



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Καλλιέργεια ραπάνου (*Raphanus sativus*) σε έδαφος όπου προστέθηκαν υπολείμματα της εκτροφής του εντόμου *Tenebrio molitor* ως εδαφοβελτιωτικό υλικό»**

ΠΑΝΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ



Επιβλέπων: Αντωνιάδης Βασίλειος, Καθηγητής, Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ 2021

**«Καλλιέργεια ραπάνου (*Raphanus sativus*) σε έδαφος όπου προστέθηκαν υπολείμματα της εκτροφής του εντόμου *Tenebrio molitor* ως εδαφοβελτιωτικό υλικό»**

**“Cultivation of radish (*Raphanus sativus*) in soil added with insect frass of the species *Tenebrio molitor* as a novel soil amendment”**

**ΠΑΝΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

#### **ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Επιβλέπων:** Αντωνιάδης Βασίλειος, Καθηγητής, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Λεβίζου Ευθυμία,** Επικ. Καθηγήτρια, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**Αθανασίου Χρήστος,** Καθηγητής, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

Πάνος Βασίλειος

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή της Πτυχιακής μου διατριβής κ. Αντωνιάδη Βασίλειο για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για την περάτωση της παρούσας εργασίας και τις διαφωτιστικές υποδείξεις και διορθώσεις του κατά τη συγγραφή του κειμένου της διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω επίσης στην Επίκ. Καθηγήτρια του Εργαστηρίου Φυσιολογίας Φυτών κα. Λεβίζου Ευθυμία για την παραχώρηση των σπόρων ραπανιού και χρήσιμου εξοπλισμού για την υλοποίηση του πρώτου μέρους του πειράματος μου και τη συμμετοχή της στην τριμελή εξεταστική επιτροπή. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Εντομολογίας του τμήματος κ. Αθανασίου Χρήστο για την παραχώρηση του «frass» και τη συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου καθώς και τους φίλους μου για τη στήριξή τους και την συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Περίληψη .....</b>  | <b>vi</b> |
| <b>Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Θρεπτικά στοιχεία.....  | 1         |
| 1.1.1. Άζωτο.....  | 1         |
| 1.1.2. Φώσφορος.....   | 4         |
| 1.1.3. Κάλιο.....  | 6         |
| 1.2. Οργανικά υπολείμματα .....  | 7         |
| 1.3. Χρήση οργανικού υπολείμματος - αποχωρημάτων εντόμων (Insect Frass). 10          |           |
| 1.4. Η καλλιέργεια και η σημασία του ραπανιού.....                                   | 13        |
| 1.5. Σκοπός της εργασίας.....  | 17        |
| <b>Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι και υλικά .....</b>   | <b>18</b> |
| 2.1. Πειραματικός σχεδιασμός.....  | 18        |
| 2.1.1. Οργάνωση και προετοιμασία του πειράματος.....                                 | 18        |
| 2.1.2 Φυτικό υλικό.....  | 19        |
| 2.1.3 Μετρήσεις .....  | 20        |
| 2.2. Μέθοδοι ανάλυσης.....   | 20        |
| 2.2.1. Φυτό.....   | 20        |
| 2.2.1.1 Συγκομιδή .....  | 20        |
| 2.2.1.2 Μέτρηση ξηρού βάρους.....  | 21        |
| 2.2.1.3 Μέτρηση ολικού αζώτου (N).....   | 21        |
| 2.2.1.4 Μέτρηση φωσφόρου (P) .....   | 23        |
| 2.2.1.5. Μέτρηση καλίου (K) και νατρίου (Na).....                                    | 24        |
| 2.2.1.6. Μέτρηση ψευδαργύρου (Zn), σιδήρου (Fe), χαλκού (Cu),<br>μαγγανίου (Mn)..... | 24        |
| 2.2.2. Έδαφος.....   | 25        |
| 2.2.2.1 Δειγματοληψία εδάφους .....  | 25        |
| 2.2.2.2 Μέτρηση pH και αγωγιμότητας.....   | 26        |
| 2.2.2.3. Μέτρηση φωσφόρου (P) .....  | 26        |
| 2.2.2.4. Μέτρηση καλίου (K) και νατρίου (Na).....                                    | 27        |
| 2.3. Στατιστική επεξεργασία.....   | 27        |
| <b>Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα και Συζήτηση.....</b>                                    | <b>28</b> |
| 3.1. Εδαφολογικές αναλύσεις .....  | 28        |
| 3.2. Αναλύσεις στα φυτά. ....  | 36        |
| <b>Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα.....</b>   | <b>52</b> |
| <b>Βιβλιογραφία .....</b>  | <b>53</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| Ελληνική βιβλιογραφία.....   | 53        |
| Ξενόγλωσση βιβλιογραφία .....                                      | 53        |
| Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία .....                                     | 57        |
| <b>Παράρτημα: Φωτογραφίες από την εκτέλεση του πειράματος.....</b> | <b>58</b> |

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία εκτροφής εντόμων για την παραγωγή πρωτεϊνούχων τροφών κερδίζει συνεχώς έδαφος. Σε αυτή τη διαδικασία το «frass» αναδύεται ως ένα σημαντικό παραπροϊόν, πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά και οργανική ουσία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό σε καλλιέργειες. Ωστόσο, απαιτείται εντατική έρευνα ώστε να προσδιοριστούν τα πιθανά οφέλη εφαρμογών του στη γεωργία. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της χρήσης των υπολειμμάτων της εκτροφής του εντόμου *Tenebrio molitor*, ως εδαφοβελτιωτικό υλικό, στην καλλιέργεια του *Raphanus sativus* (ραπανιού), και της πιθανής υπεροχής του έναντι ανόργανων λιπασμάτων. Σε έδαφος που ελήφθη από το Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, προστέθηκαν ανόργανα λιπάσματα ως θετικός μάρτυρας και «frass» σε αυξανόμενες δόσεις ίσες με 1%, 5%, 10% και 20%. Στα διάφορα υποστρώματα καλλιεργήθηκαν φυτά ραπανιού για 65 ημέρες. Στο έδαφος του εκάστοτε υποστρώματος μετρήθηκε το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και η συγκέντρωση μακροθρεπτικών (P, K, Na). Στα συγκομισθέντα φυτά μετρήθηκε αρχικά το ξηρό βάρος της βιομάζας και ακολούθως η συγκέντρωση μακροθρεπτικών (N, P, K Na) και ιχνοστοιχείων (Zn, Fe, Cu, Mn) στον υπέργειο και υπόγειο φυτικό ιστό. Η προσθήκη «frass» μείωσε το pH του εδάφους, αύξησε ελάχιστα την ηλεκτρική αγωγιμότητα και επηρέασε θετικά τη διαθεσιμότητα των μακροθρεπτικών στο έδαφος. Η χορήγηση ανόργανων λιπασμάτων μείωσε επίσης το pH του εδάφους ενώ αύξησε σημαντικά την ηλεκτρική αγωγιμότητα, συντελώντας στον αποκλεισμό ανάπτυξης φυτών σε αυτό το υπόστρωμα. Με την αύξηση των συγκεντρώσεων «frass» βελτιώθηκαν οι ιδιότητες του εδάφους, σε αντιδιαστολή με την ανάπτυξη των φυτών η οποία περιορίστηκε. Φυτά ραπανιού επέζησαν έως την συγκομιδή στο υπόστρωμα χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού υλικού καθώς και σε αυτά όπου προστέθηκε 1% και 5% «frass». Η βιομάζα των φυτών αυξήθηκε για την μεταχείριση του 1% «frass» ενώ η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών δεν παρουσίασε σημαντική διακύμανση, εξαιρουμένου του φωσφόρου. Επιπλέον η συγκέντρωση της πλειοψηφίας των ιχνοστοιχείων στους φυτικούς ιστούς της μεταχείρισης αυτής βρέθηκε αυξημένη. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, φάνηκε ότι τα αποχωρήματα του εντόμου *Tenebrio molitor* αποτελούν ικανό οργανικό λίπασμα, όμως οι δόσεις χορήγησης πρέπει να κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα ώστε να αποφεύγονται οι αρνητικές συνέπειες της υπερβολικής χορήγησης.

# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

## 1.1. Θρεπτικά στοιχεία

### 1.1.1 Άζωτο

#### Βιο-γεωχημικός κύκλος αζώτου

Ο κύκλος του αζώτου στο έδαφος είναι στενά συνδεδεμένος με τον συνολικό κύκλο του αζώτου στη φύση (Stevenson, 1965). Οι βιο-γεωχημικές διεργασίες που σχετίζονται με το άζωτο (N) ελέγχουν την ποσότητα και τη μορφή του αζώτου που διατίθεται για τις λειτουργίες της ζωής (Zhang *et al.*, 2020). Η εναλλαγή μεταξύ των διάφορων μορφών του ελέγχεται πλήρως από μικροβιακές δραστηριότητες (Stein & Klotz, 2016).

Κύρια πηγή αζώτου για το έδαφος είναι το αέριο άζωτο (N<sub>2</sub>) της ατμόσφαιρας όπου συναντάται σε ποσοστό 79,08%. Το άζωτο σταθεροποιείται στο έδαφος με την βοήθεια μικροοργανισμών (Stevenson, 1965). Το εδαφικό άζωτο ενισχύεται μερικώς μέσω της αποσάθρωσης των μητρικών υλικών, με τις αστραπές και με την προσχώρηση στο έδαφος αμμωνίας και νιτρικών αλάτων με το νερό της βροχής, ενώ αυξημένη είναι η συνεισφορά από ανθρώπινες δραστηριότητες (Stevenson, 1965; Zhang *et al.*, 2020).

Στην φύση μόνο ένας πολύ συγκεκριμένος αριθμός μικροοργανισμών δύναται να χρησιμοποιήσει το στοιχειακό άζωτο (N<sub>2</sub>), ενώ όλοι οι υπόλοιποι ζώντες οργανισμοί απαιτούν διαφορετικές μορφές του αζώτου για την εκτέλεση των απαραίτητων για τη ζωή δραστηριοτήτων (Stevenson, 1965). Στο έδαφος οι μικροοργανισμοί εκτελούν τις απαραίτητες διεργασίες μετατροπής του αζώτου στις διάφορες μορφές του, διατηρώντας παράλληλα σταθερή την ποσότητά του (Zhang *et al.*, 2020). Σήμερα, υπάρχουν πέντε αποδεκτές ροές μετασχηματισμού του αζώτου: (α) η αμμωνιοποίηση, (β) η νιτροποίηση, (γ) η απονιτροποίηση, (δ) η αναερόβια οξείδωση του αμμωνίου (anammox) και (ε) η μετατροπή νιτρώδους-νιτρικών. Οι γενικές διεργασίες ανοργανοποίησης της οργανικής ύλης και αφομοίωσής της από την κυτταρική ζωή ολοκληρώνουν την κίνηση του ενεργού αζώτου μέσω της βιόσφαιρας (Stein & Klotz, 2016).



## Χημική συμπεριφορά - Μετατροπές στο έδαφος

Το μεγαλύτερο ποσοστό του αζώτου συναντάται σε οργανικές μορφές οι οποίες δεν είναι αφομοιώσιμες από τα φυτά αλλά το προστατεύουν από απώλειες, όπως συμβαίνει με την περίπτωση της έκπλυσης (Brady & Weil, 2011). Διαθέσιμες για τη θρέψη των φυτών είναι κυρίως οι ανόργανες μορφές του αζώτου αλλά και τα αμινοξέα (Weigelt *et al.*, 2004). Επομένως, το οργανικό άζωτο για να προσληφθεί από τα φυτά θα πρέπει να γίνει ανόργανο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ανοργανοποίηση. Η ανοργανοποίηση αποτελεί κομβικό σημείο στον κύκλο του αζώτου στη βιόσφαιρα και περιλαμβάνει τρία διακριτά στάδια: (α) της αμινοποίησης, (β) της αμμωνιοποίησης και (γ) της νιτροποίησης, τα οποία πραγματοποιούνται διαδοχικά στον χρόνο. Βέβαια, στο έδαφος, συμβαίνουν και άλλες αντιδράσεις, ως μέρος αυτού του κύκλου, όπως είναι η απονιτροποίηση και η ακινητοποίηση του αζώτου και η αεριοποίηση της αμμωνίας.

Η πορεία προς την ανοργανοποίηση των οργανικών αζωτούχων ενώσεων ξεκινά με την αμινοποίηση. Στο στάδιο αυτό οι πρωτεΐνες υδρολύονται σε αμίνες (R-NH<sub>2</sub>) και αμινοξέα. Η διεργασία αυτή περατώνεται από ετερότροφους οργανισμούς.

Τη διαδικασία της αμινοποίησης διαδέχεται αυτή της αμμωνιοποίησης, η οποία, επίσης, περατώνεται από ετερότροφους οργανισμούς. Κατά την αμμωνιοποίηση από το αμινικό άζωτο, σχηματίζεται αμμωνία (NH<sub>3</sub>), η οποία μπορεί να απορροφηθεί από κάποια φυτά, να δεσμευτεί ως αμμωνιακό ιόν (NH<sub>4</sub>) (που παράγεται μέσω της αντίδρασης:  $\text{NH}_4 + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$ ) μεταξύ των στιβάδων των ορυκτών της αργίλου (ορυκτά τύπου 2:1) ή να νιτροποιηθεί σχηματίζοντας νιτρικά (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) και νιτρώδη (NO<sub>2</sub>) ιόντα.

Η πλέον αφομοιώσιμη μορφή αζώτου από τα φυτά είναι η νιτρική μορφή, η οποία σχηματίζεται κατά το τελευταίο στάδιο της ανοργανοποίησης που καλείται νιτροποίηση. Σε αυτό συμμετέχουν δύο διαφορετικές ομάδες νιτροποιητικών βακτηρίων που επιτελούν τις δύο φάσεις της. Στην πρώτη φάση τα βακτήρια της ομάδας *Nitrosomonas* μετατρέπουν παρουσία οξυγόνου την αμμωνία σε νιτρώδες ιόν και στη δεύτερη φάση η ομάδα *Nitrobacter* οξειδώνει τα νιτρώδη σε νιτρικά ιόντα (Θερίος, 2005).

Ωστόσο, μια ποσότητα νιτροποιημένου αζώτου μπορεί να εκκληθεί στην ατμόσφαιρα ύστερα από μια σειρά αναγωγικών αντιδράσεων μετατροπής των νιτρικών ιόντων σε διάφορες αέριες μορφές (Brady & Weil, 2011). Ο μηχανισμός

αναγωγής των νιτρικών ιόντων σε νιτρώδη ιόντα και ακολούθως στις ενδιάμεσες αέριες μορφές του μονοξειδίου του αζώτου (NO), του υποξειδίου του αζώτου (N<sub>2</sub>O) και τελικά του αέριου αζώτου (N<sub>2</sub>), καλείται απονιτροποίηση (Stein & Klotz, 2016). Υπεύθυνα για το φαινόμενο αυτό είναι ετερότροφα ή αυτότροφα απονιτροποιητικά βακτήρια τα οποία, όταν τα επίπεδα του οξυγόνου είναι πολύ χαμηλά, ολοκληρώνουν τις αντιδράσεις απονιτροποίησης και εκλύεται αέριο άζωτο (N<sub>2</sub>). Όμως, σε επίπεδο αγρού, η συγκέντρωση του οξυγόνου παρουσιάζει διακύμανση, με αποτέλεσμα να παράγονται και οι τρεις αέριες μορφές σε αναλογία που καθορίζεται και από το pH, την θερμοκρασία και τα διαθέσιμα νιτρικά και νιτρώδη ιόντα (Brady & Weil, 2011).

Η ανοργανοποίηση πραγματοποιείται εφόσον τα υποστρώματα που καταναλώνουν οι οργανισμοί αυτοί περιέχουν ικανές ποσότητες αζώτου. Εάν το διαθέσιμο σε αυτά άζωτο είναι περιορισμένο η ανοργανοποίηση διακόπτεται και ενεργοποιείται η αντίστροφη διεργασία της ακινητοποίησης του αζώτου. Κατά τη διάρκεια αυτής το ανόργανο άζωτο του εδάφους δεσμεύεται από τους μικροοργανισμούς και ενσωματώνεται στην βιομάζα τους με αποτέλεσμα να μετατρέπεται σε οργανικό άζωτο (Robertson & Groffman, 2007).

### **Το άζωτο στα φυτά**

Το άζωτο αποτελεί βασικό μακροθρεπτικό συστατικό αρκετών οργανικών ουσιών που απαντώνται στους φυτικούς ιστούς και σχετίζονται με τον μεταβολισμό, την κατανομή πόρων, την αύξηση και την ανάπτυξη (Cetner *et al.*, 2017; Yousaf *et al.*, 2021). Συγκεκριμένα, αποτελεί απαραίτητο συστατικό των αμινοξέων και κατ' επέκταση των πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων, της χλωροφύλλης αλλά και ορισμένων σημαντικών ενζύμων (Baloch *et al.*, 2014).

Κατά προσέγγιση, το 75% του αζώτου, που συναντάται σε ένα φύλλο, περιέχεται στις πρωτεΐνες των χλωροπλαστών. Όταν το άζωτο εφαρμόζεται στην ιδανική ποσότητα, επάγεται η κυτταροδιαίρεση και δίνεται το έναυσμα για μεριστωματική δραστηριοποίηση (Lakra, 2017). Επιπλέον, ένα σημαντικό ποσοστό του κυτταρικού αζώτου σχετίζεται με τη φωτοσύνθεση, καθώς συναντάται στα μεγάλης ζωτικής σημασίας πρωτεϊνικά σύμπλοκα, συμπεριλαμβανομένων του φωτοσυστήματος I (PSI), του φωτοσυστήματος II (PSII), του συμπλόκου εξελισσόμενου οξυγόνου (OEC) και του συμπλόκου κυτοχρώματος b6/f, αλλά και σε μικρότερες, περιφερειακές πρωτεΐνες. (Cetner *et al.*, 2017).

Τα φυτά που έχουν επάρκεια αζώτου αποκτούν έντονο πράσινο χρώμα στα φύλλα. Αυξάνεται η παραγωγικότητά τους, η περιεκτικότητά τους σε πρωτεΐνες, η σπαργή και, στα φυλλώδη λαχανικά, η περιεκτικότητά τους σε νερό (Brady & Weil, 2011). Από την άλλη πλευρά, η έλλειψη αζώτου στο έδαφος οδηγεί σε μειωμένη ανάπτυξη και απόδοση, καθώς ο ρυθμός της κυτταροδιαίρεσης και της φωτοσύνθεσης φθίνει με ταυτόχρονη μείωση της χλωροφύλλης α και των βοηθητικών χρωστικών ουσιών (Cetner *et al.*, 2017; Lakra, 2017). Τέλος, η υπερέπαρκα αζώτου έχει και αυτή αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα και την απόδοση των καλλιεργειών (Baloch *et al.*, 2014).

### 1.1.2 Φώσφορος

Ο φώσφορος (P), όμοια με το άζωτο, αποτελεί βασικό μακροστοιχείο απαραίτητο για την αύξηση, την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών (Baloch *et al.*, 2014; Cetner *et al.*, 2020).

Στο έδαφος, ο φώσφορος βρίσκεται τόσο σε οργανικές όσο και σε ανόργανες πηγές, ενώ στην ατμόσφαιρα εντοπίζεται σε ασήμαντες ποσότητες (Ruttenberg, 2003). Οι οργανικές πηγές περιλαμβάνουν τον φώσφορο που περιέχεται στα οργανικά υπολείμματα καθώς και αυτόν που βρίσκεται σε ενεργές οργανικές μορφές. Στις ανόργανες μορφές του ο φώσφορος είναι δεσμευμένος σε ορυκτά του εδάφους ή σχηματίζει ενώσεις με άλλα στοιχεία. Σε εδάφη με χαμηλές τιμές pH συγκρατείται σε ορυκτά αργιλίου και σιδήρου, με αποτέλεσμα να είναι δυσδιάλυτος, ή συγκρατείται στην άργιλο και σε οξειδία αργιλίου και σιδήρου. Σε εδάφη όπου το pH είναι υψηλό, εντοπίζεται σε διάφορες ενώσεις με το ασβέστιο, απ' όπου αποδεσμεύεται με βραδείς ρυθμούς ή είναι ευδιάλυτος στο εδαφικό διάλυμα.

Οι διάφορες πηγές φωσφόρου συνεισφέρουν, σε διαφορετικό βαθμό η κάθε μία, στην εισροή φωσφόρου στο εδαφικό διάλυμα, ενώ επιπρόσθετα, σημαντική είναι και η εισροή μέσω λιπασμάτων. Συγκεκριμένα, με ανοργανοποίηση των οργανικών μορφών φωσφόρου ή μέσω εκρόφησης από τις ανόργανες πηγές, ο φώσφορος καταλήγει στο εδαφικό διάλυμα. Εισέρχεται δε στην τροφική αλυσίδα μέσω απορρόφησης από τα φυτά και, τελικά, καταλήγει πάλι στο έδαφος μέσω των υπολειμμάτων όλων των ζώντων οργανισμών.

Απώλειες φωσφόρου σημειώνονται αφενός μέσω του εδαφικού διαλύματος και αφετέρου από τις οργανικές πηγές. Στην πρώτη περίπτωση, ο φώσφορος που ελευθερώνεται στο εδαφικό διάλυμα απομακρύνεται με έκπλυση σε βαθύτερα στρώματα ή μέσω της απορροής και καταλήγει σε υδάτινους αποδέκτες. Η διαδικασία της διάβρωσης απομακρύνει σημαντικές ποσότητες που σχετίζονται με τον φώσφορο στην οργανική ύλη.

Ο φώσφορος προσλαμβάνεται από τα φυτά ως ανιόν, μέσω του εδαφικού διαλύματος, στο οποίο αυτό βρίσκεται με δυο μορφές ανάλογα το pH του. Σε χαμηλό pH συναντάται το μονοσθενές ανιόν ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) ενώ σε υψηλό pH συναντάται το δισθενές ανιόν ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ). Σε τιμές pH κοντά στο 7 συναντώνται και οι δυο μορφές του, ωστόσο το μονοσθενές ανιόν προσλαμβάνεται ευκολότερα από τα φυτά (Brady & Weil, 2011).

### **Ο φώσφορος στα φυτά**

Εντός των φυτών, ο φωσφόρος, διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη μεταφορά ενέργειας στα φυτικά κύτταρα, στη κυτταρική διαίρεση και στο σχηματισμό μεριστωματικών ιστών, ενώ ταυτόχρονα προωθεί την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, την άνθηση και την ανάπτυξη σπόρων και καρπών (Lakra, 2017).

Το φωσφορικό άλας αποτελεί δομικό συστατικό των νουκλεϊκών οξέων, DNA και RNA, των νουκλεοτιδίων, των φωσφοπρωτεϊνών και των φωσφολιπιδίων αλλά και των συνενζύμων, που συμμετέχουν στη ρύθμιση του μεταβολισμού. Επιπλέον, τόσο τα ανόργανα όσο και τα οργανικά φωσφορικά άλατα χρησιμεύουν στη διατήρηση του κυτταρικού pH. Τέλος, το ανόργανο φωσφορικό άλας έχει την ικανότητα να σχηματίζει, αδιάλυτους στο νερό ανυδρίτες και εστέρες, όπως το ADP και το ATP, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας και την πραγματοποίηση πολλών βιοχημικών αντιδράσεων (Cetner *et al.*, 2020).

Στα φυτά που έχουν επάρκεια φωσφόρου παρατηρείται ενίσχυση της φωτοσύνθεσης, της δέσμευσης αζώτου, της άνθησης, της καρπόδεσης και της ωρίμανσης αλλά και της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος (Brady & Weil, 2011). Αντίθετα, η ανεπάρκεια του φωσφόρου αποτελεί καίριο πρόβλημα και σημαντική αιτία μείωσης της απόδοσης των καλλιεργειών (Cetner *et al.*, 2020). Φυτά με ανεπάρκεια φωσφόρου παρουσιάζουν μειωμένη ανάπτυξη και φέρουν φύλλα

σκούρου χρώματος με αποτέλεσμα την χαμηλή απόδοση και ποιότητα. Επιπρόσθετα, εξαιτίας της χαμηλής κινητικότητας του φωσφόρου στο έδαφος και στη ριζόσφαιρα, η παραγωγή των φυτών περιορίζεται (Lakra, 2017).

### 1.1.3 Κάλιο

Το κάλιο (K), το τρίτο κατά σειρά θρεπτικό συστατικό, μετά το άζωτο και τον φώσφορο, είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη και τη παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Yadav & Sidhu, 2016). Το κάλιο προσλαμβάνεται από τα φυτά μόνο με την μορφή ιόντων καλίου ( $K^+$ ) από το εδαφικό διάλυμα. Στο έδαφος προστίθεται μέσω της ενσωμάτωσης οργανικών υπολειμμάτων και ανόργανων λιπασμάτων στα οποία εντοπίζεται κυρίως ως οξείδιο του καλίου ( $K_2O$ ) (Brouder *et.al.*, 2021). Επιπρόσθετα, σημαντική πηγή καλίου αποτελούν τα πρωτογενή ορυκτά (Brady & Weil, 2011).

Στο έδαφος απαντώνται τέσσερις μορφές καλίου, οι οποίες, χαρακτηρίζονται από την ευκολία που παρουσιάζουν στην αποδέσμευση και διάθεσή του προς τα φυτά (Pandey & Mahiwal, 2020). Οι διάφορες μορφές του στο έδαφος συνδέονται μεταξύ τους με αντιστρεπτές σχέσεις, με αποτέλεσμα να διατηρούνται σε ισορροπία. (Yadav & Sidhu, 2016).

Το μεγαλύτερο ποσοστό του καλίου (90-98%) απαντάται πρακτικά ως δεσμευμένο στα πρωτογενή ορυκτά χωρίς να είναι άμεσα διαθέσιμο στα φυτά. Πηγή καλίου για τα φυτά είναι το κάλιο που είναι διαθέσιμο στο εδαφικό διάλυμα, το οποίο εκπροσωπεί μόλις το 0,1-0,2% του ολικού καλίου στο έδαφος. Η πηγή αυτή ενισχύεται ή εξασθενεί από το ανταλλάξιμο κάλιο του εδάφους (1-2%), το οποίο συγκρατείται ή απομακρύνεται στις αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες των κolloειδών της αργίλου και της οργανικής ουσίας διατηρώντας συγκεκριμένη ισορροπία (Römheld & Kirkby, 2010). Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως ύστερα από ισχυρή καλιούχο λίπανση, η ισορροπία διαταράσσεται. Το κάλιο καταλήγει να δεσμεύεται ισχυρά στα εδαφικά κolloειδή με αποτέλεσμα να θεωρείται ως μη ανταλλάξιμο. Με τη μορφή αυτή το κάλιο αποθηκεύεται ως θρεπτικό βραδείας αποδέσμευσης συνεισφέροντας μακροπρόθεσμα (Brady & Weil, 2011).

Σημαντικό σημείο στον κύκλο του καλίου αποτελούν οι απώλειές του που συμβαίνουν, κυρίως, μέσω της επιφανειακής ή της υπόγειας απορροής και της

διάβρωσης, όπου απομακρύνεται κάλιο που βρίσκεται στο εδαφικό διάλυμα αλλά και σε εδαφικά τεμαχίδια. Απώλειες σημειώνονται και κατά την συγκομιδή, όπου απομακρύνεται το συσσωρευμένο στην συγκομισθείσα βιομάζα κάλιο (Brouder *et al.*, 2021).

### **Το κάλιο στα φυτά**

Εντός των φυτών το κάλιο συμμετέχει στη διεκπεραίωση διάφορων διαδικασιών, όπως, η φωτοσύνθεση, η επέκταση των κυττάρων και ο σχηματισμός πρωτεϊνών, γι' αυτό και απαιτείται σε μεγάλες ποσότητες (Baloch *et al.*, 2014).

Αναλυτικότερα, συμμετέχει στην ενεργοποίηση των ενζύμων που είναι απαραίτητα στις μεταβολικές διεργασίες, όπως η παραγωγή πρωτεϊνών και σακχάρων, ενώ είναι υπεύθυνο για την σπαργή (ακαμψία) κάθε φυτικού κυττάρου διατηρώντας την περιεκτικότητα σε νερό. Ακόμα, το κάλιο ελέγχει το μέγεθος των στοματικών ανοιγμάτων ως απόκριση στις οικολογικές και εσωτερικές συνθήκες των φυτών και επηρεάζει τους ρυθμούς διαπνοής (Yadav & Sidhu, 2016).

Στα φυτά που έχουν επάρκεια καλίου παρατηρείται αντοχή στη ξηρασία, στις μυκητολογικές και στις εντομολογικές προσβολές, οι βλαστοί ενδυναμώνουν και η γεύση, το χρώμα και η ποιότητα των καρπών και των λαχανικών βελτιώνονται (Brady & Weil, 2011). Σε περίπτωση ανεπάρκειας καλίου, αρχικά μειώνεται η απόδοση και παρατηρούνται καφέ καψίματα και κατσάρωμα των άκρων των φύλλων, καθώς και χλώρωση μεταξύ των νευρώσεων των φύλλων (Yadav & Sidhu, 2016).

## **1.2. Οργανικά υπολείμματα**

Καθημερινά, παράγονται παγκοσμίως τεράστιες ποσότητες οργανικών υπολειμμάτων από κτηνοτροφικές, αστικές, γεωργικές και βιομηχανικές δραστηριότητες, με αποτέλεσμα η διάθεσή τους να είναι καίριο περιβαλλοντικό και κοινωνικό πρόβλημα σε πολλές χώρες του κόσμου. Ωστόσο, τα υπολείμματα αυτά αποτελούν σημαντική πηγή οργανικής ουσίας και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως βελτιωτικά στη γεωργία, προσφέροντας μια πληθώρα περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων (Pleissner & Rumpold, 2018; Carpio *et al.*, 2021).

Η χρήση οργανικών υπολειμμάτων, όπως η κοπριά των ζώων, τα ανθρωπογενή λύματα, τα υπολείμματα των καλλιεργειών κ.α., με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας και της γονιμότητας του εδάφους, χρονολογείται ήδη πριν από χιλιάδες χρόνια. Εξακολουθεί, ωστόσο, να είναι μια διαδεδομένη και κοινή πρακτική στη σύγχρονη γεωργία, εμφανίζοντας ανοδική πορεία στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ (Carprio *et al.*, 2021). Η εφαρμογή τους βελτιώνει τις ιδιότητες του εδάφους κυρίως μέσω της αποκατάστασης και διατήρησης της οργανικής ουσίας, η οποία είναι πολύ σημαντική παράμετρος της γονιμότητας και της παραγωγικότητας του εδάφους (Tsiakaras *et al.*, 2016). Συνεπώς, η προσθήκη εξωγενούς οργανικής ουσίας με την εφαρμογή οργανικών κατάλοιπων ρυθμίζει τις βιολογικές, χημικές και φυσικές διαστάσεις της γονιμότητας και της υγείας του εδάφους προσφέροντας μια σειρά από οφέλη (Sarwar *et al.*, 2008).

Αναφορικά με τις βιολογικές ιδιότητες του εδάφους, τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση οργανικών υπολειμμάτων μπορεί να είναι άμεσα και έμμεσα. Τα άμεσα αφορούν τη διέγερση της μικροβιακής ανάπτυξης και της βιομάζας παρέχοντας ενέργεια και βασικά θρεπτικά συστατικά όπως N, P, K, Ca και Mg, ενώ στα έμμεσα συγκαταλέγονται η προώθηση της ανάπτυξης των φυτών και η αύξηση του ποσοστού των ριζών στη ριζόσφαιρα. Επιπλέον, παρατηρείται αλλαγή στη μικροβιακή ποικιλομορφία εξαιτίας της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών και υποστρωμάτων ανάπτυξης που προσφέρουν τα οργανικά υπολείμματα, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των οικολογικών θέσεων και προκαλώντας μια ποικιλία οικολογικών αλληλεπιδράσεων. Η θετική επίδραση των οργανικών υπολειμμάτων στη βιομάζα, στη δραστηριότητα και στην ποικιλομορφία των εδαφικών οργανισμών δύναται μακροπρόθεσμα να παρουσιάσει ευεργετικά αποτελέσματα στην υγεία του εδάφους και να συνεισφέρει σε διάφορες διεργασίες του οικοσυστήματος.

Οι χημικές ιδιότητες του εδάφους επηρεάζονται θετικά από την εφαρμογή οργανικών καταλοίπων, καθώς οι ευνοϊκές επιπτώσεις αυτών στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους συνδέονται συχνά με αλλαγές στα χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Συγκεκριμένα, τα οργανικά κατάλοιπα, ως βελτιωτικά, έχουν άμεση επίδραση στη γονιμότητα του εδάφους. Παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία μακρο-θρεπτικών και μικρο-θρεπτικών συστατικών, τα οποία υποστηρίζουν την ανάπτυξη φυτών και μικροβίων. Επιπρόσθετα, ρυθμίζουν το pH του εδάφους και ενισχύουν την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, επηρεάζοντας έτσι έμμεσα τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών, τη μικροβιακή δραστηριότητα και, συνεπώς, τη γονιμότητα

του εδάφους. Η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών επηρεάζεται ακόμα από τη βιοχημική σύνθεση του βελτιωτικού, ιδίως από την αναλογία άνθρακα-αζώτου (C/N), η οποία μπορεί να περιορίσει τη μικροβιακή ανάπτυξη και τη δραστηριότητα του εδάφους και κατ' επέκταση να επηρεάσει το ρυθμό αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας και της απελευθέρωσης θρεπτικών ουσιών με κυριότερη το άζωτο.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους μπορούν επίσης να επηρεαστούν θετικά από την εφαρμογή οργανικών υπολειμμάτων. Με τη προσθήκη εξωγενούς οργανικής ουσίας παρατηρείται άμεση βελτίωση της δομής του εδάφους και συγκεκριμένα του πορώδους, της συσσωμάτωσης και της δομικής σταθερότητας αλλά και βελτίωση της ικανότητας κατακράτησης νερού. Με την αύξηση του πορώδους του εδάφους μειώνεται η εδαφική κρούστα και αυξάνεται η πυκνότητα, με αποτέλεσμα την διευκόλυνση της κίνησης του αέρα και του νερού στο έδαφος, την αύξηση της διερευνητικής ικανότητας του ριζικού συστήματος των φυτών και την δημιουργία ιδανικού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων στο έδαφος. Επιπλέον, τα οργανικά υπολείμματα επηρεάζουν την κατανομή μεγέθους σωματιδίων, τη συνδεσιμότητα και τη συνολική επιφάνεια στο έδαφος, αυξάνοντας τον αριθμό και τους τύπους των διαθέσιμων θέσεων για βιολογικό αποικισμό. Τέλος, η διέγερση των μικροβιακών κοινοτήτων του εδάφους μέσω της χρήσης οργανικών κατάλοιπων μπορεί επίσης έμμεσα να βελτιώσει τη δομή του εδάφους, καθώς η μικροβιακή δραστηριότητα επηρεάζει σημαντικά τη συσσωμάτωση και τη συνολική σταθερότητα του εδάφους.

Όλα τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση των οργανικών υπολειμμάτων ως βελτιωτικά εδάφους εξαρτώνται από μια πληθώρα παραγόντων. Στους παράγοντες αυτούς συγκαταλέγονται η προέλευση των υπολειμμάτων αυτών (δασοκομία, γεωργία, αστικά ή βιομηχανικά απόβλητα, κ.λπ.), το στάδιο του υλικού (στερεό, ημιστερεό, υγρό), αν υπόκειται ή όχι σε επεξεργασίες (λιπασματοποίηση, αναερόβια χώνευση, κ.λπ.), η σύνθεση, η σταθερότητα, η ωριμότητα και η συχνότητα εφαρμογής καθώς και η μέθοδος και ο ρυθμός. Επίσης ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες είναι ο τύπος του εδάφους, το σύστημα καλλιέργειας και οι καιρικές συνθήκες. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαίος ο διεξοδικός χαρακτηρισμός τόσο της βελτίωσης όσο και του ίδιου του αγρο-οικοσυστήματος πριν από την εφαρμογή οργανικών υπολειμμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό των διαφορετικών ιδιοτήτων, του αγρονομικού δυναμικού και των περιορισμών για την υγεία του εδάφους και των καλλιεργειών (Carpio *et al.*, 2021).



### 1.3. Χρήση οργανικού υπολείμματος - αποχωρημάτων εντόμων (Insect Frass)

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της Γης που παρατηρείται τις τελευταίες δεκαετίες καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη νέων στρατηγικών για παραγωγή τροφίμων χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και το περιβάλλον. Μια τέτοια προσέγγιση είναι η καλλιέργεια εντόμων για παραγωγή προϊόντων πλούσιων σε πρωτεΐνη, τόσο για ανθρώπινη κατανάλωση όσο και για παραγωγή ζωοτροφών. Ωστόσο, η μαζική εκτροφή εντόμων συνεπάγεται και την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αποχωρημάτων, γνωστών και με τον αγγλικό όρο «frass», τα οποία, μέχρι πρότινος απορρίπτονταν ως απόβλητα. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη αξιοποίησης των αποβλήτων αυτών, αφού θα μπορούσαν να αποτελέσουν σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα (Poveda, 2021).

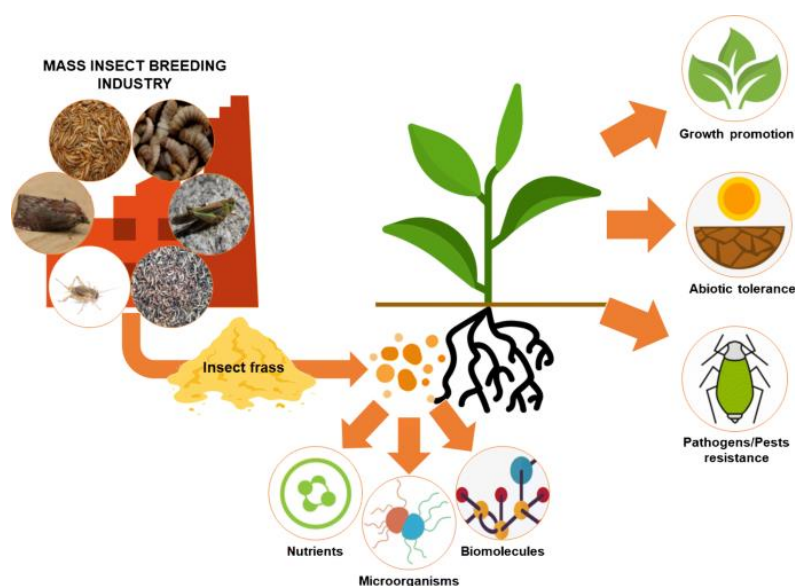
Αρκετές μελέτες υπέδειξαν τη χρήση του «frass» ως εδαφοβελτιωτικό λίπασμα που μπορεί να αυξήσει τη γονιμότητα του εδάφους και την παραγωγικότητα των φυτών (Zahn & Quilliam, 2017). Συγκεκριμένα, το «frass» αποτελεί ένα στερεό απόβλητο υλικό, το οποίο μέσω της πέψης έχει μετατραπεί σε μια μικροβιακά πλούσια ουσία, με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα προϊόν υψηλό σε οργανική ουσία και πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά (Chavez & Uchanski, 2021). Αυτά τα πρόσθετα θρεπτικά συστατικά μπορεί να λειτουργήσουν ως συμπλήρωμα ή ακόμα και ως υποκατάστατο των ανόργανων λιπασμάτων που εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια συμβατικών καλλιεργειών. Συνεπώς, η χρήση των αποχωρημάτων των εντόμων ως λίπασμα συμβάλει στην ανάπτυξη της αειφόρου γεωργίας περιορίζοντας τη χρήση των αγροχημικών και των περιβαλλοντικών προβλημάτων που αυτή συνεπάγεται (Poveda, 2021).

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) έχει προταθεί ένας κατάλογος ειδών εντόμων που δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως τρόφιμα ή ζωοτροφές και κατ' επέκταση για τη παραγωγή «frass». Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται ενδεικτικά τα είδη: *Musca domestica*, *Hermetia illucens*, *Tenebrio molitor*, *Zophobas atratus*, *Alphitobus diaperinus* (EFSA, 2015). Μεταξύ αυτών των ειδών, το *Tenebrio molitor* αντιπροσωπεύει ένα από τα πιο δημοφιλή έντομα που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της φυτικής βιομάζας σε πρωτεΐνη (Osimani *et al.*, 2018). Οι προνύμφες του είδους αυτού παράγουν περιττώματα τα οποία, όταν χρησιμοποιούνται ως οργανικό λίπασμα, παρέχουν στα φυτά πολύτιμα

θρεπτικά συστατικά. Υπάρχουν, μάλιστα, αναφορές ότι η περιεκτικότητα σε άζωτο-φώσφορο-κάλιο (N-P-K) αντιστοιχεί σε 3,5-1,5-1,5 (Poveda *et al.*, 2019)

Ως εδαφοβελτιωτικό οργανικής προέλευσης, το frass παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με αυτές των οργανικών λιπασμάτων προσφέροντας μια σειρά από οφέλη τόσο για το έδαφος όσο και για τα φυτά (Εικόνα 1).

Αρχικά, τα απεκκρίματα των εντόμων αποτελούν σημαντική πηγή θρεπτικών στοιχείων όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο, τα οποία διαθέτουν σε παρόμοιες συγκεντρώσεις με άλλα οργανικά λιπάσματα όπως το «compost» και η ζωική κοπριά. Μάλιστα, εξαιτίας του γεγονότος ότι αποτελεί προϊόν πέψης τα στοιχεία αυτά καθίστανται πιο εύκολα διαθέσιμα στα φυτά. Συγκεκριμένα, με την πέψη τα συνολικά θρεπτικά συστατικά μειώνονται, όπως επίσης και η έκπλυση τους, ενώ η αναλογία του αζώτου προς τον φωσφόρο μειώνεται και αυτή. Το τελικό προϊόν που προκύπτει παρέχει μια πιο ισορροπημένη αναλογία θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά σε σχέση με τα περισσότερα λιπάσματα που έχουν πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο και χαμηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο. Επιπλέον, σε σύγκριση με άλλα οργανικά λιπάσματα, όπως η κοπριά, το «frass» έχει υψηλότερες συγκεντρώσεις φωσφόρου και καλίου και λιγότερο ολικό άζωτο, ενώ υψηλότερα είναι και τα μικροθρεπτικά του στοιχεία (Chavez & Uchanski, 2021).



**Εικόνα 1.** Η χρήση των αποχωρημάτων εντόμων ως οργανικό λίπασμα και τα οφέλη αυτής (Poveda, 2021).

Εκτός από τα θρεπτικά στοιχεία το «frass» παρέχει και άλλες βιοδιαθέσιμες ενώσεις ιδιαίτερα ευεργετικές για τα φυτά και την ανάπτυξή τους αλλά και για τους

μικροοργανισμούς του εδάφους. Τέτοιες ενώσεις είναι τα σάκχαρα, τα αλκαλοειδή και οι φαινόλες οι οποίες σε ορισμένα φυτά ευνοούν τη βλάστηση των σπόρων και την ανάπτυξη των φυταρίων (Poveda, 2021).

Το οργανικό λίπασμα από απεκκρίματα εντόμων βελτιώνει τις ιδιότητες του εδάφους. Συγκεκριμένα, το «frass» όταν προστίθεται στο έδαφος ανοργανοποιείται γρήγορα αυξάνοντας τον ρυθμό αποσύνθεσής του με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η έκπλυση των θρεπτικών συστατικών. Ταυτόχρονα, λόγω των χαμηλών συγκεντρώσεων διαλυτού φωσφόρου στο «frass», αποφεύγεται η έκπλυση αλλά και η διήθηση σε βαθύτερα στρώματα των θρεπτικών συστατικών (Chavez & Uchanski, 2021). Επιπλέον, τα οργανικά απεκκρίματα εντόμων βελτιώνουν την οργανική ουσία του εδάφους και κατ' επέκταση διεγείρουν και αυξάνουν την μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος. Η προσθήκη «frass» στο έδαφος επηρεάζει την τιμή του pH, εξαιτίας της όξινης φύσης των απεκκριμάτων αλλά και της ταχείας αποσύνθεσής τους, η οποία οδηγεί στη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και οργανικών οξέων (Houben *et al.*, 2020).

Επιπρόσθετα, το «frass» προάγει την αντοχή των φυτών έναντι διαφόρων αβιοτικών παραγόντων καταπόνησης όπως είναι η ξηρασία, ο κορεσμός του εδάφους σε νερό και η αλατότητα. Η αύξηση της αντοχής φαίνεται να οφείλεται σε μικροοργανισμούς που υπάρχουν στα απεκκρίματα και παράγουν διάφορες ουσίες. Επιπλέον, το «frass» προάγει την αντοχή των φυτών έναντι εχθρών και ασθενειών. Συγκεκριμένα, έχει καταγραφεί εντομοκτόνος δράση έναντι προνυμφών του γένους *Agriotes* αλλά και αναστολή της εμφάνισης συμπτωμάτων των μυκήτων *Fusarium oxysporum* και *Rhizoctonia solani* (Chavez & Uchanski, 2021). Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στην ανταγωνιστική ικανότητα των ριζών έναντι των μικροοργανισμών για βιομόρια που υπάρχουν στο «frass», τα οποία ενεργοποιούν τη συστηματική αντοχή των φυτών (Poveda, 2021).

Συμπερασματικά, η χρήση των αποχωρημάτων των εντόμων (frass) ως οργανικό λίπασμα μπορεί να θεωρηθεί ως μια βιώσιμη πηγή για τη διαχείριση της θρέψης και της υγείας των φυτών στα διάφορα συστήματα καλλιέργειας, ενώ υπάρχουν στοιχεία που υποδηλώνουν τη χρήση τους ως υποκατάστατο ανόργανων λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες προκειμένου η εικασία αυτή να επιβεβαιωθεί.

## 1.4. Η καλλιέργεια και η σημασία του ραπανιού

Το ραπανάκι (*Raphanus sativus* L.) ανήκει βοτανικά στην οικογένεια των Σταυρανθών (*Brassicaceae*) και αποτελεί μια καλλιέργεια διαδεδομένη σε όλο τον κόσμο καθώς είναι κομμάτι της ανθρώπινης διατροφής. Είναι ένα λαχανικό με μεγάλη θρεπτική αξία και η κατανάλωσή του έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα ευεργετική για την υγεία του ανθρώπου αφού καταπολεμά μια σειρά από ασθένειες και μειώνει τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου (Goyeneche *et al.*, 2015).

Το καλλιεργούμενο ραπανάκι κατάγεται από την Ευρώπη και την Ασία (Gutiérrez & Perez, 2004) και αρκετές αναφορές κάνουν λόγο για τις περιοχές από τη Μεσόγειο έως τη Μαύρη Θάλασσα. Η καλλιέργεια του πραγματοποιείται ήδη από τον 13ο αιώνα π.Χ., ενώ χρησιμοποιήθηκε ως τροφή από τους αρχαίους Αιγύπτιους το 2700 - 2200 π.Χ.. Το 500 π.Χ. έφτασε στη Κίνα, ενώ αναφέρεται σε κείμενα αρχαίων Ελλήνων από τον 3ο αιώνα π.Χ.. Στην Ευρώπη καλλιεργήθηκε τον 15ο ή 16ο αιώνα και αργότερα τον 20ο αιώνα εισήχθη και στην Αμερική (Kaneko *et al.*, 2007).

### **Βοτανική περιγραφή**

Το ραπανάκι είναι ένα ετήσιο, σταυρογονιμοποιούμενο, διπλοειδές ( $2n = 18$ ), ψυχρής εποχής λαχανικό. Το ριζικό του σύστημα αποτελείται κυρίως από το υποκοτύλιο και μια πασσαλώδη ρίζα, από την οποία εκφύονται δευτερογενείς ρίζες. Υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση όσον αφορά το μήκος και το πλάτος του υποκοτυλίου, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από κοντό έως μακρύ, αλλά και αναφορικά με το σχήμα του που μπορεί να είναι στρογγυλό, επίμηκες ή κυλινδρικό, και με μεγάλη έως μικρή διάμετρο. Συγκεκριμένα, η διάμετρος μπορεί να ξεκινά από μερικά εκατοστά και ενίοτε να ξεπερνά τα 30 cm (Katashiba *et al.*, 2014). Επιπλέον, μεγάλη ποικιλομορφία παρατηρείται και στο χρώμα της επιδερμίδας του, η οποία μπορεί να είναι κόκκινη, μωβ, μαύρη, κίτρινη, λευκή έως ροζ, αλλά και στο χρώμα της σάρκας που συνήθως είναι λευκή (Banihani, 2017; da Silva *et al.*, 2020). Το νωπό βάρος της εδώδιμης ρίζας, ανάλογα με την καλλιεργούμενη ποικιλία, ανέρχεται σε μερικά γραμμάρια ενώ ενδέχεται να φτάσει τα 20 kg.

Το υπέργειο μέρος του φυτού αποτελείται από τον ανθοφόρο βλαστό και τις διακλαδώσεις αυτού. Είναι όρθιας ανάπτυξης και το ύψος του αγγίζει σε κάποιες

περιπτώσεις τα 100 cm. Τα φύλλα έχουν εναλλασσόμενη διάταξη επί του βλαστού, είναι οδοντωτά, λεία ή τριχωτά και σχηματίζουν ροζέτα.

Τα άνθη είναι τέλεια, τετραμερή, με επίμηκες σχήμα και χρώμα από λευκό έως ιώδες. Φέρονται πάνω σε ταξιανθία επιμήκη βότρυος και για την επικονίαση τους είναι απαραίτητη η παρουσία επικονιαστικών εντόμων. Οι καρποί που θα προκύψουν είναι κεράτια με κυλινδρικό σχήμα και φτάνουν σε μήκος τα 10 cm έως 60 cm. Απαρτίζονται από δύο ή περισσότερα τμήματα μέσα στα οποία βρίσκονται διαχωρισμένα με σπογγώδη ιστό τα σπέρματα (Χα και Πετρόπουλος, 2014).

### **Αύξηση και Ανάπτυξη**

Ως καλλιέργεια το ραπανάκι συγκαταλέγεται στα ευκολότερα καλλιεργούμενα λαχανικά λόγω της μεγάλης προσαρμοστικότητας που διαθέτει. Ο βιολογικός του κύκλος εξαρτάται από την εποχή σποράς. Έτσι, για ανοιξιιάτικη σπορά ο βιολογικός κύκλος συμπληρώνεται σε ένα έτος ενώ για φθινοπωρινή σε δύο έτη. Βέβαια, υπάρχει μια πληθώρα ποικιλιών, οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τις συνθήκες ανάπτυξής τους (Χα και Πετρόπουλος, 2014).

Αναπτύσσεται σε εύκρατα κλίματα και η καλλιέργεια του μπορεί να πραγματοποιηθεί σε υψόμετρα από 190 m έως 1240 m (Gutiérrez & Perez, 2004). Γενικά, εμφανίζει ανθεκτικότητα έναντι των χαμηλών θερμοκρασιών σε αντίθεση με τις υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες είναι ευαίσθητο και αν εκτεθεί σχηματίζει ρίζες με σπογγώδη σάρκα και μικρό μέγεθος. Οι άριστες θερμοκρασίες για τη σωστή ανάπτυξη του φυτού και την καλή ποιότητα του υποκοτυλίου κυμαίνονται μεταξύ 10°C και 18°C. Σε περίπτωση πολύ ψυχρού χειμώνα είναι αναγκαία η καλλιέργεια του σε προφυλαγμένες θέσεις.

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του ραπανιού και τον σχηματισμό ποιοτικών ριζών διαδραματίζει και η φωτοπερίοδος. Συγκεκριμένα, σε μικρής ή μέσης διάρκειας ημέρες σχηματίζει κανονικού σχήματος υποκοτύλιο και μικρά φύλλα, ενώ, σε μεγάλης διάρκειας ημέρες σχηματίζει υποκοτύλιο ακανόνιστου σχήματος και η έκπτυξη των ανθοφόρων οφθαλμών επιταχύνεται.

Σε γενικές γραμμές, το έδαφος θα πρέπει να είναι ψιλοχωματισμένο και απαλλαγμένο από πέτρες και άλλα χονδροειδή υλικά. Όσον αφορά τον τύπο του εδάφους το ραπανάκι δεν είναι πολύ απαιτητικό καθώς ο βιολογικός του κύκλος είναι μικρός και το ριζικό του σύστημα περιορισμένο. Μπορεί να αναπτυχθεί τόσο σε

αμμώδη όσο και σε οργανικά εδάφη εφόσον είναι γόνιμα, ελαφρά όξινα (pH 6-6,5) και υπάρχει επαρκής εδαφική υγρασία (Χα και Πετρόπουλος, 2014). Τέλος το ραπανάκι είναι μια καλλιέργεια μετρίως ευαίσθητη στην αλατότητα (Sun *et al.*, 2017).

### Διατροφική αξία

Το ραπανάκι αποτελεί πηγή υδατανθράκων, σακχάρων, διαιτητικών ινών, πρωτεϊνών καθώς επίσης, λιπαρών και φθορίου (Πίνακας 1). Επιπλέον, είναι πλούσιο σε διάφορες υδατοδιαλυτές βιταμίνες και συγκεκριμένα στις Β1, Β2, Β3, Β5, Β6, Β9 και Γ. Ακόμα περιέχει ανόργανα άλατα όπως ο φωσφόρος (P), το κάλιο (K), το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg), ο σίδηρος (Fe), ο ψευδάργυρος (Zn), το σελήνιο (Se), ο χαλκός (Cu) και το μαγγάνιο (Mn), τα οποία είναι απαραίτητα για την ανθρώπινη υγεία και διατροφή (Πίνακας 2). Το ραπανάκι περιέχει μια σειρά δευτερογενών μεταβολιτών με φαρμακευτικά οφέλη που περιλαμβάνουν γλυκοσινολικά, ισοθειοκυανικά και πολυφαινόλες. Σχετικά πρόσφατα, διαπιστώθηκε ότι διαθέτει μοναδικές βιοδραστικές ενώσεις, οι οποίες έχουν αναγνωριστεί για τα πιθανά οφέλη τους στην υγεία του ανθρώπου (Banihani, 2017).

Τα παραπάνω θρεπτικά στοιχεία συναντώνται τόσο στις ρίζες όσο και στα φύλλα του ραπανιού. Σε σύγκριση με τις ρίζες, έχει βρεθεί ότι τα φύλλα περιέχουν υψηλότερα επίπεδα πρωτεϊνών, ασβεστίου και ασκορβικού οξέος, ενώ η συνολική ποσότητα φαινόλης είναι διπλάσια στα φύλλα από τις ρίζες γεγονός που οφείλεται στην ικανότητα σάρωσης των ελεύθερων ριζών (Manivannan *et al.*, 2019).

**Πίνακας 1.** Σύσταση σπόρων ραπανιού σε μικροστοιχεία.

| Θρεπτικό στοιχείο | Αξία ανά 100 g εδώδιμου τμήματος | Μονάδα μέτρησης |
|-------------------|----------------------------------|-----------------|
| Νερό              | 95.27                            | g               |
| Θερμίδες          | 16                               | kcal            |
| Πρωτεΐνες         | 0.68                             | g               |
| Λιπαρά            | 0.1                              | g               |
| Υδατάνθρακες      | 3.4                              | g               |
| Ίνες              | 1.6                              | g               |
| Σάκχαρα           | 1.86                             | g               |

\* (Πηγή: USDA, National Nutrient Database for Standard Reference, 2020)

**Πίνακας 2.** Σύσταση σπόρων ραπανιού σε βιταμίνες.

| Θρεπτικό συστατικό   | Αξία ανά 100 g εδώδιμου τμήματος | Μονάδα μέτρησης |
|----------------------|----------------------------------|-----------------|
| <b>Βιταμίνες</b>     |                                  |                 |
| Θειαμίνη (B1)        | 0.012                            | mg              |
| Ριβοφλαβίνη (B2)     | 0.039                            | mg              |
| Νιασίνη (B3)         | 0.254                            | mg              |
| Βιταμίνη B6          | 0.071                            | mg              |
| Βιταμίνη C           | 14.8                             | mg              |
| Βιταμίνη K           | 1.3                              | μg              |
| β-καροτένιο          | 4                                | μg              |
| <b>Έχνη μετάλλων</b> |                                  |                 |
| Ασβέστιο (Ca)        | 25                               | mg              |
| Σίδηρος (Fe)         | 0.34                             | mg              |
| Μαγνήσιο (Mg)        | 10                               | mg              |
| Φωσφόρος (P)         | 20                               | mg              |
| Κάλιο (K)            | 233                              | mg              |
| Νάτριο (Na)          | 39                               | mg              |
| Ψευδάργυρος (Zn)     | 0.28                             | mg              |
| Χαλκός (Cu)          | 0.05                             | mg              |
| Σελήνιο (Se)         | 0.6                              | μg              |

\* (Πηγή: USDA, National Nutrient Database for Standard Reference, 2020)

### **Χρήσεις**

Το κύριο προϊόν που συγκομίζεται από την καλλιέργεια ραπανιού και προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση είναι η ρίζα. Η ρίζα του ραπανιού καταναλώνεται συνήθως ωμή ως τραγανό λαχανικό κυρίως σε σαλάτα αλλά και μαγειρεμένη, σε τουρσιά και σε επεξεργασμένα τρόφιμα όπως το αποξηραμένο ραπανάκι, εμφανίζεται δε και σε πολλά ευρωπαϊκά πιάτα. Στη Μέση Ανατολή αρκετοί άνθρωποι, προτιμούν να πίνουν το χυμό της ρίζας επιδιώκοντας ορισμένα οφέλη για την υγεία (Banihani, 2017) καθώς έχει αποδειχθεί η αντιμικροβιακή του δράση κατά των *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa* και *Salmonella thyphosa* (Gutiérrez & Perez, 2004).

Εκτός από τις ρίζες, τα φύλλα και ο βλαστός παρουσιάζουν και αυτά θρεπτική και θεραπευτική αξία. Συγκεκριμένα, εκχυλίσματα ραπανιού έχουν χρησιμοποιηθεί

στη λαϊκή ιατρική από την αρχαιότητα για τη θεραπεία των διαταραχών του στομάχου, της δυσκοιλιότητας, των λοιμώξεων των ούρων, της ηπατικής φλεγμονής, των καρδιακών διαταραχών και των ελκών. Επιπλέον, έχουν καταγραφεί οι αντιμικροβιακές, αντικαρκινικές, αντιοξειδωτικές και αγχολυτικές ιδιότητες του ραπανιού (Manivannan *et al.*, 2019).

Ακόμα, οι χρωστικές ουσίες του ραπανιού προάγουν την υγεία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τρόφιμα, σε καλλυντικά και στη φαρμακευτική βιομηχανία. Αναλυτικότερα, οι ανθοκυανίνες που προέρχονται από το κόκκινο ραπανάκι χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στη βιομηχανία τροφίμων ως χρωστικοί παράγοντες λόγω της υψηλής σταθερότητάς τους και τις παρόμοιες ιδιότητες που παρουσιάζουν με τη συνθετική χρωστική ουσία Red 40. Επιπρόσθετα, εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας των σπόρων ραπανιού σε λάδι (30–50% κ.β.), η καλλιέργεια του μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή βιο-ελαίου για παραγωγή βιοντίζελ (Zhang *et al.*, 2020). Τέλος το ραπανάκι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ζωοτροφή (Kaneko *et al.*, 2007).

## 1.5. Σκοπός της εργασίας

Η συστηματική εκτροφή εντόμων, για την παρασκευή πρωτεϊνούχων τροφών, είναι μια βιομηχανία που ανθίζει με ταχύτατους ρυθμούς τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, τα κατάλοιπα αυτής και η αξιοποίηση τους αποτελούν μείζων ζήτημα. Αρκετές μελέτες έχουν υποδείξει την αποτελεσματική χρήση των υπολειμμάτων των εντόμων ως οργανικό λίπασμα με τις περισσότερες από αυτές να επικεντρώνονται στα οφέλη που επιφυλάσσει για τα φυτά και το έδαφος. Παρόλα αυτά, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει κάποια μελέτη που αποδεικνύει την χρήση των υπολειμμάτων εντόμων ως υποκατάστατο των ανόργανων λιπασμάτων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της χρήσης των υπολειμμάτων της εκτροφής του εντόμου *Tenebrio molitor*, ως εδαφοβελτιωτικό υλικό, στην καλλιέργεια του ραπανιού (*Raphanus sativus*), και της πιθανής υπεροχής του έναντι του ανόργανου λιπάσματος.



## **Κεφάλαιο 2. Μέθοδοι και υλικά**

### **2.1. Πειραματικός σχεδιασμός**

Αντικείμενο του πειράματος είναι η μελέτη της καλλιέργειας του ραπανιού (*Raphanus sativus*) σε έδαφος στο οποίο προστέθηκε «frass» ως εδαφοβελτιωτικό υλικό. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκαν και καλλιεργήθηκαν, σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, φυτά ραπανιού σε περιέκτες και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν εδαφολογικές και φυλλοδιαγνωστικές αναλύσεις.

Για την διεξαγωγή του πειράματος συλλέχθηκε έδαφος από το αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο και μεταφέρθηκε στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου στον Βόλο. Το έδαφος ανασκάφηκε από μη καλλιεργούμενο σημείο του αγροκτήματος και επειδή περιείχε σημαντικό ποσοστό υγρασίας αφέθηκε να ξηραθεί σε αποθήκη του Εργαστηρίου Εδαφολογίας, απαλλαγμένη από υγρασία, για διάστημα μερικών μηνών.

Για τις ανάγκες της καλλιέργειας των φυτών χρησιμοποιήθηκε «frass» από καλλιέργεια προνυμφών του είδους *Tenebrio molitor* το οποίο χορηγήθηκε από το Εργαστήριο Εντομολογίας του τμήματος. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν σύμμεικτα λιπάσματα 11-48-8 και 13,5-0-46 και περλίτης. Τα ανόργανα λιπάσματα χρησιμοποιήθηκαν στην μεταχείριση, αποκλειστικά και μόνο, του θετικού μάρτυρα (PC), ενώ ο περλίτης χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις ώστε να βελτιώσει το πορώδες του εδάφους στους περιέκτες.

#### **2.1.1. Οργάνωση και προετοιμασία του πειράματος**

Στο πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας δημιουργήθηκαν 6 τύποι υποστρώματος για την καλλιέργεια των φυτών ραπανιού, αρχικά σε δίσκους σπορειών και στη συνέχεια σε περιέκτες. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 48 περιέκτες, όγκου 2L - 8 περιέκτες για κάθε έναν από τους 6 διαφορετικούς τύπους υποστρώματος - στον πυθμένα των οποίων εφαρμόστηκε διηθητικό χαρτί ώστε να περιοριστεί η απορροή εδάφους και θρεπτικών στοιχείων.

Το υπόστρωμα του αρνητικού μάρτυρα (NC) περιλάμβανε 1400 g εδάφους και 500 mL περλίτη ανά περιέκτη, χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού υλικού.

Το υπόστρωμα του θετικού μάρτυρα (PC) περιλάμβανε 1400 g εδάφους, 500 mL περλίτη, 84 g σύμμεικτου λιπάσματος 11-48-8 και 78 g λιπάσματος 13,5-0-46 ανά περιέκτη.

Υπόστρωμα frass 1% περιλάμβανε 1400 g εδάφους, 500 mL περλίτη και 4 g frass ανά περιέκτη.

Υπόστρωμα frass 5% περιλάμβανε 1400 g εδάφους, 500 mL περλίτη και 20 g frass ανά περιέκτη.

Υπόστρωμα frass 10% περιλάμβανε 1400 g εδάφους, 500 mL περλίτη και 41 g frass ανά περιέκτη.

Υπόστρωμα frass 20% περιλάμβανε 1400 g εδάφους, 500 mL περλίτη και 82 g frass ανά περιέκτη.

Τα συστατικά του κάθε υποστρώματος αναμειγνύονταν προσεκτικά σε δοχεία ανάμειξης και ακολούθως μεταφέρονταν στους περιέκτες. Οι περιέκτες τιτλοδοτούνταν με το όνομα της μεταχείρισης και τοποθετούνταν σε σειρές, σε σταθερή θέση στο δάπεδο του θερμοκηπίου.

Οι δίσκοι σπορείου πληρώθηκαν, επίσης, με το υπόστρωμα της κάθε μίας από τις 6 μεταχειρίσεις χωριστά και τιτλοδοτήθηκαν αναλόγως.

Οι 48 περιέκτες και οι δίσκοι αρδεύτηκαν με 300 mL νερού βρύσης την ημέρα της πλήρωσής τους. Οι αρδεύσεις συνεχίστηκαν και τις επόμενες ημέρες με ποσότητα ανάλογη ώστε να διατηρείται επαρκής υγρασία στους περιέκτες και στους δίσκους.

### **2.1.2. Φυτικό υλικό**

Το φυτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία αναπτύχθηκε σε δίσκους σπορείων, στον χώρο του θερμοκηπίου. Οι σπόροι του ραπανιού (*Raphanus sativus*) χορηγήθηκαν από το εργαστήριο Μορφολογίας και Ανατομίας φυτών του τμήματος. Τοποθετήθηκε 1 σπόρος ανά θέση και όταν τα σπορόφυτα αναπτύχθηκαν αρκετά, έγινε μεταφύτευσή τους στους περιέκτες.

Για κάθε μεταχείριση αναπτύχθηκαν 21 σπορόφυτα στις αντίστοιχες θέσεις του δίσκου. Στους περιέκτες μεταφυτεύτηκε 1 φυτό ανά περιέκτη και στις

περιπτώσεις που υπήρχε νέκρωση κάποιου φυτού κατά τις πρώτες μέρες της μεταφύτευσης γινόταν αντικατάστασή του από κάποιο άλλο του σπορείου.

Τόσο στα σπορεία όσο και στους περιέκτες γίνονταν τακτικά ποτίσματα κάθε 2-3 φορές την εβδομάδα ώστε τα φυτά να διατηρούνται σε ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης.

### **2.1.3. Μετρήσεις**

Ύστερα από 65 ημέρες καλλιέργειας από την ημερομηνία σποράς, έγινε συγκομιδή των ραπανιών. Την ημέρα της συγκομιδής έγινε επίσης δειγματοληψία εδάφους από όλους τους περιέκτες των διαφορετικών επαναλήψεων των 6 μεταχειρίσεων.

Τόσο τα φυτικά όσο και τα εδαφικά δείγματα αποξηράθηκαν και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις. Στα εδαφικά δείγματα μετρήθηκε το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), καθώς και η περιεκτικότητα σε φώσφορο, κάλιο και νάτριο. Στα φυτικά δείγματα μετρήθηκε, τόσο στο υπέργειο όσο και στο υπόγειο μέρος, το ξηρό βάρος, η συγκέντρωση του αζώτου, του φωσφόρου, του καλίου και του νατρίου. Επιπλέον στου φυτικούς ιστούς μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις στα ιχνοστοιχεία ψευδαργύρου, σιδήρου, μαγγανίου και χαλκού.

## **2.2. Μέθοδοι ανάλυσης**

Τα εδαφικά δείγματα που ελήφθησαν από τους περιέκτες, καθώς και τα φυτικά δείγματα που συγκομίστηκαν, αναλύθηκαν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Εδαφολογίας του τμήματος.

### **2.2.1. Φυτό**

#### **2.2.1.1. Συγκομιδή**

Οι περιέκτες με τα φυτά ραπανιού μεταφέρθηκαν αρχικά στο εργαστήριο για να αρχίσει η διαδικασία της συγκομιδής. Οι περιέκτες στους οποίους τελικά επέζησαν και αναπτύχθηκαν φυτά ήταν από τις μεταχειρίσεις του θετικού μάρτυρα (PC) και των «frass» 1% και 5%. Επιβίωσαν 8, 8 και 2 φυτά αντίστοιχα.

Το υπέργειο τμήμα του φυτού αποκόπηκε στο επίπεδο του εδάφους με ένα ψαλίδι κλαδέματος. Το υπόγειο τμήμα αφαιρέθηκε προσεκτικά από τον περιέκτη και στην συνέχεια καθαρίστηκε με πλύση με νερό ώστε να απομακρυνθεί το προσκολλημένο σε αυτό έδαφος.

Η διαδικασία συγκομιδής του υπέργειου και του υπόγειου τμήματος έγινε τυχαιοποιημένα, για τα φυτά των διαφορετικών μεταχειρίσεων, ώστε να αποφευχθούν τυχόν λάθη.

#### **2.2.1.2. Μέτρηση ξηρού βάρους**

Μετά την συγκομιδή, τόσο το υπέργειο όσο και το υπόγειο μέρος του κάθε φυτού τοποθετήθηκε μέσα σε χάρτινο σακουλάκι στον φούρνο αποξήρανσης στους 70°C για 48 h ώστε να απομακρυνθεί όλη η περιεχόμενη υγρασία. Έπειτα ζυγίστηκε στον ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας και καταγράφηκε το ξηρό του βάρος.

Τα αποξηραμένα φυτικά δείγματα στο τέλος της διαδικασίας μέτρησης του ξηρού βάρους, κονιορτοποιήθηκαν ώστε να προετοιμαστούν για τις αναλύσεις που επρόκειτο να ακολουθήσουν. Συγκεκριμένα η πρώτη επεξεργασία των δειγμάτων έγινε στο γουδί και στη συνέχεια η διαδικασία της κονιορτοποίησης ολοκληρώθηκε σε μύλο άλεσης δειγμάτων για καλύτερα αποτελέσματα και λιγότερες απώλειες.

#### **2.2.1.3. Μέτρηση ολικού αζώτου (N)**

Η μέτρηση του ολικού αζώτου στα φυτικά δείγματα πραγματοποιήθηκε κατά Kjeldahl.

Το πρώτο βήμα στην διαδικασία μέτρησης του αζώτου είναι η πέψη των δειγμάτων. Λόγω περιορισμένης ποσότητας δειγμάτων, τα φυτικά δείγματα των διαφορετικών επαναλήψεων, ίδιων μεταχειρίσεων, συνενώθηκαν ώστε να σχηματιστεί ικανή ποσότητα φυτικού ιστού για τις επικείμενες αναλύσεις. Κατά συνέπεια δημιουργήθηκαν μεικτά δείγματα. Η συνένωση αφορούσε αρχικά στα υπέργεια τμήματα και με όμοιο τρόπο έγιναν και οι συνενώσεις των δειγμάτων του υπόγειου μέρους.

Η πέψη πραγματοποιήθηκε σε 6 δείγματα υπέργειου τμήματος φυτού, 3 από την μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC) και 3 από αυτή του 1% «frass».

Αντίστοιχα χρησιμοποιήθηκαν 4 δείγματα για υπόγειο φυτικό τμήμα, 2 από την κάθε μεταχείριση. Τα 2 φυτά της μεταχείρισης του «frass» 5% δεν αποτελούν αντιπροσωπευτικό δείγμα και δεν ελήφθησαν υπόψιν στις αναλύσεις.

Σε έναν ζυγό ακριβείας ζυγίστηκαν 0,5 g ή 1 g δείγματος, ανάλογα με την εκάστοτε διαθέσιμη ποσότητα. Η ακριβής ένδειξη του οργάνου καταγράφηκε και στην συνέχεια το δείγμα μεταφέρθηκε στον σωλήνα πέψης. Σε κάθε σωλήνα τοποθετήθηκε 1 ταμπλέτα «Kjeltab» σεληνίου, 1 ταμπλέτα «antifoam» για αποφυγή αφρίσματος κατά την πέψη, και 20 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Ο κάθε σωλήνας πέψης πωματίστηκε με μία κωνική φιάλη των 50 mL για να συλλέγει τους υδρατμούς. Οι σωλήνες πέψης τοποθετήθηκαν στο «block» ώστε να ακολουθήσει η πέψη σύμφωνα με το πρόγραμμα 1 της συσκευής (Εικόνα 2). Με την ολοκλήρωση της πέψης, κι αφού η θερμοκρασία των σωλήνων μειώθηκε σε θερμοκρασία δωματίου, τα δείγματα μεταφέρθηκαν σε δοχεία τύπου falcon.



**Εικόνα 2.** Στάδια εκτέλεσης πέψης σύμφωνα με το πρόγραμμα 1 της συσκευής πέψης.

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας περιλαμβάνει την απόσταξη του αζώτου με την χρήση της συσκευής «Kjeldahl». Αρχικά έγινε δοκιμαστική απόσταξη σε νερό βρύσης, ώστε να προετοιμαστεί η συσκευή και να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα προηγούμενης χρήσης. Το βήμα αυτό επαναλήφθηκε στο τέλος της διαδικασίας της απόσταξης των διαλυμάτων.

Σε κάθε δείγμα εκχυλισμένης φυτικής μάζας προστέθηκαν 50 mL απιονισμένο νερό. Το δείγμα αυτό μεταφέρθηκε σε καθαρό σωλήνα πέψης και τοποθετήθηκε στην υποδοχή της συσκευής. Σε μια κωνική φιάλη των 250 mL τοποθετήθηκαν περίπου 25 mL βορικού οξέος 4% ώστε να συμπλοκοποιηθεί η αμμωνία και να μην χαθεί κατά την απόσταξη λόγω της μεγάλης πτητικότητάς της. Η κωνική φιάλη τοποθετήθηκε σε

δεύτερη υποδοχή της συσκευής και ξεκίνησε η διαδικασία της απόσταξης, διάρκειας 5 min.

Η μέτρηση του αζώτου ολοκληρώθηκε με την διαδικασία της ογκομέτρησης. Στο τέλος της απόσταξης, το περιεχόμενο του σωλήνα απορρίφθηκε και στην κωνική φιάλη περιλαμβάνονταν το εκχυλισμένο άζωτο του εκάστοτε δείγματος. Η διαδικασία της ογκομέτρησης ξεκίνησε με την τοποθέτηση 5 σταγόνων μεικτού δείκτη, με την βοήθεια πιπέτας, στο διάλυμα της κωνικής φιάλης. Το δείγμα αμέσως χρωματίστηκε πράσινο. Καθ' όλη τη διαδικασία της ογκομέτρησης γινόταν ανάδευση με μαγνητικό αναδευτήρα. Στο άνοιγμα της κωνικής φιάλης τοποθετήθηκε η προχοΐδα με το πυκνό  $H_2SO_4$  που σταδιακά προστέθηκε στο ογκομετρούμενο διάλυμα ως την πλήρη εξουδετέρωση. Η διαδικασία της ογκομέτρησης ολοκληρώθηκε όταν το χρώμα του διαλύματος έγινε πορτοκαλί, οπότε και σημειώθηκε η ένδειξη του όγκου που καταναλώθηκε μέσω της προχοΐδας. Τα βήματα αυτά επαναλήφθηκαν για όλα τα δείγματα.

#### **2.2.1.4. Μέτρηση φωσφόρου (P)**

Η μέτρηση του φωσφόρου στα δείγματα πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο «Olsen». Για την μέτρηση του φωσφόρου καθώς και των υπόλοιπων μη πτητικών ουσιών τα φυτικά δείγματα πρώτα αποτεφρώθηκαν με την διαδικασία της ξηρής καύσης.

Η διαδικασία της ξηρής καύσης δειγμάτων φύλλων και υπόγειου μέρους ραπανιού ξεκίνησε με την ζύγιση 0,5 g από 3 μεικτές επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση (αρνητικός μάρτυρας (NC), 1% «frass»).

Τα δείγματα, αφού ζυγίστηκαν, τοποθετήθηκαν σε χωνευτήρες πορσελάνης και στην συνέχεια μεταφέρθηκαν στον φούρνο όπου παρέμειναν 5 h σε θερμοκρασία  $500^{\circ}C$ . Στη συνέχεια, όταν η θερμοκρασία μειώθηκε σε θερμοκρασία δωματίου, έγινε παραλαβή των αποτεφρωμένων δειγμάτων. Το περιεχόμενο της κάψας παραλήφθηκε με 15 mL HCl 20% και διηθήθηκε από διηθητικό χαρτί σε ογκομετρική φιάλη των 50 mL. Μόλις ολοκληρώθηκε η διήθηση, έγινε πλήρωση της φιάλης ως την χαραγή, με απιονισμένο νερό και καλή ανακίνηση. Στην συνέχεια έγινε αραιώση του πυκνού δείγματος κατά 20 φορές και τα δυο δείγματα (πυκνό, αραιό) διατηρήθηκαν σε δοχεία τύπου falcon. Η αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλα τα δείγματα.

Η μέτρηση του φωσφόρου έγινε στα 20 φορές αραιωμένα διαλύματα αποτεφρωμένου φυτικού ιστού. Αρχικά παρασκευάστηκαν τα ρυθμιστικά διαλύματα γνωστής συγκέντρωσης φωσφόρου με συγκέντρωση 0, 0,1, 0,2, 0,4, 0,6 και 0,8 ppm. Στη συνέχεια σε κάθε φιάλη προστέθηκαν 2,5 mL ασκορβικού οξέος και ρυθμίστηκε το pH στην τιμή 7 με διάλυμα καυστικού νατρίου NaOH 1M και HNO<sub>3</sub> 2%. Προστέθηκε απιονισμένο νερό μέχρι την χαραγή. Τα διαλύματα αφέθηκαν για 30 min έως ότου να αναπτυχθεί το κυανό χρώμα. Κατόπιν μετρήθηκε ο φώσφορος στα πρότυπα διαλύματα και δημιουργήθηκε η καμπύλη βαθμονόμησης του οργάνου.

Το επόμενο στάδιο αποτελούσε η παρασκευή των δειγμάτων ώστε να γίνει μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο. Σε μια ογκομετρική φιάλη των 25 mL προστέθηκαν 5 mL διαλύματος. Στην συνέχεια προστέθηκαν 2,5 mL από την χρωστική (ασκορβικό οξύ), 5 σταγόνες από το NaOH 1M και 3 σταγόνες HNO<sub>3</sub> 2% ώστε να ρυθμιστεί το pH. Συμπληρώθηκε με απιονισμένο νερό ως την χαραγή και αφέθηκε για 30 min ώστε να αναπτυχθεί το κυανό χρώμα. Στην συνέχεια έγινε η μέτρηση του περιεχόμενου φωσφόρου στο φασματοφωτόμετρο.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλα τα δείγματα (υπόγειο και υπέργειο φυτικό μέρος). Κάποια δείγματα χρειάστηκαν επιπλέον αραιώση κατά 2 φορές λόγω υψηλής τιμής ένδειξης του οργάνου.

#### **2.2.1.5. Μέτρηση καλίου (K) και νατρίου (Na)**

Η μέτρηση του καλίου και του νατρίου πραγματοποιήθηκε στο φλογοφωτόμετρο. Στην αρχή έγινε βαθμονόμηση του οργάνου με δείγματα γνωστής συγκέντρωσης καλίου και νατρίου.

Η μέτρηση του καλίου αλλά και του νατρίου έγινε στα 20 φορές αραιωμένα φυτικά δείγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στην μέτρηση του φωσφόρου.

#### **2.2.1.6. Μέτρηση ψευδαργύρου (Zn), σιδήρου (Fe), χαλκού (Cu), μαγγανίου (Mn)**

Η μέτρηση των ιχνοστοιχείων έγινε με την χρήση φασματοφωτόμετρου ατομικής απορρόφησης. Η μέτρηση των ιχνοστοιχείων πραγματοποιήθηκε στα 20 φορές αραιωμένα φυτικά δείγματα ή στα πυκνά διαλύματα. Στην περίπτωση του ψευδαργύρου χρησιμοποιήθηκαν τα αραιά διαλύματα. Οι μετρήσεις του σιδήρου

έγιναν αρχικά στα πυκνά διαλύματα και όταν η ένδειξη του οργάνου ήταν μεγάλη η μέτρηση γινόταν στο 20 φορές αραιωμένο διάλυμα. Οι μετρήσεις του χαλκού και του μαγγανίου έγιναν όλες σε πυκνά διαλύματα.

Μεταξύ κάθε μέτρησης γινόταν εφαρμογή διαφορετικού λαμπτήρα, ανάλογα με το στοιχείο που επρόκειτο να μετρηθεί, και ρύθμιση του οργάνου με βάση τα ρυθμιστικά διαλύματα γνωστών συγκεντρώσεων και πυκνοτήτων.

## **2.2.2. Έδαφος**

Στα εδάφη εντός των περιεκτών πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις προσδιορισμού του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και των μακροθρεπτικών στοιχείων (P, K, Na). Οι μετρήσεις έγιναν σε τυχαίες επαναλήψεις, όλων των μεταχειρίσεων, ανεξάρτητα από την επιβίωση ή μη των φυτών ραπανιού σε αυτές.

### **2.2.2.1. Δειγματοληψία εδάφους**

Στο χρονικό διάστημα μεταξύ της συγκομιδής του υπέργειου και του υπόγειου τμήματος των φυτών ραπανιού πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία εδάφους από τους περιέκτες. Το δείγμα εδάφους παραλήφθηκε με την βοήθεια ενός σωλήνα διαμέτρου 20 mm από 3 διαφορετικά σημεία του περιέκτη, προσεκτικά για να μην τραυματιστεί το υπόγειο μέρος του φυτού. Τα 3 αυτά σημεία ήταν έτσι κατανομημένα στον περιέκτη ώστε το δείγμα να είναι κατά το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερο. Οι περιέκτες προηγουμένως δεν είχαν αρδευτεί ώστε να μην περιέχεται υπερβολική υγρασία στο δείγμα. Τελικά παραλήφθηκαν περίπου 100 g εδάφους από κάθε επανάληψη της εκάστοτε μεταχείρισης.

Το εδαφικό δείγμα στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε χάρτινο σακουλάκι στον φούρνο αποξήρανσης στους 70°C για 48 h μαζί με τα φυτικά δείγματα. Μετά την αποξήρανση των εδαφικών δειγμάτων έγινε θρυμματισμός τους σε γουδί και το θρυμματισμένο πλέον δείγμα χρησιμοποιήθηκε για τις εκχυλίσεις και τις μετρήσεις που ακολούθησαν.



#### **2.2.2.2. Μέτρηση pH και αγωγιμότητας**

Αρχικά επιλέχθηκαν, τυχαία, 3 δείγματα της κάθε μεταχείρισης από τα οποία ζυγίστηκαν 10 g εδάφους και μεταφέρθηκαν σε δοχεία τύπου falcon. Σε αυτά προστέθηκαν 25 mL απιονισμένου νερού και έγινε ελαφριά ανακίνηση με το χέρι. Στην συνέχεια, όλα τα δοχεία ανακινήθηκαν στην συσκευή ανακίνησης για 15 min. Ακολούθως, τα δείγματα αφέθηκαν να ηρεμήσουν για 15 min ενώ παράλληλα τέθηκε σε λειτουργία το πεχάμετρο και ρυθμίστηκε με τα ρυθμιστικά διαλύματα (pH=4 & pH=7). Τέλος, βυθίστηκε το ηλεκτρόδιο του οργάνου στο εκάστοτε δείγμα για 5 min και σημειώθηκε η ένδειξη της οθόνης.

Στα ίδια δείγματα, κατόπιν μέτρησης του pH, πραγματοποιήθηκε και η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Το δείγμα, αφού ανακινήθηκε ελαφρά με το χέρι, σταθεροποιήθηκε στον πάγκο, βυθίστηκε το ηλεκτρόδιο σε αυτό και ύστερα από 8 min καταγράφηκε η ένδειξη του οργάνου. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλα τα δείγματα.

#### **2.2.2.3. Μέτρηση φωσφόρου (P)**

Για τον προσδιορισμό του φωσφόρου στα εδαφικά διαλύματα η διαδικασία ήταν ίδια με αυτή των φυτικών δειγμάτων. Διαφορά υπήρχε στην δημιουργία των εκχυλισμάτων εδάφους.

Στη διαδικασία παρασκευής των δειγμάτων εδάφους αρχικά ζυγίστηκε 1 g εδάφους από 2 τυχαίες επαναλήψεις κάθε μεταχείρισης και μεταφέρθηκε σε δοχείο τύπου falcon. Σε αυτά προστέθηκαν 20 mL διαλύματος  $\text{NaHCO}_3$ . Έπειτα τα δείγματα τοποθετήθηκαν στην συσκευή ανακίνησης, σε πλάγια θέση και ανακινήθηκαν για 30 min, ενώ στη συνέχεια διηθήθηκαν από υθμούς σε νέα δοχεία τύπου falcon.

Τέλος, έγινε μέτρηση του περιεχόμενου σε αυτά φωσφόρου με την ίδια μέθοδο που ακολουθήθηκε για τα φυτικά δείγματα. Σε ορισμένα εδαφικά δείγματα χρειάστηκε επίσης αραιώση 3,33 φορές όταν η ένδειξη του οργάνου υπερέβαινε αυτή του μέγιστου ρυθμιστικού.

#### **2.2.2.4. Μέτρηση καλίου (K) και νατρίου (Na)**

Η διαδικασία προσδιορισμού του καλίου και νατρίου στο έδαφος έγινε παράλληλα με αυτήν για τα φυτικά δείγματα.

Όπως και στην περίπτωση της μέτρησης του pH, επιλέχθηκαν τυχαία 3 επαναλήψεις από κάθε μεταχείριση και ζυγίστηκαν 2 g εδάφους από κάθε μία. Το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε δοχείο τύπου falcon και στην συνέχεια προστέθηκαν σε αυτό 20 mL CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>. Τα διαλύματα ανακινήθηκαν ελαφρώς με το χέρι και στην συνέχεια για 60 min στην συσκευή ανακίνησης σε πλάγια θέση. Τέλος, διηθήθηκαν από υθμούς και από τα πυκνά διαλύματα δημιουργήθηκαν τα αραιά κατά 10 φορές.

Ο προσδιορισμός του εδαφικού καλίου έγινε στα αραιά διαλύματα, στο φλογοφωτόμετρο, αν και σε μερικές περιπτώσεις χρειάστηκε εκ νέου αραιώση των ήδη αραιών διαλυμάτων κατά 10 φορές. Τα διαλύματα αυτά αντιστοιχούσαν στο σύνολό τους σε επαναλήψεις από την μεταχείριση όπου εφαρμόστηκαν σύμμεκτα λιπάσματα (θετικός μάρτυρας PC).

Η μέτρηση του περιεχόμενου νατρίου έγινε επίσης στα αραιωμένα κατά 10 φορές διαλύματα. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάστηκε περαιτέρω αραιώση καθώς οι ενδείξεις του οργάνου δεν ήταν μεγαλύτερες από αυτές του ρυθμιστικού διαλύματος με την μεγαλύτερη συγκέντρωση.

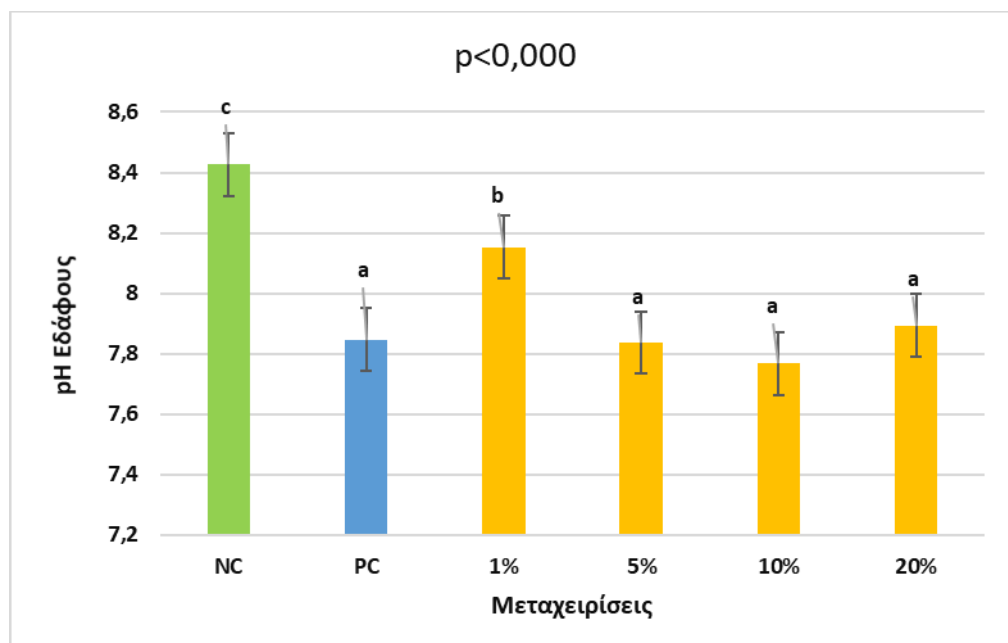
### **2.3. Στατιστική επεξεργασία**

Η διεξαγωγή του πειράματος έγινε υπό συνθήκες πλήρους τυχαιοποίησης. Υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι για τις επαναλήψεις των διάφορων μεταχειρίσεων και πραγματοποιήθηκε μονοπαραγοντική ανάλυση παραλλακτικότητας (one-way ANOVA) για την στατική επεξεργασία τους. Οι διαφορές μεταξύ των μέσων όρων διερευνήθηκαν με ανάλυση post-hoc κατά Duncan, όπου το επίπεδο σημαντικότητας αυτής ορίστηκε στο 95% (ή  $p < 0,05$ ). Η απεικόνιση των στατιστικών αποτελεσμάτων της ανάλυσης έγινε μέσω του MS Excel. Στο πάνω μέρος της κάθε στήλης των σχημάτων εφαρμόστηκε η μπάρα του τυπικού σφάλματος για τις επαναλήψεις των διάφορων μεταχειρίσεων.

## Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

### 3.1. Εδαφολογικές αναλύσεις

#### pH εδάφους



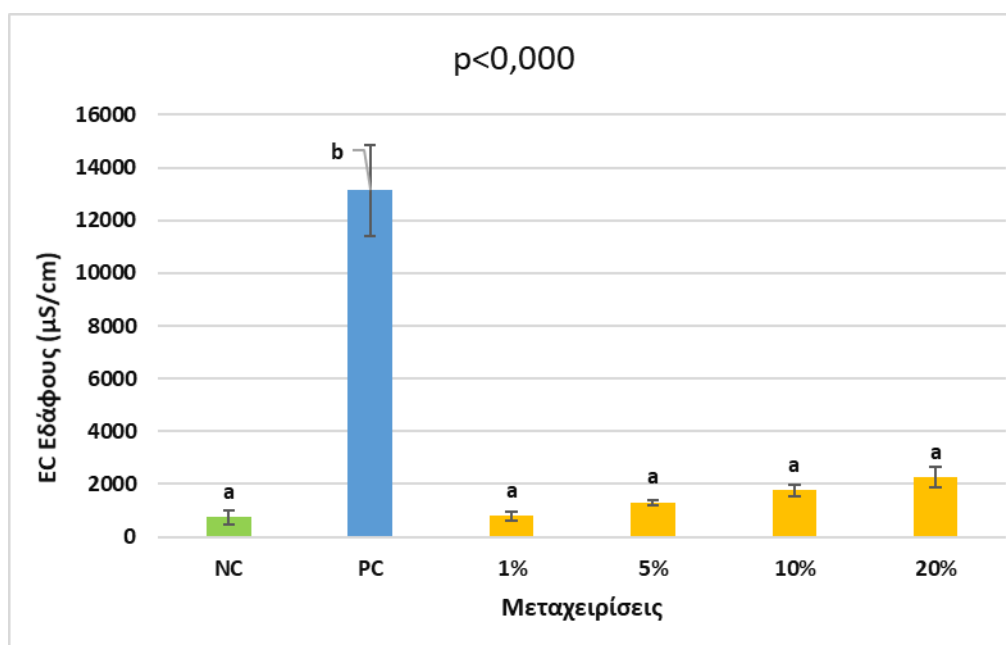
**Σχήμα 1.** Τιμές pH στα δείγματα εδάφους των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 1%, 5%, 10% και 20% «frass» εκφρασμένες σε μονάδες pH.

Όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 1, στη μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC), η τιμή του pH του εδάφους ήταν 8,4 και ύστερα από την προσθήκη ανόργανων λιπασμάτων (θετικός μάρτυρας (PC)) μειώθηκε σημαντικά σε pH 7,85. Στη μεταχείριση 1% «frass» το pH μειώθηκε σημαντικά σε 8,15, ενώ στις επόμενες κλιμακούμενες μεταχειρίσεις «frass» οι τιμές pH ήταν παρόμοιες με εκείνη του θετικού μάρτυρα (PC).

Το pH του εδάφους που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, όπως φαίνεται από την μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC), ήταν ελαφρώς αλκαλικό. Σε γενικές γραμμές το pH όλων των μεταχειρίσεων κυμάνθηκε σε ελαφρώς αλκαλικά έως αλκαλικά επίπεδα, με τιμές μεταξύ 7,7 και 8,4. Η σημαντική μείωση του pH για την μεταχείριση του θετικού μάρτυρα (PC) αποδίδεται στην προσθήκη ανόργανων σύμμεικτων λιπασμάτων στις επαναλήψεις αυτού. Έχει βρεθεί ότι τα ανόργανα λιπάσματα προκαλούν μείωση του εδαφικού pH και συνεπώς αύξηση της οξύτητας

του εδάφους (Ayeni & Ezech, 2017). Η τιμή του pH που παρατηρήθηκε στις μεταχειρίσεις του «frass» ήταν επίσης μειωμένη σε σχέση με αυτή του αρνητικού μάρτυρα (NC). Η μείωση αυτή πιθανώς να οφείλεται στην ελαφρώς όξινη φύση του «frass» και την ταχεία αποδόμησή του η οποία συντέλεσε στην παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και οργανικών οξέων (Houben *et al.*, 2020).

### Ηλεκτρική αγωγιμότητα εδάφους (EC)



**Σχήμα 2.** Τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) εδάφους των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και του «frass» στις διάφορες συγκεντρώσεις (1%, 5%, 10%, 20%) εκφρασμένες σε  $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ .

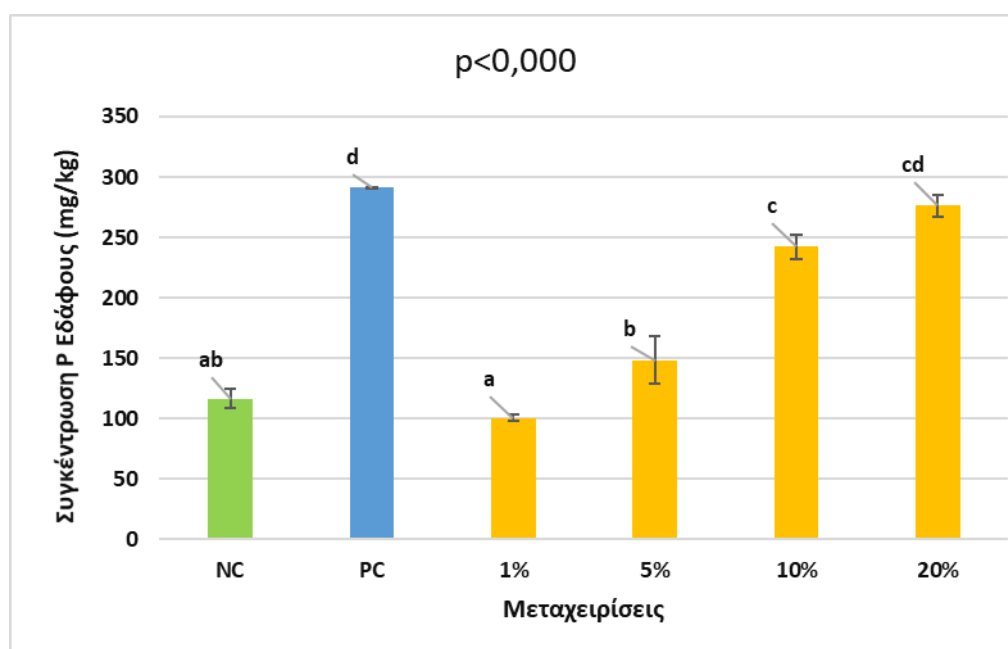
Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των διαφόρων μεταχειρίσεων. Μεταξύ των μετρήσεων για τις διάφορες μεταχειρίσεις υπήρχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές. Το μέγιστο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σημειώθηκε για την μεταχείριση PC και ήταν  $13333,3 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ , ενώ για τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις οι τιμές κυμαίνονταν σε χαμηλότερα επίπεδα. Τη μικρότερη τιμή παρουσίασε η μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC), όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν  $738,1 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ . Μεταξύ των μεταχειρίσεων του «frass» διαπιστώθηκε κλιμακούμενη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας η οποία ήταν αντίστοιχη με την αύξηση της συγκέντρωσης «frass», αλλά στατιστικώς μη σημαντική. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα για την μεταχείριση 1% βρέθηκε στα  $783,8 \mu\text{S}$

$\text{cm}^{-1}$ , ενώ για τη μεταχείριση 5% «frass» σχεδόν διπλασιάστηκε στα  $1310,7 \mu\text{S cm}^{-1}$  και για τη μεταχείριση 10%, αυξήθηκε στα  $1774,7 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Η μέγιστη τιμή αντιστοιχούσε στην μεταχείριση του 20% και βρέθηκε  $2266,3 \mu\text{S cm}^{-1}$ .

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) στο έδαφος των μεταχειρίσεων επηρεάστηκε από την προσθήκη των εδαφοβελτιωτικών υλικών. Στη μεταχείριση του θετικού μάρτυρα (PC) η ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν τόσο υψηλή ( $EC_{PC}=13,3 \text{ mS cm}^{-1}$ ) ώστε το έδαφος να χαρακτηριστεί αλατούχο ( $EC > 4 \text{ mS cm}^{-1}$ ) (Kirsten *et al.*, 2016). Σύμφωνα με τα όσα περιέγραψαν οι Iqbal *et al.* (2020), η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ύστερα από προσθήκη ανόργανων λιπασμάτων στο έδαφος, οφείλεται στην ταυτόχρονη προσθήκη θρεπτικών και αλάτων που περιέχονται σε αυτά. Όσον αφορά τις μεταχειρίσεις του «frass», η παράλληλη αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την αύξηση της συγκέντρωσης του «frass» συμφωνεί με τα όσα αναφέρουν οι Zahn & Quilliam (2017) σε αντίστοιχο πείραμα σε καλλιέργεια *Allium cepa* (φρέσκο κρεμμυδάκι). Ωστόσο οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στις μεταχειρίσεις δεν ήταν τόσο υψηλές ώστε να χαρακτηρισθούν αλατούχα τα εδάφη.

Η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ευθύνεται για μια σειρά προβλημάτων στην ανάπτυξη των φυτών, είτε εξ' αιτίας της τοξικότητας από κάποιο κατιόν ή ανιόν είτε λόγω αλλαγών στο οσμωτικό δυναμικό του εδάφους που προκαλούν μείωση στην πρόσληψη νερού και θρεπτικών από τις ρίζες (Jacobs & Timmer, 2005). Σε αυτό το γεγονός πιθανόν να οφείλεται η αδυναμία ανάπτυξης των φυτών στους περιέκτες των μεταχειρίσεων του θετικού μάρτυρα (PC) και του «frass» 5%, 10% και 20%.

### Συγκέντρωση φωσφόρου (P) στο έδαφος



**Σχήμα 3.** Αποτελέσματα μετρήσεων φωσφόρου (P) στο έδαφος των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και του «frass» στις διάφορες συγκεντρώσεις (1%, 5%, 10%, 20%) εκφρασμένα σε mg P/kg εδάφους.

Μεταξύ των συγκεντρώσεων φωσφόρου στο έδαφος των διάφορων μεταχειρίσεων υπήρχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές (Σχήμα 3). Οι τιμές ήταν παραπλήσιες για την μεταχείριση του θετικού μάρτυρα (PC) και του 20% «frass» καθώς η διαφορά τους ήταν στα  $15,5 \text{ mg kg}^{-1}$ . Παραπλήσιες ήταν και οι τιμές της συγκέντρωσης φωσφόρου για την μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του 1%, με αυτή του αρνητικού μάρτυρα (NC) να υπερτερεί κατά  $15,9 \text{ mg kg}^{-1}$ . Ενδιάμεσες των τιμών αυτών ήταν οι μετρήσεις του φωσφόρου για τις μεταχειρίσεις 5% και 10% «frass». Η αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου ήταν σχεδόν γραμμική όσο αυξανόταν το ποσοστό του προστιθέμενου «frass».

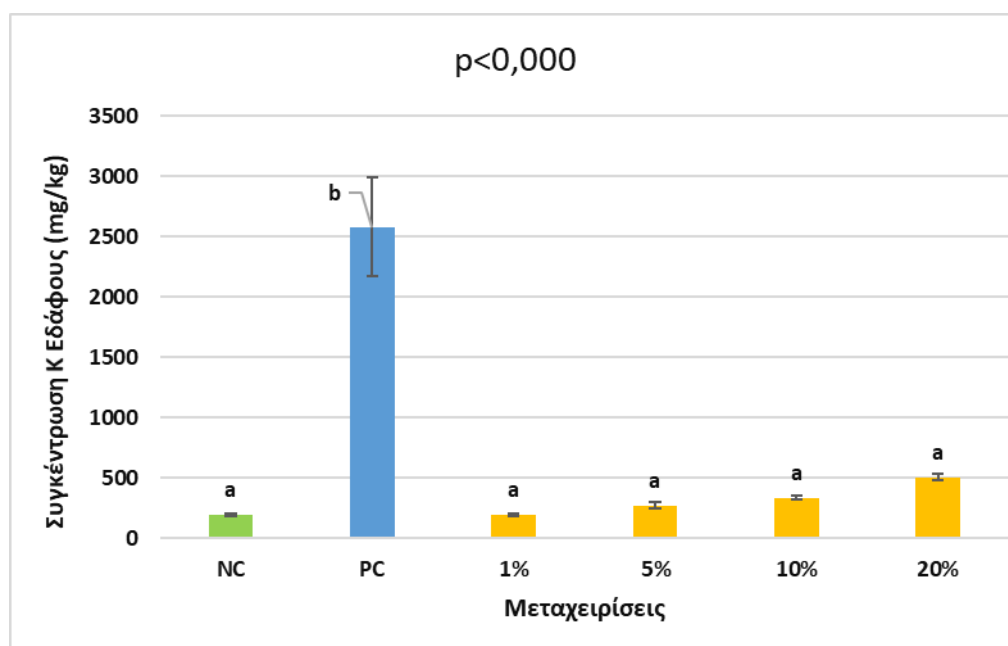
Η συγκέντρωση του φωσφόρου που καταγράφηκε για όλες τις μεταχειρίσεις ήταν σε χαμηλά επίπεδα, άλλωστε, η συγκέντρωση του διαθέσιμου φωσφόρου στο έδαφος συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 100 ppm και 3000 ppm P (Sharpley, 2000).

Το pH επηρεάζει τη διαθεσιμότητα φωσφόρου στο έδαφος η οποία είναι μέγιστη σε τιμές pH πλησίον του 6,5, σύμφωνα με τους Penn & Camberato (2019). Στην περίπτωση του θετικού μάρτυρα (PC), η προσθήκη ανόργανων λιπασμάτων εμπλούτισε το έδαφος με φώσφορο, ενώ μείωσε το pH του, γεγονός που αιτιολογεί την υψηλή συγκέντρωση φωσφόρου σε αυτό. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τους

Ayeni & Ezeh, (2017), οι οποίοι μελέτησαν μεταξύ άλλων την επίδραση ανόργανων λιπασμάτων στην συγκέντρωση φωσφόρου σε έδαφος όπου καλλιεργήθηκε *Lycopersicon esculentum* (τομάτα).

Η χαμηλή συγκέντρωση φωσφόρου στην μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1% πιθανόν να οφείλεται τόσο, στην υψηλή τιμή pH για τις δυο αυτές μεταχειρίσεις όσο, και στην μηδενική ή ελάχιστη προσθήκη εδαφοβελτιωτικού υλικού αντίστοιχα. Η συγκέντρωση του φωσφόρου δεν φάνηκε να επηρεάζεται σημαντικά από το pH για τις μεταχειρίσεις του «frass» 5%, 10% και 20% όπου το pH παρέμεινε σε παρόμοια επίπεδα. Το «frass» αποτελεί σημαντική πηγή φωσφόρου, οπότε είναι πιθανόν η κλιμακωτή αύξηση της συγκέντρωσης φωσφόρου σε αυτές τις μεταχειρίσεις να οφείλεται αποκλειστικά στην αύξηση της ποσότητας του χορηγούμενου «frass». Όλες οι μεταχειρίσεις «frass» είχαν χαμηλότερη συγκέντρωση φωσφόρου από αυτή του θετικού μάρτυρα (PC), γεγονός που συνάδει με τις παρατηρήσεις των Houben *et al.* (2020) σε καλλιέργεια *Hordeum vulgare* (κριθάρι) σε υπόστρωμα όπου χορηγήθηκε «frass» και ανόργανα λιπάσματα ως εδαφοβελτιωτικά υλικά.

## Συγκέντρωση καλίου (K) στο έδαφος



**Σχήμα 4.** Αποτελέσματα μετρήσεων καλίου (K) στο έδαφος των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 1%, 5%, 10% και 20% «frass», εκφρασμένα σε mg K/kg εδάφους.

Η συγκέντρωση του καλίου στα δείγματα των μεταχειρίσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 4. Μεταξύ των τιμών της συγκέντρωσης καλίου, για τις διάφορες μεταχειρίσεις, παρατηρήθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές. Στη μεταχείριση του θετικού μάρτυρα (PC) μετρήθηκε η μέγιστη συγκέντρωση καλίου συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Την μικρότερη συγκέντρωση καλίου παρουσίασε η μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC), η τιμή της οποίας ήταν 191,8 mg K/kg. Η τιμή αυτή ήταν παραπλήσια με εκείνη της μεταχείρισης του 1% «frass», όπου μετρήθηκαν 192,5 mg K/kg. Στις υπόλοιπες τρεις μεταχειρίσεις η συγκέντρωση του καλίου αυξανόταν ακολουθώντας την αύξηση στην περιεκτικότητα του «frass». Η μέγιστη συγκέντρωση καλίου παρατηρήθηκε στην μεταχείριση του 20 % «frass», όπου μετρήθηκαν 505,3 mg kg<sup>-1</sup>.

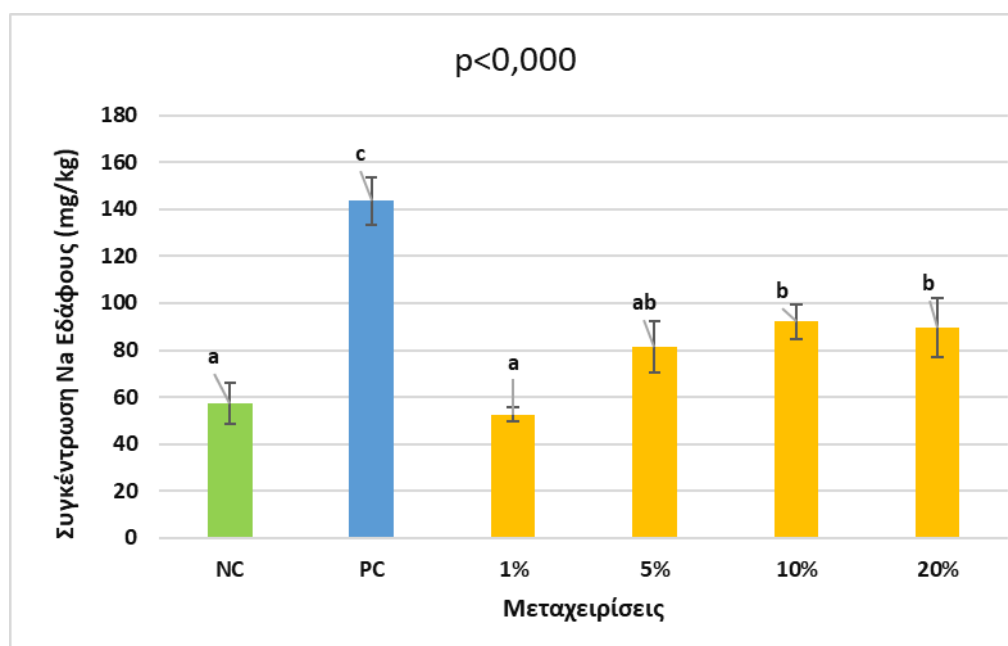
Οι συγκεντρώσεις του καλίου στα εδάφη όλων των μεταχειρίσεων, με εξαίρεση τον θετικό μάρτυρα (PC), βρέθηκαν να είναι μεταξύ 190 ppm και 500 ppm. Η πολύ υψηλή διαφορά της συγκέντρωσης καλίου στον θετικό μάρτυρα (PC) ενδέχεται να οφείλεται στην χορήγηση ανόργανων λιπασμάτων τα οποία πρόσθεσαν υψηλή ποσότητα καλίου στο έδαφος. Η υπόθεση αυτή συμφωνεί με τα όσα αποτυπώνουν οι Lalitha & Dhakshinamoorthy (2014) οι οποίοι αναφέρουν ότι



σημαντικές ποσότητες καλίου μπορεί να προστεθούν στο έδαφος ύστερα από την εφαρμογή υδατοδιαλυτών καλιούχων λιπασμάτων.

Στις μεταχειρίσεις όπου χρησιμοποιήθηκε «frass» ως εδαφοβελτιωτικό υλικό, η συγκέντρωση του καλίου αυξήθηκε γραμμικά ακολουθώντας την αύξηση της προσθήκης «frass». Αυτό φαίνεται να οφείλεται στην αυξημένη περιεκτικότητα του «frass» σε κάλιο. Σε κάθε περίπτωση βέβαια η συγκέντρωση του καλίου για τις μεταχειρίσεις του «frass» ήταν υψηλότερη από αυτή του αρνητικού μάρτυρα (NC) αλλά χαμηλότερη από ότι στον θετικό μάρτυρα (PC). Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με τα ευρήματα των Houben *et al.* (2020) σε παρόμοιο πείραμα, όπου αναφέρεται ότι η συγκέντρωση του καλίου ήταν μικρότερη στις μεταχειρίσεις του «frass» συγκριτικά με αυτή στο μάρτυρα, όπου χρησιμοποιήθηκαν ανόργανα λιπάσματα, πιθανώς εξαιτίας της υδατοδιαλυτής φύσης τους.

#### Συγκέντρωση νατρίου (Na) στο έδαφος



**Σχήμα 5.** Αποτελέσματα μετρήσεων νατρίου (Na) στο έδαφος των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC), του θετικού μάρτυρα (PC) και των μεταχειρίσεων 1%, 5%, 10% και 20% «frass», εκφρασμένα σε mg Na/kg εδάφους.

Στις τιμές της συγκέντρωσης νατρίου στο έδαφος της κάθε μεταχείρισης παρατηρήθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές (Σχήμα 5). Η υψηλότερη συγκέντρωση σε νάτριο καταγράφηκε στη μεταχείριση του θετικού μάρτυρα (PC)

όπου βρέθηκαν  $143,5 \text{ mg kg}^{-1}$ . Η χαμηλότερη συγκέντρωση νατρίου παρατηρήθηκε για τις μεταχειρίσεις του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του 1% «frass», μεταξύ των οποίων δεν υπήρχε σημαντική διαφορά.

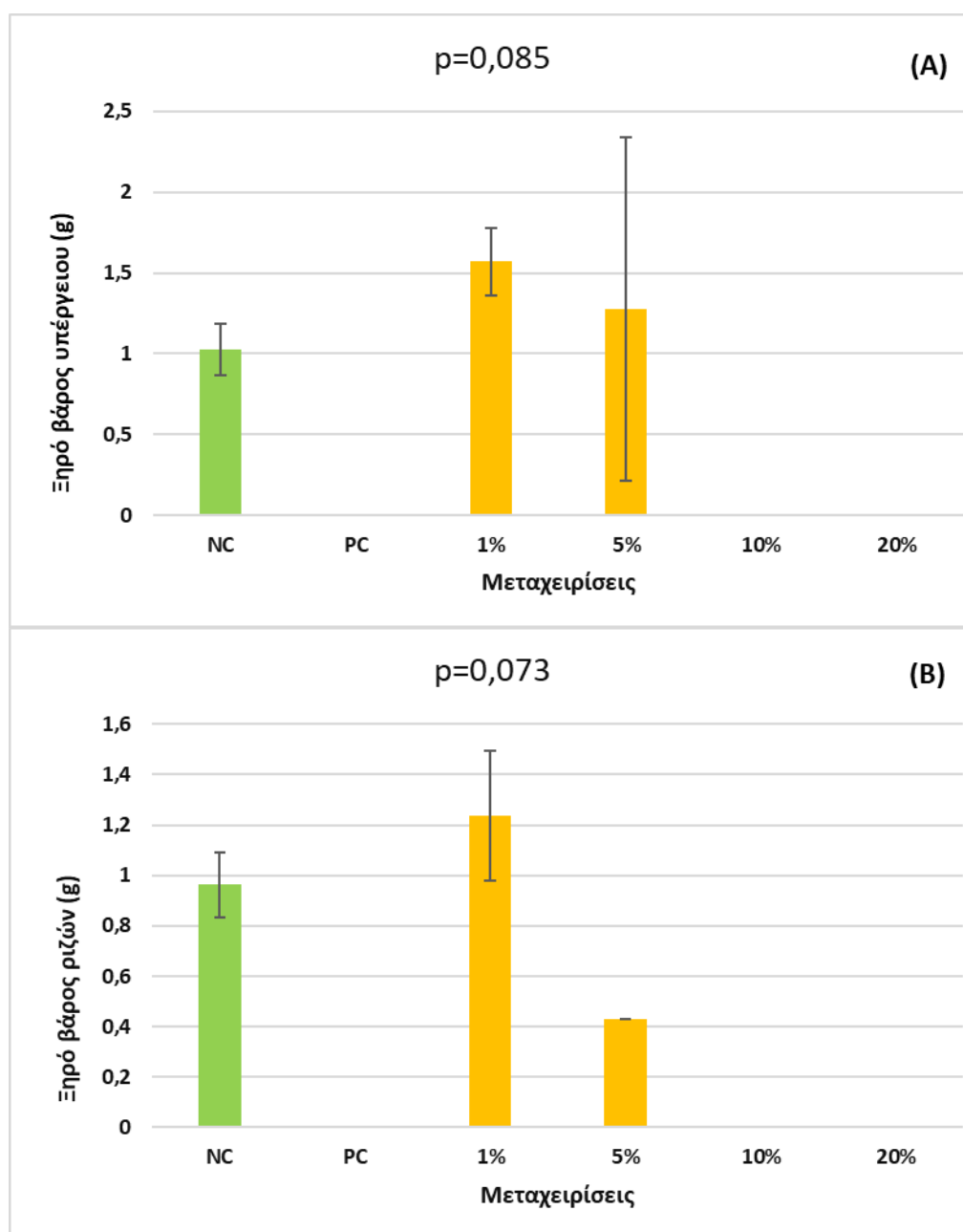
Οι υπόλοιπες μεταχειρίσεις «frass» παρουσίασαν παρόμοιες συγκεντρώσεις νατρίου με μεγαλύτερη αυτή της μεταχείρισης 10% στα  $92,2 \text{ mg kg}^{-1}$ . Αμέσως μικρότερη, κατά  $2,7 \text{ mg kg}^{-1}$ , ήταν η συγκέντρωση της μεταχείρισης του 20% με αποτέλεσμα μεταξύ τους να μην υπάρχει σημαντική διαφορά. Για την μεταχείριση του 5%, όπου η συγκέντρωση του νατρίου ήταν  $81,4 \text{ mg kg}^{-1}$ , σημειώθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες.

Η συγκέντρωση του νατρίου στο έδαφος των μεταχειρίσεων παρουσίασε σημαντική διακύμανση. Η υψηλότερη τιμή ανταλλάξιμου νατρίου, η οποία υπολογίστηκε για την μεταχείριση του θετικού μάρτυρα (PC), πιθανώς να οφείλεται στην ύπαρξη του στα ανόργανα λιπάσματα που χορηγήθηκαν. Η συγκέντρωση του νατρίου σε αυτή την περίπτωση ήταν υψηλή αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό ώστε να χαρακτηριστεί το έδαφος νατριωμένο, καθώς το pH του ήταν μικρότερο του 8,5.

Στις μεταχειρίσεις του «frass», η αυξανόμενη συγκέντρωση νατρίου που παρατηρήθηκε, αντίστοιχη με την αύξηση της προσθήκης του «frass», φαίνεται να οφείλεται στην ύπαρξη νατρίου σε αυτό. Η υπόθεση αυτή συμφωνεί με τους Przemieniecki *et al.* (2021) οι οποίοι μεταξύ άλλων πραγματοποίησαν ανάλυση της σύνθεσης του «frass» που προερχόταν από το έντομο *Tenebrio molitor* και διαπίστωσαν ότι περιείχε και νάτριο. Σύμφωνα με τον Demir (2020), η διαθεσιμότητα του νατρίου συνδέεται θετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους η οποία αυξήθηκε τόσο στην περίπτωση του θετικού μάρτυρα (PC) όσο και για τις μεταχειρίσεις του «frass» γεγονός που δικαιολογεί την υψηλή συγκέντρωση νατρίου σε αυτές τις μεταχειρίσεις.

### 3.2. Αναλύσεις στα φυτά.

#### Ξηρό βάρος Υπέργειου τμήματος – Ρίζας φυτών



**Σχήμα 6.** Μετρήσεις (A) ξηρού βάρους υπέργειου τμήματος φυτών και (B) ριζών των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και των 1%, 5% «frass», εκφρασμένες σε g.

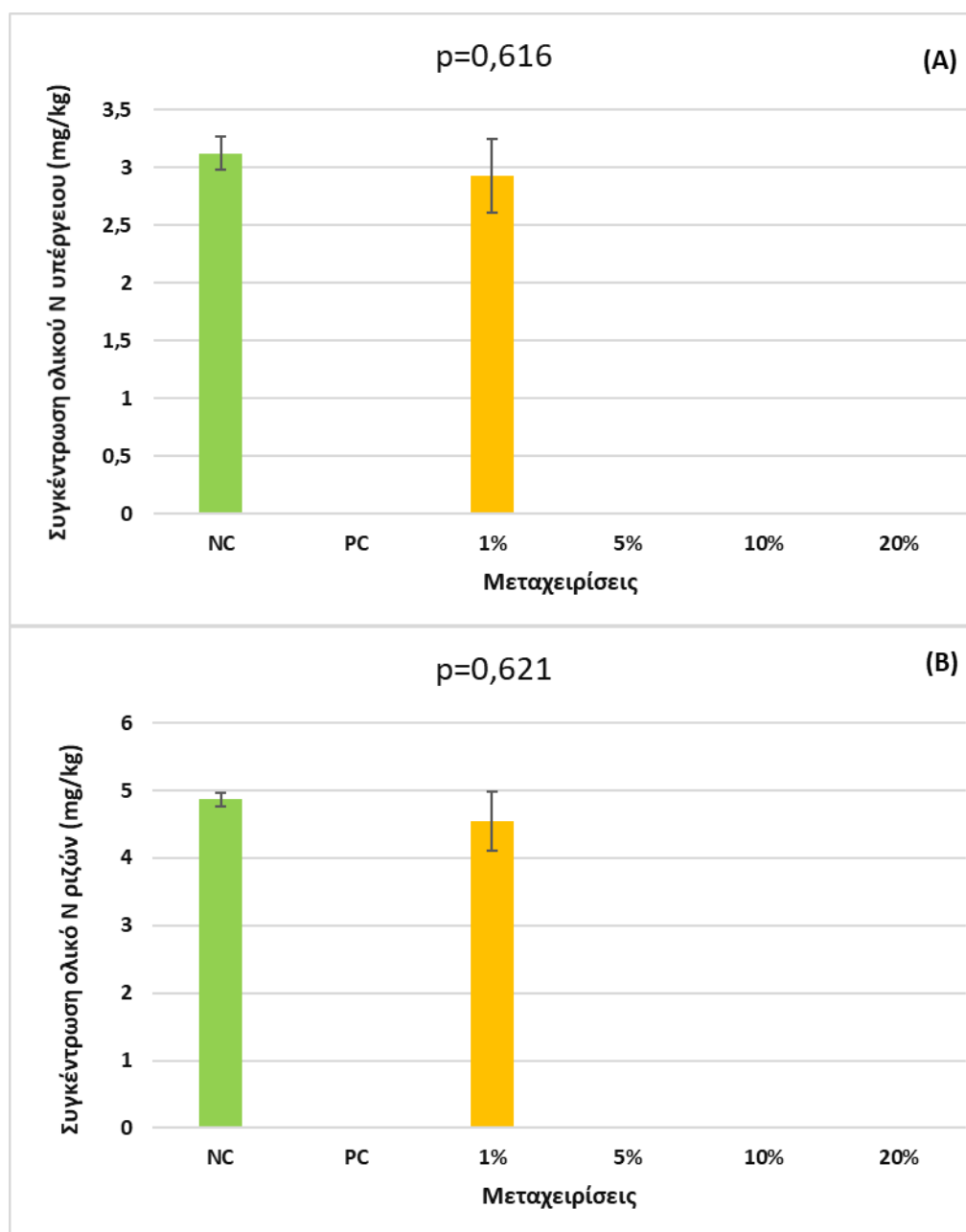
Μεταξύ των τιμών του ξηρού βάρους του υπέργειου τμήματος και της ρίζας των φυτών (Σχήμα 6), δεν υπήρχε στατιστικώς σημαντική διαφορά. Η μέγιστη τιμή της ξηρής μάζας παρουσιάστηκε και στις δυο περιπτώσεις για τα φυτά της μεταχείρισης του 1% «frass» με βάρος υπέργειου τμήματος 1,57 g και ρίζας 1,24 g.

Για την μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC) το ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος ήταν μικρότερο απ' ό,τι για την μεταχείριση του 5% «frass» αλλά με στατιστικώς μη σημαντική διαφορά (Σχήμα 6A). Επίσης, το ξηρό βάρος της ρίζας των φυτών του αρνητικού μάρτυρα (NC) βρέθηκε στατιστικώς μη σημαντικά μεγαλύτερο αυτών της μεταχείρισης του 5% (Σχήμα 6B).

Έως το στάδιο της συγκομιδής κατόρθωσαν να αναπτυχθούν μόνο τα φυτά της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC), του «frass» 1% και δυο φυτά του «frass» 5%. Η ταχεία ανοργανοποίηση του «frass» στο έδαφος (Poveda, 2021) καθώς και η υδατοδιαλυτή μορφή των ανόργανων λιπασμάτων καθιστούν άμεσα διαθέσιμες, στα φυτά, μεγάλες ποσότητες θρεπτικών. Για τον λόγο αυτό πιθανόν να αναπτύσσονται τοξικότητες στα φυτά και να παρεμποδίζεται η ανάπτυξη και η επιβίωσή τους στο έδαφος των μεταχειρίσεων του θετικού μάρτυρα (PC), του «frass» 5%, 10% και 20%. Σύμφωνα με τους Zahn & Quilliam (2017), το «frass» ενδεχομένως περιέχει υψηλή ποσότητα αμμωνιακών ιόντων ( $\text{NH}_4^+$ ) ικανή να προκαλέσει τοξικότητα και δυσκολίες στην ανάπτυξη των φυτών. Αυτοί παρατήρησαν επίσης ότι φυτά *Allium cepa* (φρέσκο κρεμμυδάκι) που καλλιεργήθηκαν σε έδαφος με υψηλή συγκέντρωση «frass» από *Tenebrio molitor* δεν επέζησαν. Παράλληλα η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα που αναπτύχθηκε στο έδαφος αυτών των τεσσάρων μεταχειρίσεων πιθανώς ανέστειλε την ανάπτυξη των φυτών.

Η καλλιέργεια των φυτών στο έδαφος του «frass» 1% αύξησε το ξηρό βάρος της παραγόμενης βιομάζας τόσο στο υπέργειο όσο και στο υπόγειο μέρος των φυτών. Το γεγονός αυτό φαίνεται να οφείλεται στην προσθήκη θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος μέσω της ανοργανοποίησης του «frass». Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρουν και οι Przemieniecki *et al.* (2021) οι οποίοι μέτρησαν υψηλότερο ξηρό βάρος σε φυτά *Triticum aestivum* (βρώμη) που λιπάνθηκαν με «frass» από *Tenebrio molitor* συγκριτικά με αυτά που καλλιεργήθηκαν σε έδαφος στο οποίο δεν έγινε καμία εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών υλικών. Στα φυτά της μεταχείρισης του 5% «frass» παρατηρήθηκε μειωμένη ανάπτυξη βιομάζας στο υπόγειο μέρος των φυτών και ελάχιστα αυξημένη στο υπέργειο μέρος τους σε σχέση με τα φυτά του αρνητικού μάρτυρα (NC). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την μεγάλη θνησιμότητα των φυτών για την μεταχείριση αυτή, υποδεικνύει ότι η χορήγηση «frass» σε μεγαλύτερα ποσοστά δεν επιφέρει θετικά αποτελέσματα.

### Συγκέντρωση ολικού αζώτου (N) στα φυτά



**Σχήμα 7.** Συγκεντρώσεις ολικού αζώτου (N) (A) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (B) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, εκφρασμένες σε mg N/kg φυτικού ιστού.

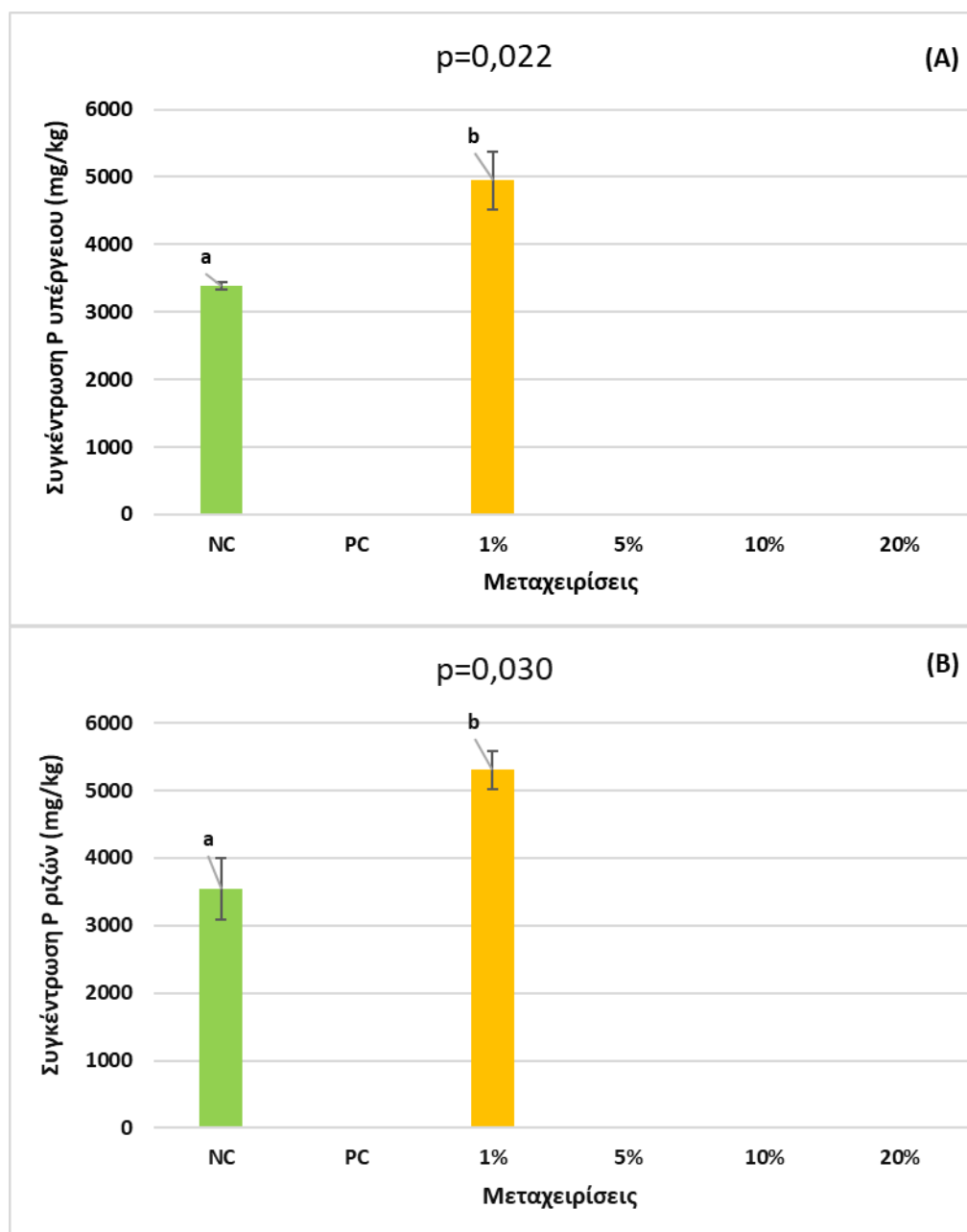
Το ολικό άζωτο τόσο του υπέργειου όσο και του υπόγειου μέρους των φυτών (Σχήμα 7), για τις μεταχειρίσεις του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, δεν παρουσίασε στατιστικές σημαντικές διαφορές. Το ολικό άζωτο ολόκληρου του φυτού ήταν μικρότερο για την μεταχείριση του 1% «frass» συγκριτικά με αυτό της

μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC), αλλά με στατιστικώς μη σημαντικές διαφορές.

Στο υπέργειο τμήμα του φυτού (Σχήμα 7A), για την μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC), συγκεντρώθηκαν συνολικά 3,12 mg N/kg ενώ για το υπόγειο μέρος 4,87 mg N/kg (Σχήμα 7B). Στην μεταχείριση του 1% «frass» συγκεντρώθηκαν 2,93 mg N/kg στο υπέργειο μέρος και 4,55 mg N/kg στη ρίζα.

Το ολικό άζωτο που συσσωρεύτηκε στην βιομάζα των φυτών του «frass» 1% ήταν χαμηλότερο σε σχέση με το ολικό άζωτο στα φυτά του μάρτυρα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα ευρήματα των Houben *et al.* (2020), οι οποίοι κατέγραψαν υψηλότερη συγκέντρωση ολικού αζώτου σε φυτά *Hordeum vulgare* (κριθάρι) που καλλιεργήθηκαν σε υπόστρωμα εμπλουτισμένο με «frass» από *Tenebrio molitor*.

### Συγκέντρωση φωσφόρου (P) στα φυτά



**Σχήμα 8.** Συγκεντρώσεις φωσφόρου (P) (A) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (B) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, εκφρασμένες σε mg P/kg φυτικού ιστού.

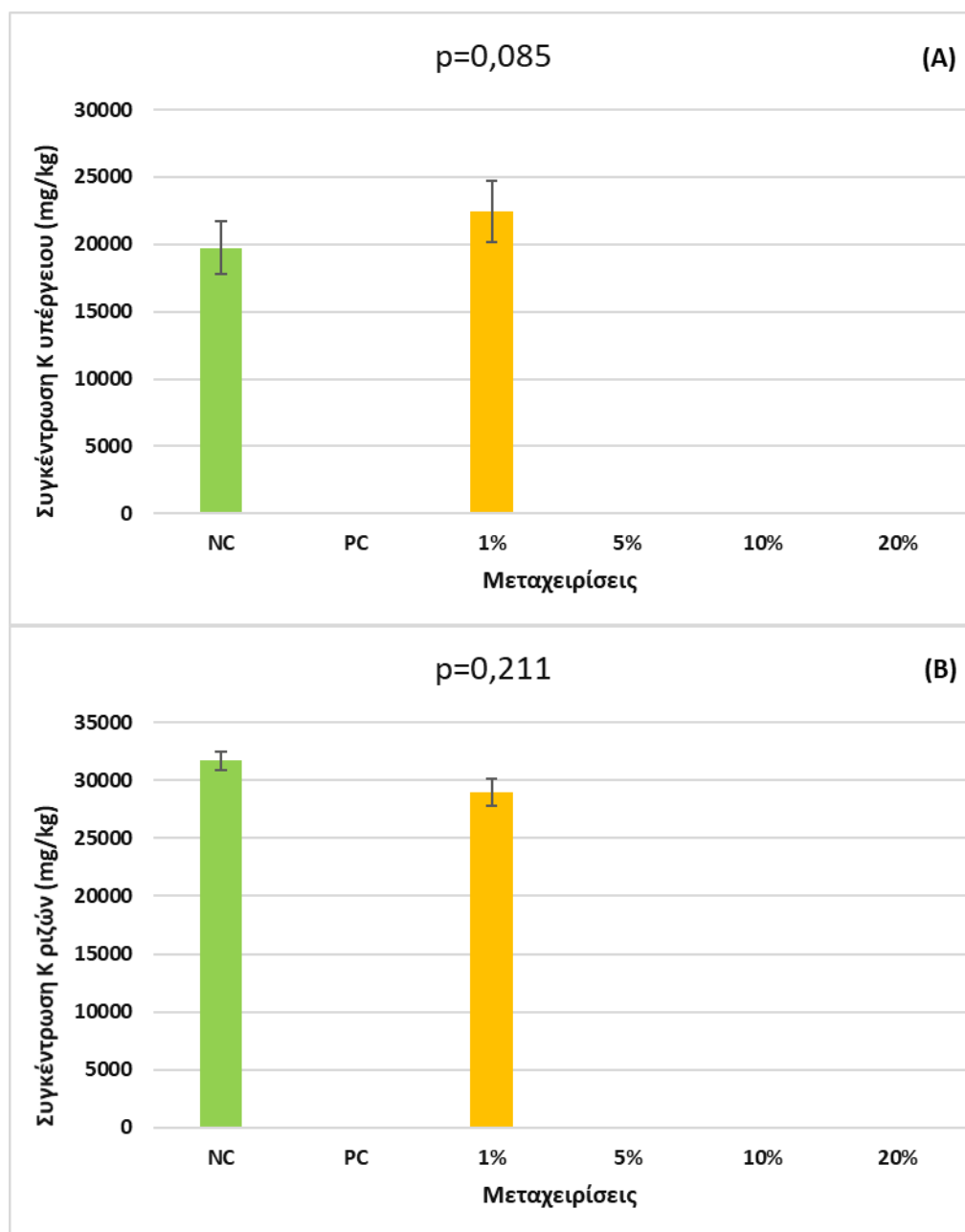
Οι συγκεντρώσεις φωσφόρου (Σχήμα 8) για της μεταχειρίσεις του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1% είχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές. Οι διαφορές σημειώθηκαν τόσο στο υπέργειο όσο και στο υπόγειο μέρος των φυτών. Το υπέργειο μέρος των φυτών (Σχήμα 8A) της μεταχείρισης 1% βρέθηκε να έχει περιεκτικότητα  $4945,9 \text{ mg kg}^{-1}$  σε φώσφορο, δηλαδή αυξημένη κατά  $1560,9 \text{ mg kg}^{-1}$  συγκριτικά με τα φυτά της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC).

Στο υπόγειο μέρος των φυτών (Σχήμα 8B) οι συγκεντρώσεις φωσφόρου της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC) ήταν μικρότερες από αυτές της μεταχείρισης «frass» 1% με στατιστικώς σημαντική διαφορά.

Από τα αποτελέσματα της μέτρησης φωσφόρου στα φυτά προκύπτει θετική συσχέτιση μεταξύ της προσθήκης «frass» ως εδαφοβελτιωτικό υλικό και της συγκέντρωσης φωσφόρου στην βιομάζα των φυτών. Η μείωση του pH που επέφερε η προσθήκη «frass» στο έδαφος της μεταχείρισης 1% φαίνεται να αύξησε την διαθεσιμότητα φωσφόρου, σε σχέση με τον αρνητικό μάρτυρα (NC), με αποτέλεσμα την πρόσληψή του σε μεγαλύτερες ποσότητες από τα φυτά. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τα όσα κατέγραψαν Chavez & Uchanski (2021), οι οποίοι μελέτησαν την χρήση αποχωρημάτων εντόμων ως οργανικό λίπασμα, και αναφέρουν ότι η εφαρμογή «frass» επέφερε αύξηση του διαθέσιμου φωσφόρου στα φυτά.



## Συγκέντρωση καλίου (K) στα φυτά



**Σχήμα 9.** Συγκεντρώσεις καλίου (K) (A) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (B) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, εκφρασμένες σε mg K/kg φυτικού ιστού.

Σύμφωνα με τα όσα αποτυπώνονται στο Σχήμα 9, μεταξύ των συγκεντρώσεων του καλίου για το υπέργειο τμήμα του φυτού (Σχήμα 9A) αλλά και για τις ρίζες των φυτών (Σχήμα 9B) δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές.

Στο υπέργειο τμήμα του φυτού, η συγκέντρωση του καλίου ήταν μικρότερη για τα φυτά της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC) με στατιστικώς μη σημαντική διαφορά από αυτήν της μεταχείρισης 1% «frass». Στη μεταχείριση αυτή η

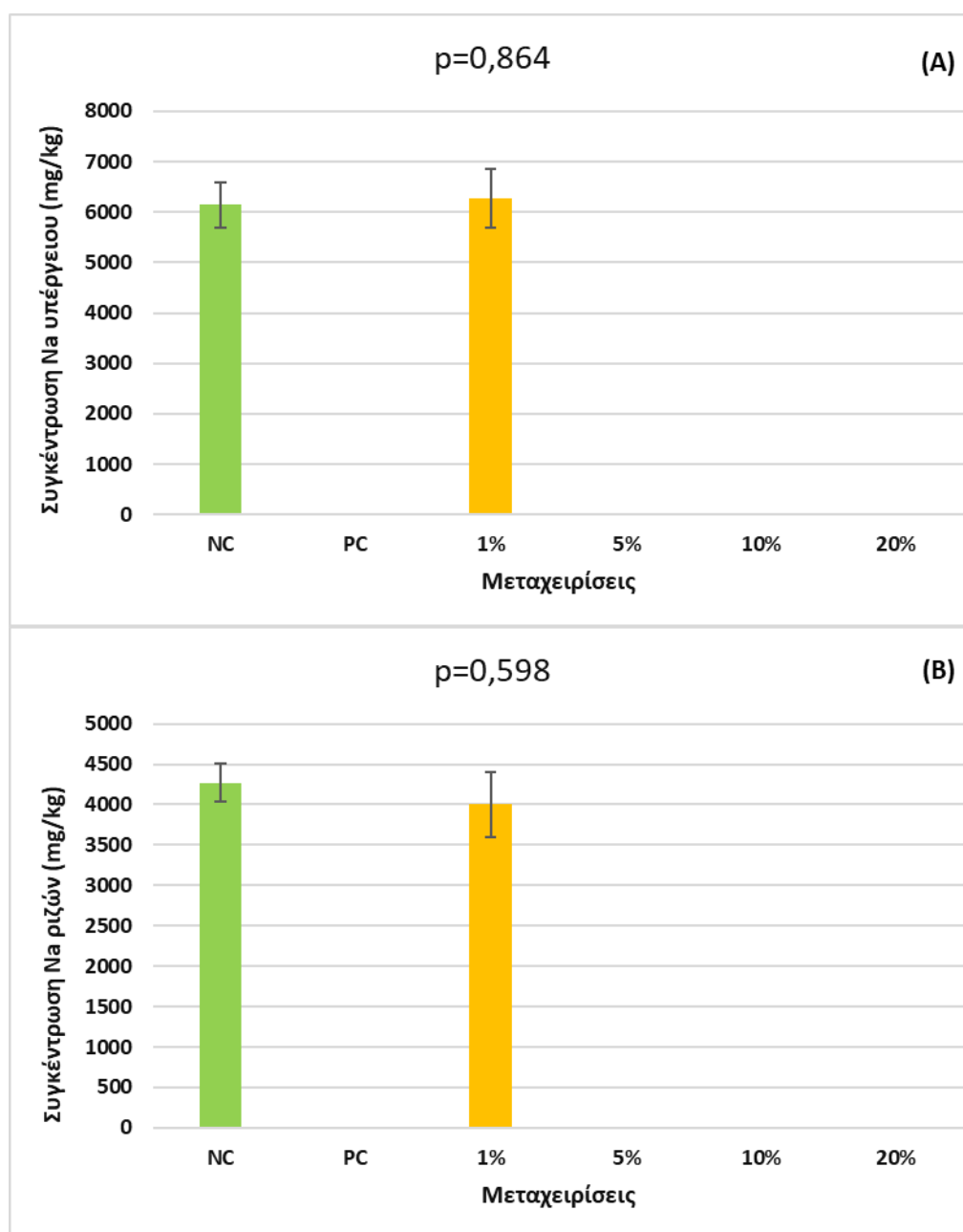
περιεκτικότητα σε κάλιο ήταν μεγαλύτερη κατά 2863,4 mg kg<sup>-1</sup> απ' ότι αυτή του αρνητικού μάρτυρα (NC).

Στο υπόγειο μέρος των φυτών οι διαφορές της συγκέντρωσης καλίου ήταν επίσης στατιστικώς μη σημαντικές. Στην περίπτωση της ρίζας η περιεκτικότητα σε κάλιο ήταν μεγαλύτερη για τα φυτά της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC) συγκριτικά με αυτά του «frass» 1%.

Η συγκέντρωση του καλίου στα φυτά δεν έδειξε να επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη «frass» ως εδαφοβελτιωτικό, τόσο για το υπέργειο όσο και για το υπόγειο τμήμα των φυτών. Είναι πιθανόν η μικρή ποσότητα «frass» που χορηγήθηκε στην μεταχείριση του 1% να μην επαρκούσε για προσθήκη ικανών ποσοτήτων καλίου στο έδαφος και συνεπώς να συντέλεσε στην μικρή διαθεσιμότητα καλίου στα φυτά. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των Houben *et al.* (2020), οι οποίοι παρατήρησαν αύξηση στην συγκέντρωση καλίου σε φυτά *Hordeum vulgare* (κριθάρι) τα οποία καλλιεργήθηκαν σε έδαφος που προστέθηκε «frass» από το έντομο *Tenebrio molitor* σε σύγκριση με έδαφος χωρίς προσθήκη κάποιου εδαφοβελτιωτικού.

Η διαθεσιμότητα του καλίου είναι εξαρτώμενη από την τιμή του pH και μάλιστα, όσο πιο αλκαλικό είναι το pH τόσο μικρότερη είναι η διαθεσιμότητα καλίου στα φυτά (Kramer, 2008). Συνεπώς, η ελαφρώς αυξημένη συγκέντρωση καλίου στο υπέργειο τμήμα των φυτών της μεταχείρισης «frass» 1% πιθανόν να οφείλεται στην υψηλότερη διαθεσιμότητα καλίου στα φυτά αυτά εξαιτίας της μείωσης του pH από την προσθήκη «frass».

### Συγκέντρωση νατρίου (Na) στα φυτά



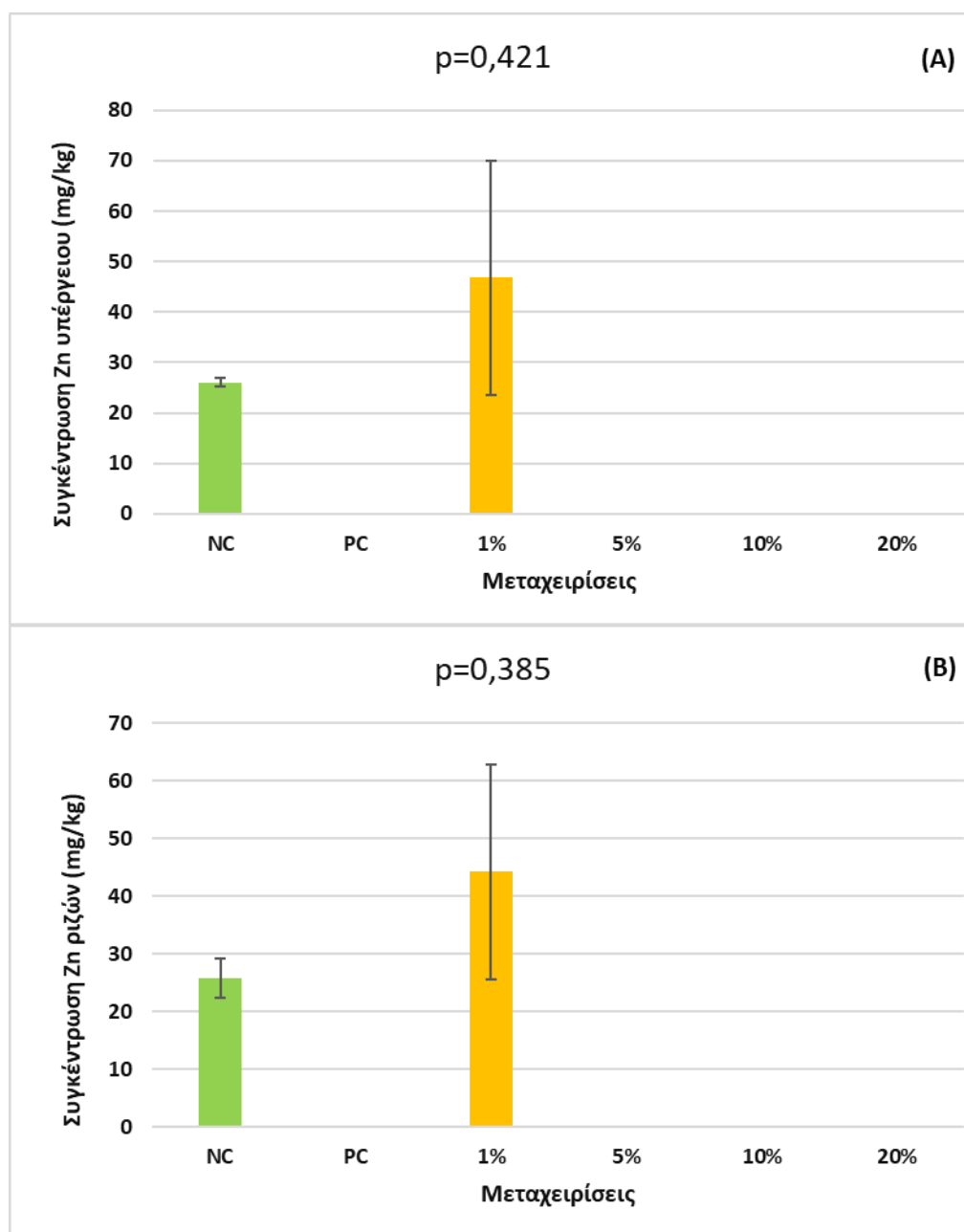
**Σχήμα 10.** Συγκεντρώσεις νατρίου (Na) (A) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (B) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, εκφρασμένες σε mg Na/kg φυτικού ιστού.

Στο Σχήμα 10 απεικονίζεται η συγκέντρωση του νατρίου στα φυτά των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%. Η συγκέντρωση του νατρίου στο υπέργειο τμήμα των φυτών (Σχήμα 10A) ήταν υψηλότερη, αλλά με στατιστικώς μη σημαντική διαφορά, για τη μεταχείριση «frass» 1%, συγκριτικά με αυτή των φυτών του αρνητικού μάρτυρα (NC).

Στο υπόγειο μέρος (Σχήμα 10B), τα φυτά της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC) είχαν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νάτριο σε σχέση με τις ρίζες των φυτών του 1% «frass». Σε αυτή την περίπτωση, επίσης, η διαφορά των τιμών ήταν στατιστικώς μη σημαντική.

Τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων του νατρίου δεν παρουσίασαν κάποια σημαντική συσχέτιση με την προσθήκη «frass» ως εδαφοβελτιωτικό στο έδαφος. Η πρόσληψη του νατρίου από τα φυτά σχετίζεται άμεσα με την συγκέντρωση του καλίου και του νατρίου στο έδαφος καθώς τα δυο αυτά στοιχεία ανταγωνίζονται τις ίδιες θέσεις πρόσληψης από αυτά (Zötb *et al.*, 2014). Στο έδαφος της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα αλλά και του «frass» 1% υπήρχε ικανοποιητική ποσότητα καλίου γεγονός που πιθανώς να παρεμπόδισε την υψηλή πρόσληψη νατρίου από τα φυτά.

### Συγκέντρωση ιχνοστοιχείων (Zn, Cu, Fe, Mn) στα φυτά

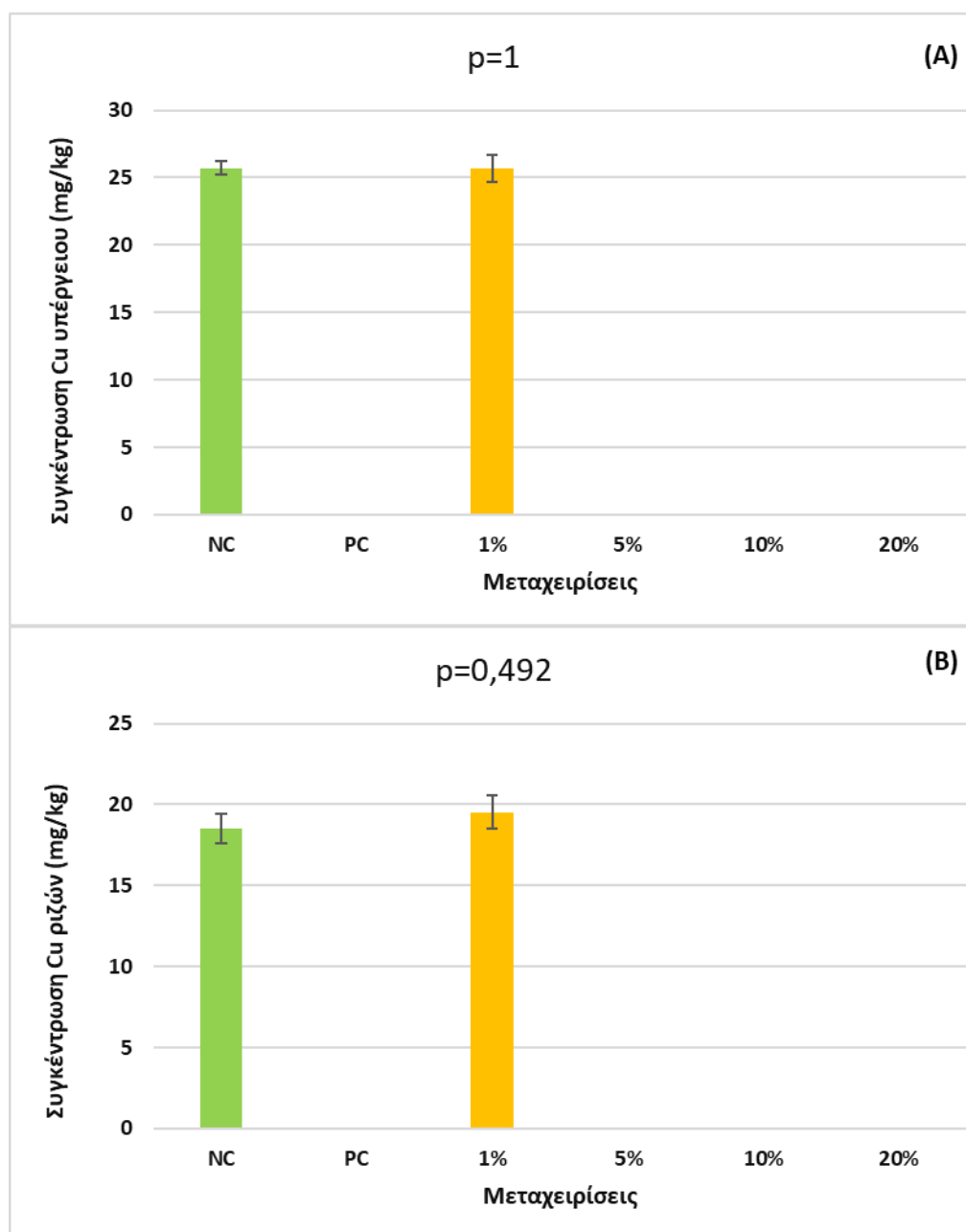


**Σχήμα 11.** Συγκεντρώσεις ψευδαργύρου (Zn) (A) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (B) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, εκφρασμένες σε mg Zn/kg φυτικού ιστού.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις συγκεντρώσεις του ψευδαργύρου στο φυτό (Σχήμα 11) έδειξαν ότι δεν υπήρχε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών για τις μεταχειρίσεις του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του 1% «frass». Οι τιμές της συγκέντρωσης ψευδαργύρου ήταν μικρότερες για το υπέργειο τμήμα των

φυτών (Σχήμα 11A) της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC) συγκριτικά με αυτές της μεταχείρισης του 1% «frass».

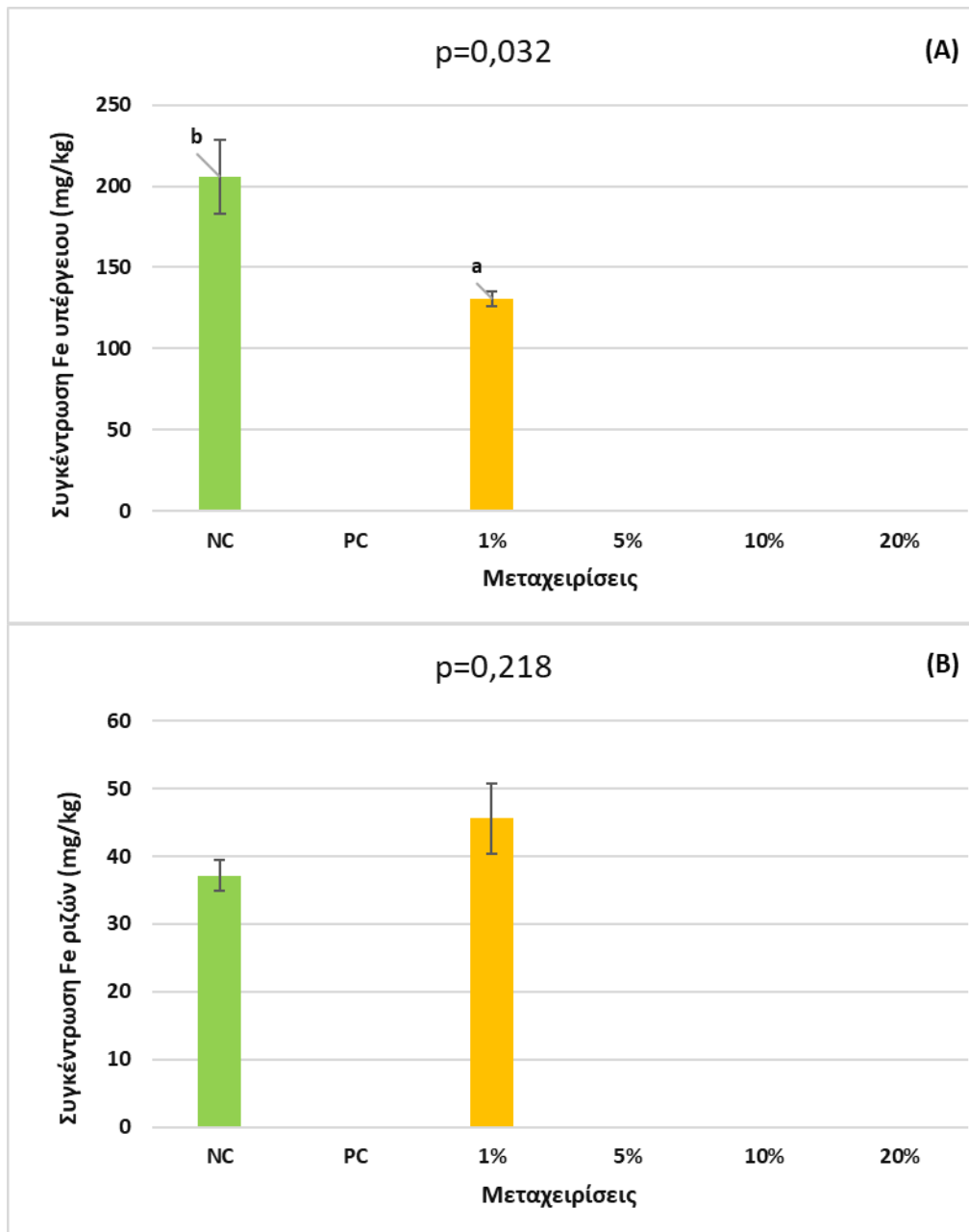
Η συγκέντρωση του ψευδαργύρου στην ρίζα (Σχήμα 11B) ήταν μεγαλύτερη για τα φυτά της μεταχείρισης του 1% «frass», σε σύγκριση με αυτά του αρνητικού μάρτυρα (NC).



**Σχήμα 12.** Συγκεντρώσεις χαλκού (Cu) (A) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (B) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, εκφρασμένες σε mg Cu/kg φυτικού ιστού.

Από την μέτρηση του χαλκού που περιέχεται στα φυτά (Σχήμα 12) προέκυψε ότι η διαφορά μεταξύ των τιμών της συγκέντρωσής του ήταν στατιστικώς μη σημαντική. Στο υπέργειο τμήμα των φυτών (Σχήμα 12Α) οι τιμές ήταν ίδιες για τα φυτά των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του 1% «frass».

Στο υπόγειο μέρος των φυτών (Σχήμα 12Β) παρατηρήθηκε μεγαλύτερη τιμή συγκέντρωσης χαλκού στα φυτά της μεταχείρισης του 1% «frass» χωρίς στατιστικώς σημαντικές διαφορές από αυτά της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC).



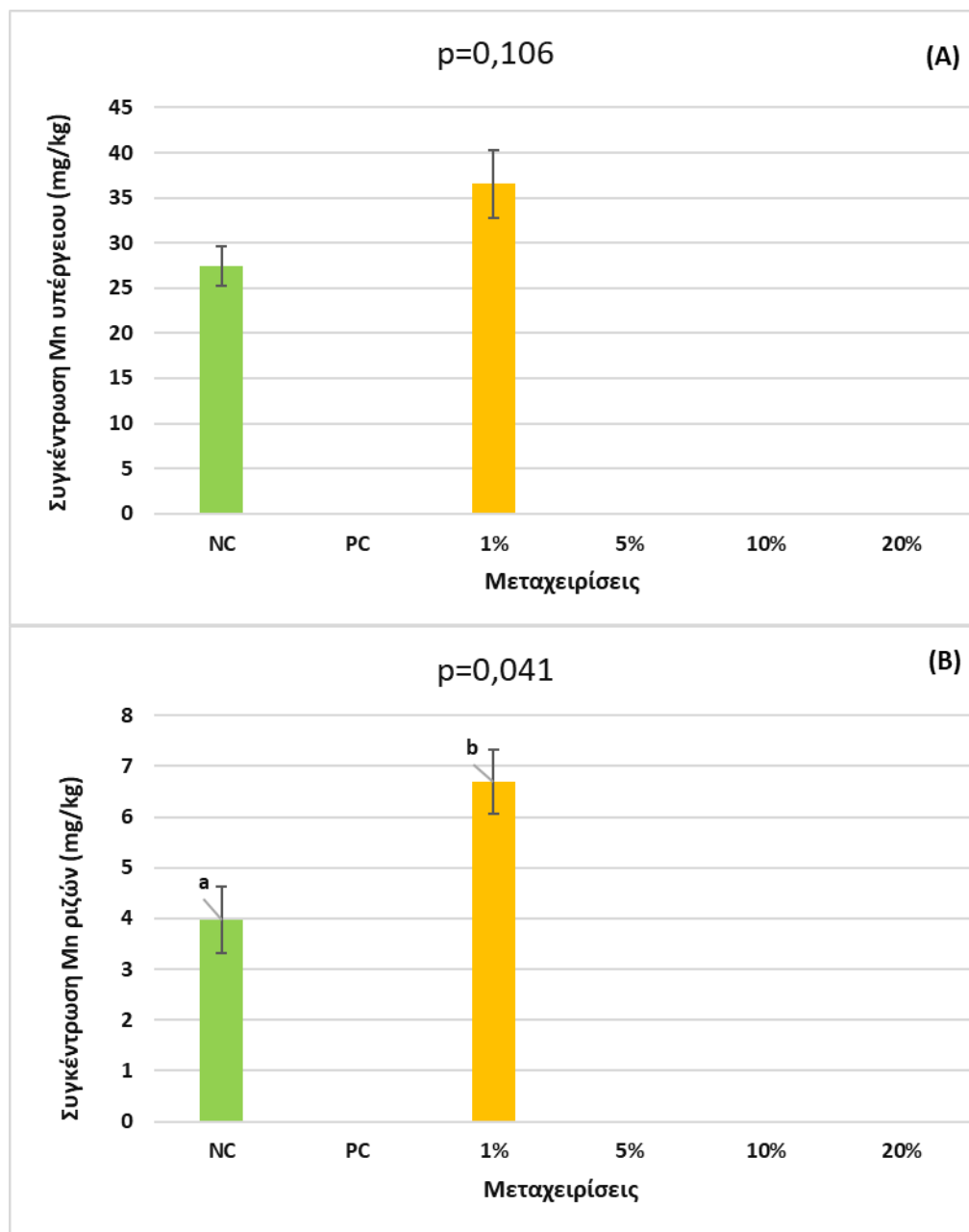
**Σχήμα 13.** Συγκεντρώσεις σιδήρου (Fe) (A) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (B) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, εκφρασμένες σε mg Fe/kg φυτικού ιστού.

Η συγκέντρωση του σιδήρου στο υπέργειο τμήμα του φυτού (Σχήμα 13A), βρέθηκε να έχει στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των δυο μεταχειρίσεων. Η περιεκτικότητα σε σίδηρο ήταν στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερη στα φυτά της μεταχείρισης του αρνητικού μάρτυρα (NC) συγκριτικά με αυτά της μεταχείρισης του 1% «frass».

Στα υπόγεια μέρη των φυτών (Σχήμα 13B), η συγκέντρωση σιδήρου που υπολογίστηκε ήταν χωρίς στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο



μεταχειρίσεων και μεγαλύτερη στην μεταχείριση του 1% «frass» συγκριτικά με την μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC).



**Σχήμα 14.** Συγκεντρώσεις μαγγανίου (Mn) (A) του υπέργειου τμήματος των φυτών και (B) της ρίζας των μεταχειρίσεων του αρνητικού μάρτυρα (NC) και του «frass» 1%, εκφρασμένες σε mg Mn/kg φυτικού ιστού.

Η συγκέντρωση του μαγγανίου στο υπέργειο τμήμα του φυτού (Σχήμα 14A), βρέθηκε σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στα φυτά της μεταχείρισης 1% «frass» από αυτά του αρνητικού μάρτυρα (NC) αλλά, με στατιστικώς μη σημαντική διαφορά.

Στα υπόγεια μέρη των φυτών (Σχήμα 14B), η συγκέντρωση μαγγανίου που υπολογίστηκε είχε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των δυο μεταχειρίσεων. Στη μεταχείριση του 1% «frass» η συγκέντρωση ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με την μεταχείριση του αρνητικού μάρτυρα (NC).

Από την ανάλυση των παραπάνω φαίνεται ότι η συγκέντρωση όλων των ιχνοστοιχείων στα φυτά αυξήθηκε με την προσθήκη «frass» ως εδαφοβελτιωτικό εδάφους με εξαίρεση την συγκέντρωση του σιδήρου στο υπέργειο τμήμα των φυτών. Η αύξηση αυτή φαίνεται να οφείλεται στην προσθήκη ιχνοστοιχείων στο έδαφος μέσω του «frass». Το «frass», όπως αναφέρουν μεταξύ άλλων οι Chavez & Uchanski (2021), είναι σημαντική πηγή μικροθρεπτικών στο έδαφος, όπως είναι ο ψευδάργυρος, ο χαλκός και ο σίδηρος. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τους Houben *et al.* (2020), οι οποίοι παρατήρησαν την ύπαρξη ιχνοστοιχείων σε «frass» προερχόμενο από προνύμφες του είδους *Tenebrio molitor*. Επίσης οι Poveda *et al* (2019) παρατήρησαν ότι στα απεκκρίματα προνυμφών του είδους *Tenebrio molitor* υπήρξε σημαντική συγκέντρωση σιδήρου και μαγγανίου η οποία εξαρτήθηκε από την διατροφή των προνυμφών.

Η διαθεσιμότητα του σιδήρου στο έδαφος εξαρτάται από το pH και όσο μικρότερη η τιμή του τόσο μεγαλύτερη είναι η διαθεσιμότητά του και άρα η πρόσληψή του από τα φυτά (Colombo *et al.*, 2014). Η προσθήκη «frass» μείωσε το pH στην μεταχείριση του 1% «frass» με αποτέλεσμα την αύξηση της πρόσληψης σιδήρου από τα φυτά. Η διαφορά της συγκέντρωσης στο υπέργειο και το υπόγειο τμήμα του φυτού ίσως να επηρεάζεται από μηχανισμούς του ίδιου του φυτού που σχετίζονται με την μεταφορά του σιδήρου σε αυτό.

## Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα

- i. Η χρήση αποχωρημάτων εντόμων του είδους *Tenebrio molitor* ως εδαφοβελτιωτικό μείωσε την τιμή του pH σε αλκαλικό έδαφος, επηρεάζοντας θετικά την διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων σε αυτό.
- ii. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του εδάφους δεν μεταβλήθηκε σημαντικά από την χορήγηση «frass», ώστε να χαρακτηριστεί το έδαφος αλατούχο, ακόμα και σε υψηλές συγκεντρώσεις. Αντιθέτως η χορήγηση ανόργανων λιπασμάτων κατέστησε το έδαφος αλατούχο προξενώντας μια σειρά προβλημάτων στην ανάπτυξη των φυτών.
- iii. Η διαθεσιμότητα των μακροθρεπτικών στοιχείων (P, K, Na) στο έδαφος αυξήθηκε με την χορήγηση «frass». Αυτό οφείλεται αφενός στην ανεύρεση αυτών στο «frass» και αφετέρου στην βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους που επέφερε η χορήγησή του.
- iv. Η αυξημένη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων όταν προστίθεται στο έδαφος «frass» 5%, 10% και 20% φαίνεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών.
- v. Η χορήγηση 1% «frass» αύξησε την απόδοση του φυτού σε ξηρή βιομάζα συγκριτικά με τον αρνητικό μάρτυρα (NC), τόσο για το υπέργειο όσο και για το υπόγειο τμήμα.
- vi. Η συγκέντρωση των μακροθρεπτικών στοιχείων αζώτου, καλίου και νατρίου στα φυτά δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη 1% «frass». Εξαίρεση αποτελεί ο φώσφορος, του οποίου η συγκέντρωση αυξήθηκε σημαντικά τόσο στο υπόγειο όσο στο υπέργειο τμήμα των φυτών.
- vii. Η συγκέντρωση ιχνοστοιχείων (Zn, Fe, Cu, Mn) στα φυτά αυξήθηκε ύστερα από την χορήγηση 1% «frass», εξαιρουμένου του σιδήρου του οποίου η συγκέντρωση στο υπέργειο μέρος των φυτών μειώθηκε σημαντικά.
- viii. Η χορήγηση μικρών ποσοτήτων «frass» του είδους *Tenebrio molitor* επιφέρει σε γενικές γραμμές θετικά αποτελέσματα για την καλλιέργεια των φυτών ραπανιού. Παράλληλα βελτιώνει τις ιδιότητες του εδάφους εμφανίζοντας υπεροχή συγκριτικά με την χορήγηση ανόργανων λιπασμάτων.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική βιβλιογραφία

- Θεριός Ι. Ν. 2005. Ανόργανη Θρέψη & Λιπάσματα. Εκδόσεις Α. Δ. Γαρταγάνη.
- Χα, Ι. Α., Πετρόπουλος, Σ. 2014. Γενική Λαχανοκομία & Υπαίθρια Καλλιέργεια Λαχανικών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος. 400-412.

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Ayeni, L. S., Ezeh, O. S. 2017. Comparative effect of NPK 20:10:10, organic and organo-mineral fertilizers on soil chemical properties, nutrient uptake and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum*). Applied Tropical Agriculture 22, 111-116.
- Baloch, P. A., Riaz, U., Nizamani, F. K., Solangi, A. H., & Siddiqui, A. A. 2014. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on growth and yield characteristics of radish (*Raphanus sativus* L.). American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences 14, 565-569.
- Banihani, S. A. 2017. Radish (*Raphanus sativus*) and diabetes. Nutrients 9, 1014.
- Brady, N. C., Weil, R. R., Weil, R. R. 2011. The Nature and Properties of Soils. Prentice Hall Upper Saddle River.
- Brouder, S. M., Volenec, J. J., Murrell, T. S. 2021. In Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops. Springer, Cham, Switzerland.
- Carpio, M. J., Sánchez-Martín, M. J., Rodríguez-Cruz, M. S., Marín-Benito, J. M. 2021. Effect of organic residues on pesticide behavior in soils: A review of laboratory research. Environments 8, 2-22.
- Cetner, M. D., Kalaji, H. M., Borucki, W., Kowalczyk, K. 2020. Phosphorus deficiency affects the I-step of chlorophyll a fluorescence induction curve of radish. Photosynthetica 58, 671-681.
- Cetner, M. D., Kalaji, H. M., Goltsev, V., Aleksandrov, V., Kowalczyk, K., Borucki, W., Jajoo, A. 2017. Effects of nitrogen-deficiency on efficiency of light-harvesting apparatus in radish. Plant Physiology and Biochemistry 119, 81-92.

- Chavez, M., Uchanski, M. 2021. Insect left-over substrate as plant fertiliser. *Journal of Insects as Food and Feed* 0, 1-12.
- Colombo, C., Palumbo, G., He, J. Z., Pinton, R., Cesco, S. 2014. Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes. *Journal of soils and sediments* 14, 538-548.
- da Silva, D. F., Cipriano, P. E., de Souza, R. R., Júnior, M. S., da Silva, R. F., Faquin, V., Guilherme, L. R. G. 2020. Anatomical and physiological characteristics of *Raphanus sativus* L. submitted to different selenium sources and forms application. *Scientia Horticulturae* 108839.
- Demir, Z. 2020. Alleviation of adverse effects of sodium on soil physicochemical properties by application of vermicompost. *Compost Science & Utilization* 28, 100-116.
- EFSA Scientific Committee, 2015. Scientific opinion on a risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA Journal* 13, 1-60.
- Gutiérrez, R. M. P., Perez, R. L. 2004. *Raphanus sativus* (Radish): their chemistry and biology. *The Scientific World Journal* 4, 811-837.
- Iqbal, S., Riaz, U., Murtaza, G., Jamil, M., Ahmed, M., Hussain, A., Abbas, Z. 2020. *Microbiota and Biofertilizers: A Sustainable Continuum for Plant and Soil Health*. Springer, Cham, Switzerland.
- Jacobs, D. F., Timmer, V. R. 2005. Fertilizer-induced changes in rhizosphere electrical conductivity: relation to forest tree seedling root system growth and function. *New Forests* 30, 147-166.
- Kaneko, Y., Kimizuka-Takagi, C., Bang, S. W., Matsuzawa, Y. 2007. *Radish*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Kitashiba, H., Li, F., Hirakawa, H., Kawanabe, T., Zou, Z., Hasegawa, Y., Nishio, T. 2014. Draft sequences of the radish (*Raphanus sativus* L.) genome. *DNA research* 21, 481-490.
- Kramer, M. J. 2008. Fertilizer effects on soil pH, soil nutrients, and nutrient uptake in swamp white and pin oak seedlings on an alkaline Missouri River bottomland. Doctoral dissertation, University of Missouri--Columbia.
- Lakra, A. S., Prasad, D., Deepanshu, V. M., Shabi, M. 2017. Effect of nitrogen and phosphorus on growth and yield of radish (*Raphanus sativus* L.) Cv. Pusha Chetki under shade net condition. *The Pharma Innovation Journal* 6, 768-770.

- Lalitha, M., Dhakshinamoorthy, M. 2014. Forms of soil potassium-A review. *Agricultural Reviews* 35, 64.
- Manivannan, A., Kim, J. H., Kim, D. S., Lee, E. S., Lee, H. E. 2019. Deciphering the nutraceutical potential of *Raphanus sativus* - A comprehensive overview. *Nutrients* 11, 402.
- Osimani, A., Milanović, V., Cardinali, F., Garofalo, C., Clementi, F., Pasquini, M., 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.
- Pandey, G. K., Mahiwal, S. 2020. *Role of Potassium in Plants*. Springer, Cham, Switzerland.
- Penn, C. J., Camberato, J. J. 2019. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture* 9, 120.
- Pleissner, D., Rumpold, B. A. 2018. Utilization of organic residues using heterotrophic microalgae and insects. *Waste Management* 72, 227-239.
- Poveda, J. 2021. Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 41, 1-10.
- Poveda, J., Jiménez-Gómez, A., Saati-Santamaría, Z., Usategui-Martín, R., Rivas, R., García-Fraile, P. 2019. Mealworm frass as a potential biofertilizer and abiotic stress tolerance-inductor in plants. *Applied Soil Ecology* 142, 110-122.
- Przemieniecki, S. W., Kosewska, A., Purwin, C., Zapałowska, A., Mastalerz, J., Kotlarz, K., Kolaczek, K. 2021. Biometric, chemical, and microbiological evaluation of common wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings fertilized with mealworm (*Tenebrio molitor* L.) larvae meal. *Applied Soil Ecology* 167, 104037.
- Robertson, G. P., Groffman, P. M. 2007. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (Third Edition). Academic Press, USA.
- Römheld, V., Kirkby, E.A. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant Soil* 335, 155–180.
- Ruttenberg, K. C. 2003. The global phosphorus cycle. *Treatise on Geochemistry* 8, 585–643.

- Sarwar, G., Hussain, N., Schmeisky, H., Suhammad, S., Ibrahim, M., Ahmad, S. 2008. Efficiency of various organic residues for enhancing rice-wheat production under normal soil conditions. *Pak. J. Bot.* 40, 2107-2113.
- Sharpley, A. 2000. Phosphorus Availability. *Handbook of soil science*. CRC Press. USA.
- Stein, L. Y., Klotz, M. G. 2016. The nitrogen cycle. *Current Biology* 26, 94-98.
- Stevenson, F. J. 1965. Origin and distribution of nitrogen in soil. *Soil nitrogen* 10, 1-42.
- Sun, X., Wang, Y., Xu, L., Li, C., Zhang, W., Luo, X., Liu, L. 2017. Unraveling the root proteome changes and its relationship to molecular mechanism underlying salt stress response in radish (*Raphanus sativus* L.). *Frontiers in plant science* 8, 1192.
- Tsiakaras, G., Petropoulos, S., Antoniadis, V. 2016. The effect of organic and inorganic fertilization on the development and yield of three brassica specie. *Poljoprivreda i Sumarstvo* 62, 71.
- Weigelt, A., Bol, R., Bardgett, R. D. 2005. Preferential uptake of soil nitrogen forms by grassland plant species. *Oecologia* 142, 627-635.
- Yadav, B. K., Sidhu, A. S. 2016. *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture*. Springer, New Delhi.
- Yousaf, M., Bashir, S., Raza, H., Shah, A. N., Iqbal, J., Arif, M., Hu, C. 2021. Role of nitrogen and magnesium for growth, yield and nutritional quality of radish. *Saudi Journal of Biological Sciences* 28, 3021-3030.
- Zahn, N. H., Quilliam, R. 2017. The effects of insect frass created by *Hermetia illucens* on spring onion growth and soil fertility. Undergraduate dissertation submitted for the degree of bachelor of science with honors in environmental science, in the department of biological and environmental science university of Stirling, 1-63.
- Zhang, J., Qiu, X., Tan, Q., Xiao, Q., Mei, S. 2020. A Comparative metabolomics study of flavonoids in radish with different skin and flesh colors (*Raphanus sativus* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 68, 14463-14470.
- Zhang, X., Ward, B. B., & Sigman, D. M. 2020. Global nitrogen cycle: critical enzymes, organisms, and processes for nitrogen budgets and dynamics. *Chemical Reviews* 120, 5308-5351.

- Zörb, C., Senbayram, M., Peiter, E. 2014. Potassium in agriculture–status and perspectives. Journal of plant physiology 171, 656-669.

### **Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία**

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



## Παράρτημα: Φωτογραφίες από την εκτέλεση του πειράματος



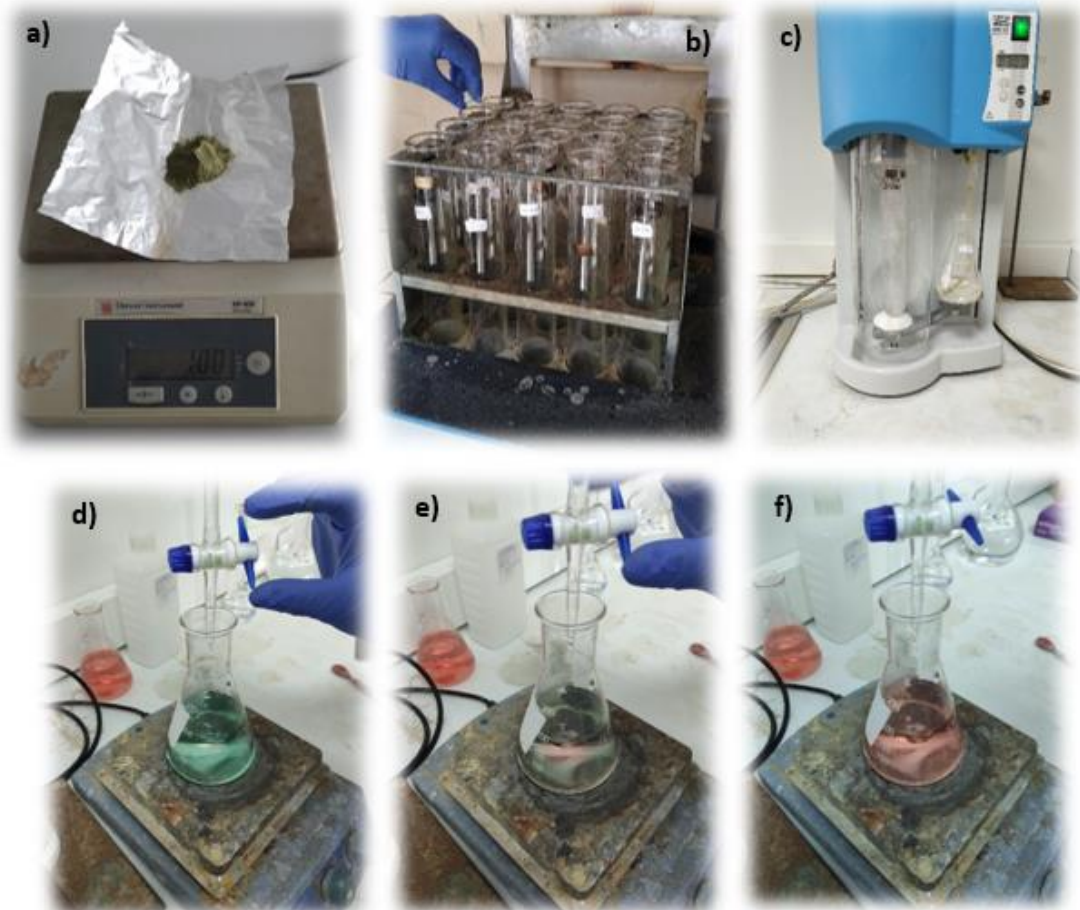
*Εικόνα 1.* Οργάνωση και προετοιμασία του πρώτου μέρους του πειράματος, της ανάπτυξης φυτών. (a) Τοποθέτηση υθμών στη βάση των περιεκτών. (b) Ανάμειξη υλικών του θετικού μάρτυρα (PC). (c) Ανάμειξη «frass» με περλίτη και έδαφος ενδεικτικά για το υπόστρωμα 20% «frass». (d) Άρδευση των περιεκτών. (e) Τοποθέτηση σε μόνιμες θέσεις στο θερμοκήπιο.



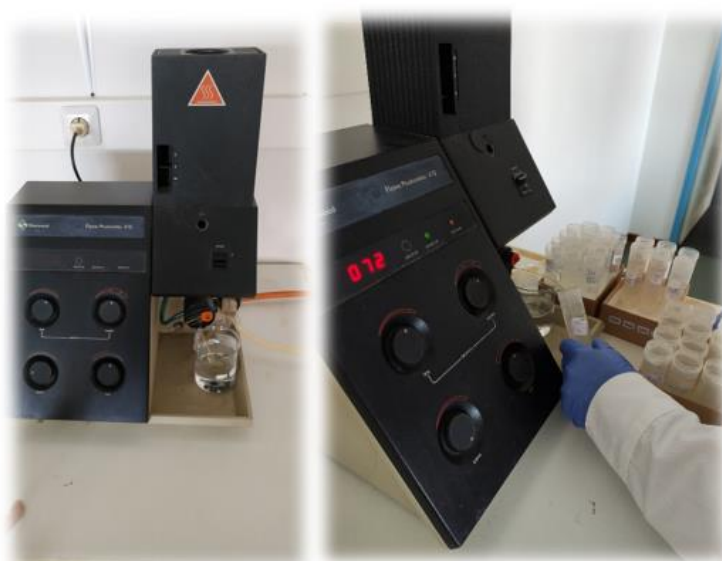
**Εικόνα 2.** Διαδικασία συγκομιδής των φυτών και δειγματοληψία εδάφους. (α) Κατάσταση των φυτών πριν την συγκομιδή και (β) τοποθέτηση τους στον φούρνο αποξήρανσης. (γ) Δειγματοληψία εδάφους και (δ) τοποθέτηση του δείγματος σε χάρτινες σακούλες.



**Εικόνα 3.** Διαδικασία παραλαβής τέφρας αποτεφρωμένων φυτικών δειγμάτων. (α) Παραλαβή φυτικών δειγμάτων από τον αποξηραντή. (β) Προσθήκη υδροχλωρικού οξέος (HCl). (γ) Διήθηση του αποτεφρωμένου διαλύματος. (δ) 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 και προσθήκη ταμπλετών. (c) Εκχύλιση ολικού αζώτου στην συσκευή Kjeldahl. (d) Πράσινος χρωματισμός του διαλύματος ύστερα από την προσθήκη μεικτού δείκτη. (e) Σταδιακή αλλαγή του χρώματος κατά την ογκομέτρηση. (f) Αλλαγή χρώματος διαλύματος σε πορτοκαλί - εξουδετέρωση.



*Εικόνα 5.* Μέτρηση της συγκέντρωσης καλίου (K) και νατρίου (Na) στο φλογοφωτόμετρο.





*Εικόνα 6.* Μέτρηση συγκέντρωσης φωσφόρου (P) στο φασματοφωτόμετρο, ύστερα από την ανάπτυξη του κυανού χρώματος στα διαλύματα.