίστηκαν 10 g εδάφους για κάθε επανάληψη κάθε μεταχείρισης σε ζυγό ακριβείας και τοποθετήθηκαν σε φιαλίδια τύπου falcon των 50 mL. Ακολούθησε η προσθήκη 25 mL απιονισμένου νερού και η ανακίνηση των δειγμάτων για 10 min. Έπειτα αφέθηκαν σε ηρεμία για τουλάχιστον 30 min και τελικά μετρήθηκε το pH με τη χρήση ηλεκτρονικού πεχάμετρου. Πριν τη χρήση του, έγινε το καλιμπράρισμα της συσκευής με τη χρήση ρυθμιστικών διαλυμάτων με pH 4 και 7 αντίστοιχα. Η τιμή pH για κάθε δείγμα λήφθηκε με την εμβάπτιση του ηλεκτροδίου του πεχάμετρου στο αντίστοιχο διάλυμα.

2.2.2.3. Μέτρηση αγωγιμότητας

Όπως και κατά τη μέτρηση του pH, για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) ζυγίστηκαν 10 g εδάφους σε φιαλίδια τύπου falcon 50 mL. Ακολούθησε η προσθήκη 50 mL απιονισμένου νερού σε κάθε φιαλίδιο και αφού σφραγίστηκαν, ανακινήθηκαν για 20 min. Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για κάθε δείγμα λήφθηκε με την εμβάπτιση του ηλεκτροδίου του αγωγιμόμετρου στο αντίστοιχο διάλυμα.

2.2.2.4. Μέτρηση οργανικής ουσίας με υγρή οξείδωση

Για κάθε δείγμα εδάφους ζυγίστηκαν περίπου 0,5 g εδάφους σε ποτήρι ζέσεως 50 mL. Σε αυτό προστέθηκαν 10 mL 0,166 M $K_2Cr_2O_7$ και 10 mL πυκνού H_2SO_4 .

Έπειτα από αναμονή 30 min, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η οξείδωση της οργανικής ουσίας του εδάφους, έγινε η διήθηση του αιωρήματος μέσω ηθμού με την προσθήκη 200 mL H₂O σε κωνική φιάλη των 500 mL. Με το τέλος της διήθησης προστέθηκαν 10 mL πυκνού H₃PO₄ στο διήθημα. Ακολούθησε η διαδικασία της ογκομέτρησης του διχρωμικού καλίου του διηθήματος, αφού πρώτα προστέθηκαν σε αυτό 5 σταγόνες δείκτη διφαινυλαμίνης στην κωνική φιάλη και διάλυμα 0,5 M FeSO₄ στην προχοΐδα. Το διάλυμα στην κωνική φιάλη είχε αρχικά σκούρο καφέ χρώμα, το οποίο λίγο πριν το τέλος της ογκομέτρησης μεταχρωματίστηκε σε έντονο βαθύ μπλε και τελικά σε πράσινο, το οποίο ήταν και το τελικό χρώμα που έλαβε με το τέλος της ογκομέτρησης. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε και σε λευκό δείγμα-μάρτυρα, το οποίο περιείχε όλα τα παραπάνω αντιδραστήρια δίχως το έδαφος.

Τελικά από την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν τα εξής δεδομένα:

- A: τα mL FeSO₄ που καταναλώθηκαν για την ογκομέτρηση του άγνωστου δείγματος
- B: τα mL FeSO₄ που καταναλώθηκαν για την ογκομέτρηση του λευκού δείγματος - μάρτυρα
- Γ: τα g του εδάφους που ζυγίστηκαν στην αρχή για κάθε δείγμα

Έτσι έγινε ο υπολογισμός του οργανικού άνθρακα (OC) για κάθε δείγμα με την επίλυση της εξής εξίσωσης: $OC \% = 0,195 \cdot (B-A)/\Gamma$, το αποτέλεσμα της οποίας χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της οργανικής ουσίας μέσω του τύπου: $OM = OC/0,58$

2.2.2.5. Μέτρηση νιτρικών

Η μέτρηση των νιτρικών ξεκίνησε με τη διαδικασία της εκχύλισης. Κατά τη διαδικασία αυτή ζυγίστηκαν 2 g εδάφους εντός φιαλιδίων τύπου falcon, των οποίων η ποσότητα καταγράφηκε ακριβώς. Συνολικά ζυγίστηκε η ποσότητα από όλα τα δείγματα όλων των μεταχειρίσεων τα οποία ήταν 49 σε αριθμό. Έπειτα προστέθηκαν 20 mL KCl 2 M σε κάθε δείγμα και ακολούθησε η ανακίνησή τους στον ανακινητήρα για 1 h. Το τελικό βήμα της εκχύλισης αφορούσε τη διήθηση του περιεχομένου κάθε φιαλιδίου falcon σε πλαστικό δοχείο.

Για τη μέτρηση του νιτρικού αζώτου δημιουργήθηκαν πρώτα τα standard δείγματα και η καμπύλη βαθμονόμησης. Αφού ζυγίστηκαν 0,7216 g KNO₃ σε 1000 mL H₂O δημιουργήθηκε stock διάλυμα 1000 ppm NO₃-N. Από αυτό το διάλυμα λήφθηκαν 10 mL και αραιώθηκαν σε ογκομετρική φιάλη των 1000 mL με αποτέλεσμα να προκύψει το επιθυμητό διάλυμα 10 ppm NO₃-N. Έπειτα δημιουργήθηκαν τα standard δείγματα των νιτρικών με την προσθήκη διαφορετικών ποσοτήτων διαλύματος 10 ppm NO₃-N σε ογκομετρικές φιάλες. Συγκεκριμένα προστέθηκαν 0, 1, 2, 3, 7, 10, 15 mL διαλύματος 10 ppm NO₃-N σε διαφορετικές ογκομετρικές φιάλες των 100 mL. Έπειτα έγινε πλήρωση κάθε ογκομετρικής φιάλης έως τη χαραγή με 2 M KCl. Τελικά τα standard διαλύματα που προέκυψαν είχαν συγκέντρωση 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,7, 1 και 1,5 ppm NO₃-N. Αυτά διατηρήθηκαν στο ψυγείο έως τη χρήση τους.

Ακολούθησε η μέτρηση του εκχυλίσματος των standard διαλυμάτων, δίχως ανάπτυξη χρώματος, στο φασματοφωτόμετρο και συγκεκριμένα στα 210 nm και 270 nm. Η μέτρηση των νιτρικών πραγματοποιείται στο υπεριώδες φάσμα αποκλειστικά σε κυψελίδες χαλαζία. Τελικά αφού λήφθηκαν οι τιμές από τα δύο διαφορετικά μήκη κύματος και βρέθηκε η διαφορά τους, σχεδιάστηκε η καμπύλη βαθμονόμησης.

Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκε η εκχύλιση και μέτρησή του όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Χρειάστηκε επίσης αραιώση των δειγμάτων κατά 5 φορές για τη μέτρησή τους στο φασματοφωτόμετρο.

2.2.2.6. Μέτρηση καλίου (K)

Ζυγίστηκαν 2 g εδάφους κάθε δείγματος και προστέθηκαν σε κωνικά φιαλίδια τύπου falcon των 50ml μαζί με 30 mL CH₃COONH₄ 1 M pH 7. Τα falcon έπειτα τοποθετήθηκαν στον ανακινητήρα για 1 h. Ακολούθησε η διήθηση του διαυγούς υπερκείμενου κάθε ανακινημένου δείγματος μέσω ηθμού και το διήθημα που λήφθηκε για κάθε δείγμα αραιώθηκε κατά 10 φορές για τη μέτρηση του K. Η συγκέντρωση του K κάθε εδαφικού δείγματος μετρήθηκε τελικά στο φλογοφωτόμετρο.

2.2.2.7. Μέτρηση φωσφόρου (P)

Η μέτρηση του φωσφόρου του εδάφους ήταν αντίστοιχη εκείνης του φυτού με διαφορά κατά τη δημιουργία εκχυλισμάτων του εδάφους. Συνολικά υπήρξαν 49 εκχυλίσματα από 49 δείγματα. Αρχικά ζυγίστηκε 1 g εδάφους από κάθε δείγμα και τοποθετήθηκε εντός φιαλιδίου τύπου falcon μαζί με προσθήκη 20 mL διαλύματος NaHCO_3 . Αυτά τα φιαλίδια ανακινήθηκαν στον ανακινητήρα για 30 min και έπειτα ακολούθησε η διήθηση του περιεχομένου τους μέσω ηθμών σε καινούργια φιαλίδια τύπου falcon. Τέλος η συγκέντρωση φωσφόρου για κάθε δείγμα εδαφικού διαλύματος μετρήθηκε μέσω του φασματοφωτόμετρου με την ίδια διαδικασία όπως εκείνη για κάθε δείγμα φυτού. Ήταν αναγκαία και η αραίωση εκείνων των δειγμάτων που εμφάνιζαν πολύ υψηλές τιμές κατά τη μέτρησή τους στο φασματοφωτόμετρο.

2.3. Στατιστική επεξεργασία

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε πλήρως τυχαιοποιημένες συνθήκες. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος ήταν το IBM SPSS Statistics. Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονταν στα λογιστικά φύλλα του προγράμματος Microsoft Excel.

Αρχικά υπολογίστηκαν στο Microsoft Excel οι μέσοι όροι για τις επαναλήψεις των διαφορετικών μεταχειρίσεων. Όλα τα δεδομένα από το Microsoft Excel των επαναλήψεων κάθε μεταχείρισης επιλέχθηκαν και εισήχθησαν στο πρόγραμμα SPSS στο οποίο αρχικά ορίστηκε η επιθυμητή μορφή των δεδομένων, η οποία ήταν numeric. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η ανάλυση διασποράς με έναν παράγοντα (one way ANOVA). Στην προκειμένη περίπτωση η ανεξάρτητη μεταβλητή ήταν η αυξανόμενη δόση insect frass και όλες οι άλλες μεταβλητές (pH, EC, ποσοστό OM και συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$, P, K) ήταν οι εξαρτώμενες. Η μονόδρομη αυτή ανάλυση διακύμανσης είχε ως στόχο τη σύγκριση των μέσων όρων των δειγμάτων και την εύρεση ή όχι της στατιστικώς σημαντικής διαφοράς μεταξύ τους.

Πραγματοποιήθηκε και η post hoc analysis κατά Tukey με το επίπεδο σημαντικότητας να είναι 95%. Τα αποτελέσματα με $p\text{ value} < 0,05$ φανέρωναν πως

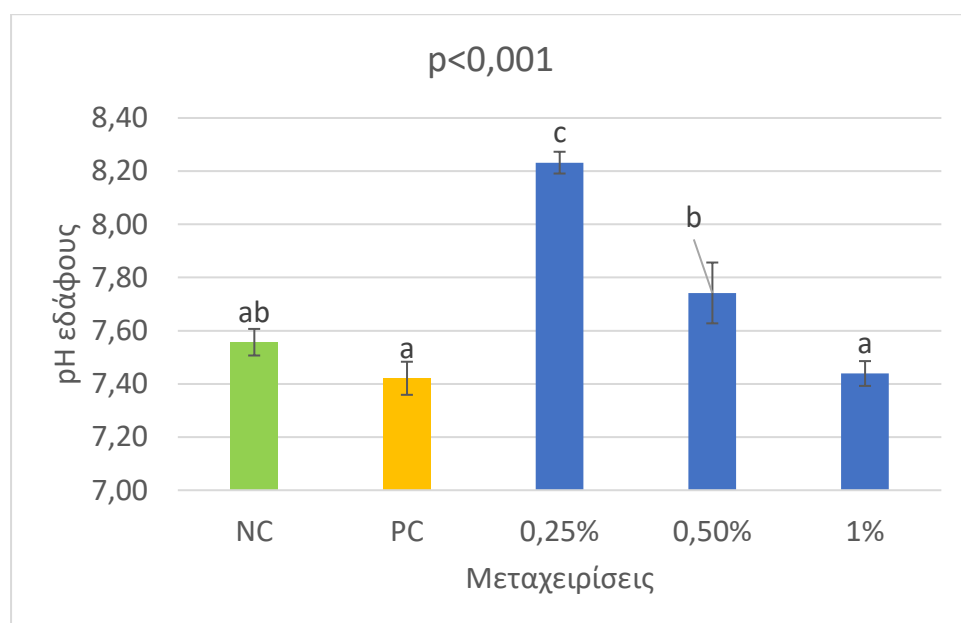
υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων όρων. Με την εφαρμογή και αυτής της ανάλυσης πραγματοποιήθηκαν οι ανά δύο συγκρίσεις των μέσων όρων και ανιχνεύτηκε εάν και σε ποια ζεύγη οι μέσοι όροι διαφέρουν. Τα στατιστικά αυτά δεδομένα εισήχθησαν και απεικονίστηκαν στο Microsoft Excel.

Τέλος δημιουργήθηκαν τα γραφήματα με μπάρες όπου στον άξονα x καταγράφηκαν οι μεταχειρίσεις NC, PC, 0,25%, 0,5% και 1% και στον άξονα y αποτυπώθηκε η παράμετρος και η μονάδα μέτρησής της. Σε κάθε γράφημα προστέθηκε και η μπάρα του τυπικού σφάλματος για τις επαναλήψεις της κάθε μεταχείρισης.

Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

3.1. Αναλύσεις στο έδαφος

3.1.1. pH εδάφους



Σχήμα 1. Τιμές pH στα δείγματα εδάφους των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 0,25%, 0,5% και 1% insect frass εκφρασμένες σε μονάδες pH.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1, η μεταχείριση 0,25% ήταν η μοναδική που διέφερε στατιστικώς σημαντικά με όλες τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Επίσης παρατηρήθηκε πως η αρχική τιμή του pH στον αρνητικό μάρτυρα (Negative Control – NC), στον οποίο δεν προστέθηκε καθόλου insect frass ή χημικό λίπασμα, ήταν 7,56. Αυτό σημαίνει πως το έδαφος ήταν ελαφρώς αλκαλικό, καθώς το pH ήταν μεταξύ 7,4-7,8, και το pH του βρισκόταν εντός του βέλτιστου εύρους για τις περισσότερες γεωργικές καλλιέργειες, το οποίο είναι μεταξύ 5,5 και 7,5 (Oshunsanya 2018).

Ως γνωστόν το H^+ είναι κατιόν και ανταγωνίζεται άλλα κατιόντα για να δεσμευτεί στις θέσεις ανταλλαγής. Γενικά ισχύει πως όταν το pH του εδάφους είναι υψηλό, έχει χαμηλή συγκέντρωση H^+ , με αποτέλεσμα περισσότερα βασικά κατιόντα να βρίσκονται στις θέσεις ανταλλαγής σωματιδίων και έτσι να είναι λιγότερο

ευαίσθητα στην έκπλυση. Ωστόσο όταν το pH του εδάφους είναι χαμηλότερο, έχει υψηλότερη συγκέντρωση H^+ , με αποτέλεσμα περισσότερα ιόντα H^+ να είναι διαθέσιμα για να αντικαταστήσουν τα βασικά κατιόντα στις θέσεις ανταλλαγής σωματιδίων, απομακρύνοντάς τα έτσι από τις θέσεις ανταλλαγής και απελευθερώνοντάς τα στο εδαφικό διάλυμα. Κατά συνέπεια τα ανταλλασσόμενα θρεπτικά συστατικά είτε απορροφώνται από το φυτό είτε χάνονται μέσω της έκπλυσης ή της διάβρωσης (Mccauley et al. 2009). Για τον λόγο αυτόν η μείωση του pH συνεπάγεται την αύξηση της διαθεσιμότητας ορισμένων θρεπτικών στοιχείων.

Στη μεταχείριση PC, στην οποία έγινε ψεκασμός διαφυλλικού χημικού λιπάσματος, παρατηρήθηκε συγκριτικά με την NC η πτώση του pH στην τιμή 7,42. Επίσης η PC είχε σχεδόν ίδια τιμή με τη μεταχείριση 1%. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς σύμφωνα με τους Mccauley et al. (2009), τα λιπάσματα με βάση το αμμώνιο (NH_4^+) και η οργανική ύλη του εδάφους (SOM) καθιστούν όξινο το έδαφος παράγοντας ιόντα H^+ , μειώνοντας έτσι το εδαφικό pH. Τα λιπάσματα με βάση το NH_4^+ , οξειδώνονται από τα μικρόβια του εδάφους και παράγουν ιόντα H^+ . Η ανοργανοποίηση της οργανικής ύλης έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό οργανικών και ανόργανων οξέων που παρέχουν επίσης H^+ στο έδαφος. Ακόμη η μεταχείριση PC προκάλεσε τη μεγαλύτερη πτώση pH συγκριτικά με όλες τις μεταχειρίσεις insect frass, γεγονός που επιβεβαιώνεται και σε πειράματα των Houben et al. (2020). Εξαίρεση αποτέλεσε η τιμή pH της μεταχείρισης 1% η οποία ήταν παρόμοια με εκείνη της PC.

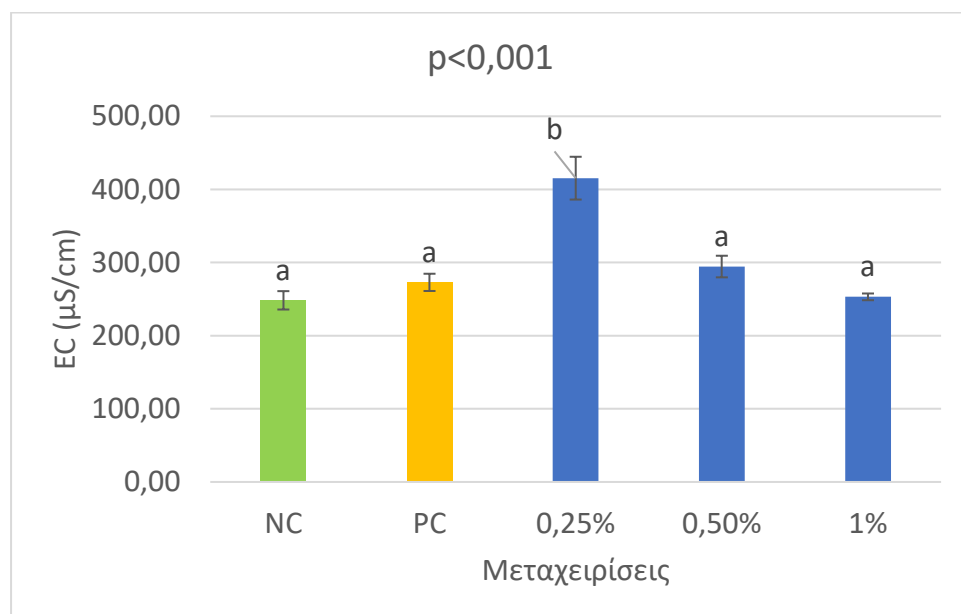
Όσον αφορά τις μεταχειρίσεις με insect frass: στη μεταχείριση 0,25% καταγράφηκε η μεγαλύτερη αύξηση καθώς και η υψηλότερη τιμή του pH συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις και ήταν 8,23. Στη μεταχείριση 0,5% καταγράφηκε αύξηση του pH (7,74) συγκριτικά με τη μεταχείριση NC. Τέλος, στη μεταχείριση 1% παρατηρήθηκε η μείωση του pH συγκριτικά με την NC.

Οι Watson et al. (2021) παρατήρησαν πως όσο αυξανόταν η ποσότητα του insect frass τόσο μειωνόταν η τιμή του εδαφικού pH, διότι παρατηρούνταν εντονότερη ανοργανοποίηση του insect frass η οποία τελικά οδηγούσε στην απελευθέρωση οργανικών οξέων. Παρομοίως και οι Houben et al. (2020) παρατήρησαν πως το pH του NC ήταν υψηλότερο από εκείνο όλων των μεταχειρίσεων με insect frass και πως η προσθήκη insect frass μείωσε σημαντικά το pH του εδάφους. Αυτό αποδόθηκε στην ελαφρώς όξινη φύση του insect frass, στην ταχεία αποσύνθεσή του που οδήγησε στην

παραγωγή CO₂ και οργανικών οξέων και στην ταχύτατη νιτροποίηση που πιθανώς να ήταν μια επιπλέον πηγή πρωτονίων στις μεταχειρίσεις με insect frass. Τα παραπάνω δεδομένα συμφωνούν με τη μεταχείριση 1% αλλά έρχονται σε αντίθεση με τις μεταχειρίσεις 0,25% και 0,5%.

Επίσης σε αντίθεση έρχεται το γεγονός πως όσο αυξάνεται η ποσότητα του insect frass τόσο μειώνεται η τιμή του εδαφικού pH καθώς στις μεταχειρίσεις 0,25% και 0,5% όχι μόνο δεν παρατηρήθηκε μείωση του εδαφικού pH αλλά αντιθέτως καταγράφηκε η αύξησή του. Σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του πειράματος έρχεται το γεγονός πως όσο αυξανόταν η ποσότητα insect frass τόσο μικρότερη τιμή του pH καταγραφόταν αλλά δίχως να προκληθεί απαραίτητα μείωση του εδαφικού pH. Από όλες τις μεταχειρίσεις insect frass μόνο η 1% είχε το προβλεπόμενο αντίκτυπο στην καλλιέργεια, όσον αφορά το pH, με βάση τις προηγούμενες έρευνες.

3.1.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα εδάφους (EC)



Σχήμα 2. Τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) εδάφους των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 0,25%, 0,5% και 1% insect frass εκφρασμένες σε $\mu\text{S/cm}$.

Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους κυμαίνονταν μεταξύ 248-415 $\mu\text{S/cm}$. Η υψηλότερη τιμή ήταν 415,38 $\mu\text{S/cm}$ και αντιστοιχούσε στη μεταχείριση 0,25%, ενώ η χαμηλότερη ήταν 248,34 $\mu\text{S/cm}$ και αντιστοιχούσε στη μεταχείριση NC. Από το σχήμα 2 συνεπάγεται πως η μοναδική μεταχείριση με στατιστικώς σημαντική διαφορά συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες ήταν η μεταχείριση 0,25%.

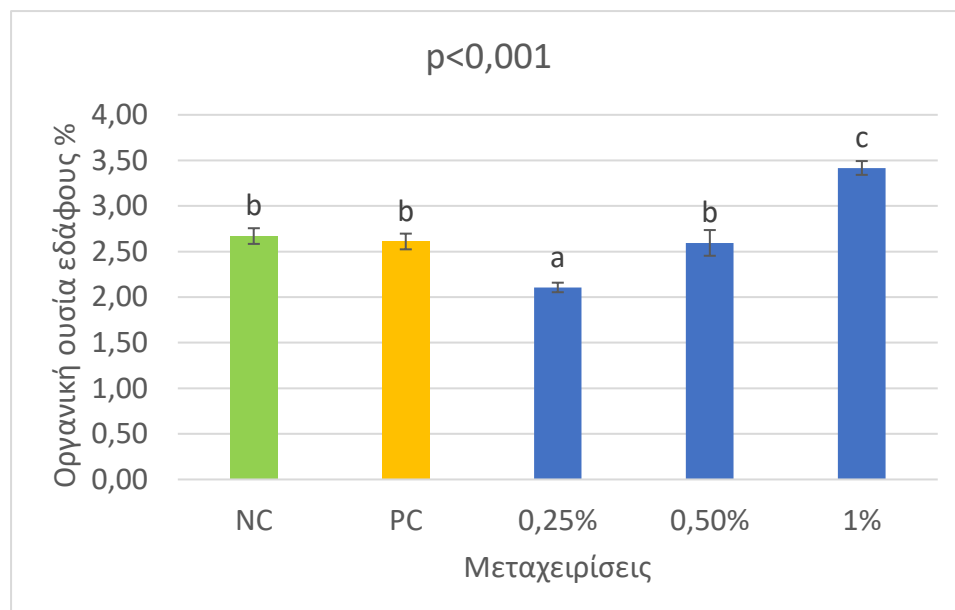
Μεταξύ των μεταχειρίσεων στις οποίες έγινε προσθήκη insect frass παρατηρήθηκε πως όσο αυξανόταν η ποσότητα insect frass, τόσο μικρότερη τιμή λάμβανε η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους. Επιπλέον όλες οι μεταχειρίσεις με insect frass εμφάνιζαν μεγαλύτερη τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας συγκριτικά με εκείνη της NC, αλλά μόνο η μεταχείριση 0,25% διέφερε στατιστικώς σημαντικά.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι συσχετισμένη κυρίως με τον προσδιορισμό της αλατότητας του εδάφους, η οποία μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες και διεργασίες στο έδαφος. Τα περισσότερα εδάφη θεωρούνται ελαφρώς αλατούχα εάν η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα (ECe) υπερβαίνει τα 2 dS/m (Smith and Doran 1997). Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως λόγω του ότι η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της μεταχείρισης NC του πειράματος ήταν 0,248 dS/m, το έδαφος δεν ήταν αλατούχο.

Γενικά, η εφαρμογή κοπριάς και εμπορικού λιπάσματος μπορεί να επηρεάσει την ECa στο σημείο όπου τα συστήματα μπορούν να μετατραπούν σε συστήματα στα οποία κυριαρχεί το αλάτι (Corwin and Lesch 2005). Ωστόσο στις μεταχειρίσεις PC, 0,25%, 0,5% και 1%, αν και παρατηρήθηκε γενικά αύξηση της EC, επειδή οι τιμές κυμάνθηκαν μεταξύ 0,253-0,415 dS/m, το έδαφος δεν κατέστη ούτε και τότε αλατούχο.

Σύμφωνα με τους Watson et al. (2021), όλοι οι τύποι insect frass χαρακτηρίζονταν από αισθητά υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας αλλά όχι υπερβολικά υψηλότερες, γεγονός που επιβεβαιώθηκε και στο πείραμα.

3.1.3. Συγκέντρωση οργανικής ουσίας στο έδαφος



Σχήμα 3. Τιμές οργανικής ουσίας (OM) εδάφους των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 0,25%, 0,5% και 1% insect frass εκφρασμένες σε ποσοστό %.

Με βάση το σχήμα 3, οι μεταχειρίσεις 0,25% και 1% παρουσιάζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές τόσο με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις όσο και μεταξύ τους. Το ποσοστό της οργανικής ουσίας του εδάφους στις μεταχειρίσεις NC, PC και 0,5% είναι σχεδόν ίδιο και δεν παρουσιάζει στατιστικώς σημαντικές διαφορές. Το μεγαλύτερο ποσοστό οργανικής ουσίας του εδάφους, καθώς και η μεγαλύτερη αύξησή της, καταγράφηκε στη μεταχείριση 1%, ενώ η μικρότερη τιμή που έλαβε, καθώς και η μεγαλύτερη μείωσή της, αντιστοιχούσε στη μεταχείριση 0,25%.

Μεταξύ των μεταχειρίσεων στις οποίες έγινε προσθήκη insect frass παρατηρήθηκε πως: όσο αυξανόταν η ποσότητα insect frass που προστίθετο, τόσο μεγαλύτερη τιμή του ποσοστού της οργανικής ουσίας του εδάφους καταγραφόταν, δίχως όμως να προκληθεί απαραίτητα η αύξηση της εδαφικής οργανικής ουσίας συγκριτικά με εκείνη του μάρτυρα.

Το insect frass είναι στερεό απόβλητο υλικό εντόμων που έχει μετατραπεί σε μια πλούσια ουσία μέσω της πέψης και αποτελεί ένα προϊόν με υψηλότερη περιεκτικότητα σε οργανική ύλη (Chavez and Uchanski 2021). Ενώ η περιεκτικότητα

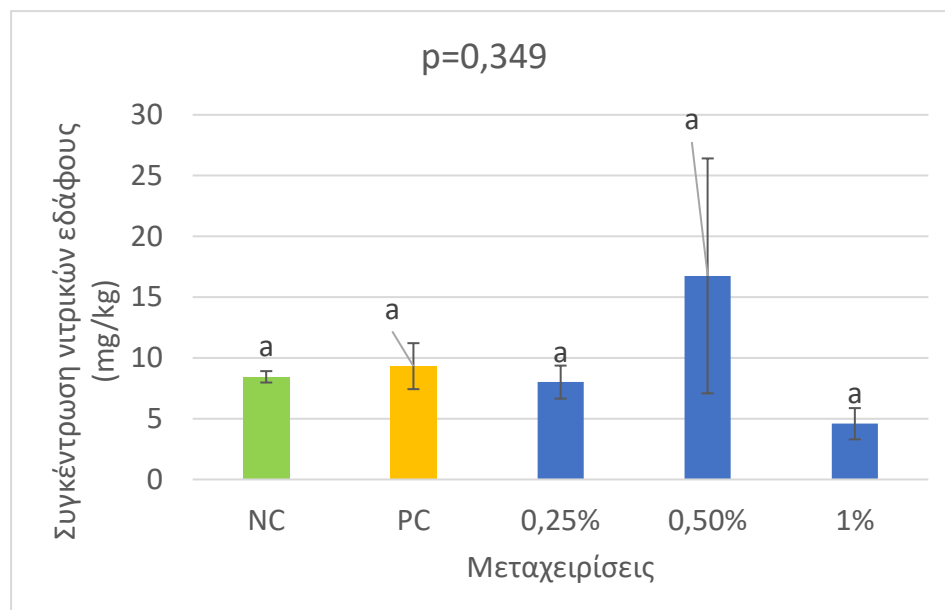
του insect frass σε θρεπτικά συστατικά εξαρτάται από τη διατροφή των εντόμων, γενικά περιέχει υψηλά ποσοστά οργανικής ύλης (Watson et al. 2021).

Το insect frass είναι γνωστό ότι αποσυντίθεται γρήγορα σε μια πρόιμη διαδικασία αποσύνθεσης και έχει μεγαλύτερο ρυθμό ανοργανοποίησης C από εκείνον των φυτικών απορριμμάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το insect frass περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα ασταθούς C, ο οποίος μπορεί να διεγείρει τη δραστηριότητα των μικροβιακών αποσυνθετών (Kagata and Ohgushi 2011).

Η προσθήκη και η διάσπαση του insect frass μπορεί να αυξήσει την περιεκτικότητα του εδάφους σε C και N. Τα δύο αυτά στοιχεία απελευθερώνονται με την αποικοδόμηση της χιτίνης, η οποία είναι το κύριο συστατικό του εξωσκελετού των εντόμων. Η αυξημένη ποσότητα C, N και άλλων θρεπτικών ουσιών στο έδαφος που παρατηρήθηκε μετά την προσθήκη insect frass μπορεί επίσης να διεγείρει τη μικροβιακή διάσπαση της φυσικής οργανικής ύλης (Watson et al. 2021).

Συμπερασματικά, οι παραπάνω παρατηρήσεις υποστηρίζουν το αποτέλεσμα της μεταχείρισης 1%. Το insect frass αποτελεί ένα προϊόν πλούσιο σε οργανική ουσία, υφίσταται ταχεία αποσύνθεση και ανοργανοποίηση C καθώς περιέχει μεγάλη ποσότητα ασταθούς C. Εκτός από την αύξηση της ποσότητας του εδαφικού C, διεγείρει και τη μικροβιακή διάσπαση της φυσικής οργανικής ύλης.

3.1.4. Συγκέντρωση νιτρικών στο έδαφος



Σχήμα 4. Τιμές συγκέντρωσης νιτρικών εδάφους ($\text{NO}_3\text{-N}$) των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 0,25%, 0,5% και 1% insect frass εκφρασμένες σε $\text{mg NO}_3\text{-N/kg}$ εδάφους.

Δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων όσον αφορά τη συγκέντρωση νιτρικών του εδάφους επειδή $p \text{ value}=0,349$. Η υψηλότερη συγκέντρωση νιτρικών, με τιμή $16,75\text{mg/kg}$, αντιστοιχούσε στη μεταχείριση 0,5% ενώ η χαμηλότερη, με τιμή $4,59 \text{ mg/kg}$, αντιστοιχούσε στην 1%.

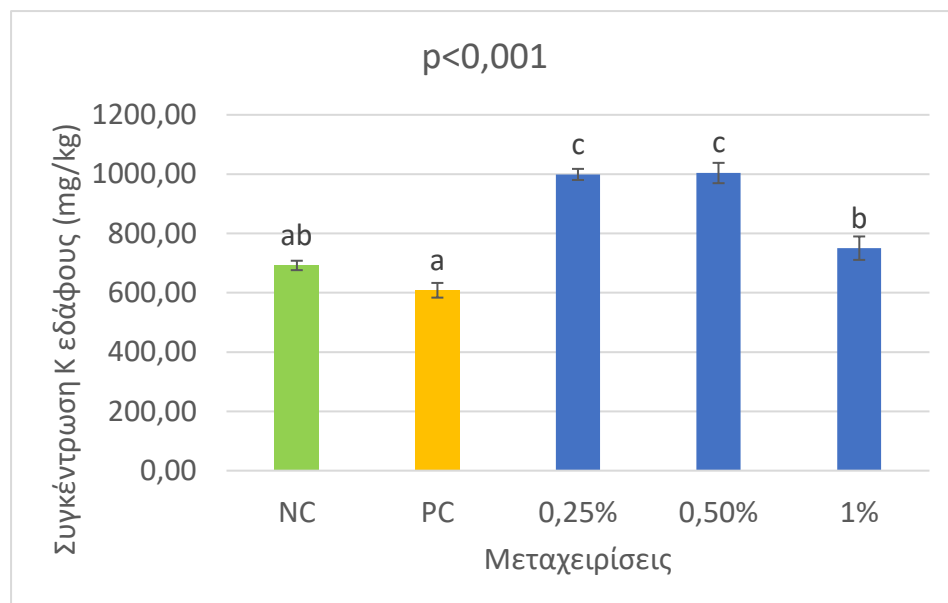
Αν και στο πείραμα δεν υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά, γενικά ισχύει πως η ακινητοποίηση του N από μικρόβια του εδάφους κατά την πρώιμη διαδικασία αποσύνθεσης είναι υπεύθυνη για τη σταδιακή μείωση του ανόργανου N στις μεταχειρίσεις insect frass. Το γεγονός αυτό όμως είχε αρνητικές συνέπειες στην ανάπτυξη του φυτού. Αντιθέτως θετική επίδραση στη διαθεσιμότητα εδαφικού N και στην αύξηση του φυτού είχε η χρήση insect frass, όταν διέθετε υψηλότερα επίπεδα ανόργανου N και κυρίως $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. Όλα τα παραπάνω ήταν σύμφωνα με τους Kagata and Ohgushi (2011).

Το ίδιο παρατήρησαν και οι Watson et al. (2021) κατά τους οποίους ένα σημαντικό ποσοστό του NH_4^+ που εφαρμόστηκε στο έδαφος, μέσω της εφαρμογής insect frass, είχε νιτροποιηθεί. Αυτό αποδείχθηκε με τη μέτρηση υψηλότερων

εκχυλίσμων συγκεντρώσεων NO_3^- στις μεταχειρίσεις insect frass από ό,τι στον μάρτυρα.

Παρατηρήθηκε πως οι μεταχειρίσεις 0,25% και 1% προκάλεσαν τη μείωση της συγκέντρωσης νιτρικών συγκριτικά με τον NC. Σύμφωνα με τους Kagata and Ohgushi (2011) σχετικά με τις συγκεντρώσεις του ανόργανου N ισχύει πως τις πρώτες 7 ημέρες οι συγκεντρώσεις των $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ και $\text{NO}_3^- - \text{N}$ στις μεταχειρίσεις insect frass εμφάνισαν μείωση. Η μείωση αυτή πιθανώς οφειλόταν στη μικροβιακή ακινητοποίηση, απονιτροποίηση και εξαέρωση της αμμωνίας. Αν και δεν έχει εξακριβωθεί ποια διαδικασία οφειλόταν για αυτό, παρατηρήθηκε πως το insect frass είχε μεγάλη επιρροή στη δυναμική του ανόργανου N, ενώ οι συγκεντρώσεις ανόργανου N στον μάρτυρα δεν άλλαζαν σημαντικά. Η μείωση του ανόργανου N κατά την αποσύνθεση του insect frass, εξαρτάται από την αρχική συγκέντρωση ανόργανου N στο insect frass και προκαλεί αλλαγές στις διαθέσιμες συγκεντρώσεις N στο έδαφος. Insect frass με χαμηλή περιεκτικότητα N προκαλούσε τη μείωση του οργανικού N στο έδαφος, καθώς τα μικρόβια του εδάφους καταλάλωναν την ποσότητα $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ του insect frass αλλά και του εδάφους.

3.1.5. Συγκέντρωση καλίου (K) στο έδαφος



Σχήμα 5. Τιμές συγκέντρωσης καλίου (K) εδάφους των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 0,25%, 0,5% και 1% insect frass εκφρασμένες σε mg K/kg εδάφους.

Στο έδαφος το πιο συνηθισμένο εύρος για τη συγκέντρωση K είναι 400-30.000 mg K/kg εδάφους (Huang 2005). Με βάση αυτό, οι τιμές συγκεντρώσεων K για όλες τις μεταχειρίσεις είναι εντός των επιθυμητών ορίων.

Παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων. Τις υψηλότερες τιμές K στο έδαφος παρουσίασαν οι μεταχειρίσεις 0,25% και 0,5%, ενώ τη χαμηλότερη την παρουσίασε η μεταχείριση PC.

Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τους Houben et al. (2020) και Houben et al. (2021), οι οποίοι εντόπισαν τις υψηλότερες διαθέσιμες συγκεντρώσεις K, σε πείραμα βραδείας διάρκειας, στη μεταχείριση του χημικού λιπάσματος, λόγω παροχής αυτών των θρεπτικών ουσιών σε διαλυτή μορφή.

Στο πείραμα η μεταχείριση του χημικού λιπάσματος όχι μόνο είχε τη χαμηλότερη συγκέντρωση K αλλά επιπλέον η εφαρμογή του μείωσε τη συγκέντρωση εδαφικού K που μετρήθηκε στον αρνητικό μάρτυρα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην έκπλυση του K, η οποία ενισχύθηκε λόγω του μειωμένου pH. Σύμφωνα με τους

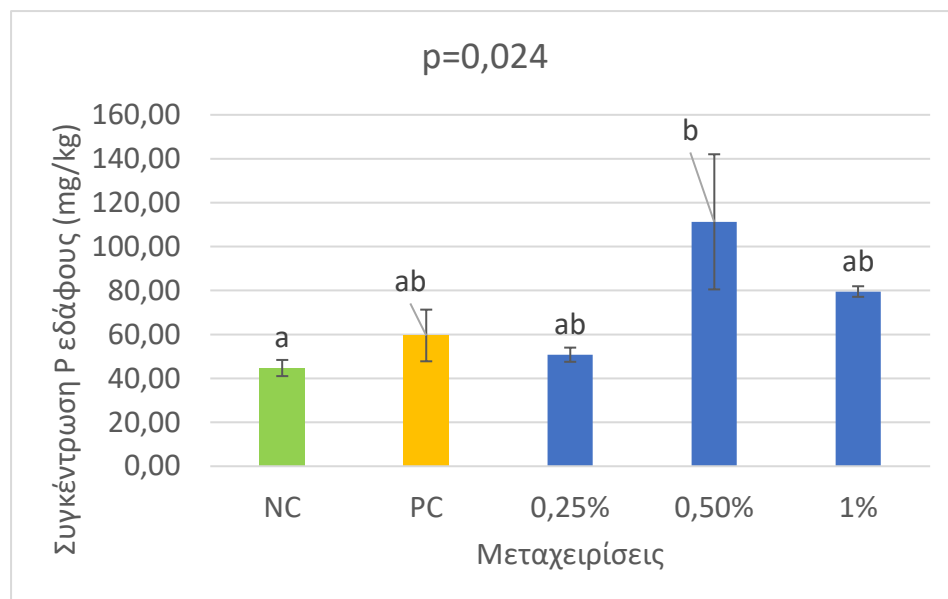
Mccauley et al. (2009) τα κατιόντα «βάσης» (Ca, K, Mg) συνδέονται ασθενέστερα με το έδαφος και είναι επιρρεπή στην έκπλυση με χαμηλό pH.

Επιπλέον η χαμηλότερη συγκέντρωση K στη μεταχείριση χημικού λιπάσματος πιθανώς να οφείλεται και στη σύντομη διάρκεια του πειράματος, καθώς σύμφωνα με τους Houben et al. (2021) η αποτελεσματικότητα του frass στο πείραμά τους αποδόθηκε στην ταχεία ανοργανοποίηση του frass και στην παρουσία P και K σε άμεσα διαθέσιμη μορφή. Συνεπώς εάν η διάρκεια του πειράματος ήταν μεγαλύτερη είναι πιθανόν οι συγκεντρώσεις του εδαφικού K της μεταχείρισης PC που θα καταγράφονταν να ήταν υψηλότερες και πιθανώς οι μέγιστες συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις.

Το γεγονός πως οι διαθέσιμες συγκεντρώσεις K ήταν υψηλότερες στις μεταχειρίσεις insect frass συγκριτικά με τη συγκέντρωση K στον αρνητικό μάρτυρα οφείλεται στο ότι τα θρεπτικά συστατικά παρέχονταν σε άμεσα διαθέσιμη μορφή. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις των Houben et al. (2020) και Houben et al. (2021).

Τέλος σε πείραμα που αφορούσε την καλλιέργεια ryegrass, όταν εφαρμόστηκαν υψηλότερα ποσοστά K στην καλλιέργεια δεν καταγράφηκε η μεγαλύτερη πρόσληψή του. Αυτό οφειλόταν στο ότι η παροχή θρεπτικών ουσιών ήταν υψηλότερη από τις απαιτήσεις του φυτού σε K και έτσι προέκυπταν σταθερές και παρόμοιες τιμές συγκέντρωσης εδαφικού K μεταξύ των μεταχειρίσεων (Houben et al. 2021). Το γεγονός αυτό συνάδει με τις τιμές των συγκεντρώσεων K στις μεταχειρίσεις 0,25% και 0,5%, στις οποίες παρατηρήθηκε αύξηση της συγκέντρωσης εδαφικού K. Η τιμή της συγκέντρωσης του εδαφικού K είναι σχεδόν ίδια και στις δύο και δεν υπήρχε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Επίσης στη μεταχείριση 1% αν και αυξήθηκε η ποσότητα insect frass που προστέθηκε, συγκριτικά με τις 0,25% και 0,5%, αν και επέφερε αύξηση της συγκέντρωσης εδαφικού K, η τελική τιμή ήταν μικρότερη από εκείνη των μεταχειρίσεων 0,25% και 0,5%.

3.1.6. Συγκέντρωση φωσφόρου (P) στο έδαφος



Σχήμα 6. Τιμές συγκέντρωσης φωσφόρου εδάφους (P) των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 0,25%, 0,5% και 1% insect frass εκφρασμένες σε mg P/kg εδάφους.

Από το παραπάνω σχήμα συμπεραίνουμε πως υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά, όμως επειδή $p \text{ value}=0,024$, δηλαδή μεταξύ των τιμών 0,01-0,05, ο βαθμός της στατιστικώς σημαντικής διαφοράς δεν είναι τόσο υψηλός.

Στο insect frass παρατηρείται σημαντική αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας του φωσφόρου (Chavez and Uchanski 2021), γεγονός που φανερώνεται και στα αποτελέσματα του πειράματος για όλες τις μεταχειρίσεις insect frass.

Η μέγιστη συγκέντρωση P παρατηρήθηκε στη μεταχείριση 0,5%, η οποία είχε σχεδόν διπλάσια τιμή από εκείνη που αντιστοιχούσε στη μεταχείριση NC. Μεταξύ των μεταχειρίσεων με insect frass, η υψηλότερη τιμή αντιστοιχούσε στη μεταχείριση 0,5%, έπειτα ακολουθούσε η μεταχείριση 1% και τέλος η ελάχιστη αποδόθηκε στη μεταχείριση 0,25%.

Η μεταχείριση PC είχε υψηλότερη συγκέντρωση εδαφικού P από την NC, αλλά χαμηλότερη από τις μεταχειρίσεις insect frass. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τους Houben et al. 2020 και Houben et al. 2021, οι οποίοι εντόπισαν τις υψηλότερες

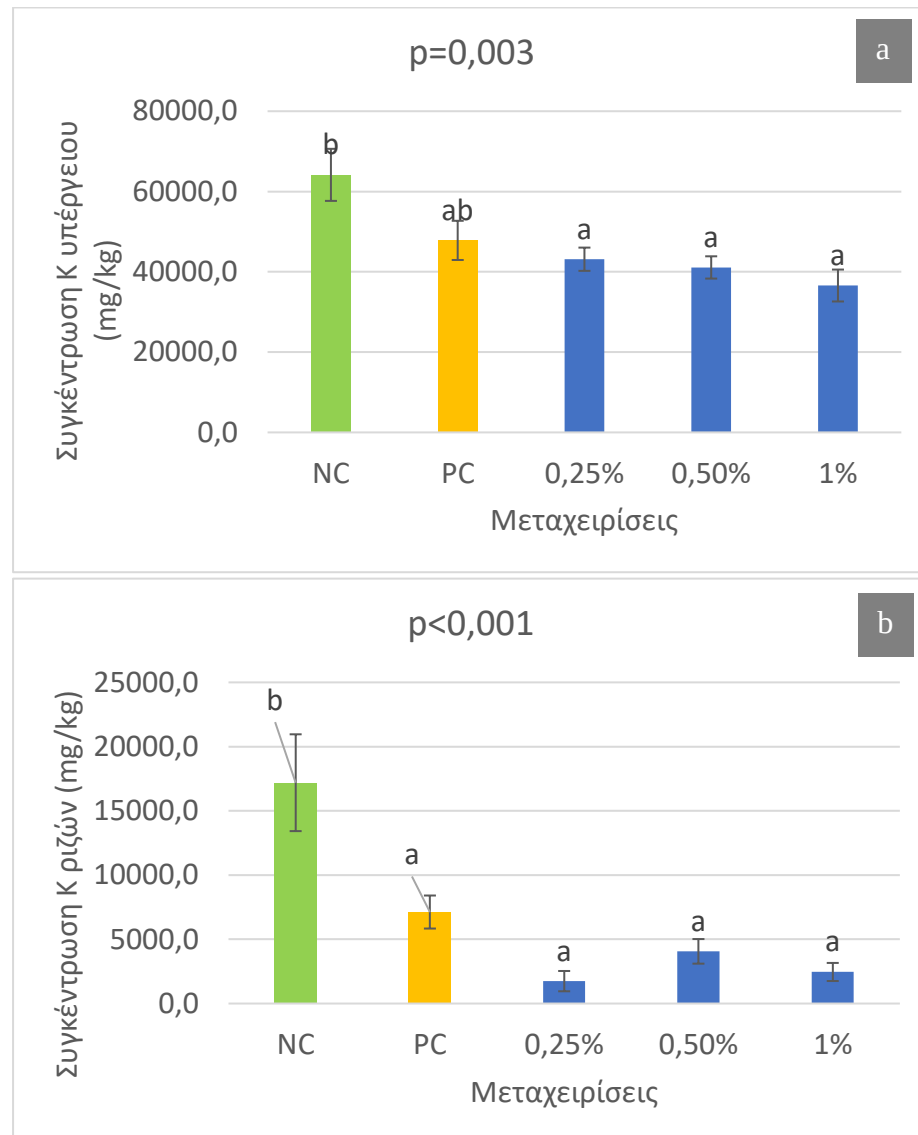
διαθέσιμες συγκεντρώσεις P, σε πείραμα βραδείας διάρκειας, στη μεταχείριση του χημικού λιπάσματος, λόγω παροχής αυτών των θρεπτικών ουσιών σε διαλυτή μορφή.

Σε συμφωνία με τους Houben et al. 2020 και Houben et al. 2021 ήταν το γεγονός πως οι διαθέσιμες συγκεντρώσεις P ήταν υψηλότερες στις μεταχειρίσεις insect frass συγκριτικά με τη συγκέντρωση P στη μεταχείριση NC, λόγω του ότι τα θρεπτικά συστατικά παρέχονταν σε άμεσα διαθέσιμη μορφή στο έδαφος από το insect frass.

Τέλος όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή ο P εξαρτάται από την τιμή του εδαφικού pH και είναι περισσότερο διαθέσιμος και ταχύτερα απορροφήσιμος σε τιμή όξινου εδαφικού pH 5,5-7. Η οργανική ουσία του εδάφους αυξάνει τη διαθεσιμότητα του P εξαιτίας της παραγωγής CO₂ και H₂CO₃ που προκαλούν τη μείωση του pH (Θεριός 2005). Γενικά η συγκέντρωση του εδαφικού P ήταν ικανοποιητική σε όλες τις μεταχειρίσεις.

3.2. Αναλύσεις στο φυτό

3.2.1. Συγκέντρωση καλίου (K) στα φυτά



Σχήμα 7. Συγκεντρώσεις καλίου (K): (Α) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (Β) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 0,25%, 0,5% και 1% insect frass εκφρασμένες σε mg K/kg φυτικού ιστού.

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω σχημάτων συμπεραίνουμε πως η συγκέντρωση K και στο υπέργειο και στο ριζικό τμήμα του φυτού παρουσιάζει στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

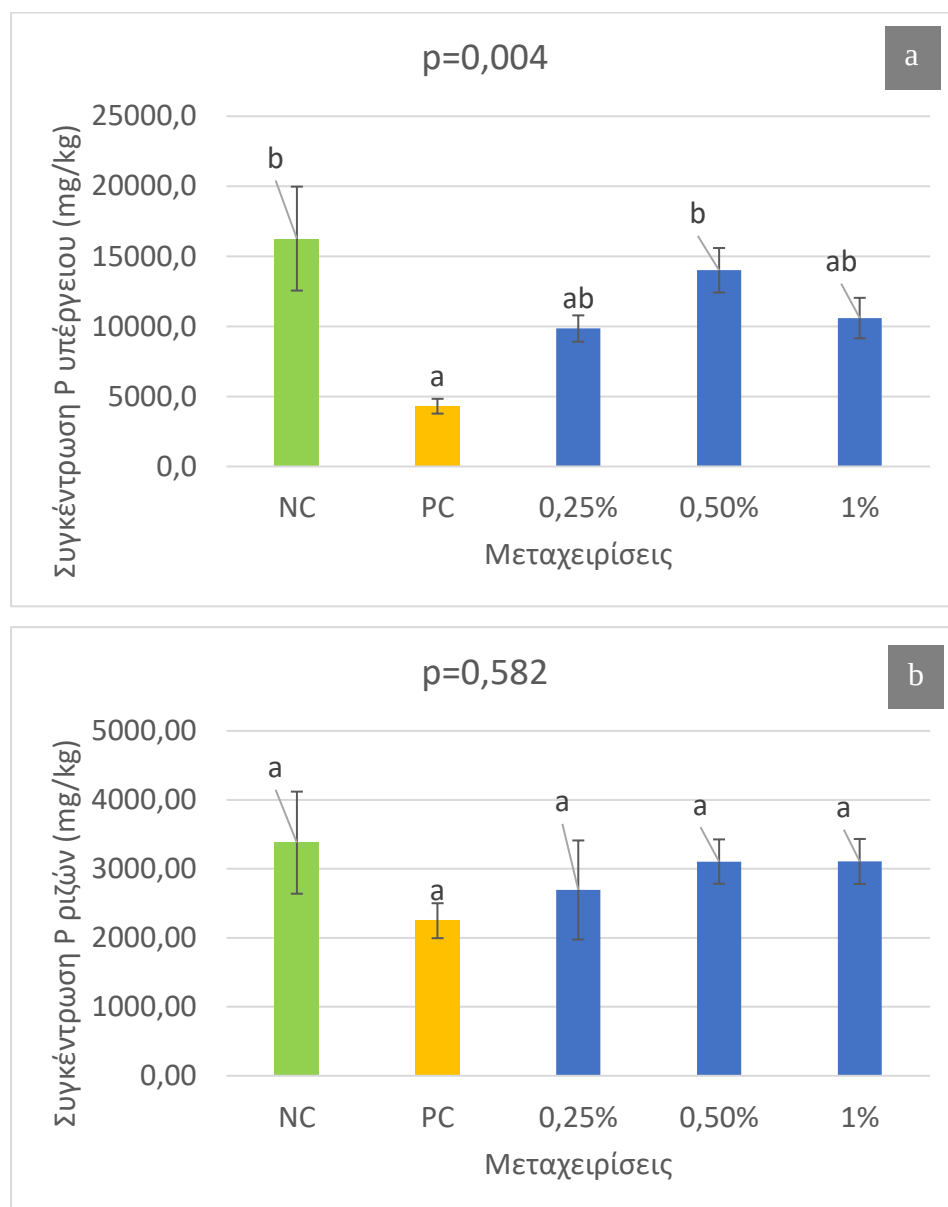
Συγκεκριμένα στο σχήμα 7Α η συγκέντρωση K στο υπέργειο τμήμα του φυτού παρουσιάζει $p\text{ value}=0,003$, δηλαδή μεταξύ των τιμών 0,001-0,01, με αποτέλεσμα ο

βαθμός της στατιστικώς σημαντικής διαφοράς να μην είναι τόσο υψηλός. Παρατηρούμε πως την υψηλότερη συγκέντρωση K στο φυτό παρέχει η μεταχείριση NC, ακολουθεί η PC και τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις K τις εμφανίζουν οι μεταχειρίσεις στις οποίες έγινε προσθήκη insect frass. Μεταξύ των μεταχειρίσεων με insect frass παρατηρήθηκε πως όσο αυξανόταν η ποσότητα insect frass μειωνόταν η συγκέντρωση K στο υπέργειο τμήμα του φυτού.

Αντιθέτως στο σχήμα 7B η συγκέντρωση K στο ριζικό τμήμα του φυτού παρουσιάζει $p \text{ value} < 0,001$ και συνεπώς τον μεγαλύτερο βαθμό στατιστικώς σημαντικής διαφοράς. Η υψηλότερη συγκέντρωση K εντοπίστηκε και πάλι στη μεταχείριση NC, έπειτα στη μεταχείριση PC και τέλος στις μεταχειρίσεις με insect frass. Ειδικά μεταξύ των μεταχειρίσεων insect frass, η υψηλότερη συγκέντρωση K του ριζικού φυτικού τμήματος καταγράφηκε πρώτα στη μεταχείριση 0,5%, έπειτα στην 1% και τέλος στην 0,25%.

Σύμφωνα με τους Houben et al. (2020) και Houben et al. (2021) το insect frass ανοργανοποιείται ταχύτατα και έχει θρεπτικά στοιχεία σε άμεσα διαθέσιμη μορφή, τα οποία παρέχει ταχύτατα. Παρατηρήθηκε σταδιακή παροχή θρεπτικών συστατικών στα φυτά καθ 'όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και πως σε σύγκριση με τον αρνητικό μάρτυρα, όλες οι μεταχειρίσεις προκάλεσαν την αύξηση της πρόσληψης K. Αυτή η παρατήρηση είναι αντίθετη με τα δεδομένα του πειράματος, στο οποίο η μεγαλύτερη πρόσληψη K και στο υπέργειο και υπόγειο τμήμα του φυτού παρατηρήθηκε στη μεταχείριση του NC. Στο πείραμα αν και οι μεταχειρίσεις PC, 0,25%, 0,5% και 1% έχουν διαφορά στην τιμή τους, δεν παρουσιάζουν μεταξύ τους στατιστικώς σημαντική διαφορά.

3.2.2. Συγκέντρωση φωσφόρου (P) στα φυτά



Σχήμα 8. Συγκεντρώσεις φωσφόρου (P) (Α) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (Β) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 0,25%, 0,5% και 1% insect frass εκφρασμένες σε mg P/kg φυτικού ιστού.

Από το σχήμα 8Α συνεπάγεται πως η συγκέντρωση P στο υπέργειο τμήμα του φυτού παρουσιάζει στατιστικώς σημαντικές διαφορές, ενώ στο σχήμα 8Β που παρέχει τα δεδομένα του ριζικού συστήματος, επειδή το $p \text{ value} > 0,05$, οι στατιστικώς σημαντικές διαφορές είναι non-significant. Ωστόσο και στα δύο σχήματα, 8Α και 8Β, η συγκέντρωση P στο υπέργειο και ριζικό φυτικό μέρος έλαβε την υψηλότερη τιμή της στις μεταχειρίσεις του NC.

Η συγκέντρωση P στο υπέργειο τμήμα του φυτού παρουσιάζει p value=0,004, δηλαδή είναι μεταξύ των τιμών 0,001-0,01, με αποτέλεσμα ο βαθμός της στατιστικώς σημαντικής διαφοράς να μην είναι ο υψηλότερος. Παρατηρείται πως την υψηλότερη συγκέντρωση K, τη διαθέτει η μεταχείριση NC και τη χαμηλότερη η PC, με τη συγκέντρωση του K να είναι σχεδόν το 1/3 από εκείνη της NC. Τις υψηλότερες συγκεντρώσεις P μετά τη μεταχείριση NC, διέθεταν οι μεταχειρίσεις στις οποίες έγινε προσθήκη insect frass και συγκεκριμένα τη μεγαλύτερη παρουσίασε η 0,5%, έπειτα η 1% και τέλος η 0,25%.

Όσον αφορά τη συγκέντρωση P των ριζών, επειδή το p value ήταν μεγαλύτερο του 0,05, δεν παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων. Αυτό οφείλεται πιθανώς στην υπόθεση των Houben et al. (2020), οι οποίοι παρατήρησαν πως σε πείραμα κριθαριού, το φυτό ήταν σε θέση να κινητοποιήσει θρεπτικά συστατικά από λιγότερο διαθέσιμες δεξαμενές λόγω του υψηλού ειδικού μήκους ρίζας και της μεγάλης απελευθέρωσης καρβοξυλικών.

Επίσης σύμφωνα με τον Poveda (2021) το insect frass διαθέτει θρεπτικά συστατικά που αφομοιώνονται εύκολα από τις ρίζες. Πολλές φορές οι φυτικοί ιστοί, με τους οποίους τρέφονται τα έντομα, διαθέτουν μεγαλύτερες ποσότητες θρεπτικών συστατικών, όπως N ή P, από εκείνες τις οποίες τα έντομα χρειάζεται να καταναλώσουν. Ως αποτέλεσμα, τα έντομα ρυθμίζουν με πολύ ελεγχόμενο τρόπο την απέκκριση των θρεπτικών ουσιών στο frass, προωθώντας υψηλές συγκεντρώσεις.

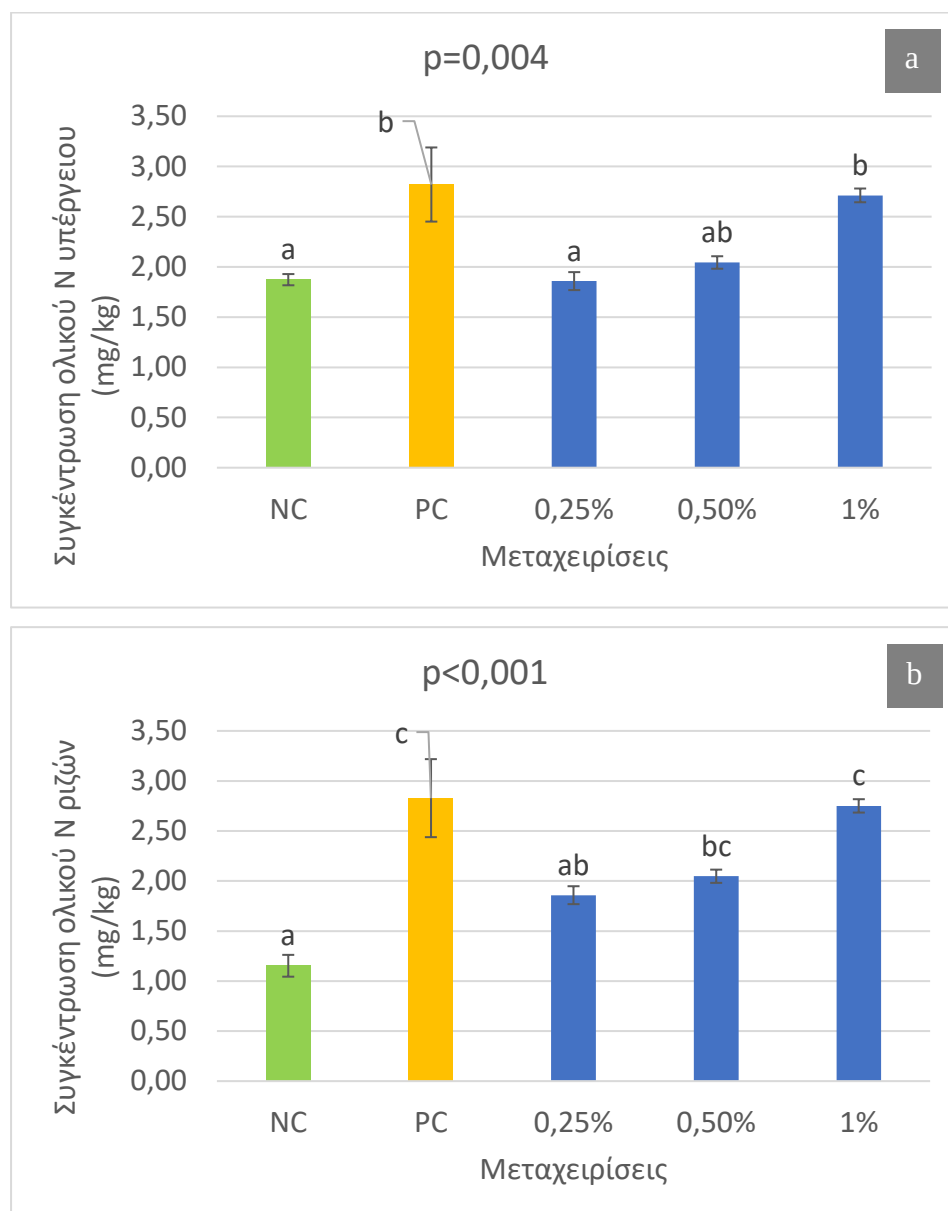
Μετά τη δράση του insect frass, θρεπτικά συστατικά όπως τα N, P και K, μετά την αφομοίωσή τους, κατέστησαν πιο βιοδιαθέσιμα στα φυτά. Το σύνολο των θρεπτικών στοιχείων και η έκπλυσή τους εκτός του συστήματος μειώθηκαν. Η αναλογία N/P μειώθηκε μετά τη βιολογική πέψη και παρείχε ένα πιο ισορροπημένο προϊόν για τα φυτά από εκείνο που προκύπτει από τις παραδοσιακές πρακτικές. Αυτό είναι πολύ θετικό χαρακτηριστικό του insect frass επειδή τα περισσότερα κομπόστ έχουν πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε N και χαμηλή περιεκτικότητα σε P (Chavez and Uchanski 2021).

Αυτό το γεγονός έρχεται σε συμφωνία με τις συγκεντρώσεις P που καταγράφηκαν για το υπέργειο μέρος του φυτού. Δεν υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ της μεταχείρισης NC και εκείνων του insect frass, αν και στη μεταχείριση NC οι τιμές συγκέντρωσης K είναι υψηλότερες.

Η μεταχείριση PC είχε τη χαμηλότερη τιμή συγκέντρωσης P στο φυτό. Σύμφωνα με τους Niu et al. (2020), αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι η περίσσεια P γίνεται «σταθερή» στο έδαφος, όπου σχηματίζει χημικούς δεσμούς με άλλα στοιχεία, όπως Ca, Mg, Fe και Zn και καθίσταται μη διαθέσιμη για πρόσληψη από τα φυτά. Επομένως, αν και τα θρεπτικά συστατικά μπορεί να είναι άφθονα στο έδαφος, η χαμηλή βιοδιαθεσιμότητα θα περιορίσει την ανάπτυξη των φυτών και θα μειώσει τη χρήση λιπασμάτων.

Για όλες τις μεταχειρίσεις ίσως η διαθεσιμότητα P να ήταν υψηλότερη στο φυτό εάν το pH τους ήταν εντός του εύρους pH από 6 έως 7, καθώς τότε ο P είναι περισσότερο διαθέσιμος (Mccauley et al. 2009).

3.2.3. Συγκέντρωση ολικού αζώτου (N) στα φυτά



Σχήμα 9. Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (N) (Α) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (Β) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων insect frass 0,25%, 0,5% και 1% εκφρασμένες σε mg N/kg φυτικού ιστού.

Η συγκέντρωση ολικού αζώτου και στα δύο τμήματα του φυτού που εξετάστηκαν, παρουσίασε στατιστικώς σημαντικές διαφορές. Και στις δύο περιπτώσεις η υψηλότερη τιμή ολικού αζώτου καταγράφηκε στις μεταχειρίσεις του PC, έπειτα σε εκείνες του 1% και ακολούθησε εκείνη του 0,5%.

Στο σχήμα 9Α το υπέργειο τμήμα του φυτού εμφανίζει $p \text{ value}=0,004$, με αποτέλεσμα ο βαθμός της στατιστικώς σημαντικής διαφοράς να μην είναι ο μέγιστος. Η χαμηλότερη συγκέντρωση ολικού αζώτου εντοπίστηκε στη μεταχείριση 0,25% και η αμέσως χαμηλότερη στη μεταχείριση NC με διαφορά τιμής 0,01 mg N/kg φυτικού ιστού. Μεταξύ των μεταχειρίσεων με insect frass παρατηρήθηκε πως όσο αυξανόταν η ποσότητα insect frass τόσο αυξανόταν η συγκέντρωση ολικού αζώτου στο υπέργειο τμήμα του φυτού.

Στο σχήμα 9Β το ριζικό φυτικό τμήμα εμφάνιζε $p \text{ value}<0,001$, δηλαδή το μέγιστο βαθμό στατιστικώς σημαντικής διαφοράς. Εδώ η χαμηλότερη τιμή συγκέντρωσης ολικού αζώτου παρατηρήθηκε στη μεταχείριση NC. Παρομοίως με το υπέργειο τμήμα, μεταξύ των μεταχειρίσεων με insect frass παρατηρήθηκε πως όσο αυξανόταν η ποσότητα insect frass τόσο αυξανόταν η συγκέντρωση ολικού αζώτου στο ριζικό τμήμα του φυτού.

Γενικά ισχύει πως το N είναι περισσότερο διαθέσιμο εντός του εύρους pH 6,5 έως 8. Οι τιμές pH για όλες τις μεταχειρίσεις ήταν εντός αυτών των ορίων (Mccauley et al. 2009).

Οι Kagata and Ohgushi (2011) παρατήρησαν πως το insect frass είχε υψηλά ποσοστά ολικού αζώτου και πως η ποιότητά του επηρεάζει θετικά ή αρνητικά τη διαθεσιμότητα του εδαφικού N και την ανάπτυξη των φυτών.

Σύμφωνα με τους Houben et al. (2020) το insect frass, λόγω της ταχείας ανοργανοποίησής του και της διάθεσης θρεπτικών συστατικών σε άμεσα διαθέσιμη μορφή, διαπιστώθηκε ότι είναι εξίσου αποτελεσματικό με το ανόργανο λίπασμα NPK για τη βελτίωση της βιομάζας και της πρόσληψης N από το κριθάρι. Στο πείραμα οι συγκεντρώσεις ολικού N στα φυτά της μεταχείρισης 1% ήταν παρόμοιες με εκείνες των φυτών της μεταχείρισης PC.

Μεταξύ των μεταχειρίσεων insect frass δεν υπήρχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές. Το γεγονός αυτό μπορεί να υποστηριχθεί από τους Chavez and Uchanski (2021) οι οποίοι παρατήρησαν σε καλλιέργεια κριθαριού παρόμοιες συγκεντρώσεις βιομάζας, N, P και K στις μεταχειρίσεις insect frass σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις ανόργανων λιπασμάτων.

Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα

- Η αναμενόμενη μείωση του pH παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις PC και 1% αλλά όχι στις 0,25% και 0,5%
- Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) δεν ήταν σε καμία μεταχείριση τόσο υψηλή ώστε το έδαφος να καταστεί αλατούχο
- Με τη χρήση του insect frass προστέθηκε ικανοποιητική ποσότητα οργανικής ουσίας στο έδαφος, η τιμή της οποίας αυξανόταν με την αύξηση της ποσότητάς του
- Δεν καταγράφηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές για τη συγκέντρωση των νιτρικών του εδάφους
- Σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων εδαφικού K σημειώθηκε έπειτα από προσθήκη insect frass αλλά όχι έπειτα από προσθήκη χημικού λιπάσματος
- Αύξηση των συγκεντρώσεων εδαφικού P καταγράφηκε έπειτα από προσθήκη insect frass ή χημικού λιπάσματος
- Το insect frass αύξησε, με την προσθήκη του, τις συγκεντρώσεις K και P στο έδαφος, λόγω της ταχείας ανοργανοποίησής του και της χορήγησης των θρεπτικών στοιχείων σε άμεσα διαθέσιμη μορφή
- Οι συγκεντρώσεις K του υπέργειου και ριζικού τμήματος του φυτού εμφάνισαν τη μεγαλύτερη μείωση στις μεταχειρίσεις insect frass
- Οι συγκεντρώσεις P του υπέργειου και ριζικού τμήματος του φυτού ήταν οι υψηλότερες στη μεταχείριση NC και οι χαμηλότερες στη μεταχείριση PC
- Οι συγκεντρώσεις K και P στο ριζικό φυτικό τμήμα δεν εμφάνισαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές
- Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ολικού N στο ριζικό και στο υπέργειο τμήμα του φυτού εμφανίστηκαν στις μεταχειρίσεις PC και 1%
- Συνοψίζοντας, η χρήση του λιπάσματος από το έντομο *Tenebrio molitor* (insect frass) στην καλλιέργεια σπανακιού έδειξε θετικά αποτελέσματα στη θρέψη των φυτών και του εδάφους
- Παρ' όλα αυτά, είναι αναγκαία η περαιτέρω έρευνα για να εξασφαλιστεί η βιώσιμη χρήση του insect frass και να διαπιστωθούν οι βέλτιστες πρακτικές χρήσης του.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

Θέριος Ι., 2005, Ανόργανη Θρέψη & Λιπάσματα, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη, 64-80

Ολύμπιος Χ., 2019. Η τεχνική της καλλιέργειας των υπαίθριων κηπευτικών. Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε. Αθήνα, σελ. 685-700.

Σάββας Δ., 2016, «Γενική Λαχανοκομία», Εκδόσεις Πεδίο, Αθήνα, σελ. 7-16, 31-33, 63-67, 145-150

Σκούλλος Μ., Σίσκος Π., 2010. Χημεία Περιβάλλοντος. 2^η έκδοση. Εκδόσεις Συμμετρία. Αθήνα. σελ. 61-73, 101-103, 218-219, 241-257.

Σφακιωτάκης, 2004. Μετασυλλεκτική φυσιολογία και τεχνολογία νωπών οπωροκηπευτικών προϊόντων. 3^η έκδοση. Εκδόσεις Γαρταγάνης. Θεσσαλονίκη, σελ. 30-43.

Χα, Ι. Α., Πετρόπουλος, Σ. 2014. Γενική Λαχανοκομία & Υπαίθρια Καλλιέργεια Λαχανικών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος. Σελ. 100-105

Χουλιάρης Ν., 2003, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, σελ. 13

Ξενόγλωσση

Bengtsson G., Bengtson P. and Måansson K.F., 2003. "Gross Nitrogen Mineralization, Immobilization, and Nitrification Rates as a Function of Soil C/N Ratio and Microbial Activity." *Soil Biology and Biochemistry* 35 (1): 143–54.

Brown T., 2016. *Biochemistry*. 1st ed. Scion Publishing, pp. 282-302.

Butnariu M., 2018. "The Nitrogen Cycle in the Soil, Impact on the Environment." *Environmental Analysis and Ecology Studies*. 4(4): 405-407.

Carpio M. J., Sánchez-Martín M.J., Rodríguez-Cruz M.S. and Marín-Benito J.M., 2021. "Effect of Organic Residues on Pesticide Behavior in Soils: A Review of Laboratory Research." *Environments* 8 (4): 32.

Chavez M. and Uchanski M., 2021. "Insect Left-over Substrate as Plant Fertiliser." *Journal of Insects as Food and Feed* 7 (5): 683–694.

Corwin D.L. and Lesch S.M., 2005. "Apparent Soil Electrical Conductivity Measurements in Agriculture." *Computers and Electronics in Agriculture* 46 (1-3): 11–43.

Cross A.F. and Schlesinger W.H., 1995. "A Literature Review and Evaluation of The Hedley Fractionation: Applications to the Biogeochemical Cycle of Soil Phosphorus in Natural Ecosystems." *Geoderma* 64 (3-4): 197–214.

De Candolle A., 1885. "Origin of Cultivated Plants". The International Scientific Series. D. Appleton and Company. New York. pp. 100.

Dicke M., 2018. "Insects as Feed and the Sustainable Development Goals." *Journal of Insects as Food and Feed* 4 (3): 147–156.

Filippelli G.M., 2008. "The Global Phosphorus Cycle: Past, Present, and Future." *Elements* 4 (2): 89–95.

Fowler D., Coyle M., Skiba U., Sutton M.A., Cape J.N., Reis S., Sheppard L.J., Jenkins A., Grizzetti B., Galloway J.N., Vitousek P., Leach A., Bouwman A.F., Butterbach-Bahl K., Dentener F., Stevenson D., Amann M. and Voss M. 2013. "The Global Nitrogen Cycle in the Twenty-First Century." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368 (1621): 20130164–64.

Gebremikael M.T., van Wickeren N., Hosseini P.S. and De Neve S., 2022. "The Impacts of Black Soldier Fly Frass on Nitrogen Availability, Microbial Activities, C-Sequestration and Plant Growth." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6: 795950.

Higashikawa F.S., Silva C.A., and Bettiol W., 2010. "Chemical and Physical Properties of Organic Residues." *Revista Brasileira de Ciência Do Solo* 34: 1742–1752.

Hirel B. and Krapp A., 2021. "Amino Acids | Nitrogen Utilization in Plants I Biological and Agronomic Importance." *Encyclopedia of Biological Chemistry III*: 127–140.

Hou E., Chen C., Luo Y., Zhou G., Kuang Y., Zhang Y., Heenan M., Lu X. and Wen D., 2018. "Effects of Climate on Soil Phosphorus Cycle and Availability in Natural Terrestrial Ecosystems." *Global Change Biology* 24 (8): 3344–56.

Houben D., Daoulas G. and Dulaurent A.M., 2021. "Assessment of the Short-Term Fertilizer Potential of Mealworm Frass Using a Pot Experiment." *Frontiers in Sustainable Food Systems. Frontiers Media* 5: 714596.

Houben D., Daoulas G., Faucon M.C. and Dulaurent A.M., 2020. "Potential Use of Mealworm Frass as a Fertilizer: Impact on Crop Growth and Soil Properties." *Scientific Reports* 10 (1): 4659.

Huang P.M., 2005. "Chemistry of Potassium in Soils" In *Chemical Processes in Soils*. SSSA Book Series no. 8, pp. 227, 248.

Ibanez J.G., Hernandez-Esparza M., Doria-Serrano C., Fregoso-Infante A. and Singh M.M., 2007. *Environmental Chemistry*. Springer New York, NY, pp. 148-160.

Kagata H. and Ohgushi T., 2011. “Positive and Negative Impacts of Insect Frass Quality on Soil Nitrogen Availability and Plant Growth.” *Population Ecology* 54 (1): 75–82.

Kögel-Knabner I., 2002. “The Macromolecular Organic Composition of Plant and Microbial Residues as Inputs to Soil Organic Matter.” *Soil Biology and Biochemistry* 34 (2): 139–62.

Koh D.W.S., Ang B.Y.X., Yeo J.Y., Xing Z. and Gan S.K.E., 2020. “Plastic Agriculture Using Worms: Augmenting Polystyrene Consumption and Using Frass for Plant Growth towards a Zero-Waste Circular Economy.” *UCL Open: Environment Preprint*.

McCauley A., Jones C. and Jacobsen J., 2009. “Soil pH and Organic Matter.” In *Nutrient Management Module No. 8*. Montana State University Extension: 4448-49.

Niu J., Liu C., Huang M., Liu K. and D. Yan. 2020. “Effects of Foliar Fertilization: A Review of Current Status and Future Perspectives.” *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21 (1): 104–118.

Oshunsanya S.O., 2018. Introductory Chapter: Relevance of Soil PH to Agriculture. *Soil pH for Nutrient Availability and Crop Performance*. IntechOpen, pp: 3-4.

Osimani A., Milanović V., Cardinali F., Garofalo C., Clementi F., Pasquini M., Riolo P., Ruschioni S., Isidoro N., Loreto N., Franciosi E., Tuohy K., Petruzzelli A., Foglini M., Gabucci C., Tonucci F. and Aquilanti L. 2018. “The Bacterial Biota of Laboratory-Reared Edible Mealworms (*Tenebrio Molitor* L.): From Feed to Frass.” *International Journal of Food Microbiology* 272: 49–60.

Parr J. and Colacicco D., 1987. “Energy in Plant Nutrition and Pest Control.” Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam. The Netherlands, pp. 81-99.

Poveda J., 2021. “Insect Frass in the Development of Sustainable Agriculture. A Review.” *Agronomy for Sustainable Development* 41 (5): 1-8.

Rodríguez-Espinosa T., Navarro-Pedreño J., Gómez Lucas I., Almendro Candel M.B., Pérez Gimeno A., Jordán Vidal M., Papamichael I., and Zorpas A.A., 2023. “Environmental Risk from Organic Residues.” *Sustainability* 15 (1): 192.

Sims J.T. and Pierzynski G.M., 2005. “Chemistry of Phosphorus in Soils.” In *Chemical Processes in Soils*. SSSA Book Series no.8, pp. 152.

Smith, J.L. and Doran J.W., 1997. “Measurement and Use of PH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis.” In *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publications. 49: 169–185.

Stein L.Y. and Klotz M.G., 2016. “The Nitrogen Cycle.” *Current Biology* 26 (3): 94–98.

Taiz L. and Zeiger E., 2010. *Plant Physiology*. Sinauer Associates Inc. Publishers Sunderland. Massachusetts. USA, pp. 137-139

Torma S., Vilček J., Lošák T., Kužel S. and Martensson A., 2017. “Residual Plant Nutrients in Crop Residues – an Important Resource.” *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 68 (4): 358–66.

Vavilov N.I. and Dorofeev V.F., 1992. *Origin and Geography of Cultivated Plants*. Cambridge University Press. Cambridge. Great Britain, pp. 337.

Watson C., Houben D. and Wichern F., 2022. “Editorial: Frass: The Legacy of Larvae - Benefits and Risks of Residues from Insect Production.” *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6, 6: 889004.

Watson C., Preißing T. and Wichern F., 2021, Plant Nitrogen Uptake from Insect Frass Is Affected by the Nitrification Rate as Revealed by Urease and Nitrification Inhibitors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 5:721840.

Watson C., Schlösser C., Vögerl J. and Wichern F., 2021. “Excellent Excrement? Frass Impacts on a Soil’s Microbial Community, Processes and Metal Bioavailability.” *Applied Soil Ecology* 168: 104110.

Ηλεκτρονική

MinAgric, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων:
http://www.minagric.gr/greek/agro_pol/Maps/spanaki1.htm

USDA, National Nutrient Database for Standard Reference:
<https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169276/nutrients>

ITIS, Integrated Taxonomic Information System: <https://www.itis.gov/>

ΕΛ.ΣΤΑΤ., Ψηφιακή Βιβλιοθήκη, <http://dlib.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/>

Παράρτημα

One way ANOVA

		ANOVA				
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
VAR00002	Between Groups	4,474	4	1,118	23,980	<,001
	Within Groups	2,052	44	,047		
	Total	6,526	48			
VAR00003	Between Groups	186550,418	4	46637,604	16,757	<,001
	Within Groups	122458,162	44	2783,140		
	Total	309008,580	48			
VAR00004	Between Groups	8,846	4	2,211	25,949	<,001
	Within Groups	3,750	44	,085		
	Total	12,595	48			
VAR00005	Between Groups	960,002	4	240,001	1,147	,348
	Within Groups	8575,654	41	209,162		
	Total	9535,656	45			
VAR00006	Between Groups	1299478,098	4	324869,524	40,649	<,001
	Within Groups	351651,295	44	7992,075		
	Total	1651129,393	48			
VAR00007	Between Groups	28486,800	4	7121,700	3,131	,024
	Within Groups	100084,308	44	2274,643		
	Total	128571,108	48			
VAR00008	Between Groups	2261219420,4	4	565304855,10	5,781	,003
	Within Groups	1955849122,0	20	97792456,101		
	Total	4217068542,4	24			
VAR00009	Between Groups	754518853,11	4	188629713,28	10,169	<,001
	Within Groups	352435911,60	19	18549258,505		
	Total	1106954764,7	23			
VAR00010	Between Groups	415668259,16	4	103917064,79	5,319	,004
	Within Groups	390712558,25	20	19535627,912		
	Total	806380817,41	24			
VAR00011	Between Groups	3908807,566	4	977201,891	,731	,582
	Within Groups	26745564,022	20	1337278,201		
	Total	30654371,588	24			
VAR00012	Between Groups	3,346	4	,837	6,321	,004
	Within Groups	1,853	14	,132		
	Total	5,199	18			
VAR00013	Between Groups	6,631	4	1,658	11,061	<,001
	Within Groups	2,098	14	,150		
	Total	8,729	18			

Φωτογραφίες



Εικόνα 1. Προετοιμασία του πειράματος και οργάνωσή του. (α) Τοποθέτηση ηθμών στη βάση των φυτοδοχείων. (β) Ανάμειξη κατεργασμένου εδάφους με περλίτη. (γ) Τοποθέτηση του κατάλληλου μείγματος στα φυτοδοχεία. (δ) Τιτλοδότηση και άρδευση των φυτοδοχείων. (ε) Ανεπτυγμένα φυτά σπανακιού έτοιμα για μεταφύτευση (φ) Τοποθέτηση των επαναλήψεων κάθε μεταχείρισης σε σειρές και στις μόνιμες θέσεις τους.



Εικόνα 2. Διαδικασία συγκομιδής των φυτών και έτοιμα δείγματα. (α) Η καλλιέργεια των φυτών ακριβώς πριν τη συγκομιδή (β) Αποξηραμένο φυτικό δείγμα πριν την κονιορτοποίησή του και (γ) μετά από αυτή. (δ) Δείγματα εδάφους που έχουν τοποθετηθεί για αποξήρανση αμέσως μετά τη δειγματοληψία.



Εικόνα 3. Διαδικασία παραλαβής τέφρας αποτεφρωμένων φυτικών δειγμάτων. (a) Ζύγισμα φυτικού δείγματος. (b) Παραλαβή φυτικών δειγμάτων από τον αποξηραντή. (c) Προσθήκη υδροχλωρικού οξέος (HCl) και διήθηση του αποτεφρωμένου διαλύματος. (d) Παραλαβή τελικών διαλυμάτων προς ανάλυση.



Εικόνα 4. Διαδικασία πέψης φυτικών δειγμάτων και μέτρησης ολικού αζώτου κατά Kjeldahl. (a) Ζύγιση του προς ανάλυση φυτικού ιστού. (b) Μεταφορά σωλήνων πέψης στο μπλοκ. (c) Εκκίνηση προγράμματος πέψης. (d) Εκχύλιση ολικού αζώτου στην συσκευή Kjeldahl. (e) Πράσινος χρωματισμός του διαλύματος ύστερα από την προσθήκη μεικτού δείκτη. (f) Σταδιακή αλλαγή του χρώματος κατά την ογκομέτρηση. (g) Αλλαγή χρώματος διαλύματος σε πορτοκαλί - εξουδετέρωση.



Εικόνα 5. Μέτρηση της συγκέντρωσης καλίου (K) στο φλογοφωτόμετρο.



Εικόνα 6. Μέτρηση συγκέντρωσης φωσφόρου (P). (a) Παρασκευασμένα πρότυπα διαλύματα. (b) Μέτρηση της συγκέντρωσης P στο φασματοφωτόμετρο, αφού πρώτα αναπτύχθηκε το κυανό χρώμα στα διαλύματα.



Εικόνα 7. Μέτρηση pH και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (a) Πεχάμετρο και δείγματα έτοιμα για μέτρηση. (b) Εμβάπτιση του ηλεκτροδίου από το πεχάμετρο σε δείγμα. (c) Αγωγιμόμετρο.