

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
& ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



Εργαστήριο Εδαφολογίας
& Γεωργικής Χημείας

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ
ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΤΟΥ ΒΟΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ
ΕΛΑΦΟΣ ΣΕ ΦΥΤΑ ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ (*Lactuca sativa* L.)**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια
Δρ. Κωνσταντίνα Χαϊντούτη

Αναστάσιος Π. Πετρίδης

Αθήνα 2011

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ
ΑΖΩΤΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΤΟΥ ΒΟΡΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ
ΕΛΑΦΟΣ ΣΕ ΦΥΤΑ ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ (*Lactuca sativa* L.)**

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια
Δρ. Κωνσταντίνα Χαϊντούτη

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:
Κωνσταντίνα Χαϊντούτη (Εισηγήτρια)
Κωνσταντίνος Κοσμάς (Μέλος)
Ιωάννης Μάσσας (Μέλος)

Αναστάσιος Π. Πετρίδης

Αθήνα 2011

Περίληψη

Πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα λίπανσης σε διάταξη πλήρως τυχαιοποιημένων ομάδων, σε δοχεία ανάπτυξης φυτών και υπό συνθήκες θερμοκηπίου. Ως φυτό δοκιμής χρησιμοποιήθηκε το μαρούλι (*Lactuca sativa* L.). Τα φυτά αναπτύχθηκαν σε ένα ασβεστολιθικό αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος με διαφορετικές δόσεις αζωτούχου και βορίουχου λίπανσης, με σκοπό τη διερεύνηση της εφαρμογής τους καθώς και της αλληλεπίδρασής τους στην συσσώρευσή των δύο στοιχείων στα φύλλα και τις ρίζες του μαρουλιού. Οι μεταχειρίσεις αποτελούνταν από τέσσερα επίπεδα N (0, 200, 400 και 600 mg N kg⁻¹ εδάφους) και δύο επίπεδα B (0 και 5 mg B kg⁻¹ εδάφους). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του N έως και 600 mg kg⁻¹ αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση του NO₃-N και του K στο έδαφος, αλλά δεν είχε καμία επίδραση στη συγκέντρωση του διαθέσιμου P και του B. Με την εφαρμογή 5 mg B kg⁻¹ μειώθηκε σημαντικά η συγκέντρωση του διαθέσιμου K ενώ αυξήθηκε η συγκέντρωση του διαθέσιμου P στο έδαφος. Η εφαρμογή του N αύξησε τη συγκέντρωση του στοιχείου στα φύλλα και τις ρίζες των φυτών ενώ επέδρασε αρνητικά στη συγκέντρωση του P και του K στα φύλλα. Με την αύξηση της συγκέντρωσης του N στο έδαφος, η συγκέντρωση του B στα φύλλα μειώθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις. Ωστόσο η προσθήκη B δεν είχε καμία επίδραση στη συγκέντρωση του N, του P και του K στα φύλλα. Στις ρίζες η συγκέντρωση του B επηρεάστηκε από τις μεταχειρίσεις N και μειώθηκε σημαντικά στη μεταχείριση 600 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹ εδάφους. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η αζωτούχος λίπανση είναι δυνατόν να οδηγήσει στην πρόληψη της τοξικότητας B και να διατηρήσει τη συγκέντρωση του B στα φύλλα του μαρουλιού σε φυσιολογικά επίπεδα. Ως εκ τούτου, η κατάλληλη διαχείριση των N λιπασμάτων σε εδάφη με περίσσεια B είναι πολύ σημαντική.

Λέξεις κλειδιά: Βόριο, θρεπτικά στοιχεία, αζωτούχος λίπανσης, ασβεστολιθικό έδαφος, μαρούλι.

Abstract

A fertilizer factorial experiment of randomized complete block design was conducted in pots under greenhouse conditions using lettuce (*Lactuca sativa* L.) as test plant. Plants of lettuce were grown in a calcareous sandy clay loam soil with different N and B fertilizer levels, in order to investigate the effect of applied nitrogen and boron as well as their interactions on nutrient distribution in leaves and roots of lettuce plants. Treatments consisted of four levels of N (0, 200, 400, and 600 mg N kg⁻¹ soil) and two levels of B (0 and 5 mg B kg⁻¹ soil). The results showed that increasing N level up to 600 mg N kg⁻¹ significantly increased soil NO₃⁻ - N and K but had no effect on soil available P and B. Application of 5 mg B kg⁻¹ soil significantly decreased available K while P concentrations increased. Nitrogen application increased leaf and root N and reduced leaf P and K. By increasing N concentration in the soil, leaf B concentration was reduced in all N treatments. However, B had no effect on the N, P, and K content of leaves. In the case of roots, B was affected by N treatments and it was reduced significantly in the treatment of 600 mg N kg⁻¹ soil + 5 mg B kg⁻¹ soil.

These results suggest that nitrogen fertilization has a potential effect to prevent B toxicity and to keep leaf B concentration at normal levels in lettuce plants. Therefore, the appropriate management of N fertilizers in soils with excess B is very important.

Keywords: boron, nutrients, nitrogen fertilizer, calcareous soil, lettuce

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η συμβολή στη μελέτη σχετικά με την αλληλεπίδραση NxB. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε πείραμα σε δοχεία, όπου μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών επιπέδων αζώτου και βορίου στην ανάπτυξη, απόδοση και ανόργανη σύνθεση του μαρουλιού, καθώς και στη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος.

Στα δύο πρώτα κεφάλαια της διατριβής γίνεται αναφορά στα στοιχεία άζωτο και βόριο, στις μορφές τους στο εδαφικό σύστημα και στους παράγοντες που επηρεάζουν την διαθεσιμότητά τους. Περιγράφονται οι απαιτήσεις των φυτών στα δύο αυτά στοιχεία και τα χαρακτηριστικά συμπτώματα της έλλειψης και της περίσσειας τους στις καλλιέργειες. Ακόμη γίνεται αναφορά στις επιβλαβείς επιπτώσεις του αζώτου στο φυσικό περιβάλλον.

Στο τρίτο κεφάλαιο της διατριβής γίνεται αναφορά στις αλληλεπιδράσεις του βορίου με τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα υλικά και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της μελέτης.

Η παραπάνω έρευνα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εδαφολογίας & Γεωργικής Χημείας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, το πείραμα με τα δοχεία στήθηκε σε θερμοκήπιο του Ινστιτούτου Αμπέλου Αθηνών του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε., ενώ μέρος των αναλύσεων έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Εδαφολογίας, Λιπασματολογίας & Αξιοποίησης Εδαφών της Σχολής Τεχνολογίας Γεωπονίας του Α.Τ.Ε.Ι. Καλαμάτας.

Ευχαριστίες

Για τη συμβολή τους κατά την εκπόνηση του πειραματικού μέρους, τη συγγραφή αλλά και την παρουσίαση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους:

- Κωνσταντίνα Χαϊντούτη, Καθηγήτρια του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (Εισηγήτρια της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής)
- Κωνσταντίνο Κοσμά, Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (Μέλος της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής)
- Ιωάννη Μάσσα, Επίκουρο Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (Μέλος της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής)
- Χρήστο Πασχαλίδη, τ. Καθηγητή του Α.Τ.Ε.Ι. Καλαμάτας
- Διονύση Γασπαράτο, Διδάκτορα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών
- Στέλιο Δάλλα, Παρασκευαστή του Εργαστηρίου Εδαφολογίας & Γεωργικής Χημείας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών
- Παντελή Ζαμανίδη, Ερευνητή του Ινστιτούτου Αμπέλου Αθηνών του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.
- Αντωνία Κορίκη, Ειδικό Τεχνικό Προσωπικό του Α.Τ.Ε.Ι. Καλαμάτας
- Άννα Ασημακοπούλου, Καθηγήτρια Εφαρμογών του Α.Τ.Ε.Ι. Καλαμάτας
- Φωτεινή Γιαννακοπούλου, Διδάκτορα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών
- Παναγιώτη Δούση, Γεωπόνο M.Sc.

Στον Χρήστο

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή:	10
Κεφάλαιο 1: Το άζωτο	12
1.1. Μορφές του αζώτου στο έδαφος	12
1.1.1. Οργανικό άζωτο	13
1.1.2. Άζωτο δεσμευμένο στα αργιλικά ορυκτά.....	14
1.1.3. Διαλυτές ανόργανες μορφές αζώτου.....	14
1.2. Ο κύκλος του αζώτου στη φύση.....	15
1.3. Η δυναμική του αζώτου στο έδαφος.....	17
1.3.1. Ορυκτοποίηση και ακινητοποίηση του αζώτου.....	17
1.3.2. Στάδια ορυκτοποίησης του αζώτου	18
1.3.3. Συμπεριφορά και δέσμευση των αμμωνιακών ιόντων στο έδαφος	20
1.3.4. Εισροές αζώτου στο έδαφος.....	21
1.3.5. Απώλειες εδαφικού αζώτου.....	22
1.4. Άζωτο και περιβάλλον	23
1.5. Το άζωτο στη θρέψη των φυτών	25
1.5.1. Οι απαιτήσεις των φυτών σε άζωτο	25
1.5.2. Η πρόσληψη του αζώτου από τα φυτά.....	26
1.5.3. Έλλειψη αζώτου.....	27
1.5.3.1. Συνθήκες που ευνοούν την έλλειψη αζώτου	27
1.5.3.2. Συμπτώματα έλλειψης αζώτου.....	27
1.5.3.3. Αντιμετώπιση έλλειψης αζώτου.....	28
1.5.4. Περίσσεια αζώτου.....	30
Κεφάλαιο 2: Το βόριο	32
2.1. Μορφές του βορίου στο έδαφος.....	34
2.2. Συγκράτηση του βορίου από τα κολλοειδή του εδάφους	34
2.2.1. Προσρόφηση βορίου από τα κολλοειδή της αργίλου	35
2.2.2. Δέσμευση βορίου από τα οργανικά κολλοειδή.....	36
2.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα του βορίου στο έδαφος.....	37
2.3.1. Η μηχανική σύσταση του εδάφους και ο τύπος της αργίλου	37
2.3.2. Η αντίδραση του εδάφους	37
2.3.3. Η οργανική ουσία του εδάφους	38
2.3.4. Κλιματολογικές συνθήκες	38

2.4. Πρόσληψη και κινητικότητα του βορίου στα φυτά.....	39
2.5. Οι απαιτήσεις των φυτών σε βόριο.....	40
2.6. Έλλειψη βορίου	43
2.6.1. Συνθήκες έλλειψης βορίου	43
2.6.2. Συμπτώματα έλλειψης βορίου	44
2.6.3. Αντιμετώπιση έλλειψης βορίου	45
2.7. Τοξικότητα βορίου.....	48
2.7.1. Συνθήκες τοξικότητας βορίου	48
2.7.2. Συμπτώματα τοξικότητας βορίου	50
2.7.3. Αντιμετώπιση τοξικότητας βορίου	51
Κεφάλαιο 3: Αλληλεπίδραση του βορίου με άλλα θρεπτικά στοιχεία	52
3.1. Αλληλεπίδραση του βορίου με τα μακροθρεπτικά στοιχεία.....	52
3.1.1. Αλληλεπίδραση με το άζωτο	52
3.1.2. Αλληλεπίδραση με τον φώσφορο	53
3.1.3. Αλληλεπίδραση με το κάλιο και το μαγνήσιο	53
3.1.4. Αλληλεπίδραση με το ασβέστιο	53
3.2. αλληλεπίδραση του βορίου με τα μικροθρεπτικά στοιχεία	54
Κεφάλαιο 4: Υλικά και μέθοδοι	55
4.1. Πειραματικό σχέδιο	55
4.2. Εγκατάσταση του πειράματος.....	56
4.3. Καλλιεργητικές φροντίδες	58
4.4. Συγκομιδή και δειγματοληψία.....	59
4.5. Αναλύσεις εδάφους και φυτικών ιστών	60
4.6. Στατιστική επεξεργασία	60
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	61
5.1. Ανάπτυξη και απόδοση των φυτών	61
5.2. Συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος	68
5.2.1. Άζωτο (N) στο έδαφος	68
5.2.2. Φώσφορος (P) στο έδαφος	69
5.2.3. Κάλιο (K), Ασβέστιο (Ca), Μαγνήσιο (Mg) στο έδαφος.....	70
5.2.4. Σίδηρος (Fe), Μαγγάνιο (Mn), Ψευδάργυρος (Zn), Χαλκός (Cu) στο έδαφος.....	73
5.2.5. Βόριο (B) στο έδαφος.....	76
5.3. Συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς.....	79
5.3.1. Άζωτο (N) στους φυτικούς ιστούς.....	79

5.3.2. Φώσφορος (P) στους φυτικούς ιστούς.....	80
5.3.3. Κάλιο (K), Ασβέστιο (Ca), Μαγνήσιο (Mg) στους φυτικούς ιστούς	82
5.3.4. Σίδηρος (Fe), Μαγγάνιο (Mn), Ψευδάργυρος (Zn), Χαλκός (Cu) στους φυτικούς ιστούς.....	86
5.3.5. Βόριο (B) στους φυτικούς ιστούς	92
5.4. Συσχέτιση των αποτελεσμάτων.....	96
5.5. Συμπεράσματα.....	97
Βιβλιογραφία	99

Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των φυτών εξαρτάται από τις εισροές θρεπτικών στοιχείων τόσο του εδάφους όσο και της ατμόσφαιρας. Τα θρεπτικά στοιχεία προσλαμβάνονται από τα φυτά είτε από την ατμόσφαιρα με τη φωτοσύνθεση δια μέσου των φύλλων, είτε από το νερό του εδάφους δια μέσου των ριζών, είτε από το εδαφικό διάλυμα με τη μορφή ιόντων.

Τα θρεπτικά στοιχεία ούτε δημιουργούνται ούτε χάνονται, απλά αλλάζουν τη χημική τους μορφή ή εναλλάσσονται μέσα στα μεγαλομόρια και κυκλοφορούν από θέση σε θέση. Η συνεχής αυτή κυκλική κυκλοφορία (ανακύκλωση) των θρεπτικών στοιχείων στη φύση συνιστά τη μεγαλύτερη προϋπόθεση συνέχισης ύπαρξης της ζωής. Όταν το φυτό περιέχει λιγότερη ποσότητα ενός στοιχείου, που είναι ουσιώδες για την ανάπτυξή του, τότε το φυτό αυτό χαρακτηρίζεται ότι βρίσκεται σε κατάσταση έλλειψης. Το αποτέλεσμα της έλλειψης είναι φυσιολογικές ανωμαλίες που συνήθως συνοδεύονται από ορατά συμπτώματα. Όταν η έλλειψη βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ή όταν έχει μεγάλη ένταση, έχει σαν αποτέλεσμα την τελική ξήρανση του φυτού.

Τα θρεπτικά στοιχεία των φυτών μπορεί να διαχωριστούν σε μακροστοιχεία ή μακροθρεπτικά και σε ιχνοστοιχεία ή μικροθρεπτικά. Παρατηρήθηκε ότι τα μακροθρεπτικά προσλαμβάνονται από τα φυτά σε μεγαλύτερες ποσότητες απ' ό,τι προσλαμβάνονται τα μικροθρεπτικά. Τα στοιχεία Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, και Cl ανήκουν στην ομάδα των μικροθρεπτικών, εξαιτίας της παρουσίας τους στο σύστημα εδάφους - φυτού, σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Το γεγονός, ότι τα μικροθρεπτικά περιέχονται στα φυτά σε πολύ μικρές ποσότητες, δεν σημαίνει ότι αυτά είναι λιγότερο απαραίτητα από τα άλλα θρεπτικά στοιχεία. Αυτά, έχουν κυρίως καταλυτικό ρόλο, δηλαδή αποτελούν απαραίτητα συστατικά διάφορων ενζύμων που από την παρουσία τους εξαρτάται ο κανονικός μεταβολισμός των κυττάρων και συνεπώς η κανονική ανάπτυξη των φυτών. Επτά ακόμη χημικά στοιχεία (ευεργετικά στοιχεία) έχουν αποδειχθεί αναγκαία σε ορισμένα είδη φυτών. Πρόκειται για τα: Αλουμίνιο (Al), Κοβάλτιο (Co), Νάτριο (Na), Νικέλιο (Ni), Πυρίτιο (Si), Βανάδιο (V) και Φθόριο (F).

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της γεωργικής παραγωγής σε παγκόσμια κλίμακα είναι η ανεπάρκεια και η οριακότητα του βορίου πολλών γεωργικών εδαφών. Σύμφωνα με έγκυρες εκτιμήσεις το βόριο είναι το μικροθρεπτικό στοιχείο με τη μεγαλύτερη συνολική έκταση των ελλειμματικών γεωργικών γαιών. Ο Sillanpaa (1982) αναφέρει ότι σε μελέτη του FAO με θέμα τη στάθμη των μικροθρεπτικών στοιχείων στα εδάφη 41 χωρών

της Ευρώπης, Λατινικής Αμερικής, Άπω Ανατολής, Εγγύς Ανατολής, Αφρικής και Ωκεανίας, πλέον εκτεταμένη είναι η τροφοπενία βορίου.

Όπως και αντίθετα, προβληματικά εδάφη με το βόριο σε τοξικά επίπεδα απαντώνται σε πολλές ξηροθερμικές κυρίως περιοχές της γης, με μεγαλύτερη έκταση στο Ιράκ, το Μεξικό, το Πακιστάν και την Τουρκία.

Στην Ελλάδα το πρόβλημα της τροφοπενίας βορίου ευπαθών στην έλλειψη του μικροθρεπτικού καλλιεργειών (ελιά, μηλοειδή, τεύτλα, αμπέλι, κλπ) είναι αρκετά διαδεδομένο, μολονότι δεν υπάρχουν ακριβή ποσοτικά δεδομένα για την έκταση του προβλήματος, ενώ αντίθετα τοξικότητα του στοιχείου έχει αναφερθεί σε καλλιέργειες ακτινιδίων στη Β. Ελλάδα.

Ο πειραματικός προσδιορισμός των απαιτήσεων σε θρεπτικά στοιχεία, όπως και η εφαρμογή της εδαφοανάλυσης και της φυλλοδιαγνωστικής, είναι αναγκαίος για τη σωστή θρέψη και λίπανση των φυτών.

Κεφάλαιο 1: Το άζωτο

Το άζωτο ανήκει στα μακροστοιχεία ή μακροθρεπτικά μαζί με τα στοιχεία P, K, Ca, Mg και S. Ονομάζονται έτσι γιατί απορροφούνται από τις ρίζες σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία. Ως κύρια θρεπτικά στοιχεία χαρακτηρίζονται τα N, P, K γιατί παρατηρείται αυξημένη ανάγκη προσθήκη τους υπό μορφή λιπασμάτων. Από πλευράς σπουδαιότητας το άζωτο κατατάσσεται τέταρτο μετά τον άνθρακα το υδρογόνο και οξυγόνο, (Paul and Clarck, 1989).

Το στοιχειακό άζωτο είναι ένα αδρανές διατομικό αέριο άχρωμο άοσμο και αποτελεί το 78% κατ' όγκο του ατμοσφαιρικού αέρα. Στην αέρια μορφή του το N δεν μπορεί να απορροφηθεί από τα φυτά, παρά μόνο σε πολύ μικρές ποσότητες, προσλαμβανόμενο υπό μορφή οξειδίων από το φύλλωμα, (Marschner, 1997).

Επίσης αναφέρεται ότι το 2% του ολικού αζώτου της γης βρίσκεται στην βιόσφαιρα και το 98% στη λιθόσφαιρα, ενώ τα πετρώματα έχουν μια μέση περιεκτικότητα σε άζωτο ίση με 50 ppm (Brady and Weil, 1999).

1.1. Μορφές του αζώτου στο έδαφος

Τα ελληνικά εδάφη περιέχουν άζωτο σε ποσοστό μεταξύ 0,003 και 0,3%, ενώ το πιο συνηθισμένο ποσοστό είναι από 0,05 – 0,15%. Στα φυτά το άζωτο συνήθως περιέχεται σε ποσοστό 1-5% επί της ξηράς ουσίας του φυτού. Οι μορφές από τις οποίες απαντάται το άζωτο στα εδάφη είναι οι εξής:

- Οργανικό άζωτο στις χουμικές ενώσεις του εδάφους.
- Αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) είτε δεσμευμένο στους ενδοκρυσταλλικούς χώρους των αργιλικών ορυκτών είτε σε ανταλλάξιμη μορφή.
- Νιτρικό άζωτο ($\text{NO}_3^-\text{-N}$).
- Αέριο άζωτο σε στοιχειακή μορφή (N_2) και διοξείδιο του αζώτου (N_2O) ως προϊόν της απονιτροποίησης (Denitrification).
- Αμμωνία (NH_3) είτε ως προϊόν της εξαέρωσης (Volatilization), ή σαν λίπασμα που έχει προστεθεί στο έδαφος.
- Υδροξυλαμίνη (NH_2OH), και ουρία (H_2NCONH_2).

(Καλλιάνου, 1999).

1.1.1. Οργανικό άζωτο

Το άζωτο βρίσκεται στο έδαφος ενσωματωμένο στην οργανική ουσία σε ποσοστό 90%. Απαντάται συχνότερα με την αμινική μορφή (NH_2) και λιγότερο με την μορφή ετεροκυκλικών ενώσεων (νουκλεοξέα κ.α.). Η σημασία των οργανικών ενώσεων στην θρέψη των φυτών είναι μέγιστη, γεγονός που καθιστά την παρουσία της οργανικής ουσίας απαραίτητη.

Οι χουμικές ενώσεις, τα κυριότερα οργανικά συστατικά του εδάφους και της ιλύος, είναι ευρύτατα διανεμημένα πάνω στην επιφάνεια της γης. Βρίσκονται σε όλα τα γήινα και υδάτινα περιβάλλοντα. Ο άνθρακας των χουμικών ενώσεων αποτελεί το 60-70% του συνολικού εδαφικού άνθρακα. Για το λόγο αυτό ο ρόλος των χουμικών ουσιών στο κύκλο του άνθρακα, ως πηγή CO_2 και ως ένα απόθεμα είναι σημαντικός. Η αποσύνθεση της εδαφικής οργανικής ύλης προμηθεύει το μεγαλύτερο ποσό CO_2 στην ατμόσφαιρα.

Οι χημικές και βιολογικές αποικοδομήσεις φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων δημιουργούν τις χουμικές ενώσεις. Τα σχηματιζόμενα προϊόντα είναι μεγαλομοριακές ενώσεις με πολύπλοκη δομή και επίσης τα παραγόμενα προϊόντα είναι πιο σταθερά από τα αρχικά υλικά.

Σπουδαίες ιδιότητες των χουμικών ενώσεων είναι η ικανότητά τους να σχηματίζουν υδατοδιαλυτά και μη υδατοδιαλυτά σύμπλοκα με μεταλλικά ιόντα, ένυδρα οξείδια και τέλος αντιδρούν με τα ορυκτά της αργίλου και οργανικές.

Το έδαφος περιέχει μια μεγάλη ποικιλία από οργανικά υλικά τα οποία μπορούν να ομαδοποιηθούν τόσο σε χουμικές όσο και σε μη χουμικές ενώσεις. Οι μη χουμικές ενώσεις μπορούν σχετικά εύκολα να προσδιοριστούν και είναι: πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, πεπτίδια, λίπη, κηροί, αμινοξέα και χαμηλού μοριακού βάρους οργανικά οξέα. Οι περισσότερες απ' αυτές τις ενώσεις προσβάλλονται σχετικά εύκολα από μικροοργανισμούς. Αντίθετα στις χουμικές ενώσεις δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι φυσικές τους σταθερές όπως το σημείο τήξης, ο συντακτικός τους τύπος και η δομή του (Καλλιάνου, 1999).

Η έρευνα των χημικών μορφών του οργανικού N των εδαφών βασίζεται συνήθως σε κλασμάτωση των αζωτούχων ενώσεων του εδάφους. Σε μια τυπική διαδικασία παραλαβής των αζωτούχων ενώσεων το δείγμα εδάφους θερμαίνεται με ισχυρό οξύ (HCl), οπότε παραλαμβάνονται τα διάφορα αζωτούχα κλάσματα. Το ποσοστό του ολικού N το οποίο παραμένει αδιάλυτο μετά την εν λόγω όξινη υδρόλυση είναι αρκετά υψηλό της τάξεως του 20-35%. Οι σημαντικότερες από ποσοτικής άποψης αζωτούχες οργανικές ενώσεις του

εδάφους που έχουν προσδιοριστεί ανήκουν στις κατηγορίες των αμινοξέων (30-45% του N) και των αμινοζαχάρων (5-10% του N). Ένα ακόμη κλάσμα διαλυτό στο HCl, που αποτελεί το 10-20% του εδαφικού N, έχει προσδιοριστεί χημικώς μόνο εν μέρει (Αναλογίδης, 2000).

1.1.2. Άζωτο δεσμευμένο στα αργιλικά ορυκτά

Αντίθετα με τα NO_3^- που είναι πολύ ευκίνητα στο έδαφος και δεν προσροφώνται από τα εδαφικά σωματίδια, τα κατιόντα του NH_4^+ προσροφώνται ισχυρά στα αρνητικά φορτισμένα αργιλικά ορυκτά. Ιδιαίτερα δεσμεύονται εκλεκτικά από τα 2:1 αργιλικά ορυκτά όπως τους ιλλίτες, βερμικουλίτες και μοντμοριλονίτες. Η ικανότητα δέσμευσης αμμωνίου στα διάφορα ορυκτά της αργίλου ακολουθεί την εξής σειρά:

Βερμικουλίτης > Ιλλίτης > Μοντμοριλονίτης > Καολινίτης

Το αμμωνιακό κατιόν (NH_4^+) δεσμεύεται στους ενδοκρυσταλλικούς χώρους, σε ποσοστά που μπορούν να φτάσουν σε επιφανειακά εδάφη το 1-10 % του ολικού αζώτου ενώ μπορεί να υπερβεί το 50 % σε βαθύτερους ορίζοντες (Williams, 1967). Επομένως ένα μέρος του αμμωνιακού αζώτου του εδάφους δεσμεύεται από την άργιλο και καθίσταται έτσι μη ανταλλάξιμο (Mengel and Kirkby, 1987).

1.1.3. Διαλυτές ανόργανες μορφές αζώτου

Στο έδαφος συναντάμε διάφορες μορφές ανόργανου αζώτου. Οι μορφές αυτές είναι το υποξείδιο (N_2O), το μονοξείδιο (NO), το διοξείδιο (NO_2) του αζώτου, η αμμωνία (NH_3), τα ιόντα του αμμωνίου (NH_4^+), τα νιτρώδη (NO_2^-) και τα νιτρικά (NO_3^-) καθώς και το μοριακό άζωτο (N_2) (Αλιφραγκής, 2008).

Η αμμωνιακή καθώς και η νιτρική μορφή ιόντων δεν ξεπερνά το 2% του ολικού εδαφικού αζώτου. Μόνο σε περιπτώσεις που έχουν γίνει μεγάλες προσθήκες αζωτούχων λιπασμάτων μπορούμε να μιλάμε για ποσοστό πάνω από 2%.

Το αμμωνιακό κατιόν (NH_4^+) όπως έχει ήδη αναφερθεί προσροφάται από τα κολλοειδή του εδάφους και εκπλένεται δύσκολα. Το γεγονός όμως ότι μετατρέπεται εύκολα στη νιτρική μορφή, έχει ως αποτέλεσμα να βρίσκεται στο έδαφος σε μικρές ποσότητες (Havlin *et.al.*, 1999). Η συγκέντρωση του N στο εδαφικό διάλυμα μεταβάλλεται σημαντικά

σε μικρές περιόδους, λόγω του πλήθους των διεργασιών που επηρεάζουν τον κύκλο του N στο έδαφος. Η μεταβολή αυτή αφορά κυρίως τα νιτρικά ιόντα (Καλλιάνου, 1999).

Όταν οι απαιτήσεις μιας καλλιέργειας είναι μεγάλες, τα NO_3^- απορροφώνται από τις ρίζες των φυτών με αποτέλεσμα η συγκέντρωσή τους στο διάλυμα να μειώνεται. Επίσης, μεγάλη κινητικότητα των νιτρικών ιόντων στο έδαφος παρατηρείται κατά την υγρή περίοδο του έτους και όταν το ύψος των βροχοπτώσεων είναι υψηλό. Τα NO_3^- μη μπορώντας να συγκρατηθούν από την στερεή φάση εκκλύονται από το νερό της βροχής και μεταφέρονται σε χαμηλότερους ορίζοντες (Mengel, 1992).

1.2. Ο κύκλος του αζώτου στη φύση

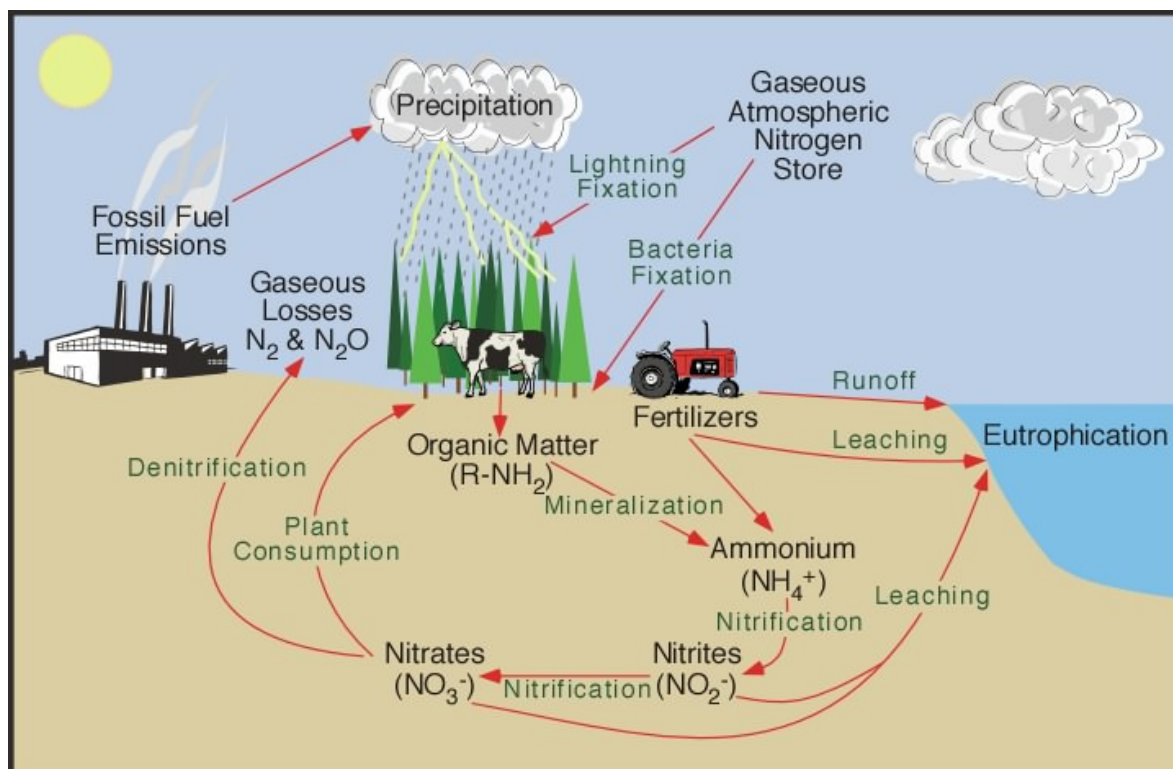
Η ατμόσφαιρα είναι η σημαντικότερη δεξαμενή αζώτου, αλλά το μεγαλύτερο μέρος του είναι αδρανές και δεν συμμετέχει καθόλου στην ανακύκλωση N. Αν και τα πετρώματα του γήινου φλοιού αποτελούν μια σημαντική δεξαμενή του στοιχείου, αυτό συμμετέχει ελάχιστα στον κύκλο του N, με εξαίρεση την απελευθέρωση αμμωνίας από την ηφαιστειακή δραστηριότητα (Pulford and Flowers, 2006).

Κατά τις φάσεις της ανακύκλωσης του αζώτου στη φύση, το στοιχείο αυτό το οποίο είναι ένα από τα κύρια για την θρέψη των φυτών καθώς και κάθε ζωντανού οργανισμού, περνάει από μια σειρά μετασχηματισμών εμφανιζόμενο σε ενώσεις ανόργανες, οργανικές ή πτητικές. Οι μετασχηματισμοί αυτοί στη φύση γίνονται συνεχώς και συγχρόνως.

Μικρό μέρος του αζώτου της ατμόσφαιρας, μετατρέπεται σε οργανικό από σχετικά μικρό αριθμό ειδών μικροοργανισμών που έχουν την ικανότητα να το δεσμεύουν, ζώντας άλλοι ελεύθερα και άλλοι σε συμβίωση με ανώτερα φυτά. Υπολογίζεται ότι μέσω της βιολογικής δέσμευσης $130-180 \times 10^6$ τόνοι αζώτου δεσμεύτηκαν από την ατμόσφαιρα το 1995 και περίπου η μισή ποσότητα του ποσού αυτού δεσμεύτηκε από την δράση των *Rhizobia* (Havlin *et.al.*, 1999).

Το άζωτο που βρίσκεται στις πρωτεΐνες και στα νουκλεοξέα των φυτικών ιστών είναι πηγή αζώτου για τα ζώα. Στο σώμα των ζώων το άζωτο μεταβολίζεται σε απλούστερες ή πολυπλοκότερες ενώσεις. Από τα σώματα των ζώων και από τους ιστούς των φυτών κατά τη σήψη τους ελευθερώνεται άζωτο σε αμμωνιακή μορφή και έτσι είτε αμέσως χρησιμοποιείται από τα φυτά ή αφού πρώτα οξειδωθεί προς νιτρική μορφή. Τα νιτρικά ιόντα μπορούν να εκκλυθούν προς βαθύτερα στρώματα του εδάφους, μπορεί να προσληφθούν από τα φυτά για τη θρέψη τους ή ακόμα μπορούν να αναχθούν.

Η δέσμευση του αζώτου μπορεί να γίνει τόσο φυσικοχημικά όσο και βιολογικά. Με την φυσικοχημική δέσμευση το μοριακό αζώτο (N_2) μετατρέπεται σε οξείδια κατά τις ηλεκτρικές εκκενώσεις της ατμόσφαιρας και μεταφέρεται στο έδαφος μέσω της βροχής. Ο πιο σημαντικός τρόπος δέσμευσης του αζώτου της ατμόσφαιρας αποτελεί η βιολογική δέσμευση μέσω της οποίας σχηματίζεται ανόργανο αζώτο.



Εικόνα 1. Ο κύκλος του αζώτου στη φύση (Pidwirny, 2006).

Από υπολογισμούς ξέρουμε ότι η ηλεκτροχημική και η φωτοχημική δέσμευση παρείχαν κάθε χρόνο κατά μέσο όρο $7,6 \times 10^6$ τόνους NO_3^- -N. Αντίθετα η βιολογική δέσμευση υπολογίζεται σε $130-180 \times 10^6$ τόνους ανά έτος.

Σύμφωνα με τον Delwiche (1970), η συνολική ετήσια δέσμευση του αζώτου είναι 92×10^6 τόνοι, η οποία αναλύεται σε 54 τόνους βιολογικής δεσμεύσεως, 30 τόνους βιομηχανικής δέσμευσης, 7,6 τόνους φωτοχημικής δέσμευσης και 0,2 τόνους λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας. Οι απώλειες μέσω της απονιτροποίησης και διαφυγής αζώτου στην ατμόσφαιρα είναι της τάξης των 83×10^6 τόνων ανά έτος. Η διαφορά αυτή μεταξύ εισροών και εκροών που φτάνει τους 9×10^6 τόνους ετησίως, είναι η ποσότητα του αζώτου συνεχώς αυξανόμενη λόγω σταθερής αύξησης της βιομηχανικής δέσμευσης και η οποία προστίθεται κάθε χρόνο στα υπόγεια νερά, τα νερά της επιφανειακής απορροής, τις

λίμνες και τις θάλασσες του πλανήτη. Προκαλείται κατά αυτόν τον τρόπο μια διαταραχή του ισοζυγίου του αζώτου στο οικοσύστημα, η οποία αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα ρύπανσης (Mengel, 1992).

1.3. Η δυναμική του αζώτου στο έδαφος

1.3.1. Ορυκτοποίηση και ακινητοποίηση του αζώτου

Με τον όρο ορυκτοποίηση εννοούμε την διαδικασία της μετατροπής του εδαφικού αζώτου σε ανόργανες αφομοιώσιμες για τα φυτά μορφές, όπως αμμωνιακή και νιτρική.

Αρχικά λαμβάνει χώρα η μετατροπή του οργανικού αζώτου σε αμμωνία, η οποία οξειδώνεται στη συνέχεια σε νιτρικό άζωτο. Συνήθως η αμμωνιοποίηση είναι βραδύτερη της νιτροποίησης, για αυτό το λόγο και το αμμωνιακό άζωτο στο έδαφος είναι γενικά λιγότερο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ορυκτοποίηση είναι μια πολύ αργή διαδικασία.

Η διαδικασία της ορυκτοποίησης είναι ουσιαστικά μια σειρά από ενζυμικές αντιδράσεις οξειδωτικής διάσπασης που ενεργοποιούνται από ετερότροφους μικροοργανισμούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας ενώσεις οργανικού άνθρακα. Οι μικροοργανισμοί αυτοί επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία του εδάφους, ο αερισμός κ.α. και έχει ως άμεση συνέπεια να παρατηρούνται εποχιακές διακυμάνσεις στο ποσό του ορυκτοποιημένου αζώτου με αποτέλεσμα η εκτίμηση του ρυθμού ορυκτοποίησης σε κάποιο έδαφος να παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες (Καλλιάνου, 1999).

Ακινητοποίηση αποκαλείται η αφομοίωση και ενσωμάτωση των ανόργανων μορφών N σε οργανικά συστατικά των κυττάρων και ιστών της εδαφικής βιομάζας. Από βιοχημικής άποψης η ακινητοποίηση του N στην εδαφική βιομάζα αποτελεί μια διαδικασία αφομοιώσεως του N από την ετεροτροφική μικροχλωρίδα του εδάφους, της οποίας τα χαρακτηριστικά είναι κοινά με την αφομοίωση του N από τα ανώτερα φυτά.

Η δυναμική ισορροπία μεταξύ ανόργανου και οργανικού N φαίνεται ότι διαταράσσεται με την προσθήκη αζωτούχων λιπασμάτων. Από έρευνες συνάγεται ότι η αζωτούχος λίπανση οδηγεί σε αύξηση της ορυκτοποίησης του οργανικού αζώτου.

Μεταξύ οργανικής ύλης και ολικού N υπάρχει στενή ποσοτική σχέση, λόγω του ότι το μέγιστο μέρος του εδαφικού αζώτου απαντάται σε οργανική μορφή. Επειδή δε και ο άνθρακας αποτελεί ένα αρκετά σταθερό ποσοστιαίο κλάσμα της οργανικής ύλης, προκύπτει

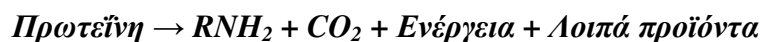
ότι το πηλίκο C/N στους διάφορους τύπους εδαφών παίρνει χαρακτηριστικές τιμές. Στο επιφανειακό στρώμα των γεωργικών εδαφών η συνήθης τιμή του C/N κυμαίνεται μεταξύ 8:1 και 15:1 (Αναλογίδης, 2000).

Ο λόγος C/N επηρεάζει την ισορροπία μεταξύ της ορυκτοποίησης και της ακινητοποίησης. Στο νέο ιστό της βιομάζας, ο λόγος αυτός είναι μεγάλος, κατά κανόνα C/N>25:1, και η διεργασία τείνει προς την ακινητοποίηση. Αν ο ιστός της βιομάζας έχει υψηλή περιεκτικότητα σε N ή αν ο λόγος C/N είναι μικρός, τότε η ποσότητα του N που απελευθερώνεται από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης είναι μεγαλύτερη από τις μικροβιακές απαιτήσεις, με συνέπεια την ορυκτοποίηση του N (Pulford and Flowers, 2006).

1.3.2. Στάδια ορυκτοποίησης του αζώτου

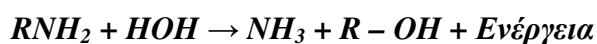
Αμινοποίηση:

Κατά το στάδιο αυτό οι πρωτεΐνες υδρολύονται με την επίδραση ετερότροφων μικροοργανισμών και παράγονται αμίνες και αμινοξέα. Η απελευθέρωση του αμινικού N από την οργανική ουσία του εδάφους ονομάζεται και πρωτεόλυση (Καλλιάνου, 1999).



Αμμωνιοποίηση:

Το δεύτερο στάδιο της ορυκτοποίησης του αζώτου είναι η αμμωνιοποίηση. Κατά την αμμωνιοποίηση οι αμίνες και αμινοξέα που ήδη έχουν παραχθεί κατά τη διαδικασία της αμινοποίησης προσβάλλονται από άλλες ομάδες ετερότροφων μικροοργανισμών με αποτέλεσμα την έκλυση αμμωνίας.

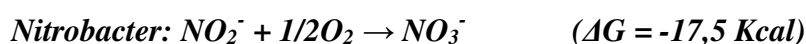
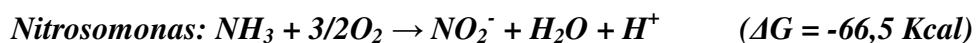


Τα περισσότερα είδη βακτηρίων του εδάφους έχουν την ικανότητα να προσβάλλουν τις πρωτεΐνες με ταυτόχρονη ελευθέρωση αμμωνίας. Επίσης οι μύκητες όπως και οι ακτινομύκητες έχουν έντονες πρωτεϊνολυτικές ικανότητες. Πιστεύεται ότι η αμμωνιοποίηση σε ουδέτερα ή αλκαλικά εδάφη πρέπει να γίνεται κατά κύριο λόγο από τον βακτηριακό πληθυσμό ενώ σε όξινα εδάφη οι μύκητες παίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Σε αναερόβιες

συνθήκες, τα βακτήρια αναμένονται να είναι οι κύριοι αμμωνιωποιητικοί παράγοντες (Havlin *et.al.*, 1999).

Νιτροποίηση:

Η βιολογική οξείδωση του $\text{NH}_4^+\text{-N}$ προς $\text{NO}_3^-\text{-N}$ είναι γνωστή σαν νιτροποίηση (Nitrification). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικά στάδια. Αρχικά η αμμωνία οξειδώνεται προς NO_2^- και αμέσως εν συνεχεία προς NO_3^- . Οι διεργασίες αυτές επιτελούνται από αυτότροφα βακτήρια δηλαδή από βακτήρια που προμηθεύονται ενέργεια από την οξείδωση ανόργανων αλάτων και χρησιμοποιούν το CO_2 σαν πηγή άνθρακα. Οι ομάδες των βακτηρίων είναι δύο, η πρώτη είναι η *Nitrosomonas* και η δεύτερη η *Nitrobacter*.



(Μήτσιος, 2004).

Ο ρυθμός νιτροποίησης στα γεωργικά εδάφη είναι ταχύς και υπερκαλύπτει το ρυθμό πρόσληψης των NO_3^- από τα φυτά, υπό την προϋπόθεση επαρκούς αζωτούχου υποστρώματος. Συνθήκες από τις οποίες εξαρτάται ο ρυθμός νιτροποίησης είναι:

- **Η διαθεσιμότητα αμμωνίας.** Η νιτροποίηση πραγματοποιείται εφόσον υπάρχουν αποθέματα αμμωνίας, είτε από ορυκτοποίηση του οργανικού N, είτε από προσθήκη αμμωνιακών λιπασμάτων.
- **Αερισμός.** Η νιτροποίηση αποτελεί οξειδωτική διαδικασία και ο ρυθμός της περιορίζεται σε πολύ υγρά ή συμπαγή εδάφη.
- **Θερμοκρασία.** Ως ευνοϊκή θεωρείται η θερμοκρασία εδάφους μεταξύ 27° και 32° C.
- **Υγρασία.** Όταν η υγρασία του εδάφους είναι υπερβολική, ή αντίθετα πολύ χαμηλή, ο ρυθμός νιτροποίησης επιβραδύνεται.
- **Ανταλλάξιμα βασικά κατιόντα και pH.** Ο ρυθμός νιτροποίησης πραγματοποιείται απρόσκοπτα όταν υπάρχει ικανοποιητική διαθεσιμότητα βασικών κατιόντων σε ανταλλάξιμη μορφή. Ακριβώς δε στην ελλιπή διαθεσιμότητα βάσεων οφείλεται κυρίως ο

μειωμένος ρυθμός νιτροποίησης των όξινων εδαφών χωρίς να αποκλείεται και η άμεση επίδραση της υψηλής οξύτητας.

- **Γεωργικά φάρμακα.** Οι μικροοργανισμοί νιτροποίησης παρουσιάζουν ευαισθησία σε ορισμένα γεωργικά φάρμακα (μυκητοκτόνα), που περιορίζουν επίσης και τη δράση των μικροοργανισμών οξειδωτικής διάσπασης του οργανικού N.

(Αναλογίδης, 2000).

1.3.3. Συμπεριφορά και δέσμευση των αμμωνιακών ιόντων στο έδαφος

Το ανταλλάξιμο NH_4^+ όπως και το K^+ υπό ορισμένες συνθήκες, υπόκεινται σε δέσμευση (fixation). Η δέσμευση σχετίζεται με την παρουσία στο έδαφος ορυκτών της αργίλου τύπου 2:1. Όσο μεγαλύτερο είναι το ηλεκτρικό φορτίο τόσο ισχυρότεροι δεσμοί αναπτύσσονται μεταξύ των κρυσταλλικών στιβάδων.

Στους μοντοριλλονίτες τα μόρια του ύδατος και τα ανταλλάξιμα κατιόντα κυκλοφορούν ελεύθερα μεταξύ των στοιβάδων και προκαλούν διόγκωση των κρυστάλλων. Αντίθετα σε ορυκτά με πολύ ισχυρούς διαστιβαδικούς δεσμούς, (μαρμαρυγιακά ορυκτά) δεν είναι δυνατή η διείσδυση του ύδατος και δε διογκώνονται, τα δε διαστιβαδικά κατιόντα που βρίσκονται στο εσωτερικό των κρυστάλλων είναι μη-ανταλλάξιμα.

Μια ενδιάμεση κατηγορία από απόψεως ισχύος διαστιβαδικών δεσμών αποτελούν οι βερμικουλίτες. Στους βερμικουλίτες τόσο το NH_4^+ , όσο και το K^+ , όταν εισέλθουν στο διάστημα μεταξύ των εσωτερικών διαστιβαδικών επιφανειών καθίστανται μη ανταλλάξιμα.

Οι ιλλίτες παρουσιάζουν μικρή δεσμευτική ικανότητα, ενώ τα αργιλικά ορυκτά τύπου 1:1 (καολινίτης) δε δεσμεύουν τα αμμωνιακά ιόντα (Μήτσιος, 2004).

Συνέπεια της προσροφήσεως και της δέσμευσης του NH_4^+ -N είναι ότι η κινητικότητα των ιόντων NH_4^+ στο έδαφος είναι μικρότερη από την κινητικότητα των NO_3^- . Για το λόγο αυτό το άζωτο εκπλένεται κυρίως με την μορφή του NO_3^- -N και ελάχιστα υπό την NH_4^+ -N μορφή. Στο εδαφικό διάλυμα επίσης η συγκέντρωση των νιτρικών είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση των ιόντων NH_4^+ εκτός εάν το έδαφος είναι όξινο (Καλλιάνου, 1999).

Τα ιόντα NH_4^+ στο έδαφος βρίσκονται με την δεσμευμένη την ανταλλάξιμη και την ελεύθερη στο εδαφικό διάλυμα μορφή. Οι μορφές αυτές βρίσκονται μεταξύ τους σε κατάσταση ισορροπίας (Nommik, 1965):



Με βάση την εξίσωση ισορροπίας συμπεραίνουμε ότι δέσμευση κατιόντων αμμωνίου και μετακίνηση της ισορροπίας προς τα αριστερά θα γίνει μετά από την προσθήκη αμμωνιακών κατιόντων στο εδαφικό διάλυμα, δηλαδή με την προσθήκη αμμωνιακών λιπασμάτων. Όταν η πρόσληψη αμμωνιακών κατιόντων από τα φυτά μειώνει το ανταλλάξιμο NH_4^+ κάτω από την τιμή ισορροπίας θα παρατηρηθεί αποδέσμευση κατιόντων NH_4^+ (Καλλιάνου, 1999).

Όταν στο έδαφος προστίθενται ιόντα K^+ πριν από την προσθήκη αμμωνιακών κατιόντων, παρατηρείται μείωση της δέσμευσης των NH_4^+ (Nommic and Vahtras, 1982).

Η παρουσία του καλίου υποβιβάζει τη δεσμευτική ικανότητα του εδάφους για το NH_4^+ και αντιστρόφως η παρουσία του NH_4^+ υποβιβάζει τη δεσμευτική ικανότητα του εδάφους για το K^+ . Από έρευνες προέκυψε ότι υπάρχει μια τάση αύξησης της δέσμευσης NH_4^+ , όσο αυξάνει ο βαθμός κορεσμού ή το pH ενώ εδάφη $\text{pH} < 5,5$ δείχνουν πολύ χαμηλή δεσμευτική ικανότητα (Μήτσιος, 2004).

1.3.4. Εισροές αζώτου στο έδαφος

Βιολογική δέσμευση ατμοσφαιρικού αζώτου:

Η σημαντικότερη διεργασία με την οποία το μη χρήσιμο για τα φυτά μοριακό ανόργανο άζωτο της ατμόσφαιρας δεσμεύεται και μετατρέπεται σε οργανικό, χαρακτηρίζεται σαν δέσμευση του αζώτου (Nitrogen fixation) και επιτελείται από διάφορα είδη μικροοργανισμών που ζουν στο έδαφος συμβιωτικά με φυτά η ελεύθερα. Το ατμοσφαιρικό άζωτο μπορεί να δεσμευτεί επίσης χημικά από την μέθοδο Haber-Bosch κατά την οποία το αέριο N_2 και H_2 , υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσεως αντιδρούν και δίνουν NH_3 . Είναι η βασική αντίδραση για την παραγωγή αμμωνιακών λιπασμάτων αλλά τα δεσμευόμενα με την μέθοδο αυτή ποσά είναι ακόμη μικρότερα σε σχέση με τα ποσά που δεσμεύονται φυσικά από τους μικροοργανισμούς.

Η βιολογική δέσμευση συμβάλλει σημαντικά στην αζωτούχο θρέψη των φυτών. Είναι γεγονός όμως ότι τα δεσμευόμενα ποσά διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και αυτό εξαρτάται από παράγοντες του εδάφους όπως το pH, τα διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία, την παρουσία βαρέων μετάλλων και την εδαφική υγρασία, (Havlin *et.al.*, 1999).

Η δέσμευση είναι μικρή στα καλλιεργήσιμα αλλά χωρίς φυτική κάλυψη εδάφη, αντίθετα στους βοσκότοπους, στα δάση και λιγότερο στους ορυζώνες η βιολογική δέσμευση

του αζώτου είναι σημαντική. Επίσης η δέσμευση του N_2 στα νερά των ποταμών και των λιμνών είναι αρκετά υψηλή (Καλλιάνου, 1999).

Άζωτο στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα:

Εκτός από τη βιολογική δέσμευση, ένα μέρος του μοριακού αζώτου που περιέχεται στην ατμόσφαιρα εισέρχεται στον κύκλο του αζώτου με τις ηλεκτρικές εκκενώσεις που το οξειδώνουν προς NO_2^- και NO_3^- . Με το νερό των βροχοπτώσεων αυτά μεταφέρονται στο έδαφος. Υπολογίζεται ότι με τη διαδικασία αυτή επιστρέφει από την ατμόσφαιρα στο έδαφος ποσότητα που ισοδυναμεί με 3,6 Kg N/ha ετησίως (Stevenson, 1982). Στις τροπικές περιοχές τα ποσά είναι μεγαλύτερα αλλά δεν ξεπερνούν τα 10 Kg N/ha ετησίως. Από το συνολικό άζωτο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων μόνο το 10-20% οφείλεται στην δράση των ηλεκτρικών εκκενώσεων. Τα μεγαλύτερα ποσά αζώτου των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων οφείλονται στην βιομηχανική ρύπανση. Τα μεγαλύτερα ποσά παρατηρούνται βέβαια σε περιοχές με βιομηχανική ανάπτυξη και ανθρωπογενή παρουσία.

Η συμμετοχή του αζώτου που εισέρχεται στο έδαφος με τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, στη ποσότητα εισροής του αζώτου είναι πολύ μικρή και έτσι η σημασία του στη γεωργική παραγωγή είναι ελάχιστη. Παρά το γεγονός αυτό, παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον για την οικονομία του αζώτου στα φυσικά οικοσυστήματα όπως στα δάση και στους φυσικούς λειμώνες (Καλλιάνου, 1999).

1.3.5. Απώλειες εδαφικού αζώτου

Το άζωτο μπορεί να απομακρυνθεί από το εδαφικό σύστημα είτε με έκπλυση προς βαθύτερα στρώματα είτε με επιφανειακή απορροή, είτε σε αέρια μορφή λόγω εξαέρωσης ή απονιτροποίησης. Το αμμωνιακό άζωτο βρίσκεται υπό μορφή κατιόντος (NH_4^+) και προσροφάται από την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια των εδαφικών κolloειδών ή στους ενδοκρυσταλλικούς χώρους των 2:1 ορυκτών και έτσι δεν υφίσταται έκπλυση παρά μόνο στα χονδρόκοκκα εδάφη, τα οποία έχουν πολύ μικρή I.A.K. Τα NO_3^- αντίθετα κινούνται ελεύθερα στο εδαφικό διάλυμα και στις περιπτώσεις που επικρατεί καθοδική κίνηση του νερού έχουμε απώλεια αυτού από το έδαφος (Mengel, 1992).

Οι παράγοντες που επιδρούν στην έκπλυση είναι ο τύπος του εδάφους, οι κλιματικές συνθήκες, η φυτική κάλυψη, το είδος της καλλιέργειας και η διαχείριση της αζωτούχου λίπανσης (Αναλογίδης, 2000).

Η απονιτροποίηση συμβάλλει στην απώλεια N_2 στην ατμόσφαιρα. Οι απώλειες με απονιτροποίηση παρατηρούνται με την παρουσία των μικροοργανισμών *Pseudomonas*, *Achromobacter* και *Micrococcus* σε pH 4,9-5,6 (απώλεια ως N_2O) ή pH 7,3-7,9 (N_2). Το άζωτο επίσης μπορεί να εξαερωθεί με τη μορφή αμμωνίας.

Οι πυρκαγιές επηρεάζουν τον κύκλο του αζώτου άμεσα, γιατί μεγάλες ποσότητες N χάνονται με την καύση της οργανικής ουσίας και έμμεσα εξαιτίας των φυσικοχημικών μεταβολών που υφίσταται το έδαφος από τις πυρκαγιές. Με την καύση της οργανικής ουσίας παράγονται μικρές ποσότητες NH_3 και μεγάλες ποσότητες αερίου N_2 ή οξειδίων του αζώτου, που επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα (Μήτσιος, 2004).

1.4. Άζωτο και περιβάλλον

Οι επιβλαβείς επιπτώσεις του αζώτου στο φυσικό περιβάλλον απορρέουν από τη διατάραξη της οικολογικής ισορροπίας εισροών-εκροών αζώτου στο έδαφος, τα ύδατα και την ατμόσφαιρα, λόγω της πλεονασματικότητας των εισροών, οι οποίες κατά τα τελευταία έτη εξελίσσονται ανοδικά. Μία από τις πηγές εισροών του N, όχι όμως η μοναδική, είναι η εντατική γεωργοκτηνοτροφική εκμετάλλευση, που συνεπάγεται αυξημένη χρησιμοποίηση αζωτούχων λιπασμάτων και παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ζωικών αποβλήτων καθώς και διάφορες αστικές δραστηριότητες, όπως η καύση γαιανθράκων, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κλπ (Αναλογίδης, 2000).

Νιτρούπανση και ευτροφισμός

Οι μεγάλες συγκεντρώσεις των νιτρικών και των φωσφορικών ιόντων στα ύδατα, αποτελούν τα κύρια αίτια δημιουργίας του φαινομένου του ευτροφισμού. Ο ευτροφισμός έχει διαταράξει σε μεγάλο βαθμό την οικολογική ισορροπία των υδατικών οικοσυστημάτων στον πλανήτη μας (Μήτσιος, 2004).

Το φαινόμενο οφείλεται στην αύξηση, πέραν ενός ορίου, της συγκέντρωσης των θρεπτικών ιόντων στα υδατικά συστήματα, που προκαλεί τη μαζική και κατακόρυφη αύξηση πληθυσμών των φωτοσυνθετικών μονοκυττάρων φυκών. Ο ευτροφισμός, εξαιτίας της απορρόφησης φωτισμού και οξυγόνου που προκαλεί, οδηγεί σε εξαφάνιση της μακροφυτικής υδρόβιας βλάστησης, και τελικά στη θανάτωση των ενάλιων ζωικών πληθυσμών. Μετά από μία «έκρηξη» ανάπτυξης φυτοπλαγκτού, ακολουθεί νέκρωση και αποσύνθεση της τεράστιας αυτής βιομάζας, η οποία δημιουργεί αναερόβιες συνθήκες. Το

ακραίο τελικό αποτέλεσμα μπορεί να είναι ένας απολύτως «νεκρός» υδατικός σχηματισμός. Επιπλέον, μερικά είδη φυκών είναι τοξικά και μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στα ζώα και τον άνθρωπο. Καθοριστικοί παράγοντες του ευτροφισμού στα μεν θαλάσσια ύδατα είναι το άζωτο και στα γλυκά ύδατα ο φωσφόρος (Αναλογίδης, 2000).

Εκπομπές αμμωνίας και οξειδίων N στην ατμόσφαιρα:

Η απώλεια και έκλυση N στην ατμόσφαιρα από γεωργικά συστήματα σε ρυπογόνες χημικές μορφές λαμβάνει χώρα με την εξαέρωση της αμμωνίας και με τις εκπομπές οξειδίων N, τα οποία παράγονται κατά την απονιτροποίηση, καθώς και κατά τη νιτροποίηση.

Ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας με αμμωνία (NH₃) συνεπάγεται τις ακόλουθες ζημιογόνες επιπτώσεις:

- Οξίνιση του εδάφους κατά την επαναφορά και εναπόθεση της αμμωνίας με τις βροχοπτώσεις και τη συνακόλουθη νιτροποίηση του αμμωνιακού N στο έδαφος.
- Πρόκληση όξινης βροχής κατά την αντίδραση της αμμωνίας στην ατμόσφαιρα με οξείδια του θείου και την παραγωγή θειικής αμμωνίας.
- Αύξηση της επιβάρυνσης με NO₃-N του εδαφικού ύδατος και έμμεση συμβολή στο φαινόμενο του ευτροφισμού.

Οι εκπομπές οξειδίων N στην ατμόσφαιρα είναι το αποτέλεσμα μικροβιακών διεργασιών στο έδαφος. Ένα μικρό ποσοστό του NH₄-N μετατρέπεται σε N₂O και NO κατά τη νιτροποίηση, ενώ τα ίδια αέρια παράγονται σε μεγαλύτερες ποσότητες κατά την απονιτροποίηση του NO₃-N (Αναλογίδης, 2000). Τα εδάφη, σε φυσική κατάσταση και καλλιεργούμενα, είναι η κύρια πηγή του N₂O με ποσοστιαία συμμετοχή 65% στο σύνολο των εκπομπών (Prather *et.al.*, 1995).

Το N₂O, όπως και το CO₂ και το CH₄ απορροφά την υπέρυθρη ακτινοβολία του ήλιου και τη μετατρέπει σε θερμότητα, συμμετέχοντας, με αυτόν τον τρόπο, στην ολική αύξηση της θέρμανσης της ατμόσφαιρας. Το N₂O αν και βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις από ότι το CO₂, παρόλα αυτά μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα, γιατί είναι 310 φορές πιο αποτελεσματικό από το CO₂.

Η αύξηση του N₂O στην ατμόσφαιρα, είναι δυνατόν να μειώσει τη συγκέντρωση του O₃ στην οζονόσφαιρα, επιτρέποντας έτσι τη διέλευση περισσότερης υπεριώδους ακτινοβολίας (Laegreid *et.al.*, 1999).

1.5. Το άζωτο στη θρέψη των φυτών

1.5.1. Οι απαιτήσεις των φυτών σε άζωτο

Το ετήσιο ισοζύγιο του αζώτου είναι η βάση για τον καθορισμό της λίπανσης ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία. Το είδος των φυτών και ο γενότυπός τους, οι εδαφικές και κλιματικές συνθήκες καθορίζουν την απόδοση και επομένως τις ανάγκες των φυτών σε άζωτο (Μήτσιος, 2004).

Γενικά, η περιεκτικότητα του N στα φυτά κυμαίνεται από 1,50- 6,00% της ξηράς ουσίας, με ένα μέσο εύρος επάρκειας 2,50-3,50%. Το χαμηλότερο εύρος επάρκειας παρατηρείται στις δενδρώδεις καλλιέργειες και είναι 1,80-2,20%, ενώ το υψηλότερο στα ψυχανθή και κυμαίνεται από 4,80-5,50% (Benton Jones Jr., 1998). Όσον αφορά στη κρίσιμη (οριακή) συγκέντρωση του N, αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, το στάδιο ανάπτυξης του φυτού, το αναλυόμενο φυτικό όργανο και την ηλικία του φυτού.

Το όριο επάρκειας του ολικού N στο έδαφος για τις περισσότερες καλλιέργειες κυμαίνεται από 200-250 mg N/g εδάφους (Θεοδώρου και Πασχαλίδης, 1999), ενώ το όριο για το NO₃-N από 21-40 mg N/kg εδάφους (Κουκουλάκης, 1991).

Σε πειραματική καλλιέργεια αραβόσιτου διαπιστώθηκε ότι, όταν η συγκέντρωση του ανόργανου N είναι πάνω από 10 mg/100g εδάφους, δε διαφοροποιούνται οι αποδόσεις. Σε τιμές 5-10 mg/100g εδάφους επηρεάζονται τόσο η απόδοση όσο και οι άλλοι παράμετροι και, όταν συγκέντρωση είναι κάτω από 5 mg/100g εδάφους, τότε η απόδοση μειώνεται σημαντικά (Μπλαδενόπουλος *et.al.*, 1990).

Έρευνα σε αργιλώδη εδάφη της Θεσσαλίας έδειξε πως η αζωτούχος λίπανση και ιδιαίτερα δόσεις ≥ 12 kg N/στρ. αύξησαν σημαντικά το βάρος των ριζών των ζαχαρότευτλων (Τσιάλτας και Μασλάρης, 2010).

Πίνακας 1. Όρια επάρκεια ολικού N στο έδαφος

mg N / 100 g εδάφους	Χαρακτηρισμός εδάφους
μέχρι 150	Ανεπαρκώς εφοδιασμένο
150 - 200	Μέτρια εφοδιασμένο
200 - 250	Επαρκώς Εφοδιασμένο
> 250	Υπερεπαρκής

(Πασχαλίδης, 2006).

Σύμφωνα με τους Κουκουλάκη *et.al.* (1994) η παρουσία στο έδαφος σε βάθος 0-30 εκ. περισσότερο από 50 ppm NO₃-N αποτελεί ένδειξη επάρκειας του στοιχείου για τη βαμβακοκαλλιέργεια.

Πίνακας 2. Όρια επάρκειας NO₃-N στο έδαφος

Μεγάλων Καλλιεργειών	Πολύ χαμηλή	0-3 ppm
NO ₃ -N	Ανεπαρκής	4-10 ppm
	Μέση	11-20 ppm
	Επαρκής	21-40 ppm
	Υπερεπαρκής	> 40 ppm
Θερμοκηπίων	Πολύ χαμηλή	0-10 ppm
NO ₃ -N	Ανεπαρκής	11-20 ppm
	Μέση	21-25 ppm
	Επαρκής	26-40 ppm
	Υπερεπαρκής	> 40 ppm

(Κουκουλάκης, 1991).

1.5.2. Η πρόσληψη του αζώτου από τα φυτά

Η πρόσληψη του αζώτου από τα φυτά γίνεται υπό τη νιτρική μορφή (NO₃⁻) στο μεγαλύτερο ποσοστό, αλλά και υπό την αμμωνιακή μορφή (NH₄⁺) ανάλογα με το pH, τη θερμοκρασία και άλλους παράγοντες. Σε ουδέτερο pH τα φυτά προσλαμβάνουν το N ως NH₄⁺, ενώ σε όξινο ως NO₃⁻ (Rao and Rains, 1976). Η χαμηλή πρόσληψη των NO₃⁻ ανιόντων σε υψηλό pH οφείλεται βασικά στην ανταγωνιστική δράση των υδροξυλίων (OH⁻) σε βάρος των NO₃⁻. Κατά τους Mills and Benton-Jones (1996) το μεν NH₄⁺ προσδίδει στα φυτά το χαρακτηριστικό πράσινο χρώμα, ενώ τα NO₃⁻ συμβάλουν στην αύξηση της βιομάζας. Συνήθως, η πρόσληψη του NO₃⁻-N πραγματοποιείται με υψηλούς ρυθμούς δεδομένου ότι τα φυτά έχουν υψηλές απαιτήσεις σε N.

Όσον αφορά στον τρόπο πρόσληψης του N, αυτός μπορεί να είναι παθητικός και επιτυγχάνεται με την παρέμβαση ενός φορέα μεταφοράς. Η παθητική πρόσληψη εξαρτάται από τη συγκέντρωση των NO₃⁻ στο εδαφοδιάλυμα. Από σχετικά πειράματα, προκύπτει ότι η παθητική πρόσληψη των NO₃⁻ μπορεί να καθορίζει το ρυθμό της τελικής πρόσληψης του N από τα φυτά. Αυτό προκύπτει από τη δράση του NH₄⁺-N, το οποίο μειώνει την πρόσληψη του NO₃⁻, προκαλώντας έτσι την παθητική πρόσληψη του (Deane-Drummond, 1983).

Ωστόσο, για να συμβεί κάτι τέτοιο, θα πρέπει να αποδειχτεί ότι το NH_4^+ προσλαμβάνεται «ενεργητικώς», γεγονός που κατά τους Mengel and Kirkby (1987) δεν έχει ακόμη επιβεβαιωθεί.

Σύμφωνα με τους Clarkson and Warner (1979), η θερμοκρασία επιδρά κατά διάφορο τρόπο στην πρόσληψη των δύο μορφών του N. Έτσι, από ορισμένες καλλιέργειες, το NH_4^+ προσλαμβάνεται πιο εύκολα κάτω από την επίδραση χαμηλών θερμοκρασιών όταν τα δύο ιόντα (NO_3^- και NH_4^+) χορηγούνται ισόποσα.

Η πρόσληψη του N από τα ψυχανθή αποτελεί ειδική περίπτωση. Το συμβιωτικό βακτήριο *Rhizobium*, που αναπτύσσεται στις ρίζες των φυτών, σχηματίζει αποικίες (όγκους) όπου το ατμοσφαιρικό άζωτο δεσμεύεται από τα βακτήρια και περνάει αμέσως στο φυτό ξενιστή σε αμμωνιακή μορφή. Έτσι αυξάνεται ο εφοδιασμός με νιτρικό ή αμμωνιακό N πέρα από εκείνο που προσλαμβάνεται από το έδαφος με το ριζικό σύστημα του φυτού.

Όλα τα φυτά μπορούν επίσης να απορροφήσουν το N με τη μορφή μικρών οργανικών μορίων. Το ποσό που λαμβάνεται από τις ρίζες σαν αμινοξέα είναι πάντοτε ελάχιστο αλλά αξιοσημείωτα ποσά μπορούν να απορροφηθούν από τα φύλλα όταν χρησιμοποιείται ουρία διαφυλλικά (Τσικαλάς, 1994).

1.5.3. Έλλειψη αζώτου

1.5.3.1. Συνθήκες που ευνοούν την έλλειψη αζώτου

Η έλλειψη του αζώτου παρατηρείται κυρίως στα αμμώδη εδάφη και ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις ή άρδευση, λόγω έπλυσης των νιτρικών ιόντων. Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία επηρεάζουν την ορυκτοποίηση και ακινητοποίηση του αζώτου (Κεφ. 1.3.). Άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με την έλλειψη του N είναι το pH, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ), η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία και η αλληλεπίδραση του N με άλλα στοιχεία (Πασχαλίδης, 2006).

1.5.3.2. Συμπτώματα έλλειψης αζώτου

Τα συμπτώματα έλλειψης N εμφανίζονται αρχικά στα παλιά φύλλα, σαν μια γενικευμένη χλόρωση. Καθώς οξύνεται η έλλειψη, η χλόρωση επεκτείνεται και στα

νεότερα φύλλα, ενώ στα παλιά εμφανίζονται νεκρωτικές περιοχές οι οποίες γενικεύονται και σε πολύ σοβαρές ελλείψεις ξηραίνεται όλο το έλασμα.

Το γεγονός ότι τα συμπτώματα της έλλειψης του αζώτου εμφανίζονται πρώτα στα παλιά φύλλα, οφείλεται στην υψηλή κινητικότητα του στοιχείου στο φυτό. Σε περιπτώσεις έλλειψης, το N κινείται προς τα νεότερα φύλλα, τα οποία εμφανίζουν υψηλό βαθμό αύξησης (μεταβολισμού) με συνέπεια να έχουν υψηλότερες απαιτήσεις σε N.

Γενικά, τα επί μέρους συμπτώματα της έλλειψης N έχουν ως εξής: Τα φύλλα είναι μικρού μεγέθους, ενώ ο χρωματισμός τους είναι πρασινωπός προς ωχρός (χλώρωση). Η ανάπτυξη του φυτού πραγματοποιείται με μειωμένους ρυθμούς και γενικά εμφανίζεται μία καχεξία. Επί πλέον, παρατηρείται μια πρόιμη πτώση των φύλλων. Επίσης, διαπιστώνεται μία αναστολή στην ανάπτυξη των ριζών και ο σχηματισμός νέων βλαστών και κλαδίσκων περιορίζεται σημαντικά. Οι αποδόσεις μειώνονται και η ποιότητα υποβαθμίζεται (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003).

Στα πυρηνόκαρπα η έλλειψη αζώτου εκδηλώνεται με καχεκτική βλάστηση, με καρπόπτωση και με προσκόλληση του πυρήνα στη σάρκα (Πασχαλίδης, 2006).

Στα σιτηρά και στον αραβόσιτο η έλλειψη αζώτου εκτός από μείωση της απόδοσης προκαλεί υποβάθμιση της ποιότητας του καρπού λόγω μειωμένης περιεκτικότητας και χαμηλής ποιότητας πρωτεϊνών (Αναλογίδης, 2000).

1.5.3.3. Αντιμετώπιση έλλειψης αζώτου

Η αντιμετώπιση της έλλειψης αζώτου θα πρέπει να γίνεται αρχικά με τη βελτίωση εκείνων των ιδιοτήτων του εδάφους και των καλλιεργητικών τεχνικών, οι οποίες επηρεάζουν την έκπλυση των νιτρικών ιόντων, την εξαέρωση της αμμωνίας και την απονιτροποίηση του N (Πασχαλίδης, 2006). Η υιοθέτηση της κλασματικής λίπανσης, η προσεκτική επιλογή του χρόνου εφαρμογής των λιπασμάτων και της δόσης τους, μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο έλλειψης N λόγω της έκπλυσης νιτρικών (Πιστόλης, 2004).

Οι απαιτήσεις των φυτών σε άζωτο διαφέρουν ανάλογα με την καλλιέργεια. Για τα φυλλώδη λαχανικά συνίσταται η χορήγηση 10-15 kg N/στρ., για τα σολανώδη 10-25 kg N/στρ., για τα πυρηνόκαρπα 15-25 kg N/στρ. και για το βαμβάκι 10-17 kg N/στρ. (Θεοδώρου και Πασχαλίδης, 1999).

Η χορήγηση N στα φυτά μπορεί να γίνει είτε με οργανικά λιπάσματα είτε με χημικά. Για την εφαρμογή τους απαιτείται η γνώση της υπάρχουσας κατάστασης, όσον αφορά τη

συγκέντρωση των στοιχείων στο έδαφος. Η εδαφοανάλυση και η φυλλοδιαγνωστική μας παρέχουν πληροφορίες για την θρεπτική κατάσταση του εδάφους και για τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών (Χουλιάρης, 2002).

Τα αζωτούχα λιπάσματα αμμωνιακής μορφής, χρησιμοποιούνται στα ασβεστούχα (αλκαλικά) εδάφη, ενώ τα αζωτούχα λιπάσματα νιτρικής μορφής στα όξινα εδάφη.

Θεική αμμωνία:

Περιέχει 21 % άζωτο (N). Είναι το πιο συνηθισμένο βασικό λίπασμα σε ασβεστούχες περιοχές και χρησιμοποιείται πριν τη σπορά ή τη φύτευση. Στο έδαφος προκαλεί οξίνιση, όπως και όλα τα λιπάσματα που περιέχουν ιόντα αμμωνίου (NH_4^+). Δεν χρησιμοποιείται σε όξινα εδάφη.

Νιτρική αμμωνία:

Περιέχει 33,5 % άζωτο. Για την αποφυγή της οξίνισης του εδάφους σε υγρές περιοχές συνιστάται η χρησιμοποίηση ασβεστόλιθου μέχρι 50 kg ανά 100 kg νιτρικής αμμωνίας (ασβεστούχος νιτρική αμμωνία).

Ασβεστούχος νιτρική αμμωνία:

Περιέχει 15,5 - 20,6 % άζωτο.

Νιτροθεική αμμωνία:

Περιέχει 26 % άζωτο. Η χημική συμπεριφορά του λιπάσματος είναι όμοια με της νιτρικής αμμωνίας.

Νιτρικό νάτριο - Νίτρο της Χιλής:

Το διάλυμά του είναι ουδέτερο. Περιέχει 16 % άζωτο. Όπως και όλα τα λιπάσματα νιτρικής μορφής, είναι ταχείας δράσης γιατί είναι απευθείας αφομοιώσιμα από τα φυτά. Το νιτρικό κλάσμα του λιπάσματος (NO_3^-) μετακινείται γρηγορότερα από το νάτριο (Na^+) στο εδαφικό διάλυμα με αποτέλεσμα την άνοδο του pH. Το νάτριο επιδρά αρνητικά στις ιδιότητες του εδάφους (καταστροφή της δομής του εδάφους, δημιουργία κρούστας).

Νιτρικό ασβέστιο:

Περιέχει 15,5 % άζωτο και 28 % οξείδιο του ασβεστίου (CaO) ή 19,5 % ασβέστιο (Ca). Είναι πολύ υγροσκοπικό λίπασμα με αλκαλική αντίδραση στο έδαφος. Η επιφανειακή λίπανση είναι συνήθως ωφέλιμη για τα φυτά. Είναι το λίπασμα που προσλαμβάνεται

περισσότερο από τα φυτά κατά τις περιόδους ξηρασίας. Είναι το πιο συνηθισμένο λίπασμα σε μη ασβεστούχες περιοχές.

Ουρία:

Περιέχει 45-46 % άζωτο. Είναι πολύ ευδιάλυτο οργανικό λίπασμα, όπου το άζωτο μετατρέπεται πολύ γρήγορα σε αμμωνιακό και σε συνέχεια σε νιτρικά άλατα. Στο έδαφος έχει όξινη αντίδραση (Θεοδώρου και Πασχαλίδης, 1999).

Οργανικά λιπάσματα:

Οργανικά λιπάσματα είναι η κοπριά, το κομπόστ, η τύρφη και τα ψυχανθή. Η κοπριά των βοοειδών περιέχει 0,29-0,30% N, των αλόγων 0,44-0,55% N, των χοίρων 0,60-0,70% N, των προβάτων 0,60% N, των αιγών 0,40% N και των κοτόπουλων 1,63% N. Ένα κομπόστ καλής ποιότητας περιέχει 0,20-0,30% N και περισσότερο από 20% οργανική ουσία. Όσον αφορά τη χλωρή λίπανση, ο βίκος και τα κουκιά ευδοκιμούν σε ασβεστούχα εδάφη και το λούπινο σε όξινα και ελαφρά. Το ετήσιο τριφύλλι είναι κατάλληλο για ελαφρά εδάφη, ενώ το σινάπι για εδάφη βαριάς μηχανικής σύστασης. Η σπορά των φυτών σε ξηρές και νότιες περιοχές με ήπιο φθινόπωρο θα πρέπει να γίνεται νωρίς το φθινόπωρο με τα πρωτοβρόχια και σε συνδυασμό με κατάλληλη λίπανση (Πασχαλίδης, 2006).

1.5.4. Περίσσεια αζώτου

Στην περίπτωση της περίσσειας αζώτου τα φύλλα των φυτών παίρνουν ένα βαθύ πράσινο χρώμα. Το φύλλωμα γίνεται χυμώδες και είναι επιδεκτικά στις ασθένειες και στις επιδρομές των εντόμων. Τα φυτά μπορούν εύκολα να καταπονηθούν και είναι ευαίσθητα στην ανομβρία. Οι καρποί μπορεί να αναπτύξουν την ξερή κορυφή (blossom-end rot) και η καρπόδεση να είναι φτωχή (Γσικαλάς, 1994).

Είναι γνωστό ότι τα φυτά, ενώ μπορούν να αποταμιεύουν υψηλά επίπεδα νιτρικών ιόντων, δεν μπορούν να κάνουν το ίδιο με τα αμμωνιακά ιόντα. Εκτιμάται ότι η συσσώρευση του NH_4^+ , καθώς και άλλων ιόντων οφείλεται στο ότι το φυτό, εκείνη τη χρονική στιγμή, δε διαθέτει την απαιτούμενη ενέργεια, ώστε να τα ενσωματώσει σε οργανικές μορφές (Πιστόλης, 2008).

Αν υπάρχει περίσσεια αμμωνιακού αζώτου τότε υπάρχει κίνδυνος να εκδηλωθεί τοξικότητα με αποτέλεσμα να σπάσουν οι αγωγοί ιστοί και έτσι να περιοριστεί η πρόσληψη

του νερού. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί έλλειψη Ca (Τσικαλάς, 1994). Η συσσώρευση στα φύλλα υψηλών συγκεντρώσεων αμμωνιακών ιόντων δημιουργεί στα ελάσματα τοξικά συμπτώματα, όπως νεκρώσεις (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003).

Κατά την Παρασκευή της ουρίας, με την υπερύψωση της θερμοκρασίας, παράγεται διουρία σε ποσοστό που μπορεί να υπερβαίνει το όριο ασφαλείας για τις καλλιέργειες (1,5%). Αυτό το όριο ασφαλείας αφορά την εφαρμογή της ουρίας στο έδαφος.

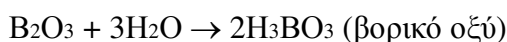
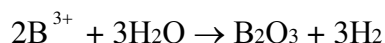
Στις διαφυλλικές εφαρμογές, για να αποφευχθεί η τοξικότητα, η ουρία που χρησιμοποιείται πρέπει να περιέχει λιγότερο από 0,3% διουρία, ιδιαίτερα σε ευαίσθητες καλλιέργειες όπως τα εσπεριδοειδή.

Η ύπαρξη διουρίας μπορεί να γίνει γνωστή μέσω της αντίδρασης που είναι γνωστή ως αντίδραση διουρίας: Σε δοκιμαστικό σωλήνα τοποθετούμε μερικά κυβικά εκατοστά διαλύματος NaOH (30%) και προσθέτουμε λίγες σταγόνες αραιού διαλύματος CuSO₄ (1%). Αναταρασόμενο το παρασκεύασμα γίνεται μπλε σκούρο. Κρατώντας το σωλήνα κεκλιμένο, στάζουμε με προσοχή το διάλυμα της ουρίας, έτσι που να μην αναμειχθεί με το περιεχόμενο του σωλήνα. Σε λίγο, στη ζώνη επαφής των δύο υγρών δημιουργείται μια στιβάδα με χρώμα ιώδες-κόκκινο, γεγονός που πιστοποιεί την ύπαρξη διουρίας.

Αρκετές καλλιέργειες, όπως το καλαμπόκι, ανέχονται υψηλά ποσοστά διουρίας. Για την αποφυγή τοξικότητας (διαφυλλική εφαρμογή ουρίας) συνίσταται η προσθήκη 10 g θειικού σιδήρου σε κάθε 100 L ψεκαστικού διαλύματος (Πιστόλης, 2008).

Κεφάλαιο 2: Το βόριο

Το βόριο (B) ανήκει στην ομάδα IIIA του περιοδικού συστήματος. Έχει ατομικό αριθμό 5 και ατομικό βάρος 10,8. Δεν έχει μεταλλικές ιδιότητες και είναι ηλεκτροαρνητικό στοιχείο. Έχει σταθερό σθένος +3 και πολύ μικρή ιοντική ακτίνα της τάξεως των $0,88 \times 10^{-10}$ m. Στη φύση απαντάται πάντοτε σε συνδυασμό με το οξυγόνο με τρεις δεσμούς και δίνει το οξείδιο του βορίου (B_2O_3) που διαλύεται στο νερό και από το οποίο προκύπτει το βορικό οξύ:



Το βόριο πιστεύεται ότι βρίσκεται ως αδιάστατο H_3BO_3 ή ως ανιόν στο εδαφικό διάλυμα. Σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις, το H_3BO_3 διασπάται, γίνεται ένυδρη ουσία και σχηματίζει υδροξείδιο του βορίου ($B(OH)_4^-$). Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του βορικού οξέως θα σχηματίσουν ιόντα βορίου με πολυμερή μορφή, όπως το τετραβορικό ιόν $B_4O_7^{2-}$.

Το βορικό οξύ έχει μεγάλη πτητικότητα ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι πολύ ευκίνητο κυρίως σε εδάφη που είναι φτωχά σε κολλοειδή της αργίλου και βρίσκεται σε μεγαλύτερες ποσότητες σε διαλύματα παρά σε ορυκτά. Σε τιμές pH κάτω από την τιμή 7, η μορφή του βορίου που συναντάται είναι αυτή του βορικού οξέως, αλλά καθώς η τιμή του pH ανυψώνεται η συγκέντρωση των ιόντων $B(OH)_4^-$ αυξάνει. Τα ιόντα $B(OH)_4^-$ αντιδρούν και με τα επιφανειακά OH^- της αργίλου σχηματίζοντας ένα σύμπλοκο βορίου με δύο OH^- (Μήτσιος, 2004).

Η κατανομή του βορίου στο στερεό φλοιό της γης είναι ανομοιόμορφη. Σε υψηλές γεωλογικές θερμοκρασίες σχηματίζει βοριοπυριτικά και άνυδρα βορικά ορυκτά, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες ένυδρα βορικά ορυκτά. Τα κοινά βορικά ορυκτά παρουσιάζουν αρκετή διαλυτότητα, ώστε οι κύριοι σχηματισμοί τους είναι ιζηματογενείς αποθέσεις, όπου το βόριο είναι ενσωματωμένο στο αργιλικό κλάσμα. Η κατανομή του στα πυριγενή πετρώματα είναι πολύ ακανόνιστη με σχετικά μεγαλύτερη παρουσία στους γρανίτες παρά στους βασάλτες. Γενικά, η περιεκτικότητα βορίου των πυριγενών πετρωμάτων αυξάνει με την οξύτητα του πετρώματος. Μεταξύ των κοινών ορυκτών των πυριγενών πετρωμάτων το

βόριο εντοπίζεται περισσότερο στις μαρμαρυγίες, όπου η ποσοστιαία συμμετοχή του είναι μερικά δέκατα του εκατοστού (Αναλογίδης, 2007).

Άλλα ορυκτά που περιέχουν Βόριο είναι: ο κερνίτης, ένυδρο άλας βορικού οξέος ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), ο κολεμανίτης ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ο κοτοΐτης (σύμπλοκα με Mg και Fe, Mg_2FeBO_5 και $\text{Mg}_3(\text{BO}_3)_2$) και ο τουρμαλίνης (Μήτσιος, 2004).

Ο τουρμαλίνης είναι το κυριότερο ορυκτό που βρίσκεται στα εδάφη και περιέχει βόριο. Είναι αδιάλυτο και ανθεκτικό στην αποσάθρωση με αποτέλεσμα τη βραδεία απελευθέρωση του βορίου (Havlin *et.al.*, 1999). Περιέχει διάφορες αναλογίες σε σίδηρο, αργίλιο, μαγνήσιο, ασβέστιο, λίθιο, νάτριο (Τσιτσιάς, 1995) και απαντάται εντοπισμένο σαν δευτερεύον ορυκτό των γρανιτικών πετρωμάτων (Αναλογίδης, 2007). Κατά την αποσάθρωσή του, το βόριο απελευθερώνεται ως βορικό ανιόν ή ως βορικό οξύ (Παναγιωτόπουλος, 2008).

Πίνακας 3. Κατανομή του βορίου στα πετρώματα του στερεού φλοιού της Γης (σε ppm).

Πυριγενή πετρώματα	ppm
Δουνίτες, περιδοτίτες, πυροξενίτες	1-5
Βασάλτης, Γάβρος	5-20
Διορίτες, Συενίτες	9-25
Όξινα πετρώματα: Γρανίτες, Γνεύσιοι	10-30
Όξινα πετρώματα: Ηφαιστειογενή	15-25
Αργιλικά ιζήματα	120
Φυλλίτες	130
Ψαμμίτες	30
Ασβεστόλιθοι, Δολομίτες	20-30

(Kabata - Pendias and Pendias, 2001).

Στο θαλάσσιο ύδωρ το βόριο κατέχει ποσοτικά τη 12η θέση μεταξύ των εν διαλύσει χημικών στοιχείων, με μέση συγκέντρωση που ανέρχεται στα 4,6 ppm. Η τάση ατμών του H_3BO_3 πάνω από την επιφάνεια των θαλασσών υπολογίζεται στα 2mm στήλης Hg, έτσι ώστε το στοιχείο μπορεί να παραληφθεί από την ατμόσφαιρα, σε σταγονίδια, ή και σαν όξινος ατμός και να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις στο εσωτερικό των ηπειρών.

Από αυτή την πηγή και από τη διάβρωση των πετρωμάτων το βόριο κατευθύνεται προς τους ιζηματογενείς σχηματισμούς σε ποσότητες που φαίνονται μεγάλες σε σχέση με την περιεκτικότητα του στα πυριγενή πετρώματα (Αναλογίδης, 2007).

2.1. Μορφές του βορίου στο έδαφος

Στα εδάφη το βόριο απαντάται: ως αδιάστατο βορικό οξύ H_3BO_3 , ως ιόντα $B(OH)_4^-$, ως δομικό συστατικό των πυριτικών πετρωμάτων, ως σύμπλοκο με στοιχεία των ορυκτών στα οποία είναι προσκολλημένο καθώς και δεσμευμένο στην οργανική ουσία του εδάφους και στα κολλοειδή της αργίλου (Gardiner and Miller, 2004).

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε βόριο κυμαίνεται από 2 μέχρι 100 ppm, τα περισσότερα όμως εδάφη περιέχουν λιγότερο από 3 ppm (Θεοδώρου και Πασχαλίδης, 1999). Κατά άλλους, η ολική συγκέντρωση βορίου στα εδάφη ποικίλει μεταξύ 2 και 200 ppm και συχνά κυμαίνεται από 7 έως 80 ppm. Το βόριο που είναι σε μορφές αφομοιώσιμες για τα φυτά κυμαίνεται συνήθως από 0,4 έως 5 ppm (Havlin *et.al.*, 1999).

Η κατανομή του ολικού βορίου του εδάφους εξαρτάται από τη φύση και την ηλικία του μητρικού πετρώματος. Μεταξύ του ολικού βορίου του εδάφους και του ολικού βορίου του μητρικού πετρώματος, υπάρχει μία στατιστικώς σημαντική συσχέτιση που υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$\text{Βόριο (ολικό έδαφος)} = 0,44 (\text{Βόριο}) (\text{μητρικού πετρώματος}) + 27,3$$

Σύμφωνα με άλλες έρευνες ένα σημαντικό ποσοστό του ολικού βορίου των εδαφών που φθάνει το 60%, απαντάται στο κλάσμα της αργίλου (Αναλογίδης, 2007).

2.2. Συγκράτηση του βορίου από τα κολλοειδή του εδάφους

Όπως προαναφέρθηκε το ποσοστό βορίου του εδάφους που είναι διαθέσιμο στα φυτά είναι χαμηλό (από 0,4 έως 5 ppm). Αυτό οφείλεται κυρίως στη συγκράτησή του από τα κολλοειδή της αργίλου αλλά και από τα οργανικά κολλοειδή. Έρευνες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το στοιχείο βόριο προσροφάται από αργιλώδεις επιφάνειες με τον τρόπο που προσροφούνται τα βαρέα μέταλλα (Μήτσιος, 2004).

Όταν διάλυμα βορίου προστίθεται σε έδαφος, μέρος του στοιχείου συγκρατείται στη στερεή φάση και μέρος παραμένει στο διάλυμα (Barber, 1995). Οι Biggar and Fireman (1960) ανάφεραν ότι η προσρόφηση του προστιθέμενου βορίου ακολουθεί την εξίσωση Landgmuir και προσδιόρισαν τιμές μέγιστης προσρόφησης για τέσσερα εδάφη, που κυμαίνονταν μεταξύ 7,3 και 21,3 mg/kg.

2.2.1. Προσρόφηση βορίου από τα κολλοειδή της αργίλου

Η προσρόφηση του βορίου εξαρτάται από τον τύπο ορυκτών της αργίλου του εδάφους καθώς και από τα οξείδια του Fe και Al. Σύμφωνα με τους Sims and Bingham (1967) η ικανότητα των διαφόρων ορυκτών της αργίλου να συγκρατούν το βόριο ακολουθεί την εξής σειρά:

Καολινίτης < Μοντοριλονίτης < Ιλλύτης

Η προσρόφηση του B αυξάνει καθώς το pH ανέρχεται πάνω από την τιμή 4 και προσεγγίζει ένα μέγιστο σε pH 8 ή 9, για να μειωθεί εκ νέου σε ακόμη υψηλότερες τιμές pH (Sims and Bingham, 1968). Σε τιμές pH μεγαλύτερες από 8 ή 9 η προσρόφηση του βορίου ελαττώνεται λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης OH^- τα οποία ανταγωνίζονται τα βορικά ανιόντα (Τσαντήλας *et.al.*, 1994).

Έχει παρατηρηθεί ότι τα πολυπύρρηνα βορικά ιόντα συγκρατούνται ισχυρότερα από τα απλά ιόντα με αυξημένη συγκράτηση στους 80°C και μειωμένη στους 15°C . Το πρόσφατα σχηματιζόμενο ίζημα $\text{Al}(\text{OH})_3$, προσροφά μεγάλες ποσότητες βορίου. Η προσρόφηση όμως αυτή μειώνεται σημαντικά μετά παρέλευση χρονικού διαστήματος από 20' μέχρι 7 ημέρες.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι το βόριο που δεσμεύεται από τα εδάφη μπορεί να συσχετιστεί με την μεταβολή στο ανταλλάξιμο Al κατά την ασβέστωση. Αυτό δείχνει ότι το $\text{Al}(\text{OH})_3$ είναι μια από τις κυριότερες ενώσεις που προσροφούν το βόριο στα εδάφη. Όλα τα υλικά ασβέστωσης αντιδρούν με τα όξινα κολλοειδή του εδάφους με αποτέλεσμα το ασβέστιο και το μαγνήσιο να αντικαθιστούν το υδρογόνο και το αργίλιο των κολλοειδών του εδάφους όπου συγκρατείται και το βόριο (Μήτσιος, 2004).

Η συγκράτηση του βορίου στην επιφάνεια των υδροξειδίων Fe και Al αποτελεί ένα σημαντικό φαινόμενο, το οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαλυτότητα του βορίου στα εδάφη. Έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη μίας γραμμικής συσχέτισης μεταξύ της ποσότητας βορίου που προσροφάται και της ποσότητας οξειδίων του Fe ή του Al (Αναλογίδης, 2007).

Η προσρόφηση του βορίου από τα υδροξείδια και τα οξείδια του Al και Fe εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του pH. Η μέγιστη προσρόφηση από τα υδροξείδια του Fe παρατηρείται σε τιμές pH από 8 μέχρι 9 και από τα υδροξείδια του Al σε τιμή pH 7 (Goldberg and Glaubig, 1985). Κατά τους Evans and Sparks (1983), οι ενώσεις του Al προσροφούν μεγαλύτερες ποσότητες βορίου σε σχέση με τις ενώσεις του Fe. Για την ερμηνεία του φαινομένου έχουν προταθεί δύο μηχανισμοί προσρόφησης:

- Μία απλή ανταλλαγή ιόντων της επιφάνειας των υδροξειδίων Al και Fe των οποίων τα OH^- ανταλλάσσονται με ιόντα $\text{B}(\text{OH})_4^-$.
- Μία αντίδραση συμπύκνωσης μεταξύ OH^- και $\text{B}(\text{OH})_4^-$ κατά την οποία παράγεται βορικό σύμπλοκο.

(Αναλογίδης, 2007).

Σύμφωνα με τους Προδρόμου και Λάκη (2010) η προσρόφηση του βορίου από υδροξείδια του αργιλίου ($\text{Al}(\text{OH})_3$) και του μαγγανίου ($\text{Mn}(\text{OH})_2$) ακολουθεί την εξίσωση Freundlich και εξαρτάται, εκτός από την κρυσταλλική κατάσταση των υδροξειδίων, τη συγκέντρωση των επιφανειακών OH^- , την τιμή του pH, τη συγκέντρωση των ανιόντων στο διάλυμα ισορροπίας και από την πορεία μεταβολής της κρυσταλλικής κατάστασης των υδροξειδίων, από το ρυθμό γήρανσής τους, τη μετάβασή τους δηλαδή σε πλέον σταθερές μορφές.

Το βόριο αν δε συγκρατηθεί από τις επιφάνειες της αργίλου μπορεί να εκπλυθεί και να μετακινηθεί στους κατώτερους ορίζοντες της εδαφικής κατανομής και να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τη διαθεσιμότητά του στα ανώτερα φυτά (Μήτσιοι, 2004).

2.2.2. Δέσμευση βορίου από τα οργανικά κολλοειδή

Είναι δεδομένο ότι η οργανική ουσία παίζει σημαντικό ρόλο στη διαθεσιμότητα του βορίου (Parker and Gardner, 1982). Το βόριο μπορεί να συγκρατηθεί και από την οργανική ουσία με την προϋπόθεση ότι τα καρβοξυλικά οξέα των χουμικών κολλοειδών θα ενωθούν με το βορικό οξύ. Σε όξινες ή κανονικές συνθήκες, τα χουμικά κολλοειδή δεσμεύουν ισχυρότερα το βόριο σε πολλά γεωργικά εδάφη. Τα σύμπλοκα του βορίου είναι μια αρκετά δυναμική πηγή διαθεσιμότητας βορίου στα φυτά, η οποία αυξάνει καθώς ανυψώνεται η τιμή του pH του εδάφους. Τα μίγματα βορίου και οργανικής ουσίας του εδάφους είναι

πιθανότητα μίγματα βορίου με ορυκτά. Στους σχιστόλιθους το βόριο μπορεί να αντικαταστήσει το Al^{3+} και το Si^{4+} (Μήτσιος, 2004).

2.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα του βορίου στο έδαφος

2.3.1. Η μηχανική σύσταση του εδάφους και ο τύπος της αργίλου

Τα αμμώδη εδάφη που είναι καλώς στραγγιζόμενα, περιέχουν βόριο σε μικρές συγκεντρώσεις. Στα εδάφη αυτά το βόριο είναι πολύ ευκίνητο και εκπλύνεται στα βαθύτερα στρώματα της εδαφικής κατανομής με έντονους ρυθμούς. Τα αργιλώδη εδάφη με καλή δομή συγκρατούν το προστιθέμενο βόριο για περισσότερο χρονικό διάστημα από ότι τα αργιλώδη εδάφη με κακή δομή, των οποίων τα κολλοειδή τους προσροφούν το βόριο εντονότερα. Η προσρόφιση του βορίου είναι μεγαλύτερη στους μαρμαρυγίες, λίγο μικρότερη στο μοντμοριλλονίτη και ελάχιστη στον καολινίτη (Μήτσιος, 2004).

Σύμφωνα με έρευνες, το διαθέσιμο κλάσμα του βορίου ως ποσοστό του ολικού βορίου είναι πάντοτε μεγαλύτερο σε εδάφη με χαμηλή, παρά με υψηλή περιεκτικότητα αργίλου. Ακόμη, οι υψηλές συγκεντρώσεις υδροξειδίων Fe και Al επιδρούν αρνητικά στη διαθεσιμότητα του βορίου, ειδικότερα όταν συνδυάζονται με υψηλές τιμές pH, λόγω υψηλής δεσμευτικής ικανότητας. Επίσης, η παρουσία $Mg(OH)_2$ φαίνεται να συμβάλει στην αύξηση της δέσμευσης του βορίου. Κατά συνέπεια το πηλίκο Mg/B στο έδαφος είναι σημαντικός δείκτης της πρόσληψης του βορίου από το έδαφος (Αναλογίδης, 2007).

2.3.2. Η αντίδραση του εδάφους

Η διαθεσιμότητα του βορίου στο έδαφος μειώνεται καθώς η τιμή του pH του εδάφους ανυψώνεται. Αύξηση του pH σε τιμές από 6,3 - 6,5 και πάνω συνεπάγεται απότομη μείωση του διαθέσιμου στα φυτά βορίου (Havlin *et.al.*, 1999). Η ασβέστωση στα όξινα εδάφη συχνά προκαλεί μια προσωρινή έλλειψη βορίου σε ευαίσθητα φυτά. Το πόσο ισχυρή θα είναι η έλλειψη αυτή εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους, το είδος του φυτού και από τη διάρκεια που διατηρείται το ασβέστιο στο έδαφος (Μήτσιος, 2004). Όταν η ασβέστωση πραγματοποιείται σε όξινα εδάφη ελαφράς μηχανικής σύστασης, φτωχά σε οργανική ουσία και με μέτρια περιεκτικότητα σε βόριο, αυξάνει την πιθανότητα έλλειψης βορίου στα φυτά (Αναλογίδης, 2007).

Η μείωση της διαθεσιμότητας του βορίου προκαλείται κυρίως από την επιφανειακή προσρόφηση του σε πρόσφατα κατακρημνιζόμενο $Al(OH)_3$, που σχηματίζεται από την εξουδετέρωση της οξύτητας, με μέγιστη συγκράτηση σε τιμή pH 7 (Havlin *et.al.*, 1999).

Όταν η ασβέστωση του εδάφους δεν είναι επαρκής, τότε παρατηρείται μείωση της διαθεσιμότητας του βορίου. Σημειώνεται ότι η έντονη ασβέστωση δεν οδηγεί πάντα σε αυξημένη προσρόφηση βορίου από το $Al(OH)_3$. Υψηλότερες τιμές pH ως αποτέλεσμα ασβέστωσης εδαφών πλούσιων σε σύμπλοκα Βορίου, μπορεί να ενθαρρύνουν τη διάσπασή τους και να ελευθερώσουν βόριο (Μήτσιοι, 2004).

2.3.3. Η οργανική ουσία του εδάφους

Μεγάλη ποσότητα διαθέσιμου βορίου συγκρατείται από την οργανική ουσία του εδάφους με αποτέλεσμα εδάφη πλούσια σε οργανική ουσία να παρουσιάζουν και υψηλή διαθεσιμότητα του στοιχείου αυτού (Μήτσιοι, 2004). Το βόριο της οργανικής ουσίας καθίσταται διαθέσιμο στα φυτά κατά την ανοργανοποίησή (Αναλογίδης, 2007). Ο όξινος χούμος προσροφά τη διπλάσια ποσότητα βορίου σε σχέση με χούμο κορεσμένο με Ca^{2+} . Τα επιφανειακά στρώματα του εδάφους που περιέχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, παρουσιάζουν υψηλή διαθεσιμότητα σε βόριο (Havlin *et.al.*, 1999).

Σύμφωνα με τον Marzadori *et.al.* (1991) η οργανική ουσία μπορεί να προκαλέσει την απελευθέρωση του βορίου από τα κολλοειδή του εδάφους, επιδρώντας στις διαδικασίες απορρόφησης του στοιχείου σε αυτά.

2.3.4. Κλιματολογικές συνθήκες

Η υγρασία, εδαφική και ατμοσφαιρική είναι παράγοντας που περισσότερο από κάθε άλλον επηρεάζει τη θρέψη των φυτών με βόριο. Ανεπαρκής εδαφική υγρασία δεν ευνοεί την απελευθέρωση του βορίου από την οργανική ουσία, μειώνει την ένταση της διαπνοής και συνεπώς δυσχεραίνει την πρόσληψη του βορίου από το φυτό (Πιστόλης, 2004).

Έρευνες έδειξαν ότι η υγρασία του εδάφους επέδρασε σημαντικά στην πρόσληψη του βορίου σε καλλιέργεια κριθής που είχε δεχτεί λίπανση με βόριο. Η περιεκτικότητα των φυτών σε βόριο ήταν μειωμένη κατά το ήμισυ όταν το έδαφος που λιπάνθηκε διατηρήθηκε σε κατάσταση ξηρασίας (Gupta *et.al.*, 1976).

Έλλειψη βορίου εκδηλώνεται κυρίως κατά τους ξηρούς μήνες του καλοκαιριού, ιδιαίτερα όταν αυτοί έπονται μιας υγρής περιόδου, ευνοϊκής για την ανάπτυξη της βλάστησης. Παρατεταμένη ξηρασία νωρίς την άνοιξη επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη των καρπών, αφού η περιεκτικότητα του φυτού σε βόριο, ένα μήνα μετά την άνθηση, καθορίζει αν θα εκδηλωθούν ή όχι συμπτώματα έλλειψης.

Η έντονη βροχόπτωση απομακρύνει το βόριο από το ενεργό ριζόστρωμα, ιδιαίτερα στα ελαφριάς μηχανικής σύστασης και στα όξινα εδάφη, όπου το ασβέστιο απουσιάζει. Το ασβέστιο στην πράξη μάλλον προφυλάσσει το βόριο από την έκπλυση, παρά το καθιστά απρόσιτο στο φυτό.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες του εδάφους την άνοιξη περιορίζουν την πρόσληψη του βορίου από τις ρίζες των δένδρων. Την άνοιξη, μετά από έναν κρύο χειμώνα, στους βλαστούς των δένδρων το επίπεδο του βορίου είναι χαμηλό (Πιστόλης, 2004).

Η πρόσληψη του βορίου επηρεάζεται και από το φως. Αύξηση κατά 5,5 φορές της φωτεινής έντασης προκάλεσε την αύξηση, κατά 13 φορές, της συγκέντρωσης του βορίου στον ηλιάνθο (Tanaka, 1967).

2.4. Πρόσληψη και κινητικότητα του βορίου στα φυτά

Η μετακίνηση του εν διαλύσει βορίου προς τις ρίζες των φυτών γίνεται ως επί των πλείστον με μαζική ροή, αλλά κατά τον Barger (1995) για καλλιέργειες υψηλών απαιτήσεων (άνω των 20 ppm Βορίου επί Ξ.Μ.) και υπό συνθήκες οριακής εδαφικής διαθεσιμότητας φαίνεται ότι συμβάλει και η διάχυση.

Σύμφωνα με όλες τις διαθέσιμες ενδείξεις το βόριο προσλαμβάνεται από τις ρίζες των φυτών στη μορφή του αδιάστατου H_3BO_3 και σε πολύ μικρότερο ποσοστό ως μονοσθενές βορικό ιόν $B(OH)_4^-$. Σε ότι αφορά τη διαδικασία πρόσληψης φαίνεται ότι είναι μάλλον παθητική (δηλ. διάχυση στο εσωτερικό της ρίζας με κινητήρια δύναμη τη διαπνοή), μολονότι υπάρχουν και ερευνητικές ενδείξεις περί του αντιθέτου. Οι Bowen and Nissen (1976) βάσει πειραμάτων με αποκομμένες ρίζες κριθής συμπέραναν ότι κατά μεγάλο μέρος το βόριο απορροφάται παθητικά (και απαντάται στα εσωτερικά τοιχώματα των ριζών υπό μορφή βορικού-ζαχαρικού συμπλόκου) ενώ κατά μικρό μέρος η πρόσληψη του βορίου τελεί υπό μεταβολικό έλεγχο. Ο Nissen (1974) υποστήριξε ότι η ενεργός απορρόφηση του βορίου λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες χαμηλής εξωτερικής συγκέντρωσης του μικροθρεπτικού, ενώ σε σχετικά υψηλότερες συγκεντρώσεις η πρόσληψη είναι παθητική. Κατά τον Bergmann

(1992) το αδιάστατο H_3BO_3 απορροφάται παθητικά ακολουθώντας το ρεύμα της διαπνοής, ενώ το ιόν $B(OH)_4^-$, απορροφάται με τη μεταβολική διαδικασία.

Η διακίνηση του βορίου από τη ρίζα στα διάφορα όργανα του υπέργειου μέρους του φυτού γίνεται μέσω των ξυλωδών αγγείων ακολουθώντας επίσης το ρεύμα της διαπνοής. Κατά συνέπεια, η πρόσληψη και εσωτερική διακίνηση του βορίου είναι συνάρτηση του συντελεστή διαπνοής (Αναλογίδης, 2007).

Σε πολλά φυτικά είδη η κινητικότητα του βορίου, μέσω του ηθμού, είναι περιορισμένη, λόγω της έντονης συγκράτησής του στους ιστούς. Σε σημαντικό όμως αριθμό φυτών η κινητικότητα του βορίου μέσω του ηθμού είναι ικανοποιητική. Πρόκειται για τα φυτά των οποίων τα κύρια φωτοσυνθετικά προϊόντα είναι η σορβιτόλη, η μαννιτόλη και η ντουλσιτόλη, πολυαλκοόλες (πολυόλες) με τις οποίες το βόριο συμπλοκοποιείται, δε δεσμεύεται στους ιστούς ή/και μεταβάλλει την περατότητα των μεμβρανών για το βόριο και έτσι καθίσταται δυνατή η μετακίνησή του.

Ευκίνητο είναι το βόριο στα είδη: Μηλιά, αχλαδιά, ροδακινιά, βερικοκιά, αμυγδαλιά, κερασιά, δαμασκηνιά, μουσμουλιά, ροδιά, αμπέλι, ελιά, ελαιοκράμβη, σπαράγγι, φασόλι, αρακάς, μπρόκολο, κουνουπίδι, καρότο, σέλινο και κρεμμύδι, ενώ δυσκίνητο είναι στα είδη: Φιστικά, καρυδιά, συκιά, πορτοκαλιά, μανταρινιά, φράουλα, πατάτα, τομάτα, σιτάρι, κριθάρι, καλαμπόκι, ρύζι, βαμβάκι, τεύτλο, καπνός, μηδική και μαρούλι (Πιστόλης, 2008).

Κατά τους Brown and Hu (1998) υψηλότερες συγκεντρώσεις βορίου στα παλαιότερα φύλλα είναι ένδειξη της μη κινητικότητάς του, ενώ υψηλότερες συγκεντρώσεις στα νεότερα φύλλα και στους καρπούς είναι ένδειξη της κινητικότητάς του.

2.5. Οι απαιτήσεις των φυτών σε βόριο

Το κρίσιμο όριο συγκέντρωσης του βορίου για το έδαφος κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 1,0 ppm (Κεραμίδας, 1989), ενώ σύμφωνα με το Ινστιτούτο Εδαφολογίας Θεσσαλονίκης το όριο επάρκειας του βορίου είναι τα 0,5 ppm για όλα τα εδάφη. Οι Smith and Clark (1988) και οι Τσαντήλας *et.al.* (1992) αναφέρουν ότι συγκεντρώσεις εδαφικού βορίου μεγαλύτερες από 0,5 ppm προκαλούν τοξικές συγκεντρώσεις στα φύλλα της ακτινιδιάς, ενώ για τα ανθεκτικά στο βόριο φυτά, το όριο είναι γύρω στο 1,0 ppm. Κατά τους Θεοδώρου και Πασχαλίδη (1999) αν η συγκέντρωση του εκχυλίσματος κορεσμού του βορίου είναι μεγαλύτερη του 1,5 ppm είναι τοξικό για όλες τις καλλιέργειες, ενώ μικρότερες του 0,7 ppm είναι αβλαβείς ακόμα και για ευαίσθητες καλλιέργειες.

Πίνακας 4. Όρια επάρκειας βορίου στο εδαφικό διάλυμα σε ppm.

Περιεκτικότητα σε p.p.m.	Χαρακτηρισμός
< 0,4	Πολύ χαμηλή
0,5 - 0,7	Χαμηλή
0,8 - 1,2	Μέτρια
1,3 - 2,0	Υψηλή
> 2,0	Πολύ υψηλή

(Πασχαλίδης, 2006).

Οι ανάγκες των φυτών σε βόριο είναι μέγιστες κατά το στάδιο του σχηματισμού των φύλλων, της ανθοφορίας, καθώς και κατά το στάδιο σχηματισμού των καρπών. Η περιεκτικότητα των μονοκοτυλήδων φυτών σε βόριο είναι ιδιαίτερα χαμηλή, και συνήθως από 2 μέχρι 6 mg B Kg⁻¹ ξηρής ουσίας, σημαντικά λιγότερη από αυτή των δικοτυλήδων, των οποίων η περιεκτικότητα είναι από 20 μέχρι 200 mg B Kg⁻¹ ξηρής ουσίας.

Πίνακας 5. Εύρος άριστης επάρκειας βορίου διαφόρων καλλιεργειών.

Καλλιέργεια	ppm	Καλλιέργεια	ppm	Καλλιέργεια	ppm
Αραχίδα	25-60	Καρπούζι	30-80	Ελιά	20-75
Βαμβάκι	20-60	Παντζάρι	30-85	Γκρέιπφρουτ	30-100
Τεύτλα	30-200	Κολοκύθι	25-75	Λεμονιά	20-100
Ηλιάνθος	35-150	Κουνουπίδι	30-100	Μανταρινιά	30-100
Καλαμπόκι	5-25	Κρεμμύδι	22-60	Πορτοκαλιά	30-100
Καπνός	18-24	Λάχανο	30-100	Φυστικά	50-250
Μηδική	30-80	Μαρούλι	25-60	Ακτινίδιο	30-300
Κριθάρι	6-12	Μελιτζάνα	25-75	Αμπέλι	30-100
Ρύζι	5-15	Φασολάκια	20-75	Αμυγδαλιά	30-60
Σόγια	20-55	Πατάτα	40-70	Βερικοκιά	25-70
Αγγούρια	25-100	Πεπόνι	25-60	Νεκταρινιά	20-60
Αρακάς	5-60	Πιπεριά	25-75	Ροδακινιά	20-60
Καρότα	30-100	Σπανάκι	25-63	Κερασιά	20-60
Σπαράγγι	25-100	Σέλινο	30-60	Μηλιά	25-50
Φράουλα	23-50	Τομάτα	25-75	Καρυδιά	35-200

(Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003).

Ευαίσθητα φυτά στην έλλειψη βορίου είναι τα ζαχαρότευτλα, το σέλινο, ο ηλιάνθος, το κουνουπίδι, η μηδική, τα οπωροφόρα και ειδικότερα τα μηλοειδή (Μήτσιος, 2004), καθώς και το αμπέλι, η τομάτα και ο καπνός (Θεοδώρου και Πασχαλίδης, 1999). Ενώ το κριθάρι, τα αγγουράκια, τα φασόλια, οι φράουλες και τα εσπεριδοειδή είναι ανθεκτικά σε μικρές συγκεντρώσεις βορίου του εδάφους. Όπως συμβαίνει και με άλλα θρεπτικά στοιχεία των φυτών, οι διαφορετικές ποικιλίες του αυτού είδους δεν αντιδρούν με το ίδιο τρόπο στην έλλειψη βορίου, δηλαδή όλες οι ποικιλίες του ίδιου είδους δεν είναι κατάλληλες για την ένδειξη της έλλειψης του βορίου (Μήτσιος, 2004).

Κατά τον Αλεξιάδη (1980) ανθεκτικά στο βόριο είναι: τα καρότα, το μαρούλι, το λάχανο, τα κουκιά, το κρεμμύδι, τα φασόλια (Brad bean), ο γλαδίολος, η μηδική, τα τεύτλα, η χουρμαδιά και το σπαράγγι. Μέτρια ανθεκτικά είναι τα φασόλια (Lima bean), η γλυκοπατάτα, η πιπεριά, το αμπέλι, η τομάτα, τα κολοκυθάκια, η βρώμη, το καλαμπόκι, το σιτάρι, το κριθάρι, η ελιά, το μπιζέλι, το ραπάνι, το βαμβάκι, η πατάτα και ο ηλιάνθος, ενώ ευπαθείς σε σχέση με την ανθεκτικότητά τους στο βόριο είναι η λεμονιά, η πορτοκαλιά, το αβοκάντο, η βερικοκιά, η ροδακινιά, η κερασιά, η μηλιά, η αχλαδιά, η δαμασκηλιά, τα φασόλια (Navy bean), η αγκινάρα και η καρυδιά.

Πίνακας 6. Όρια ανθεκτικότητας των διάφορων καλλιεργειών στο βόριο.

Ευαίσθητες 0,3 - 1 ppm Βορίου	Ημιανθεκτικές 1 - 2 ppm Βορίου	Ανθεκτικές 2 - 4 ppm Βορίου
Εσπεριδοειδή	Φασολιά (Lima bean)	Καρότα
Αβοκάντο	Γλυκοπατάτα	Μαρούλια
Βερικοκιά	Πιπεριά	Λάχανα
Ροδακινιά	Βρώμη	Κτην. τεύτλα
Κερασιά	Σόργο	Κρεμμύδι
Persimon (Διόσπυρος)	Καλαμπόκι	Κουκιά
Συκιά	Σιτάρι	Μηδική
Αμπέλι	Κριθάρι	Κοκκινογούλια
Μηλιά	Ελιά	Μάνγκολ
Αχλαδιά	Μπιζελιά	Ζαχαρότευτλα
Δαμασκηλιά	Ραπανάκι	Φοίνικας
Φασολιά (Navy bean)	Τομάτα	Ινδοκαρυδιά
Αγκινάρες	Βαμβάκι	Σπαράγγι

(Shainberg and Oster, 1978).

2.6. Έλλειψη βορίου

Η τροφοπενία βορίου στην ελιά, αρχικά στη Νήσο Λέσβο, αναφέρθηκε και περιγράφηκε από ερευνητές του Μπενάκειου Φυτοπαθολογικού Ινστιτούτου. Έχει διαπιστωθεί επίσης σε πολλές περιοχές της Κρήτης. Στη μηλιά η τροφοπενία βορίου αναφέρθηκε ομοίως προ πολλών ετών από ερευνητές του Μπενάκειου Φυτοπαθολογικού Ινστιτούτου τόσο στη Β. Ελλάδα, όσο και στην Πελοπόννησο.

Ιδιαίτερα οξύ εμφανίζεται το πρόβλημα της τροφοπενίας βορίου στα ζαχαρότευτλα μερικών περιοχών, όπως Έβρος, Ροδόπη, Ξάνθη (αμμώδη, ελαφρώς όξινα, αλουβιακά εδάφη), Τενάγη Φιλίππων (τυρφώδη εδάφη), Φάρσαλα-Δομοκός (οργανικά-αργιλώδη εδάφη). Στις περιοχές τευτλοκαλλιέργειας που ενδημεί το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με χορήγηση βορίουχων σκευασμάτων στο έδαφος και τα φύλλα.

Στα μηλοειδή της Β. Ελλάδας έχει αναφερθεί ότι η έλλειψη βορίου είναι πολύ λιγότερο εκτεταμένη από την έλλειψη Zn. Επίσης στη ροδακινιά το βόριο σπάνια δημιουργεί προβλήματα, σε αντίθεση με τα προβλήματα τροφοπενίας B που παρατηρούνται στην κερασιά που καλλιεργείται στα ορεινά της Νάουσας (Αναλογίδης, 2007).

2.6.1. Συνθήκες έλλειψης βορίου

Μεγάλες πιθανότητες εμφάνισης τροφοπενίας βορίου παρατηρούνται στα αμμώδη εδάφη σε περιοχές με συχνές βροχοπτώσεις και στα εδάφη που διαθέτουν μικρή περιεκτικότητα βορίου και στα όξινα εδάφη που έχουν υποστεί υπερβολική ασβέστωση. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε Fe και Al επιδρά αρνητικά στην περιεκτικότητα των εδαφών σε βόριο, ειδικά όταν επικρατούν υψηλές τιμές pH όπως σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές.

Στα εδάφη με ελαφρά σύσταση, το βόριο βρίσκεται σε μικρές συγκεντρώσεις με αποτέλεσμα να παρατηρούνται τροφοπενίες του στοιχείου αυτού. Οι τροφοπενίες βορίου συχνά παρατηρούνται κατά τους καλοκαιρινούς ξηρούς μήνες, και αυτό διότι οι επιφανειακοί ορίζοντες της εδαφικής κατανομής περιέχουν βόριο σε μικρές συγκεντρώσεις. Στους ορίζοντες αυτούς, τα οργανικά κολλοειδή δεσμεύουν το βόριο.

Στα αμμώδη εδάφη που περιέχουν μικρή συγκέντρωση βορίου, το διαθέσιμο βόριο δεν επαρκεί με αποτέλεσμα να παρατηρείται τροφοπενία B. Σε εδάφη όμως με υψηλή περιεκτικότητα του στοιχείου, η ξηρασία δεν οδηγεί σε εμφάνιση τροφοπενίας στα φυτά.

Σημειώνεται ότι τα φυτά προσλαμβάνουν περισσότερο βόριο από τα ελαφριάς συστάσεως εδάφη παρά από τα εδάφη βαριάς συστάσεως και περισσότερο βόριο από τα όξινα παρά από τα ασβεστούχα εδάφη. Το βόριο δεν είναι ευκίνητο εντός του φυτού, με αποτέλεσμα όταν αυτό προσλαμβάνεται από τα φυτά σχετικά νωρίς να μην μετακινείται αργότερα στα σημεία αυξήσεως του φυτού, με συνέπεια την εμφάνιση ορατών συμπτωμάτων έλλειψης βορίου (Μήτσιος, 2004).

Γενικά, αποδεικνύεται πως τα αποθέματα ολικού βορίου είναι περιορισμένα σε εδάφη αμμώδη και χονδρόκοκκα, όξινα, εκπλυμένα και φτωχά σε οργανική ουσία. Τα πιο επιρρεπή στην εκδήλωση της τροφοπενίας βορίου είναι τα εδάφη που προέρχονται από όξινα πυριγενή πετρώματα, ειδικότερα δε σε κλιματικές ζώνες υψηλών βροχοπτώσεων. Τα όξινα αμμώδη εδάφη παρουσιάζουν συγχρόνως τις μεγαλύτερες απώλειες έκπλυσης βορίου. Αντίθετα, τροφοπενία βορίου σπάνια συναντάται σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα αργίλου και αλκαλικό pH, διότι αυτές οι συνθήκες εμποδίζουν την έκπλυση του στοιχείου. Επίσης, η εκδήλωση τροφοπενίας βορίου σε ευπαθείς καλλιέργειες των ασβεστούχων εδαφών δεν είναι σπάνια, λόγω της έντονα αρνητικής αλληλεπίδρασης βορίου και Ca (Αναλογίδης, 2007).

2.6.2. Συμπτώματα έλλειψης βορίου

Τα εσωτερικά (μη εξωτερικώς ορατά) συμπτώματα εμφανίζονται κατ' αρχάς σε κυτταρικό και αγγειακό επίπεδο. Έτσι, παρατηρείται αυξημένη κυτταροπλασία του καμβίου, με ατελή - ανώμαλη διαφοροποίηση των κυττάρων (υπερτροφία). Οι κυτταρικοί πυρήνες έχουν ακανόνιστο σχήμα και ενίοτε διασπώνται. Παρατηρείται εκφυλισμός των μεριστωματικών ιστών και των κυτταρικών μεμβρανών, συσσώρευση φαινολικών ουσιών στα κενοτόπια (χυμοτόπια) των κυττάρων, σχηματισμός φελλοποιημένων ζωνών, ατελής σχηματισμός των αγγειωδών και ηθμο-αγγειωδών δεσμίδων. Στη θέση των αγωγών δεσμίδων αναπτύσσεται ιστός παρεγχυματικού τύπου (ατελής διαφοροποίηση - αδυναμία σχηματισμού αγωγού συστήματος). Τελικά, οι εκφυλισμένοι μεριστωματικοί ιστοί λόγω πλήρους διάσπασης του μεταβολισμού τους και απώλειας επικοινωνίας με τους αγωγούς, νεκρώνονται. Οι επικόρυφοι οφθαλμοί ξηραίνονται και τα άκρα των βλαστών νεκρώνονται, λόγω μη υπάρξεως αγωγών δεσμίδων (έλλειψη τροφοδοσίας) (Αναλογίδης, 2007).

Η έλλειψη βορίου μπορεί να ανιχνευθεί στα νεότερα φύλλα, στους βλαστούς και στις ρίζες και εμφανίζεται σε ορισμένα είδη φυτών, μέσω πολλών ορατών χαρακτηριστικών

συμπτωμάτων, που διαπιστώνονται τόσο μικροσκοπικά όσο και μακροσκοπικά ως ακολούθως:

- Κίτρινος μέχρι κοκκινωπός αποχρωματισμός των νεότερων φύλλων, με ή χωρίς επακόλουθες νεκρώσεις.
- Εμφάνιση νεωτέρων φύλλων με τη μορφή ροζέτας.
- Μικρά παραμορφωμένα φύλλα, συχνά με απλοποιημένο σχήμα φύλλου, με ασύμμετρο σχηματισμό των νεύρων.
- Σπασίματα και σχηματισμοί φελλού στο μίσχο των φύλλων.
- Ξήρανση των αναπτυσσόμενων σημείων ή των μπουμπουκιών και με αρκετή έλλειψη Βορίου στα βλαστάρια οι βλαστοί "εξαφανίζονται" και το ίδιο και τα μπουμπουκία.
- Παρατηρείται αύξηση των μασχαλιαίων οφθαλμών οι οποίοι αναπτύσσονται κανονικά ή ξηραίνονται σύντομα (σκούπα της μάγισσας).
- Μείωση του αριθμού των μπουμπουκιών, των ανθέων και των σχηματιζόμενων καρπών, με πρόωρο διασκορπισμό του περικαρπίου.
- Περιορισμένη ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, με ανώμαλη αύξηση των πλευρικών ριζών, που προσδίδουν στη ρίζα "αγκαθωτή" εμφάνιση.

(Μήτσιος, 2004).

2.6.3. Αντιμετώπιση έλλειψης βορίου

Η τροφοπενία βορίου των καλλιεργειών αντιμετωπίζεται με χορήγηση κατάλληλων βοριούχων παρασκευασμάτων στο έδαφος, ή με ψεκάσμό του φυλλώματος, ή με συνδιασμό των δύο μεθόδων. Η χορήγηση στο έδαφος έχει προληπτικό χαρακτήρα και μεγαλύτερη διάρκεια επίδρασης, ενώ η διαφυλλική χορήγηση αποσκοπεί συνήθως στη διόρθωση της τροφοπενίας όταν έχουν ήδη εκδηλωθεί τα συμπτώματά της. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων συνιστάται σε ιδιαίτερα σοβαρές περιπτώσεις. Κλασικές πηγές βορίου είναι τα βορικά άλατα νατρίου.

Στις λιπάνσεις χρησιμοποιούνται τόσο τα απλά λιπάσματα βορίου, όσο και λιπάσματα κύριων θρεπτικών στοιχείων (NPK) εμπλουτισμένα με βόριο. Μεταξύ των απλών βοριούχων λιπασμάτων συνηθέστερα χρησιμοποιούνται από εδάφους ο βόρακας και το πανταβορικό νάτριο, κατά προτίμηση σε κοκκώδη μορφή. Τα δυσδιάλυτα σκευάσματα (βοριοπυριτικό γυαλί, κολεμανίτης), που είναι βραδείας απόδοσης, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα. Ο κολεμανίτης ειδικότερα συνιστάται σε αμμώδη

χονδρόκοκα εδάφη ελλειμματικά σε βόριο, σε ευαίσθητες κτηνοτροφικές καλλιέργειες όπως η μηδική και το τριφύλλι, όπου η πολύ μειωμένη διαλυτότητά του περιορίζει τις απώλειες έκπλυσης (Holden, 1959).

Εκτός από τον κολεμανίτη αναφέρεται ότι σε πειραματική κλίμακα καλά αποτελέσματα έχουν δώσει και 2 άλλα βοριούχα ορυκτά, ο ντατολίτης με 5,2% ολικό και 0,01% υδατοδιαλυτό βόριο (Sherell, 1983) και ο ουλεξίτης με βραδεία - προοδευτική απελευθέρωση βορίου στο έδαφος (Gupta, 1979). Τα εν λόγω ορυκτά πλεονεκτούν σε διάρκεια υπολειμματικής δράσεως.

Αναφέρεται επίσης ότι τα θαλάσσια φύκη, λόγω περιεκτικότητας βορίου του θαλασσιού ύδατος, αποτελούν πηγή βορίου με μέση περιεκτικότητα 150 g βορίου ανά τόνο ξηρής μάζας (Maurice *et.al.*, 1983).

Ευρεία διάδοση έχουν τα τελευταία χρόνια διεθνώς αλλά και στην Ελλάδα τα NPK λιπάσματα εμπλουτισμένα με βόριο σε κατάλληλη αναλογία, ώστε με τη δοσολογία των κύριων θρεπτικών στοιχείων να καλύπτονται συγχρόνως οι απαιτήσεις σε βόριο. Στην Ελλάδα ευρεία διάδοση είχε, από τα τέλη της 10ετίας 1980 το Πολυβόρ (POLYBOR). Το λίπασμα αυτό με τύπο 12-12-18+0,5B απεδείχθη ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την πρόληψη και καταπολέμηση της τροφοπενίας βορίου στην Κρήτη και άλλες ελαιοκομικές περιοχές της χώρας. Συναφής τύπος που παρήχθη παράλληλα ήταν η βοριούχος νιτροθειϊκή αμμωνία (24-0-0+0,5B). Όπως έδειξε αρκετά νωρίς ο Mortvedt (1968) το βόριο στα σύνθετα NPK λιπάσματα δεν υπεισέρχεται σε αντιδράσεις αδιαλυτοποίησης με τα υπόλοιπα θρεπτικά συστατικά του λιπάσματος (ιδιαίτερα δε με τα υπερφωσφορικά και το φωσφορικό αμμώνιο) και κατά συνέπεια η αποτελεσματικότητά του δεν επηρεάζεται.

Το βόριο σε κατάλληλη μορφή (συνηθέστερα Solubor, ή βορικό οξύ) προστίθεται επίσης σε υδατοδιαλυτά (κρυσταλλικά) λιπάσματα κύριων θρεπτικών στοιχείων. Υδατοδιαλυτά λιπάσματα εμπλουτισμένα με βόριο χρησιμοποιούνται κυρίως σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες απαιτητικές σε βόριο (Αναλογίδης, 2007).

Η άριστη δοσολογία του βορίου όταν χορηγείται στο έδαφος, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες εδαφικούς, κλιματικούς και φυτοκομικούς, οι κυριότεροι των οποίων είναι το είδος και η ποικιλία του φυτού, το ακολουθούμενο πρόγραμμα καλλιεργητικής αγωγής, οι βροχομετρικές συνθήκες της περιοχής, η περιεκτικότητα οργανικής ουσίας, το pH και η κοκκομετρική σύσταση του εδάφους.

Σε περιπτώσεις αποδεδειγμένων αναγκών λίπανσης, το εύρος της δοσολογίας δεν εξαρτάται μόνο από τους προαναφερθέντες παράγοντες, αλλά περιορίζεται και από μία άλλη ιδιομορφία του βορίου, του οποίου τα όρια μεταξύ ενδεδειγμένης λίπανσης και τοξικής

επίδρασης είναι πολύ στενά, ιδιαίτερα στην κατηγορία των ευαίσθητων φυτικών ειδών. Στην πράξη η συνιστώμενη δοσολογία κυμαίνεται από κατά μέσο όρο από 100-300gr B/στρ σε ποσότητα σκευάσματος ανάλογη της αντίστοιχης περιεκτικότητας βορίου. Η δοσολογία για το βόρακα, το συνηθέστερο βοριούχο λίπασμα περιεκτικότητας 11,5% B, είναι μεταξύ 800 και 2500 gr/στρ. Η ανώτερη δόση εφαρμόζεται σε ανθεκτικά και συγχρόνως πολύ απαιτητικά είδη, όπως η μηδική και τα ζαχαρότευτλα.

Πίνακας 7. Τα κυριότερα λιπάσματα βορίου.

Πηγή	Χημικός τύπος	Περιεκτικότητα % σε B
Βόρακας	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	11
Πενταβορικό νάτριο	$\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	18
Τετραβορικό νάτριο	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	14
Βορικό οξύ	H_3BO_3	20
Κολεμανίτης (ορυκτό)	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	17
Fritst Βορίου		10
Solubor	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O} +$ $\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	20
Bortrac	-	15
Profit	-	15
Vytel Boron	-	15
Χηλικό B (EDTA)	-	4
Πολυβόρ	(12-12-18 + 0,5 B)	0,5

(Μήτσιος, 2004).

Σημαντικό πάντως ρόλο φαίνεται να παίζει και η μέθοδος προσθήκης του βοριούχου λιπάσματος. Οι Gupta and Cutcliffe (1978) ανέφεραν πειραματικά αποτελέσματα σύμφωνα με τα οποία όταν η προσθήκη γίνονταν κατά λωρίδες στις γραμμές των φυτών, δοσολογία μειωμένη κατά 50% αποδείχθηκε πιο αποτελεσματική σε σχέση με τη διπλάσια ποσότητα σε ομοιόμορφη προσθήκη.

Στις πολυετής καλλιέργειες, όπως η άμπελος, τα οπωροφόρα δένδρα, η ελιά κλπ, έχει διαδοθεί η μέθοδος ψεκασμού της κόμης των φυτών με αραιά βοριούχα διαλύματα. Η απορρόφηση του βορίου από τα φύλλα είναι ταχύτερη σε σύγκριση με την προσθήκη στο

έδαφος (Αναλογίδης, 2007). Πολλές διαφυλλικές εφαρμογές, με μικρή συγκέντρωση βορίου, είναι πιο αποτελεσματικές από μία με υψηλή συγκέντρωση, λόγω της δυσκινησίας του βορίου στα φύλλα (Θερίος, 2005). Στους φυλλοψεκασμούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα προϊόντα βορίου, όπως το βορικό οξύ, ο βόρακας και το πενταβορικό νάτριο (Πιστόλης, 2008).

Οι διαφυλλικές εφαρμογές, από μόνες τους, μπορούν να επιταχύνουν τη δημιουργία ικανοποιητικών επιπέδων βορίου στα φύλλα, όμως επειδή στην ομαλή ανάπτυξη των καρπών το επίπεδο του βορίου στα σπέρματα παίζει σημαντικό ρόλο, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός τους με την εφαρμογή βορίου στο έδαφος. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα είδη στα οποία το βόριο δε μετακινείται μέσω του ηθμού. Το βόριο δεν πρέπει να αναμειγνύεται με ελαιούχα σκευάσματα και γαλακτώματα, με θειικά άλατα θρεπτικών και με το CaCl_2 (Πιστόλης, 2008).

2.7. Τοξικότητα βορίου

Είναι γνωστό ότι το βόριο είναι απαραίτητο για τα φυτά σε μικρές συγκεντρώσεις, όταν όμως βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις στο έδαφος ή στο νερό άρδευσης, τότε το στοιχείο αυτό προκαλεί τοξικά συμπτώματα στα καλλιεργούμενα φυτά.

Αν ληφθεί υπόψη ότι τα όρια μεταξύ τοξικότητας και έλλειψης του στοιχείου αυτού είναι πολύ στενά, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εφαρμογή λιπασμάτων τόσο στο έδαφος όσο και σε διαφυλλικούς ψεκασμούς. Αν για παράδειγμα παρέχεται για αρκετό χρονικό διάστημα λίπανση με βόριο, μπορεί εύκολα να προκληθεί ζημιά λόγω αυξημένης συγκέντρωσης του μικροστοιχείου στο εδαφικό διάλυμα, ειδικά σε αμμώδη εδάφη. Η αυξημένη, αλόγιστη και μη προγραμματισμένη χρήση βοριούχων λιπασμάτων οδηγεί σε καταστάσεις υπερεπάρκειας του στοιχείου τόσο στο έδαφος όσο και στα φυτά, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τοξικών συμπτωμάτων στα έλασμα αλλά και στο βλαστό (Μήτσιος, 2004).

2.7.1. Συνθήκες τοξικότητας βορίου

Τοξικότητα Βορίου στις καλλιέργειες μπορεί να εκδηλωθεί: σε εδάφη που λόγω προέλευσης παρουσιάζουν μεγάλο φυσικό εμπλουτισμό σε βόριο, σε αρδευόμενες καλλιέργειες στις οποίες χρησιμοποιείται αρδευτικό νερό υψηλής συγκέντρωσης σε βόριο

και από αστικά και βιομηχανικά λύματα εμπλουτισμένα με βόριο, τα οποία διαρρέουν σε επιφανειακά ύδατα και υδροφόρους ορίζοντες (Αναλογίδης, 2007).

Ο Reisenauer (1976), αναφέρει το ακόλουθο εύρος ανεκτικότητας των καλλιεργειών στη συγκέντρωση του βορίου στο εκχύλισμα κορεσμού του εδάφους:

- Λιγότερο από 0,5 ppm: Ουδέν πρόβλημα σε οποιαδήποτε καλλιέργεια.
- Περί το 1,0 ppm: Πολύ ευαίσθητα είδη πιθανό να εκδηλώσουν συμπτώματα τοξικότητας.
- Περί τα 5 ppm: Μέσης ευαισθησίας είδη αναπτύσσουν συμπτώματα τοξικότητας.
- Περί τα 10 ppm: Ακόμη και φυτά χαμηλής ευαισθησίας εμφανίζουν συμπτώματα τοξικότητας.

Συμπερασματικά, η φυσική πλεονασματικότητα βορίου μπορεί να αποβεί τοξική για τις ευαίσθητες καλλιέργειες σε εδάφη προερχόμενα από θαλάσσιες ιζηματογενείς αποθέσεις και από μητρικά πετρώματα πλούσια σε βόριο, απαντώμενα σε ξηρικές-ημιξηρικές περιοχές όπου υπάρχει τάση συσσώρευσης αλάτων στους επιφανειακούς ορίζοντες και από εδάφη αρδευόμενα με ύδατα υψηλής περιεκτικότητας σε βόριο (Αναλογίδης, 2007).

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην αρδευτική διαχείριση των καλλιεργειών, όταν το νερό άρδευσης περιέχει βόριο σε υπολογίσιμη συγκέντρωση. Κατά τον Bingham (1972) συνιστάται να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη το βόριο του αρδευτικού νερού, όταν η συγκέντρωση του υπερβαίνει τα 0,5 mg/L. Σύμφωνα με την ταξινόμηση που έχει υιοθετήσει ο παγκόσμιος κύριος πειραματικός σταθμός Riverside, ΗΠΑ, το αρδευτικό νερό άριστης έως καλής ποιότητας (κατηγορία I) πρέπει να περιέχει λιγότερο από 0,5 ppm βορίου.

Πίνακας 8. Ποιοτική κατάταξη των νερών σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε βόριο.

Κλάσεις ποιότητας νερού	1η κλάση	2η κλάση	3η κλάση
Βόριο σε ppm	< 0,50	0,50 - 2,00	> 2,00

(Doneen, 1967).

Ο Reisenauer (1975) αναφέρει ομοίως ότι το νερό με περιεκτικότητα βορίου μικρότερη των 0,5 mg/L μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς επιφυλάξεις για την άρδευση όλων γενικώς των καλλιεργειών. Τέλος, νερό με άνω των 2,0 mg/L βορίου προκαλεί πλειονότητα των περιπτώσεων μείωση παραγωγής, όταν χρησιμοποιείται συχνά. Σύμφωνα με τον FAO, η συγκέντρωση του βορίου στο νερό άρδευσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0,75 mg/L.

Πίνακας 9. Επιτρεπτά όρια βορίου νερών άρδευσης και ευαισθησία των φυτών.

Κατηγορίες Βορίου	Ευαίσθητες καλλιέργειες	Ημ ευαίσθητες καλλιέργειες	Ανθεκτικές καλλιέργειες
1η	< 0,30 ppm	< 0,67 ppm	< 1,00 ppm
2η	0,33 - 0,67 ppm	0,67 - 1,33 ppm	1,00 - 2,00 ppm
3η	0,67 - 1,00 ppm	1,33 - 2,00 ppm	2,00 - 3,00 ppm
4η	1,00 - 1,25 ppm	2,00 - 2,50 ppm	3,00 - 3,75 ppm
5η	> 1,25 ppm	> 2,50 ppm	> 3,75 ppm

(Scofield, 1936).

Τα διάφορα είδη φυτών παρουσιάζουν ευρύτατη διακύμανση ως προς την αντοχή τους στο βόριο. Κατά τον Brown (1976) τα οπωροφόρα δένδρα συμπεριλαμβανομένων των εσπεριδοειδών και των σκληροκάρπων ανέχονται συγκεντρώσεις 0,67 - 1,00 ppm βορίου. Μετρίως ανεκτικά φυτά, όπως διάφορα κηπευτικά και ο σίτος, αντέχουν χωρίς πρόβλημα συγκεντρώσεις 1,00 - 1,33 ppm βορίου. Τέλος, ανθεκτικά είδη (Σε υψηλές συγκεντρώσεις βορίου) όπως η μηδική, τα τεύτλα, το σπαράγγι και η χουρμαδιά μπορούν να ανεχθούν συγκεντρώσεις από 2,00 ppm έως και 3,00 ppm βορίου στο νερό άρδευσης.

Εξίσου σημαντική είναι η συνολική ποσότητα του εφαρμοζόμενου αρδευτικού ύδατος (ύψος άρδευσης). Η «ασφαλής» συγκέντρωση βορίου στο νερό άρδευσης σχετίζεται στενά με το συνολικό ύψος άρδευσης. Αναφέρεται ότι για συγκεντρώσεις 0,5 - 2,0 mg/L η συχνή άρδευση προκαλεί συμπτώματα τοξικότητας ακόμη και για «ανεκτικές» καλλιέργειες. Πρέπει να ληφθεί υπόψη πως άρδευση συνολικού ύψους 100 mm (δηλ. 100 m³ /στρ), όταν περιέχει 1-2 mg/L βορίου προσθέτει αντίστοιχα στο έδαφος 100 - 200 g B/στρ που αντιστοιχεί με μία «κανονική» λίπανση.

Η περιεκτικότητα βορίου των υδάτων που αντλούνται από γεωτρήσεις σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές είναι συχνά υψηλή, 2,0 mg/L, ή μεγαλύτερη. Η χρήση τέτοιων υδάτων για ύδρευση και για άρδευση μπορεί μακροπρόθεσμα να προκαλέσει συσσώρευση βορίου στα εδάφη. (Αναλογίδης, 2007).

2.7.2. Συμπτώματα τοξικότητας βορίου

Τα τοξικά συμπτώματα του βορίου στα φυτά αρχικά παρουσιάζονται στα παλιά φύλλα ως κίτρινες κηλίδες ή ακόμα ξηραίνονται οι κορυφές των ελασμάτων των φύλλων και οι

άκρες αυτών. Η χλώρωση και ξήρανση επεκτείνεται προς το κέντρο του ελάσματος καθώς και μεταξύ των νευρώσεων, όταν η συγκέντρωση βορίου στο έλασμα αυξάνεται.

Στα φυτά που είναι ευαίσθητα στην παρουσία βορίου στο νερό άρδευσης, όπως είναι η κερασιά, η δαμασκηλιά και άλλα φυτά, είναι εμφανής η παρουσία κόλλας ή εκκρίσεων στους κλάδους και στους κορμούς.

Τα τοξικά σημεία στα φύλλα των φυτών εμφανίζονται όταν η συγκέντρωση βορίου υπερβεί σε αυτά τα 250 - 300 mg B kg⁻¹ ξηρής ουσίας. Τα συμπτώματα της τοξικότητας βορίου στα φύλλα δεν παρουσιάζονται στα φυτά: ροδακινιά, δαμασκηλιά, μηλιά, αχλαδιά κ.α. (Μήτσιος, 2004).

2.7.3. Αντιμετώπιση τοξικότητας βορίου

Σε ότι αφορά τη διόρθωση τοξικών επιπέδων βορίου στα γεωργικά εδάφη, σημειώνεται ότι εάν το pH του εδάφους είναι όξινο η τοξικότητα βορίου μπορεί να αντιμετωπιστεί με ασβέστωση του εδάφους. Όμως τα αλατούχα εδάφη των ξηρών και ημίξηρων κλιματικών ζωνών, που παρουσιάζουν και υψηλές συγκεντρώσεις βορίου, έχουν αλκαλικό pH και η ασβέστωση δεν θα απέτρεπε την τοξικότητα βορίου. Σε τέτοια εδάφη το πλεονασματικό βόριο μπορεί να απομακρυνθεί μόνο με έκπλυση, αλλά κατά τους Keren and Bingham (1985) για το σκοπό αυτό απαιτείται 3πλάσια ποσότητα νερού από ότι απαιτεί η απομάκρυνση του νατρίου.

Η έκπλυση επιτυγχάνεται με την παρακάτω σχέση (Hofmann, 1980):

$$\left(\frac{C}{C_0} \right) \left(\frac{D}{D_s} \right) = 0,6$$

Όπου: C = Τελική συγκέντρωση B στα εδάφη σε mg/Kg.

C₀ = Αρχική συγκέντρωση B του εδάφους σε mg/Kg.

D = Βάθος νερού που εφαρμόζεται για έκπλυση σε cm.

D₀ = Βάθος εδάφους που εκπλύνεται σε cm.

Η παραπάνω εξίσωση είναι ανεξάρτητη από τη μέθοδο εφαρμογής του νερού είτε διά καταιονισμού ή διά λεκανών (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2007).

Σε περιπτώσεις όπου τα προβλήματα τοξικότητας δεν είναι τόσο συχνά, σχετικά μικρές αλλαγές στην καλλιέργεια (σύστημα αμειψισποράς) μπορεί να δώσουν λύση στο πρόβλημα (Μήτσιος, 2004).

Κεφάλαιο 3: Αλληλεπίδραση του βορίου με άλλα θρεπτικά στοιχεία

Η πρόσληψη του βορίου από τα φυτά εξαρτάται από τη συγκέντρωση και άλλων ιόντων στο εδαφικό διάλυμα, όπως το ασβέστιο, το κάλιο και το άζωτο (Μήτσιοι, 2004).

3.1. Αλληλεπίδραση του βορίου με τα μακροθρεπτικά στοιχεία

3.1.1. Αλληλεπίδραση με το άζωτο

Έχει αποδειχτεί ότι μια πλούσια αζωτούχος λίπανση περιορίζει την αρνητική επίδραση της πλεονασματικότητας του βορίου. Από διάφορες έρευνες προκύπτει ότι η ισχυρή αζωτούχος λίπανση επιδρά αρνητικά στην πρόσληψη του βορίου, δυνάμενη να προκαλέσει ακόμη και τροφopenία βορίου. Οι ανάγκες σε βόριο αυξάνουν όταν η δοσολογία του N είναι υψηλή, ιδιαίτερα σε νιτρική μορφή.

Κατά τον Gupta *et.al.* (1976) η προσθήκη 50 mg kg⁻¹ N και άνω στο έδαφος, μείωσε σημαντικά την πρόσληψη του βορίου στο κριθάρι και το σιτάρι, ενώ και ο Willett *et.al.* (1985) αναφέρει πως με την προσθήκη αζώτου παρατηρήθηκε μείωση της συγκέντρωσης του βορίου στο τριφύλλι. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι ισχυρές N λιπάνσεις αναστέλλουν την τοξική δράση των υψηλών συγκεντρώσεων βορίου στα εσπεριδοειδή (Jones *et.al.*, 1963).

Ο Wojcik (2000), ανέφερε ότι η εφαρμογή αζώτου με τη μορφή ασβεστούχου νιτρικής αμμωνίας, σε χονδρόκοκκα εδάφη, αύξησε την διαθεσιμότητα και την πρόσληψη του βορίου από τις ρίζες. Η αύξηση αυτή, σύμφωνα με τον ίδιο ερευνητή, οφείλεται στο γεγονός ότι τα νιτρικά ιόντα ανέστειλαν την συγκράτηση του βορίου από τα οξείδια του Fe και Al με αποτέλεσμα την αύξηση του στοιχείου στο εδαφικό διάλυμα.

Πάντως, όπως έχει προαναφερθεί, τα νιτρικά ιόντα εκπλένονται πολύ εύκολα, ιδιαίτερα στα χονδρόκοκκα εδάφη. Επίσης, το αμμωνιακό N θα μπορούσε να αποτρέψει την αρνητική επίδραση του Ca επί του B, καθώς τα NH₄⁺ ανταγωνίζονται ισχυρά το Ca.

Γενικά, οι αλληλεπιδράσεις των θρεπτικών στοιχείων αποτελούν πεδίο έρευνας στο οποίο δύναται να μελετηθούν περαιτέρω οι σχέσεις μεταξύ εδαφικού συστήματος, στοιχείων και φυτού. Κατά τον Loue (1978) οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων θα μπορούσαν ενδεχομένως να εξηγηθούν με τη βοήθεια του νόμου του ελάχιστου.

3.1.2. Αλληλεπίδραση με τον φώσφορο

Σε περιπτώσεις ενισχυμένης φωσφορικής λίπανσης φαίνεται να αυξάνεται η απορρόφηση του βορίου από τα φυτά (Tanaka, 1967).

Το βόριο σχετίζεται συνεργιστικά με τον P, δεδομένου ότι συμβάλει στην συσσώρευση του P στα νουκλεϊκά οξέα. Κατά συνέπεια με τη μείωση του επιπέδου του βορίου, ελαττώνεται ο P και ως εκ τούτου η συγκέντρωση της ATP, δεδομένου ότι ο P είναι βασικό συστατικό της. Έτσι, φυτά που δεν έχουν επαρκείς ποσότητες βορίου, εμφανίζουν μειωμένη πρόσληψη P από τις ρίζες, λόγω ενδεχομένως μερικής αναστολής της μεριστωματικής δραστηριότητας των επικορύφων κυττάρων, εξαιτίας της μειωμένης παραγωγής ATP (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003).

3.1.3. Αλληλεπίδραση με το κάλιο και το μαγνήσιο

Το βόριο ενισχύει σημαντικά την πρόσληψη θρεπτικών κατιόντων (K^+ , Mg^{2+}) (Αναλογίδης, 2007). Έρευνες έχουν αποδείξει πως όταν η στάθμη του βορίου είναι ικανοποιητική η πρόσληψη του K αυξάνεται στο πολλαπλάσιο, σε σχέση με την πρόσληψή του υπό συνθήκες έλλειψης βορίου (Reeve and Shive, 1944).

Έχει αποδειχτεί ότι αυξημένες καλιούχες λιπάνσεις μπορεί να εντείνουν την παρουσία τροφοπενιών βορίου (Μήτσιος, 2004). Η δράση του καλίου είναι αρνητική επί της αναλογίας Ca/B λόγω προφανώς της ανταγωνιστική δράσης του K επί του Ca. Οι Mills and Benton Jones (1996) αναφέρουν πως η άριστη αναλογία Ca/K για τα τεύτλα είναι 100/1.

Ο Salinas *et.al.* (1987) απέδειξε ότι οι επιπτώσεις της τοξικότητας B στην απόδοση των λοβών μπιζελιού μειώθηκαν σημαντικά με την προσθήκη Mg.

3.1.4. Αλληλεπίδραση με το ασβέστιο

Έχει αποδειχτεί ότι η απορρόφηση του βορίου από φυτά ραδικιού σημείωσε σημαντική μείωση όταν αυξήθηκε η συγκέντρωση του ασβεστίου στο καλλιεργητικό μέσο (Tanaka, 1967).

Μεγάλη συγκέντρωση ιόντων Ca^{2+} μπορεί να προστατέψει τα φυτά από την τοξικότητα βορίου καθώς το Ca^{2+} αντικαθιστά τα ιόντα Al^{3+} , τα οποία αποδεσμευόμενα

συγκρατούν ποσότητες βορίου, με αποτέλεσμα το βόριο να μην είναι πλέον διαθέσιμο στα φυτά (Μήτσιος, 2004).

Η σχέση Ca/B στο φυτό αποτελεί ένα δείκτη βοριούχου θρέψης των καλλιεργειών, εξαρτώμενο και από το είδος του φυτού. Ως ιδανικές τιμές του δείκτη Ca/B έχουν αναφερθεί, 1200 για το καπνό, 500 για τη σόγια και 100 για το ζαχαρότευτλο. Η άριστη τιμή του δείκτη Ca/B για κάθε βοτανικό είδος εξαρτάται και από τις συγκεντρώσεις άλλων θρεπτικών στοιχείων στο καλλιεργητικό μέσο (Αναλογίδης, 2007).

3.2. αλληλεπίδραση του βορίου με τα μικροθρεπτικά στοιχεία

Ο Fe επιδρά αρνητικά με το βόριο (Leal *et.al.*, 1972). Το Mn ασκεί μικρή θετική επίδραση επί του βορίου, ενώ η ανεπάρκεια Cu έχει αρνητική επίδραση στην πρόσληψη του βορίου (Στυλιανίδης *et.al.*, 2002). Η έλλειψη Zn έχει αποδειχτεί ότι προκαλεί αύξηση της συσσώρευσης του βορίου στο κριθάρι σε τοξικά επίπεδα (Graham *et.al.*, 1987).

Η προσθήκη βορίου μπορεί να προκαλέσει έλλειψη Cu, Mo και Mn λόγω αύξησης της ανάπτυξης των φυτών που συνεπάγεται και αυξημένες απαιτήσεις σε μικροθρεπτικά (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). Επίσης, έχει βρεθεί ότι το βόριο επιδρά θετικά στην ανάπτυξη των φυτών σε συνθήκες τοξικότητας Al (Lukaszewski and Blevins, 1996).

Κεφάλαιο 4: Υλικά και μέθοδοι

4.1. Πειραματικό σχέδιο

Για τη μελέτη της επίδρασης του αζώτου στην πρόσληψη του βορίου από το έδαφος, πραγματοποιήθηκε πείραμα λίπανσης σε δοχεία ανάπτυξης φυτών και υπό συνθήκες θερμοκηπίου. Μελετήθηκε η επίδραση τεσσάρων επιπέδων αζώτου, ήτοι: 0, 200, 400 και 600 mg kg⁻¹ εδάφους και δύο επιπέδων βορίου, ήτοι: 0 και 5 mg kg⁻¹ εδάφους, στην ανάπτυξη του μαρουλιού καθώς και στη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος και τους φυτικούς ιστούς. Κάθε μεταχείριση είχε από τέσσερις επαναλήψεις. Το πείραμα ήταν πλήρως τυχαιοποιημένων ομάδων. Το πειραματικό σχέδιο παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 10.

Πίνακας 10. Σχέδιο πειραματικού λίπανσης μαρουλιού σε δοχεία.

A/A	Μεταχειρίσεις	Δοχεία
1	0 mg N kg ⁻¹ (μάρτυρας) + 0 mg B kg ⁻¹	1,2,3,4
2	200 mg N kg ⁻¹ + 0 mg B kg ⁻¹	5,6,7,8
3	400 mg N kg ⁻¹ + 0 mg B kg ⁻¹	9,10,11,12
4	600 mg N kg ⁻¹ + 0 mg B kg ⁻¹	13,14,15,16
5	0 mg N kg ⁻¹ + 5 mg B kg ⁻¹	17,18,19,20
6	200 mg N kg ⁻¹ + 5 mg B kg ⁻¹	21,22,23,24
7	400 mg N kg ⁻¹ + 5 mg B kg ⁻¹	25,26,27,28
8	600 mg N kg ⁻¹ + 5 mg B kg ⁻¹	29,30,31,32

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ως φυτό δοκιμής το μαρούλι (*Lactuca sativa* L.), λόγω του μικρού σχετικά βιολογικού κύκλου του. Η ποικιλία που χρησιμοποιήθηκε ήταν η *Lactuca sativa* var. *romana*. Πρόκειται για φυτό όρθιο, με λεπτή επιμήκη κεφαλή στο εσωτερικό και λεπτά μακριά φύλλα στο εξωτερικό με χρώμα συνήθως σκούρο πράσινο. Τα φύλλα αναπτύσσονται σπειροειδώς επί του κοντού βλαστού και είναι λεία, πλατειά, διαφόρου μεγέθους και σχήματος, ωοειδή, καρπιοειδή, επιμήκη, είναι ακέραια ή κυματοειδή ή ακανόνιστα οδοντωτά. Είναι φυτό ποώδες, μονοετές. Ο βλαστός είναι πολύ κοντός και φέρει πυκνά φύλλα. Το ανθικό στέλεχος είναι όρθιο, χωρίς άκανθες, διακλαδιζόμενο και πολύφυλλο (Ολύμπιος, 2001).

4.2. Εγκατάσταση του πειράματος

Η εγκατάσταση του πειράματος έγινε σε μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο του Ινστιτούτου Αμπέλου Αθηνών, που βρίσκεται στη Λυκόβρυση του Ν. Αττικής. Η φύτευση των σποριόφυτων έγινε στις 22 Σεπτεμβρίου του 2010. Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε πάρθηκε από το επιφανειακό στρώμα (0-30 cm) ενός αμπελώνα του Ινστιτούτου και το νερό άρδευσης από γεώτρηση της περιοχής.

Πίνακας 11. Φυσικοχημικές ιδιότητες εδάφους.

Ιδιότητα	Τιμές	Χαρακτηρισμός
Μηχανική ανάλυση	26,4 % C 26 % Si 47,6 % S	Αμμοαργιλοπηλώδες Sandy Clay Loam (SCL)
pH (1:1)	7,8	Αλκαλικό
Οργανική Ουσία	2,1 %	Μέτρια εφοδιασμένο
CaCO ₃ (Bernard)	25 %	Ασβεστολιθικό
Υδατοκορεσμός	43 %	-
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	2,6 mS cm ⁻¹	Μη αλατούχο
ΙΑΚ	14 meq 100 g ⁻¹	Μέτρια
Ολικό N	0,14 %	Μέτρια εφοδιασμένο
NO ₃ ⁻	36 mg kg ⁻¹	Επαρκώς εφοδιασμένο
Αφομοιώσιμος P (Olsen)	42 mg kg ⁻¹	Επαρκώς εφοδιασμένο
Αφομοιώσιμο K	1,52 meq 100 g ⁻¹	Επαρκώς εφοδιασμένο
Ανταλλάξιμο Na	0,55 meq 100 g ⁻¹	ESP < 15 %
B (διά ζέοντος ύδατος)	1,6 mg kg ⁻¹	Επαρκώς εφοδιασμένο

Αρχικά το έδαφος κοσκινίστηκε με κόσκινο των 5 mm, ώστε να απομακρυνθούν τα χαλίκια και τα φυτικά υπολείμματα. Τα δοχεία ανάπτυξης φυτών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χωρητικότητας 6,5 L.

Ο πυθμένας των δοχείων ήταν κλειστός, προκειμένου να συγκρατείται το εδαφοδιάλυμα μέσα σε αυτό. Η άρδευση γινόταν από πλαστικό σωλήνα, το κάτω άκρο του οποίου κατέληγε σε ένα στρώμα από θρυμματισμένα κομμάτια πηλού, σκεπασμένα από ένα φύλλο χαρτιού για να συγκρατείται το έδαφος (τριχοειδής άνοδος νερού).

Τα δοχεία αριθμήθηκαν και σε κάθε ένα τοποθετήθηκαν 6 kg εδάφους, αφού πρώτα υπολογίστηκε εργαστηριακά η εδαφική υγρασία (Πασχαλίδης, 2005). Επίσης, υπολογίστηκε το βάρος του δοχείου, το βάρος του σωλήνα άρδευσης και το βάρος του θρυμματισμένου πηλού που τοποθετήθηκε στον πυθμένα (μεικτό βάρος δοχείου). Μαζί με την τοποθέτηση του εδάφους, εφαρμόστηκε και η βασική λίπανση.



Εικόνα 2. Εγκατάσταση του πειραματικού.

Τα λιπάσματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: θειική αμμωνία (21-0-0), νιτρική αμμωνία (34,5-0-0), υπερφοσφορικό (0-20-0), θειικό κάλιο (0-0-50) και βορικό οξύ (H_3BO_3). Κατά τη βασική λίπανση χορηγήθηκε το 30% του N με τη μορφή θειικής αμμωνίας και το 100% του B. Ακόμη, χορηγήθηκαν 200 mg P kg^{-1} εδάφους και 200 mg K kg^{-1} εδάφους. Η εφαρμογή του P και του K έγινε εξίσου σε όλες τις μεταχειρίσεις με τη βασική λίπανση. Το υπόλοιπο 70% του N δόθηκε σε δύο ισόποσες δόσεις με τη μορφή νιτρικής αμμωνίας, ήτοι: 8 και 15 ημέρες μετά την εγκατάσταση του πειράματος. Η ποσότητα των λιπασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, υπολογίστηκε με βάση την ποσότητα των θρεπτικών στοιχείων σε αυτά (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2001).

4.3. Καλλιεργητικές φροντίδες

Κάθε δεύτερη ημέρα, αφού είχε υπολογιστεί το μεικτό βάρος του δοχείου (έδαφος, πλαστικός σωλήνας άρδευσης, θρυμματισμένος πυλός, βάρος δοχείου), τα δοχεία ζυγίζονταν και ακολουθούσε άρδευση με τόση ποσότητα νερού, ώστε η υγρασία του εδάφους να διατηρείται στο 70% της υδατοχωρητικότητας (Πασχαλίδης *et.al.*, 2009).

Μία εβδομάδα μετά τη μεταφύτευση των σποριόφυτων πραγματοποιήθηκε προληπτικό ριζοπότισμα με μυκητοκτόνο σκεύασμα, για την αποφυγή εκδήλωσης σήψεων στις ρίζες και τη βάση του λαιμού των φυτών (Παναγόπουλος, 2000).

Ακόμη, κάθε εβδομάδα πραγματοποιούνταν απομάκρυνση των ζιζανίων και αναμόχλευση του εδάφους, για τον καλύτερο αερισμό και την αποφυγή δημιουργίας επιφανειακής κρούστας.

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις: 20, 35 και 50 ημέρες (συγκομιδή) μετά τη μεταφύτευση των σποριόφυτων. Μετρήθηκαν το ύψος των φυτών και ο αριθμός των φύλλων.



Εικόνα 3. Ο πειραματικός την 20^η ημέρα της καλλιέργειας.

4.4. Συγκομιδή και δειγματοληψία

Η συγκομιδή και η δειγματοληψία του εδάφους έγινε στις 11 Νοεμβρίου του 2010. Τα φυτά κόπηκαν στο ύψος του λαιμού και αφού υπολογίστηκε το νωπό βάρος τους, τοποθετήθηκαν σε σακούλες, στις οποίες αναγραφόντουσαν τα στοιχεία κάθε δείγματος.

Το έδαφος απομακρύνθηκε από τα δοχεία, αναμοχλεύτηκε έκαστο και έγινε η δειγματοληψία του. Από κάθε δοχείο πάρθηκαν τυχαία περίπου 500 g εδάφους, για περαιτέρω εργαστηριακές αναλύσεις. Κάθε εδαφικό δείγμα τοποθετήθηκε σε πλαστική σακούλα, στην οποία αναγραφόντουσαν τα στοιχεία του.

Οι ρίζες των φυτών αφαιρέθηκαν με προσοχή κατά το στάδιο της δειγματοληψίας του εδάφους και τοποθετήθηκαν και αυτές σε πλαστικές σακούλες.

Τα δείγματα εδάφους και φυτικών ιστών τοποθετήθηκαν σε κιβώτια και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Εδαφολογίας και Γεωργικής Χημείας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο χώρος του θερμοκηπίου, όπου είχε εγκατασταθεί το πείραμα, καθαρίστηκε και τα δοχεία πλύθηκαν και αποθηκεύτηκαν για μελλοντική χρήση.



Εικόνα 4. Ο πειραματικός λίγο πριν από τη συγκομιδή.

4.5. Αναλύσεις εδάφους και φυτικών ιστών

Τα φυσικοχημικά χαρακτηρίστηκα του εδάφους προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τις διεθνώς αποδεκτές μεθόδους της SSSA (Page *et.al.*, 1982).

Η μηχανική σύσταση του εδάφους προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Bouyoucos. Το pH προσδιορίστηκε σε αιώρημα 1:1 (1 έδαφος : 1 νερό). Η οργανική ουσία υπολογίστηκε με τη μέθοδο Walkley-Black. Το ανθρακικό ασβέστιο προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Bernard. Για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, υπολογίστηκε η ηλεκτρική αντίσταση πάστας κορεσμού. Το ολικό N του εδάφους προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Kjeldahl, τα νιτρικά ιόντα με τη μέθοδο του καδμίου και τα αμμωνιακά χρωματομετρικά με τη μέθοδο της ινδοφαινόλης. Ο αφομοιώσιμος φώσφορος προσδιορίστηκε κατά Olsen. Τα ανταλλάξιμα κατιόντα προσδιορίστηκαν εκχυλιζόμενα με οξικό αμμώνιο. Το K υπολογίστηκε με τη χρήση φλογοφωτόμετρου, ενώ το Ca και το Mg με φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης. Τα μικροθρεπτικά Fe, Mn, Zn και Cu υπολογίστηκαν μετά από εκχύλιση με DTPA.

Στους φυτικούς ιστούς προσδιορίστηκαν τα στοιχεία: ολικό N, P, K, Ca, Mg και τα μικροθρεπτικά Fe, Mn, Zn, Cu και B. Το ολικό N προσδιορίστηκε χρωματομετρικά με τη μέθοδο της ινδοφαινόλης (Allen, 1989). Η ξηρή καύση και ο προσδιορισμός των υπόλοιπων χημικών στοιχείων έγινε όπως περιγράφεται από τους Karla (1998) και Πασχαλίδη (2006).

Το βόριο στο έδαφος και στους φυτικούς ιστούς προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της Αζωμεθίνης (John *et.al.*, 1975). Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρύτατα και παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

4.6. Στατιστική επεξεργασία

Η στατιστική επεξεργασία έγινε με το στατιστικό πακέτο STATGRAFICS Centurio XV.II. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση διασποράς δύο παραγόντων, των επεμβάσεων N (0, 200, 400 και 600 mg kg⁻¹) και B (0 και 5 mg kg⁻¹), καθώς και της αλληλεπίδρασής τους.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα - Συζήτηση

5.1. Ανάπτυξη και απόδοση των φυτών

Για τη μελέτη της επίδρασης του αζώτου και του βορίου στην ανάπτυξη και απόδοση του μαρουλιού πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις του ύψους των φυτών και του αριθμού των φύλλων τους: 20, 35 και 50 ημέρες (συγκομιδή) μετά τη μεταφύτευση των φυτών. Μετά τη συγκομιδή μετρήθηκε το νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου και του υπόγειου μέρους των φυτών και η συνολική τους επιφάνεια. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 12. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε μακροσκοπική παρατήρηση των φυτών.

Ύψος φυτών:

Στην 1^η μέτρηση (20 ημέρες μετά τη μεταφύτευση) το ύψος των φυτών κυμαίνεται από 5,3 έως 15,6 cm, στη 2^η μέτρηση (35 ημέρες μετά τη μεταφύτευση) από 11,3 έως 33,9 cm και στην 3^η μέτρηση (50 ημέρες μετά τη μεταφύτευση - συγκομιδή) από 13,3 έως 40,9 cm (πίνακας 12). Σε όλες τις μετρήσεις παρατηρείται σημαντική αύξηση του ύψους των φυτών στις μεταχειρίσεις, όπου η προσθήκη N ήταν ίση με 200 mg kg⁻¹ και σημαντική μείωση του ύψους στις μεταχειρίσεις, όπου η προσθήκη N ήταν ίση με 400 mg kg⁻¹ και 600 mg kg⁻¹, γεγονός που επιβεβαιώνει την άποψη πως οι υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου στο έδαφος, μπορούν να μειώσουν την ανάπτυξη και απόδοση των φυτών (Γιάσογλου, 1995; Πασχαλίδης *et.al.*, 2009). Δεν παρατηρείται καμία σημαντική μεταβολή του ύψους των φυτών στις μεταχειρίσεις με B, σε σχέση με τις αντίστοιχες χωρίς B.

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στο ύψος των φυτών (πίνακα 13), φαίνεται πως οι επεμβάσεις N επιδρούν σημαντικά στη μεταβολή του ύψους των φυτών και στις τρεις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, ενώ δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων B.

Αριθμός φύλλων:

Στην 1^η μέτρηση (20 ημέρες μετά τη μεταφύτευση) ο αριθμός των φύλλων κυμαίνεται από 5,5 έως 8, στη 2^η μέτρηση (35 ημέρες μετά τη μεταφύτευση) από 8,8 έως 17,5 και στην 3^η μέτρηση (50 ημέρες μετά τη μεταφύτευση - συγκομιδή) από 12,3 έως 29,3 (πίνακας 12). Και στις τρεις μετρήσεις παρατηρείται σημαντική αύξηση του αριθμού των φύλλων των φυτών στις μεταχειρίσεις, όπου η προσθήκη N ήταν ίση με 200 mg kg⁻¹ και σημαντική

μείωσή τους στις μεταχειρίσεις, όπου η προσθήκη του στοιχείου ήταν ίση με 400 mg kg^{-1} και 600 mg kg^{-1} . Η τάση που παρατηρείται στις μεταχειρίσεις χωρίς B, είναι παρόμοια με αυτή των αντίστοιχων μεταχειρίσεων με B.

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στον αριθμό των φύλλων των φυτών (πίνακα 13) φαίνεται πως οι επεμβάσεις N επιδρούν σημαντικά στη μεταβολή του αριθμού τους και στις τρεις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, ενώ δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων B.

Νωπό βάρος υπέργειου και υπόγειου μέρους των φυτών:

Το νωπό βάρος του υπέργειου μέρους των φυτών κυμαίνεται από 24,1 έως 318,6 g και του υπόγειου μέρους από 1,4 έως 18,6 g (πίνακας 12). Παρατηρείται μία σημαντική αύξηση του νωπού βάρους του υπέργειου και του υπόγειου μέρους των φυτών στις μεταχειρίσεις όπου η προσθήκη του N ήταν ίση με 200 mg kg^{-1} και σημαντική μείωσή του στις μεταχειρίσεις όπου η προσθήκη του στοιχείου ήταν 400 mg kg^{-1} και 600 mg kg^{-1} . Παρόμοια αποτελέσματα, όσον αφορά την επίδραση του N στην απόδοση του μαρουλιού σε νωπό βάρος, έχουν αναφερθεί και από άλλους ερευνητές (Πασχαλίδης *et.al.*, 2009).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στο νωπό βάρος του υπέργειου και υπόγειου μέρους των φυτών (πίνακα 13), φαίνεται πως οι επεμβάσεις N επιδρούν σημαντικά στη μεταβολή του νωπού βάρους, ενώ δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων B.

Ξηρό βάρος υπέργειου και υπόγειου μέρους των φυτών:

Το ξηρό βάρος του υπέργειου μέρους των φυτών κυμαίνεται από 0,6 έως 14,9 g και του υπόγειου μέρους από 0,2 έως 1,6 g (πίνακας 12). Τα αποτελέσματα του ξηρού βάρους των φυτών είναι αντίστοιχα με αυτά του νωπού βάρους. Παρατηρείται μία σημαντική αύξηση του ξηρού βάρους του υπέργειου και του υπόγειου μέρους των φυτών στις μεταχειρίσεις όπου η προσθήκη του N ήταν ίση με 200 mg kg^{-1} και μία σημαντική μείωσή του στις μεταχειρίσεις όπου η προσθήκη του N ήταν ίση με 400 mg kg^{-1} και 600 mg kg^{-1} . Και στο ξηρό, όπως και στο νωπό βάρος των φυτών, δεν παρατηρείται καμία σημαντική μεταβολή ανάμεσα στις μεταχειρίσεις χωρίς B και στις αντίστοιχες με B.

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στο ξηρό βάρος του υπέργειου και υπόγειου μέρους των φυτών (πίνακα 13), φαίνεται πως οι επεμβάσεις N επιδρούν σημαντικά στη μεταβολή του ξηρού βάρους, ενώ δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων B.

Επιφάνεια φυτών:

Το εμβαδόν της επιφάνειας των φυτών (υπέργειο μέρος) κυμαίνεται από 45,6 έως 611,1 cm² (πίνακας 12). Παρατηρείται μία σημαντική αύξησή του στις μεταχειρίσεις όπου η προσθήκη N ήταν ίση με 200 mg kg⁻¹ και σημαντική μείωσή του στις μεταχειρίσεις όπου το η προσθήκη N ήταν ίση με 400 mg kg⁻¹ και 600 mg kg⁻¹. Στις μεταχειρίσεις με B το εμβαδόν της επιφάνειας των φυτών είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις αντίστοιχες χωρίς B, με εξαίρεση τη μεταχείριση όπου η προσθήκη N ήταν ίση με 600 mg kg⁻¹. Η επίδραση του B στο εμβαδόν της επιφάνειας του υπέργειου μέρους των φυτών, πιθανώς να σχετίζεται με την επίδραση του στοιχείου στη μεταβολή του πάχους των φύλλων τους. Σύμφωνα με τους Καραμπουρνιώτης *et.al.* (2005), ένα από τα πιο χαρακτηριστικά συμπτώματα της έλλειψης B στα φύλλα των φυτών είναι η εντυπωσιακή αύξηση του πάχους του ελάσματος συγκριτικά με τα φύλλα των φυσιολογικών φυτών.

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στο εμβαδόν της επιφάνειας των φυτών (πίνακα 13), φαίνεται πως οι επεμβάσεις N επιδρούν σημαντικά στη μεταβολή του, ενώ σημαντική επίδραση ασκούν και οι επεμβάσεις B σε αυτό.

Μακροσκοπική παρατήρηση της επίδρασης των επεμβάσεων N και B, στην ανάπτυξη και απόδοση των φυτών:

Από την παρατήρηση των φυτών στα διάφορα στάδια της ανάπτυξής τους, προκύπτει ότι στις μεταχειρίσεις με προσθήκη υψηλών δόσεων N λίπανσης (600 mg kg⁻¹), είχαμε καχεκτική βλάστηση, μεσονεύριος χλώρωση του ελάσματος και αδυναμία σχηματισμού κεφαλής (Εικόνα 5). Σε όλες τις επαναλήψεις του μάρτυρα παρατηρήθηκε η δημιουργία μεγάλου βλαστού (Εικόνα 6). Στα φυτά των μεταχειρίσεων: 0 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹ και 200 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹ παρατηρήθηκε περιφερειακό κάψιμο των φύλλων, αρχικά της βάσης (Εικόνα 7 και 8), το οποίο σύμφωνα με τους Winson and Adams (1987) είναι χαρακτηριστικό σύμπτωμα της τοξικότητας βορίου στο μαρούλι. Το παραπάνω σύμπτωμα δεν εμφανίστηκε στα φυτά των μεταχειρίσεων: 400 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹ και 600 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹, γεγονός που επιβεβαιώνει εκ πρώτης όψεως την αρνητική επίδραση του N επί του B. Τη μεγαλύτερη ανάπτυξη την είχαν μακροσκοπικά τα φυτά της μεταχείρισης: 200 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹, γεγονός που επαληθεύουν και οι σχετικές μετρήσεις (πίνακας 12). Τα φυτά σε αυτήν τη μεταχείριση είχαν πλούσια και ζωηρή βλάστηση με έντονα πράσινο χρωματισμό του ελάσματος, ενώ η κεφαλή τους ήταν συμπαγής και καλοσχηματισμένη.

Πίνακας 12. Στοιχεία της ανάπτυξης και απόδοσης των φυτών. Μέσοι όροι των τιμών: Ύψος (cm), αριθμός φύλλων, νωπό βάρος υπέργειου και υπόγειου μέρους (g), ξηρό βάρος υπέργειου και υπόγειου μέρους (g), επιφάνεια φυτών (cm²).

Μεταχειρίσεις	Ύψος (μ.ο.) σε cm 20 ^η ημέρα	Ύψος (μ.ο.) σε cm 35 ^η ημέρα	Ύψος (μ.ο.) σε cm 50 ^η ημέρα	Αριθμός φύλλων (μ.ο.) 20 ^η ημέρα	Αριθμός φύλλων (μ.ο.) 35 ^η ημέρα	Αριθμός φύλλων (μ.ο.) 50 ^η ημέρα	Νωπό Β. υπέργειου (μ.ο.) σε g	Νωπό Β. υπόγειου (μ.ο.) σε g	Ξηρό Β. υπέργειου (μ.ο.) σε g	Ξηρό Β. υπόγειου (μ.ο.) σε g	Επιφάνεια φυτών (μ.ο.) σε cm ²
0 mg N kg⁻¹ + 0 mg B kg⁻¹ (μάρτυρας)	15,1	32,5	39,8	6,8	15,3	24,8	207,1	13,6	10,3	1,1	395,5
200 mg N kg⁻¹ + 0 mg B kg⁻¹	15,4	33,4	40,4	7,8	17,5	27,3	290,0	18,6	14,2	1,6	523,1
400 mg N kg⁻¹ + 0 mg B kg⁻¹	13,9	23,6	29,9	6,0	11,8	17,3	134,5	11,8	8,1	1,0	287,5
600 mg N kg⁻¹ + 0 mg B kg⁻¹	5,3	12,3	13,8	5,5	10,3	12,3	24,1	2,4	1,2	0,3	67,2
0 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹	15,3	32,9	39,4	7,3	15,8	24,3	238,5	14,6	11,3	1,3	424,2
200 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹	15,6	33,9	40,9	8,0	17,0	29,3	318,6	16,7	14,9	1,5	611,1
400 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹	13,1	23,5	33,3	6,0	11,8	17,8	124,7	8,7	6,1	0,7	310,9
600 mg N kg⁻¹ + 5 mg B kg⁻¹	6,0	11,3	13,3	5,5	8,8	14,0	26,5	1,4	0,6	0,2	45,6

Πίνακας 13. Ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N (0, 200, 400 και 600 mg kg⁻¹) και B (0 και 5 mg kg⁻¹) στα χαρακτηριστικά της ανάπτυξης και απόδοσης των φυτών: (Ύψος, αριθμός φύλλων, νωπό βάρος υπέργειου και υπόγειου μέρους, ξηρό βάρος υπέργειου και υπόγειου μέρους, επιφάνεια φυτών).

Μεταβλητές	Πηγή παραλλακτικότητας		
	Επεμβάσεις N	Επεμβάσεις B	Επεμβάσεις N * Επεμβάσεις B
Ύψος (cm) 20 ^η ημέρα	< 0,001	ns	ns
Ύψος (cm) 35 ^η ημέρα	< 0,001	ns	ns
Ύψος (cm) 50 ^η ημέρα	< 0,001	ns	ns
Αριθμός φύλλων 20 ^η ημέρα	< 0,001	ns	ns
Αριθμός φύλλων 35 ^η ημέρα	< 0,001	ns	ns
Αριθμός φύλλων 50 ^η ημέρα	< 0,001	ns	ns
Νωπό B. υπέργειου (g.)	< 0,001	ns	ns
Νωπό B. υπόγειου (g.)	< 0,001	ns	ns
Ξηρό B. υπέργειου (g.)	< 0,001	ns	ns
Ξηρό B. υπόγειου (g.)	< 0,001	ns	ns
Επιφάνεια φυτών (cm ²)	< 0,001	< 0,05	ns



Εικόνα 5. Μείωση της ανάπτυξης και απόδοσης των φυτών με την προσθήκη 600 mg N kg^{-1} .



Εικόνα 6. Δημιουργία μεγάλου βλαστού στο μάρτυρα ($0 \text{ mg N kg}^{-1} + 0 \text{ mg B kg}^{-1}$).



Εικόνα 7. Συμπτώματα τοξικότητας Β. Μεταχείριση: $0 \text{ mg N kg}^{-1} + 5 \text{ mg B kg}^{-1}$ (20^η ημέρα).



Εικόνα 8. Συμπτώματα τοξικότητας Β. Μεταχείριση: $0 \text{ mg N kg}^{-1} + 5 \text{ mg B kg}^{-1}$ (50^η ημέρα).

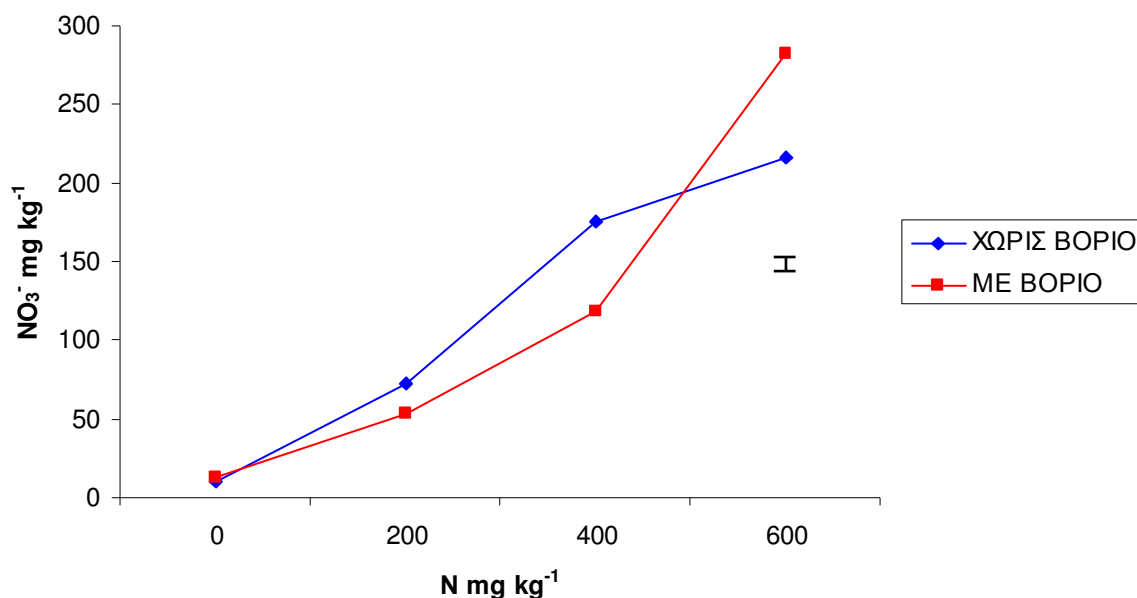
5.2. Συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος

5.2.1. Άζωτο (N) στο έδαφος

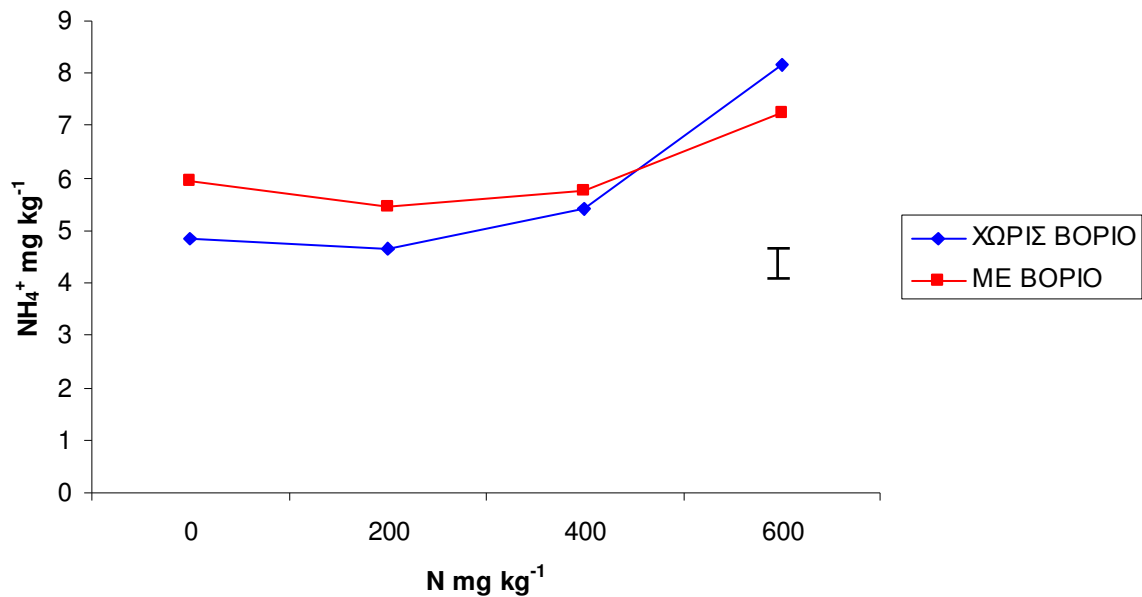
Στο έδαφος προσδιορίστηκε το NO_3^- -N και το NH_4^+ -N. Οι τιμές του NO_3^- -N κυμαίνονται από 9,8 έως 282,1 mg kg^{-1} , ενώ του NH_4^+ -N από 4,7 έως 8,1 mg kg^{-1} .

Στις μεταχειρίσεις χωρίς προσθήκη N, η συγκέντρωση του NO_3^- -N είναι $< 20 \text{ mg kg}^{-1}$, που σημαίνει πως υπάρχει ανεπάρκεια του στοιχείου (Κουκουλάκης, 1991). Παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του NO_3^- -N, όσο αυξάνεται η προσθήκη N σε σχέση με το μάρτυρα (Διάγραμμα 1), γεγονός που επιβεβαιώνει τη θετική επίδραση της N λίπανσης στη συσσώρευση των NO_3^- στο έδαφος (Marschner, 1995, Γιάσογλου, 1995). Ακόμη, η πολύ υψηλή δόση N παρουσία B, αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση των νιτρικών στο έδαφος. Η συγκέντρωση των NH_4^+ ιόντων στο έδαφος αυξήθηκε σημαντικά στις μεταχειρίσεις όπου υπήρχαν υψηλές δόσεις N λίπανσης (Διάγραμμα 2).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του NO_3^- -N και NH_4^+ -N στο έδαφος, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N στη συγκέντρωση του NO_3^- -N και NH_4^+ -N και σημαντική αλληλεπίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του NO_3^- -N (Πίνακας 14).



Διάγραμμα 1. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του NO_3^- -N στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.



Διάγραμμα 2. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του NH_4^+ -N στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

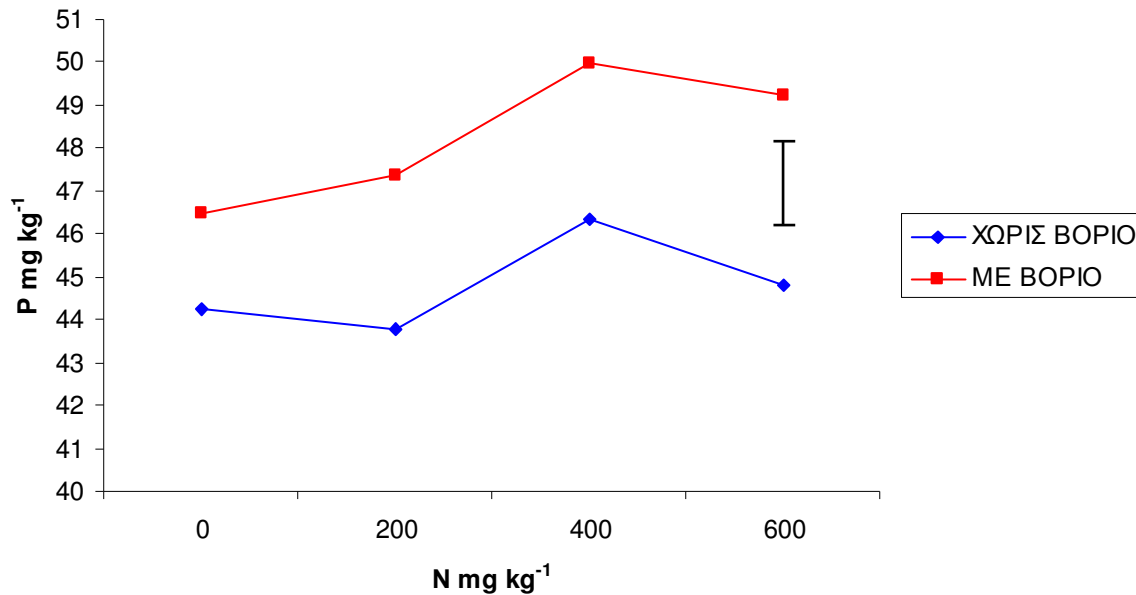
5.2.2. Φώσφορος (P) στο έδαφος

Οι τιμές του αφομοιώσιμου P κυμαίνονται από 43,8 έως 50,0 mg kg^{-1} , που σημαίνει πως το έδαφος είναι επαρκώς εφοδιασμένο με το εν λόγω μακροθρεπτικό (Havlin *et.al.*, 1999; Σιμώνης, 1990; Ασημακόπουλος *et.al.*, 2009).

Φαίνεται πως η προσθήκη N δεν επιδρά σημαντικά στη συγκέντρωση του αφομοιώσιμου P στο έδαφος, παρατηρείται όμως μία τάση μείωσης του αφομοιώσιμου P στο έδαφος, στις πολύ υψηλές δόσεις N. Στις μεταχειρίσεις με B υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση αφομοιώσιμου P στο έδαφος, σε σχέση με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις χωρίς B (Διάγραμμα 3). Σύμφωνα με τον Graham *et.al.* (1987), η αλληλεπίδραση P και B, δεν έχει πλήρως κατανοηθεί και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Γενικά, ο P δεσμεύεται ισχυρά από τα αργιλικά ορυκτά, αλλά και από το CaCO_3 , γεγονός που επιδράει στη διαθεσιμότητά του και στις σχέσεις του με τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία. Στα ασβεστούχα εδάφη, τα φωσφορικά ιόντα προσροφούνται αρχικά πάνω στην επιφάνεια του ασβεστίτη και κατόπιν σχηματίζουν κρυσταλλικό φωσφορικό ασβέστιο. Έχει αποδειχτεί, ότι τα ιόντα P αντιδρούν ταχέως με το CaCO_3 και καθιζάνουν αρχικά ως φωσφορικό διασβέστιο και στη συνέχεια ως φωσφορικό οκτασβέστιο και φωσφορικό τριασβέστιο (Griffin and Jurinak, 1974).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του αφομοιώσιμου P στο έδαφος, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων B στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 14).



Διάγραμμα 3. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του αφομοιώσιμου P στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

5.2.3. Κάλιο (K), Ασβέστιο (Ca), Μαγνήσιο (Mg) στο έδαφος

Το ανταλλάξιμο K κυμαίνεται από 1,63 έως 2,05 meq 100g⁻¹, γεγονός που υποδηλώνει πως το έδαφος είναι επαρκώς εφοδιασμένο σε K (Havlin *et.al.*, 1999; Σιμώνης, 1990; Ασημακόπουλος *et.al.*, 2009).

Οι υψηλές δόσεις αζωτούχου λίπανσης επηρεάζουν θετικά τη συγκέντρωση του ανταλλάξιμου K στο έδαφος, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στη μειωμένη πρόσληψη του στοιχείου από τα φυτά, λόγω της αρνητικής αλληλεπίδρασης του NH₄⁺-N επί του K (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003), αλλά και της μικρής ανάπτυξης και απόδοσης των φυτών (μείωση της παραγόμενης βιομάζας), γεγονός που συνεπάγεται μικρότερες απαιτήσεις σε K και άρα μεγαλύτερη συσσώρευση του στοιχείου στο έδαφος (Μήτσιος 2004; Πασχαλίδης *et.al.*, 2009). Το B επιδρά αρνητικά στη συγκέντρωση του ανταλλάξιμου K στο έδαφος, γεγονός που θα μπορούσε να επιβεβαιώσει την άποψη, ότι η πρόσληψη των ιόντων K

από τα φυτά αυξάνεται, όταν η συγκέντρωση του Β στο έδαφος κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα (Reeve and Shine, 1944) (Διάγραμμα 4).

Σύμφωνα με τον Αναλογίδη (2000), όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κορεσμού του εδαφοσυμπλόκου με ανταλλάξιμο Ca, τόσο ισχυρότερα συγκρατείται το Κ ως ανταλλάξιμο κατιόν (Διάγραμμα 4 και 5).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων Ν και Β στη συγκέντρωση του ανταλλάξιμου Κ στο έδαφος, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων Ν και Β στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 14).

Το ανταλλάξιμο Ca κυμαίνεται από 42,4 έως 51,7 meq 100g⁻¹, δείχνοντας πως το έδαφος είναι επαρκώς εφοδιασμένο (Αλεξιάδης, 1980).

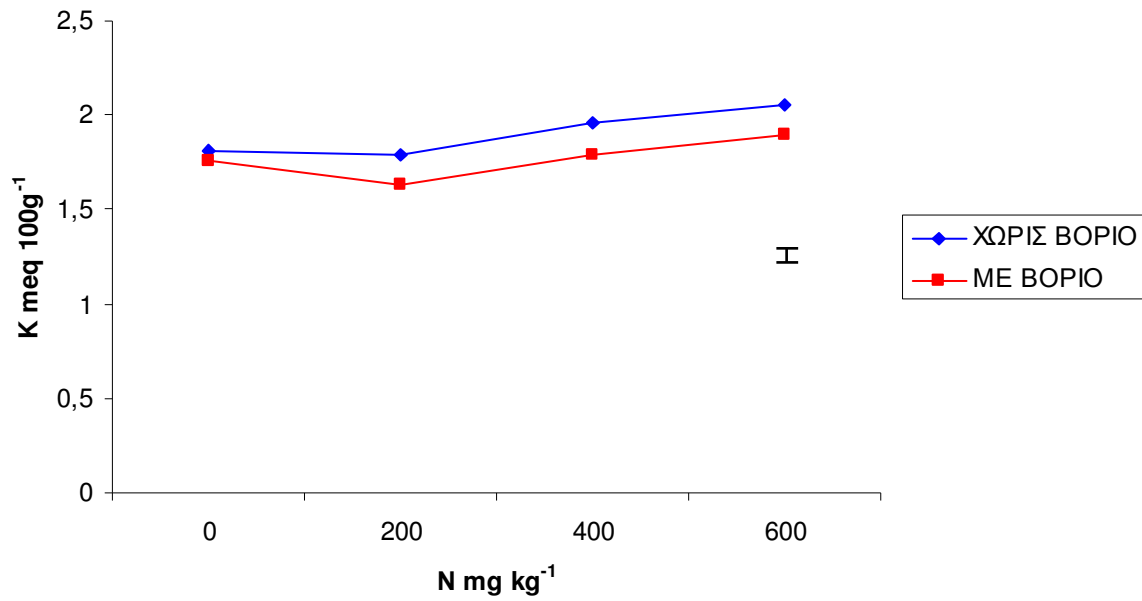
Η προσθήκη Ν επιδρά σημαντικά στη συγκέντρωση του ανταλλάξιμου Ca, ενώ δεν παρατηρείται επίδραση της προσθήκης Β στη συγκέντρωση του στοιχείου στο έδαφος (Διάγραμμα 5). Όπως και με το Κ, η προσθήκη υψηλών δόσεων Ν επηρεάζει σημαντικά τη συσσώρευση του ανταλλάξιμου Ca στο έδαφος, γεγονός που οφείλεται πιθανώς στη μειωμένη πρόσληψη του στοιχείου από τα φυτά, λόγω της αρνητικής αλληλεπίδρασης του Ν επί του Ca (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003), αλλά και της μικρής ανάπτυξης και απόδοσης των φυτών (Πασχαλίδης *et.al.*, 2009).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων Ν και Β στη συγκέντρωση του Ca στο έδαφος, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων Ν στη συγκέντρωση του στοιχείου, ενώ δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων Β (Πίνακας 14).

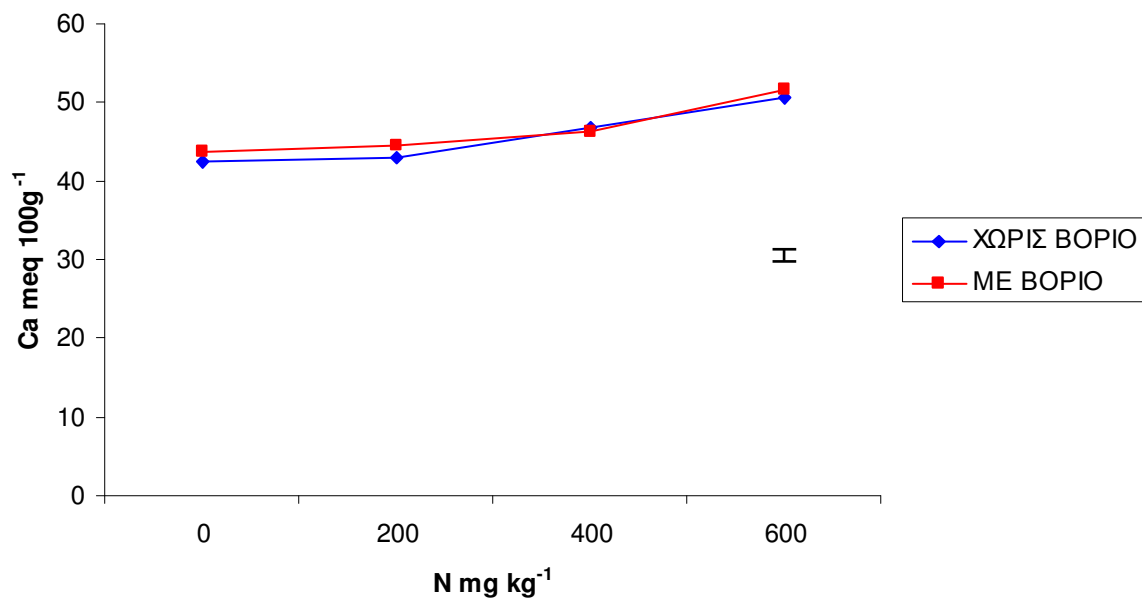
Οι τιμές του ανταλλάξιμου Mg στο έδαφος κυμαίνονται από 0,95 έως 1,05 meq 100g⁻¹ και κρίνονται ως ικανοποιητικές (Havlin *et.al.*, 1999; Πασχαλίδης, 2006).

Παρατηρείται μία μη στατιστικώς σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του ανταλλάξιμου Mg στο έδαφος στις μεταχειρίσεις χωρίς Β, σε σχέση με τις αντίστοιχες με Β (Διάγραμμα 6). Σύμφωνα με τους Havlin *et.al.* (1999) και Αλιφραγκή (2008), οι υψηλές συγκεντρώσεις Κ, Ca και NH₄⁺-N στο έδαφος έχουν αρνητική επίδραση στη διαθεσιμότητα του Mg, ενώ η προσθήκη NO₃⁻-N έχει θετική επίδραση. Τα Ρ ανιόντα μπορούν να περιορίσουν την έκπλυση του Mg από το έδαφος, εξαιτίας της δημιουργίας δυσδιάλυτων συμπλόκων μεταξύ των δύο στοιχείων.

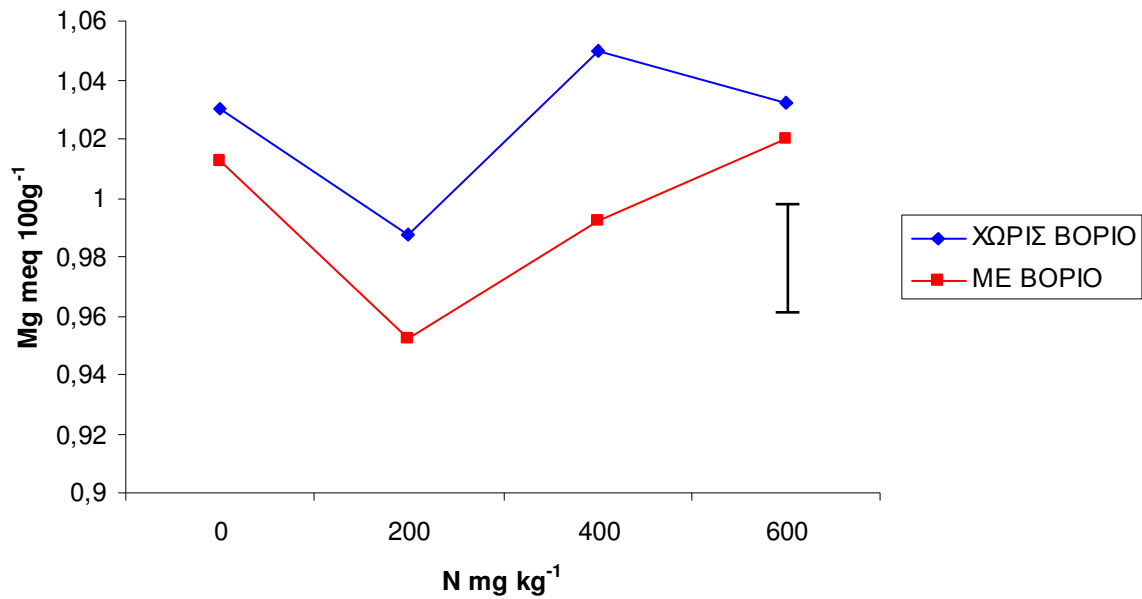
Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων Ν και Β στη συγκέντρωση του Mg στο έδαφος, δεν παρατηρείται καμία στατιστικώς σημαντική επίδραση (Πίνακας 14).



Διάγραμμα 4. Επίδραση των επεμβάσεων N και Β στη συγκέντρωση του ανταλλάξιμου Κ στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.



Διάγραμμα 5. Επίδραση των επεμβάσεων N και Β στη συγκέντρωση του ανταλλάξιμου Ca στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.



Διάγραμμα 6. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του ανταλλάξιμου Mg στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

5.2.4. Σίδηρος (Fe), Μαγγάνιο (Mn), Ψευδάργυρος (Zn), Χαλκός (Cu) στο έδαφος

Οι τιμές του διαθέσιμου Fe κυμαίνονται από 1,1 έως 2,0 mg kg⁻¹, γεγονός που φανερώνει πως υπάρχει έλλειψη του στοιχείου στο έδαφος (Διάγραμμα 7) (Kabata - Pendias and Pendias, 2001; Κεραμίδας, 1989; Αναλογίδης, 2007). Η έλλειψη αυτή οφείλεται πιθανώς στην ακινητοποίηση (καθίζηση) του Fe, εξαιτίας της αντίδρασης του Fe²⁺ και του Fe³⁺ με το ανθρακικό ασβέστιο (Loeppert and Clarke, 1984).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Fe στο έδαφος, δεν παρατηρείται καμία στατιστικώς σημαντική επίδραση (Πίνακας 14).

Το διαθέσιμο Mn κυμαίνεται από 4,0 έως 6,7 mg kg⁻¹ και οι τιμές αυτές δείχνουν πως το έδαφος είναι επαρκώς εφοδιασμένο σε Mn (Διάγραμμα 8) (Kabata - Pendias and Pendias, 2001; Κεραμίδας, 1989; Αναλογίδης, 2007). Επισημαίνεται, πως το υψηλό pH προκαλεί μείωση της συγκέντρωσης του Mn²⁺ στο εδαφοδιάλυμα (Lindsay, 1979).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Mn στο έδαφος, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των

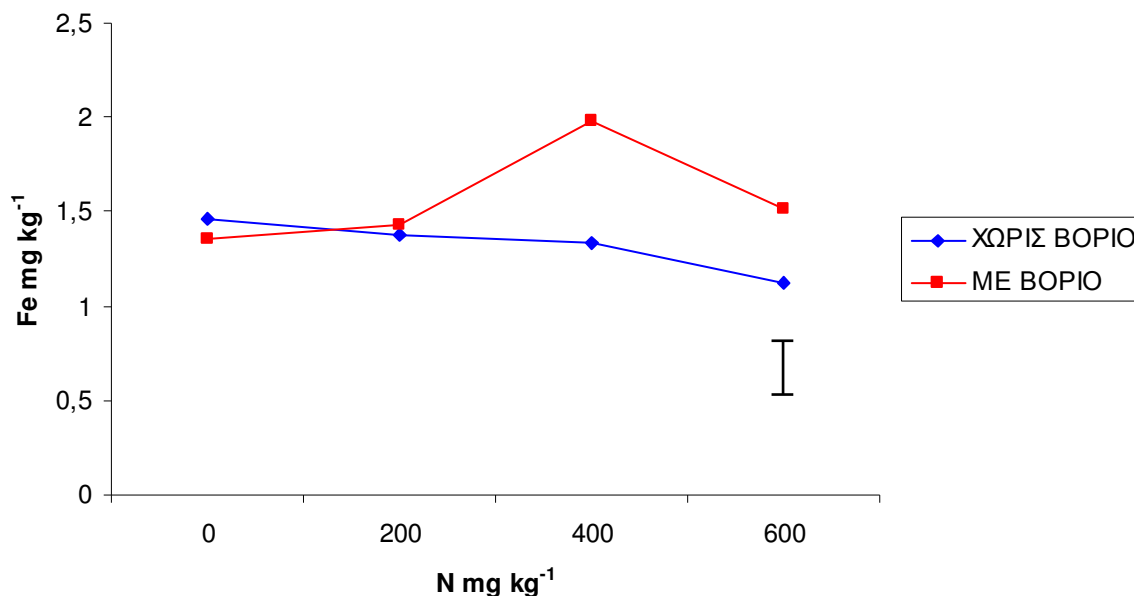
επεμβάσεων N στη συγκέντρωση του στοιχείου, ενώ δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων B (Πίνακας 14).

Ο διαθέσιμος Zn κυμαίνεται από 2,52 έως 2,94 mg kg⁻¹. Σύμφωνα με τους Κεραμίδα (1989) και Kabata - Pendias and Pendias (2001), το έδαφος κρίνεται ως επαρκώς εφοδιασμένο σε διαθέσιμο Zn (Διάγραμμα 9).

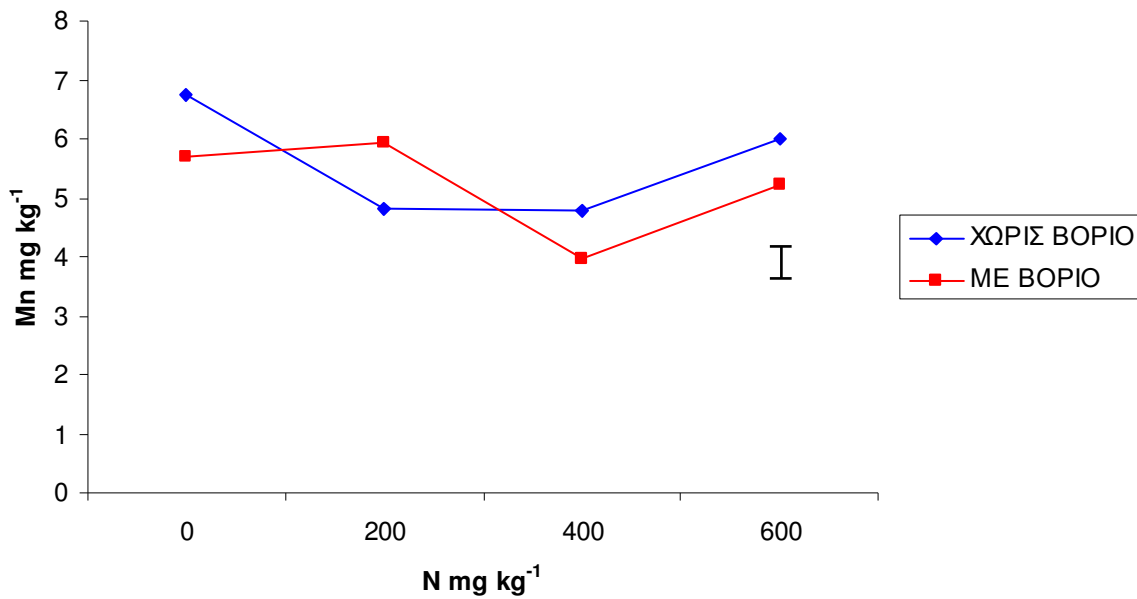
Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Zn στο έδαφος, δεν παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 14).

Οι τιμές του Cu κυμαίνονται από 12,7 έως 15,1 mg kg⁻¹, που σημαίνει πως υπάρχει επάρκεια του στοιχείου στο έδαφος (Kabata - Pendias and Pendias, 2001; Κεραμίδας, 1989; Αναλογίδης, 2007). Παρατηρείται μία τάση αύξησης της συσσώρευσης του Cu στις μεταχειρίσεις με B σε σχέση με τις αντίστοιχες χωρίς B, η οποία όμως δεν είναι στατιστικώς σημαντική (Διάγραμμα 10).

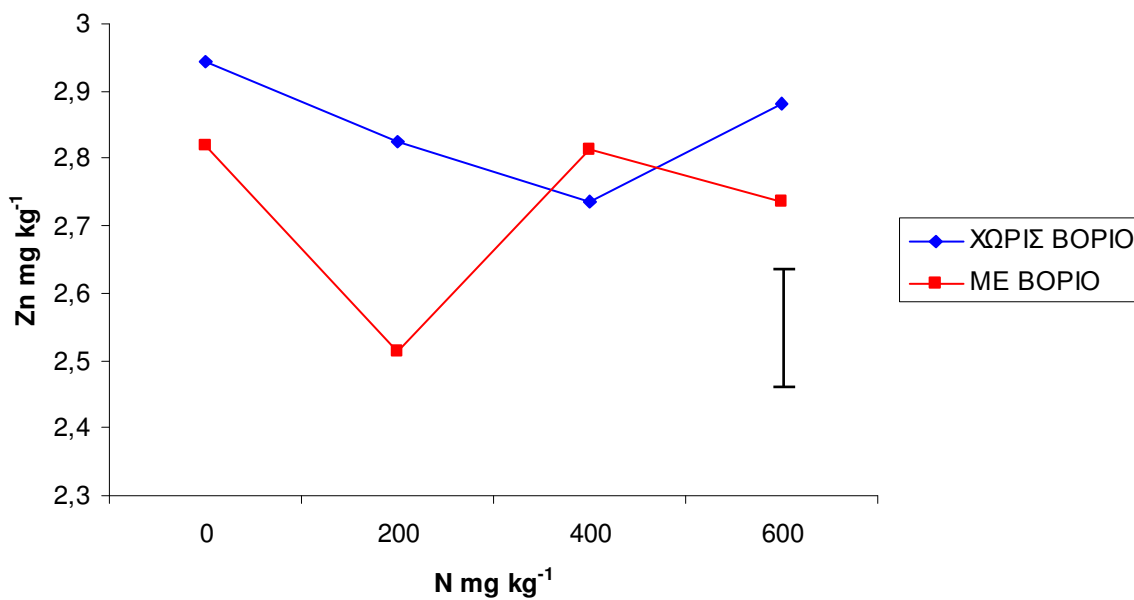
Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Cu στο έδαφος, δεν παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 14).



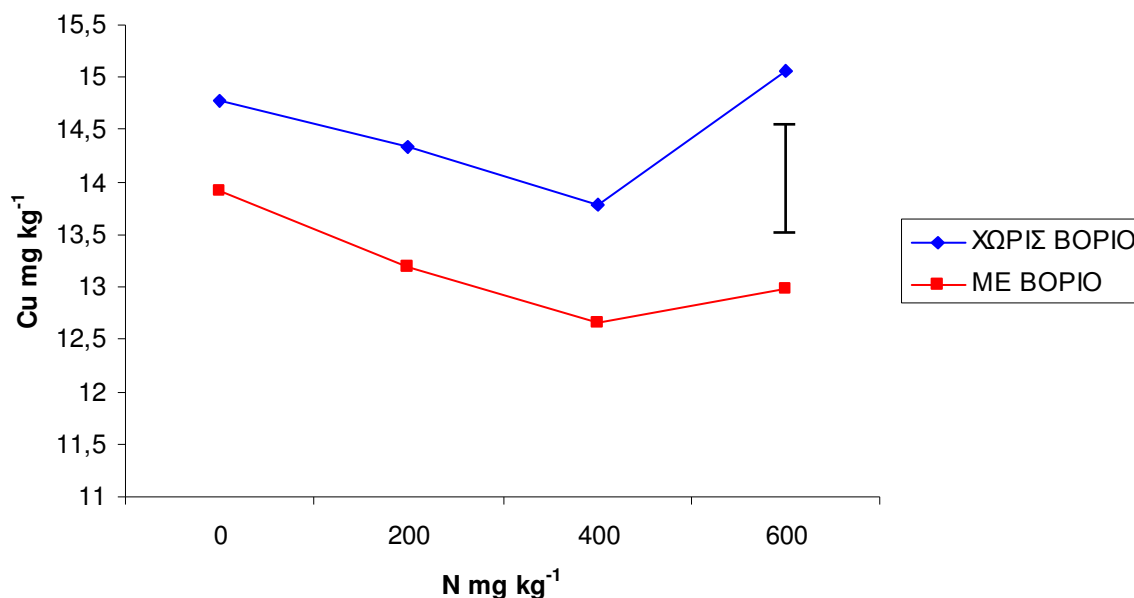
Διάγραμμα 7. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Fe στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.



Διάγραμμα 8. Επίδραση των επεμβάσεων N και Β στη συγκέντρωση του Mn στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.



Διάγραμμα 9. Επίδραση των επεμβάσεων N και Β στη συγκέντρωση του Zn στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.



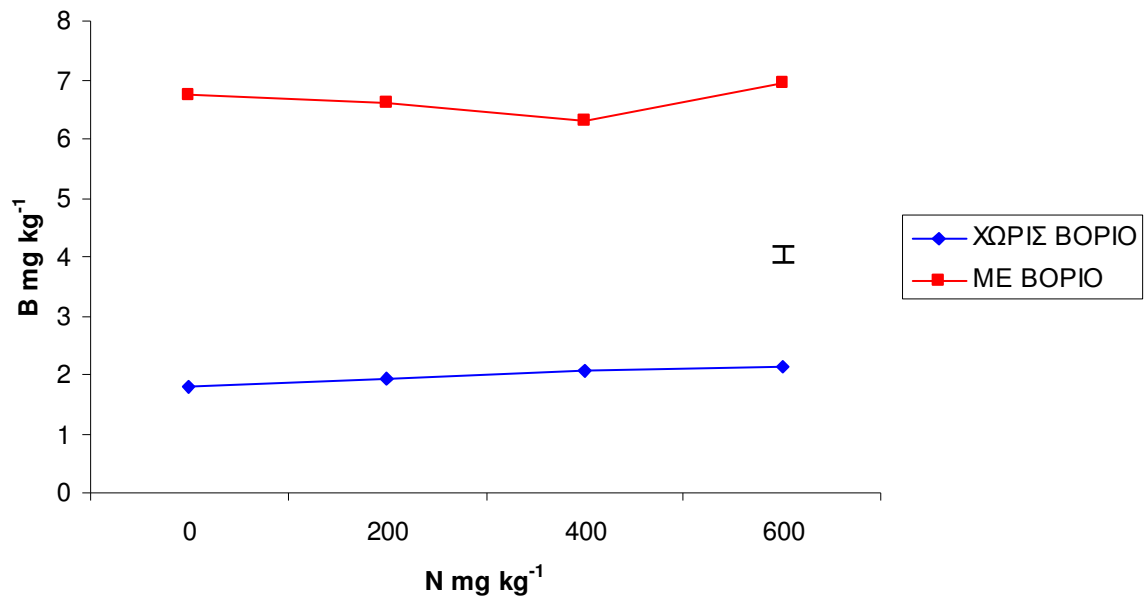
Διάγραμμα 10. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Cu στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

5.2.5. Βόριο (B) στο έδαφος

Το B στο έδαφος κυμαίνεται από 1,8 έως 7,0 mg kg⁻¹. Στις μεταχειρίσεις με B η συγκέντρωση του στοιχείου στο έδαφος είναι υψηλή, ενώ στις μεταχειρίσεις χωρίς B η συγκέντρωση του στοιχείου κρίνεται ως επαρκής (Kabata - Pendias and Pendias, 2001; Κεραμίδας, 1989; Πασχαλίδης, 2006).

Δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή της συγκέντρωσης του στοιχείου στο έδαφος, σε σχέση με την προσθήκη N (Διάγραμμα 11). Στις μεταχειρίσεις με B, αλλά και σε αυτές χωρίς B, η μεγαλύτερη τιμή του στοιχείου εμφανίζεται με την προσθήκη της υψηλότερης δόσης N. Το γεγονός αυτό, πιθανώς να οφείλεται στην μικρή ανάπτυξη και απόδοση των φυτών σε αυτές τις μεταχειρίσεις, εξαιτίας της περίσσειας N (Πίνακας 12). Οι αποδόσεις επηρεάζουν τη συγκέντρωση του εδάφους σε θρεπτικά στοιχεία, ιδιαίτερα σε μικροθρεπτικά, εξαιτίας της μικρής διαθεσιμότητάς τους. Το είδος των φυτών, ο γενότυπός τους, οι εδαφικές και κλιματικές συνθήκες, είναι παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση και επομένως τις ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία (McClung and Lott, 1973; Μήτσιος, 2004).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του B στο έδαφος παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων B στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 14).



Διάγραμμα 11. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του B στο έδαφος. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

Πίνακας 14. Ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N (0, 200, 400 και 600 mg kg⁻¹) και B (0 και 5 mg kg⁻¹) στη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος.

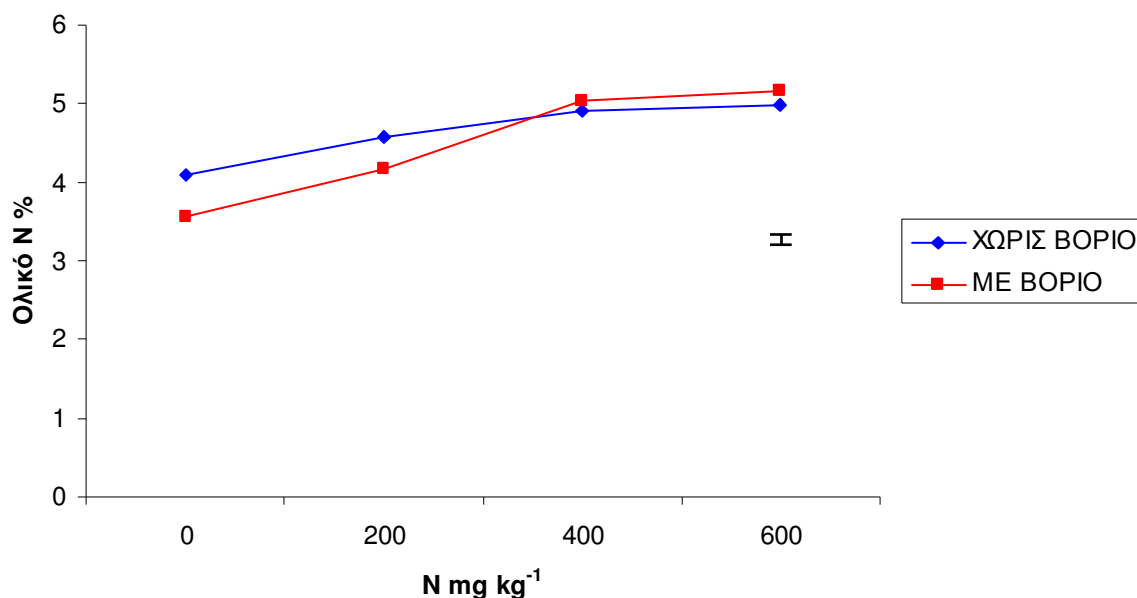
Μεταβλητές	Πηγή παραλλακτικότητας		
	Επεμβάσεις N	Επεμβάσεις B	Επεμβάσεις N * Επεμβάσεις B
NO₃⁻	< 0,001	ns	< 0,001
NH₄⁺	< 0,001	ns	ns
P	ns	< 0,05	ns
K	< 0,05	< 0,05	ns
Ca	< 0,001	ns	ns
Mg	ns	ns	ns
Fe	ns	ns	ns
Mn	< 0,05	ns	ns
Zn	ns	ns	ns
Cu	ns	ns	ns
B	ns	< 0,001	ns

5.3. Συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων στους φυτικούς ιστούς

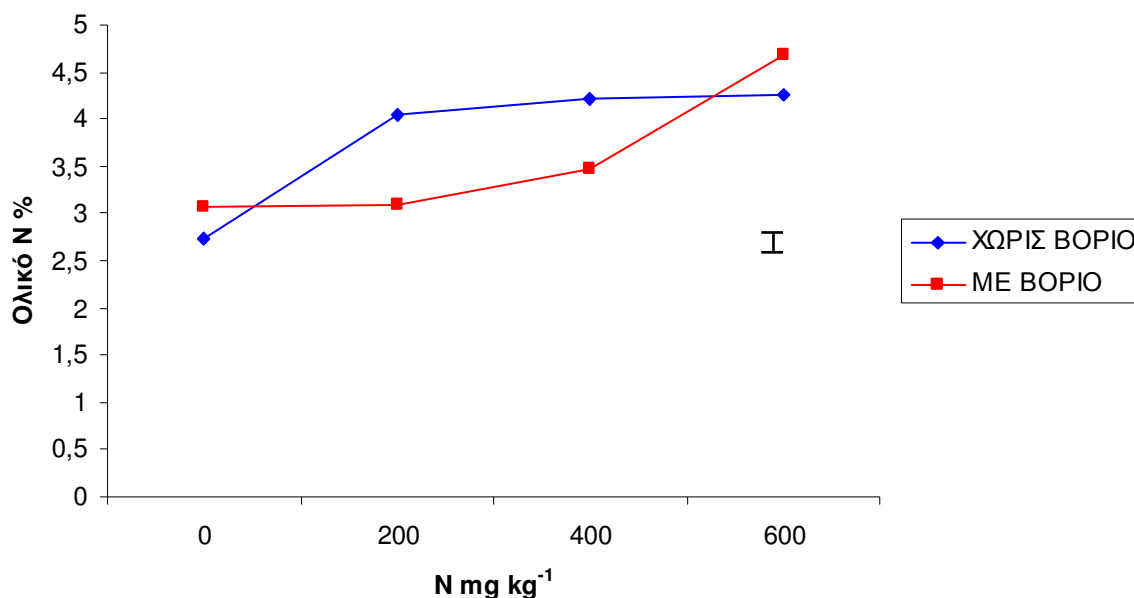
5.3.1. Άζωτο (N) στους φυτικούς ιστούς

Οι τιμές του ολικού N στα φύλλα κυμαίνονται από 3,55 έως 5,15 %, που σημαίνει πως υπάρχει επάρκεια του στοιχείου (Karla, 1998; Barker and Pilbeam, 2007). Στις ρίζες, η συγκέντρωση του ολικού N κυμαίνεται από 2,73 έως 4,69 %. Παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του N, όσο μεγαλώνει η προσθήκη N σε σχέση με το μάρτυρα (Διάγραμμα 12 και 13), γεγονός που επιβεβαιώνει την θετική επίδραση της αζωτούχου λίπανσης στη συσσώρευση του στοιχείου στους φυτικούς ιστούς (Marschner, 1995; Μήτσιος, 2004; Ασημακόπουλος *et.al.*, 2009; Πασχαλίδης *et.al.*, 2009).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του N στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και σημαντική αλληλεπίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15). Στις ρίζες παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και σημαντική αλληλεπίδραση των επεμβάσεων N και B (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 12. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του ολικού N στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

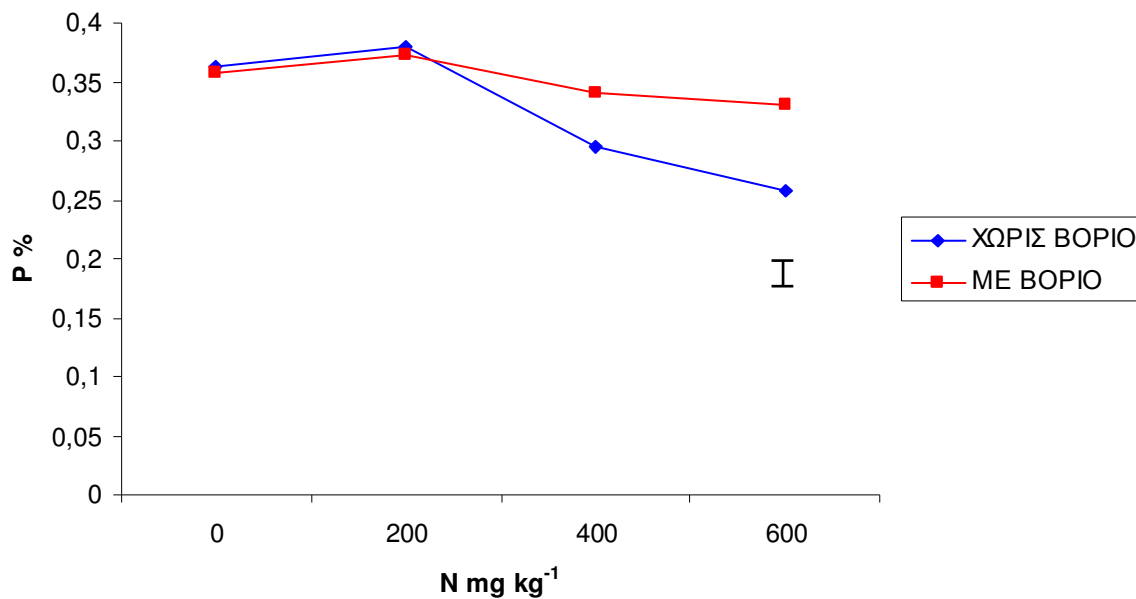


Διάγραμμα 13. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του ολικού N στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

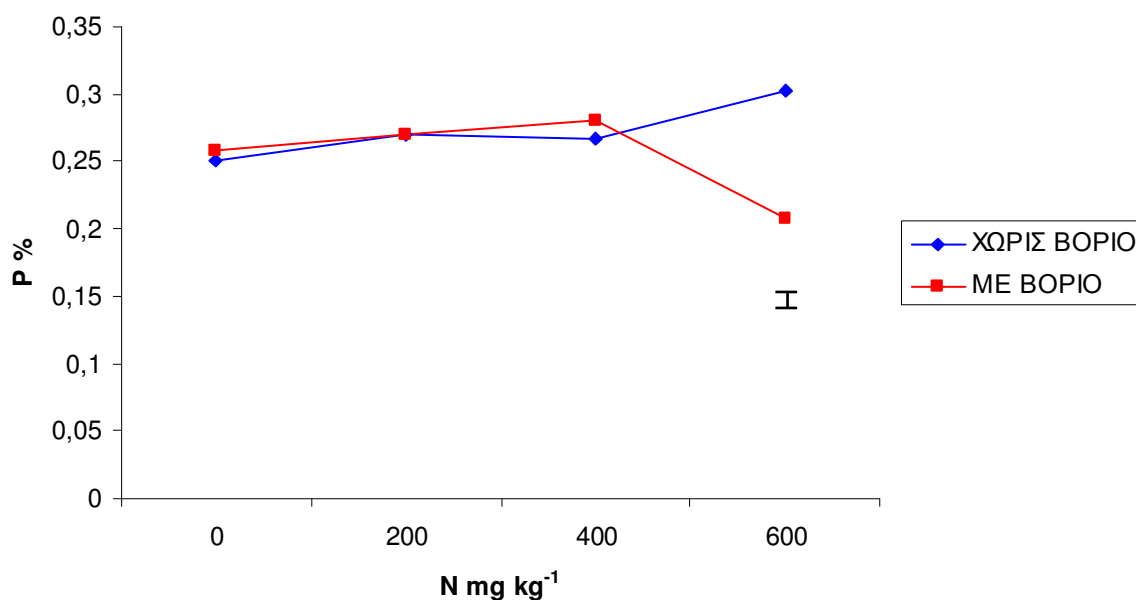
5.3.2. Φώσφορος (P) στους φυτικούς ιστούς

Οι τιμές του P στα φύλλα κυμαίνονται από 0,26 έως 0,38 % και στις ρίζες από 0,21 έως 0,30 %. Σύμφωνα με τους Karla (1998) και Barker and Pilbeam (2007), η συγκέντρωση του στοιχείου στους φυτικούς ιστούς είναι επαρκής. Παρατηρείται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης του P στα φύλλα, όσο αυξάνεται η προσθήκη N στο έδαφος, σε σχέση με το μάρτυρα (Διάγραμμα 14), γεγονός που επιβεβαιώνεται και από άλλους ερευνητές (Πασχαλίδης, 1978). Σύμφωνα με τους Κουκουλάκη και Παπαδόπουλο (2003), τα αίτια της ανταγωνιστικής σχέσης NO_3^- και P δεν έχουν διερευνηθεί μέχρι σήμερα. Σύμφωνα με τον Τσικαλά (1994), η σχέση N:P σε αναλογία 3:1 θεωρείται κρίσιμη. Στις ρίζες παρατηρείται μία τάση αύξησης της συγκέντρωσης του P στις μεταχειρίσεις χωρίς B. Στις μεταχειρίσεις με B παρατηρούμε την ίδια τάση, με εξαίρεση τη μεταχείριση όπου είχαμε προσθήκη της μεγαλύτερης δόσης N, στην οποία έχουμε μία σημαντική μείωση της συγκέντρωσης του στοιχείου (Διάγραμμα 15).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του P στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15). Στις ρίζες, παρατηρείται σημαντική αλληλεπίδραση των επεμβάσεων N και B (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 14. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του P στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

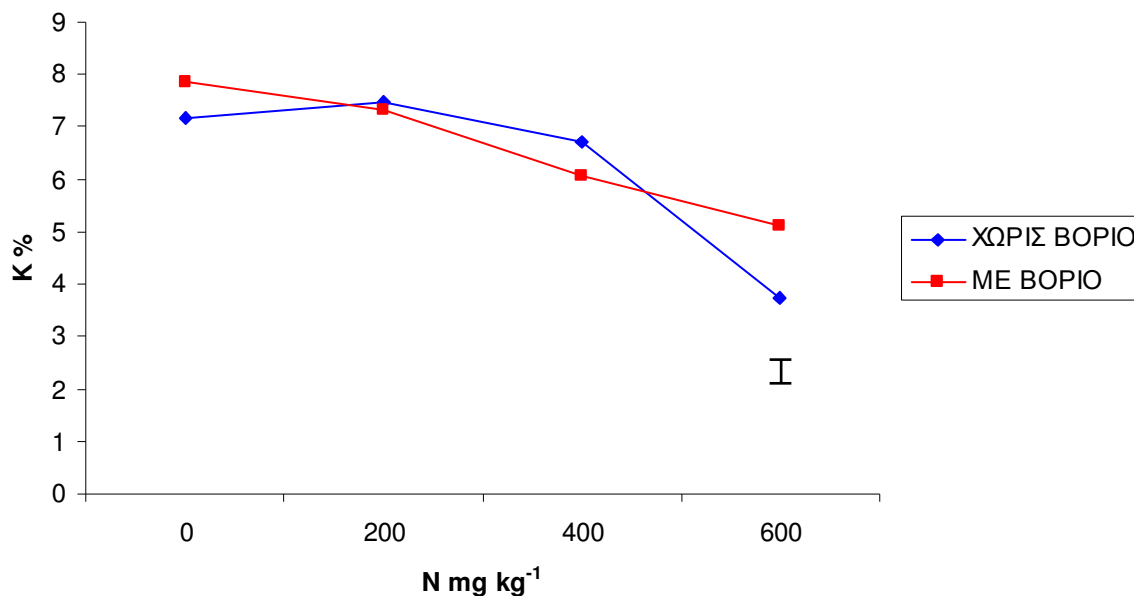


Διάγραμμα 15. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του P στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

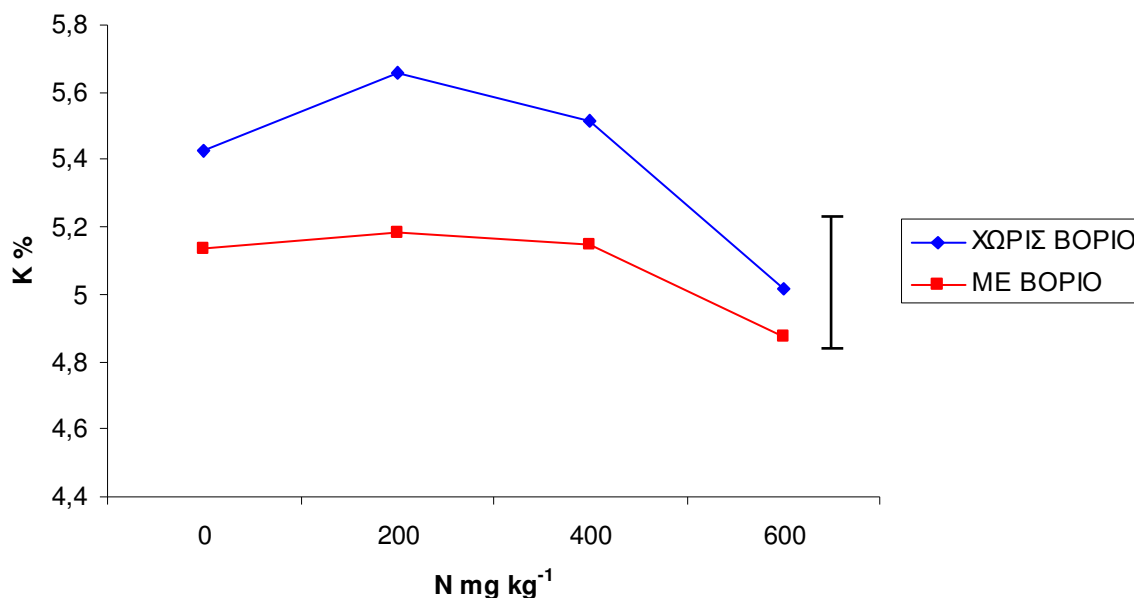
5.3.3. Κάλιο (K), Ασβέστιο (Ca), Μαγνήσιο (Mg) στους φυτικούς ιστούς

Το K στα φύλλα κυμαίνεται από 3,74 έως 7,84 % και στις ρίζες από 4,88 έως 5,66 %, που σημαίνει πως υπάρχει επάρκεια του στοιχείου στους φυτικούς ιστούς (Karla, 1998; Barker and Pilbeam, 2007), με εξαίρεση τη συγκέντρωση του στοιχείου στα φύλλα της μεταχείρισης: 600 mg N kg⁻¹ + 0 mg B kg⁻¹. Παρατηρείται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης του K στα φύλλα, όσο αυξάνεται η προσθήκη N στο έδαφος, σε σχέση με το μάρτυρα (Διάγραμμα 16). Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την άποψη, πως οι σχέσεις NH₄⁺ και K είναι ανταγωνιστικές (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003, Μήτσιος, 2004). Παρόμοια τάση παρατηρείται και στις ρίζες (Διάγραμμα 17). Δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση του B στη συσσώρευση του στοιχείου στους φυτικούς ιστούς, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στις πολύ υψηλές συγκεντρώσεις του ανταλλάξιμου K στο έδαφος.

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του K στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15). Στις ρίζες, δεν παρατηρείται καμία σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 16. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του K στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

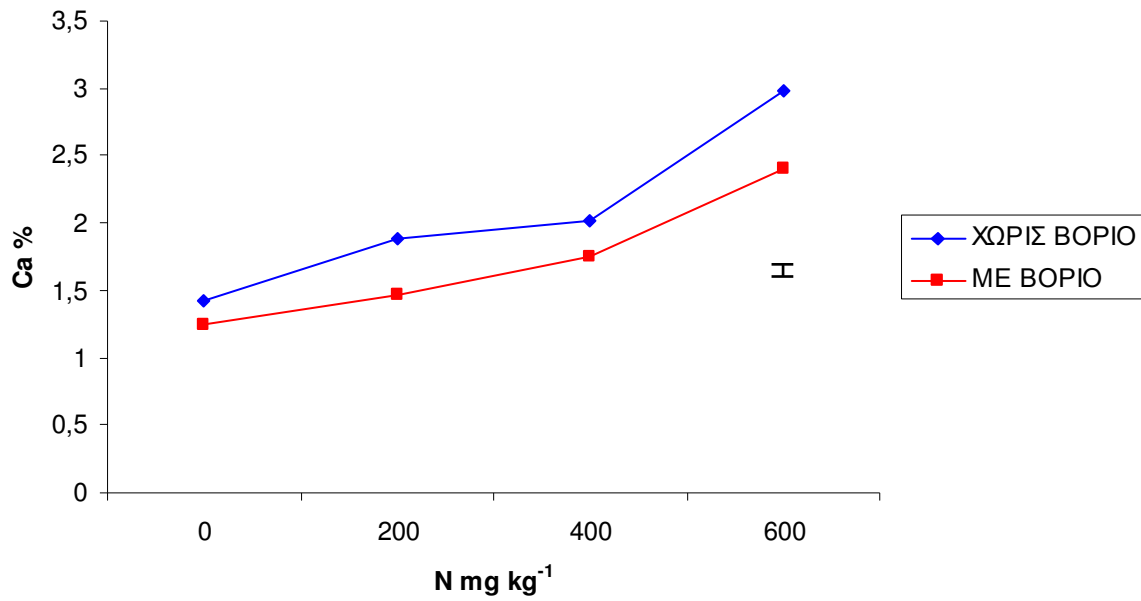


Διάγραμμα 17. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του K στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

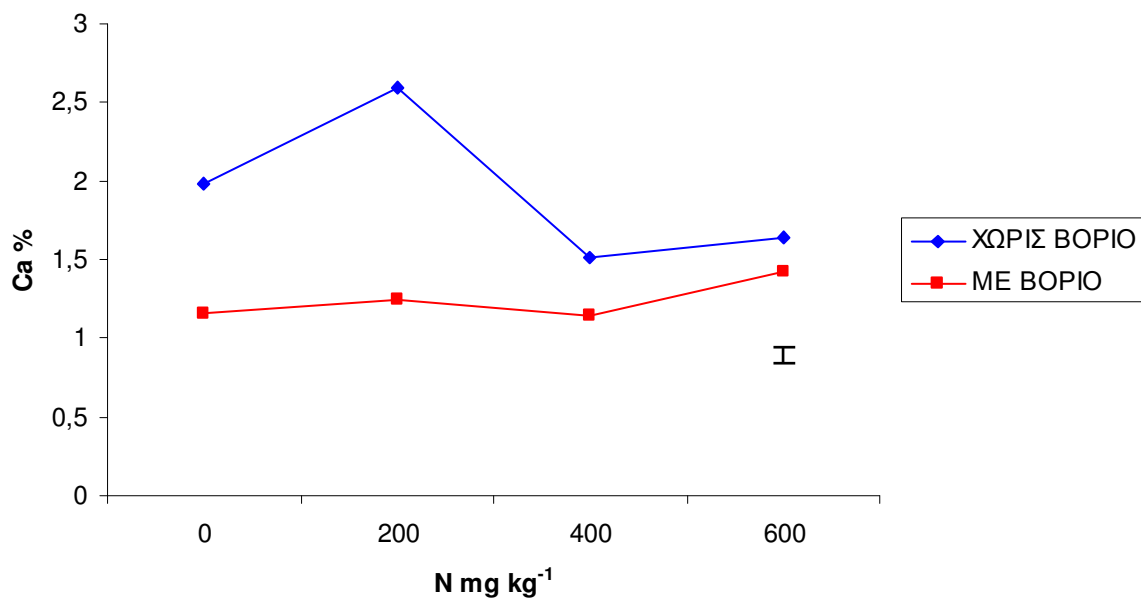
Το Ca στα φύλλα κυμαίνεται από 1,24 έως 2,98 % και στις ρίζες από 1,15 έως 2,59 %. Σύμφωνα με τους Karla (1998) και Barker and Pilbeam (2007), η συγκέντρωση του Ca στους φυτικούς ιστούς είναι επαρκής. Παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης του Ca στα φύλλα, όσο αυξάνεται η προσθήκη N στο έδαφος (Διάγραμμα 18), γεγονός που επιβεβαιώνει την θετική επίδραση του NO₃⁻-N στην πρόσληψη του Ca από τα φυτά. Το B επιδρά αρνητικά στη συσσώρευση του Ca στους φυτικούς ιστούς (Διάγραμμα 18 και 19), γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τους Mills and Benton Jones Jr. (1996).

Από την αύξηση της συγκέντρωσης του Ca (Διάγραμμα 18 και 19) και τη μείωση της συγκέντρωσης του K (Διάγραμμα 16 και 17) στους φυτικούς ιστούς, στις μεταχειρίσεις όπου υπάρχει προσθήκη υψηλών δόσεων N, επιβεβαιώνεται η αρνητική αλληλεπίδραση του Ca επί του K (Loue, 1978). Είναι χαρακτηριστική η εμφάνιση συμπτωμάτων έλλειψης K σε ασβεστούχα εδάφη, ακόμη και όταν οι συγκεντρώσεις του ανταλλάξιμου K κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα.

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Ca στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15). Στις ρίζες παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και B, καθώς και της αλληλεπίδρασής τους, στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 18. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Ca στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

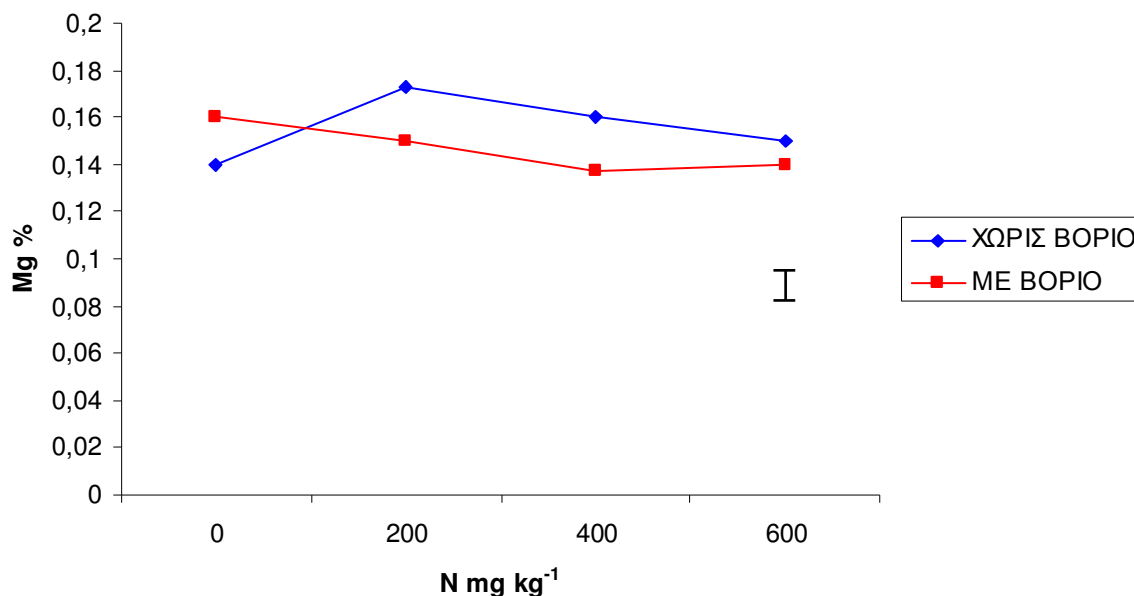


Διάγραμμα 19. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Ca στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

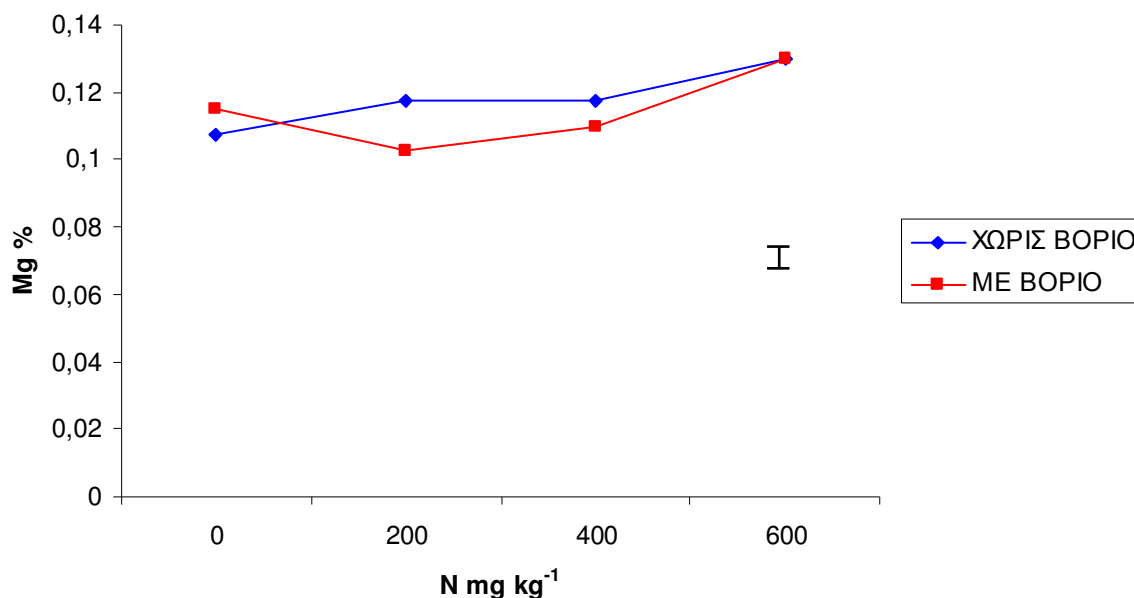
Οι τιμές του Mg στα φύλλα κυμαίνονται από 0,14 έως 0,17 % και στις ρίζες από 0,10 έως 0,13 %, γεγονός που φανερώνει πως οι φυτικοί ιστοί είναι επαρκώς εφοδιασμένοι με Mg (Havlin *et.al.*, 1999; Barker and Pilbeam, 2007). Δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση του B στη συγκέντρωση του Mg στους φυτικούς ιστούς, ενώ το N φαίνεται πως επιδρά θετικά στη συσσώρευση του στοιχείου στο ριζικό σύστημα (Διάγραμμα 20 και 21).

Οι σχέσεις του Mg με το K και το Ca είναι αμοιβαία ανταγωνιστικές. Έτσι, η παρουσία υψηλών επιπέδων K και Ca μειώνει την πρόσληψη του Mg από τα φυτά, προκαλώντας πολλές φορές συμπτώματα τροφοπενίας. Ως άριστες σχέσεις μεταξύ του Mg και Ca θεωρούνται οι: Ca:Mg = 3:1 και K:Mg = 8:1. Οι σχέσεις αυτές αποτελούν δείκτες του εφοδιασμού των φυτών με Mg (Κουκουλάκης και Παπαδόπουλος, 2003). Έλλειψη Mg μπορεί να προκληθεί επίσης από υψηλές συγκεντρώσεις $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (Barker and Pilbeam, 2007; Τσικαλάς, 1994).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Mg στα φύλλα, δεν παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15). Στις ρίζες, παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 20. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Mg στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

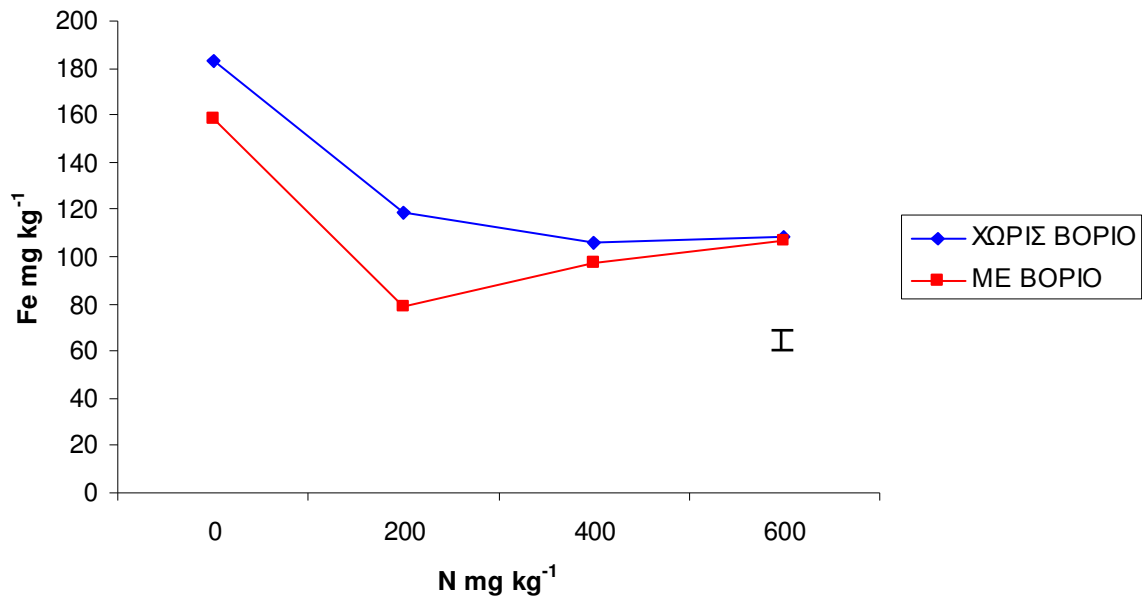


Διάγραμμα 21. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Mg στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

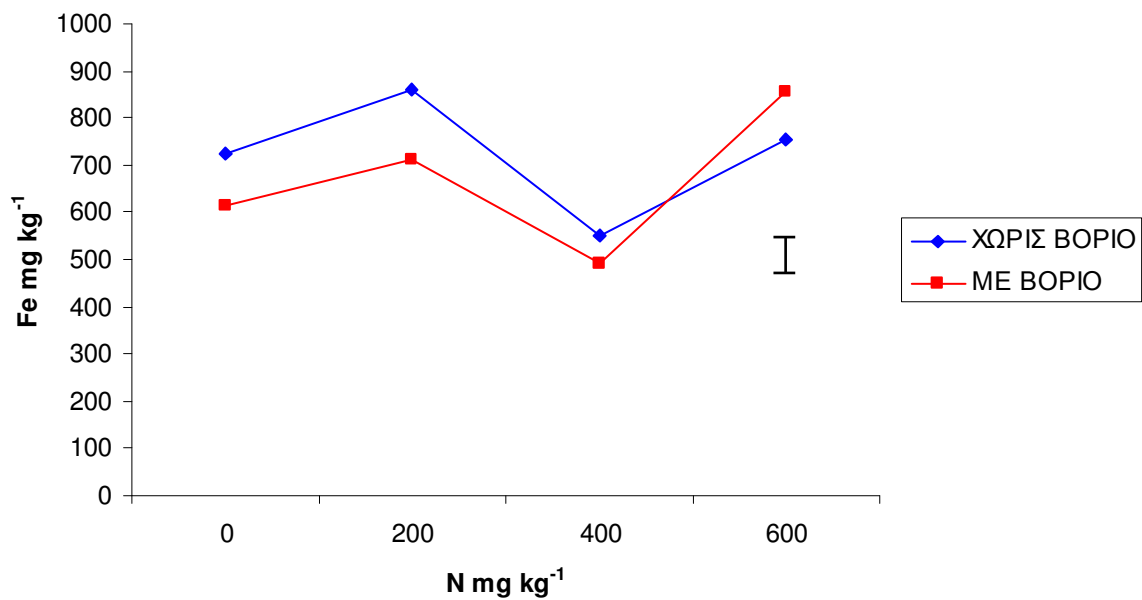
5.3.4. Σίδηρος (Fe), Μαγγάνιο (Mn), Ψευδάργυρος (Zn), Χαλκός (Cu) στους φυτικούς ιστούς

Οι τιμές του Fe στα φύλλα κυμαίνονται από 78,7 έως 183,0 mg kg⁻¹, ενώ στις ρίζες από 490,9 έως 860,5 mg kg⁻¹, που σημαίνει πως υπάρχει επάρκεια του στοιχείου (Karla, 1998; Kabata - Pendias and Pendias, 2001, Καλλιάνου, 2008). Παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης του Fe στα φύλλα, όσο αυξάνεται η προσθήκη N στο έδαφος (Διάγραμμα 22), γεγονός που επιβεβαιώνει την ανταγωνιστική αλληλεπίδραση του N επί του Fe. Έχει βρεθεί ότι σε συνθήκες υψηλής διαθεσιμότητας NO₃⁻-N, αυξάνεται η συγκέντρωση των ιόντων HCO₃⁻ στο εδαφοδιάλυμα, τα οποία δρουν ανασταλτικά στην πρόσληψη του Fe (Chen and Barak, 1982). Επίσης, επιβεβαιώνεται η αρνητική αλληλεπίδραση BxFe, ενώ οι υψηλές συγκεντρώσεις του στοιχείου στις ρίζες, επιβεβαιώνουν την άποψη ότι ο σίδηρος είναι στοιχείο δυσκίνητο (Mills and Benton Jones Jr., 1996; Kabata - Pendias and Pendias, 2001).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Fe στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15), ενώ στις ρίζες παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 22. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Fe στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

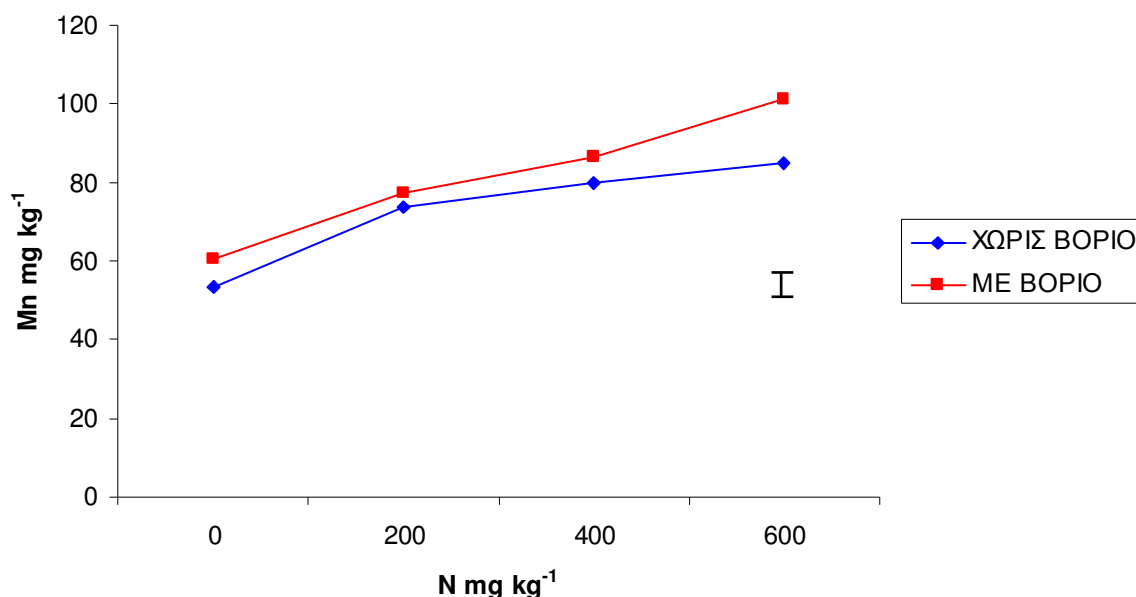


Διάγραμμα 23. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Fe στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

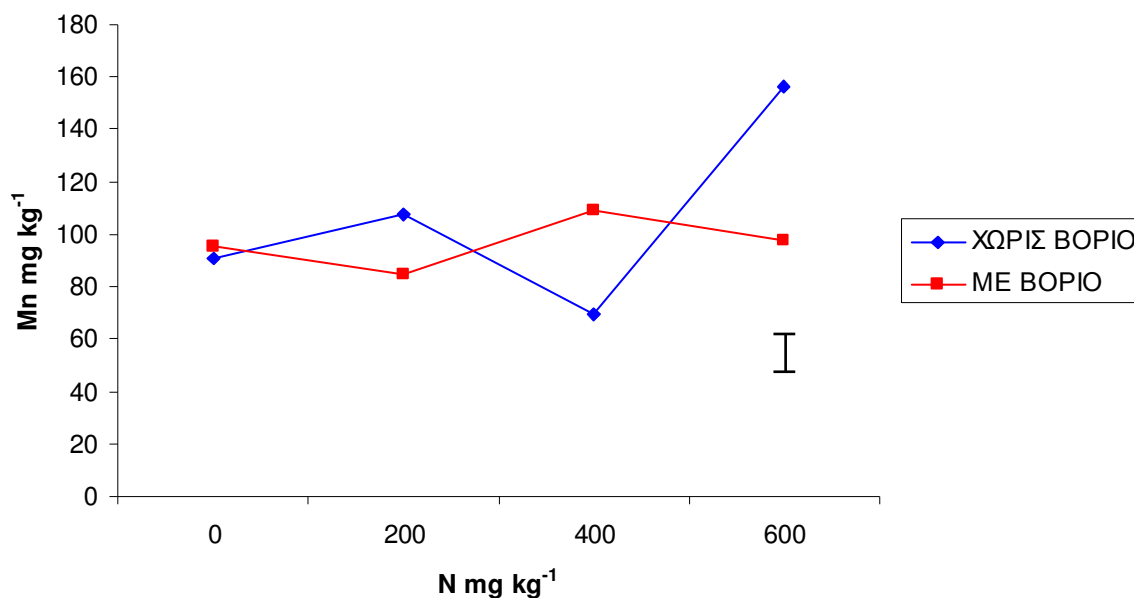
Το Mn στα φύλλα κυμαίνεται από 53,2 έως 101,0 mg kg⁻¹, ενώ στις ρίζες από 69,8 έως 156,1 mg kg⁻¹. Σύμφωνα με τους Kabata - Pendias and Pendias (2001) και Καλλιάνου (2008), η συγκέντρωση του στοιχείου στους φυτικούς ιστούς κρίνεται ως επαρκής. Παρατηρείται μία αύξηση της συγκέντρωσης του Mn στα φύλλα όσο αυξάνεται η προσθήκη N στο έδαφος (Διάγραμμα 24), γεγονός που επιβεβαιώνει τη θετική επίδραση του NO₃⁻-N επί του Mn. Το NH₄⁺-N ευνοεί την πρόσληψη του Mn λόγω της επίδρασης των H⁺ που παράγονται κατά τη νιτροποίηση (Mills and Benton Jones Jr., 1996). Σύμφωνα με άλλους ερευνητές, το NH₄⁺-N έχει ανασταλτική επίδραση στην πρόσληψη του Mn (Αναλογίδης, 2007). Το B δεν φαίνεται να επιδρά στη συσσώρευση του Mn στους φυτικούς ιστούς, παρότι έχει αναφερθεί πως η προσθήκη B δύναται να προκαλέσει μείωση της συγκέντρωσης του στοιχείου σε αυτούς (Kabata - Pendias and Pendias, 2001).

Σύμφωνα με έρευνες, στα ασβεστούχα εδάφη υψηλού pH και χαμηλής διαθεσιμότητας Fe, τα φυτά είναι σε θέση να αντλούν μεγάλες ποσότητες Mn, χάρις στο χαμηλό pH που επικρατεί στην περιοχή της ριζόσφαιρας (Moraghan, 1985).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Mn στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15), ενώ στις ρίζες παρατηρείται σημαντική αλληλεπίδραση των επεμβάσεων N και B (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 24. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Mn στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

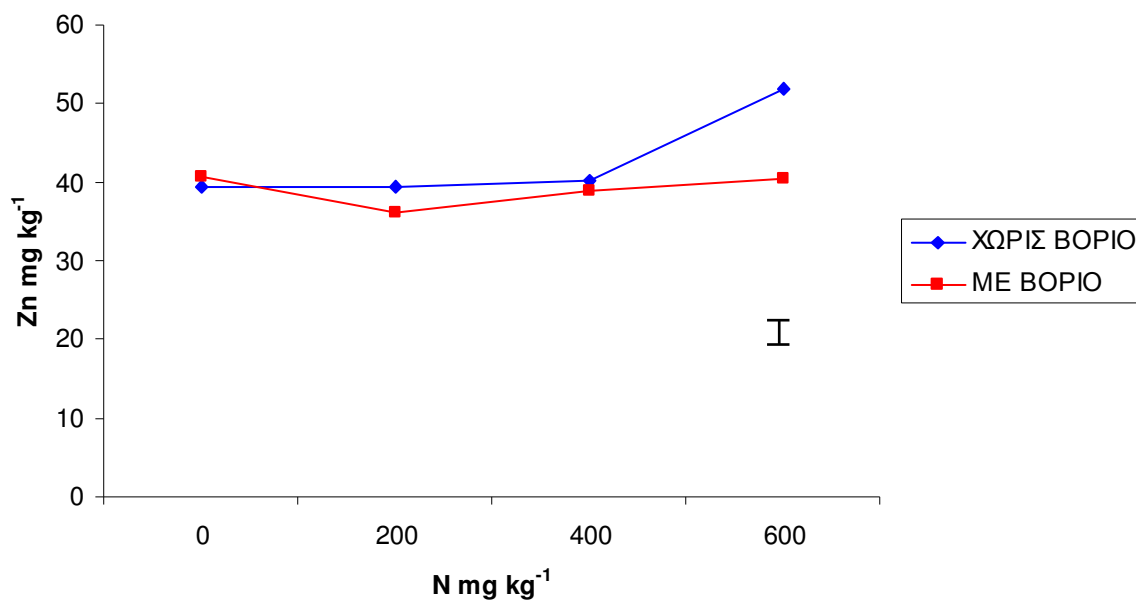


Διάγραμμα 25. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Mn στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

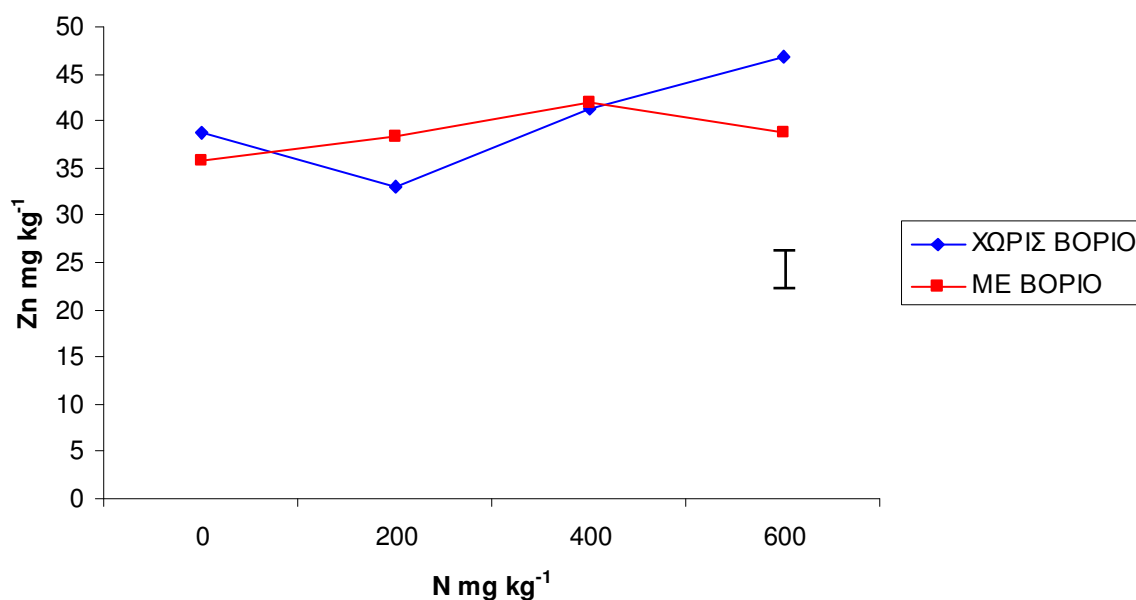
Οι τιμές του Zn στα φύλλα κυμαίνονται από 36,2 έως 51,9 mg kg⁻¹, ενώ στις ρίζες από 33,0 έως 46,8 mg kg⁻¹, που σημαίνει πως υπάρχει επάρκεια του στοιχείου (Karla, 1998; Kabata - Pendias and Pendias, 2001; Mills and Benton Jones Jr., 1996). Παρατηρείται μία αύξηση της συγκέντρωσης του Zn στους φυτικούς ιστούς, στις μεταχειρίσεις με την υψηλότερη δόση N χωρίς προσθήκη B (Διάγραμμα 26 και 27). Στις αντίστοιχες μεταχειρίσεις με B, η συγκέντρωση του στοιχείου μειώνεται, γεγονός που θα μπορούσε να επιβεβαιώσει την αρνητική επίδραση του B επί του Zn (Chaudry and Loneragan, 1972). Η προσθήκη N φαίνεται πως έχει θετική επίδραση στη συσσώρευση του Zn στους φυτικούς ιστούς του μαρουλιού (Διάγραμμα 26 και 27), γεγονός που επιβεβαιώνεται και από άλλους ερευνητές (Πασχαλίδης *et.al.*, 2008).

Σύμφωνα με έρευνες, άλλα στοιχεία που δρουν ανταγωνιστικά επί του Zn είναι ο P, το Mg και το Ca (Chaudry and Loneragan, 1972).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Zn στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15). Στις ρίζες, δεν παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και B (Πίνακας 16).



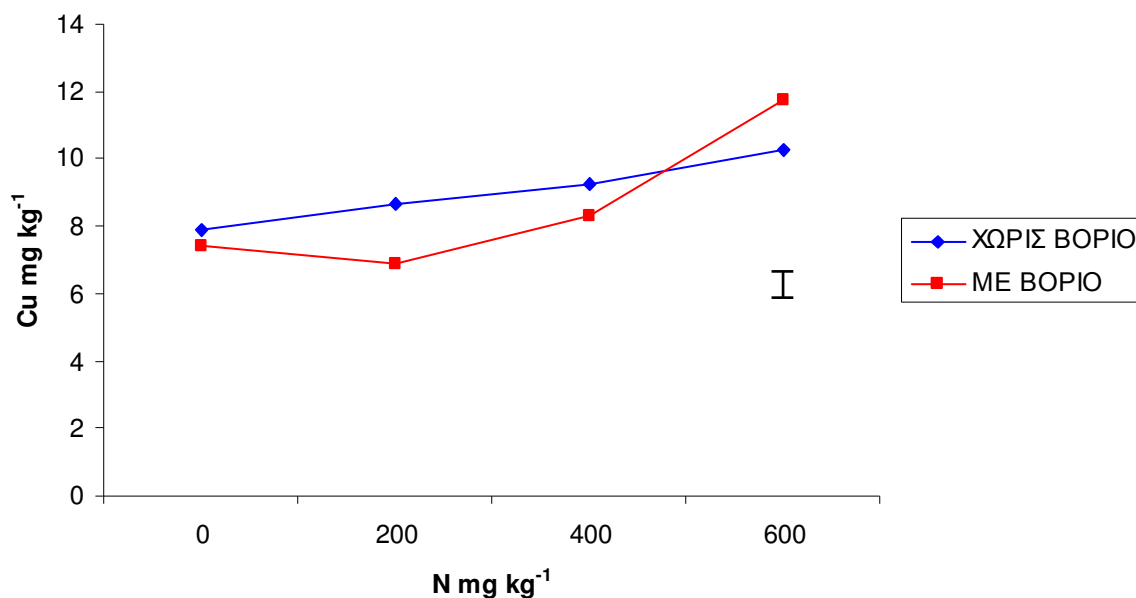
Διάγραμμα 26. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Zn στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.



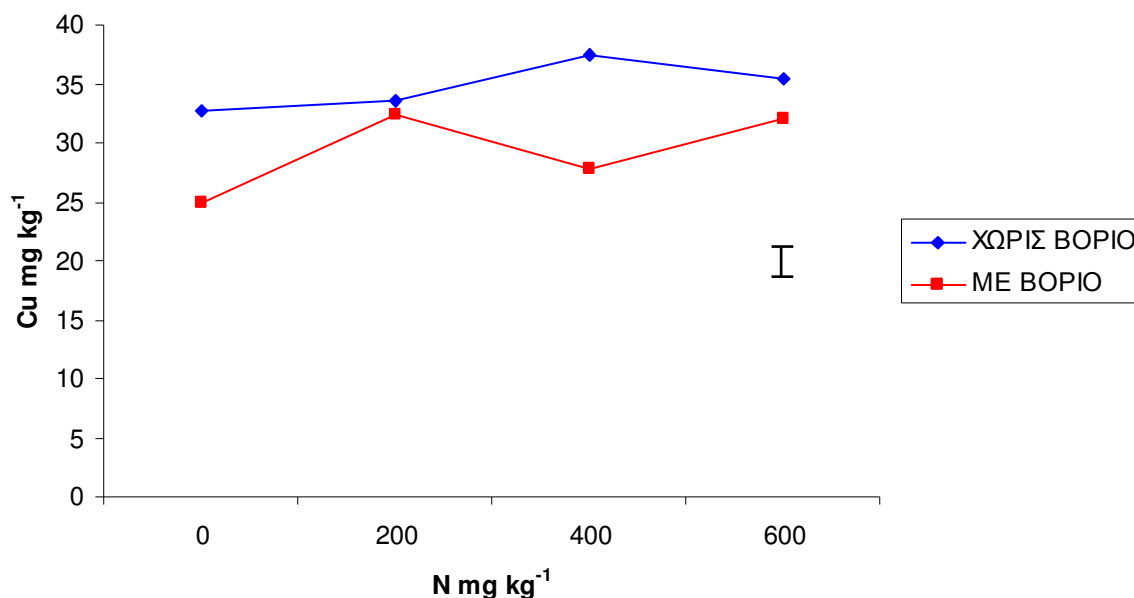
Διάγραμμα 27. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Zn στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

Ο Cu στα φύλλα κυμαίνεται από 6,9 έως 11,7 mg kg⁻¹, ενώ στις ρίζες από 24,8 έως 37,5 mg kg⁻¹. Σύμφωνα με τους Kabata - Pendias and Pendias (2001) και Καλλιάνου (2008), η συγκέντρωση του στοιχείου στους φυτικούς ιστούς είναι επαρκής. Παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης του Cu στα φύλλα, όσο αυξάνεται η προσθήκη N (Διάγραμμα 28), γεγονός που επιβεβαιώνει την άποψη, ότι οι ισχυρές N λιπάνσεις αυξάνουν τις ανάγκες των φυτών σε Cu, λόγω της μεγάλης σημασίας του Cu στο μεταβολισμό των πρωτεϊνών (Bergmann, 1992). Ο Cu έχει την τάση να εναποτίθεται μέσα στις ρίζες και η μετακίνησή του στα υπέργεια μέρη των φυτών είναι πολύ βραδεία. Όσο αυξάνεται η διαθεσιμότητα του εδαφικού Cu τόσο αυξάνεται και η συσσώρευσή του στις ρίζες, ενώ συγχρόνως η συγκέντρωση του στοιχείου στα φύλλα αυξάνει με πολύ βραδύτερο ρυθμό (Διάγραμμα 28 και 29). Η ροή του στοιχείου από τις ρίζες στα υπέργεια μέρη των φυτών, εξαρτάται και από τον γονότυπο (Loneregan *et.al.*, 1980). Στις ρίζες, επιβεβαιώνεται η αρνητική αλληλεπίδραση BxCu (Διάγραμμα 29) (Kabata - Pendias and Pendias, 2001).

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Cu στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15), ενώ στις ρίζες, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων B (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 28. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Cu στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

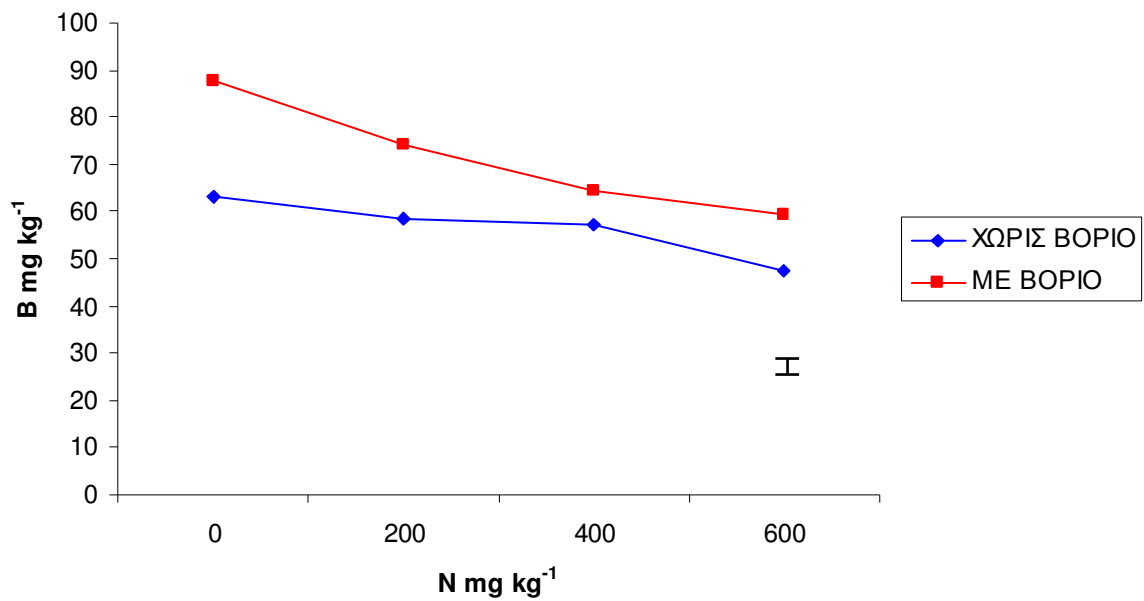


Διάγραμμα 29. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του Cu στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

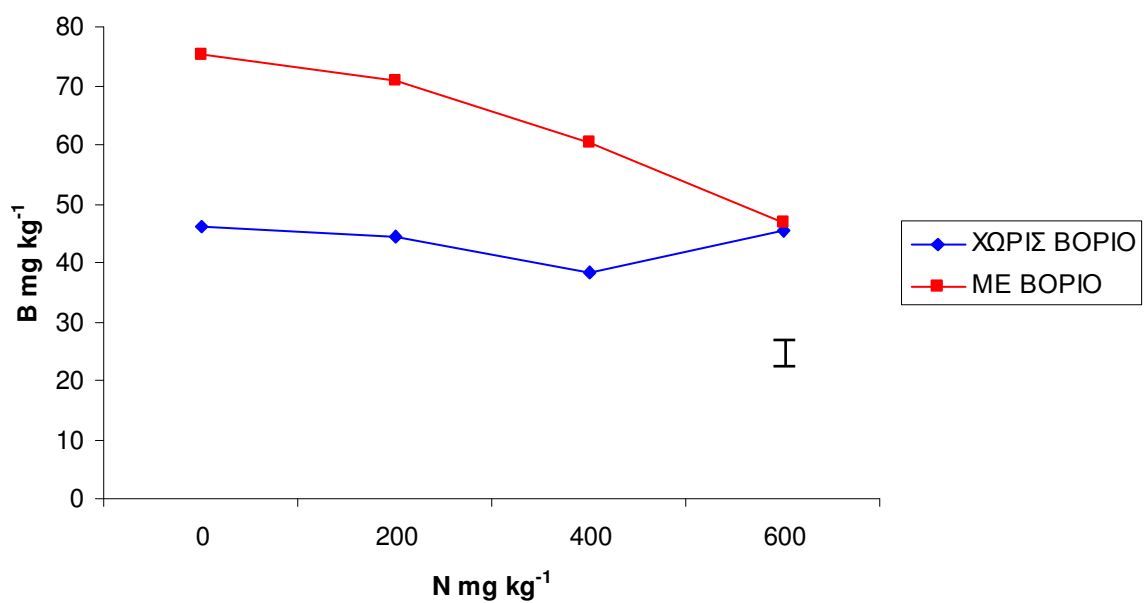
5.3.5. Βόριο (B) στους φυτικούς ιστούς

Οι τιμές του B στα φύλλα κυμαίνονται από 47,3 έως 87,7 mg kg⁻¹, ενώ στις ρίζες από 38,4 έως 75,4 mg kg⁻¹. Στις μεταχειρίσεις χωρίς B, η συγκέντρωση του στοιχείου είναι σε φυσιολογικά επίπεδα, ενώ στις μεταχειρίσεις με B, η συγκέντρωση του στοιχείου είναι υψηλή (Gupta *et.al.*, 1985; Kabata - Pendias and Pendias, 2001). Παρατηρείται μία σημαντική μείωση της συγκέντρωσης του B στους φυτικούς ιστούς, όσο αυξάνεται η προσθήκη του N στο έδαφος, ιδιαίτερα στις μεταχειρίσεις με B (Διάγραμμα 30 και 31). Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνει την άποψη ότι μια πλούσια N λίπανση περιορίζει την αρνητική επίδραση της περίσσειας B (Jones *et.al.*, 1963). Σύμφωνα με έρευνες των Gupta *et.al.* (1979) και Willet *et.al.* (1985), οι ισχυρές N λιπάνσεις επιδρούν αρνητικά στην πρόσληψη του B και μπορούν να προκαλέσουν ακόμη και έλλειψη του στοιχείου.

Από την ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του B στα φύλλα, παρατηρείται στατιστικώς σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του στοιχείου (Πίνακας 15). Στις ρίζες, παρατηρείται σημαντική επίδραση των επεμβάσεων N και B, καθώς και της αλληλεπίδρασής τους (Πίνακας 16).



Διάγραμμα 30. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του B στα φύλλα. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.



Διάγραμμα 31. Επίδραση των επεμβάσεων N και B στη συγκέντρωση του B στις ρίζες. Η κάθετη μπάρα αντιπροσωπεύει το τυπικό σφάλμα της ανάλυσης.

Πίνακας 15. Ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N (0, 200, 400 και 600 mg kg⁻¹) και B (0 και 5 mg kg⁻¹) στη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στα φύλλα.

Μεταβλητές	Πηγή παραλλακτικότητας		
	Επεμβάσεις N	Επεμβάσεις B	Επεμβάσεις N * Επεμβάσεις B
N	< 0,001	ns	< 0,05
P	< 0,01	ns	ns
K	< 0,001	ns	ns
Ca	< 0,001	< 0,001	ns
Mg	ns	ns	ns
Fe	< 0,001	< 0,01	ns
Mn	< 0,001	ns	ns
Zn	< 0,05	ns	ns
Cu	< 0,001	ns	ns
B	< 0,001	< 0,001	ns

Πίνακας 16. Ανάλυση διασποράς των επιδράσεων των επεμβάσεων N (0, 200, 400 και 600 mg kg⁻¹) και B (0 και 5 mg kg⁻¹) στη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στις ρίζες.

Μεταβλητές	Πηγή παραλλακτικότητας		
	Επεμβάσεις N	Επεμβάσεις B	Επεμβάσεις N * Επεμβάσεις B
N	< 0,001	ns	< 0,01
P	ns	ns	< 0,01
K	ns	ns	ns
Ca	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Mg	< 0,05	ns	ns
Fe	< 0,01	ns	ns
Mn	ns	ns	< 0,05
Zn	ns	ns	ns
Cu	ns	< 0,01	ns
B	< 0,05	< 0,001	< 0,05

5.4. Συσχέτιση των αποτελεσμάτων

Από τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των συγκεντρώσεων του N και του B στο έδαφος, στα φύλλα και τις ρίζες των φυτών, προκύπτει ότι στις μεταχειρίσεις χωρίς προσθήκη B, υπάρχει θετική συσχέτιση της συγκέντρωσης των νιτρικών στο έδαφος και του B στο έδαφος, των νιτρικών στο έδαφος και του N στα φύλλα, του B στο έδαφος και του N στα φύλλα και του N στα φύλλα και στις ρίζες. Ακόμη παρατηρείται μία θετική τάση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στο έδαφος και του N στις ρίζες, του B στο έδαφος και του N στις ρίζες, καθώς και μία αρνητική τάση της συγκέντρωσης των νιτρικών στο έδαφος και του B στα φύλλα.

Στις μεταχειρίσεις με B παρατηρείται θετική συσχέτιση μεταξύ των νιτρικών στο έδαφος και του N στις ρίζες, ενώ αρνητική συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ των συγκεντρώσεων των νιτρικών στο έδαφος και του B στις ρίζες, του N και του B στα φύλλα, καθώς και του N και του B στις ρίζες. Ακόμη, παρατηρούμε μία θετική τάση των συγκεντρώσεων του B στα φύλλα και τις ρίζες και μία αρνητική τάση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στο έδαφος και του B στα φύλλα.

Πίνακας 17. Συσχετίσεις των συγκεντρώσεων αζώτου και βορίου στο έδαφος, στα φύλλα και στις ρίζες. Έντονα νούμερα με αστερίσκο υποδεικνύουν σημαντικές συσχετίσεις ($p < 0.05$).

Χωρίς βόριο	<i>NO₃⁻ Έδαφος</i>	<i>B Έδαφος</i>	<i>N Φύλλα</i>	<i>N Ρίζες</i>	<i>B Φύλλα</i>	<i>B Ρίζες</i>
<i>NO₃⁻ Έδαφος</i>	1,000					
<i>B Έδαφος</i>	0,980 *	1,000				
<i>N Φύλλα</i>	0,967 *	0,998 *	1,000			
<i>N Ρίζες</i>	0,844	0,932	0,952 *	1,000		
<i>B Φύλλα</i>	- 0,875	- 0,836	- 0,816	- 0,715	1,000	
<i>B Ρίζες</i>	- 0,454	- 0,519	- 0,538	- 0,521	- 0,025	1,000
Με βόριο	<i>NO₃⁻ Έδαφος</i>	<i>B Έδαφος</i>	<i>N Φύλλα</i>	<i>N Ρίζες</i>	<i>B Φύλλα</i>	<i>B Ρίζες</i>
<i>NO₃⁻ Έδαφος</i>	1,000					
<i>B Έδαφος</i>	0,458	1,000				
<i>N Φύλλα</i>	0,845	- 0,085	1,000			
<i>N Ρίζες</i>	0,986 *	0,570	0,756	1,000		
<i>B Φύλλα</i>	- 0,872	- 0,002	- 0,987 *	- 0,780	1,000	
<i>B Ρίζες</i>	- 0,988 *	- 0,317	- 0,912	- 0,958 *	0,921	1,000

5.5. Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα, με βάση τις μετρήσεις των στοιχείων της ανάπτυξης και απόδοσης των φυτών, τη μακροσκοπική τους παρατήρηση καθώς και τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων του εδάφους και των φυτικών ιστών, είναι τα ακόλουθα:

- Η εφαρμογή της αζωτούχου λίπανσης αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση των NO_3^- στο έδαφος και του ολικού N στους φυτικούς ιστούς. Η προσθήκη 200 mg N kg^{-1} είχε θετική επίδραση στην ανάπτυξη και απόδοση του μαρουλιού, ενώ η προσθήκη 400 mg N kg^{-1} και 600 mg N kg^{-1} επέδρασε αρνητικά, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται σε τοξικότητα του $\text{NH}_4^+\text{-N}$, αλλά και στην αρνητική επίδραση του NH_4^+ επί του K.
- Η εφαρμογή της λίπανσης με βόριο αύξησε σημαντικά τη συγκέντρωση του B στο έδαφος και τους φυτικούς ιστούς. Στις μεταχειρίσεις με $0 \text{ mg N kg}^{-1} + 5 \text{ mg B kg}^{-1}$ και $200 \text{ mg N kg}^{-1} + 5 \text{ mg B kg}^{-1}$ παρατηρήθηκε η εμφάνιση περιφερειακού καψίματος των φύλλων (χαρακτηριστικό σύμπτωμα τοξικότητας βορίου στο μαρούλι) ως αποτέλεσμα των υψηλών συγκεντρώσεων B στα φύλλα ($87,7$ και $74,1 \text{ mg kg}^{-1}$ αντίστοιχα). Αντίθετα στις μεταχειρίσεις με $400 \text{ mg N kg}^{-1} + 5 \text{ mg B kg}^{-1}$ και $600 \text{ mg N kg}^{-1} + 5 \text{ mg B kg}^{-1}$ δεν εμφανίστηκαν συμπτώματα τοξικότητας και οι συγκεντρώσεις του B στους φυτικούς ιστούς κυμάνθηκαν σε φυσιολογικά επίπεδα ($64,2$ και $59,2 \text{ mg kg}^{-1}$ αντίστοιχα), γεγονός που επιβεβαιώνει την αρνητική επίδραση των υψηλών δόσεων του N επί του B.
- Η χαμηλότερη συγκέντρωση B στους φυτικούς ιστούς παρατηρήθηκε στη μεταχείριση με $600 \text{ mg N kg}^{-1} + 0 \text{ mg B kg}^{-1}$, ενισχύοντας την άποψη ότι μία ισχυρή αζωτούχος λίπανση σε εδάφη χωρίς προσθήκη B μπορεί να προκαλέσει τροφοπενία του στοιχείου αυτού. Παρόλα αυτά, η προσθήκη υψηλών δόσεων αζώτου στο έδαφος δεν μπορεί να αποτελέσει πρακτικό μέσο για τη μείωση των τοξικών συγκεντρώσεων του βορίου στους φυτικούς ιστούς, καθώς οι υψηλές δόσεις N μειώνουν σημαντικά την ανάπτυξη και απόδοση των φυτών, ενώ αυξάνουν τη συγκέντρωση των NO_3^- ιόντων στο έδαφος, προκαλώντας αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Η προσθήκη N στο έδαφος μείωσε σημαντικά τη συγκέντρωση του K, P και Fe στα φύλλα, ενώ αύξησε τη συγκέντρωση του Ca, Mn και Cu, επαληθεύοντας την ανταγωνιστική σχέση του N με το K, P και Fe, καθώς και τη συνεργιστική του σχέση με το Ca, Mn και Cu. Παρατηρήθηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις Fe και Cu στις ρίζες σε σχέση με τα φύλλα επιβεβαιώνοντας την άποψη ότι τα στοιχεία αυτά είναι δυσκίνητα εντός του φυτού.

- Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις των αποτελεσμάτων έδειξαν ότι η αύξηση της συγκέντρωσης του N στα φύλλα οδηγεί σε μείωση του B, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης των NO_3^- ιόντων στο έδαφος σχετίζεται σημαντικά με τη μείωση του B στις ρίζες.

Βιβλιογραφία

- Allen S.E., 1989. Chemical Analysis of Ecological Materials. Blackwell Scientific Publications. Oxford, London, Edinburgh, Boston, Melbourne.
- Barber-Stanley A., 1995. Soil nutrient Bioavailability. A mechanistic Approach. 2nd edition. John Wiley, New York, USA.
- Barker A. and Pilbeam D., 2007. Handbook of Plant Nutrition. CRC Press, USA.
- Benton Jones J Jr., 1998. Plant nutrition manual. CRC Roca Raton, USA.
- Bergmann W., 1992. Nutritional Disorders of plants. Gustav Fisher Verlag Jena. Stuttgart, New York.
- Biggar J.W. and Fireman M., 1960. Boron absorption and release by soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc 24: 115-120.
- Bowen J.F. and Nilsen P., 1976. Boron uptake by excised barley roots. Plant Physiol. 57: 353-357.
- Brady N. and Weil R., 1998. The Nature and Properties of Soils, 12th Edition. Pearson Education, USA.
- Brown P.H. and Hu H. 1998. Phloem Boron Mobility in Diverse Plant Species. Bot. Acta. 111: 331-335
- Chaudry F.M. and Loneragan J.F., 1972. Zinc absorption in wheat seedlings: Inhibition by micronutrient ions in short term experiments and its relevance to long term Zinc nutrition. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36: 323-327.
- Chen Y. and Barak P., 1982. Iron nutrition of plants in calcareous soils. Adv. Agron. 35: 217-240.
- Clarkson D.T. and Warner A.J., 1979. Relationship between root temperature and the transport of ammonium and nitrate ions by Italian and perennial rye grass. Plant Physiol. 64: 557-561.
- Delwiche C.C., 1970. The biosphere, Scientific Amer., Inc. Freeman, San Francisco.
- Evans C.M., and Sparks D.L., 1983. On the chemistry and mineralogy of boron in pure and in mixed systems: A review. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 14: 827-846.
- Faithfull N. T., 2002. Methods in agricultural chemical analysis: A Practical Handbook. CABI Publishing, Wallingford.
- Gardiner D. and Miler R., 2004. Soils in our Enviroment. Pearson Education, Inc. USA.

- Goldberg S. and Glaubig R.A., 1985. Boron absorption on aluminium and iron oxide minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1374-1379.
- Graham, R.D., R.M. Welch, D.L. Grunes, E.E. Cary, and W.A. Norvell. 1987. Effect of zinc deficiency on the accumulation of boron and other mineral nutrients in barley. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 652-657.
- Griffin R.A. and Jurinak J.J., 1974, Kinetics of the phosphate interaction with calcite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 75-79.
- Gupta U.C., McLeod J.A. and Sterling J.D.E., 1976. Effects of boron and nitrogen on grain yield and boron and nitrogen concentrations of barley and wheat. *Soil Sci. Soc. Am.* 40: 723-726.
- Gupta, U. C. and Cutcliffe, J. A., 1978. Effects of methods of boron application on leaf tissue concentration of boron and control of brown heart in rutabaga. *Can. J. Plant Sci.* 58: 63-68.
- Gupta, U.C., 1979. Boron nutrition of crops. *Advances in Agronomy.* 31: 273-307.
- Gupta, U.C., Jame, Y.W., Campbell, C.A., Leyshon, A.J. and Nicholaichuk W., 1985. Boron toxicity and deficiency: a review. *Can. J. Soil Sci.* 65: 381-409.
- Havlin J., Beaton J., Tisdale S. and Nelson W., 1999. *Soil Fertility and Fertilizers.* Prentice Hall, Inc. USA.
- Holden E.R., 1959. Glass as boron source. Relationship of surface area and particle size distribution of borosilicate glasses to boron status in alfalfa. *J. Agr. Food chem.* 7:756-762.
- John M.K., Chauah H.H., and Neufeld J.H., 1975. Application of improved azomethine-H method to the determination of boron in soils and plants. *Anal. Lett.* 8: 559-568.
- Jones W.W., Embleton T.W., Boswell S.B., Steinacker M.L., Lee B.W. and Barnhart E.L., 1963. Nitrogen control program for oranges and high sulfate and/or high boron. *Calif. Citrogr.* 48: 128-129.
- Kabata-Pendias A. and Pendias. H., 2001. *Trace elements in soils and plants* 3rd edition. CRS Press LLC, USA.
- Karla Y., 1998. *Handbook of reference methods for plant analysis.* CRC Press. USA.
- Keren R. and Bingham F.T., 1985. Boron in water, soils and plants. *Adv. In Soil Sc.* Vol. 1: 241-262.
- Laegreid M., Bockman O.K. and Kaarstad O., 1999. *Agriculture, fertilizers and the environment.* CABI Publishing.

- Leal A., Gomez M., Sanchez-Raya J. A., Yanez J. and Recalde L., 1972. Effect of boron absorption on accumulation and distribution of phosphate, paper presented at 3rd Coll. Le Controle de l'Adimentation des Pantee Cultivees, Budapest.
- Lindsay W.L., 1979. Chemical equilibrium in soils. Wiley, New York.
- Loeppert, R.H. and Clarke E.T., 1984. Reaction of Fe(II) and Fe(III) in calcareous soils. J.Plant Nutr. 7: 149-163.
- Loneregan J.F., Snowball K. and Robson A.D., 1980. Copper supply in relation to content and rebidistribution of copper among organs of the wheat plant. Ann. Bot. 45: 621-632.
- Loue A., 1978. The interaction of potassium with other growth factors, particularly with other nutrients. Proceedings of 11th Congress of international Potash Institute, Bern, Switzerland.
- Lucas-Robert E. and Knezek B.D., 1972. Climatic and soil conditions promoting micronutrient deficiencies in plants. Madison Wisc., USA.
- Lukaszewski K.M. and Blevins D.G., 1996. Root growth inhibition in boron deficient or aluminum stress squash may be a result of impaired ascorbate metabolism. Plant Physiol. 112: 1-6.
- Marschner H., 1995. Mineral nutrition of higher plants 2nd edition. Academic Press. London.
- Marzadori C., Vittori Antisari L., Ciavatta C. and Sequi P., 1991. Soil organic matter influence on absorption and desorption of boron. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 1582-1585.
- McClung A.C. and Lott W.L., 1973. Mineral composition of peach leaves as affected by leaf age and position and the presence of fruit crop. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 67: 112-120.
- Mengel K. and Kirkby E.A., 1987. Principles of plant nutrition 4th edition. International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- Mengel K., 1992. Nitrogen: Agricultural productivity and environmental problems, In: Mengel and D.J. Pilbeam (ed) Nitrogen metabolism of plants, Proc. of the Phytochemical Society of Europe, Oxford University Press.
- Mills H.A. and Benton Jones J. Jr., 1996. Plant analysis handbook. II-A. Practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide, Micro Macro Publishing Inc. USA.
- Moraghan J.T., 1985. Manganese nutrition of flux as affected by Fe EDDHA and soil air-drying. Soil Sci. Soc. Amer. J. 49: 668-671.
- Mordvedt J.J., 1968. Availability of boron in various boronated fertilizers. Soil Sci. Soc. Amer. 32: 433-437.
- Nissen P., 1974. Uptake mechanisms: Inorganic and organic. Ann. Rev. Plant physiol. 25: 53-72.

- Nommik H. and Vahtras K., 1982. Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils, In: Stevenson (ed), Nitrogen in Agricultural Soils Agron. Monogr. 22, ASA, CSSA and SSSA, Madison, USA.
- Nommik K.H., 1965. Investigations on denitrification in soil, Acta Agric. Scand. VE 2.
- Page A.L., R.H. Miller and Keeney D.R., 1982. Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties 2nd Edition. ASA/SSSA, Madison, WI, USA.
- Pansu M. and Gautheyrou J., 2006. Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Parker D.R. and Gardener E.H., 1982. Factors affecting the mobility and plant availability of boron in some Western Oregon soils. Soil Sci. Am. J.46: 573-578.
- Paul E.A. and Clark F.E., 1989. Soil Microbiology and Biochemistry, Academic Press, Inc. London.
- Pidwirny M., 2006. "The Nitrogen Cycle". Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition.
- Prather M., Derwent R., Ehhalt D., Fraser P., Sanhueza E. and Zhou X., 1995. Other trace gases and atmospheric chemistry. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Pulford I. and Flowers H., 2006. Environmental chemistry at a glance. Blackwell Publishing Ltd. Oxford, UK.
- Rao K.P. and Rains D.W., 1976. Nitrate absorption by barley. Plant Physiol. 57: 59-62.
- Reeve E. and Shive W., 1944. Potassium - boron and calcium - boron relationships in plant nutrition. Soil Sci. 57: 1-14.
- Reisenauer H.M., 1976. Soil and plant tissue testing in California. Div. of Agric. Sci. Bull. 1879. University of California. USA.
- Salinas R., Cerda A., Fernandez F.G. and Caro M., 1987. Interactive effect of boron and nitrogen on pea plants. Agrochimica 31: 489-499.
- Scaife A. and Turner M., 1983. Diagnosis of Mineral Disorders in Plants. Volume 2. J.Robinson, UK.
- Shainberg I. and Osten J.D., 1978. Quality of Irrigation water. Int. Irrigation information Center, Volcani Center, Bet Dagan, Israel.
- Sherrell C.G. 1983. Boron deficiency and responses in white and red clovers and Lucerne. New Zealand J. Agric. Res. 26: 209-214.
- Sherrell C.G., 1983. Comparison of materials of different solubility as source of boron for plants. New Zealand J. Exper. Agric. 325-329.
- Sillanpaa M., 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: A global study. FAO. Soils Bull. 48. United Nations, Rome.

- Sims J.R. and Bingham F.T., 1967. Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials I: Layer silicates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 728-732.
- Sims J.R. and Bingham F.T., 1968. Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials II: Sesquioxides. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 364-369.
- Smith G.S. and Clark C.J., 1988. Effect of excess boron on yield and post-harvest storage of kiwifruit. *Scientia Horticulturae*, vol. 38: 105-115.
- Stevenson F.J., 1982. Organic forms of soil Nitrogen. In: Stevenson F.J. (ed). Nitrogen in agricultural systems No 22 Agronomy series. Amer.Soc. Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Tanaka A., 1967. Boron absorption by crop plants as affected by other nutrients of the medium. *Soil Sci. Plant Nutr.* 13: 41-44.
- Willett R., Jakobsen P. and Zarcinas B.A., (1985). Nitrogen-induced boron deficiency in Lucerne. *Plant and Soil* 86: 443-446.
- Williams C. H., 1967. Nitrogen, sulphur and phosphorus, their interactions and availability. *Intern. Soc. Soil Sci. Trans. Comm.* II and IV.
- Winsor G. and Adams P., 1987. *Diagnosis of Mineral Disorders in Plants. Volume 3.* UK, J.Robinson.
- Wojcik P., 2000. Behaviour of soil boron and boron uptake by M.26 apple rootstock as affected by application of different forms of nitrogen rates. *J. Plant Nutr.* 23: 1227-1239.
- Yau S. K. and Ryan J., 2008. Boron Toxicity Tolerance in Crops: A Viable Alternative to Soil Amelioration. *Crop Sci.* 48: 854-865.
- Αλεξιάδης Κ., 1980. Φυσική και χημική ανάλυση του εδάφους. Θεσσαλονίκη.
- Αλιφραγκής Δ., 2008. Το έδαφος. Γένεση, ιδιότητες, ταξινόμηση, τόμος Ι. Εκδόσεις Αϊβάζη. Θεσσαλονίκη.
- Αναλογίδης Δ., 2000. Έδαφος, θρεπτικά στοιχεία και φυτική παραγωγή. Εκδόσεις Αγροτύπος. Αθήνα.
- Αναλογίδης Δ., 2007. Τα μικροθρεπτικά στοιχεία στο αγροτικό οικοσύστημα. Αθήνα, Εκδόσεις Αγροτύπος.
- Ασημακόπουλος Ι. και Οιχαλιώτης Κ., 2010. Εργαστηριακές ασκήσεις γονιμότητας εδάφους. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Ασημακόπουλος Ι., Οιχαλιώτης Κ. και Μπόβης Κ., 2009. Γονιμότητα του εδάφους. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Γιάσογλου Ν., 1995. Μαθήματα Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

- Θεοδώρου Μ. και Πασχαλίδης Χ., 1999. Εγχειρίδιο καλλιεργητή. Αθήνα, Εκδόσεις Έμβρυο.
- Θερίος Ι., 2005. Ανόργανη θρέψη και λιπάσματα. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Γαρταγάνη.
- Καλλιάνου Χ., 1999. Σημειώσεις Μαθημάτων Εδαφοχημείας και Περιβαλλοντικής Χημείας, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Καλλιάνου Χ., 2008. Αναλύσεις φυτών και εδαφών - Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Καραμπουρνιώτης Γ., Αϊβαλάκης Γ. και Φασσέας Κ., 2005. Γενική βοτανική. Η μορφολογία, η ανατομία και η φυσιολογία των ανώτερων φυτών. Εκδόσεις Έμβρυο, Αθήνα.
- Κεραμίδας Β., 1989. Σημασία και ερμηνεία των εργαστηριακών εδαφολογικών αναλύσεων. Πρακτικά διημερίδας «Γονιμότητα εδάφους – θρέψη φυτών». Ηράκλειο.
- Κουκουλάκης Π. και Παπαδόπουλος Α., 2001. Η ερμηνεία της ανάλυσης του εδάφους. Εκδόσεις Σταμούλη. Αθήνα
- Κουκουλάκης Π. και Παπαδόπουλος Α., 2003. Η ερμηνεία της φυλλοδιαγνωστικής. Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλη.
- Κουκουλάκης Π. και Παπαδόπουλος Α., 2007. Τα προβληματικά εδάφη και η βελτίωσή τους. Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλη.
- Κουκουλάκης Π., 1991. Προβλήματα και προοπτικές της λίπανσης των καλλιεργειών στην Ελλάδα. Γεωπονικά 1991.
- Κουκουλάκης Π., 1995. Βασικές αρχές της ορθολογικής λίπανσης των καλλιεργειών. Γεωργία κτηνοτροφία, τεύχος 9 / 1995.
- Κουκουλάκης Π., Πασχαλίδης Χ. και Λίγκος Ε., 1994. Σύγχρονες αρχές λίπανσης του βαμβακιού. Γεωργική Τεχνολογία. Ιούνιος 1994.
- Μήτσιος Ι., 1999. Εδαφολογία. Εκδόσεις Zymel. Αθήνα.
- Μήτσιος Ι., 2004. Γονιμότητα εδαφών. Αθήνα, Εκδόσεις Zymel.
- Μπλαδενόπουλος Κ., Γκατζιάνας Α. και Σιμώνης Α., 1990. Επίδραση της Ν-ούχου λίπανσης και του υπολειμματικού Ν του εδάφους στην απόδοση και σε άλλες παραμέτρους του καλαμποκιού. Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου, ΕΕΕ, Θεσσαλονίκη.
- Ολύμπιος Χ., 2001. Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλη. Αθήνα.
- Παναγιωτόπουλος Κ., 2008. Εδαφολογία. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Γαρταγάνη.
- Παναγιωτόπουλος Κ., 2009. Εδαφοφυσική. Εκδόσεις Γαρταγάνης. Θεσσαλονίκη.
- Παναγόπουλος Χ., 2000. Ασθένειες κηπευτικών καλλιεργειών 2^η έκδοση. Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλη.

- Πασχαλίδης Χ., 1978. Αποτελεσματικότητα των δόσεων φωσφορούχων λιπασμάτων στην καλλιέργεια πράσινου κενάφ (*Hibiscus cannabinus*) σε σχέση με την περιεκτικότητα του εδάφους σε αδέσμευτο φώσφορο. Διδακτορική Διατριβή (στα ρωσικά), Τασκένδη.
- Πασχαλίδης Χ., 2005. Εδαφολογία, εργαστηριακές ασκήσεις. Εκδόσεις Έμβρυο. Αθήνα.
- Πασχαλίδης Χ., 2006. Λιπασματολογία - Εργαστηριακές ασκήσεις. Αθήνα, Εκδόσεις Έμβρυο.
- Πασχαλίδης Χ., Καββαδίας Β., Κορίκη Α., Πετρόπουλος Δ., Σωτηρόπουλος Σ., Πασχαλίδου Χ., Χριστοπούλου Σ. και Πετρίδης Α., 2009. Η επίδραση διαφορετικών επιπέδων υγρασίας και λίπανσης στην ανάπτυξη, απόδοση και συσσώρευση θρεπτικών στοιχείων στο μαρούλι και στο έδαφος. Πρακτικά 24^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Εταιρίας της Επιστήμης των Οπωροκηπευτικών, Βέροια.
- Πασχαλίδης Χ., Καββαδίας Β., Κουκουλάκης Π., Χατζησαββίδης Χ., Κορίκη Α., Καλιγερή Ο., Πασχαλίδου Χ. και Παπαδόπουλος Α., 2008. Επίδραση του $ZnSO_4$ στην ανάπτυξη και ανόργανη σύνθεση του μαρουλιού (*Lactuca sativa*) παρουσία του ΝΡΚ. Πρακτικά 12^{ου} Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου, ΕΕΕ, Πύργος.
- Πιστόλης Α., 2004. Καιρός και θρέψη φυτών. Λάρισα, Εκδόσεις Α.Τ.Πιστόλης.
- Πιστόλης Α., 2008. Διαφυλλικές λιπάνσεις. Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλη.
- Προδρόμου Κ. και Λάκης Χ., 2010. Προσρόφηση βορίου από υδροξείδια του αργίλου και του μαγγανίου. Πρακτικά 13^{ου} Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου, ΕΕΕ, Λάρισα.
- Σιμώνης Α., 2008. Προβλήματα αξιοποίησης εδαφικών πόρων. Εκδόσεις ΧΑΡΙΣ ΕΠΕ & Σιμώνης Α. Θεσσαλονίκη.
- Σιμώνης Α.Δ., 1990. Αρχές λίπανσης των καλλιεργειών. Γεωπονικά, Μάιος-Ιούνιος 1990.
- Σιμώνης Α.Δ., 1990. Επίπεδο φωσφορικής γονιμότητας-Ισοζύγιο Ρ και χαρακτηριστικά δέσμευσης Ρ των ελληνικών εδαφών. Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου, ΕΕΕ, Θεσσαλονίκη.
- Στυλιανίδης Δ., Σιμώνης Α. και Συργιανίδης Γ., 2002. Θρέψη, Λίπανση φυλλοβόλων καρποφόρων δένδρων. Αθήνα, Εκδόσεις Σταμούλη.
- Τσαντήλας Χ., Δημογιάννης Δ., Σαμαράς Β. και Μητσιμπόνας Θ. 1992. Η εποχιακή διακύμανση στην συγκέντρωση των μακρο- και μικροθρεπτικών στα φύλλα ακτινιδιάς (*Actinidia chinensis*). Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου, ΕΕΕ, Θεσσαλονίκη.
- Τσαντήλας Χ.Δ., Κοσμάς Κ. και Γιάσογλου Ν., 1994. Διερεύνηση εδαφικών παραμέτρων που σχετίζονται με την τροφοπενία βορίου στην ελιά και αντιμετώπιση αυτής. Γεωτ. Επιστ. Θεμ 4/1994.

- Τσιάλτας Ι. και Μασλάρης Ν., 2010. Αζωτούχος λίπανση του ζαχαρότευτλου σε αργιλώδη εδάφη της Θεσσαλίας: Επίδραση στην απόδοση και την ποιότητα. Πρακτικά 13^{ου} Πανελληνίου Εδαφολογικού Συνεδρίου, ΕΕΕ, Λάρισα.
- Τσικαλάς Π., 1994. Ανάλυση φυτικών ιστών. Ηράκλειο, Εκδόσεις ΤΕΙ Ηρακλείου.
- Τσιτσίας Κ., 1995. Λιπασματολογία. ΤΕΙ Λάρισας.
- Χαϊντούτη Κ., 2002. Περιβαλλοντική Εδαφολογία. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Χαϊντούτη Κ., 2006. Σημειώσεις Γενικής Εδαφολογίας. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Χουλιάρης Ν., 2002. Εργαστηριακά Μαθήματα Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας. Εκδόσεις ΙΩΝ. Αθήνα.
- Χουλιάρης Ν., 2002. Λίπανση κηπευτικών. Αθήνα, Εκδόσεις ΙΩΝ.
- Χουλιάρης Ν., 2002. Μαθήματα Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας. Εκδόσεις ΙΩΝ. Αθήνα.