

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΔΕΙΦΟΡΙΚΗ ΓΕΩΡΓΙΑ
ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΦΥΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Επιδράσεις των αζωτούχων λιπασμάτων με δύο διαφορετικούς παρεμποδιστές (ουρεάσης και νιτροποίησης) στην επιβίωση και τη δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων (*Octodrilus complanatus*)



Χαρίκλεια Α. Ζήση

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Μπιλάλης, Καθηγητής ΓΠΑ

Αθήνα

2020

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Επιδράσεις των αζωτούχων λιπασμάτων με δύο διαφορετικούς
παρεμποδιστές (ουρεάσης και νιτροποίησης) στην επιβίωση και τη
δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων (*Octodrilus complanatus*)

“Effects of nitrogen fertilizers with two different inhibitors (urease and
nitrification) on the survival and activity of earthworms (*Octodrilus
complanatus*)”

Χαρίκλεια Α. Ζήση

Εξεταστική Επιτροπή:

Μπιλάλης Δημήτριος, Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)
Τραυλός Ηλίας, Επίκουρος Καθηγητής ΓΠΑ
Παπαστυλιανού Παναγιώτα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΓΠΑ

Επιδράσεις των αζωτούχων λιπασμάτων με δύο διαφορετικούς παρεμποδιστές (ουρεάσης και νιτροποίησης) στην επιβίωση και τη δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων (*Octodrilus complanatus*)

*Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής
Εργαστήριο Γεωργίας*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιβίωση των γαιοσκωλήκων στα γεωργικά εδάφη αποτελεί πηγή πληροφόρησης για τους επιστήμονες όσο αφορά την υγεία των εδαφών, αφού αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους βιοδείκτες υγείας του εδάφους. Από την άλλη πλευρά, η δραστηριότητά τους φέρει ευεργετικά αποτελέσματα στο έδαφος, μέσω της συμβολής τους σε φυσικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Ωστόσο, η εντατικοποίηση της γεωργίας, κυρίως εξαιτίας του ολοένα και αυξανόμενου πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο, απαιτεί τη χρήση αγρο-χημικών και φυτο-προστατευτικών ουσιών, αλλά κυρίως λιπασμάτων με σκοπό την αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών. Η ανάγκη εντατικοποίησης της γεωργίας σε συνδυασμό με την κλιματική μεταβολή, οδηγούν στην ανάγκη δημιουργίας πιο φιλικών προς το περιβάλλον μορφών λίπανσης. Μία από αυτές ίσως αποτελούν οι παρεμποδιστές νιτροποίησης και ουρεάσης οι οποίοι έχουν προστεθεί με λιπάσματα ουρίας.

Δύο ίδια εργαστηριακά πειράματα έλαβαν χώρα στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών κατά τα έτη 2019-2020. Για το σχεδιασμό των πειραμάτων ακολουθήθηκε το σχέδιο πλήρως τυχαιοποιημένων ομάδων, με τρεις επαναλήψεις και πέντε επεμβάσεις, τις λιπάνσεις. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, μελετήθηκαν οι επιδράσεις της ουρίας στην οποία είχαν προστεθεί παρεμποδιστές ουρεάσης, νιτροποίησης καθώς και ο συνδυασμός τους, στην επιβίωση και τη δραστηριότητα του γαιοσκώληκα *Octodrilus complanatus*, σε σύγκριση με τις επιδράσεις που επιφέρει η ουρία καθώς και με γαιοσκώληκες που δεν είχαν δεχτεί κανενός είδους επέμβαση (μάρτυρας). Η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων μελετήθηκε μέσω του προσδιορισμού των κοπρολυμάτων τους καθώς και διάφορων χαρακτηριστικών του εδάφους (ανταλλάξιμο ασβέστιο, ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, pH, οργανική ουσία και έκλυση διοξειδίου του άνθρακα του εδάφους). Όσο για την επιβίωση, μελετήθηκε μέσω του προσδιορισμού της θνησιμότητας καθώς και της μεταβολής του μέσου βάρους των ατόμων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, ο μάρτυρας και αμέσως μετά η ουρία με την προσθήκη παρεμποδιστή νιτροποίησης και ουρεάσης, ήταν οι επεμβάσεις που

έφεραν τα καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά την επιβίωση των γαιοσκωλήκων αλλά και τη δραστηριότητά τους στο εδαφικό υπόστρωμα.

Επιστημονική περιοχή: Γεωργία

Λέξεις κλειδιά: Γαιοσκώληκες, ουρία, παρεμποδιστές αζώτου, εδαφικά χαρακτηριστικά, θνησιμότητα

Effects of nitrogen fertilizers with two different inhibitors (urease and nitrification) on the survival and activity of earthworms (*Octodrilus complanatus*)

*Department of Crop Science
Laboratory of Agronomy*

ABSTRACT

The survival of earthworms in agricultural land gives scientists information about soil health, as it is one of the most important bio-indicators of soil health. On the other hand, their activity has beneficial effects on the soil, through their contribution to natural and biological characteristics of the soil.

However, the intensification of agriculture, mainly due to the growing world population, requires the use of pesticides, but mainly fertilizers in order to increase crop yields. The need to intensify agriculture combined with climate change is leading to the need to create more environmentally friendly forms of fertilization. One of these may be nitrogen inhibitors added to urea fertilizers.

Two same laboratory experiments took place at the Agricultural University of Athens during the years 2019-2020. The design of the experiments was followed by the randomized complete block design, with three replications and five treatments, fertilizers. In the present study, the effects of urea with nitrite and urease inhibitors were studied, as well as their combination in the survival and activity of the earthworm *Octodrilus complanatus*, compared with the effects of urea and control, without any fertilizer. The activity of earthworms was studied by their casts determination as well as various soil characteristics (exchangeable calcium, cation exchange capacity, pH, organic matter and carbon dioxide respiration). In terms of survival, it was studied by determining mortality as well as the change in average weight of earthworms.

According to the results of the present study, control followed by urea with the addition of nitrite and urease inhibitor, were the treatments that found the best results in terms of survival of earthworms and their activity in the soil substrate.

Scientific area: Agronomy

Key words: Earthworms, urea, nitrogen inhibitors, soil characteristics, mortality

*«Χωρίς το ταπεινό αυτό πλάσμα και το έργο του, που δεν γνωρίζει
το όφελος που προσφέρει στην ανθρωπότητα, η γεωργία όπως τη
γνωρίζουμε θα ήταν πολύ δύσκολη, αν όχι αδύνατη»*

(Δαρβίνος, 1881)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, πραγματοποιήθηκε στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, κατά τη διάρκεια των ετών 2019-2020, στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Καινοτόμες εφαρμογές στην αειφορική γεωργία στη βελτίωση φυτών και στην αγρομετεωρολογία του τμήματος Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής. Στο παράθεμα αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους όσους συνέβαλαν στην εκπλήρωση του πειράματος καθώς και της μελέτης.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω ένα θερμό ευχαριστώ στον καθηγητή μου, τον κύριο Δημήτριο Μπιλάλη, για τη δύναμη, τις συμβουλές, τις περαιτέρω επιστημονικές γνώσεις που αφορούν τη γεωργία, καθώς και τη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης μου, από την έναρξη του πειραματικού μέρους έως και το τέλος της συγγραφής της παρούσας διατριβής.

Πολυτίμη βοήθεια δέχτηκα από όλα τα μέλη του εργαστηρίου Γεωργίας, και κυρίως τους προπτυχιακούς φοιτητές οι οποίοι αποτελούν μέρος των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες της μελέτης, Κατερίνα Σαρσέντου, Παντελή Σταυρόπουλο και Στέλιο Ξενιάδη. Θα ήθελα να εκφράσω ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στις υποψήφιες Διδακτορικές Διδάκτορες του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, Στέλλα Καρυδόγιαννη και Αντιγόλενα Φωλίνα, όπως και τους μεταπτυχιακούς συμφοιτητές μου, για την άψογη συνεργασία και το ευχάριστο κλίμα που υπήρχε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές που ανταλλάξαμε στα πλαίσια αυτής.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στο οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον για την αμέριστη στήριξη και δύναμη που μου χάρισαν απλόχερα όλο το διάστημα εκπόνησης της μελέτης καθώς και για τη συμπαράστασή τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- 2 -
ABSTRACT	- 4 -
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	- 6 -
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	- 9 -
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	- 10 -
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	- 11 -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ.....	- 12 -
1.1 Γαιοσκώληκες.....	- 12 -
1.1.1 Ανατομία Ζώου	- 13 -
1.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την αφθονία των γαιοσκωλήκων στο έδαφος	- 18 -
1.1.3 Γαιοσκώληκες – Έδαφος - Ανάπτυξη φυτών	- 21 -
1.1.4 Γαιοσκώληκες ως Βιοδείκτες	- 24 -
1.1.5 Vermicompost	- 25 -
1.1.6 Octodrilus complanatus	- 26 -
1.2 Άζωτο.....	- 28 -
1.2.1 Το άζωτο στη φυτική παραγωγή.....	- 29 -
1.2.2 Άζωτο – Περιβάλλον – Κλιματική μεταβολή.....	- 30 -
1.2.3 Λιπάσματα νέας γενιάς	- 33 -
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	- 40 -
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	- 41 -
3.1 Πειραματικό Σχέδιο	- 41 -
3.2 Συλλογή ατόμων και Εγκατάσταση πειράματος.....	- 42 -
3.3 Προσδιορισμοί – Μετρήσεις.....	- 45 -
3.3.1 Γαιοσκώληκες	- 45 -
3.3.2 Ανταλλάξιμο ασβέστιο εδάφους.....	- 47 -
3.3.3 Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ).....	- 47 -
3.3.4 Οξύτητα (pH)	- 47 -
3.3.5 Έκλυση Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂).....	- 48 -
3.3.6 Οργανική ουσία εδάφους	- 48 -
3.4 Στατιστική Ανάλυση.....	- 49 -
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	- 50 -
4.1 Μεταβολή Μέσου Βάρους Γαιοσκωλήκων	- 50 -
4.2 Κοπρολύματα (Casts)	- 52 -
4.3 Θνησιμότητα γαιοσκωλήκων.....	- 53 -
4.4 Ανταλλάξιμο ασβέστιο εδάφους (Ca).....	- 56 -

4.5 Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ).....	- 57 -
4.6 Οξύτητα pH εδάφους.....	- 59 -
4.7 Έκλυση Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂)	- 60 -
4.8 Ποσοστό Οργανικής Ουσίας Εδάφους	- 62 -
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	- 64 -
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	- 67 -
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	- 68 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1.1 Διαφορά βάρους γαιοσκωλήκων. Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

Πίνακας 4.2.1. Εμφάνιση κοπρολυμάτων σε 3 διαφορετικές ημέρες από την επέμβαση (ΗΑΕ). Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

Πίνακας 4.3.1 Θνησιμότητα γαιοσκωλήκων σε 10 διαφορετικές ημέρες από την επέμβαση (ΗΑΕ). Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

Πίνακας 4.4.1 Περιεκτικότητα του εδάφους σε Ανταλλάξιμο Ασβέστιο (Ca). Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

Πίνακας 4.5.1 Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ) του εδάφους. Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

Πίνακας 4.6.1 Οξύτητα, pH, του εδάφους. Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

Πίνακας 4.8.1 Ποσοστό οργανικής ουσίας του εδάφους. Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1.1. Μεταβολή του μέσου βάρους των γαιοσκωλήκων (εξαιτίας των επεμβάσεων) σε 4 διαφορετικές ΗΑΕ στα δύο πειράματα. ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό).

Διάγραμμα 4.4.1 Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση ανταλλάξιμου ασβεστίου στο έδαφος ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό).

Διάγραμμα 4.5.1. Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ) του εδάφους ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό).

Διάγραμμα 4.6.1 Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη οξύτητα pH του εδάφους του εδάφους ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό).

Διάγραμμα 4.7.1. Μεταβολή του διοξειδίου του άνθρακα του εδάφους (εξαιτίας των επεμβάσεων) σε διαφορετικές ΗΑΕ στα δύο πειράματα. ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό)

Διάγραμμα 4.8.1 Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στο ποσοστό οργανικής ουσίας του εδάφους ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό).

Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα Συσχετίσεων μεταξύ της μείωσης του βάρους των γαιοσκωλήκων και των casts, του Ανταλλάξιμου Ασβεστίου, της Ικανότητας Ανταλλαγής Κατιόντων και της Μεταβολής του διοξειδίου του άνθρακα.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Ανατομία σώματος γαιοσκωλήκων.

Εικόνα 1.2: Κύκλος ζωής των γαιοσκωλήκων.

Εικόνα 1.3: Σύζευξη γαιοσκωλήκων.

Εικόνα 1.4: Στοά του γαιοσκώληκα *Octodrilus complanatus* στον αγρό του Εργαστηρίου Γεωργίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. (Προσωπική συλλογή)

Εικόνα 1.5: Vermicompost, στο οποίο περιέχονται οι γαιοσκώληκες οι οποίοι πήραν μέρος στην παραγωγή του.

Εικόνα 1.6: Γαιοσκώληκας *Octodrilus complanatus*.

Εικόνα 1.7: Η πορεία της αμμωνίας στο έδαφος.

Εικόνα 1.8: Χημική ένωση του παρεμποδιστή ουρεάσης NBPT.

Εικόνα 1.9: Χημική ένωση του παρεμποδιστή νιτροποίησης DCD.

Εικόνα 1.10: Διαδρομές απώλειας αζώτου και επιλογές διαχείρισης για τη μείωση του κινδύνου απώλειας N.

Εικόνα 2.1: *Octodrilus complanatus* (φωτογραφία από τον αγρό του ΓΠΑ). (Προσωπική συλλογή)

Εικόνα 3.1: Σχέδιο του πειράματος της παρούσας μελέτης.

Εικόνα 3.2: Συλλογή των γαιοσκωλήκων για τις ανάγκες του πειράματος (ΓΠΑ). (Προσωπική συλλογή)

Εικόνα 3.3: Εικόνες από την προετοιμασία και καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης του πειράματος (ΓΠΑ). (Προσωπική συλλογή)

Εικόνα 3.4: Πάνω φαίνεται στο διαφανές σταυρόνημα που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των casts και κάτω, είναι εικόνες των casts όπως φαίνονταν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. (Προσωπική συλλογή)

Εικόνα 3.5: Εικόνες από τις εδαφολογικές αναλύσεις (Εργαστήριο Εδαφολογίας ΓΠΑ). (Προσωπική συλλογή)

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Γαιοσκώληκες

Κατά τον Αριστοτέλη, οι γαιοσκώληκες θεωρούνται το «εντόσθια» της Γης. Ήταν από τους πρώτους που έδωσαν προσοχή στο ρόλο των γαιοσκωλήκων, όσο αφορά τη μεταφορά εδάφους. Οι γαιοσκώληκες είναι οργανισμοί της πανίδας του εδάφους. Είναι ζώα του φύλου Annelida, Δακτυλιοσκώληκες, το οποίο περιλαμβάνει σκωληκόμορφους ζωικούς οργανισμούς, που είναι αμφίπλευρα συμμετρικοί. Όπως φανερώνει το όνομά του, (Annelus = δακτυλίδι), το φύλο αυτό περιλαμβάνει οργανισμούς που χαρακτηρίζονται από μεταμέρεια, φέρουν δηλαδή σωματικούς δακτυλίους, τα μεταμερή. Οι δακτύλιοι αυτοί εσωτερικά αντιστοιχούν σε εγκάρσια, μεσοδερμικά διαφράγματα, τα σέπτα. Είναι ζώα ευκοιλωματικά και τριπλαβλαστικά. Στους δακτυλιοσκώληκες περιλαμβάνονται περίπου 22.000 είδη τα οποία κατανέμονται σε διαφορετικές κλάσεις. Πιο συγκεκριμένα, ανήκουν στην υποκλάση των Ολιγόχαιτων, Oligochaeta, η οποία περιλαμβάνει υδρόβια καθώς και χερσαία είδη. Στην κλάση αυτή, ανήκει περίπου το 50% των δακτυλιοσκωλήκων.

Οι γαιοσκώληκες είναι οργανισμοί, η δραστηριότητα των οποίων παρουσιάζει μεταβολές στη διάρκεια του χρόνου. Έτσι σε εύκρατες περιοχές παρατηρείται δραστηριότητα κυρίως κατά το φθινόπωρο και την άνοιξη (Τζώρτζη, 2010). Για την αποφυγή ακραίων κλιματικών συνθηκών διεισδύουν στο χώμα όπου επικρατούν σταθερότερες κλιματολογικές συνθήκες, συγκριτικά με την ατμόσφαιρα. Είναι γνωστό ότι είναι οργανισμοί που εξαρτώνται από την εδαφική υγρασία, αφού μέσω της εφυμενίδας τους υφίστανται σημαντικές απώλειες υγρασίας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι γαιοσκώληκες είναι συνδεδεμένοι με τις βροχοπτώσεις.

Όπως προαναφέρθηκε είναι ζώα, που χαρακτηρίζονται από ευδιάκριτη μεταμέρεια. Ο υδροσκελετός αποτελείται από τη δομή της σωματικής κοιλότητας, σε συνδυασμό με τους κυκλικούς και επιμήκεις μύες που την περιβάλλουν. Η σωματική κοιλότητα περιέχει την αιμολέμφο, δηλαδή με το σωματικό υγρό. Η κίνηση των γαιοσκωλήκων προκαλείται από πλαστικές παραμορφώσεις του σώματός τους, οι οποίες είναι αποτέλεσμα κατάλληλων κινήσεων του υδροσκελετού.

Το πρώτο άρθρο του σώματός τους ονομάζεται προστόμιο. Στο πρόσθιο μέρος του σώματος διακρίνεται μία ομάδα εξειδικευμένων αδενικών εκκρηκτικών κυττάρων και το επίσαγμα, *clitellum*. Το επίσαγμα, αποτελεί ταξινομικό χαρακτήρα, και είναι ένας αδενώδης

σχηματισμός στο πρόσθιο τμήμα του σώματος. Ο κύριος ρόλος του επισάγματος αφορά τη διευκόλυνση της σύζευξης και τη δημιουργία των βομβύκιων αναπαραγωγής. Σχηματίζεται κατά την περίοδο της αναπαραγωγής και ύστερα αποδιοργανώνεται. Τα κύτταρά του εκκρίνουν βλέννα και άλλες ουσίες. Έτσι σχηματίζεται ένας χιτινώδης σωλήνας, εκεί όπου γίνεται η απόθεση των ωαρίων, των σπερματοζωαρίων καθώς και της αλβουμίνης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία απογόνων.

1.1.1 Ανατομία Ζώου

Κάθε μεταμερές φέρει ενιαία κοιλότητα, ενώ ο διαχωρισμός από τα γειτονικά επιτυγχάνεται από το διάφραγμα. Διάφραγμα δεν υπάρχει στην πρόσθια περιοχή του σώματος. Το διάφραγμα εκτός από το διαχωρισμό των κοιλοτήτων, αποσκοπεί και στην διευκόλυνση της διέλευσης των αγγείων, του πεπτικού σωλήνα καθώς και της γαγγλιακής αλυσίδας.

Το περίβλημα του σώματός τους αποτελείται από:

- εφυμενίδα,
- στρώμα πρωτεΐνης,
- επιδερμίδα,
- συνδετικό ιστό,
- κυκλικές μυϊκές ίνες,
- νευρικό ιστό (ανάμεσα από τις μυϊκές στιβάδες),
- επιμήκεις μυϊκές ίνες,
- περιτόναιο και τέλος
- το κοίλωμα

➤ *Νευρικό Σύστημα*

Το νευρικό σύστημα διακρίνεται σε:

- Κεντρικό: Το κεντρικό σύστημα περιλαμβάνει ζεύγος γαγγλίων, υπερφαρυγγικά γάγγλια ή εγκέφαλος, στο πρόσθιο μέρος, τα οποία συνδέονται με νευρικές ίνες με το ζεύγος των υποφαρυγγικών γαγγλίων και την κοιλιακή νευρική χορδή (αλυσίδα γαγγλίων). Τα υπερφαρυγγικά γάγγλια βρίσκονται στο τρίτο μεταμερές και στη νωτιαία πλευρά του πεπτικού σωλήνα στο ύψος μεταξύ της στοματικής κοιλότητας και του φάρυγγα. Η κοιλιακή νευρική χορδή εκτείνεται κατά μήκος του σώματος, κάτω από τον πεπτικό σωλήνα.
- Περιφερειακό: Το περιφερειακό νευρικό σύστημα περιλαμβάνει νεύρα που ξεκινούν από α) τον εγκέφαλο και καταλήγουν στο προστόμιο, τη στοματική κοιλότητα και τον φάρυγγα, β) το υποφαρυγγικό γάγγλιο και καταλήγουν σε όργανα που βρίσκονται στο τμήμα του σώματος μεταξύ του 2ου και 4ου σωμίτη και γ) το ζεύγος γαγγλίων κάθε σωματικού δακτυλίου και καταλήγουν σε όργανα που βρίσκονται στην περιοχή του αντίστοιχου σωμίτη. Πολύ έντονα αντιλαμβάνεται χημικά και απτικά ερεθίσματα, στην περιοχή του προστόμιου, φως ή σκοτάδι με φωτοϋποδοχείς στο πίσω μέρος του σώματος. Έχουν θετικό φωτοτροπισμό σε χαμηλής έντασης φωτισμό. Δεν ακούν, ωστόσο νοιώθουν τους κραδασμούς.
- Συμπαθητικό

➤ *Αναπνευστικό Σύστημα*

Η μεταφορά του οξυγόνου στους ιστούς των γαιοσκωλήκων γίνεται μέσω της αιμογλοβίνης.

➤ *Κυκλοφορικό Σύστημα*

Το κυκλοφορικό σύστημα των γαιοσκωλήκων είναι κλειστό, περιλαμβάνει το νωτιαίο και το κοιλιακό αγγείο. Το νωτιαίο αγγείο διατρέχει τη νωτιαία πλευρά του σώματος, και μεταφέρει το αίμα από το πίσω μέρος του σώματος προς το πρόσθιο. Το κοιλιακό διατρέχει την κοιλιακή πλευρά του σώματος, κάτω από τον πεπτικό σωλήνα.

Το αίμα των γαιοσκωλήκων περιέχει αιμογλοβίνη και αιμοκύτταρα. Η κίνησή του διευκολύνεται από πέντε ζεύγη αορτικών αγγείων, μεταξύ του 6^{ου} και 11^{ου} σωματικού δακτυλίου που ονομάζονται ψευδοκαρδιές.

Το κοιλωματικό υγρό μπορεί να μετακινείται μεταξύ των διαδοχικών μεταμερών, μέσω των πόρων που φέρουν τα διαφράγματα, εξασφαλίζοντας έτσι τη μεταφορά του νερού και των θρεπτικών συστατικών σε ιστούς σε ολόκληρο το σώμα.

➤ *Απεκκριτικό Σύστημα*

Το απεκκριτικό σύστημα αποτελείται από ένα ζεύγος νεφριδίων σε κάθε μεταμερές, πλην των τριών πρώτων και του τελευταίου. Οι σωλήνες των νεφριδίων φιλτράρουν το σωματικό υγρό απομακρύνοντας τα άχρηστα προϊόντα του μεταβολισμού του αζώτου. Τα προϊόντα αυτά περνούν μεταξύ διαδοχικών μεταμερών και τέλος αποβάλλονται από τον νεφριδόπορο στην εξωτερική πλευρική επιφάνεια του σώματος.

➤ *Αναπαραγωγικό Σύστημα*

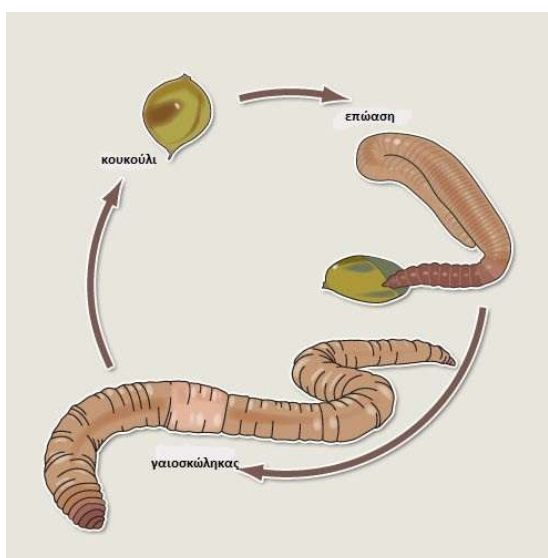
Οι γαιοσκώληκες είναι ερμαφρόδιτοι οργανισμοί. Παρ' όλα αυτά, παρατηρούνται συζεύξεις. Οι συζεύξεις λαμβάνουν χώρα κυρίως στην επιφάνεια του εδάφους, με ύπαρξη υγρασίας, κατά τις νυχτερινές ώρες της μέρας.

Οι γονάδες βρίσκονται στο πρόσθιο τμήμα του σώματος των γαιοσκωλήκων, μεταξύ 9^{ου} και 15^{ου} μεταμερούς. Φέρουν από ένα έως δύο ζεύγη όρχεων και δύο έως τέσσερις σπερματοκύστες, όπου λαμβάνει χώρα η παραγωγή και η αποθήκευση του σπέρματος. Οι σπερματικοί αγωγοί, μέχρι να καταλήξουν στο γονοπόρο διαπερνούν πολλά μεταμερή.

Το θηλυκό μέρος περιλαμβάνει ένα ζεύγος ωοθηκών, στο 13^ο μεταμερές. Οι σπερμοθήκες, όργανα λήψης και αποθήκευσης του σπέρματος κατά τη σύζευξη, βρίσκονται στο 9^ο και 10^ο σωματικό δακτύλιο. Οι σπερματοαγωγοί των όρχεων εκβάλλουν στον 15^ο δακτύλιο, ενώ οι ωαγωγοί των ωοθηκών στον 14^ο.

Κατά τη σύζευξη, πραγματοποιείται ένωση των κοιλιακών επιφανειών των δύο ατόμων, στρέφοντας το πρόσθιο μέρος του σώματός τους προς την αντίθετη κατεύθυνση, ούτως ώστε το επίσαγμα του ενός ατόμου να εφάπτεται καλά με τις σπερματοθήκες του άλλου. Από τα αδενικά κύτταρα του επίσαγματος εκκρίνεται βλεννώδης δακτύλιος, ο ρόλος του οποίου είναι να συγκρατεί το ζεύγος κατά τη διάρκεια της σύζευξης. Το σπέρμα μεταφέρεται μέσω του βλεννώδη δακτυλίου.

Μετά το διαχωρισμό των συντρόφων, παράγονται από 2 έως 10 βομβύκια, από το επίσαγμα, τα οποία περιλαμβάνουν τα ωάρια, που εξέρχονται από τον γεννητικό πόρο του θηλυκού τμήματος και γονιμοποιούνται από τα σπερματοζωάρια που ελευθερώνονται από την σπερματοθήκη.



Εικόνα 1.2: Κύκλος ζωής των γαιοσκωλήκων

(Πηγή: www.TeAra.govt.nz/en/diagram/15491/earthworm-life-cycle)

Τα βομβύκια αποτελούνται από χιτίνη και περιέχουν βλέννα και αλβουμίνη. Καθώς αποβάλλονται από το πρόσθιο μέρος περικλείουν ωάρια και σπερματοζωάρια, διαδικασία μέσω της οποίας δημιουργείται το ζυγωτό. Κάθε βομβύκιο περιέχει από 1 έως 20 έμβρυα, από τα οποία εξελίσσονται λίγα. Τα βομβύκια είναι ανθεκτικά στο κρύο καθώς και στην ξηρασία. Οι νεαροί γαιοσκωλήκες ωριμάζουν σεξουαλικά σε διάστημα 2-3 μηνών και συμπληρώνουν την ανάπτυξη τους σε 1 περίπου έτος.



Εικόνα 1.3: Σύζευξη γαιοσκωλήκων. (Πηγή: 2020 Bright Hub Education)

1.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την αφθονία των γαιοσκωλήκων στο έδαφος

Η επιβίωση, η δραστηριότητα καθώς και ο πληθυσμός των γαιοσκωλήκων στο έδαφος εξαρτώνται από διάφορους αβιοτικούς και βιοτικούς παράγοντες. Στους αβιοτικούς παράγοντες ανήκουν οι κλιματικοί και οι εδαφολογικοί παράμετροι που έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τους πληθυσμούς τους, ενώ στους βιοτικούς, διάφοροι οργανισμοί όπως για παράδειγμα τα έντομα και τα πτηνά, καθώς και ο άνθρωπος κυρίως μέσω των καλλιεργητικών μεθόδων που χρησιμοποιεί κατά τη διάρκεια μίας καλλιέργειας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η αφθονία των γαιοσκωλήκων ποικίλει από λιγότερα από 10 ακμαία άτομα έως περισσότερα από 1000 ενήλικα άτομα σε ένα τετραγωνικό μέτρο (Curry 2004), κυρίως εξαιτίας των προαναφερθέντων παραγόντων.

Αναφορικά με τους κλιματικούς παράγοντες που επηρεάζουν τους πληθυσμούς γαιοσκωλήκων, οι κυριότεροι είναι η θερμοκρασία και υγρασία. Η θερμοκρασία είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας αφού από αυτή εξαρτάται η μεταβολική δραστηριότητα και η κατανομή των γαιοσκωλήκων στο έδαφος. Σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες, οι κατάλληλες θερμοκρασίες για γαιοσκώληκες δροσερών και τροπικών κλιμάτων είναι 10°C έως 20°C και 20°C έως 30°C αντίστοιχα (Lee 1985; Edwards & Bohlen 1996). Ανάλογα με το εύρος θερμοκρασίας που επικρατεί στην περιοχή που ευδοκίμει το κάθε είδος, ποικίλει και το μέγεθος. Για παράδειγμα σε εδάφη με αυξημένη θερμοκρασία είναι σπανιότερα τα μεγαλόσωμα είδη, αφού απαιτούν περισσότερη ενέργεια για τη διαδικασία της αναπνοής, μη έχοντας πολλά αποθέματα ενέργειας για τη δημιουργία ιστού, σε περίπτωση ανεπάρκειας τροφής.

Η θερμοκρασία πολλές φορές είναι συνδεδεμένη με την περιεκτικότητα των εδαφών σε υγρασία. Αναφέρεται ότι κυριότερη αιτία θνησιμότητας από αβιοτικούς παράγοντες είναι η έλλειψη ή υπερεπάρκεια υγρασίας από την ύπαρξη ακραίων θερμοκρασιών. Όταν το έδαφος είναι στο «ρώγο» του, η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων είναι η βέλτιστη δυνατή. Μεταξύ των ειδών ωστόσο, υπάρχει ποικιλία προτιμήσεων.

Όσο για τις ιδιότητες του εδάφους, αυτές οι οποίες αφορούν την επιβίωση και τη δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων είναι η σύσταση, το βάθος, η οξύτητα (pH), καθώς και η ύπαρξη οργανικής ουσίας. Οι γαιοσκώληκες προτιμούν εδάφη μεσαίας σύστασης, τόσο στα αμμώδη όσο και στα αργιλώδη οι συνθήκες που επικρατούν δεν ευνοούν για τη δραστηριότητά τους. Τα βαριά αργιλώδη εδάφη, σε συνθήκες υπερεπάρκειας νερού, όπως οι έντονες και συνεχείς βροχοπτώσεις του χειμώνα, «πλημμυρίζουν» με αποτέλεσμα την δημιουργία αναερόβιων συνθηκών για τους οργανισμούς του εδάφους. Από την άλλη πλευρά, στα αμμώδη εδάφη παρατηρείται ξηρασία, εξαιτίας της μεγαλύτερης «απορροής» του νερού, γεγονός που επίσης πλήττει τους πληθυσμούς των γαιοσκωλήκων.

Επιπρόσθετα, το μικρό βάθος των εδαφών (ρηχά) δεν ευνοείται η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων, με αποτέλεσμα την ύπαρξη περιορισμένου αριθμού στοών. Το εύρος pH που προτιμούν οι γαιοσκώληκες κυμαίνεται από 5 έως 7.4. Άλλοι παράγοντες που επίσης είναι συνδεδεμένοι με την επιβίωση καθώς και δραστηριοποίησή τους είναι η περιεκτικότητα ασβεστίου, μαγνησίου, αζώτου αλλά και αλάτων στα εδάφη (El-Duweini & Ghabbour 1965).

Επιπλέον, η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων στο έδαφος επηρεάζεται σημαντικά από την περιεκτικότητα των εδαφών σε οργανική ύλη. Η οργανική ύλη του εδάφους είναι αποτέλεσμα των φυτικών υπολειμμάτων που υπάρχουν σε αυτό. Η υψηλής ποιότητας οργανικής ύλης για γαιοσκώληκες παρουσιάζει αναλογία άνθρακα: αζώτου, από 20:1 και κάτω. Σύμφωνα με τους Edwards & Bohlen (1996) η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη είναι ένδειξη ύπαρξης γαιοσκωλήκων, αφού αποτελεί τη βάση της διατροφής τους. Η οργανική ύλη με την οποία διατρέφονται οι γαιοσκώληκες προέρχεται από την υπέργεια και υπόγεια νεκρή φυτική ύλη, που υπάρχει στα εδάφη στα οποία δραστηριοποιούνται.

Παρά το γεγονός ότι οι γαιοσκώληκες, επηρεάζουν ευεργετικά το έδαφος και συνεπώς την ανάπτυξη των φυτών με τόσους διαφορετικούς τρόπους, υπάρχουν πολλοί κίνδυνοι-απειλές που επηρεάζουν την επιβίωσή τους σε αυτό. Κάποιες από τις αιτίες οι οποίες επηρεάζουν την αφθονία των γαιοσκωλήκων του εδάφους είναι διάφορα είδη πτηνών τα οποία τρέφονται με γαιοσκώληκες καθώς και παρασιτικοί οργανισμοί όπως βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα κ.α.

Ωστόσο, οι μεγαλύτερες απειλές των γαιοσκωλήκων προέρχονται από τη δραστηριοποίηση του ανθρώπου στο έδαφος, μέσω της εκμετάλλευσής του για διάφορους σκοπούς. Κάποιες από τις ενέργειες του ανθρώπου που επηρεάζουν την αφθονία και τη δραστηριότητά τους είναι η αποψίλωση δασών όπως και η αναδάσωση, η διαχείριση λιβαδιών και λειμώνων, οι αροτραίες καλλιέργειες, τα φυτοφάρμακα, η διαχείριση της εδαφικής υγρασίας, τα βιομηχανικά απόβλητα και τέλος η λίπανση των καλλιεργειών με οργανικά (κοπριά) και ανόργανα λιπάσματα.

Οι επιρροές της γεωργίας στη ζωή των γαιοσκωλήκων, προέρχονται κυρίως από τις καλλιεργητικές πρακτικές, τα λιπάσματα, τα εντομοκτόνα και την εναλλαγή καλλιεργειών. Οι καλλιεργητικές πρακτικές επηρεάζουν τους γαιοσκώληκες, προκαλώντας μηχανικές ζημιές, καταστρέφοντας τις στοές τους, καθώς και εκθέτοντάς τους στα πτηνά. Μία καλλιεργητική πρακτική η οποία επηρεάζει σημαντικά την αφθονία τους στο έδαφος είναι η άροση. Σύμφωνα με τους Edwards & Bohlen (1996) η μηδενική καθώς και η ελαφριά κατεργασία του εδάφους ευνοούν την αύξηση του πληθυσμού τους.

Όσο για τα λιπάσματα, τα οργανικά, όπως για παράδειγμα η κοπριά, ευνοούν την αύξηση του πληθυσμού των γαιοσκωλήκων, καθώς αναφέρεται ότι μπορούν να τον διπλασιάσουν ή ακόμα και να τον τριπλασιάσουν (Edwards 2004). Οι γαιοσκώληκες παρουσιάζουν ευαισθησία στην αμμωνία, έτσι τα αμμωνιακά λιπάσματα, παρότι προωθούν την αύξηση της τροφής των οργανισμών αυτών ως συνέπεια της προώθησης της βλάστησης, αποτελούν κίνδυνο έναν από τους κυριότερους κινδύνους (Edwards & Lofty 1982 b). Το άζωτο αποτελεί σημαντική αιτία όσο αφορά την έλλειψη γαιοσκωλήκων στο έδαφος, καθώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τον πληθυσμό τους σε διάφορα οικοσυστήματα (Zisi et al., 2020). Επίσης, αναφέρεται ότι τα προσθετικά εδάφους που προκαλούν όξινες συνθήκες στο έδαφος (Reinecke & Reinecke 2004), έχουν καταστροφικές επιδράσεις στους γαιοσκώληκες. Οι Ma et al. (1990), ανέφεραν ότι τα ανόργανα αζωτούχα λιπάσματα, κυρίως τα αμμωνιακά, έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αφθονίας και της βιομάζας των γαιοσκωλήκων.

Ο όρος φυτοφάρμακα αναφέρεται στα εντομοκτόνα, ζιζανιοκτόνα, μυκητοκτόνα και στα νηματοδοκτόνα. Τα φυτοφάρμακα χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη συμβατική γεωργία. Από διάφορες έρευνες φαίνεται ότι τα ζιζανιοκτόνα, τα μυκητοκτόνα, καθώς και τα εντομοκτόνα, προκαλούν τοξικότητες στους γαιοσκώληκες.

Τέλος η εναλλαγή καλλιεργειών έχει σαν αποτέλεσμα την εξισορρόπηση του πληθυσμού των γαιοσκωλήκων, αφού με την καλλιέργεια φυτών διαφορετικών κατηγοριών, σιτηρά, ψυχανθή κλπ., παρέχεται στους γαιοσκώληκες ποικιλία τροφής.

1.1.3 Γαιοσκώληκες – Έδαφος - Ανάπτυξη φυτών

Η αξία των οργανισμών αυτών γίνεται περισσότερο κατανοητή μέσω της φράσης του Δαρβίνου «Χωρίς το ταπεινό αυτό πλάσμα, που δεν γνωρίζει το όφελος που προσφέρει στην ανθρωπότητα, και το έργο του, η γεωργία, όπως τη γνωρίζουμε θα ήταν πολύ δύσκολη, αν όχι αδύνατη (Darwin, 1881).

Σύμφωνα με τους Bilalis et al. (2009), η ποιότητα του εδάφους είναι στενά συνδεδεμένη με χλωρίδα και την πανίδα του. Οι γαιοσκώληκες, ένα από τα σημαντικότερα είδη της πανίδας του εδάφους. Επηρεάζουν τη δομή (Langmaack et al., 1999), το πορώδες και τη γονιμότητα του εδάφους (Bilalis et al., 2009), με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη διήθηση ύδατος διείσδυση των ριζών ακόμα και σε συμπιεσμένα στρώματα.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η παρουσία γαιοσκωλήκων στο έδαφος οδηγεί σε αύξηση υπέργειας βιομάζας των φυτών κατά 23%, καθώς και της απόδοσης των καλλιεργειών κατά 25% (Van Groenigen et al., 2014). Αναφέρεται επιπλέον στη βιβλιογραφία, ότι οι γαιοσκώληκες συμβάλουν στην αύξηση της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στοιχείων (Scheu 2003). Σύμφωνα με τους (Lemtiri et al., 2014), χαρακτηριστικά του εδάφους όπως το pH, η οργανική ουσία, το άζωτο καθώς και η σύστασή του, επηρεάζονται από τη δραστηριότητα των οργανισμών αυτών, αφού κατακερματίζουν τα εδαφικά σωματίδια και μεταφέρουν οργανική ύλη από και προς τα υψηλότερα επίπεδα του εδάφους.

Όσο αφορά τα κοπρολύματα (casts) των γαιοσκωλήκων, περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες ανταλλάξιμου καλίου (K), ασβεστίου (Ca) καθώς και μαγνησίου (Mg), σε σχέση με το έδαφος. Αναφέρεται, ότι η αυξημένη ποσότητα ασβεστίου στα περιττώματα των γαιοσκωλήκων πιθανόν οφείλονται στην ύπαρξη ενός ασβεστούχου αδένου στον οισοφάγο τους ο οποίος εκκρίνει βλέννες πλούσιες σε ανθρακικό ασβέστιο (Drake et al., 2007). Η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών, του εδάφους, οφείλεται στην επίδραση των γαιοσκωλήκων σε φυσιολογικούς και βιολογικούς παραγόντες (Syers & Springett, 1984). Μία από τις σημαντικότερες φυσιολογικές επιδράσεις των γαιοσκωλήκων στο έδαφος είναι η «ανακατανομή» του.

Ορισμένα είδη γαιοσκωλήκων τρέφονται με φυτικά υπολείμματα στην επιφάνεια του εδάφους ενώ άλλα τρέφονται με αποσυντεθημένη οργανική ύλη μέσα σε αυτό. Το πέρας, των υπολειμμάτων και της οργανικής ύλης, από το έντερο των γαιοσκωλήκων, έχει σαν αποτέλεσμα τον κατακερματισμό τους και την ανάμιξή τους με χώμα. Με τον τρόπο αυτό γίνεται ανακύκλωση και ανακατανομή της οργανικής ουσίας του εδάφους, με αποτέλεσμα τη μείωση της απώλειας θρεπτικών συστατικών από αυτό, μέσω των φυτομάζας των καλλιεργειών. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό τα θρεπτικά συστατικά μεταφέρονται από τα επιφανειακά στρώματα στα κατώτερα, στα οποία μπορούν να δεσμευτούν από το ριζικό σύστημα των φυτών. Σε αυτά τα στρώματα, εκτός των άλλων, υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας, από ότι στην επιφάνεια, λόγω του μειωμένου ρυθμού εξάτμισης σε αυτά.

Μία ακόμα επίδραση των γαιοσκωλήκων που αφορά τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους είναι η βελτίωση της διαπερατότητάς του. Γενικά, η συμπύκνωση του εδάφους εμποδίζει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος (Scott 1977). Η ύπαρξη και η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων στο έδαφος συνεπάγεται τη διάνοιξη «στοών». Αυτό λειτουργεί ευεργετικά για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος καθώς και για την αύξηση της διαθεσιμότητας νερού και θρεπτικών στοιχείων στην περιοχή της ριζόσφαιρας.

Από την άλλη πλευρά, η κυριότερη βιολογική επίδραση των γαιοσκωλήκων στο έδαφος είναι η αύξηση του μικροβιακού φορτίου του καθώς και της μικροβιακής δραστηριότητάς του. Όσο περισσότερη είναι η περιεκτικότητα της τροφής των γαιοσκωλήκων σε οργανική ύλη τόσο μεγαλύτερο μικροβιακό φορτίο περιέχεται στα κοπρολύματά τους. Τόσο ο πληθυσμός όσο και η δραστηριότητα των μικροβίων είναι μεγαλύτερη ύστερα από το πέρας τους από το έντερο, ανεξάρτητα από την προέλευση της τροφής. Σύμφωνα με έρευνα του Parle (1963), τα κοπρολύματα περιείχαν χίλιες φορές περισσότερα βακτήρια και μύκητες ύστερα από τη διέλευση στο έντερο των γαιοσκωλήκων.

Οι γαιοσκώληκες κατατάσσονται στα σημαντικότερα εδαφικά είδη, ενώ χαρακτηρίζονται ως «μηχανικοί συστημάτων». Συμβάλλουν σε πολλές διαδικασίες που αφορούν το έδαφος, όπως η κυκλοφορία των θρεπτικών ουσιών, η αποστράγγιση και η ρύθμιση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (Lubbers et al., 2013; Blouin et al., 2013).

Είναι ευρέως γνωστό το γεγονός ότι οι εδαφικοί οργανισμοί επιδρούν επίσης στην ανάπτυξη των φυτικών οργανισμών. Πιο συγκεκριμένα, αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενίσχυσης της ανοργανοποίησης της οργανικής ουσίας και της τροποποίησης των φυσικών ιδιοτήτων τους (Bardgett et al., 2005; Lavelle & Spain 2001). Οι γαιοσκώληκες είναι γνωστοί για την θετική επίδρασή τους στην ανάπτυξη των φυτών. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ φυτών

και γαιοσκωλήκων πιθανώς εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (π.χ. τύπος εδάφους). Οι μηχανισμοί μέσω των οποίων οι γαιοσκώληκες επιδρούν θετικά στα φυτά είναι οι εξής (Brown et al., 2004; Scheu 2003):

- Αύξηση της ανοργανοποίησης της οργανικής ύλης του εδάφους
- Αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας
- Έλεγχος των εντόμων και των παρασίτων
- Διέγερση των συμβιωτών
- Τροποποίηση στο πορώδες και στη συσσωμάτωση του εδάφους, προκαλώντας μεταβολές στη διαθεσιμότητα ύδατος και οξυγόνου σε ρίζες φυτών

Αρκετά πειράματα έχουν γίνει με σκοπό να μελετηθούν οι επιδράσεις των γαιοσκωλήκων σε εδάφη διαφορετικών ειδών (Doube et al., 1997; Wurst & Jones 2003). Ο Doube et al. (1997) ανέφερε ότι η ανάπτυξη του σιταριού ήταν αυξημένη σε αμμώδη εδάφη ενώ σε αργιλώδη όχι, παρουσία του *Aporrectodea trapezoides*, ενώ επίσης ότι η ανάπτυξη και η απόδοση φυτών κριθαριού ήταν αυξημένη σε αμμώδη εδάφη σε αντίθεση με τα αργιλώδη όπου παρουσιάστηκε μείωση, παρουσία επίγειων ειδών γαιοσκωλήκων. Ακόμα, σε πειράματα με έδαφος το οποίο είχε υποστεί διαταραχή, από την αρχή του πειράματος, οι επιδράσεις των γαιοσκωλήκων στην υπερκείμενη βιομάζα ήταν σχεδόν δύο φορές περισσότερες από αυτές σε έδαφος μη διαταραγμένο.

Ένας από τους κυριότερους τρόπους μέσω του οποίου οι γαιοσκώληκες επιδρούν στην ανάπτυξη των φυτών είναι η αύξηση της περιεκτικότητας του χώματος σε αφομοιώσιμες μορφές αζώτου. Έτσι φαίνεται να είναι πιο ωφέλιμοι σε πιο άγονα εδάφη. Ο συνδυασμός των «φτωχών» σε άζωτο εδαφών και των υπολειμμάτων καλλιέργειας (τροφή για τους γαιοσκώληκες), συναντάται σε συστήματα γεωργικής εκμετάλλευσης, και χαρακτηρίζεται ως «Συστήμα Χαμηλών Εισροών» (Feller et al., 2012). Στα συστήματα βιολογικής γεωργίας, χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες οργανικής κοπριάς, ακόμα και υπολείμματα καλλιεργειών, υλικά που δημιουργούν άριστες συνθήκες για την ανάπτυξη, τη δραστηριότητα και την επιβίωση των γαιοσκωλήκων (Chan, 2001).

Οι Srinithi & Brian (2010) κατέληξαν στο γεγονός ότι οι γαιοσκώληκες παίζουν σημαντικό ρόλο στη θρεπτική κατάσταση του εδάφους καθώς και στην προώθηση της ανάπτυξης των φυτών. Ο Brady (1974) ορίζει τη «γονιμότητα» ως μία εγγενή ικανότητα του εδάφους να παρέχει θρεπτικά συστατικά για τα φυτά σε επαρκείς ποσότητες και σε κατάλληλες αναλογίες.

Αναφέρεται επίσης ότι προωθείται η απελευθέρωση θρεπτικών ουσιών και ακολούθως διευκόλυνση της πρόσληψή τους από τα φυτά. Σύμφωνα με τον Holt-White (1901), οι γαιοσκώληκες προωθούν τη βλάστηση, γεγονός που με την απουσία τους θα ήταν σχεδόν αδύνατον, εξαιτίας κυρίως της αύξησης της διαθεσιμότητας του εδαφικού αζώτου που προκαλείται εξαιτίας τους (Van Groenigen et al., 2014).



Εικόνα 1.4: Στοά του γαιοσκώληκα *Octodrilus complanatus* στον αγρό του Εργαστηρίου Γεωργίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. (Προσωπική συλλογή)

1.1.4 Γαιοσκώληκες ως Βιοδείκτες

Ολοένα και περισσότερο η προσοχή των επιστημόνων στρέφεται προς το περιβάλλον και ιδιαίτερα προς την σχέση των ρύπων του εδαφικού περιβάλλοντος με την υγεία του ανθρώπου. Ωστόσο εδώ και αρκετά χρόνια έχουν γίνει μελέτες προσανατολισμένες προς τις επιδράσεις στον άνθρωπο (Callahan, 1988). Σύμφωνα με τον (Moriarti, 1983) ο όρος ρύπος αναφέρεται σε ανθρώπινη εισροή προς το περιβάλλον η οποία αποτελεί ουσία επιβλαβή για τους οργανισμούς.

Οι βιοδείκτες, στα οικοσυστήματα, χρησιμοποιούνται με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης των ρύπων στο οικοσύστημα. Οι γαιοσκώληκες αποτελούν έναν από τους πιο συχνά χρησιμοποιημένους βιοδείκτες (Espinosa-Reyes et al., 2019). Οι Bilalis et al. (2013) τόνισαν τη σημασία του *Octodrilus complanatus* ως βιοδείκτης των Μεσογειακών εδαφών. Αρκετά χρόνια πριν, περί το 1997, οι Doube & Schmidt, ότι οι γαιοσκώληκες αποτελούν έναν από τους καλύτερους δείκτες ποιότητας του εδάφους.

Οι οργανισμοί αυτοί έχουν όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά τα οποία απαιτείται να έχει ένας «βιοδείκτης». Πιο συγκεκριμένα, είναι μεγάλοι σε μέγεθος, άφθονοι σε υγιή εδάφη,

συλλέγονται εύκολα ακόμα και από κάποιον που δεν είναι ειδικός, σε αντίθεση με άλλους οργανισμούς του εδάφους, όπως επίσης ταυτοποιούνται εύκολα. Χαρακτηριστικά ο Edwards (2004) αναφέρει ότι τα μικρό-αρθρόποδα όπως οι νηματώδεις είναι ακατάλληλα να χρησιμοποιηθούν ως βιοδείκτες αφού παρουσιάζουν δυσκολία στη δειγματοληψία. Είναι σημαντικό το να μπορεί να γίνεται ταυτοποίηση του βιοδείκτη από ευρύ φάσμα ανθρώπων, και ειδικά από τους αγρότες, ώστε να μειωθούν όσο γίνεται περισσότερο οι απώλειες πληροφοριών.

Έτσι, διευκολύνεται η εκτίμηση της βιωσιμότητας των πρακτικών διαχείρισης του εδάφους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άτομα χωρίς την απαιτούμενη εμπειρία, απευθείας στον αγρό (Fusaro et al., 2018). Επιπλέον, λόγω της έντονης κινητικής δραστηριότητάς τους στο έδαφος, έχουν το πλεονέκτημά του «εντοπισμού» ρύπων διασκορπισμένων στο έδαφος (Lourenco et al., 2011).

1.1.5 *Vermicompost*

Τα τελευταία χρόνια η διαχείριση των οργανικών αποβλήτων από οργανισμούς όπως οι γαιοσκώληκες, αποκτά ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον, από επιστημονικής πλευράς. Αναφέρεται ότι είναι αποτελεσματική μέθοδος για στερεά και υγρά λύματα, υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων και χαρτιού, αποβλήτων των ανθρώπων και των ζώων καθώς και υπολειμμάτων καλλιεργειών.

Το vermicomposting είναι μέθοδος ανακύκλωσης οργανικών υπολειμμάτων (Huang, et al., 2019) και ορίζεται ως μία βίο-οξειδωτική διαδικασία, κατά την οποία οι γαιοσκώληκες, αλληλοεπιδρούν με μικροοργανισμούς του εδάφους, προωθώντας την αποσύνθεση, επιταχύνοντας τη σταθεροποίηση της οργανικής ύλης καθώς και μετατροπή των φυσικών και βιοχημικών ιδιοτήτων της (Dominguez 2004).

Στη βιοχημική αποσύνθεση της οργανικής ύλης συμβάλουν οι μικροοργανισμοί, μέσω της παραγωγής ενζύμων. Ο ρόλος των γαιοσκωλήκων ωστόσο, είναι να διεγείρουν με έμμεσο τρόπο τους μικροβιακούς πληθυσμούς, μέσω του τεμαχισμού, της κατάποσης, της διέγερσης, της πέψης και της διασποράς σε κοπρολύματα της νωπής οργανικής ύλης, προάγοντας έτσι τον μικροβιακό (Domínguez et al., 2009).

Το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας του vermicomposting, είναι το vermicompost. Το vermicompost είναι μία λεπτή τύρφη, με υψηλό πορώδες και μεγάλη υδατοχωρητικότητα, που περιέχει πολλά θρεπτικά συστατικά, σε μορφές που τα καθιστούν εύκολα αφομοιώσιμα από τα φυτά (Domínguez et al., 2009). Οι Sanchez-Hernandez & Domínguez (2019), ανέφεραν ότι αποτελεί εξαιρετικό οργανικό λίπασμα, με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, άζωτο και φωσφόρο, όπως και σε διάφορα προβιοτικά, χρήσιμα για την γεωργία.

Αξιοσημείωτο επίσης είναι το γεγονός ότι κατά το vermicomposting οι γαιοσκώληκες προωθούν την βίο-αποικοδόμηση των χημικών στοιχείων τα οποία χαρακτηρίζονται ως τοξικά ,για ορισμένα φυτά και ζώα, καθώς και τη βίο-σταθεροποίηση βαρέων μετάλλων (Bhat et al., 2018).



Εικόνα 1.5: Vermicompost, στο οποίο περιέχονται οι γαιοσκώληκες οι οποίοι πήραν μέρος στην παραγωγή του. (Πηγή: Doha Organic Fertilizer Corporation)

1.1.6 *Octodrilus complanatus*

Ο γαιοσκώληκας του γένους *Octodrilus* και είδους *complanatus*, ανήκει στα μεγαλόσωμα είδη της οικογένειας Lumbricidae (Monroy et al., 2007), στο φύλο Annelida. Σύμφωνα με τους Pavlíček & Csuzdí (2006), απαντάται ευρέως σε όλη την έκταση της λεκάνης της Μεσογείου. Κατά συνέπεια, συναντάται σε όλο το μήκος της Ελλάδας, σε καλλιεργητικούς αγρούς (Vavouliδου et al., 2010). Ανήκει στα «ανερχόμενα» είδη τα οποία ανοίγουν βαθιές κάθετες στοές, ενώ σπάνια εξέρχεται από το έδαφος για να τραφεί με φυτικά υπολείμματα (Fusaro et al., 2018), επί το πλείστον κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επιβιώνει και δραστηριοποιείται άριστα σε θερμοκρασίες 10°C -13°C (Michalis & Panidis 1993). Παράλληλα προτιμά εδάφη με ουδέτερο έως αλκαλικό pH, με επαρκεί επίπεδα υγρασίας (Duges, 1828), καθώς και πλούσια σε CaCO₃.

Κατά τους (Michalis & Panidis 1993), το μήκος και το πάχος του κυμαίνονται από 150 έως 220 χιλιοστά και 9 έως 11 χιλιοστά αντίστοιχα. Έχει επιλοβικό προστόμιο, ο πρώτος ραχιαίος πόρος είναι δυσδιάκριτος, ανάμεσα στα 12°-13° και 13°-14° μεταμερή. Φέρει το επίσαγμα στο μεταξύ του 29^{ου} και του 37^{ου} μεταμερούς, καθώς τα ηβικά φυμάτια μεταξύ των 28°-39° μεταμερών. Επιπρόσθετα, φέρει μεταξύ των 9°-12° και 6°-12° μεταμερών, τις σπερματοκύστες και σπερματοθήκες αντίστοιχα. Τέλος ανάμεσα στο 10ο και το 14ο μεταμερές του, βρίσκονται οι ασβεστικοί αδένες.

Η σύζευξή τους γίνεται επί το πλείστον στην επιφάνεια του εδάφους κατά τις νυχτερινές ώρες. Η διάρκειά της ποικίλει από μισή έως και πέντε ώρες, και γίνεται συνήθως τις εποχές του έτους που χαρακτηρίζονται από υγρασία, δηλαδή από το φθινόπωρο έως και τις αρχές της άνοιξης. Μπορεί ωστόσο να πραγματοποιηθεί και περισσότερες από μία φορές κατά τη διάρκεια ενός έτους. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα παρθενογένεσης, δηλαδή αναπαραγωγής χωρίς να έχει προηγηθεί η διαδικασία της σύζευξης.

Όταν είναι αναπαραγωγικά ώριμοι το επίσαγμα παρουσιάζει μεταβολή σε χρώμα και μέγεθος. Πιο συγκεκριμένα αποκτά αρχικά πορτοκαλί χρώμα, που στη συνέχεια γίνεται καφέ και τέλος άσπρο. Τέλος, το μέγεθος του επισάγματος, αυξάνεται σταδιακά παράλληλα με την αλλαγή του χρώματος, μέχρις ότου να γίνει η ανάπτυξη του ωοφόρου, στιγμή από την οποία ξεκινά πάλι η μείωση του (Michalis & Panidis 1993).



Εικόνα 1.6: Γαιοσκώληκας *Octodrilus complanatus* (Πηγή: www.biodiversidadvirtual.org)

1.2 Άζωτο

Το άζωτο είναι από τα πιο διαδεδομένα στοιχεία στη φύση, αφού υπάρχει στην ατμόσφαιρα τη λιθόσφαιρα και την υδρόσφαιρα (Mengel et al., 2001). Ωστόσο, είναι ίσως το στοιχείο που ‘προβληματίζει’ περισσότερο τους επιστήμονες αφού τόσο η έλλειψη όσο και η περίσσεια του αποτελεί παράγοντα κλειδί για την παραγωγικότητα των καλλιεργειών, και συνεπώς στην επάρκεια τροφής. Ο ολοένα και αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός οδηγεί σε αύξηση των βασικών αναγκών του ανθρώπου για επιβίωση, όπως η τροφή η ένδυση κλπ, προέλευση των οποίων είναι η γεωργία. Είναι ευρέως γνωστό το γεγονός ότι οι πρωτεΐνες αποτελούν βασικό στοιχείο της διατροφής του ανθρώπου. Το ποσοστό αζώτου στις πρωτεΐνες αγγίζει το 16,6 %. Ως εκ τούτου, το άζωτο αποτελεί το στοιχείο για το οποίο έχουν επενδυθεί χρήματα και πόροι, περισσότερα από κάθε άλλο.

Το παγκόσμιο σύστημα παραγωγή τροφής προκαλείται να τροφοδοτήσει τον πληθυσμό, ο οποίος παρουσιάζει μία διαρκεί αύξηση στο χρόνο, μειώνοντας παράλληλα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Godfray et al., 2010). Η γεωργία, αποτελεί αν όχι τον βασικότερο, έναν από τους βασικότερους παράγοντες παραγωγής τροφής. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αυξημένη ανάγκη για παραγωγή τροφής, οδηγεί στην εντατικοποίηση της γεωργίας, και συνεπώς στη χρήση και εφαρμογή χημικών φυτό-προστατευτικών και εδαφό-βελτιωτικών σκευασμάτων κατά την φυτική παραγωγή. Είναι ευρέως γνωστό το γεγονός ότι το άζωτο επηρεάζει την απόδοση και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων, έτσι είναι φανερό ότι αποτελεί απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο για την ανάπτυξη και απόδοση των καλλιεργειών. Τα αζωτούχα λιπάσματα, που χρησιμοποιούνται στη γεωργία, έρχονται να αντικαταστήσουν τις απώλειες αζώτου εξαιτίας της ασυνέχειας του κύκλου.

Ο φυσικός εμπλουτισμός του εδάφους με άζωτο, πραγματοποιείται κυρίως μέσω της αζωτοδέσμευσης ατμοσφαιρικού αζώτου, από συγκεκριμένους οργανισμούς, με αποτέλεσμα

την εναπόθεσή του εκ νέου στο έδαφος, διαδικασία που ονομάζεται αζωτοδέσμευση. Ωστόσο η ανθρώπινη παρέμβαση, κυρίως λόγω της εντατικοποίησης της γεωργίας, προκαλεί ασυνέχειες στον κύκλο του αζώτου, με συνέπεια την αύξηση των απωλειών του από το έδαφος. Το έδαφος μπορεί να παρέχει στο φυτό άζωτο μέσω της ανοργανοποίησης της οργανικής ουσίας, καθώς και μέσω των υπολειμματικού ανόργανου αζώτου στο έδαφος (Tao & Rogers 2019).

Η ουρία είναι το πιο διαδεδομένο λίπασμα με βάση το άζωτο παγκοσμίως. Το 55% των αζωτούχων λιπασμάτων είναι ουρία (IFA 2017). Οι σημαντικότεροι λόγοι οι οποίοι ευθύνονται γι' αυτό είναι η υψηλή περιεκτικότητας της ουρίας σε άζωτο, ενώ παράλληλα είναι λίπασμα χαμηλού κόστους, εύκολης εφαρμογής και αποθήκευσης (Glibert et al., 2006). Η χρήση λιπασμάτων με βάση την ουρία οδηγούν σε αυξημένες απώλειες αζώτου, κυρίως μέσω της εξάτμισης της αμμωνίας (Karydogianni et al., 2020), τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση, που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος (Firestone & Davidson 1989).

Σε αρκετές μελέτες αναφέρεται, ότι η εφαρμογή αζώτου μπορεί να μειώσει το ρυθμό αναπνοής και συνεπώς τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών του εδάφους, μετά από εξέταση των επιδράσεων των αζωτούχων λιπασμάτων σε αυτούς (Bowden et al., 2004, Craine et al., 2007, Ramirez et al., 2012).

1.2.1 Το άζωτο στη φυτική παραγωγή

Το άζωτο αποτελεί βασικό στοιχείο πολλών οργανικών ενώσεων, όπως τα αμινοξέα και τα ένζυμα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το άζωτο περιέχεται στη χλωροφύλλη καθώς και στα νουκλεϊκά οξέα. Συνεπώς αποτελεί, κύριο παράγοντα όσο αφορά την επιβίωση, την ανάπτυξη καθώς και την παραγωγικότητα των φυτών. Η επάρκεια αζώτου απεικονίζεται στο φυτό κυρίως με το έντονο βαθυπράσινο χρώμα των φύλλων.

Είναι ένα από τα στοιχεία που προάγουν την ανάπτυξη και αύξηση του ριζικού συστήματος. Επηρεάζει ακόμα, την πρόσληψη άλλων θρεπτικών στοιχείων από το φυτό, αφού η πρόσληψη των αμμωνιακών οδηγεί στην μείωση του pH του εδάφους στην περιοχή της ριζόσφαιρας, παράγοντας που επηρεάζει διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Τα φυτά προσλαμβάνουν το εδαφικό άζωτο άμεσα, με τη μορφή αμμωνιακών (NH_4^+) και νιτρικών (NH_3^-) ιόντων. Οι ανόργανες μορφές αζώτου (NH_4^+ και NH_3^-), αφομοιώνονται από τα φυτά πιο εύκολα, λόγω του ότι είναι υδατοδιαλυτές. Η έλλειψη καθώς και η υπερεπάρκεια αζώτου έχουν επιπτώσεις τόσο στη μορφολογία όσο και τη φυσιολογία των

φυτών, και αναφέρονται στη βιβλιογραφία με τους όρους τροφοπενία και τοξικότητα αντίστοιχα.

Η τροφοπενία λοιπόν αζώτου εκδηλώνεται στα φυτά, με συμπτώματα όπως η χλώρωση, ή αλλιώς το κιτρίνισμα, των φύλλων, καθώς και με καχεκτική-μειωμένη ανάπτυξη ολόκληρου του φυτού. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σε συνθήκες έλλειψης αζώτου είναι μειωμένη και η σύνθεση πρωτεϊνών, δομικό στοιχείο των οποίων αποτελούν τα αμινοξέα. Επίσης μέσω των συμπτωμάτων έλλειψης αζώτου (κίτρινο χρώμα φύλλων), γίνεται κατανοητή η σχέση αζώτου – χλωροφύλλης. Τα συμπτώματα αυτά είναι εμφανή κυρίως σε παλαιότερα φύλλα, αφού είναι στοιχείο το οποίο ανήκει στα ευκίνητα θρεπτικά στοιχεία.

Όσο για την τοξικότητα αζώτου, που προκαλείται από την περίσσεια ποσότητα αζώτου στο έδαφος, εμφανίζει ως κυριότερο σύμπτωμα την υπέρμετρη ανάπτυξη βιομάζας σε βάρος της παραγωγής προϊόντων. Για παράδειγμα στις δενδρώδεις και αροτραίες καλλιέργειες προωθείται επί το πλείστον η βλαστητική ανάπτυξη, σε βάρος της άνθησης, της καρπόδεσης αλλά και της ωρίμανσης των καρπών, ενώ όσο αφορά τα καλλωπιστικά φυτά η υπέρμετρη βλάστηση λειτουργεί σε βάρος της παραγωγής ανθεών. Όπως γίνεται κατανοητό η ποιότητα των εμπορευσιμων μερών του φυτού ή της καλλιέργειας υποβαθμίζεται, επηρεάζοντας αρνητικά την οικονομικότητά τους.

Ωστόσο, η επίτευξη της σωστής ποσότητας διαθέσιμου αζώτου για μία καλλιέργεια είναι δύσκολη, αφού είναι στοιχείο το οποίο υπόκειται σε απώλειες στο περιβάλλον μέσω πολλαπλών οδών (Tao & Rogers 2019). Συμμετέχει επιπλέον σε πολλές μεταβολικές διεργασίες των φυτών ενώ, ο ρυθμός πρόσληψης και κατανομής του καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την προσφορά και τη ζήτησή του από τα φυτά καθώς και από το αναπτυξιακό στάδιο στο οποίο βρίσκονται (Delogu et al., 1998). Ωστόσο σύμφωνα με τους Sinclair and de Wit (1975), η διαθεσιμότητα και η παροχή του αζώτου, ποικίλει μεταξύ των ειδών καλλιέργειας και εξαρτάται από τις εκάστοτε απαιτήσεις τους.

1.2.2 Αζωτο – Περιβάλλον – Κλιματική μεταβολή

Η κλιματική μεταβολή σε συνδυασμό με την ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για τροφή, οδηγούν στην ανάγκη για ανάπτυξη μιας φιλικής προς το περιβάλλον μορφής γεωργίας η οποία παράλληλα θα είναι αλλά αποδοτική. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, ένας από τους οποίους είναι βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης αζώτου από τα φυτά (Zhang et al., 2015). Το γεγονός ότι το άζωτο αποτελεί στοιχείο κλειδί για την

ανάπτυξη των φυτών, σε συνδυασμό με τις πολλαπλές μορφές του, όπως φαίνεται στον κύκλο του, καθώς και τις πολλαπλές διόδους απώλειάς του, οδηγούν στην αέναη μελέτη και έρευνά του (Montemurro & Diacono, 2016). Σύμφωνα με τους Myers et al. (2014), η κλιματική μεταβολή φέρει ακόμα μια απροσδόκητη απειλή, αφού η συνεχής εναπόθεση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, προκαλεί αρνητικά αποτελέσματα στα περισσότερα φυτά τύπου C₃ όσο αφορά την κατάσταση του αζώτου, με αποτέλεσμα την μείωση της διατροφικής αξίας των καλλιεργειών.

Η ατμόσφαιρα, αποτελείται από άζωτο σε ποσοστό περίπου 78%. Στο αέριο άζωτο (N₂), τα δύο άτομα αζώτου συνδέονται μεταξύ τους με τριπλό δεσμό. Έτσι εξαιτίας της ισχυρής αυτής σύνδεσης μεταξύ τους, το αέριο άζωτο αποτελεί μη αφομοιώσιμη μορφή από ζωικούς και φυτικούς οργανισμούς. Ωστόσο, μέσω της διαδικασίας της αζωτοδέσμευσης αλλά και του φωτισμού, το αέριο άζωτο μετατρέπεται σε αφομοιώσιμη μορφή για τα φυτά. Οι μεγαλύτερες ποσότητες αζώτου απαντώνται στη φύση ως μέρος οργανικών ενώσεων. Όσο αφορά το έδαφος, το 5% της οργανικής ουσίας αποτελείται από άζωτο, γεγονός που καθιστά την παρουσία αζώτου - οργανικής ουσίας αλληλένδετη. Το άζωτο απαντάται στο έδαφος σε οργανικές μορφές, όπως η οργανική ουσία, αλλά και σε ανόργανες.

Αξιοσημείωτο, είναι το γεγονός ότι οι ποσότητες αζωτούχων λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως είναι πλέον τόσο μεγάλες που ισοδυναμούν σχεδόν με τη φυσική σταθεροποίηση αζώτου από την ατμόσφαιρα στη βιο-λιθόσφαιρα. Οι τεράστιες ποσότητες των ανθρωπογενών εισροών στο περιβάλλον, έχουν ως συνέπεια την εξάντληση του του βιοχημικού κύκλου του αζώτου (Steffen et al., 2015), με αποτέλεσμα την επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Ένα παράδειγμα τέτοια επιβάρυνσης, είναι η ρύπανση των γλυκών νερών, με νιτρικά (Galloway, 2003).

Όσο αφορά την αέναη απομάκρυνση του αζώτου από το έδαφος χωρίς αυτό να οδηγεί στην εξάντλησή του, οφείλεται στο λεγόμενο «Κύκλο του Αζώτου». Το άζωτο απαντάται στο περιβάλλον με διάφορες μορφές, έχοντας διαφορετικές ιδιότητες και συμπεριφορά στα διάφορα οικοσυστήματα. Οι δύο κυριότερες αφομοιώσιμες από τα φυτά μορφές του αζώτου στο έδαφος είναι τα νιτρικά και τα αμμωνιακά ιόντα.

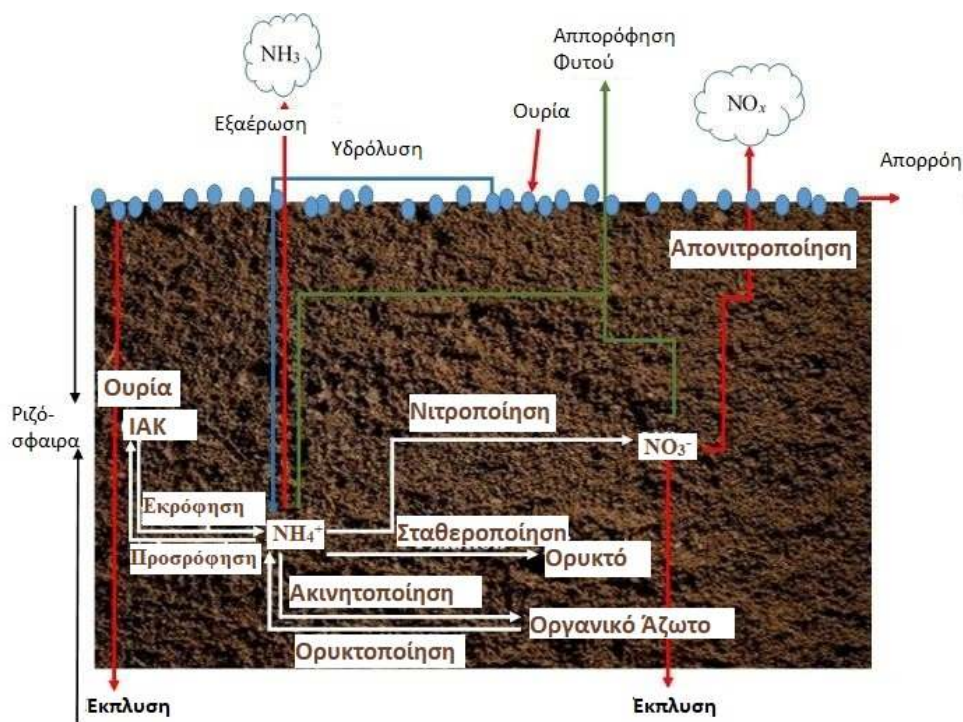
Πιο συγκεκριμένα, τα αμμωνιακά ιόντα, απομακρύνονται από το έδαφος μέσω της ακινητοποίησής τους από τους μικροοργανισμούς, από την πρόσληψή τους από τους φυτικούς οργανισμούς, από την εξαέρωσή τους, μετά τη μετατροπή τους σε αμμωνία (Li et al., 2020). Επιπρόσθετα, μέρος της απομάκρυνσης αζώτου στο περιβάλλον οφείλεται και στη νιτροποίηση, τη μετατροπή τους δηλαδή σε νιτρικά ιόντα, τα οποία με τη σειρά τους

απομακρύνονται προς το περιβάλλον μέσω της έκπλυσης (Li et al., 2020), αλλά και στην εξαέρωσή του με τη μορφή διάφορων αερίων που περιέχουν άζωτο, όπως το N₂O, ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου, το οποίο είναι επιβλαβές για το περιβάλλον και τον άνθρωπο (Myhre et al., 2013).

Η αέρια μορφή της αμμωνίας προέρχεται από τη διάσπαση οργανικών υλικών και ανόργανων λιπασμάτων όπως η ουρία (CH₂N₂O). Η εξαέρωσή της ευνοείται από υψηλές θερμοκρασίες καθώς και από τις υψηλές τιμές pH. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αν το λίπασμα, ή το οποιοδήποτε βελτιωτικό εδάφους, ενσωματωθεί στο έδαφος οι απώλειες αμμωνίας, μέσω της εξαέρωσης, μπορεί να μειωθούν έως και 75%. Εδώ κρίνεται σημαντική η συμβολή των γαιοσκωλήκων, μέσω η δραστηριότητας των οποίων οδηγεί στην ενσωμάτωση των υλικών αυτών στο έδαφος.

Νιτροποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής των αμμωνιακών ιόντων σε νιτρώδη και τέλος σε νιτρικά, παρουσία βακτηριακών ενζύμων. Όπως γίνεται κατανοητό είναι μία διαδικασία η οποία εξαρτάται άμεσα από την παρουσία και την δραστηριότητα των ενζύμων στο έδαφος. Ως εκ τούτου, εξαρτάται από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη δραστηριότητα των βακτηρίων αυτών, όπως η παρουσία οξυγόνου, το pH, η θερμοκρασία, η υγρασία εδάφους κ.α.

Τα νιτρικά ιόντα αποβάλλονται στο περιβάλλον κυρίως μέσω της έκπλυσης και της εξαέρωσης (απονιτροποίηση). Λόγω του αρνητικού τους φορτίου, δεν προσκολλώνται στα κολλοειδή του εδάφους, με αποτέλεσμα να κινούνται ελεύθερα προς τα κάτω, με συνέπεια την έκπλυση τους. Ωστόσο, αν και τα νιτρικά ιόντα ανήκουν στις μορφές αζώτου που συμβάλλουν στη θρέψη των φυτών, όταν υποστούν έκπλυση, αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους περιβαλλοντικούς ρύπους και επιφέρουν πολλές αρνητικές συνέπειες στο οικοσύστημα, νιτρορύπανση.



Εικόνα 1.7: Η πορεία της αμμωνίας στο έδαφος. (Πηγή: Washington State University, designed by Haiying Tao, WSU)

Αναφορικά με την απονιτροποίηση, είναι η μετατροπή των νιτρικών ιόντων, σε αέρια μορφή, μέσω βιοχημικών αντιδράσεων, και εν τέλη η εξαέρωση τους. Τα γεωργικά εδάφη θεωρούνται η κύρια πηγή ατμοσφαιρικού υπεροξειδίου του αζώτου (N_2O). Αναφέρεται ότι συμβάλλουν με 4,1 Tg αζώτου ανά έτος (IPCC, 2013) στον παγκόσμιο προϋπολογισμό. Επίσης αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών μονοξειδίου του αζώτου (NO) στις αγροτικές περιοχές. Σύμφωνα με διάφορες έρευνες το 18% των παγκόσμιων εκπομπών μονοξειδίου του αζώτου προέρχεται από τα γεωργικά εδάφη (Bouwman et al., 2002; IPCC, 2007).

1.2.3 Λιπάσματα νέας γενιάς

Η χρήση των δεικτών είναι απαραίτητη για αποτελεσματικότερη και πιο εντοπισμένη παρακολούθηση της εξέλιξης των καλλιέργειών καθώς και την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την επίδραση βιοτικών αλλά και αβιοτικών παραγόντων σε διάφορα χαρακτηριστικά των φυτών-καλλιέργειών (αγρονομικά, ποιοτικά κ.α.). Κάποιοι από τους σημαντικότερους δείκτες, που αφορούν το άζωτο και την αποδοτικότητα της χρήσης του, είναι οι εξής:

- ❖ Δείκτης Αποδοτικότητας Χρήσης Αζώτου (Nitrogen Use Efficiency) (NUE)
- ❖ Δείκτης Απόδοσης Χρήσης Αζώτου (Nitrogen Utilization Efficiency) (NUtE)
- ❖ Δείκτης Αγρονομικής Αποδοτικότητας Αζώτου (Nitrogen Agronomic Efficiency) (NAE)
- ❖ Δείκτης Συγκομιδής Αζώτου (Nitrogen Harvest Index) (NHI)

Αναφορικά με το δείκτη απόδοσης χρήσης του αζώτου (NUtE), αναφέρεται ότι ορίζει τη σχέση μεταξύ της απόδοσης της καλλιέργειας και του ολικού αζώτου το οποίο απομακρύνθηκε μέσω της συλλογής της βιομάζας και των σπόρους του φυτού (Kakabouki et al., 2018). Από την άλλη, ο δείκτης αγρονομικής αποτελεσματικότητας του αζώτου (NAE), αναφέρεται στην ικανότητα του εφαρμοσμένου αζώτου να αυξήσει την οικονομική απόδοση της καλλιέργειας.

Ο δείκτης συγκομιδής αζώτου (NAE) ορίζεται ως η κατανομή του ολικού αζώτου στο σπόρο ή στο εκάστοτε παραγόμενο προϊόν της καλλιέργειας (Kakabouki et al., 2018). Αποτελεί ένδειξη του πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποίησε η καλλιέργεια το άζωτο που προσέλαβε για την παραγωγή προϊόντος, ενώ διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, από είδος σε είδος καθώς και από γονότυπο σε γονότυπο (Fageria & Baligar, 2005). Επιπλέον, αποτελεί σημαντικό δείκτη εξαιτίας της δυνατότητας μέτρησης της αποδοτικότητας και της μεταφοράς του απορροφημένου αζώτου από τα διάφορα μέρη του φυτού στο παραγόμενο προϊόν (Fageria & Baligar, 2005).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η αναγκαιότητα αλλά και οι αρνητικές συνέπειες της χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων, οδηγούν στην «ανάγκη» χρήσης δεικτών, με σκοπό την εύρεση της κατάλληλης δόσης λίπανσης καθώς και τον κατάλληλο τύπο λιπάσματος. Ως εκ τούτου η δημιουργία λιπασμάτων με προσθήκη παρεμποδιστών, έχει ως στόχο τη μείωση των απωλειών θρεπτικών στο περιβάλλον (Li et al., 2020) καθώς και τη διάθεσή τους στα φυτά την κατάλληλη περίοδο και σε κατάλληλη ποσότητα, ούτως ώστε να μειωθεί η ρύπανση του περιβάλλοντος ενώ παράλληλα να αυξηθεί η αποδοτικότητα των λιπασμάτων.

Ο όρος «λιπάσματα νέας γενιάς» αναφέρεται στα λιπάσματα τα οποία περιέχουν παρεμποδιστές, με αποτέλεσμα την έκλυση των συστατικών τους σταδιακά στη διάρκεια του χρόνου, με σκοπό την αποτελεσματικότερη δέσμευση και αξιοποίησή τους από το φυτό και τη μείωση των απωλειών τους στο περιβάλλον. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι παρά το γεγονός ότι εφαρμόζονται μεγάλες ποσότητες αζώτου στις καλλιέργειες, με σκοπό την αύξηση της απόδοσης, η αποδοτικότητα της χρήσης των λιπασμάτων (NUE), αγγίζει μόλις το

30 έως 50%, στο πλείστο των καλλιεργούμενων εδαφών (Delgado 2002), γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στις απώλειες του αζώτου στο περιβάλλον.

Οι απώλειες αζώτου είναι δυνατό να μειωθούν, συγχρονίζοντας της διαθεσιμότητα του αζώτου με την κατάλληλη περίοδο της πρόσληψής του από τα φυτά. Ο συγχρονισμός αυτός αποτελεί πρόκληση λόγω του ότι εκτός από τις καλλιεργητικές πρακτικές ή αλλιώς τις ανθρώπινες επεμβάσεις, οι οποίες συμβάλλουν στη απώλεια του αζώτου από το έδαφος, οι απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες (βροχόπτωση, θερμοκρασία και άνεμος) αποτελούν επιπλέον παράγοντα ενίσχυσης των απωλειών (Tao & Rogers 2019). Σύμφωνα με τους Jones et al. (2013), απαιτούνται περισσότερο από 12,70 χιλιοστά βροχοπτώσεων, εντός 24 με 48 ωρών από την επιφανειακή εφαρμογή της ουρίας, για τη μεταφορά της σε βάθος που επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των απωλειών μέσω της πτητικότητας. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία εδάφους, τόσο πιο γρήγορος είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης, εξαιτίας της αυξημένης μικροβιακής δραστηριότητας, η οποία είναι θετικά συσχετισμένη με τη θερμοκρασία.

Επιπλέον, αναφέρεται ότι μείωση της έκπλυσης μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους, μέσω της μείωσης του φορτίου αζώτου που προέρχεται από την κτηνοτροφία, με σωστή διαχείριση της διατροφής των ζώων (Monaghan et al., 2008), ή μέσω της μείωσης του ρυθμού απελευθέρωσης νιτρικού αζώτου στο περιβάλλον, γεγονός που επιτυγχάνεται κυρίως με τη χρήση παρεμποδιστών (Di & Cameron, 2002). Αργή ή ελεγχόμενη αποδέσμευση αζώτου, οδηγεί στη μείωση των απωλειών, καθυστερώντας έτσι την απελευθέρωση αζώτου στο έδαφος, τροφοδοτώντας σταδιακά την καλλιέργεια, σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης.

Οι πηγές αζώτου καθώς και ο τύπος του εφαρμοζόμενου λιπάσματος, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά της απώλειες αζώτου όπως την εκπομπή νιτρικών αερίων. Οι παρεμποδιστές που χρησιμοποιούνται επί το πλείστον σε λιπάσματα με βάση το άζωτο, είναι ο παρεμποδιστής ουρεάσης και ο παρεμποδιστής νιτροποίησης. Ο παρεμποδιστής ουρεάσης, θειοφωσφορικό τριαμίδιο (NBPT), καθυστερεί την μετατροπή της ουρίας σε αμμωνιακά (NH_4^+) και εν συνεχεία σε αμμωνία (NH_3), ενώ ο παρεμποδιστής νιτροποίησης, δικυανδιαμίδη (DCD), καθυστερεί την μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά (NO_3^-) (Li et al., 2020).

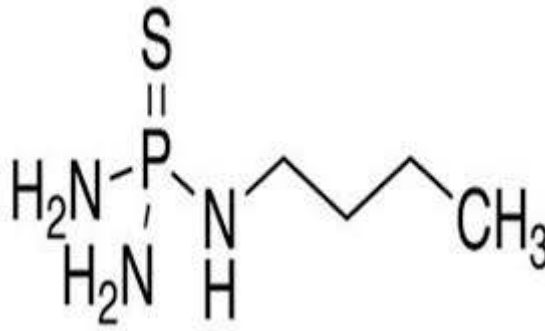
Έχουν αναπτυχθεί διάφορα προϊόντα με σκοπό να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες αζώτου, εξαιτίας της πτητικότητας της αμμωνίας, ένα από αυτά είναι οι παρεμποδιστές ουρεάσης (Keshavarz Afshar et al., 2018). Οι παρεμποδιστές ουρεάσης, καθυστερούν τη μετατροπή της ουρίας σε αμμώνιο (NH_4^+), με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις του στο έδαφος να είναι

μειωμένες, καθώς και η πιθανότητα πτητικότητας της αμμωνίας (NH_3) (Dawar et al., 2011). Έχει αποδειχθεί, ότι η ουρία με επικάλυψη παρεμποδιστή ουρεάσης, όπως το (όπως το NBPT, N- (η-βουτυλο) θειοφωσφορικό τριαμίδιο), μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αμμωνίας (Engel et al., 2011; Soares et al., 2012; Turner et al., 2010). Το NBPT, συμβάλλει στην αναστολή της υδρόλυσης της ουρίας κλειδώνοντας τις θέσεις δέσμησης του ενζύμου της ουρεάσης και εμποδίζοντάς το να αντιδράσει με την ουρία (Manunza et al., 1999).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι με τη χρήση παρεμποδιστών ουρεάσης αναστέλλεται προσωρινά η δραστηριότητα της ουρεάσης και ελέγχεται η απελευθέρωση αζώτου στο έδαφος, επιτρέποντας έτσι τον καλύτερο συγχρονισμό προσφοράς (μέσω του λιπάσματος) και ζήτησης από την καλλιέργεια, με αποτέλεσμα της αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης του αζώτου (NUE) και τη μείωση των εκπομπών αζώτου εξαιτίας του εφαρμοζόμενου λιπάσματος (Soares et al., 2012; Turner et al., 2010).

Αναφέρεται ότι η συνολική εκπομπή αμμωνίας NH_3 , κατά την εφαρμογή ουρίας ήταν 10,1%, καθώς από την άλλη, κατά την εφαρμογή ουρίας με παρεμποδιστή ουρεάσης ήταν 5,9% (Sanz-Cobena et al., 2008). Σύμφωνα με τους Li et al. (2015), οι αθροιστικές απώλειες αμμωνίας από την ουρία ήταν 11-25% του εφαρμοσμένου N σε περίοδο δύο εβδομάδων, ενώ από τον συνδυασμό με παρεμποδιστή, ουρίας-ουρεάσης, ήταν μόνο 0-6%. Οι μειωμένες εκπομπές αμμωνίας οφείλονται στη μείωση της δραστηριότητας της ουρεάσης κατά τις πρώτες εννέα μέρες μετά την εφαρμογή του λιπάσματος. Επιπλέον σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι παρεμποδιστές ουρεάσης είναι αποτελεσματικοί για 10 έως 14 ημέρες αν και υπάρχουν βιβλιογραφίες οι οποίες το αντικρούουν (Havlin et al., 2005).

Γενικά, οι παρεμποδιστές ουρεάσης είναι πιο αποτελεσματικοί σε συνθήκες υψηλής πτητικότητας, έκπλυσης ή απονιτροποίησης (Tao & Rogers 2019). Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται από την εφαρμογή λιπασμάτων με βάση την ουρία, στην επιφάνεια εδάφους με περίσσεια υπολειμμάτων, με pH μεγαλύτερο από 7, ή χαμηλής ρυθμιστικής ικανότητας όπως τα αμμώδη εδάφη (Grant 2004). Επιπλέον ο Grant (2004), ανέφερε ως επιπλέον πλεονέκτημα των παρεμποδιστών ουρεάσης τη μείωση του αρνητικών επιδράσεων σε σπόρους που οφείλονται στην ουρία που περιέχεται στα λιπάσματα, η οποία πολλές φορές δρα καταστροφικά προς τους σπόρους.



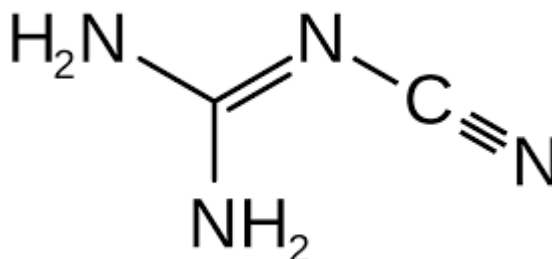
Εικόνα 1.8: Χημική ένωση του παρεμποδιστή ουρεάσης NBPT.

Όσο για τους παρεμποδιστές νιτροποίησης, έχει φανεί ότι μπορεί να καθυστερήσουν την οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλάση, η οποία στη συνέχεια οξειδώνεται σε διοξείδιο του αζώτου (NO_2^-) και νιτρικά ανιόντα (NO_3^-), μειώνοντας με τον τρόπο αυτό, άμεσα τη νιτροποίηση, και έμμεσα την απονιτροποίηση (Majumdar et al., 2000; Malla et al., 2005; Sun et al., 2015). Επιπλέον, επιβραδύνουν προσωρινά τη διαδικασία νιτροποίησης, όπου τα βακτήρια του εδάφους (*Nitrosomonas*) (Alonso-Ayuso et al. 2016), μετατρέπουν το αμμώνιο (NH_4^+) σε διοξείδιο του αζώτου (NO_2), αναστέλλοντας έτσι το πρώτο βήμα της νιτροποίησης, με αποτέλεσμα το λίπασμα να παραμείνει στη μορφή του αμμωνίου (NH_4^+). Η εφαρμογή παρεμποδιστών νιτροποίησης είναι μία από τις στρατηγικές αύξησης της αποδοτικότητας του αζώτου (NUE) στα καλλιεργητικά συστήματα.

Όταν τα λιπάσματα έχουν αναμειχθεί με παρεμποδιστές νιτροποίησης, βελτιώνεται ο συγχρονισμός μεταξύ της προσφοράς του αζώτου και της ζήτησής του, από την εκάστοτε καλλιέργεια, ενισχύοντας την αποδοτικότητα χρήσης του, μειώνοντας παράλληλα τις απώλειες νιτρικών (Ladha et al., 2005), όπως και με τους παρεμποδιστές ουρεάσης.

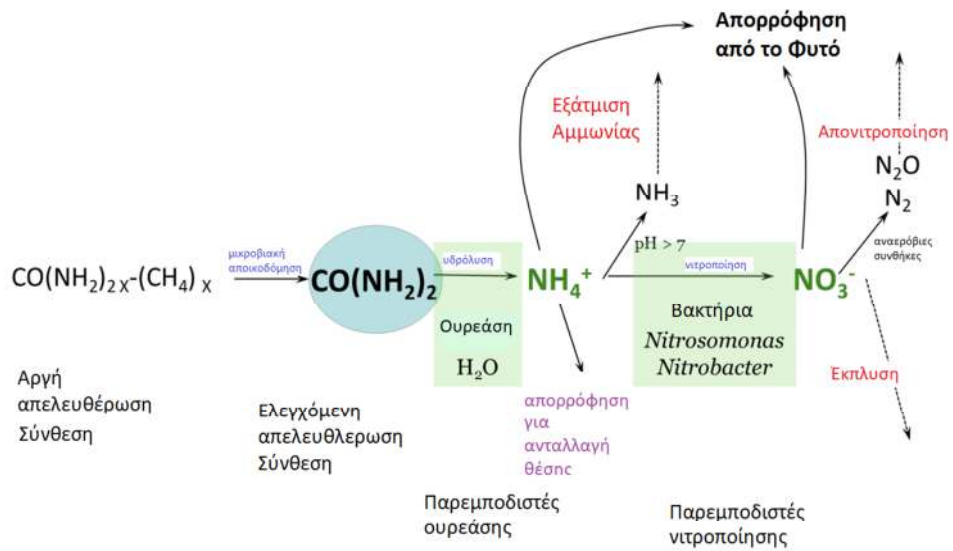
Σε αρδευόμενα γεωργικά συστήματα, η χρήση παρεμποδιστή νιτροποίησης οδήγησε σε μείωση της έκλυσης νιτρικών κατά 27% σε σχέση με την έκλυση κατά τη χρήση συμβατικών λιπασμάτων (Quemada et al., 2013). Οι Juma & Paul (1983), παρατήρησαν αύξηση της βιομάζας των μικροοργανισμών του εδάφους, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την διαθεσιμότητα του εδαφικού αζώτου εξαιτίας της συμβολής τους στην ανοργανοποίηση και την ακινητοποίησή του, κατά τη χρήση λιπασμάτων που περιείχαν παρεμποδιστές νιτροποίησης. Από την άλλη η προσθήκη παρεμποδιστή νιτροποίησης, οδήγησε σε ενίσχυση της διαθεσιμότητας των αμμωνιακών ιόντων για τους μικροοργανισμούς, αυξάνοντας την ακινητοποίηση αζώτου, σε πείραμα που έγινε σε εργαστηριακό επίπεδο (Ma et al., 2015).

Ως παρεμποδιστές νιτροποίησης, χρησιμοποιούνται δύο παρόμοια δραστικά συστατικά η νιτραπυρίνη (2-χλωρο-6 [τριχλωρομεθυλ] πυριδίνη) και το δικυανδιαμίδιο (DCD). Η αποτελεσματικότητα του (DCD), διαρκεί έως και τους τρεις μήνες (Havlin et al. 2005; Malzer et al. 1989; Sawyer 1985).



Εικόνα 1.9: Χημική ένωση του παρεμποδιστή νιτροποίησης DCD.

Ο συνδυασμός ωστόσο των παρεμποδιστών ουρέασης και νιτροποίησης, δείχνει να είναι πιο αποτελεσματικός όσο αφορά την εκπομπή αερίων του αζώτου αλλά και την αύξηση της απόδοσης καλλιεργειών (Akiyama et al., 2009; Wang et al., 2015). Η αυξημένη τιμή των λιπασμάτων με παρεμποδιστές λοιπόν, δικαιολογείται εξαιτίας της μείωσης των εφαρμογών, της αύξησης της παραγωγικότητας, με αποτέλεσμα την ανάδειξή τους ως μία βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών λιπασμάτων. Ως εκ τούτου, οδηγεί στην αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης του αζώτου (NUE) καθώς και την απόδοση των καλλιεργειών (Quemada et al., 2013).



Εικόνα 1.10: Διαδρομές απώλειας αζώτου και επιλογές διαχείρισης για τη μείωση του κινδύνου απώλειας N (Πηγή: <https://cropwatch.unl.edu>).

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο σκοπός παρούσας μελέτης είναι να προσδιοριστούν οι επιδράσεις λιπασμάτων ουρίας (U) με προσθήκη διαφορετικών παρεμποδιστών, παρεμποδιστή ουρέασης (U + UI), παρεμποδιστή νιτροποίησης (U + NI) και το συνδυασμό και των δύο παρεμποδιστών (U + UI + NI), σε σχέση με την απλή ουρία και το μάρτυρα (M) (καμία προσθήκη λιπάσματος), στην επιβίωση, την αφθονία και τη δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων του γένους *Octodrilus complanatus*, ο οποίος που αποτελεί βιοδείκτη υγείας για τα εδάφη της λεκάνης της Μεσογείου και ως εκ τούτου και τα ελληνικά.



Εικόνα 2.1: *Octodrilus complanatus* (φωτογραφία από τον αγρό του ΓΠΑ). (Προσωπική συλλογή)

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Πειραματικό Σχέδιο

Δύο πανομοιότυπα εργαστηριακά πειράματα έλαβαν χώρα στο εργαστήριο Γεωργίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΓΠΑ), κατά τη διάρκεια των ετών 2019-2020.

Τα πειράματα ακολούθησαν σχέδιο τυχαιοποιημένων πλήρων ομάδων, με πέντε επεμβάσεις (διαφορετικοί συνδυασμοί ουρίας) και τρεις επαναλήψεις. Κατά το σχεδιασμό οι συνδυασμοί ουρίας και οι μέθοδοι εφαρμογής τους θεωρήθηκαν παράγοντες ίδιας σημασίας.

Πιο συγκεκριμένα, οι επεμβάσεις-συνδυασμοί της ουρίας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 1) Ουρία (42-0-0), 2) Ουρία με παρεμποδιστή νιτροποίησης (NI), 3) Ουρία με παρεμποδιστή ουρέασης (UI), 4) Ουρία με παρεμποδιστή νιτροποίησης και παρεμποδιστή ουρέασης (NI+UI) και 5) Μάρτυρας (χωρίς την προσθήκη λιπάσματος).

1^η ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ 2^η ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ 3^η ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

M	M	M
U	U	U
U+NI	U+NI	U+NI
U+UI	U+UI	U+UI
U+NI+UI	U+NI+UI	U+NI+UI

Εικόνα 3.1: Σχέδιο του πειράματος της παρούσας μελέτης

Όπου **M**: μάρτυρας, **U**: ουρία, **U+NI**: ουρία με παρεμποδιστή νιτροποίησης, **U+UI**: ουρία με παρεμποδιστή ουρεάσης και **U+NI+UI**: ουρία με διπλή παρεμπόδιση

3.2 Συλλογή ατόμων και Εγκατάσταση πειράματος

Η συλλογή των γαιοσκωλήκων, πραγματοποιήθηκε στο βιολογικό αγρό του εργαστηρίου Γεωργίας στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο στην Ιερά οδό 75 (γεωγραφικό πλάτος 37° 59' 1,47'' Β, γεωγραφικό μήκος 23° 42' 6,98'' Α, 30 m από την επιφάνεια της θάλασσας). Για το πρώτο πείραμα, η συλλογή έγινε το Νοέμβριο του 2019, ενώ για το δεύτερο τον Ιανουάριο του 2020. Η συλλογή πραγματοποιήθηκε με τα χέρια, από τετράγωνα εδάφους διαστάσεων, 50 εκ. x 50 εκ. x 10-20 εκ (βάθος).



Εικόνα 3.2: Συλλογή των γαιοσκωλήκων για τις ανάγκες του πειράματος (ΓΠΑ).

(Προσωπική συλλογή)

Μετά τη συλλογή τους οι γαιοσκώληκες πλύθηκαν, ώστε να φύγουν τα σωματίδια χόματος από την επιδερμίδα τους, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε διαλογή υγιών ενήλικων ατόμων, με καλά ανεπτυγμένο επίσαγμα, για τις ανάγκες του πειράματος, σε συμφωνία με άλλες έρευνες (Xiao et al., 2004). Επιπλέον οι γαιοσκώληκες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη ήταν παρόμοιου βάρους όπως προτείνεται από

παρόμοιες έρευνες στο παρελθόν (Bilalis et al., 2013), με μέσο βάρος ατόμου 2,000 γραμμάρια με απόκλιση $\pm 0,900$ γραμμάρια.

Αφού ζυγίστηκαν οι γαιοσκώληκες, στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε πλαστικά δοχεία διαστάσεων 20 x 14 x 10 εκ (βάθος) (Travlos et al., 2017). Κάθε δοχείο περιείχε υπόστρωμα τύρφης, 500 γραμμάρια, τρεις γαιοσκώληκες, 20 γραμμάρια τεμαχισμένα φύλλα μουριάς (*Morus alba* L.) στην επιφάνεια του υποστρώματος, 1 γραμμάριο βρώμης και 150 ml νερό και τέλος 5 γραμμάρια του εκάστοτε λιπάσματος.

Τα φύλλα μουριάς είχαν συλλεχθεί από δέντρα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, είχαν πλυθεί και είχαν αφεθεί σε θερμοκρασία και υγρασία δωματίου έως ότου στεγνώσουν.

Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύρφη με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και τις εξής ιδιότητες: pH (1:1 H₂O) 5-6,5 και Άζωτο (N) 16,6 mg/100L.

Αφού τοποθετήθηκαν όλα όσα προαναφέρθηκαν, το κάθε κουτί καλύφθηκε με λεπτή σίτα, ώστε να αποτρέψει την φυγή των γαιοσκωλήκων, και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε δωμάτιο με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και φωτισμού 20 °C και 12 ώρες ανά μέρα, αντίστοιχα.

Μία φορά την εβδομάδα, τα δοχεία ζυγίζονταν και αναπληρωνόταν η ποσότητα υγρασίας που είχε χαθεί, καθώς επίσης την ίδια ημέρα γινόταν η προσθήκη φύλλων μουριάς όπου και όταν κρινόταν αναγκαίο.

Η διάρκεια του εκάστοτε πειράματος ήταν 24 ημέρες. Τα πειράματα τελείωσαν όταν η θνησιμότητα των γαιοσκωλήκων ήταν 100% σε όλες τις επεμβάσεις πλην του μάρτυρα. Το πρώτο πείραμα ξεκίνησε στις 27 Νοεμβρίου 2019 και τέλειωσε στις 21 Δεκεμβρίου 2019 καθώς το δεύτερο πραγματοποιήθηκε από τις 15 Ιανουαρίου 2020 έως τις 8 Φεβρουαρίου 2020.

Οι επιζώντες γαιοσκώληκες μετά το πέρας του πειράματος αφέθηκαν στο σημείο από όπου συλλέχθηκαν, στον αγρό του εργαστηρίου γεωργίας.





Εικόνα 3.3: Εικόνες από την προετοιμασία και καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης του πειράματος (ΓΠΑ). (Προσωπική συλλογή)

3.3 Προσδιορισμοί – Μετρήσεις

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν χαρακτηριστικά των γαιοσκωλήκων, όπως το βάρος, η θνησιμότητα και η πυκνότητα και ποσότητα των κοπρολυμάτων (casts) τους, καθώς και ιδιότητες του εδάφους όπως το pH, η οργανική ουσία, τα ανταλλάξιμο ασβέστιο (Ca), τη μεταβολή της έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα CO₂, καθώς και η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ).

3.3.1 Γαιοσκώληκες

Όσο αφορά τις μετρήσεις που αφορούσαν τους γαιοσκώληκες πραγματοποιούνταν σε διαφορετικές ημέρες από την επέμβαση (εφαρμογή των λιπασμάτων) (ΗΑΕ). Το βάρος των γαιοσκωλήκων μετρήθηκε πέντε διαφορετικές ΗΑΕ, και τελικά εκφράστηκε ως η μείωση του μέσου βάρους τους στο πέρας του χρόνου. Για τον υπολογισμό του βάρους, οι γαιοσκώληκες πλένονταν με απεσταγμένο νερό, ώστε να απομακρυνθούν τα σωματίδια

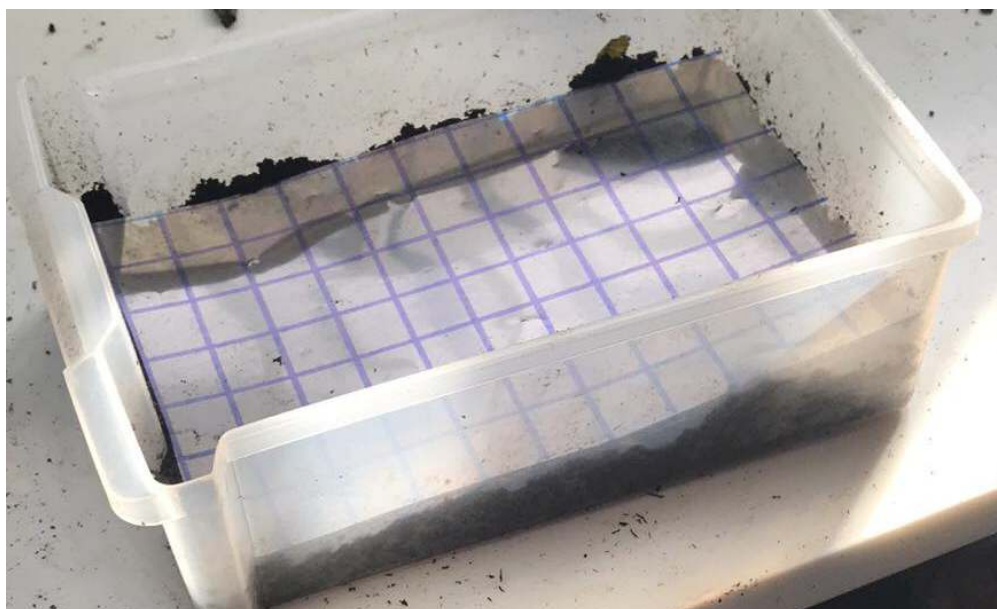
χώματος από το σώμα τους και τη συνέχεια ζυγίζονταν σε ζυγαριά ακρίβειας. Ο προσδιορισμός της θνησιμότητας των γαιοσκωλήκων πραγματοποιούνταν κάθε 10 ΗΑΕ.

Όσο αφορά τον προσδιορισμό των κοπρολύματων, πραγματοποιήθηκε τρεις φορές κατά τη διάρκεια του κάθε πειράματος, σε 3 διαφορετικές ΗΑΕ. Για τον προσδιορισμό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος «line interest method», με τον έξης τύπο:

$$R = \frac{\pi NA}{2H}$$

Όπου: R: τα κοπρολύματα, π: μαθηματική σταθερά με τιμή 3,14, N: διασταύρωση, A: περιοχή και H: ολικό μήκος σταυρού (NEWMAN 1996).

Για το σκοπό αυτό φτιάχτηκε ένα διαφανές σταυρόνημα.



(α)



(β)



Εικόνα 3.4: (α) το διαφανές σταυρόνημα που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των casts και (β) είναι εικόνες των casts όπως φαίνονταν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

(Προσωπική συλλογή)

Για τις ανάγκες των εδαφολογικών μετρήσεων, τα εδαφικά δείγματα είχαν υποστεί αεροξήρανση για περίπου 48 ώρες, και στη συνέχεια κοσκινίστηκαν από κόσκινο με οπές διαμέτρου 2 χιλιοστών (mm).

3.3.2 Ανταλλάξιμο ασβέστιο εδάφους

Για τον υπολογισμό του ανταλλάξιμου ασβεστίου ακολουθήθηκε η μέθοδος Drouineau-Galet, με τη χρήση σπεκτομέτρου. Για την εξαγωγή των κατιόντων ασβεστίου χρησιμοποιήθηκε διάλυμα οξικού αμμωνίου ($\text{C}\square\text{H}\square\text{NO}\square$).

3.3.3 Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (IAK)

Ο προσδιορισμός της IAK πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του οξικού αμμωνίου ($\text{C}\square\text{H}\square\text{NO}\square$) (Chapman, 1965).

3.3.4 Οξύτητα (pH)

Ο προσδιορισμός του pH του εδάφους πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Mclean (1982), σε αιώρημα εδάφους : ύδατος, 1:1, χρησιμοποιώντας 50 γραμμάρια κοσκινισμένου εδάφους και 50 ml απιονισμένου ύδατος. Το διάλυμα αφέθηκε περίπου 60 λεπτά για εξισορρόπηση και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε pH-μέτρο πλαστικού ηλεκτροδίου “gel filling”, για τον προσδιορισμό του pH.

3.3.5 Έκλυση Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

Για την πραγματοποίηση της μέτρησης αυτής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος τιτλοδότησης (Isermeyer 1952). Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε σε πέντε διαφορετικές ημέρες από την εφαρμογή των λιπασμάτων (HAE).

3.3.6 Οργανική ουσία εδάφους

Ο προσδιορισμός της οργανικής ουσίας έγινε με τη μέθοδο υγρής οξείδωσης των Wakley & Black (1934). Η υγρή οξείδωση χρησιμοποιεί την εξώθερμη θέρμανση και οξείδωση του οργανικού άνθρακα του εκάστοτε δείγματος χρησιμοποιώντας διχρωμικό κάλιο και συμπυκνωμένο θειικό οξύ H₂SO₄.





Εικόνα 3.5: Εικόνες από τις εδαφολογικές αναλύσεις (Εργαστήριο Εδαφολογίας ΓΠΑ).
(Προσωπική συλλογή)

3.4 Στατιστική Ανάλυση

Η ανάλυση της παραλλακτικότητας των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του στατιστικού προγράμματος Statistica (Stat Soft, 2011), ως σχέδιο τυχαιοποιημένων πλήρων ομάδων. Χρησιμοποιήθηκε LSD τεστ για την εκτίμηση της σημαντικότητας των διαφορών μεταξύ των επεμβάσεων. Οι συγκρίσεις έγιναν σε επίπεδο σημαντικότητας 5%, ($p \leq 0,05$).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Μεταβολή Μέσου Βάρους Γαιοσκωλήκων

Το βάρος των γαιοσκωλήκων όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1, μεταβάλλεται στο χρόνο, και πιο συγκεκριμένα μειώνεται με το πέρας του χρόνου. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο πειράματα. Οι τιμές της μεταβολής του βάρους των γαιοσκωλήκων κυμαίνονται από 8,13 % έως 100,00% για το πρώτο πείραμα και από 10,06% έως 100,0% για το δεύτερο.

Η μεταβολή του βάρους είναι σημαντικά μεγαλύτερη στην επέμβαση της ουρίας όπως και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης, ακολουθεί η ουρία με διπλή παρεμπόδιση, η ουρία με παρεμποδιστή ουρεάσης και τέλος ο μάρτυρας. Στο μάρτυρα η διαφορά βάρους είναι σημαντικά μικρότερη από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, περίπου 90% μικρότερη από την ουρία.

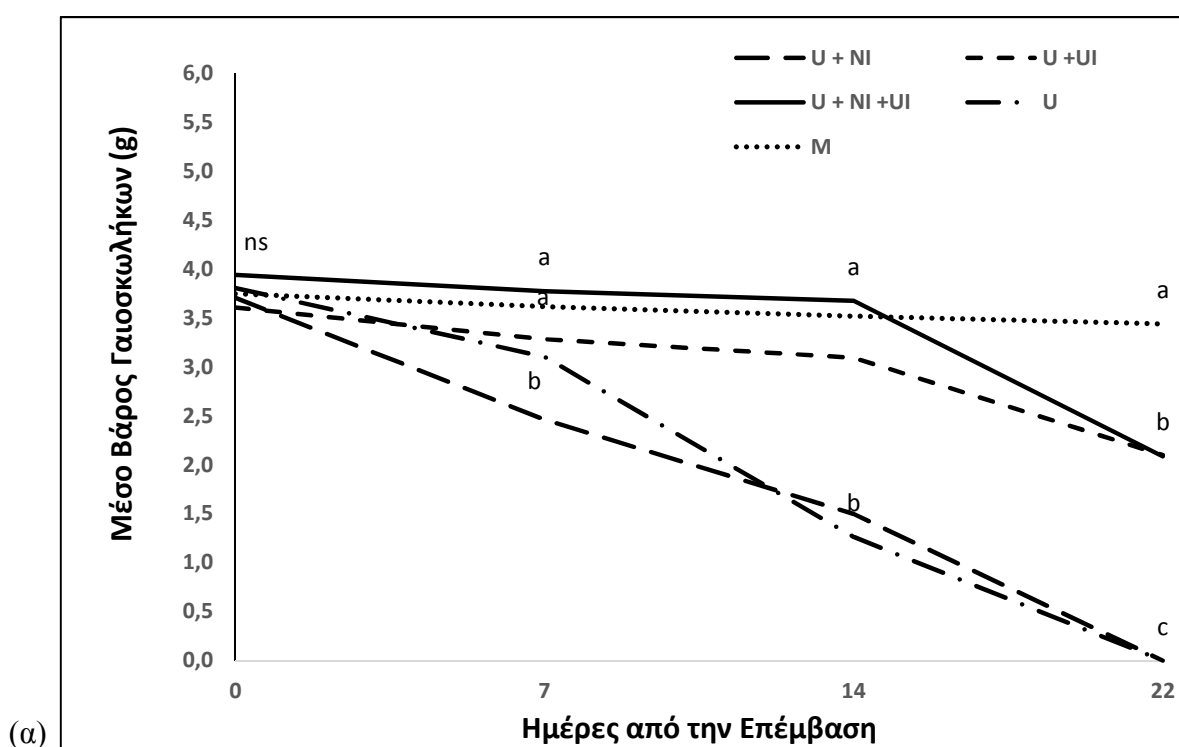
Πίνακας 4.1.1 Διαφορά βάρους γαιοσκωλήκων. Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

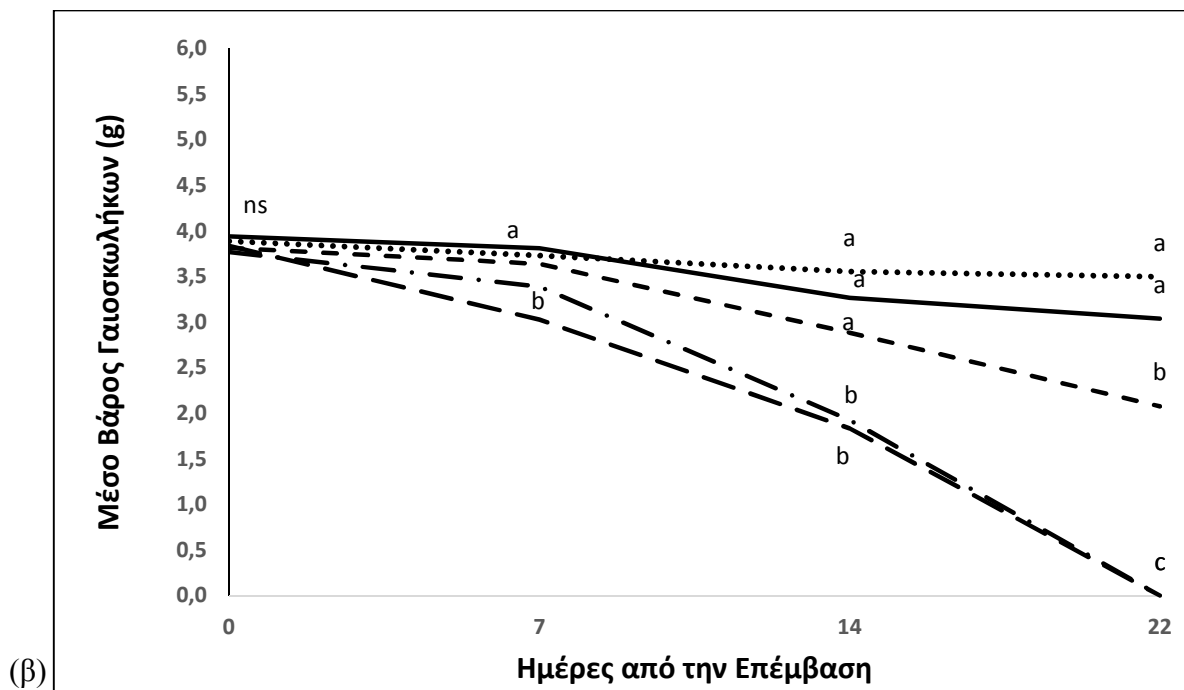
1 ^ο Πείραμα	Μεταβολή μέσου βάρους Γαιοσκωλήκων (%)
U + NI	100,00 ^a
U + UI	41,99 ^b
U + NI +UI	46,82 ^c
U	100,00 ^a
M	8,13 ^d
2^ο Πείραμα	
U + NI	100,00 ^a
U + UI	44,80 ^b
U + NI +UI	22,83 ^c
U	100,00 ^a
M	10,06 ^d
$F_{\text{λίπανση}}$	50,96 ^{***}
$F_{\text{πείραμα}}$	ns
$F_{\text{λίπανση} \times \text{πείραμα}}$	ns

(‘ns’όχι στατιστικά σημαντικό; *: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.05$; **: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.01$;***: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.001$).

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 1, το βάρος μέχρι τις 7 ΗΑΕ μειώνεται με τον ίδιο τρόπο για τις επεμβάσεις του μάρτυρα, της ουρίας με διπλό παρεμποδιστή και της ουρίας με παρεμποδιστή ουρεάσης, μεταξύ των οποίων δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Από την άλλη, οι προαναφερθείσες επεμβάσεις παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις επεμβάσεις της ουρίας καθώς και της ουρίας με τον παρεμποδιστή νιτροποίησης, μεταξύ των οποίων φαίνεται ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Το ίδιο συμβαίνει και κατά την 14^η ΗΑΕ, στη οποία η μεταβολή είναι πιο έντονη, παρότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά από την 7^η ΗΑΕ.

Στις 22 ΗΑΕ, ο μάρτυρας παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις, αφού εκεί σημειώνεται η μικρότερη μεταβολή του μέσου βάρους των γαιοσκωλήκων. Μεταξύ της ουρίας με διπλό παρεμποδιστή και της ουρίας με παρεμποδιστή ουρεάσης δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές, ενώ στατιστικά σημαντικές είναι οι διαφορές μεταξύ της ουρίας και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Στο σημείο αυτό υπάρχει μία διαφορά, που ωστόσο δεν κρίνεται στατιστικά σημαντική, ανάμεσα στα δύο πειράματα αφού η επεμβάσεις του μάρτυρα και της ουρίας με διπλό παρεμποδιστή, δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.





Διάγραμμα 4.1.1. Μεταβολή του μέσου βάρους των γαιοσκωλήκων (εξαιτίας των επεμβάσεων) σε 4 διαφορετικές ΗΑΕ, (α) και (β) για το πρώτο και το δεύτερο πείραμα αντίστοιχα ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό).

4.2 Κοπρολύματα (Casts)

Αναφορικά με τα κοπρολύματα των γαιοσκωλήκων, τα οποία μετρήθηκαν σε 3 διαφορετικές ΗΑΕ, σύμφωνα με τον Πίνακα 2, δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων στις 2 και στις 7 ΗΑΕ, καθώς και μεταξύ των δύο πειραμάτων. Ωστόσο στην τρίτη μέτρηση, την 22^η ΗΑΕ σημειώνονται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων και μεταξύ των πειραμάτων. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές κυμαίνονται από 0,000 έως και 0,350 για το πρώτο και από 0,000 έως και 0,590 για το δεύτερο πείραμα.

Μεταξύ των επεμβάσεων, όσο αφορά το πρώτο πείραμα, η μεγαλύτερη τιμή των κοπρολυμάτων σημειώνεται στην επέμβαση της ουρίας με διπλή παρεμπόδιση ενώ η μικρότερη στις επεμβάσεις της ουρίας και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης. Στατιστικά σημαντικές διαφορές υπάρχουν επίσης και μεταξύ όλων των επεμβάσεων εκτός από τις επεμβάσεις της ουρίας και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης. Όσο αφορά το δεύτερο πείραμα, στις 22 ΗΑΕ, η μεγαλύτερη τιμή σημειώθηκε επίσης στην επέμβαση της ουρίας με διπλό παρεμποδιστή, και η μικρότερη στην ουρία και στην ουρία με παρεμποδιστή νιτροποίησης.

Πίνακας 4.2.1. Εμφάνιση κοπρολυμάτων σε 3 διαφορετικές ημέρες από την επέμβαση (HAE). Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

1 ^ο Πείραμα	Κοπρολύματα- Casts		
	2 ΗΑΕ	7 ΗΑΕ	22 ΗΑΕ
U + NI	0,340 ^{ns}	0,330 ^{ns}	0 ^a
U + UI	0,330 ^{ns}	0,250 ^{ns}	0,220 ^b
U + NI +UI	0,370 ^{ns}	0,350 ^{ns}	0,350 ^c
U	0,370 ^{ns}	0,370 ^{ns}	0 ^a
M	0,340 ^{ns}	0,300 ^{ns}	0,300 ^d
2 ^ο Πείραμα			
U + NI	0,440 ^{ns}	0,580 ^{ns}	0 ^a
U + UI	0,520 ^{ns}	0,600 ^{ns}	0,450 ^b
U + NI +UI	0,470 ^{ns}	0,480 ^{ns}	0,590 ^c
U	0,520 ^{ns}	0,550 ^{ns}	0 ^a
M	0,570 ^{ns}	0,480 ^{ns}	0,420 ^d
$F_{\lambda\text{ίπανση}}$	<i>ns</i>	<i>ns</i>	83,59 ^{***}
$F_{\text{πείραμα}}$	<i>ns</i>	<i>ns</i>	8,507 ^{**}
$F_{\lambda\text{ίπανση} \times \text{πείραμα}}$	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

(^{ns}: όχι στατιστικά σημαντικό; *: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.05$; **: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.01$; ***: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.001$)

4.3 Θνησιμότητα γαιοσκωλήκων

Στις 2 ΗΑΕ (Πίνακας 3) η θνησιμότητα των γαιοσκωλήκων ήταν 0% για όλες τις επεμβάσεις, καθώς επίσης διαφορές ανάμεσα στα δύο πειράματα δεν κρίνονται στατιστικά σημαντικές. Το ίδιο ισχύει και για τις 5 ΗΑΕ, στις οποίες το ποσοστό θνησιμότητας είναι επίσης 0%. Την 7^η ΗΑΕ, σημειώθηκε 33,3% θνησιμότητα στην επέμβαση της ουρίας και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης, στο πρώτο πείραμα, ενώ στο δεύτερο θνησιμότητα παρουσιάστηκε στην επέμβαση της ουρίας σε ποσοστό 33,3%. Στατιστικά σημαντικές είναι οι διαφορές μεταξύ της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης και της ουρίας, με τις

υπόλοιπες επεμβάσεις, για το πρώτο πείραμα, καθώς και της ουρίας με της υπόλοιπες επεμβάσεις και το δεύτερο πείραμα.

Στις 9 ΗΑΕ, το ποσοστό θνησιμότητας είναι 66,6% στην επέμβαση της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης, και 33,3% στην επέμβαση της ουρίας, για το πρώτο πείραμα, ενώ στο δεύτερο πείραμα η θνησιμότητα ήταν 33,3%, στην επέμβαση της ουρίας. Στατιστικά σημαντικές είναι οι διαφορές μεταξύ της ουρίας και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης με τις υπόλοιπες επεμβάσεις για το πρώτο πείραμα, ενώ για το δεύτερο στατιστικά σημαντική είναι η διαφορά μεταξύ της ουρίας με τις υπόλοιπες επεμβάσεις.

Επιπλέον, στην 5^η μέτρηση (Πίνακα 3), στις 12 ημέρες δηλαδή από την εφαρμογή των λιπασμάτων, στο πρώτο πείραμα η θνησιμότητα δε διαφέρει από την προηγούμενη μέτρηση, ωστόσο όσο αφορά τον δεύτερο πείραμα, θνησιμότητα παρουσιάστηκε στην επέμβαση της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης σε ποσοστό 33,3%, ενώ στην επέμβαση της ουρίας το ποσοστό θνησιμότητας παραμένει σταθερό. Ως εκ τούτου, η λίπανση επηρέασε στατιστικά σημαντικά το ποσοστό θνησιμότητας.

Πίνακας 4.3.1 Θνησιμότητα γαιοσκωλήκων σε 10 διαφορετικές ημέρες από την επέμβαση (ΗΑΕ). Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p=0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

1 ^ο Πείραμα	Ποσοστό Θνησιμότητας (%)									
	2 ΗΑΕ	5 ΗΑΕ	7 ΗΑΕ	9 ΗΑΕ	12 ΗΑΕ	14 ΗΑΕ	16 ΗΑΕ	19 ΗΑΕ	21 ΗΑΕ	24 ΗΑΕ
U + NI	0% ^{ns}	0% ^{ns}	33,3% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	100% ^a	100% ^a
U + UI	0% ^{ns}	0% ^{ns}	0% ^b	0% ^b	0% ^b	0% ^b	33,3% ^b	66,6% ^a	66,6% ^b	100% ^a
U + NI +UI	0% ^{ns}	0% ^{ns}	0% ^b	0% ^b	0% ^b	0% ^b	33,3% ^b	33,3% ^b	33,3% ^b	100% ^a
U	0% ^{ns}	0% ^{ns}	33,3% ^a	33,3% ^a	33,3% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	100% ^a	100% ^a
M	0% ^{ns}	0% ^{ns}	0% ^b	0% ^b	0% ^b	0% ^b	0% ^c	0% ^c	0% ^c	0% ^b
2 ^ο Πείραμα										
U + NI	0% ^{ns}	0% ^{ns}	0% ^b	0% ^b	33,3% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	100% ^a	100% ^a
U + UI	0% ^{ns}	0% ^{ns}	0% ^b	0% ^b	0% ^b	33,3% ^b	33,3% ^b	33,3% ^b	33,3% ^b	100% ^a
U + NI +UI	0% ^{ns}	0% ^{ns}	0% ^b	0% ^b	0% ^b	0% ^b	0% ^c	33,3% ^b	33,3% ^b	100% ^a
U	0% ^{ns}	0% ^{ns}	33,3% ^a	33,3% ^a	33,3% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	66,6% ^a	100% ^a	100% ^a

M	0% ^{ns}	0% ^{ns}	0% ^b	0% ^b	0% ^b	0% ^b	0% ^c	0% ^c	0% ^c	0% ^b
<i>F</i> _{λίπανση}	<i>ns</i>	<i>ns</i>	4,263 ^{**}	8,088 ^{***}	9,293 ^{***}	23,36 ^{***}	20,16 ^{***}	11,242 ^{***}	39,021 ^{***}	639,0 ^{***}
<i>F</i> _{πείραμα}	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	5,965 [*]	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
<i>F</i> _{λίπανση x πείραμα}	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

(‘ns’όχι στατιστικά σημαντικό; *: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.05$; **: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.01$;***: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.001$).

Στο επόμενο μισό των δύο πειραμάτων φαίνεται να συμβαίνουν σημαντικές αλλαγές στο ποσοστό της θνησιμότητας σε όλες τις επεμβάσεις εκτός από τον μάρτυρα. Πιο συγκεκριμένα στις 14 ΗΑΕ, το ποσοστό θνησιμότητας για τις επεμβάσεις της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης και της ουρίας, είναι 66,6% και 33,3%, , στο πείραμα 1 και 2 αντίστοιχα. Οι δύο αυτές επεμβάσεις διαφέρουν σημαντικά με τις υπόλοιπες και για τα δύο πειράματα.

Στις 16 ΗΑΕ, όσο αφορά το πρώτο πείραμα, θνησιμότητα σημειώθηκε σε όλες τις επεμβάσεις εκτός από το μάρτυρα, σε διαφορετικά ποσοστά ωστόσο. Στις επεμβάσεις της ουρίας με διπλό παρεμποδιστή και με παρεμποδιστή ουρεάσης το ποσοστό θνησιμότητας που σημειώθηκε είναι 33,3%, ενώ στις επεμβάσεις της ουρίας και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης είναι 66,6%. Οι διαφορές ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο πείραμα δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Στο δεύτερο πείραμα, η ουρία καθώς και η ουρία με παρεμποδιστή νιτροποίησης προκάλεσαν θνησιμότητα σε ποσοστό 66,6%, και η ουρία με παρεμποδιστή ουρεάσης 33,3% όπως και στο πρώτο, με τη διαφορά ότι στο δεύτερο δεν σημειώθηκε θνησιμότητα στην επέμβαση της ουρίας με το διπλό παρεμποδιστή (ουρεάσης και νιτροποίησης).

Επιπλέον, στις 19 ΗΑΕ, υπάρχει σημαντική αύξηση του ποσοστού θνησιμότητας και στα δύο πειράματα. Το ποσοστό της θνησιμότητας των επεμβάσεων της ουρίας και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης είναι 66,6% και 33,3% για την ουρία με διπλό παρεμποδιστή για τα δύο πειράματα, ωστόσο, η επέμβαση της ουρίας με παρεμποδιστή ουρεάσης προκάλεσε 66,6% θνησιμότητα στο πρώτο πείραμα και 33,3% στο δεύτερο. Στην επέμβαση του μάρτυρα εξακολουθεί το ποσοστό θνησιμότητας να είναι 0%.

Στην προτελευταία (9^η) μέτρηση, στις 21 ΗΑΕ, το ποσοστό της θνησιμότητας σημείωσε αύξηση αφού και στα δύο πειράματα στην επέμβαση της ουρίας και της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης σημειώνεται 100% θνησιμότητα. Από την άλλη 33,3% θνησιμότητα σημειώθηκε και στα δύο πειράματα στην επέμβαση της ουρίας με διπλό παρεμποδιστή, ενώ διαφορές μεταξύ των δύο πειραμάτων σημειώθηκαν στην επέμβαση της

ουρίας με παρεμποδιστή ουρέασης, όπου στο πρώτο πείραμα το ποσοστό θνησιμότητας που σημειώθηκε είναι 66,6% ενώ στο δεύτερο 33,3%.

Τέλος, την 24^η ΗΑΕ, όπου επήλθε και το τέλος του εκάστοτε πειράματος, το ποσοστό της θνησιμότητας σε όλες τις επεμβάσεις ήταν 100%, εκτός από το μάρτυρα στον οποίο το ποσοστό θνησιμότητας είναι 0%. Όπως γίνεται κατανοητό από τις 7 ημέρες μετά από την εφαρμογή των λιπασμάτων και ύστερα, η λίπανση επηρέασε στατιστικά σημαντικά το ποσοστό της θνησιμότητας των ατόμων των γαιοσκωλήκων.

4.4 Ανταλλάξιμο ασβέστιο εδάφους (Ca)

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4 και το Διάγραμμα 2, το ανταλλάξιμο ασβέστιο του εδάφους έχει επηρεαστεί στατιστικά σημαντικά από της επεμβάσεις, και για τα δύο πειράματα. Επίσης φαίνεται ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα δύο πειράματα.

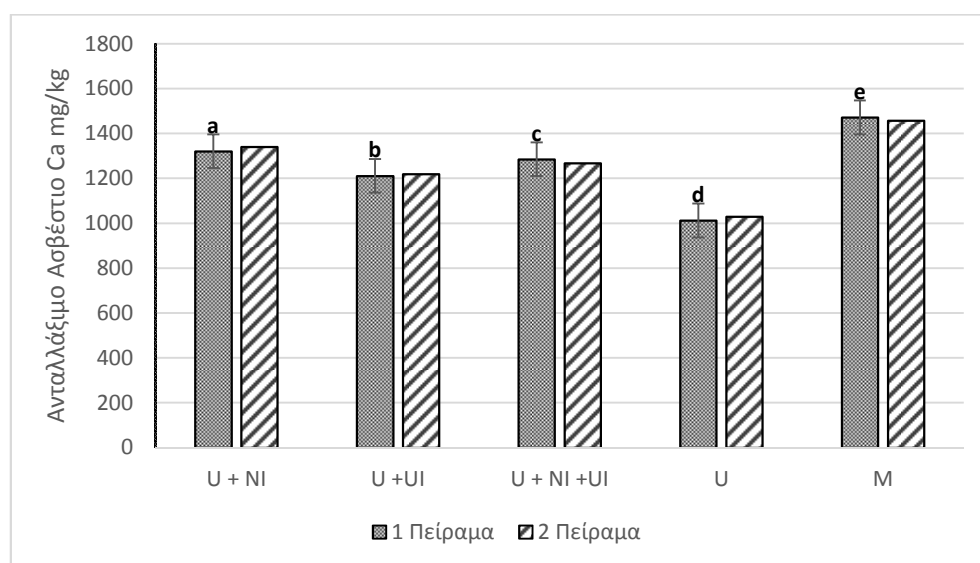
Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά το πρώτο πείραμα η μέγιστη τιμή 1472,0 mg/kg σημειώθηκε στο μάρτυρα ενώ η μικρότερη 1012,0 mg/kg στην επέμβαση της ουρίας. Επιπλέον, υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ όλων των επεμβάσεων, όπως και στο δεύτερο πείραμα. Στο δεύτερο πείραμα η μεγαλύτερη τιμή 1458,0 mg/kg, παρατηρείται επίσης στο μάρτυρα, ενώ η μικρότερη 1029,0 mg/kg στην ουρία.

Πίνακας 4.4.1 Περιεκτικότητα του εδάφους σε Ανταλλάξιμο Ασβέστιο (Ca). Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p=0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

1 ^ο Πείραμα	Ανταλλάξιμο Ασβέστιο (Ca) mg/kg
U + NI	1321,0 ^a
U + UI	1211,0 ^b
U + NI +UI	1285,0 ^c
U	1012,0 ^d
M	1472,0 ^e
2 ^ο Πείραμα	
U + NI	1340,0 ^a
U + UI	1219,0 ^b
U + NI +UI	1268,0 ^c

U	1029,0 ^d
M	1458,0 ^e
$F_{\text{λίπανση}}$	679,138 ^{***}
$F_{\text{πείραμα}}$	ns
$F_{\text{λίπανση x πείραμα}}$	ns

(‘ns’ όχι στατιστικά σημαντικό; *: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.05$; **: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.01$; ***: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.001$)



Διάγραμμα 4.4.1 Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη συγκέντρωση ανταλλάξιμου ασβεστίου στο έδαφος (‘ns’: όχι στατιστικά σημαντικό).

4.5 Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ)

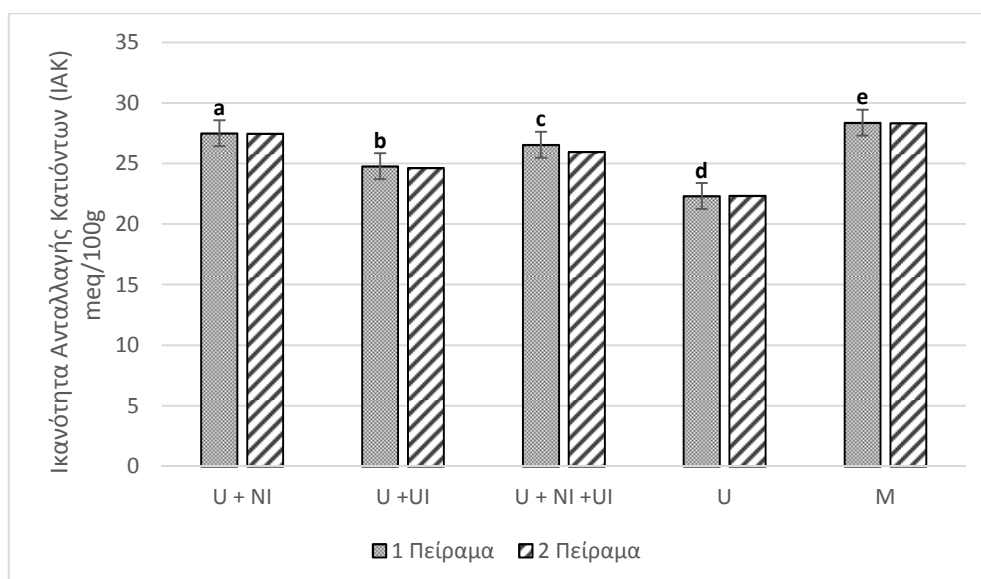
Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ) του εδάφους (Πίνακας 5, Διάγραμμα 3), παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το ανταλλάξιμο ασβέστιο. Σύμφωνα με τον Πίνακα 1, η λίπανση επηρεάζει σημαντικά την ΙΑΚ του εδάφους και στα δύο πειράματα, τα αποτελέσματα των οποίων δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Έτσι αναφορικά με το πρώτο πείραμα, οι τιμές της ΙΑΚ κυμαίνονται από 22,32 meq/100g έως 28,36 meq/100g, στην ουρία και στο μάρτυρα αντίστοιχα. Στατιστικά σημαντικές είναι οι διαφορές μεταξύ όλων των επεμβάσεων. Στο δεύτερο πείραμα, στο οποίο δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές με το πρώτο, οι τιμές κυμαίνονται από 22,34 meq/100g στην ουρία έως 28,34 meq/100g στο μάρτυρα.

Πίνακας 4.5.1 Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ) του εδάφους. Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p=0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

1 ^ο Πείραμα	Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ) meq 100g ⁻¹
U + NI	27,49 ^a
U + UI	24,77 ^b
U + NI +UI	26,55 ^c
U	22,32 ^d
M	28,36 ^e
2^ο Πείραμα	
U + NI	27,45 ^a
U + UI	24,64 ^b
U + NI +UI	25,96 ^c
U	22,34 ^d
M	28,34 ^e
<i>F</i> _{λίπανση}	113,20 ^{***}
<i>F</i> _{πείραμα}	ns
<i>F</i> _{λίπανση x πείραμα}	ns

(‘ns’ όχι στατιστικά σημαντικό; *: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.05$; **: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.01$; ***: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.001$)



Διάγραμμα 4.5.1. Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ) του εδάφους ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό).

4.6 Οξύτητα pH εδάφους

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6 και το Διάγραμμα 4, τα αποτελέσματα της οξύτητας του εδάφους δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο πειραμάτων. Ωστόσο και στα δύο πειράματα η φαίνεται ότι η λίπανση επηρεάζει στατιστικά σημαντικά την οξύτητα του εδάφους.

Πιο συγκεκριμένα και στα δύο πειράματα η μεγαλύτερη τιμή του pH παρατηρήθηκε στην επέμβαση της ουρίας με τον παρεμποδιστή ουρεάσης 7,43 και 7,41 για το πρώτο και το δεύτερο πείραμα αντίστοιχα, ενώ η ελάχιστη σημειώθηκε στο μάρτυρα 5,26 και 5,13 για το κάθε πείραμα αντίστοιχα. Όλες οι επεμβάσεις, παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, εκτός από την ουρία με τη διπλή παρεμπόδιση και την ουρία, μεταξύ των οποίων οι διαφορές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.

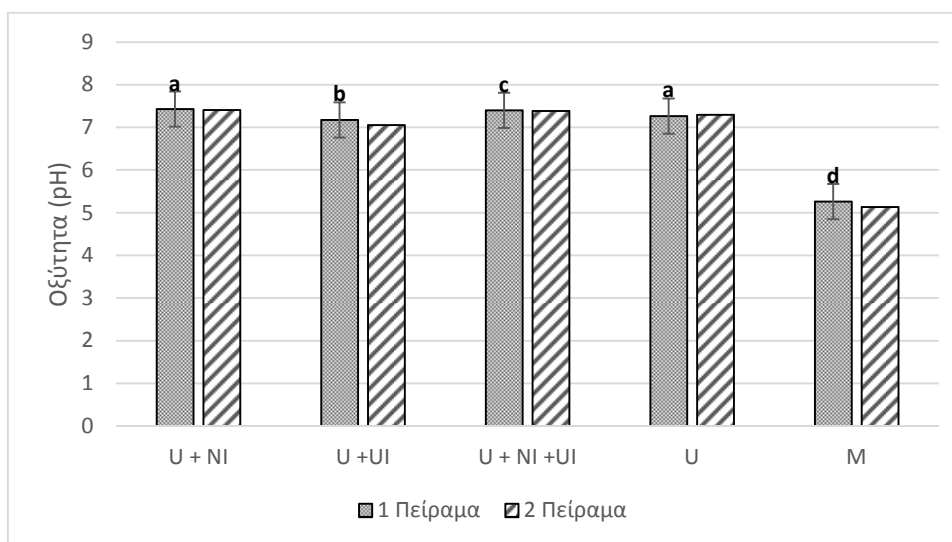
Επιπλέον, και στα δύο πειράματα παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά του pH αναμεσα στο μάρτυρα και τις υπόλοιπες επεμβάσεις, της τάξεως περίπου των δύο μονάδων, γεγονός που γίνεται καλύτερα κατανοητό στο Διάγραμμα 4.

Πίνακας 4.6.1 Οξύτητα, pH, του εδάφους. Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p= 0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

1° Πείραμα	Οξύτητα pH
U + NI	7,43 ^a
U + UI	7,17 ^b
U + NI +UI	7,40 ^c
U	7,27 ^a
M	5,26 ^d
2° Πείραμα	
U + NI	7,41 ^a
U + UI	7,05 ^b
U + NI +UI	7,38 ^c
U	7,30 ^a

M	5,13 ^d
$F_{\lambda\pi\alpha\nu\sigma\eta}$	142,726 ^{***}
$F_{\pi\epsilon\iota\rho\alpha\mu\alpha}$	ns
$F_{\lambda\pi\alpha\nu\sigma\eta \times \pi\epsilon\iota\rho\alpha\mu\alpha}$	ns

(‘ns’: όχι στατιστικά σημαντικό; *: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.05$; **: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.01$; ***: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.001$)



Διάγραμμα 4.6.1 Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στη οξύτητα pH του εδάφους του εδάφους (‘ns’: όχι στατιστικά σημαντικό).

4.7 Έκλυση Διοξειδίου του Άνθρακα (CO_2)

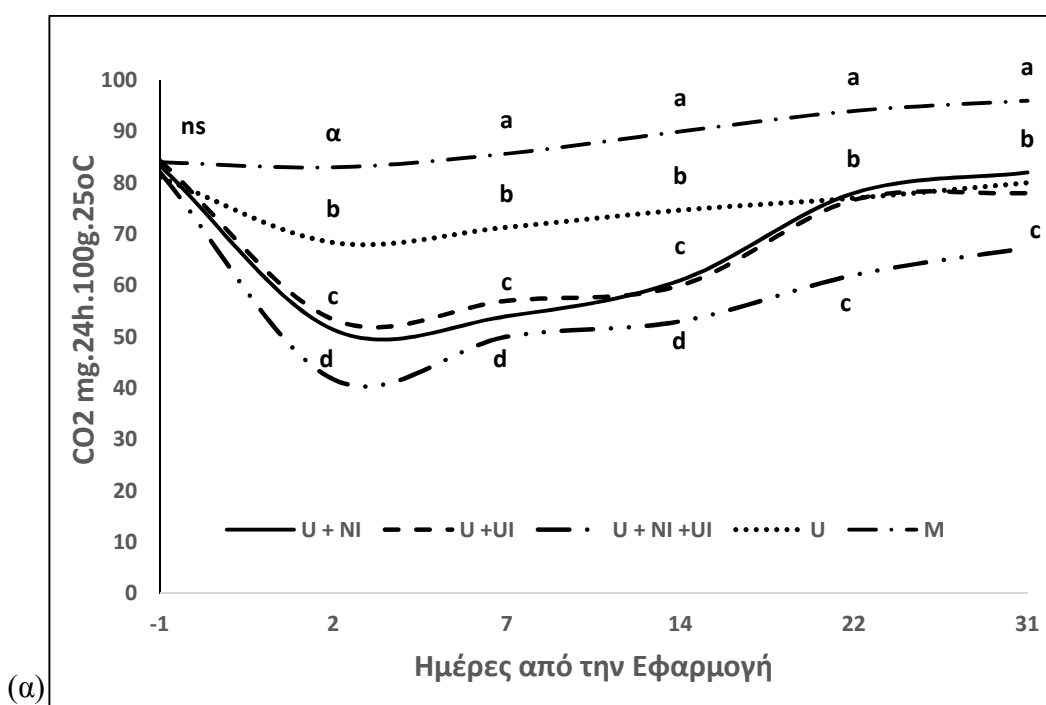
Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5, όσο αφορά το πείραμα 1, η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα δεν μεταβάλλεται σημαντικά στην επέμβαση του μάρτυρα, ωστόσο καθ’ όλη τη διάρκεια του πειράματος από την πρώτη μέρα από την επέμβαση φαίνεται να διαφέρει σημαντικά από όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Κατά τη 2^η μέρα από την επέμβαση, η μεγαλύτερη τιμή του διοξειδίου του άνθρακα παρατηρείται στον μάρτυρα, τον οποίο ακολουθούν η ουρία, η ουρία με παρεμποδιστή ουρέασης, η ουρία με παρεμποδιστή νιτροποίησης και τέλος η ουρία με τη διπλή παρεμπόδιση. Επιπλέον, φαίνεται ότι από την πρώτη ημέρα της επέμβασης οι τιμές παρουσιάζουν μία πτώση σχεδόν έως και την εβδομή.

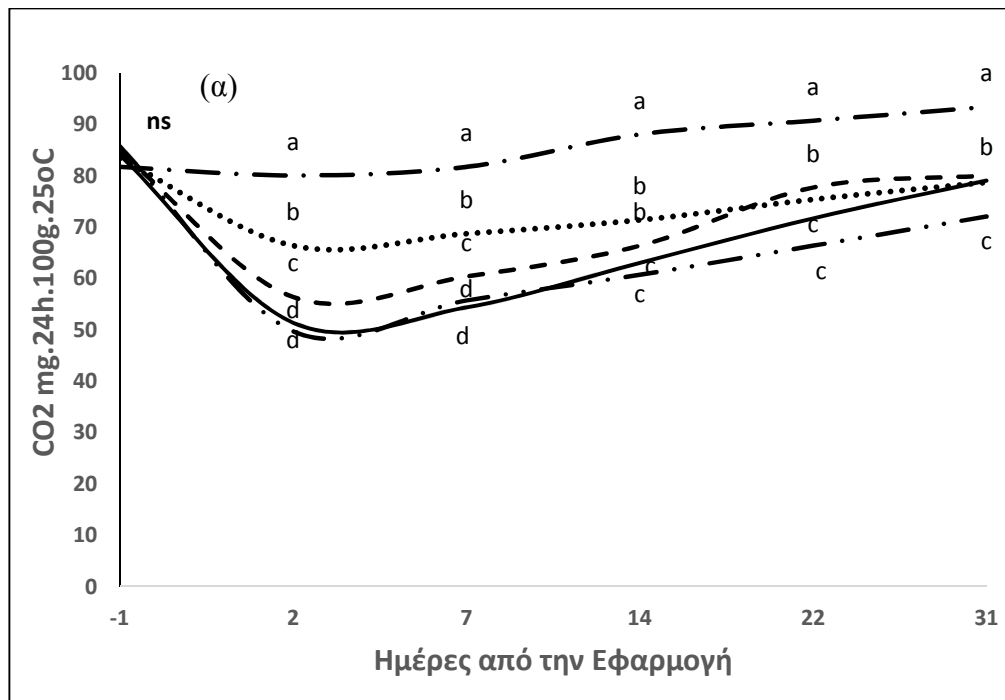
Στην 7^η λοιπόν ΗΑΕ καθώς και στην 14^η, δεν παρουσιάζονται διαφορές ως προς των κατάταξη των αποτελεσμάτων, η μέγιστη τιμή παρατηρείται στο μάρτυρα και η ελάχιστη την ουρία με το διπλό παρεμποδιστή. Όλες οι επεμβάσεις παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές

διαφορές μεταξύ τους εκτός από τις επεμβάσεις ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης και ουρίας με παρεμποδιστή ουρεάσης οι οποίες δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Ωστόσο σε όλες τις επεμβάσεις σημειώνεται μία στοιχειώδης αύξηση. Η ανοδική αυτή πορεία των τιμών συνεχίζεται έως και το πέρας του πειράματος.

Κατά την 22^η και την 31^η ΗΑΕ, η ανοδική πορεία εξακολουθεί να παρατηρείται, ενώ στατιστικά σημαντικές διαφορές σημειώνονται μεταξύ του μάρτυρα με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις όπως επίσης και της ουρίας με διπλή παρεμπόδιση με όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Ωστόσο οι διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων της ουρίας, της ουρίας με παρεμποδιστή νιτροποίησης καθώς και της ουρίας με παρεμποδιστή ουρεάσης δεν χαρακτηρίζονται στατιστικά σημαντικές.

Αναφορικά με το δεύτερο πείραμα η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα παρουσίασε παρόμοια πορεία στο χρόνο, σημειώνοντας αρχικά μία απότομη μείωση μέχρι την 7^η ΗΑΕ, κατά την οποία σηματοδοτήθηκε η αύξηση των τιμών. Η διαφορά αυτού με το πρώτο πείραμα έγκειται στο γεγονός ότι η διπλή παρεμπόδιση και η παρεμπόδιση νιτροποίησης δεν παρουσίασαν μεταξύ τους στατιστικά σημαντικές διαφορές κατά τις 2, 7, 14 και 22 ΗΑΕ.





(β) **Διάγραμμα 4.7.1.** Μεταβολή έλκυσης διοξειδίου του άνθρακα του εδάφους (εξαιτίας των επεμβάσεων) σε διαφορετικές ΗΑΕ, (α) και (β) για το πρώτο και το δεύτερο πείραμα αντίστοιχα ('ns': όχι στατιστικά σημαντικό).

4.8 Ποσοστό Οργανικής Ουσίας Εδάφους

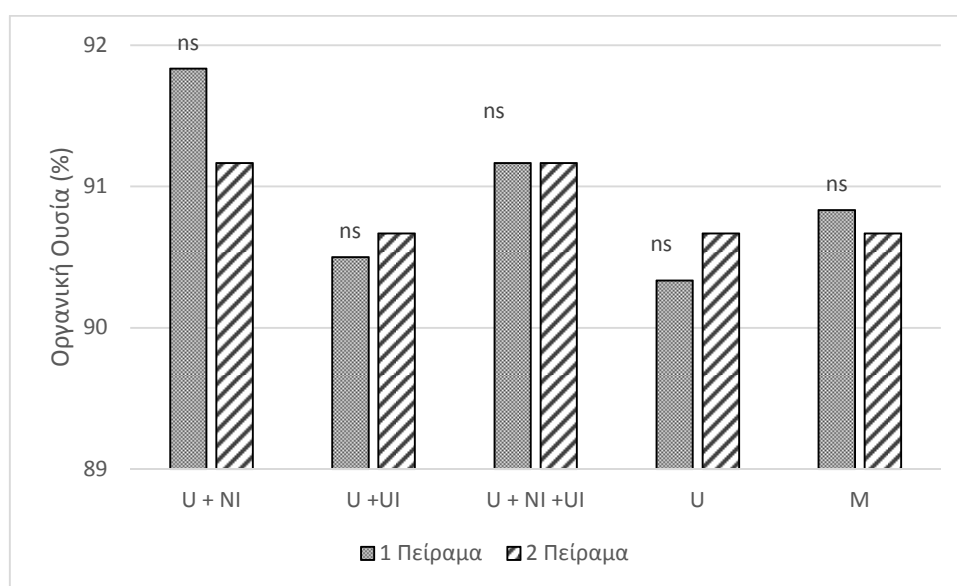
Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6, οι μεγαλύτερες τιμές οργανικής ουσίας 91,83% κατά το πρώτο πείραμα και 91,17% κατά το δεύτερο σημειώθηκαν αντίστοιχα στην επέμβαση της ουρίας με παρεμποδιστή ουρεάσης, καθώς επίσης και 91,17% και για τα δύο πειράματα στην επέμβαση της ουρίας με διπλό παρεμποδιστή, ουρεάσης και νιτροποίησης. Ωστόσο οι μικρότερες τιμές σημειώθηκαν στην επέμβαση της ουρίας 90,33% κατά το πρώτο και 90,67 κατά το δεύτερο πείραμα. Τόσο οι διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων όσο και μεταξύ των πειραμάτων δεν κρίνονται στατιστικά σημαντικές.

Πίνακας 4.8.1 Ποσοστό οργανικής ουσίας του εδάφους. Οι μέσοι σε κάθε στήλη που συμβολίζονται από διαφορετικά γράμματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας ($p=0,005$), σύμφωνα με το LSD τεστ.

1 ^ο Πείραμα	Οξύτητα pH (%)
U + NI	91,83
U + UI	90,50

U + NI +UI	91,17
U	90,33
M	90,83
2^ο Πείραμα	
U + NI	91,17
U + UI	90,67
U + NI +UI	91,17
U	90,67
M	90,67
$F_{\lambda\iota\pi\alpha\nu\sigma\eta}$	<i>ns</i>
$F_{\pi\epsilon\iota\rho\alpha\mu\alpha}$	<i>ns</i>
$F_{\lambda\iota\pi\alpha\nu\sigma\eta \times \pi\epsilon\iota\rho\alpha\mu\alpha}$	<i>ns</i>

(‘ns’όχι στατιστικά σημαντικό; *: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.05$; **: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.01$;***: στατιστικά σημαντικό σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.001$)



Διάγραμμα 4.8.1 Επίδραση των διαφορετικών επεμβάσεων στο ποσοστό οργανικής ουσίας του εδάφους (‘ns’: όχι στατιστικά σημαντικό).

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο ρυθμός μεταβολής του βάρους των γαιοσκωλήκων αποτελεί δείκτη οικο-τοξικότητας της ουρίας (Xiao et al., 2004). Στην παρούσα μελέτη το μέσο βάρος των γαιοσκωλήκων σημείωσε σημαντική μείωση σε όλες τις επεμβάσεις εκτός από το μάρτυρα, εκεί όπου παρατηρήθηκε η μικρότερη μεταβολή σε συνάρτηση με το χρόνο.

Η μεγαλύτερη μεταβολή βάρους παρατηρήθηκε στην επέμβαση της ουρίας καθώς και της ουρίας με την προσθήκη του παρεμποδιστή νιτροποίησης. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν στο παρελθόν σε διάφορες έρευνες στις οποίες η χρήση αμμωνιακών λιπασμάτων, οδήγησε σε μείωση του βάρους των γαιοσκωλήκων (Ma et al., 1990; Edwards & Lofty 1982). Επιπλέον σε παρόμοιες μελέτες παρατηρήθηκε μείωση του βάρους εξαιτίας της προσθήκης διάφορων αγρο-χημικών και τοξικών ουσιών όπως τα ζιζανιοκτόνα και το αλουμίνιο (Travlos et al., 2015; Bilalis et al., 2013).

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η ουρία με παρεμποδιστή ουρεάσης και με διπλό παρεμποδιστή μέχρι και την 14^η ημέρα από την επέμβαση έχουν παρόμοια αποτελέσματα με το μάρτυρα. Ωστόσο την 22^η ΗΑΕ ακολουθούν την πορεία της ουρίας, εξαιτίας της εξασθένησης της δράσης του παρεμποδιστή ουρεάσης. Τέλος, την 24^η ΗΑΕ φαίνεται να έπαψε η δράση του παρεμποδιστή ουρεάσης.

Γενικά αναφέρεται ότι η μείωση του πληθυσμού των γαιοσκωλήκων είναι συνυφασμένη με την εφαρμογή χημικών λιπασμάτων (Yang et al., 2007; Xiang et al., 2006). Στην παρούσα μελέτη, μέχρι και την 5^η ΗΑΕ, το ποσοστό θνησιμότητας ήταν 0% και στα δύο πειράματα. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ευαισθησία των γαιοσκωλήκων στην αμμωνία, αφού με την εξασθένηση του παρεμποδιστή ουρεάσης, σημειώνονται αρνητικές επιπτώσεις στον πληθυσμό των γαιοσκωλήκων όπως και στο βάρος. Η αμμωνία θεωρείται ουσία καταστροφική για την επιβίωση και τη δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων (Zisi et al. 2020).

Τα κοπρολύματα (casts) των γαιοσκωλήκων μέχρι και τη μέτρηση της 22^{ης} ΗΑΕ δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων. Οι μεγαλύτερες τιμές casts σημειώνονται στις επεμβάσεις της ουρίας με τη διπλή παρεμπόδιση. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.1, τα περιττώματα των γαιοσκωλήκων είναι αρνητικά συσχετισμένα με τη μείωση του βάρους τους ($r=-0,84$, $p<0,001$).

Το ανταλλάξιμο ασβέστιο του εδάφους, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, επηρεάζεται στατιστικά σημαντικά από τη λίπανση. Όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή, τα περιττώματα των κοπρολυμάτων περιέχουν σημαντική ποσότητα ασβεστίου, λόγω της ύπαρξης του ασβεστούχου αδένου στον οισοφάγο τους (Drake et al., 2007). Έτσι, η υψηλότερη τιμή ασβεστίου σημειώθηκε στο μάρτυρα και στα δύο πειράματα εκεί όπου σημειώθηκε το μικρότερο ποσοστό θνησιμότητας καθώς και η μεγαλύτερη διάρκεια δραστηριότητας των γαιοσκωλήκων. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συμφωνούν με αποτελέσματα άλλων μελετών που αφορούν τους γαιοσκώληκες (Bilalis et al., 2013). Όπως είναι φανερό στο Διάγραμμα 5.1, η μείωση του μέσου βάρους των γαιοσκωλήκων είναι αρνητικά συσχετισμένη με την περιεκτικότητα του εδάφους σε ανταλλάξιμο ασβέστιο ($r=-0,596, p<0,01$).

Ο παρεμποδιστής ουρεάσης εμποδίζει την υδρόλυση της ουρίας, που οφείλεται στα ένζυμα ουρεάσης, με αποτέλεσμα να καθυστερεί την αποικοδόμηση της αμμωνίας και της έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), για περίπου 12-20 HAE (Zisi et al., 2020). Επιπλέον, σύμφωνα με τους Jumadi et al. (2019), η μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος, οδηγεί σε παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα. Η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων στο έδαφος οδηγεί σε αύξηση του μικροβιακού φορτίου στο έδαφος και συνεπώς σε αύξηση της έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα (Caravaca et al., 2005; Chapuis-Lardy et al., 2010; Speratti & Whalen 2008).

Από την άλλη, τα χημικά λιπάσματα λειτουργούν καταστροφικά ως προς το μεγαλύτερο ποσοστό των εδαφικών οργανισμών, μεταξύ των οποίων είναι και οι μικροβιακοί οργανισμοί. Έτσι στο παρόν πείραμα, εκτός του μάρτυρα, όλες οι επεμβάσεις οδήγησαν σε μείωση της έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα που τη διαδέχτηκε αύξηση, γεγονός που αποτελεί συνέπεια κάποιας από τις διαφορετικές διαδικασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω (ύπαρξη ή απουσία μικροβιακής δραστηριότητας, υδρόλυση).

Η μείωση της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ) σχετίζεται με την εφαρμογή αμμωνιακών λιπασμάτων (Barak 2000). Στην παρούσα μελέτη η ΙΑΚ επηρεάστηκε σημαντικά από την λίπανση, σημειώνοντας τη μεγαλύτερη τιμή της στο μάρτυρα και έπειτα στην ουρία με παρεμποδιστή ουρεάσης και στα δύο πειράματα. Επίσης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.1, παρατηρήθηκε αρνητική συσχέτιση με τη μείωση του βάρους των γαιοσκωλήκων ($r=-0,438, p<0,05$).

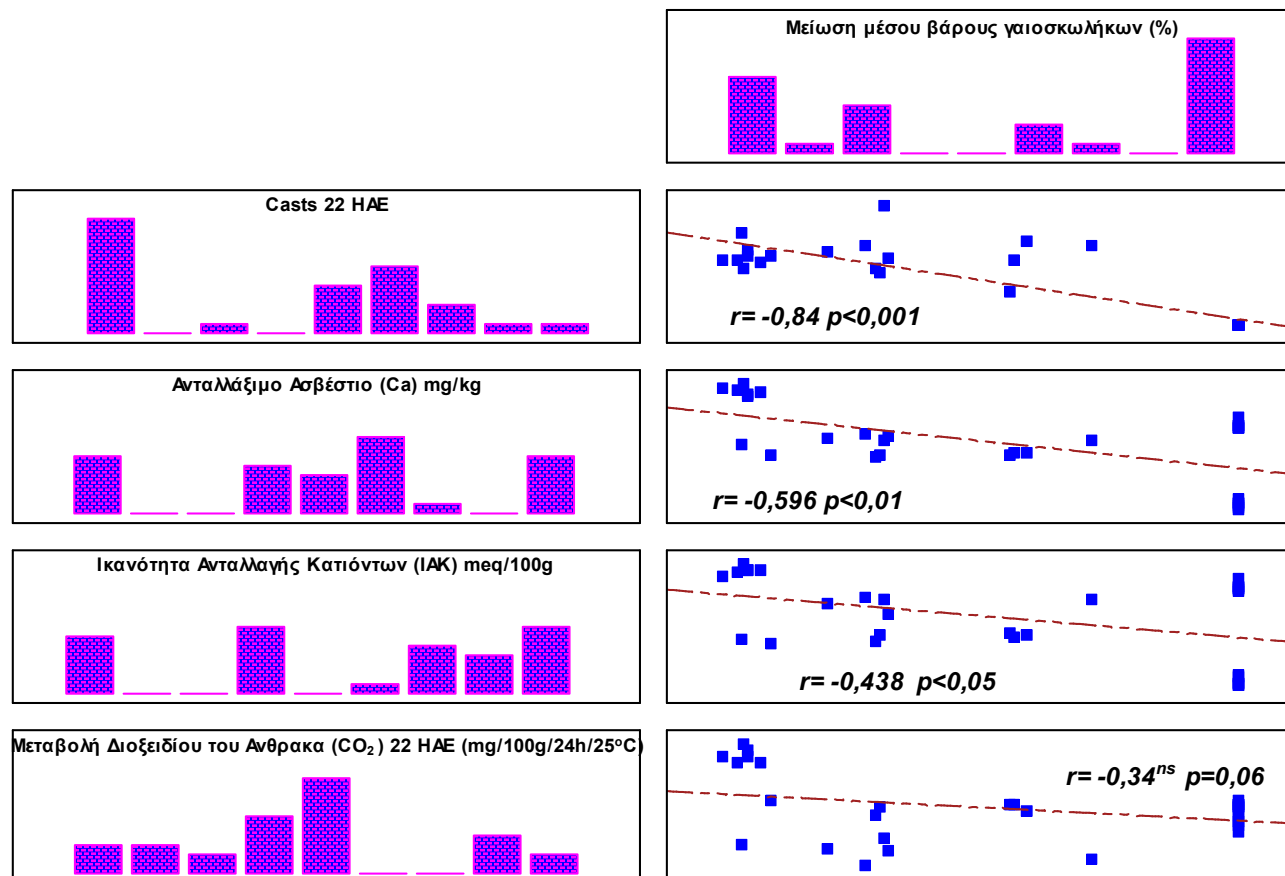
Επιπρόσθετα, η λίπανση φαίνεται ότι επηρεάζει στατιστικά σημαντικά και την οξύτητα (pH) του εδάφους, η οποία δεν σημείωσε σημαντικές διαφορές μεταξύ των πειραμάτων. Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση του pH σε όλες τις επεμβάσεις εκτός του μάρτυρα, στον οποίο

σημειώθηκε σημαντική μείωση. Το pH στο έδαφος όπου δεν δέχθηκε προσθήκη λιπάσματος ήταν σχεδόν δύο μονάδες πιο όξινο από το pH των υπόλοιπων επεμβάσεων. Σύμφωνα με τους Havlin et al. (2005), η υδρόλυση της ουρίας, προκαλεί προσωρινή αύξηση του pH, γεγονός που ευνοεί την εξαέρωσή της.

Τέλος αναφορικά με την οργανική ουσία του εδάφους, δεν φαίνεται να επηρεάστηκε σημαντικά από τη λίπανση. Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύρφη, πλούσια σε οργανική ουσία. Επίσης το εκάστοτε πείραμα διήρκησε 24 ημέρες με συνέπεια να υπάρχει η δυνατότητα μακροχρόνιας δραστηριοποίησης των γαιοσκωλήκων ώστε να σημειωθούν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων.

Ωστόσο στην ουρία, όπου παρατηρήθηκε θνησιμότητα νωρίτερα από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, ως συνέπεια της συντομότερης δραστηριότητας των γαιοσκωλήκων, ήταν η επανάληψη στην οποία σημειώθηκαν οι χαμηλότερες τιμές οργανικής ουσίας του εδάφους. Γενικά, η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων οδηγεί σε αύξηση της οργανικής ουσίας του εδάφους, κυρίως μέσω της εναπόθεσης των κοπρολυμάτων, τα οποία είναι πλούσια σε οργανική ουσία, στο εδαφικό περιβάλλον στο οποίο δραστηριοποιούνται (Guggenberger et al., 1996).

Συσχετίσεις



Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα Συσχετίσεων μεταξύ της μείωσης του βάρους των γαιοσκωλήκων και των casts, του Ανταλλάξιμου Ασβεστίου, της Ικανότητας Ανταλλαγής Κατιόντων και της Μεταβολής του διοξειδίου του άνθρακα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η ανάγκη προστασίας των γαιοσκωλήκων, γίνεται κατανοητή αν σκεφτεί κάποιος, την προσφορά τους στην ανθρωπότητα μέσω της βελτίωσης των εδαφικών παραμέτρων και συνεπώς τις ευεργετικές επιδράσεις τους στη γεωργία. Ωστόσο όπως οι περισσότεροι οργανισμοί του εδάφους παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία μεταξύ άλλων στα αζωτούχα λιπάσματα.

Τα νέου τύπου λιπάσματα, με παρεμποδιστές αζώτου (νιτροποίησης, ουρεάσης καθώς και ο συνδυασμός τους) είναι λιπάσματα τα οποία παρουσιάζουν αύξηση των δεικτών αποδοτικότητας του αζώτου σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει σε διάφορες καλλιέργειες. Η παρούσα μελέτη σχεδιάστηκε με σκοπό να μελετηθεί η επίδρασή τους σε οργανισμούς του

εδάφους, επιλέγοντας τους γαιοσκώληκες, εξαιτίας της σημασίας τους για το έδαφος και της ιδιότητάς τους ως βιοδείκτες.

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, οι πιο θετικές επιδράσεις στην επιβίωση καθώς και τη δραστηριότητα του γαιοσκώληκα *Octodrilus complanatus*, σημειώθηκαν στις επεμβάσεις της ουρίας με την προσθήκη του παρεμποδιστή ουρεάσης καθώς και σε αυτή με την προσθήκη του διπλού παρεμποδιστή. Από την άλλη η σκέτη ουρία είχε τις πιο αρνητικές επιδράσεις στα άτομα των γαιοσκωλήκων.

Ωστόσο η μελέτη αυτή αποτελεί την αρχή της ερευνάς της επίδρασης των λιπασμάτων νέου τύπου (παρεμποδιστών) σε οργανισμούς του εδάφους, αφού η μέχρι τώρα έρευνα αφορά τις επιδράσεις τους στα φυτά καθώς και την απόδοση αυτών.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ

Akiyama H., Yan X., Yagi K. (2009). *Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: metaanalysis.* Global Change Biology, 16:1837–1846. Doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02031.x.

Alonso-Ayuso M., Gabriel J.L., Quemada M. (2016). *Nitrogen use efficiency and residual effect of fertilizers with nitrification inhibitors.* European Journal of Agronomy, 80:1–8. doi:10.1016/j.eja.2016.06.008.

Barak P. (2000). *Long-term effects of nitrogen fertilizers on soil acidity.* In: Fertilizer agronomy and pest management. Conference proceedings. Wisconsin. 223–229.

- Bardgett R., Bowman W., Kaufmann R., Schmidt S.** (2005). *A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology*. Trends in Ecology and Evolution, 20(11):634–641. doi:10.1016/j.tree.2005.08.005.
- Bhat S., Singh A., Singh S., Kumar J., Bhawana S., Vig A.P.** (2018). *Bioremediation and detoxification of industrial wastes by earthworms: Vermicompost as powerful crop nutrient in sustainable agriculture*. Bioresource Technology, 252:172–179. doi:10.1016/j.biortech.2018.01.003.
- Bilalis D., Sidiras N., Vavoulidou E., Konstantas A.** (2009). *Earthworm populations as affected by crop practices on clay loam soil in a Mediterranean climate*. Acta Agriculturae Scandinavica Section B, Soil and Plant Science, 59(5):440-446, DOI:10.1080/09064710802342327.
- Bilalis D., Tzortzi I., Vavoulidou E., Karkanis A., Emmanouel N., Efthimiadou A., Katsenios N., Patsiali S., Dellaporta L.** (2013). *Effects of aluminum and moisture levels on aluminum bioaccumulation and protein content in the earthworm Octodrilus complanatus*. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 13: 845–854. Doi:10.4067/S0718-95162013005000067.
- Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Brun J.J.** (2013). *A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services*. European Journal of Soil Science, 64(2):161–182. doi:10.1111/ejss.12025.
- Bouwman A.F., Van Vuuren D.P., Derwent R.G., Posch,M.** (2002). *Water, Air, and Soil Pollution*, 141(1/4):349–382. doi:10.1023/a:1021398008726.
- Bowden R.D., Davidson E., Savage K., Arabia C., Steudler P.** (2004). *Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest*. Forest Ecology and Management, 196: 43-56. Doi: 10.1016/j.foreco.2004.03.011.
- Brady N.C.** (1974). *The Nature and Properties of soils*. Macmillan Co., New York, 639.
- Brown G.G., Edwards C.A., Brussaard L.** (2004). *How earthworms affect plant growth: burrowing into the mechanisms*. In: Earthworm Ecology (ed C.A. Edwards), pp. 13–49. CRC Press, Boca Raton, FL.

- Callahan C.A.** (1988). Earthworms as ecotoxicological assessment tools. In: Earthworms in Waste and Environmental Assessment; Edwards, C. A., Neuhauser, E. F., Eds.; SPB Academic Publishing: The Hague, pp 295–301.
- Caravaca F., Pera A., Masciandaro G., Ceccanti B., Roldán A.** (2005). *A microcosm approach to assessing the effects of earthworm in occultation and oat cover cropping on CO₂ fluxes and biological properties in an amended semiarid soil.* Chemosphere, 59:1625–1631.
- Chapman H.D.** (1965). *Cation- exchange capacity.* In: C.A. Black (ed.) Methods of soil analysis - Chemical and microbiological properties. Agronomy, 9: 891-901. Doi: 10.2134/agronmonogr9.2.c6.
- Chapuis L.L., Brauman A., Bernard L., Pablo A.L., Toucet J., Mano M.J., Weber L., Brunet D., Razafimbelo T., Chotte J.L., Blanchart E.** (2010). *Effect of the endogeic earthworm Pontoscolex corethrurus on the microbial structure and activity related to CO₂ and N₂O fluxes from a tropical soil (Madagascar).* Applied Soil Ecology, 45: 201–208. doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.04.006.
- Craine J.M., Morrow C., Fierer N.** (2007). *Microbial nitrogen limitation increases decomposition.* Ecology, 88: 2105-2113. Doi:10.1890/06-1847.1.
- Craswell E.T., Godwin D.C.** (1984). *The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals in different climates.* Advanced Plant Nutrition, 1:1–55.
- Curry J.P.** (2004). *Factors affecting the abundance of earthworms in soils.* Edwards, editor. Earthworm Ecology. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. Pages 91–113 in C. A.
- Darwin C.R.,** (1881). *The Formation of Vegetable Mold.* John Murray, London.
- Dawar K., Zaman M., Rowarth J.S., Blennerhassett J., Turnbull M.H.** (2011). *Urease inhibitor reduces N losses and improves plant-bioavailability of U applied in fine particle and granular forms under field conditions.* Agriculture, Ecosystems & Environment, 144:41–50. Doi:10.1016/j.agee.2011.08.007.
- Delgado J.A.** (2002). *Quantifying the loss mechanisms of nitrogen.* Journal of Soil and Water Conservation, 57(6):389–398.
- Delogu G., Cattivelli L., Pecchioni N., De Falcis D., Maggiore T., Stanca A.M.** (1998). *Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat.* European Journal of Agronomy, 9:11-20. Doi:10.1016/S1161-0301(98)00019-7.

- Di H.J., Cameron K.C.** (2007). *Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor—a lysimeter study*. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79:281–290. Doi:10.1007/s10705-007-9115-5.
- Dominguez J.** (2004). *State of the art and new perspectives on vermicomposting research*. In: Edwards CA (ed) *Earthworm ecology*, 2nd ed. CRC, Boca Raton, pp 401–424.
- Domínguez J., Aira M., Gómez-Brandón M.** (2009). *Vermicomposting: Earthworms Enhance the Work of Microbes*. *Microbes at Work*, 93–114. Doi:10.1007/978-3-642-04043-6_5.
- Doube B.M., Schmidt O.** (1997). *Can the abundance or activity of soil macrofauna be used to indicate the biological health of soils?* In: C. Pankhurst, B.M. Doube, V.V.S.R. Gupta (Eds.), *Biological Indicators of Soil Health*, pp. 265e295.
- Drake H.L., Horn M.A.** (2007). *As the worm turns: the earthworm gut as a transient habitat for soil microbial biomes*. *Annual Review of Microbiology*, 61:169-189. DOI: 10.1146/annurev.micro.61.080706.093139.
- Edwards C.A.** 2004. *The Importance of Earthworms as Key Representatives of the Soil Fauna*. Soil Ecology Laboratory, The Ohio State University, Columbus, Ohio, U.S.A.
- Edwards C.A., Bohlen P.J.** (1996). *The Effects of Toxic Chemicals on Earthworms*. *Department of Entomology. Ohio State University, Columbus, OH 43210. Springer-Verlag New York Inc.
- Edwards C.A., Lofty J.R.** (1982 b). *Nitrogenous fertilizers and earthworm populations in agricultural soils*. *Soil Biology Biochemistry*, 14:515-521. Doi:10.1016/0038-0717(82)90112-2.
- El-Duweini A.K., Ghabbour S. I.** (1965). *Population Density and Biomass of Earthworms in Different Types of Egyptian Soils*. *The Journal of Applied Ecology*, 2(2):271. Doi:10.2307/2401479.
- Engel R., Jones C., Wallander R.** (2011). *Ammonia Volatilization from U and Mitigation by NBPT following Surface Application to Cold Soils*. *Soil Science Society of America Journal*, 75(6):2348-2357. Doi:10.2136/sssaj2011.0229.
- Espinosa-Reyes G., Costilla-Salazar R., Pérez-Vázquez F.J., González-Mille D.J., Flores-Ramírez R., del Carmen Cuevas-Díaz M., Medellín-Garibay S.E., Ilizaliturri-**

- Hernández C.A.** (2019). *DNA damage in earthworms by exposure of Persistent Organic Pollutants in low basin of Coatzacoalcos River, Mexico*. *Science of the Total Environment*, 651:1236–1242. Doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.207.
- Fageria N.K., Baligar V.C.** (2005). *Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants*. *Advances in Agronomy*, 88:97– 185. Doi:10.1016/S0065-2113(05)88004-6.
- Feller C., Blanchart E., Bernoux M., Lal R., Manlay R.** (2012). *Soil fertility concepts over the past two centuries: the importance attributed to soil organic matter in developed and developing countries*. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(sup1):S3–S21. Doi:10.1080/03650340.2012.693598
- Firestone M.K., Davidson E.A.** (1989). *Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil*. In: Andea, M.O., Schimel, D.S. (Eds.), *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. Wiley, Chichester, pp. 7–21.
- Fusaro S., Gavinelli F., Lazzarini F., Paoletti M.G.** (2018). *Soil Biological Quality Index based on earthworms (QBS-e). A new way to use earthworms as bioindicators in agroecosystems*. *Ecological Indicators*, 93:1276–1292. Doi:10.1016/j.ecolind.2018.06.007.
- Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J.** (2003). *The nitrogen cascade*. *Bioscience*, 53:341–356. Doi:10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2.
- Glibert P.M., Harrison J., Heil C., Seitzinger S.** (2006). *Escalating worldwide use of U – a global change contributing to coastal Eutrophication*. *Biogeochemistry*, 77:441–463. Doi:10.1007/s10533-005-3070-5.
- Grant C.A.** (2004). *Potential Uses for Agrotain and PolymerCoated Products*. *Canada Soil Science Conference Proceedings*, 76–86.
- Guggenberger G., Thomas R.J., Zech W.** (1996). *Soil organic matter within earthworm casts of an anecic-endogeic tropical pasture community, Colombia*. *Applied Soil Ecology*, 3:263–274. Doi:10.1016/0929-1393(95)00081-X.
- Havlin J.L., Beaton J.D., Tisdale S.L., Nelson W.L.** (2005). *Soil Fertility and Fertilizers—An Introduction to Nutrient Management*. Pearson Education, Inc. New Jersey.
- Holt-White R.** (1901). *The life and Letters of Gilbert White of Selborne*. (Ed.) Holt-White, Vol. 1, John Murray, London.

- Huang K., Xia H., Zhang Y., Li J., Cui G., Li F., Bai W., Jiang Y., Wu N.** (2019). *Elimination of antibiotic resistance genes and human pathogenic bacteria by earthworms during vermicomposting of dewatered sludge by metagenomic analysis*. *Bioresource Technology*, 122451. Doi:10.1016/j.biortech.2019.122451.
- IFA International Fertilizer Association.** (2017). *Fertilizer outlook 2017–2021. IFA annual conference – 22–24 May 2017 Marrakech (Marocco)*. Paris: IFA International Fertilizer Association, Services PITaA;
- IPCC** (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- IPCC** (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Isermeyer H.** (1952). *Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden*. *Z. Pflanzenernaehr. Düngung Bodenkunde*, 56(1-3):26–38. Doi:10.1002/jpln.19520560107.
- Jones C., Brown B.D., Engel R., Horneck D., OlsonRutz K.** (2013). *Factors Affecting Nitrogen Fertilizer Volatilization*. *Montana State University Extension Publication EB0208*. Montana State University.
- Juma N., Paul E.** (1983). *Effect of a nitrification inhibitor on N immobilization and release of ¹⁵N from nonexchangeable ammonium and microbial biomass*. *Canadian Journal of Soil Science*, 63:167–175. Doi:10.4141/cjss83-018.
- Jumadi O., Pagoga S., Hala Y., Hiola F.St., Karim H., Kaseng E. S., Inubushi K.** (2019). *Production of N₂O, CO₂ gases and microbe responses in the soil amended with urea granulated zeolite*. *Journal of Physics. Conference Series* 1317 012085. Doi:10.1088/1742-6596/1317/1/012085.
- Kakabouki I.P., Hela D., Roussis I., Papastylianou P., Sestras A.F., Bilalis D.J.** (2018). *Influence of fertilization and soil tillage on nitrogen uptake and utilization efficiency of quinoa crop (Chenopodium quinoa Willd.)*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, (ahead), 0–0. Doi:10.4067/s0718-95162018005000901.
- Karydogianni S., Darawsheh M.K., Kakabouki I., Zisi Ch., Folina A.E., Roussis I., Tselia Z., Bilalis D.** (2020). *Effect of nitrogen fertilization, with and without inhibitors, on*

cotton growth and fiber quality. *Agronomy Research*, 18(2):432–449. Doi: 10.15159/AR.20.148.

Keshavarz Afshar R., Lin R., Mohammed Y.A., Chen C. (2018). *Agronomic effects of Use and nitrification inhibitors on ammonia volatilization and nitrogen utilization in a dryland farming system: Field and laboratory investigation*. *Journal of Cleaner Production*, 172:4130–4139. Doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.105.

Khalaf El-Duweini A., Ghabbour S.I. (1965). *Population density and biomass of earthworms in different types of Egyptian soils*. *Journal of Applied Ecology*, 2(2):271-287. DOI: 10.2307/2401479

Ladha J.K., Pathak H., Krupnik T.J., Six J., van Kessel C. (2005). *Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and Prospects*. *Advances in Agronomy*, 87:85–156. Doi:10.1016/S0065-2113(05)87003-8.

Langmaack M., Schrader S., Rapp-Bernhardt U., Kotzke K. (1999). *Quantitative analysis of earthworm burrow systems with respect to biological soil-structure regeneration after soil compaction*. *Biology and Fertility of Soils*, 28(3):219–229. Doi:10.1007/s003740050486.

Lavelle P., Spain A.V. (2001). *Soil Ecology*. Kluwer Academics Publishers, Dordrecht, Netherlands, 654 pp

Lee K.E. (1985). *Earthworms. Their Ecology and Relationships with Soils and Land Use*. Academic Press, Sydney Australia.

Lemtiri A., Colinet G., Alabi T., Cluzeau D., Zirbes L., Haubruge E., Francis F. (2014). *Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review*. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 18(1):121-133.

Li Q., Yang A., Wang Z., Roelcke M., Chen X., Zhang F., Pasda G., Zerulla W., Wissemeier A.H., Liu X. (2015). *Effect of a new Use inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China*. *Field Crops Research*, 175:96–105. Doi:10.1016/j.fcr.2015.02.005.

Li Y., Mingfang H., Tenuta M., Ma Z., Gui D., Li X., Zeng F., Gao X. (2020). *Agronomic evaluation of polymercoated U and Use and nitrification inhibitors for cotton production under drip-fertigation in a dry climate*. *Scientific Reports*, 10:1472. Doi:10.1038/s41598-020-57655-x.

- Lourenco J.I., Pereira R.O., Silva A.C., Morgado J.M., Carvalho F.P., Oliveira J.M., Malta M.P., Paiva A.A., Mendo S.A., Goncalves F.J.** (2011). *Genotoxic endpoints in the earthworms sub-lethal assay to evaluate natural soils contaminated by metals and radionuclides.* Journal of Hazardous Materials, 186(1):788–795. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.11.073.
- Lubbers I.M., van Groenigen K.J., Fonte S.J., Six J., Brussaard L., vanGroenigen J.W.** (2013). *Greenhouse gas emissions from soils increased by earthworms.* Nature Climate Change in press.
- Ma Q., Wu Z., Shen S., Zhou H., Jiang C., Xu Y., Liu R., Yu W.** (2015). *Responses of biotic and abiotic effects on conservation and supply of fertilizer N to inhibitors and glucose inputs.* Soil Biology & Biochemistry, 89:72–81. Doi:10.1016/j.soilbio.2015.06.024.
- Ma W.C., Brussaard L., Deridder J.A.** (1990). *Long-term effects of nitrogenous fertilizers on grassland earthworms (Oligochaeta :Lumbricidae): their relation to soil acidification.* Agriculture, Ecosystems & Environment, 30:71–80. Doi:10.1016/0167-8809(90)90184-F.
- Majumdar D., Kumar S., Pathak H., Jain M., Kumar U.** (2000). *Reducing nitrous oxide emission from an irrigated rice field of North India with nitrification inhibitors.* Agriculture, Ecosystems & Environment, 81(3):163–169. Doi:10.1016/S0167-8809(00)00156-0.
- Malla G., Bhatia A., Pathak H., Prasad S., Jain N., Singh J.** (2005). *Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the Indo-Gangetic plain with nitrification and Urease inhibitors.* Chemosphere, 58(2):141–147. Doi:10.1016/j.chemosphere.2004.09.003.
- Malzer G.L., Kelling K.A., Schmitt M.A., Hoeft R.G., Randall G.W.** (1989). *Performance of Dicyanodiamide in the North Central States.* Communications in Soil Science and Plant Analysis, 20:2001–2022. Doi:10.1080/00103628909368198.
- Manunza B., Deiana S., Pintore M., Gessa C.** (1999). *The Binding Mechanism of U, Hydroxamic Acid and N-(Nbutyl)-Phosphoric Triamide to the Use Active Site. A Comparative Molecular Dynamics Study.* Soil Biology and Biochemistry, 31:789–796. Doi:10.1016/S0038-0717(98)00155-2.

- McLean E.O.** (1982). *Soil pH and lime requirement. in: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 199–224.
- Mengel K., Kirkby E.A., Kosegarten H., Appel T.** (2001). *Nitrogen.* Principles of Plant Nutrition, 397–434. doi:10.1007/978-94-010-1009-2_7.
- Michalis K. & Panidis S.** (1993). *Seasonal variation in the reproductive activity of Octodrilus complanatus (Oligochaeta, Lumbricidae).* European Journal of Soil Biology, 29(3-4):161-166. ISSN 1164-5563.
- Monaghan R.M., de Klein C.A.M., Muirhead R.W.** (2008). *Prioritisation of farm scale remediation efforts for reducing losses of nutrients and faecal indicator organisms to waterways: A case study of New Zealand dairy farming.* Journal of Environmental Management, 87:609–622. Doi:10.1016/j.jenvman.2006.07.017.
- Monroy F., Aira M., Gago J. Á., Domínguez J.** (2007). Life cycle of the earthworm *Octodrilus complanatus* (Oligochaeta, Lumbricidae). Comptes Rendus Biologies, 330(5):389–391. Doi:10.1016/j.crv.2007.03.016.
- Montemurro F., Diacono M.** (2016). *Towards a Better Understanding of Agronomic Efficiency of Nitrogen: Assessment and Improvement Strategies.* Agronomy, 6(2):31. Doi:10.3390/agronomy6020031.
- Myers S.S., Zanobetti A., Kloog I., Huybers P., Leakey A.D.B., Bloom A.J., Carlisle E., Dietterich L.H., Fitzgerald G., Hasegawa T., Holbrook N.M., Nelson R.L., Ottman M.J., Raboy V., Sakai H., Sartor K.A., Schwartz J., Seneweera S., Tausz M., Usui Y.** (2014). *Increasing CO₂ threatens human nutrition.* Nature, 510:139–142.
- Myhre G., Shindell D., Bréon F.M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H.** (2013). *Anthropogenic and natural radiative forcing.* In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 659–740. Doi:10.1038/nature13179.
- Newman E.I.** (1966). *A method of estimating total length of root in a sample.* Journal of Applied Ecology, 3(1):139-145. DOI: 10.2307/2401670.

- Nyle C.B., Ray R. W.** (2011). *The Nature and Properties of SOILS*. (14th Ed) ed. Embryo, ISBN:978-960-8002-62-3.
- Parle J.N.** (1963). *Microorganisms in the intestines of earthworms*. Journal of General Microbiology. 33:1-11.
- Pavliček T., Csuzdi C.** (2006). *Species richness and zoogeographic affinities of earthworms in Cyprus*. European Journal of Soil Biology, 42:S111-S116. Doi:10.1016/j.ejsobi.2006.09.001.
- Quemada M., Baranski M., Nobel-de Lange M.N.J., Vallejo A., Cooper J.M.** (2013). *Meta-analysis of strategies to N nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 174:1–10. Doi:10.1016/j.agee.2013.04.018.
- Ramirez K.S., Craine J.M., Fierer N.** (2012). *Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes*. Global Change Biology, 18:1918-1927. Doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02639.x.
- Reinecke A.J., Reinecke S.A.** (2004). *Earthworms as test organisms in ecotoxicological assessment of toxicant impacts on ecosystems*. In: Edwards C.A. (ed.): Earthworm Ecology. CRC Press, Boca Raton, 299–320.
- Sanchez-Hernandez J.C., Dominguez J.** (2019). *Dual Role of Vermicomposting in Relation to Environmental Pollution*. Bioremediation of Agricultural Soils. CRC Press. pp. 217
- Sanz-Cobena A., Misselbrook T.H., Arce A., Mingot J.I., Diez J.A., Vallejo A.** (2008). *An inhibitor of Urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with Urea under Mediterranean conditions*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 126(3-4):243–249. Doi:10.1016/j.agee.2008.02.001.
- Sawyer J.E.** (1985). *Nitrification of Ammonium Nitrogen as Affected by Time of Application, Location, Temperature, and Nitrification Inhibitors*. M.S. Thesis. University of Illinois, Urbana.
- Scheu S.** (2003). *Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives*. Pedobiologia, 47(5-6):846–856. Doi:10.1078/0031-4056-00270.
- Scott Russell R.** (1977). *Plant Root Systems: Their Function and Interaction with the Soil*. McGraw-Hill Book Co., London, 298p.

- Sinclair T.R., de Wit C.T.** (1975). *Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops*. *Science*, 18:565-567. DOI:10.1126/science.189.4202.565.
- Soares J.R., Cantarella H., Menegale M.L.C.** (2012). *Ammonia volatilization losses from surface-applied U with Urease and nitrification inhibitors*. *Soil Biology and Biochemistry*, 52:82–89. Doi:10.1016/j.soilbio.2012.04.019.
- Speratti A.B., Whalen J.K.** (2008). *Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from soil as influenced by anecic and endogeic earthworms*. *Applied Soil Ecology*, 38:27–33. Doi:10.1016/j.apsoil.2007.08.009.
- Srinithi M., Brian R.** (2010). *Effect of earthworms on nutrients dynamics in soil and growth of crop*. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 14:39–44.
- Steffen W., Richardson K., Rockstrom J., Cornell S. E., Fetzer I., Bennett E.M., Biggs R., Carpenter, S.R., de Vries W., de Wit C.A., Folke C., Gerten D., Heinke J., Mace G.M., Persson L.M., Ramanathan V., Reyers B., Sorlin S.** (2015). *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*. *Science*, 347(6223):1259855–1259855. Doi:10.1126/science.1259855.
- Sun H.J., Zhang H.L., Powlson D., Min J., Shi W.M.** (2015). *Rice production, nitrous oxide emission and ammonia volatilization as impacted by the nitrification inhibitor 2-chloro-6-(trichloromethyl)-pyridine*. *Field Crops Research*, 173:1–7. Doi:10.1016/j.fcr.2014.12.012.
- Syers J.K., Springett J.A.** (1984). *Earthworms and soil fertility*. *Biological Processes and Soil Fertility*, 93–104. Doi:10.1007/978-94-009-6101-2_8.
- Tao H., Rogers C.W.** (2019). *Nitrogen inhibitors: how do they work to reduce N losses?* research.wsulibs.wsu.edu Publications, Washington State University Extension (Tao & Rogers 2019)
- Travlos I., Gkotsi T., Roussis I., Kontopoulou C.K., Kakabouki I., Bilalis D.** (2017). *Effects of the herbicides benfluralin, metribuzin and propyzamide on the survival and weight of earthworms (Octodrilus complanatus)*. *Plant, Soil and Environment*, 63(3):117–124. Doi:10.17221/811/2016-PSE.
- Turner D. A., Edis R. B., Chen D., Freney J. R., Denmead O.T., Christie R.** (2010). *Determination and mitigation of ammonia loss from U applied to winter wheat with N-(n-*

butyl) thiophosphorictriamide. Agriculture, Ecosystems & Environment, 137(3-4):261–266. Doi:10.1016/j.agee.2010.02.011.

Van Groenigen J.W., Lubbers I.M., Vos H.M.J., Brown G.G., De Deyn G.B., van Groenigen K.J. (2014). *Earthworms increase plant production: a meta-analysis*. Scientific Reports, 4(1). Doi:10.1038/srep06365.

Vavoulidou E., Dellaporta L., Bilalis D.J. (2010). *Collagen distribution in the tissue of the earthworm *Octodrilus complanatus** Zoology in the Middle East. *Advances of the 4th International Oligochaeta Taxonomy Meeting Zoology in the Middle East*. Supplementum Epigraphicum Graecum, 2:175–180. Doi:10.1080/09397140.2010.10638471.

Wakley A., Black I.A. (1934). *An examination of the Destyareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Science, 37(1):29–38.

Wang X.F., Zhang L., Zou J.W., Liu S.W. (2015). *Optimizing net greenhouse gas balance of a bioenergy cropping system in southeast China with Use and nitrification inhibitors*. Ecological engineering, 83:191–198. Doi:10.1016/j.ecoleng.2015.05.047.

Xiang C., Zhang P., Pan G. (2006). *Changes in diversity, protein content, and amino acid composition of earthworms from a paddy soil under different long-term fertilizations in the Tai Lake Region*. Acta Ecologica Sinica, 26:1667–1673. Doi:10.1016/S1872-2032(06)60030-9.

Xiao H., Zhou Q.X., Liang J.D. (2004). *Single and joint effects of acetochlor and U on earthworm *Esisenia foelide* populations in phaeozem*. Environmental Geochemistry and Health, 26:277–283. Doi:10.1023/B:EGAH.0000039591.36259.a1.

Yeates G., (2020). *Earthworms - Earthworms in New Zealand*. Te Ara - the Encyclopedia of New Zealand, <http://www.TeAra.govt.nz/en/diagram/15491/earthworm-life-cycle>

Zhang X., Davidson E.A., Mauzerall D.L., Searchinger T.D., Dumas P., Shen Y. (2015). *Managing nitrogen for sustainable development*. Nature, 528:51–59. Doi:10.1038/nature15743.

Zisi Ch., Karydogianni S., Kakabouki I., Stavropoulos P., Folina A.E., Bilalis D. (2020) *Effects of nitrogen fertilizers with two different inhibitors (urease and nitrification) on the survival and activity of earthworms (*Octodrilus complanatus*)*. Journal of Elementology, Doi:10.5601/jelem.2020.25.2.2008.

Ελληνική Βιβλιογραφία:

Τζώρτζη, Ιωάννα – Ευγενία, (2010). *Επίδραση 4 συγκεντρώσεων αργιλίου στο έδαφος πάνω στη βιοσυσσώρευση σε γαιοσκώληκες του γένους Octodrilus*. Μεταπτυχιακή διατριβή.

Ιστοσελίδες:

- ❖ <https://www.brighthubeducation.com/science-homework-help/116047-the-life-cycle-of-an-earthworm/>
- ❖ www.biodiversidadvirtual.org
- ❖ <https://cropwatch.unl.edu/2019/nitrogen-inhibitors-improved-fertilizer-use-efficiency>