



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΑΣ

Π.Μ.Σ. «Καινοτόμες εφαρμογές στην Αειφορική Γεωργία, στη Βελτίωση Φυτών και στην Αγρομετεωρολογία»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

«Επίδραση λίπανσης με παρεμποδιστές νιτροποίησης σε καλλιέργεια σκληρού σίτου στις αποδόσεις και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά»



Ελένη Μαρία Σ. Ηλία

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Μπιλάλης, Καθηγητής ΓΠΑ

Αθήνα

2021

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

«Επίδραση λίπανσης με παρεμποδιστές νιτροποίησης σε καλλιέργεια σκληρού σίτου στις αποδόσεις και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά»

«The effect of fertilization with nitrification inhibitors on the yield and the quality characteristics of winter durum wheat»

Ελένη Μαρία Σ. Ηλία

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δημήτριος Μπιλάλης, Καθηγητής ΓΠΑ (Επιβλέπων)

Ηλίας Τραυλός, Επίκουρος Καθηγητής ΓΠΑ

Παναγιώτα-Θηρεσία Παπαστυλιανού, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΓΠΑ

Περίληψη

Κατά την καλλιεργητική περίοδο 2019-2020, στην περιοχή της Κωπαΐδας στην Αλίαρτο, πραγματοποιήθηκε έρευνα με αντικείμενο μελέτης την επίδραση της επιφανειακής αζωτούχου λίπανσης με παρεμποδιστές νιτροποίησης και ουρεάσης, τόσο στις αποδόσεις όσο και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε καλλιέργεια σκληρού σίτου (*Triticum turgidum ssp. Durum*). Εφαρμόστηκε το σχέδιο των τυχαιοποιημένων πλήρων ομάδων με 7 μεταχειρίσεις (επιφανειακή λίπανση) και 4 επαναλήψεις (blocks). Στις μεταχειρίσεις εφαρμόστηκε η ίδια βασική λίπανση με N:P(S)+B+Zn [12:40(10)+0,3+1] σε αναλογία 14,5 Kg/στρ (που αντιστοιχεί σε 1,74 Kg N/στρ). Στην επιφανειακή λίπανση εφαρμόστηκαν λιπάσματα ουρίας 40 και 46% N, ουρίας 40 και 46% N με αναστολέα ουρεάσης (NBPT), ασβεστούχος νιτρική αμμωνία(CAN) 27% N και ασβεστούχος νιτρική αμμωνία με αναστολέα νιτροποίησης (DMPSA) 27% N.

Μελετήθηκαν στοιχεία που αφορούν την φαινολογία του φυτού (ύψος φυτών, αριθμός φύλλων), τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (πρωτεΐνη κόκκων, άζωτο κόκκων), τα συστατικά απόδοσης (ξηρό βάρος φυτών, μήκος ταξιανθίας, βάρος χιλίων σπόρων) και τις αποδόσεις (απόδοση σε κόκκους, απόδοση σε πρωτεΐνη, απόδοση σε άζωτο). Επίσης, υπολογίστηκαν ορισμένοι δείκτες αζώτου όπως η αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (Nitrogen Use Efficiency-NUE), ο δείκτης συγκομιδής (Harvest Index-HI) και η γεωργική αποτελεσματικότητα αζώτου (Nitrogen Agronomic Efficiency-NAE).

Η μέγιστη απόδοση τόσο για τα συμβατικά όσο και για τα παρεμποδισμένα λιπάσματα παρατηρήθηκε με την χρήση CAN. Στην επέμβαση CAN 27% N επετεύχθη απόδοση 560,45 Kg/στρ ενώ στην επέμβαση CAN 27% N + DMPSA η απόδοση εμφανίζεται αυξημένη κατά 1,14%, φτάνοντας τα 566,83 Kg/στρ. Όσον αφορά στην πρωτεΐνη κόκκων και στον δείκτη αποδοτικότητας χρήσης αζώτου (NUE), οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται για τις επεμβάσεις της ουρίας με 46% N και στα συμβατικά και στα παρεμποδισμένα λιπάσματα. Στην επέμβαση Ουρία 46% N παράχθηκε σπόρος με 13,5% πρωτεΐνη και ο δείκτης NUE ανήλθε σε 0,24 , ενώ στην επέμβαση Ουρία 46% N+ NBPT η πρωτεΐνη κόκκου ανήλθε στο 14,4% και ο δείκτης NUE ήταν 0,31.

Επιστημονική περιοχή: Γεωργία

Λέξεις κλειδιά: Σκληρό σιτάρι, Λίπανση, Παρεμποδιστές νιτροποίησης, Απόδοση σε σπόρο, Περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη.

The effect of fertilization with nitrification inhibitors on the yield and the quality characteristics of winter durum wheat

Department of Crop Science
Laboratory of Agronomy

Abstract

A field experiment was carried out in order to study the effect of topdressing nitrogen fertilization with nitrification inhibitors during the growing season 2019-2020, in the area of Kopaida in Aliartos. Both of yields and quality characteristics in durum wheat (*Triticum turgidum ssp. Durum*) were measured. The experiment was established in a design of randomized complete blocks with 7 treatments (topdressing fertilizer) and 4 blocks. Basal fertilization was common in all plots and was applied at a ratio of 145 Kg / ha (N: P (S) + B + Zn [12:40 (10) + 0.3 + 1]) (corresponding to 17,4 Kg N / ha). Topdressing treatments were Urea 40 and 46% N, urea 40 and 46% N with urease inhibitor (NBPT), calcium ammonium nitrate (CAN) 27% N and calcium ammonium nitrate with nitrification inhibitor (DMPSA) 27% N.

Data were studied regarding phenology (plant height, number of leaves), quality characteristics (grain protein, grain nitrogen), yield components (plant dry weight, inflorescence length, 1000-seed weight) and yields (grain yield, protein yield, nitrogen yield). Some indices were also calculated such as Nitrogen Use Efficiency (NUE), Harvest Index (HI) and Nitrogen Agronomic Efficiency (NAE).

Maximum grain yield was observed under CAN. yield was 5,60 tn / ha under CAN 27% N treatment while grain yield was increased by 1.14% and reaching 5,66 tn /ha in the CAN 27% N + DMPSA treatment

The maximum values of grain protein and nitrogen use efficiency (NUE), were in urea treatments with 46% N. More specifically, protein content was 13.5% under Urea 46% N and NUE was 0,24. Finally, protein content was 14.4% in Urea 46% N + NBPT treatment and NUE was 0,31.

Scientific area: Agronomy

Keywords: Durum wheat, Fertilization, Nitrification inhibitors, Grain yield, Protein content.

**Στους γονείς μου, Σίμο και Στέλλα,
που δεν παύουν στιγμή να με στηρίζουν.**

Ευχαριστίες

Φτάνοντας λοιπόν στο τέλος αυτής της διαδρομής, θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και με στήριξαν όλον αυτόν τον καιρό.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Μπιλάλη για την καθοδήγηση και τις ουσιαστικές συμβουλές που μου έδωσε τόσο κατά την διάρκεια του πειράματος, όσο και κατά την συγγραφή της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα του Γεωπονικού πανεπιστημίου Αθηνών, Ιωάννη Ρούσση, την μεταπτυχιακή φοιτήτρια Κουτρομάνου Μαρία και τον παραγωγό Κωνσταντίνο Αδάμο για την βοήθεια που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια του πειράματος, αλλά και τον κ. Κωνσταντίνο Παπαϊωάννου που ανταποκρίθηκε στην πρόσκλησή μου, επισκέφθηκε τον πειραματικό αγρό και τον φωτογράφησε με την χρήση drone.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά και ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς την υποψήφια διδάκτορα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, Αντιγολένα Φωλίνα, τόσο για την πολύτιμη βοήθεια όσο και για την στήριξη που απλόχερα μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα.

Φυσικά δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φίλους μου και τον αδερφό μου Νίκο, που καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών μοιράστηκα μαζί τους τα άγχη και τις αγωνίες μου και πάντα ήταν εκεί για να με ακούσουν και να με βοηθήσουν να τα ξεπεράσω.

Και για το τέλος άφησα τους δύο ανθρώπους στους οποίους χρωστάω ό,τι έχω καταφέρει μέχρι σήμερα, τους γονείς μου! Τους ευχαριστώ μέσα από τα βάθη της ψυχής μου που είναι δίπλα μου κάθε στιγμή και με στηρίζουν με κάθε τρόπο σε κάθε μου απόφαση.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	4
Ευχαριστίες.....	6
Περιεχόμενα	7
1. Εισαγωγή.....	10
1.1 Σιτάρι.....	10
1.1.1 Ιστορικά στοιχεία και εξέλιξη	11
1.1.2 Ανάπτυξη σιταριού.....	13
1.1.3 Προσαρμοστικότητα	16
1.1.4 Καλλιεργητική τεχνική στα χειμερινά σιτηρά.....	17
1.1.4.1 Αμειψισπορά	18
1.1.4.2 Κατεργασία του εδάφους.....	19
1.1.4.3 Σπορά.....	19
1.1.4.4 Λίπανση	21
1.1.4.5 Διαχείριση ζιζανίων	22
1.1.4.6 Άρδευση.....	23
1.1.4.7 Συγκομιδή και αποθήκευση	24
1.1.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά.....	24
1.1.6 Θρεπτική αξία.....	25
1.1.7 Το σκληρό σιτάρι στην Ελλάδα	28
1.2 Θρέψη και λίπανση καλλιεργειών.....	31
1.2.1 Άζωτο	33
1.2.1.1 Ο Βιογεωχημικός Κύκλος του Αζώτου (N).....	34
1.2.1.2 Διεργασίες που καθορίζουν την κατάσταση του αζώτου στο έδαφος.....	36
1.2.1.3 Ο ρόλος του αζώτου στο φυτό	44
1.2.1.4 Η κατανομή και η μετακίνηση αζώτου στα φυτά	45
1.2.1.5 Πρόσληψη και μεταφορά νιτρικών ιόντων εντός του φυτικού σώματος.....	46
1.2.1.6 Πρόσληψη αμμωνιακών ιόντων από τα φυτά	49
1.2.1.7 Πρόσληψη οργανικού αζώτου	50
1.2.1.8 Η αφομοίωση του αζώτου από τα φυτά.....	51
1.2.1.9 Ο ρόλος των ενώσεων οργανικού αζώτου χαμηλού μοριακού βάρους.....	54
1.2.1.10 Συνέργεια στη θρέψη των φυτών με νιτρικά και αμμωνιακά ιόντα	55
1.2.1.11 Τοξικότητα αμμωνίου	56
1.2.1.12 Επίδραση αζώτου στην πρωτεΐνη του καρπού.....	57

1.2.1.13 Δείκτες.....	58
1.2.2 Λιπάσματα ενισχυμένης αποτελεσματικότητας	60
1.2.2.1. Αναστολείς ουρεάσης.....	61
1.2.2.2. Αναστολείς νιτροποίησης.....	71
2. Σκοπός εργασίας	80
3. Υλικά και μέθοδοι.....	80
3.1 Περιοχή έρευνας	80
3.2 Διερεύνηση δεδομένων	81
3.2.1 Προσδιορισμός εδαφικών παραμέτρων.....	81
3.2.2 Κλιματολογικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του πειράματος.....	81
3.2.3 Φυτικό υλικό	84
3.3 Πειραματικό σχέδιο.....	84
3.4 Καλλιεργητικές φροντίδες και ημερομηνίες εφαρμογής τους κατά τη διάρκεια του πειράματος.....	86
3.4.1 Κατεργασία εδάφους.....	86
3.4.2 Σπορά (Ημερομηνία και Ποσότητα σπόρων).....	86
3.4.3 Λίπανση.....	87
3.4.4 Συγκομιδή.....	87
3.5 Παρατηρήσεις και μετρήσεις	87
3.6 Στατιστική ανάλυση.....	91
3.7 Άποψη αγρού κατά την διάρκεια του πειράματος	92
4. Αποτελέσματα.....	95
4.1 Φαινολογία.....	95
4.1.1 Ύψος φυτών	95
4.1.2 Αριθμός φύλλων.....	96
4.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά	96
4.2.1 Περιεκτικότητα κόκκων σε πρωτεΐνη	96
4.2.2 Άζωτο κόκκων.....	97
4.3 Συστατικά απόδοσης.....	98
4.3.1 Ξηρό βάρος φυτών	98
4.3.2 Μήκος ταξιανθίας.....	99
4.3.3 Βάρος χιλίων σπόρων.....	99
4.4 Αποδόσεις	100
4.4.1 Αποδόσεις σε κόκκους	100
4.4.2 Αποδόσεις σε πρωτεΐνη	101
4.4.3 Αποδόσεις σε άζωτο	101

4.5 Δείκτες εκτίμησης	102
4.5.1 Αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (Nitrogen Use Efficiency- NUE)	102
4.5.2 Δείκτης συγκομιδής (Harvest Intex-HI)	103
4.5.3 Γεωργική Αποτελεσματικότητα αζώτου (Nitrogen Agronomic Efficiency-NAE)	103
5. Συμπεράσματα-Συζήτηση	104
6. Βιβλιογραφία.....	111

1. Εισαγωγή

Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού προβλέπεται ότι θα κλιμακωθεί τα επόμενα χρόνια και σύμφωνα με εκτιμήσεις του FAO, ο παγκόσμιος πληθυσμός το 2050 θα ξεπεράσει τα 9,1 δισεκατομμύρια, από 7,8 που είναι σήμερα. Ταυτόχρονα το φαινόμενο της αστικοποίησης θα συνεχιστεί με γοργούς ρυθμούς καθώς υπολογίζεται ότι το 70% του παγκόσμιου πληθυσμού θα ζει σε αστικές περιοχές, ενώ σήμερα αυτό το ποσοστό φτάνει το 49%. Προκειμένου λοιπόν να καλυφθούν οι επισιτιστικές ανάγκες που θα προκύψουν, θα πρέπει η συνολική παραγωγή τροφίμων να αυξηθεί κατά 70%, η ετήσια παραγωγή σιτηρών κατά 42% και η ετήσια ζωική παραγωγή κατά 135%.

Συνεπώς, η βελτίωση της γεωργικής βιωσιμότητας μελλοντικά θα εξαρτηθεί από τη βελτιστοποίηση της φυτικής παραγωγής, την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της καλλιεργήσιμης γης καθώς και την περιβαλλοντική διατήρηση. Μάλιστα εκτιμάται ότι το 80% των παραγωγικών απαιτήσεων θα προέρχονται από την αύξηση των αποδόσεων και την ένταση της καλλιέργειας ενώ μόνο το 20% θα προέρχεται από την αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων, καθώς σύμφωνα με τον FAO «οι διαθέσιμοι χώροι για τη γεωργία είναι όλο και πιο περιορισμένοι».

Ως εκ τούτου καθίστανται απαραίτητες οι έρευνες στον τομέα της βελτίωσης της παραγωγικότητας, ώστε η γεωργική παραγωγή να ανταποκριθεί στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η «βιώσιμη εντατικοποίηση», θα πρέπει να έχουμε αποτελεσματικότερη χρήση των γεωργικών εισροών. Ένα σημαντικό όπλο απέναντι σε αυτή την πρόκληση είναι τα «λιπάσματα ενισχυμένης αποτελεσματικότητας», στα οποία ανήκουν τα λιπάσματα στα οποία έχει προστεθεί κάποιος αναστολέας νιτροποίησης ή/και αναστολέας ουρεάσης.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της λίπανσης με λιπάσματα που περιέχουν αναστολείς νιτροποίησης και ουρεάσης στις αποδόσεις και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας σκληρού σίτου (*Triticum turgidum ssp. durum*).

1.1 Σιτάρι

Το σιτάρι (*Triticum spp*), είναι κατά σειρά σημαντικότητας η τρίτη από τις καλλιέργειες σιτηρών παγκοσμίως, καθώς αποτελεί βασικό στοιχείο στη διατροφή για τουλάχιστον το 36% του παγκόσμιου πληθυσμού. Στις μέρες μας, οι καλλιεργούμενες εκτάσεις με σιτάρι ξεπερνούν κάθε άλλη καλλιέργεια (Fatima et. al., 2014). Για να

καλυφθούν οι ανάγκες ενός ολοένα και αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού(με ετήσια αύξηση 1,15% περίπου), σύμφωνα με προβλέψεις η ζήτηση για το 2020 ανέρχεται σε 840 εκατομμύρια τόνους (Rosegrant et al.,1995) ή σε 1 δισεκατομμύριο τόνους (Kronstad, 1998). Η παγκόσμια ζήτηση για το σιτάρι αναμένεται να αυξηθεί ταχύτερα από οποιαδήποτε άλλη σημαντική καλλιέργεια. Τόσο λόγω της ευκολίας που έχει στη μεταφορά όσο και της ικανότητας του να διατηρείται για μεγάλο χρονικό διάστημα, αλλά και της διατροφικής του αξίας, το σιτάρι κατέχει πρωτεύουσα θέση στην ανθρώπινη διατροφή παγκοσμίως καθώς έχει την δυνατότητα να εξασφαλίσει πάνω από το 20% των αναγκαίων θερμίδων και πρωτεϊνών στον άνθρωπο. Περίπου το 65% της παραγωγής σιταριού χρησιμοποιείται στην ανθρώπινη διατροφή, το 21% ως ζωοτροφή, το 8% χρησιμοποιείται χωρίς επεξεργασία ως σπόρος και το υπόλοιπο 6% αποτελεί πηγή παραγωγής αμύλου και γλουτένης για την βιομηχανία.

1.1.1 Ιστορικά στοιχεία και εξέλιξη

Οι άγριοι πρόγονοι του σιταριού βρίσκονται σε μια σημαντικά περιορισμένη περιοχή κατά μήκος της ανατολικής ακτής της Μεσογείου. Παρόλα αυτά κάθε άλλο παρά τυχαία ήταν η εξάπλωση της καλλιέργειας του σιταριού σε αρκετές περιοχές του κόσμου, καθώς θεωρείται ένα από τα πρώτα είδη που καλλιεργήθηκε για τη διατροφή του ανθρώπου. Η ιστορία του σιταριού είναι συνυφασμένη με αυτή του ανθρώπινου πολιτισμού εδώ και τουλάχιστον 10.000 χρόνια. Σύμφωνα με ορισμένα αρχαιολογικά ευρήματα, η καλλιέργεια του σιταριού τοποθετείται περί το 15.000 π.Χ. (Harlan 1981, αναφερόμενος από Goodling και Davies,1997). Υπάρχουν πολλές ενδείξεις πως ο άνθρωπος καταλάωνε “ζυμαρικά” από σιτάρι περίπου από το 5.000 π.Χ. .

Το κέντρο καταγωγής και η παραλλακτικότητα του σκληρού σίτου (*T. durum Desf.*), συζητήθηκε αρκετά τον 20^ο αιώνα. Με βάση τις συλλογές γενετικού υλικού σκληρού σίτου, ο Orlof (1923) κατέληξε στο συμπέρασμα πως το κύριο κέντρο καταγωγής του σκληρού σιταριού είναι η περιοχή της Βόρειας Αφρικής (Αιθιοπία, Αίγυπτος, Αλγερία). Κατά τον Vavilov (1931), το σκληρό σιτάρι κατάγεται από την Αιθιοπία, όπου είναι το πρωταρχικό κέντρο της παραλλακτικότητας για τα τετραπλοειδή σιτάρια, εξαιτίας της μεγάλης παραλλακτικότητας και των ενδημικών μορφών σκληρού σίτου που βρέθηκαν στην Αιθιοπία (Zeven & Zhukovsky,1975). Ωστόσο, η έλλειψη άγριων συγγενών του σιταριού στην Αιθιοπία, δείχνουν πως τα τετραπλοειδή σιτάρια έχουν πιθανότατα εισαχθεί από άλλες περιοχές, και η Αιθιοπία είναι ένα δευτερογενές

κέντρο της παραλλακτικότητας για τα τετραπλοειδή είδη του σιταριού. Επίσης στην Αιθιοπία υπάρχει μια συγκέντρωση τετραπλοειδών ειδών σιταριού όπως το *T. Polomicum*, το *T. dicoccum* και το *T. turgidum* (Philips,1995). Ως εκ τούτου, επιβεβαιώνεται ότι το *T. durum* Desf. εισήχθη από τη Δυτική Ασία και Βόρεια Αφρική στη νότια και κεντρική Ευρώπη, στις περιοχές του Καυκάσου, στη Κεντρική Ασία και τη δυτική Σιβηρία.

Αναφορές για την καλλιέργεια του σιταριού στην αρχαιότητα έχουν γίνει από τον Όμηρο, τον Θεόφραστο κ.α. Σύμφωνα με μαρτυρίες, οι αρχαίοι Έλληνες απέδιδαν την καταγωγή του στην θεά Δήμητρα. Στην Ελλάδα, η παρουσία του σκληρού σιταριού επιβεβαιώνεται από τα ευρήματα καρβουνιασμένων σπόρων στους νεολιθικούς οικισμούς Διμήνι και Σέσκλου στην περιοχή του Βόλου. Αξίζει να σημειωθεί πως η Ελλάδα συγκαταλέγεται στα Παγκόσμια Κέντρα γενετικού υλικού για το σιτάρι (Ινστιτούτο Σιτηρών, 2012).

Το σιτάρι είναι ένας θαυμαστός οργανισμός-μοντέλο για την εξελικτική θεωρία της ειδογένεσης των αλλοπλοειδών, την προσαρμογή και την εξημέρωση στα φυτά (Gustafson et al., 2009). Η εξημέρωσή του προκάλεσε σημαντική γενετική διάβρωση, η οποία ενισχύθηκε κατά τη διάρκεια των σύγχρονων μεθόδων βελτίωσης και έτσι αυξήθηκε η ευαισθησία και η ευπάθεια στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις, παράσιτα και ασθένειες.

Τα είδη του γένους *Triticum* ταξινομούνται σε τρία επίπεδα πλοειδίας:

- Διπλοειδή : $2n = 2x = 14$ χρωμοσώματα, γονιδίωμα AA.
- Τετραπλοειδή: $2n = 4x = 28$ χρωμοσώματα, γονιδίωμα AABB
- Εξαπλοειδή: $2n = 6x = 42$ χρωμοσώματα, γονιδίωμα AABBDD.

Πειράματα χρήσης μοριακών δεικτών, έδειξαν ότι τα συμβαλλόμενα A, B και D προέρχονται από διασταύρωση μεταξύ του άγριου σιταριού και τριών άγριων αγρωστωδών της οικογένειας Poaceae (Dvorak et al.,2010). Σύμφωνα με την ιστορία της εξέλιξης του σιταριού μόνο τα άγρια μονόκοκκα και δίκοκκα σιτάρια υποβλήθηκαν στην επιλογή εξημέρωσης, από την ανθρώπινη παρέμβαση. Τα εξαπλοειδή κοινά σιτάρια δεν προήλθαν από άγριο είδος αλλά από το *T. turgidum ssp. dicoccum*.

Ο επόμενος πίνακας, κατατάσσει τα είδη του σιταριού σε καλλιεργούμενα και άγρια είδη, ανάλογα με τον βαθμό πλοειδίας, το γονιδίωμά τους και την επένδυση ή μη του καρπού τους (Βαχαμίδης αναφερόμενος στους Feldman et. al., 1995)

Πίνακας 1. Κατάταξη των ειδών του σιταριού σε καλλιεργούμενα και άγρια είδη, ανάλογα με τον βαθμό πλοειδίας, το γονίωμα τους και την επένδυση ή μη του καρπού τους (Βαχαμίδης 2013)

Είδη	Γονίωμα	Άγρια		
		Επενδυμένα	Επενδυμένα	Μη Επενδυμένα
Διπλοειδή (2n=14)				
<i>Aegilops speltoides</i>	S(G)	Όλα	-	-
<i>Ae. bicornis</i>	S ^b	Όλα	-	-
<i>Ae. longissima</i>	S ^l	Όλα	-	-
<i>Ae. searsii</i>	S ^s	Όλα	-	-
<i>Ae. squarrosa</i>	D	Όλα	-	-
<i>Triticum urartu</i>	A	Όλα	-	-
<i>T. monococcum</i>	A	ssp. <i>boeoticum</i>	ssp. <i>monococcum</i>	ssp. <i>sinskajae</i>
Τετραπλοειδή(2n=28)				
<i>T. timopheevi</i>	AG	ssp. <i>araraticum</i>	ssp. <i>timopheevi</i>	ssp. <i>militinae</i>
<i>T. turgidum</i>	AB	ssp. <i>dicoccoides</i>	ssp. <i>dicoccum</i>	ssp. <i>durum</i>
		-	-	ssp. <i>turgidum</i>
		-	-	ssp. <i>polonicum</i>
		-	-	ssp. <i>carthlicum</i>
		-	-	ssp. <i>turanicum</i>
Εξαπλοειδή (2n=42)				
<i>T. aestivum</i>	ABD	-	ssp. <i>spelta</i>	ssp. <i>aestivum</i>
		-	ssp. <i>macha</i>	ssp. <i>compactum</i>
		-	ssp. <i>vavilovi</i>	ssp. <i>sphaerococcum</i>

1.1.2 Ανάπτυξη σιταριού

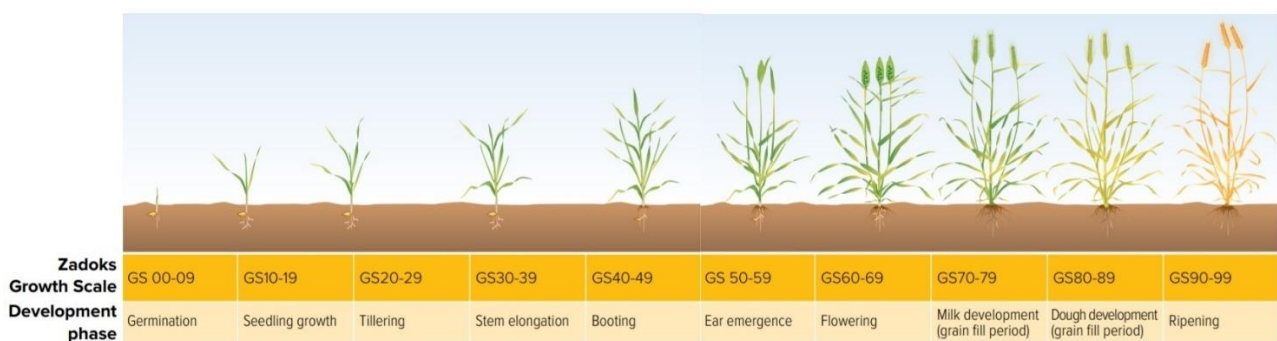
Η σπορά του σκληρού σιταριού γίνεται το φθινόπωρο, συνήθως τον Οκτώβριο στις ορεινές περιοχές και τον Νοέμβριο στις πεδινές. Η επιλογή του χρόνου που θα πραγματοποιηθεί η σπορά εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες, το τύπο του εδάφους και την αντοχή της ποικιλίας στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Η ανάπτυξη του σιταριού ακολουθεί μια σειρά διαφόρων φαινολογικών σταδίων. Πριν από τον 19^ο αιώνα ήδη είχαν αρχίσει οι προσπάθειες ποσοτικοποίησης τους από τους Lermer και Holzner (1888), και Nowacki(1886). Πρώτος όμως ο Fleekes το 1941 ανέπτυξε σε διεθνές περιβάλλον την ποσοτικοποίηση των φαινολογικών κλιμάκων σε 5 αναπτυξιακές περιόδους, οι οποίες ήταν:

1. Αδέλφωμα
2. Καλάμωμα
3. Ξεστάχασμα
4. Άνθηση
5. Ωρίμανση

Κάθε στάδιο από αυτά υποδιαιρείται σε 23 φάσεις που περιγράφουν την ανάπτυξη του σιταριού από την εμφάνιση του πρώτου φύλλου έως την εμπορική ωρίμανση των συγκομιζόμενων καρπών. Η κλίμακα του Fleekes μαζί με αυτές των Haun(1973) και του Zadoks(1974) αποτελούν παγκοσμίως τις πιο διαδεδομένες κλίμακες.

Ο Zadoks(1974) παρουσίασε μια κλίμακα που χρησιμοποιείται ευρύτατα έως σήμερα σε διεθνές επίπεδο ερευνών και αγοράς (χημικών εισροών) καθώς χαρακτηρίζεται από την πληρότητά της σε ότι αφορά την περιγραφή της φαινολογικής ανάπτυξης του σιταριού συνολικά. Η κωδικοποίηση του Zadoks περιλαμβάνει ένα εύρος το οποίο ξεκινά με το στάδιο της βλάστησης των σπόρων και την αρχή της διαδικασίας του φυτρώματος και ολοκληρώνεται με την πλήρη ωρίμανση των καρπών (Βαχαμίδης, 2013).



Εικόνα 1. Κλίμακα Zadoks (Πηγή: GRDC, Cereal Growth Stages Guide)

Πρόκειται για μια κλίμακα μεγέθους «0-99» και βασίζεται σε 10 πρωτεύοντα στάδια ανάπτυξης. Κάθε πρωτεύον στάδιο διαιρείται σε 10 δευτερεύοντα στάδια. Τα πρωτεύοντα στάδια ανάπτυξης είναι τα:

1. Βλάστηση σπόρου
2. Φύτρωμα

3. Αδέλφωμα
4. Επιμήκυνση στελέχους
5. Καλάμωμα
6. Ξεστάχιασμα
7. Ανθοφορία
8. Στάδιο γάλακτος
9. Στάδιο ζύμης
10. Ωρίμανση

Καθώς περνούσαν τα χρόνια, η κλίμακα αυτή επεκτάθηκε. Η τελευταία τροποποίησή της έγινε από τους Klepper et al. (1982) και Moragues and McMaster(2012). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η διάρκεια του κάθε σταδίου και ο αριθμός των καταβολών που σχηματίζονται, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αλληλεπίδραση γονότυπου-περιβάλλοντος.

Ο σπόρος δεν βλαστάνει αμέσως μόλις ωριμάσει, αλλά θα πρέπει να περάσει πρώτα από μια περίοδο λήθαργου, κατά την οποία υφίσταται ορισμένες μεταβολές. Η περίοδος του λήθαργου διαρκεί από λίγες ημέρες μέχρι και 6 μήνες (Leonard and Martin 1963) ή και περισσότερο, αν ο σπόρος δεν συλλεχθεί ώριμος ή αν διατηρείται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο λήθαργος αποτρέπει το φύτευμα του σπόρου στο χωράφι πριν τον αλωνισμό (Σφήκας, 1995).

Η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους καθορίζουν την έναρξη του φυτρώματος(η εμφάνιση του ακραίου οφθαλμού στην επιφάνεια του εδάφους). Η βλάστηση αρχίζει όταν οι σπόροι απορροφήσουν μικρά ποσά υγρασίας, τουλάχιστον 35-45% του ξηρού βάρους τους, ενώ το φως δεν την επηρεάζει. Η ελάχιστη θερμοκρασία φυτρώματος για το σιτάρι είναι 4°C, η άριστη 20-25 °C και η μέγιστη 35-37°C. Η βλάστηση γίνεται εντός 10-15 ημερών μετά τη σπορά. Έπειτα σχηματίζονται πλευρικοί οφθαλμοί στις μασχάλες των φύλλων από τους οποίους εκφύονται νέα στελέχη (αδέλφια). Το στάδιο του αδελφώματος συνήθως σταματά με την έναρξη ανάπτυξης του στάχου και πριν το καλάμωμα (Παπακώστα 2008).

Την άνοιξη, τα φυτά μπαίνουν σε μια περίοδο ταχείας ανάπτυξης όπου επιμηκύνεται το στέλεχος και ταυτόχρονα ξεκινά η αύξηση των φύλλων, των ριζών και της ταξιανθίας. Η επιμήκυνση των μεσογονάτιων διαστημάτων και η βλαστική ανάπτυξη ευνοούνται από τις υψηλές θερμοκρασίες και την επάρκεια νερού και αζώτου.

Την ανάπτυξη του στελέχους ακολουθεί η αύξηση του μεγέθους του στάχους και η μετακίνησή του από την βάση του φυτού προς την κορυφή. Ο στάχους βρίσκεται πάντα

στη βάση του υψηλότερου κόμβου από το έδαφος. Όταν ο στάχυς φτάσει στον κολεό του τελευταίου φύλλου, ο κολεός διογκώνεται και το στάδιο αυτό ονομάζεται φούσκωμα.

Έπειτα ο κολεός του φύλλου σημαία σχίζεται κατά μήκος και εμφανίζεται η ταξιανθία. Το γέμισμα των καρπών χαρακτηρίζεται από τη συσσώρευση ουσιών από προϊόντα της φωτοσύνθεσης που παράγονται τόσο μετά την άνθηση όσο και πριν από αυτή και που μετακινούνται από τα βλαστικά τμήματα του φυτού προς τους αναπτυσσόμενους καρπούς. Η χρονική πορεία του γεμίματος ακολουθεί σιγμοειδή καμπύλη και διαρκεί 30-60 ημέρες από την άνθηση, ανάλογα με το γενότυπο και τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η συγκομιδή χαρακτηρίζεται από αφυδάτωση των καρπών και βαθμιαίο θάνατο (ξηρανση) των φυτών από το λαιμό προς το στάχυ. Ο καρπός είναι σκληρός, ασυμπίεστος και δεν χαράζεται εύκολα. Στην Ελλάδα η συγκομιδή πραγματοποιείται με θεριζοαλωνιστικές μηχανές, συνήθως κατά τον Ιούνιο και σε περισσότερο ορεινές περιοχές κατά τον Ιούλιο, όταν η υγρασία των κόκκων έχει μειωθεί περίπου στο 14% για να καταστεί ασφαλής η αποθήκευσή τους.

1.1.3 Προσαρμοστικότητα

Η κλιματική μεταβλητότητα, ως έκφραση μελέτης χωρικών και χρονικών μοντέλων θερμοκρασίας (Houghton et al., 1996), προβλέπεται να έχει σημαντικές συνέπειες για την φυτική παραγωγή (Porter and Gawith, 1999). Η συνολική ανάπτυξη των φυτών καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον παράγοντα της μεταβολής της θερμοκρασίας. Οι ερευνητές που μελετούν τις συνέπειες των μεταβολών της, πάνω στις γεωργικές καλλιέργειες (Kenny et al., 1993) έχουν χρησιμοποιήσει μοντέλα πρόβλεψης σε συνδυασμό με πειράματα, βάσει των οποίων μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τις συνέπειες της κλιματικής μεταβολής στην παραγωγή σίτου (Porter and Gawith, 1999).

Οι Porter και Gawith (1999), εξέτασαν περί τα 65 επιστημονικά άρθρα από τα οποία προέκυψαν οι μέσες ελάχιστες, μέγιστες και βέλτιστες θερμοκρασίες ανάπτυξης των περισσότερων φαινολογικών σταδίων του σιταριού, με προσαρμογή στις νέες περιβαλλοντικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα το σιτάρι ως C₃ φυτό, ευνοείται γενικά από σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Μπορεί να καλλιεργηθεί από το επίπεδο της θάλασσας έως και 3.000m υψόμετρο, ενώ υπάρχουν αναφορές και για υψόμετρα των

4570m στο Θιβέτ(Percival,1921). Το στάδιο του φυτρώματος όπως προαναφέρθηκε παρουσιάζει ελάχιστη θερμοκρασία ανάπτυξης 4 °C, βέλτιστη 20-25 °C και μέγιστη 35°C. Υψηλές θερμοκρασίες ημέρας(άνω των 30 °C), ευνοούν την ταχεία ανάπτυξη της καλλιέργειας, την επιτάχυνση της ξήρανσης του φυλλώματος και επιβραδύνουν την ανάπτυξη του κόκκου (Παπακώστα,2008).

Σύμφωνα με τους Warrington et al. (1977), σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες στο στάδιο ανάπτυξης της ταξιανθίας του σιταριού, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ύψους των φυτών, τη διόγκωση του ελάσματος στο φύλλο σημαία και την αύξηση του αριθμού σταχυδίων ανά στάχυ. Καθοριστικό ρόλο για την διαμόρφωση της απόδοσης, παίζει η θερμοκρασία κατά το στάδιο της ωρίμανσης του καρπού. Σχετικά με την παράμετρο αντοχής σε χαμηλές θερμοκρασίες, σκληραγωγημένα φυτά μπορούν ανταπεξέλθουν σε θερμοκρασίες έως και -30 °C. Στις περισσότερες περιπτώσεις, θερμοκρασίες κάτω των -18°C είναι καταστροφικές για το φυτό. Σε γενικές γραμμές το μαλακό σιτάρι παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στις χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με το σκληρό (Παπακώστα 2008).

Το σιτάρι παρουσιάζει εύρος προσαρμογής σε συνθήκες έλλειψης υγρασίας, παρόλο που δεν θεωρείται ιδιαίτερα ανθεκτικό φυτό σε αυτές τις καταπονήσεις. Οι άριστες συνθήκες βροχόπτωσης που εξασφαλίζουν την μέγιστη απόδοσή του, κυμαίνονται μεταξύ 250 και 1000mm. Σημαντικό ρόλο όμως, εκτός από την ποσότητα, έχει και η κατανομή καθώς στο στάδιο μεταξύ καλαμώματος και άνθησης παρουσιάζονται μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό. Τέλος εδάφη υψηλής γονιμότητας, επαρκούς στράγγισης, ιλυοπηλώδους ή αργιλοπηλώδους σύστασης με pH από 7,0 έως 8,5 θεωρούνται ιδανικά για την εξασφάλιση υψηλών αποδόσεων (Παπακωστα 2008).

1.1.4 Καλλιεργητική τεχνική στα χειμερινά σιτηρά

Πρωταρχικό στόχο στη γεωργία αποτελεί η αύξηση των αποδόσεων και της παραγωγικότητας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου σημαντικό ρόλο παίζουν οι εξής τρεις παράγοντες:

1. Η δημιουργία και η καλλιέργεια νέων ποιοτικότερων ποικιλιών με πιο υψηλό δυναμικό απόδοσης.
2. Η βελτιωμένη τεχνική της καλλιέργειας των νέων αυτών ποικιλιών.
3. Η ένταξη νέας τεχνολογίας στη σποροπαραγωγή, στην εγκατάσταση της καλλιέργειας, στην τεχνική της υποστήριξη και στη συγκομιδή.

Η εισαγωγή των πρώτων ημινάνων ποικιλιών σιταριού, που δημιουργήθηκαν στο CIMMYT(Διεθνές Κέντρο Βελτίωσης Καλαμποκιού και Σιταριού), εξασφάλισε την αυτάρκεια σε σιτάρι σε αρκετές χώρες του κόσμου όπως το Μεξικό, το Πακιστάν, η Ινδία κ.α.. Οι εν λόγω ποικιλίες είχαν την δυνατότητα να δεχθούν αυξημένες ποσότητες λιπασμάτων και να επιτύχουν μεγαλύτερες αποδόσεις καθώς δεν πλάγιαζαν.

Στις μέρες μας, οι ερευνητές καταβάλλουν σημαντικές προσπάθειες να δημιουργήσουν είδη και ποικιλίες με λιγότερες απαιτήσεις σε τεχνική υποστήριξη, για τους εξής λόγους:

- Το οικονομικό κόστος που απαιτεί η τεχνική υποστήριξης της καλλιέργειας (λιπάσματα, χημικός έλεγχος ύψους, ασθeneιών, εντόμων κ.α.)
- Η ρύπανση του περιβάλλοντος από την έκλυση και την κακή χρήση των χημικών μέσων.
- Η διαρκής μείωση των διαθέσιμων προς καλλιέργεια περιοχών του πλανήτη με ευνοϊκές συνθήκες για την παραγωγή.
- Η διαρκής υποβάθμιση της γονιμότητας και της μηχανικής σύστασης των εδαφών (όξινα εδάφη, εδάφη με οριακά ποσοστά οργανικής ουσίας κ.α.). Έτσι προκύπτει η ανάγκη καλύτερης αξιοποίησης και βελτίωσης των υποβαθμισμένων εδαφών καθώς και των περιθωριακών εδαφών όπως είναι τα όξινα ($pH < 6$), τα υψίπεδα (έως 2000m), τα ηφαιστειακά και τα αλατούχα εδάφη (Ινστιτούτο Σιτηρών,1991)

1.1.4.1 Αμειψισπορά

Η αμειψισπορά συντελεί στη συντήρηση και καλύτερη εκμετάλλευση της γονιμότητας του εδάφους, αλλά και στην διαχείριση των παράσιτων και των ζιζανίων. Μονοκαλλιέργεια σιτηρού μπορεί να εφαρμοστεί για 5-10 έτη σε γόνιμα, χωρίς ζιζάνια και ασθένειες χωράφια. Σε πολύ φτωχά εδάφη θα μπορούσε να εφαρμοστεί το εκτατικό σύστημα αγρανάπαυση-σιτηρό. Το πιο επωφελές σύστημα για το σιτάρι είναι το τριετές ψυχανθές-σκαλιστικό-σιτάρι (Σφήκας,1995). Σε ότι αφορά τους εχθρούς του σιταριού, το κολεόπτερο *Zabrus gibbus* και το δίπτερο *Phytophaga destructor* φαίνεται να ελέγχονται αποτελεσματικά με την αμειψισπορά (Καραμάνος,1992).

1.1.4.2 Κατεργασία του εδάφους

Ο αριθμός και το βάθος των όργωμάτων καθώς και η εποχή που πραγματοποιούνται, με σκοπό την προετοιμασία του εδάφους για σπορά, καθορίζονται από την προηγούμενη καλλιέργεια, την ύπαρξη ζιζανίων και την υγρασιακή κατάσταση του εδάφους (Σφήκας, 1995).

Το πρώτο όργωμα γίνεται συνήθως μετά τις πρώτες φθινοπωρινές βροχές και είναι ελαφρύ αν προηγήθηκε χειμερινό σιτηρό και βαθύτερο μετά από καλαμπόκι για πληρέστερο παράχωμα των στελεχών. Μπορεί στη συνέχεια να γίνει κάποιο ενδιάμεσο όργωμα ή μόνο το όργωμα της σποράς και αν κριθεί αναγκαίο ένα δισκοσβάρνισμα, και τέλος η σπορά (Σφήκας, 1995)

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο που έχει σχέση με την προετοιμασία του εδάφους για τη σπορά, τη διατήρηση της γονιμότητας του, της υφής αλλά και της συνοχής του, είναι ο χειρισμός των υπολειμμάτων του θεριζοαλωνισμού, ιδιαίτερα όταν καλλιεργούνται μόνο σιτηρά επί σειρά ετών. Συνιστάται λοιπόν, μέτρια αναστροφή του εδάφους για ενσωμάτωση των υπολειμμάτων που παρέμειναν στον αγρό μετά τη συγκομιδή της προηγούμενης καλλιέργειας και καταστροφή των ζιζανίων (Ινστιτούτο Σιτηρών, 1991). Τα υπολείμματα των αροτραίων καλλιεργειών με σωστή διαχείριση, μπορούν να προσφέρουν προστασία στο χωράφι από την διάβρωση και να εμπλουτίσουν το έδαφος με οργανική ουσία. Τα εδάφη στην Ελλάδα είναι πολύ φτωχά σε οργανική ουσία, που αποτελεί το βασικότερο συστατικό της γονιμότητας των εδαφών. Η ωφέλεια στο έδαφος από την συγκράτηση περισσότερου βρόχινου νερού και από τη μείωση της εξάτμισης από αυτό, συνδέεται άμεσα με το καλό φύτρωμα των σπόρων. Η συγκράτηση της υγρασίας επηρεάζεται θετικά από την κάλυψη του εδάφους από φυτικά υπολείμματα (ΟΣΔΕ, 2006).

1.1.4.3 Σπορά

Γίνεται επιλογή κατάλληλης, για την περιοχή, ποικιλίας. Ακολουθεί η επιλογή του σπόρου, από τον οποίο εξαρτάται το γρήγορο και κανονικό φύτρωμα, η πρώτη ανάπτυξη των φυτών, η καθαρότητα και η ομοιογένεια της καλλιέργειας. Για αυτούς τους λόγους ο σπόρος θα επιλεγεί θα πρέπει να είναι καθαρός (από σπόρους άλλης ποικιλίας ή από ζιζάνια), απαλλαγμένος από έντομα και ασθένειες, απολυμασμένος, ομοιόμορφος και γεμάτος. Επίσης θα πρέπει να έχει υψηλή φυτρωτική ικανότητα και βλαστική δύναμη και να μην περιέχει σπασμένους σπόρους.

Όσον αφορά τον υπολογισμό της ποσότητας του σπόρου που απαιτείται για την σπορά, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τόσο η ποικιλία που έχει επιλεγεί, οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, η γονιμότητα και η προετοιμασία του εδάφους καθώς επίσης και η εποχή που πραγματοποιείται η σπορά. Στην χώρα μας για την καλλιέργεια του σκληρού σιταριού συνιστάται ποσότητα που αγγίζει τα 20 Kg σπόρου/ στρ για τις ορεινές περιοχές με βαρύ χειμώνα, ενώ η ποσότητα αυτή είναι λίγο μικρότερη σε περιοχές με ηπιότερο χειμώνα.

Το σιτάρι στη χώρα μας σπέρνεται κατά κανόνα τους μήνες Οκτώβριο-Νοέμβριο(Σφήκας,1995). Για το σκληρό σιτάρι οι καλύτερες αποδόσεις επιτυγχάνονται όταν η σπορά γίνει εντός των 2 πρώτων 10ημέρων του Νοέμβρη. Η ημερομηνία σποράς εξαρτάται από την ποικιλία και τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της καλλιέργειας. Η κρίσιμη περίοδος για το σιτάρι είναι η ανθοφορία έως και το γέμισμα του σπόρου. Αν η σπορά πραγματοποιηθεί πολύ νωρίς, σε περιοχές με όψιμους παγετούς μπορεί να προκληθούν ζημιές, ενώ, αν γίνει αργά, δεν θα έχουμε καλή γονιμοποίηση και γέμισμα από τις υψηλές θερμοκρασίες ή την έλλειψη νερού. Επίσης σε πολύ πρόωμη καλλιέργεια πιθανότατα να έχουμε υποβάθμιση από βροχή κοντά στη συγκομιδή.

Η σπορά γίνεται σε γραμμές που απέχουν μεταξύ τους από 14 έως 20cm και οι αποστάσεις επί της γραμμής κυμαίνονται από 2,5 έως 5cm. Το σύνθετος βάθος σποράς είναι 2,5-5 cm. Το μεγαλύτερο βάθος εφαρμόζεται σε ελαφρά εδάφη, πρόωμη σπορά και συνθήκες έλλειψης υγρασίας. Έρευνες έχουν δείξει πως οι υψηλότερες αποδόσεις και καλύτερη ποιότητα επιτυγχάνονται όταν η σπορά γίνεται σε βάθος 3-8cm. Αυτό συμβαίνει γιατί τα φυτά αποκτούν βαθύ ριζικό σύστημα και είναι πιο ανθεκτικά στο πλάγιασμα, οπότε αντιδρούν καλύτερα στην αζωτούχο λίπανση και παράγουν περισσότερη πρωτεΐνη. Οι γραμμές σποράς θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν παράλληλες με την κίνηση του ήλιου και κάθετες προς τους επικρατέστερους ανέμους της περιοχής για να εξασφαλισθεί εφ' ενός ο καλύτερος φωτισμός και αφ' ετέρου να μειωθούν πιθανές επιπτώσεις από ψύχος(Ινστιτούτο Σιτηρών,1991).

Για το σκληρό σιτάρι, η πυκνότητα σποράς είναι ένα καλό εργαλείο για να μειωθεί το ρίσκο των χαμηλών αποδόσεων. Σε υψηλή πυκνότητα σποράς, τα φυτά παράγουν λιγότερα αδέρφια ενώ σε χαμηλότερης πυκνότητας παράγουν περισσότερα. Οι χαμηλές όμως πυκνότητες έχουν υψηλότερη ρυθμιστική ικανότητα στις αλλαγές των καιρικών συνθηκών.

1.1.4.4 Λίπανση

Οι απαιτήσεις του σιταριού σε μακροστοιχεία μπορεί να εκτιμηθούν από χημικές αναλύσεις των φυτών κατά την ανάπτυξή τους. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η ολική περιεκτικότητα των φυτών σε διάφορα θρεπτικά συστατικά καθώς και η περιεκτικότητα των θρεπτικών στοιχείων μόνο στους στάχεις. Από τα δεδομένα προκύπτει πως σημαντικά ποσά ορισμένων στοιχείων όπως του καλίου, του ασβεστίου, του μαγνησίου και του θείου) παραμένουν στο έδαφος μετά τη συγκομιδή. Αντίθετα όμως η μεγαλύτερη ποσότητα του αζώτου και του φωσφόρου συσσωρεύεται στους καρπούς.

Πίνακας 2. Η μέγιστη περιεκτικότητα μιας φυτείας χειμερινού σιταριού σε μακροστοιχεία και νάτριο καθώς και η περιεκτικότητα των στάξεων (από δεδομένα των Gregory et al., 1979)

Θρεπτικό στοιχείο	Περιεκτικότητα (Kg/στρ)	
	Ολική	Στάξεων
Αζωτο	12,8	9,7
Φώσφορος	2,7	2,3
Κάλιο	20,7	2,9
Ασβέστιο	2,7	0,3
Μαγνήσιο	1,1	0,6
Θείο	1,9	0,3
Νάτριο	0,4	0,1

Η λιπαντική τακτική θα πρέπει να σχεδιάζεται διαφορετικά σε κάθε χωράφι και να λαμβάνονται υπόψιν οι εδαφικές συνθήκες (ανάλυση εδάφους), το γενετικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί (ποικιλία), οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, η προηγούμενη καλλιέργεια αλλά και η προσδοκώμενη απόδοση.

Η βασική λίπανση το φθινόπωρο, πριν ή κατά τη σπορά, έχει ως στόχο να καλύψει τις ανάγκες των φυτών μέχρι και το στάδιο του αδελφώματος. Οι απαιτήσεις που έχει το σιτάρι μέχρι αυτό το στάδιο σε άζωτο, αγγίζουν τα 4 Kg N/στρ (από τα 12-16 Kg N/στρ που χρειάζεται η καλλιέργεια για να ολοκληρώσει τον βιολογικό της κύκλο). Ταυτόχρονα, χορηγούνται 3-5 Kg P/στρ αλλά και κάλιο όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο.

Η επιφανειακή λίπανση πραγματοποιείται στο ξεκίνημα του αδελφώματος και είναι εστιασμένη κυρίως στην διαχείριση του αζώτου που απαιτείται συμπληρωματικά της βασικής λίπανσης. Ωστόσο η ταυτόχρονη χορήγηση θείου στις απαιτούμενες ποσότητες επιδρά θετικά στις τελικές αποδόσεις και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού. Κατά τη βασική τους λίπανση τα σιτηρά λαμβάνουν μόλις το 20-30% των συνολικών τους αναγκών σε άζωτο. Άρα η επιφανειακή λίπανση είναι εξαιρετικής σημασίας για την επίτευξη της επιδιωκόμενης παραγωγής. Η έντονη απορρόφηση του αζώτου στα σιτηρά εντοπίζεται από το στάδιο του αδελφώματος μέχρι και το τέλος της άνθισης, στάδια στα οποία το φυτό διαμορφώνει τις δομές της παραγωγής του (σχηματισμός αδελφιών, επιμήκυνση στελέχους, ένταση φυλλικής επιφάνειας, άνθιση, αριθμός και μέγεθος κόκκων στο στάχυ). Το άζωτο που απαιτείται κατά τη διάρκεια του γεμίσματος των κόκκων, προέρχεται κυρίως από μια εσωτερική του ανακατανομή από τους βλαστούς και τα φύλλα και όχι τόσο από το έδαφος. Όπως και το άζωτο, έτσι και το θείο, αποτελεί βασικό στοιχείο της δομής των πρωτεϊνών και θα πρέπει να χορηγείται μαζί κατά την επιφανειακή λίπανση των σιτηρών στις σωστές αναλογίες. Η υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη είναι ένα σημαντικό ποιοτικό κριτήριο στο σκληρό σιτάρι που αναζητείται από τη βιομηχανία. Οι ποσότητες του θείου που απαιτούνται για τη μέγιστη παραγωγικότητα της καλλιέργειας είναι περίπου 2-4 Kg SO₃/στρ.

1.1.4.5 Διαχείριση ζιζανίων

Τα κυριότερα αυτοφυή είδη που συναντάμε σε χειμερινά σιτηρά είναι από τα αγρωστώδη η αγριοβρώμη (*Avena sp.*), το μίλιο (*Milium vemale*) και η φάλαρη (*Phalaris sp.*), ενώ από τα πλατύφυλλα είναι ο αγριοβίκος (*Vicia sp.*), το σινάπι (*Sinapis arvensis*), το γαϊδουράγκαθο (*Carduus nutans*), το κενταύριο (*Centaurea cyanus*), η αγριομαργαρίτα (*Chrysanthemum segetum*), η παπαρούνα (*Papaver rhoeas*), η βερόνικα (*Veronica sp.*), το καπνόχορτο (*Fumaria officinalis*), η κολλητσίδα (*Gallium sp.*), η μπιφόρα (*Bifora radians*), το πολυκόμπι (*Polygonum aviculare*), το χαμομήλι (*Chamomila recutita*), η καψέλα (*Capsella bursa-pastoris*), το κίρσιο (*Cirsium arvense*) και το αναρριχώμενο πολύγωνο (*Bilderdykia convolvulus*) (Λόλας, 2003).

Ένας καλός έλεγχος ζιζανίων στο σκληρό σιτάρι αυξάνει τις αποδόσεις και ελαχιστοποιεί την επιμόλυνση του σιμιγδαλιού με ξένες ύλες. Η χρήση των ζιζανιοκτόνων πρέπει να γίνεται με προσοχή έτσι ώστε να αποφεύγονται τοξικότητες καθώς και επιμολύνσεις του προϊόντος από μη εγκεκριμένα σκευάσματα.

Ο έλεγχος των αυτοφυών ειδών γίνεται κυρίως με καλλιεργητικά μέτρα και με ζιζανιοκτόνα. Τα καλλιεργητικά μέτρα ελέγχου εφαρμόζονται σε εκτάσεις βιολογικής καλλιέργειας σιτηρών ώστε να φτάσουν σε ένα επίπεδο όπου δεν θα δημιουργούν ανταγωνισμό. Η χρήση ζιζανιοκτόνων έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης γεωργίας. Τα ζιζανιοκτόνα προσφέρουν μεγάλη ευελιξία, λειτουργία, αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο διαχείρισης των αυτοφυών ειδών (Chauhan et al., 2012). Τα περισσότερα είναι κατάλληλα για καταπολέμηση μόνον αγρωστωδών ή πλατύφυλλων αυτοφυών ειδών, ενώ λίγα καταπολεμούν συγχρόνως ορισμένα αγρωστώδη και πλατύφυλλα. Η εφαρμογή τους γίνεται προφυτρωτικά της καλλιέργειας ή συνηθέστερα μεταφυτρωτικά, σε στάδιο του φυτού που καθορίζεται από το είδος του ζιζανιοκτόνου (Παπακώστα,2008). Η εφαρμογή ζιζανιοκτόνου έγινε δημοφιλής σε πολλά μέρη του κόσμου, κυρίως επειδή απαιτεί λιγότερη ανθρώπινη προσπάθεια, μπορεί να αντιμετωπίσει είδη που εξοντώνονται δύσκολα και επιτρέπει την ευελιξία στη διαχείριση των φυτών. Παρ' όλα αυτά, συνεχείς χρήσεις ενός ενιαίου ζιζανιοκτόνου για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη ανθεκτικών βιοτύπων, μετατοπίσεις της χλωρίδας καθώς και αρνητικές συνέπειες για την επόμενη καλλιέργεια και το περιβάλλον (Chauhan et al.,2012).

1.1.4.6 Άρδευση

Γενικά τα χειμερινά σιτηρά στην Ελλάδα, καλλιεργούνται κυρίως σε περιοχές που δεν υπάρχει δυνατότητα άρδευσης. Όταν όμως καλλιεργούνται σε αρδευόμενες εκτάσεις, τότε η άρδευση σε χρονιές με μεγάλη ξηρασία είναι ευνοϊκή. Η αποτελεσματικότητα της όμως εξαρτάται και από την εποχή στην οποία θα εφαρμοστεί. Η άρδευση αυξάνει τις αποδόσεις όταν πραγματοποιείται σε περίοδο που η θερμοκρασία παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, σε αντίθεση με τις σχετικά υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να μειώσουν τις αποδόσεις. Ο κυριότερος λόγος είναι η καταστροφή των φύλλων από ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών που ευνοούνται από την υγρασία και τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, με την άρδευση σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης, ο κίνδυνος πλαγιάσματος είναι μεγαλύτερος. Αντιθέτως μια βροχόπτωση αργά την άνοιξη είναι επιθυμητή, καθώς η ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών περιορίζεται από την πτώση των θερμοκρασιών, λόγω της βροχής. Σε βαριά, επίπεδα εδάφη που δεν στραγγίζουν καλά, μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις δημιουργούνται λιμνάζοντα νερά που μπορούν να προκαλέσουν ασφυξία στα φυτά, που

εκδηλώνεται με κιτρίνισμα και ξήρανση των κατώτερων φύλλων. Η απομάκρυνσή τους γίνεται με αυλάκια που ανοίγονται κατά θέσεις στον αγρό (Παπακώστα, 2008).

1.1.4.7 Συγκομιδή και αποθήκευση

Στην Ελλάδα, η συγκομιδή του σιταριού πραγματοποιείται με θεριζοαλωνιστικές μηχανές τον Ιούνιο ή τον Ιούλιο. Στο σκληρό σιτάρι η συγκομιδή πρέπει να γίνεται την κατάλληλη περίοδο, όταν δηλαδή οι σπόροι είναι ώριμοι με χαμηλή υγρασία (<14%). Χρειάζεται πολλή προσοχή κατά τη συγκομιδή για να μην ραγίσουν ή σπάσουν οι σπόροι, καθώς είναι πολύ ευαίσθητοι, ειδικά όσοι έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, λόγω του υψηλού υαλώδους.

Η αποθήκευση των σιτηρών γίνεται με υγρασία μικρότερης του 14%, σε ξηρές και δροσερές αποθήκες μέσα σε μεταλλικά δοχεία ή σάκους ή χύμα, καθώς και σε μεγάλα σιλό. Ο ρυθμός αναπνοής του σπόρου με υγρασία κάτω του 14% και θερμοκρασία κάτω των 20 °C είναι βραδύς ώστε να μην διατρέχει κίνδυνο να ανάψει. Στην υγρασία των 8-10% και θερμοκρασία 4 °C σταματά και η δραστηριότητα των εντόμων στην αποθήκη (Σφήκας, 1995).

1.1.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά

Σύμφωνα με τον Finney (1987), η ποιότητα του μαλακού σιταριού καθορίζεται σύμφωνα με τις ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο προς αλευροποίηση, ενώ η ποιότητα του σκληρού σιταριού, σύμφωνα με την καταλληλότητα για παραγωγή σιμιγδαλιού και μακαρονιών. Πιο συγκεκριμένα, κριτήρια τα οποία λαμβάνονται υπόψιν για τον καθορισμό της ποιότητας είναι τα εξής :

- Άλεσμα
- Ρεολογία ζύμης
- Ποιότητα αρτοποιήσης
- Θρεπτική αξία
- Ικανότητα αποθήκευσης
- Υγρασία
- Απόδοση
- Αναλογία βάρους σπόρου προς πρωτεΐνη αλεύρου
- Εκατολιτρικό βάρος
- Σκληρότητα κόκκου.

Όσον αφορά το σκληρό σιτάρι, γενικά , προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή απόδοση σε σιμιγδάλι, οι καρποί θα πρέπει να είναι υψηλής σκληρότητας (υαλώδους δομής), με υψηλό εκατολιτρικό βάρος και βάρος χιλίων κόκκων. Επίσης, θα πρέπει οι συγκομιζόμενοι καρποί να έχουν πρωτεΐνη μεγαλύτερη από 13% και τέλος, να μην φέρουν μαύρα στίγματα από προσβολές μυκήτων (Finney et al.,1996).

Πιο αναλυτικά, έξι είναι οι παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα του σκληρού σιταριού: (Finney et. al., 1987)

1. **Μέγεθος και σχήμα του σπόρου.** Το υψηλής ποιότητας σκληρό σιτάρι θα πρέπει να έχει μεγάλους σπόρους και με λεία επιφάνεια, χωρίς χαρακώσεις, για μεγάλη απόδοση και καθαρότητα σιμιγδαλιού κατά την άλεση.
2. **Αντοχή στην υποβάθμιση πριν τη συγκομιδή.** Ο υγρός και θερμός καιρός πριν την συγκομιδή αυξάνει το ποσοστό των μαλακών λευκών σπόρων με αποτέλεσμα να μειώνεται η πρωτεΐνη που συγκρατεί τους αμυλόκοκκους και να υποβαθμίζεται η ποιότητα και η καθαρότητα του σιμιγδαλιού.
3. **Μαύρα στίγματα.** Οι σπόροι μπορούν να αναπτύξουν μαύρα στίγματα επιφανειακά, ύστερα από βροχές πριν τη συγκομιδή, που υποβαθμίζουν την εμφάνιση των παραγόμενων ζυμαρικών. Το υψηλής ποιότητας σκληρό σιτάρι δεν πρέπει να έχει πάνω από 3% ενώ η μέτρια ποιότητα 3-5% μαύρα στίγματα.
4. **Σπόροι ζιζανίων.** Μερικοί σπόροι ζιζανίων δύσκολα απομακρύνονται από το σιτάρι με αποτέλεσμα να δημιουργούν τεράστιο πρόβλημα στην ποιότητα του σιμιγδαλιού.
5. **Πρωτεΐνη και ποιότητα πρωτεΐνης.** Το σκληρό σιτάρι υψηλής ποιότητας πρέπει να έχει πρωτεΐνη πάνω από 13% (υαλώδη >90%), το μέτριας ποιότητας 11,5-13% (υαλώδη 80-89%) και το χαμηλής ποιότητας 10-11,5%.

Χρώμα. Προτιμάται λαμπερό κίτρινο χρώμα, το οποίο δημιουργεί μια ευχάριστη εικόνα μετά το βράσιμο των ζυμαρικών.

1.1.6 Θρεπτική αξία

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η χημική σύσταση (σε ποσοστά %) του καρπού και των κύριων τμημάτων του σε υγρασία 14%.

Πίνακας 3. Χημική σύσταση του καρπού του σιταριού (σε υγρασία 14%) και των κύριων τμημάτων του (σε ποσοστά %) (Πηγή: Kent-Jones & Amos, 1957)

Σύνολο καρπού	Ενδοσπέρμιο	Έμβρυο	Περιβλήματα
Άμυλο (63-71)	71,0	14,0	8,6
Πρωτεΐνες (8-15)	9,6	28,5	14,4
Κυτταρίνη (2,0-2,5)	0,2	7,5	21,4
Λίπη (1,5-2,0)	1,4	10,4	4,7
Διαλυτά ζάχαρα (2,0-3,0)	1,1	16,2	4,6
Τέφρα (1,5-2,0)	0,7	4,5	6,3
Ημικυτταρίνες (2,5-3,0)	1,8	6,8	26,2

Ο καρπός είναι κατ' εξοχήν αμυλούχος, με αρκετά υψηλό ποσοστό πρωτεΐνης. Όλο το άμυλο βρίσκεται στο ενδοσπέρμιο, τα διαλυτά ζάχαρα κυρίως στο έμβρυο και οι άλλοι πολυζακχαρίτες (κυτταρίνες-ημικυτταρίνες) στα περιβλήματα. Πρωτεΐνες, λίπη και τέφρα βρίσκονται κυρίως στο έμβρυο και το ασπίδιο και σε μικρότερα ποσοστά στο ενδοσπέρμιο. Το άμυλο βρίσκεται κυρίως ως αμυλόζη σε αμυλόκοκκους σφαιρικούς ή φακοειδείς Διασπάται από τις α- και β- αμυλάσες που υπάρχουν σε βλαστώντα σπέρματα. Από τα διαλυτά ζάχαρα απαντάται κυρίως ζαχαρόζη (στο έμβρυο), πεντοζάνες (ραφινόζη, μελιβιόζη), γλυκόζη, φρουκτόζη και μαλτόζη.

Η υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες παρατηρείται στο έμβρυο. Η περιεκτικότητα του ενδοσπερμίου αυξάνει από το κέντρο (1,5-5,5%) προς την περιφέρεια για να φτάσει σχεδόν το 18% στο στρώμα της αλευρώνης. Οι αζωτούχες ουσίες του περικαρπίου και της testa μάλλον δεν είναι πρωτεΐνες. Οι πρωτεΐνες του ενδοσπερμίου (εκτός της αλευρώνης) αποτελούνται από ίσες αναλογίες γλιαδίνης και γλουτελίνης. Η γλιαδίνη είναι διαλυτή σε 70% αλκοόλη και η γλουτελίνη σε αραιά οξέα ή αλκάλια. Στο νερό σχηματίζουν μια κολλοειδή ουσία, τη γλουτένη, που παίζει αποφασιστικό ρόλο στην αρτοποιητική ικανότητα. Σιτάρια με υψηλή πρωτεΐνη δίνουν ζυμαρικά μεγάλης σταθερότητας στην υψηλή θερμοκρασία, ενώ σιτάρια με πρωτεΐνη χαμηλότερη του 10% πάνε συνήθως για ζωοτροφή. Οι πρωτεΐνες του σιταριού, όπως φαίνεται στο πίνακα που ακολουθεί(Πίνακας 4) έχουν χαμηλή περιεκτικότητα στα απαραίτητα αμινοξέα, λυσίνη, τρυπτοφάνη και μεθειονίνη.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την περιεκτικότητα και σύσταση των πρωτεϊνών του καρπού, είναι οι εξής:

- **Υψηλές θερμοκρασίες και έλλειψη νερού** αυξάνουν την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες μειώνοντας αναλογικά περισσότερο τη συσσώρευση αμύλου
- **Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας** αυξομειώνει τη συσσώρευση πρωτεΐνης στον ίδιο βαθμό με το άμυλο και επομένως έχει συνήθως μικρή επίδραση.
- **Λίπανση με άζωτο** αυξάνει σημαντικά την περιεκτικότητα σε αποθηκευτικές πρωτεΐνες ιδίως όταν εφαρμόζεται όψιμα (10 Kg N/στρ προκαλούν αύξηση της απόδοσης σε πρωτεΐνη κατά 25 Kg/στρ), αλλά μειώνει την περιεκτικότητα σε απαραίτητα αμινοξέα στα οποία οι δύο πρωτεΐνες της γλουτένης είναι ελλειματικές.
- **Λίπανση με φώσφορο και κάλιο.** Ο φώσφορος συνήθως μειώνει την πρωτεΐνη, ενώ το κάλιο δεν έχει ουσιαστικές επιδράσεις.
- **Καλλιεργητικές φροντίδες.**
- **Καλλιεργούμενος γενότυπος** (Καραμάνος,1992)

Τα λίπη στον καρπό βρίσκονται σε χαμηλές περιεκτικότητες(1,5-2,0%) και δεν παίζουν σημαντικό ρόλο ως πηγές ενέργειας, αλλά κυρίως ως διαλύτες της βιταμίνης E. Η τέφρα στον καρπό, αποτελείται από K(0,48% κ.β.), P(0,40%), S(0,18%), Mg(0,17), Ca(0,05%). Σε μικρά ποσά ανιχνεύονται Fe, Na, και Cl. Τα περισσότερα ανόργανα άλατα βρίσκονται στο έμβρυο και στα περιβλήματα.

Από τις λιποδιαλυτές βιταμίνες, το σιτάρι είναι εξαιρετική πηγή βιταμίνης E που υπάρχει στο έμβρυο (αλλά απομακρύνεται με το άλεσμα στους κυλινδρόμυλους) ενώ δεν υπάρχουν οι A, D και K. Από τις υδατοδιαλυτές υπάρχουν σημαντικά ποσά των βιταμινών B, ιδίως θειαμίνης (στο ασπίδιο), ριβοφλαβίνης, νιασίνης και λιγότερο πυριδοξίνης, βιοτίνης και παντοθενικού οξέος (Πίνακας 4). Πάντως, επειδή βρίσκονται και αυτές κυρίως στο έμβρυο και στην αλευρώνη, απομακρύνονται με το άλεσμα και γιαυτό υπάρχουν σε μικρές ποσότητες στο λευκό ψωμί.

Πίνακας 4. Περιεκτικότητα του καρπού του σιταριού σε βιταμίνες και απαραίτητα αμινοξέα (Pomeranz & Shellenberger, 1971)

Βιταμίνες (mg/100gr Ξ.Β.)		Αμινοξέα (gr/16gr αζώτου)	
Θειαμίνη	0,40	Αργινίνη	4,71
Ριβοφλαβίνη	0,16	Ιστιδίνη	2,12
Νιασίνη	6,95	Ισολευκίνη	3,78
Βιοτίνη	0,02	Λευκίνη	6,52
Χολίνη	216,00	Λυσίνη	2,67
Παντοθενικό οξύ	1,67	Μεθειονίνη	1,74
Φυλλικό οξύ	0,05	Φαινυλαλανίνη	4,43
Ινοσιτόλη	370,00	Θρεονίνη	2,76
p-Αμινοβενζοϊκό οξύ	0,51	Τρυπτοφάνη	1,13
		Βαλίνη	4,69

Για ανθρώπινη κατανάλωση, ο καρπός του μαλακού σιταριού χρησιμοποιείται αλεσμένος στην αρτοποιία, ζαχαροπλαστική, κλπ., ενώ από το σκληρό σιτάρι παράγεται το σμιγδάλι που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ζυμαρικών.

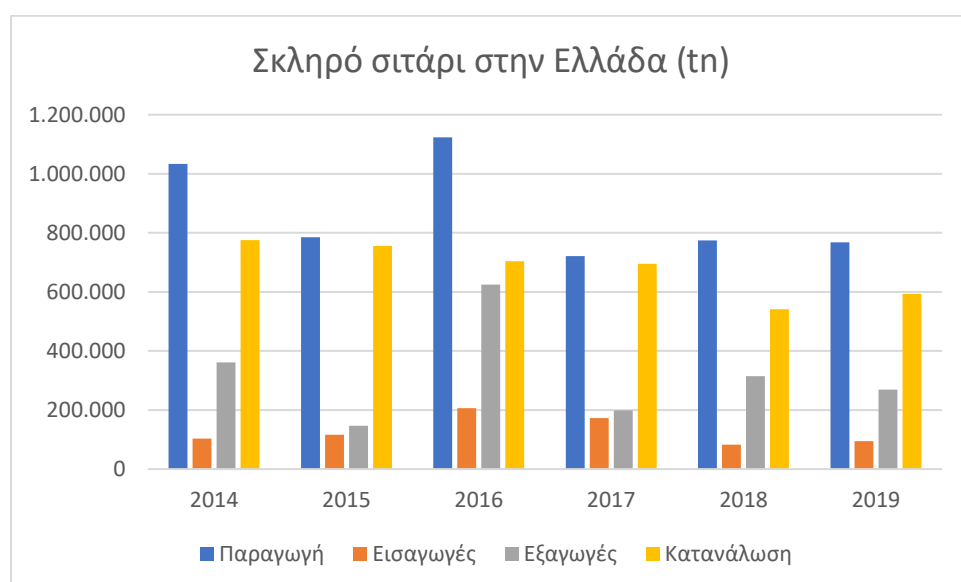
1.1.7 Το σκληρό σιτάρι στην Ελλάδα

Η συνολική παραγωγή σκληρού σιταριού στην Ελλάδα για το 2018 ανέρχεται σε 767.956 τόνους και οι καλλιεργούμενες εκτάσεις έφτασαν στα 2.948.495 στρέμματα (Υπ.Α.Α.Τ.,2019) ενώ η μέση στρεμματική απόδοση άγγιξε τα 261Kg(Ευρωπαϊκή Επιτροπή,2020).

Πίνακας 5. Καλλιεργούμενες εκτάσεις (στρ) και ύψος παραγωγής (tn) σκληρού σίτου στην Ελλάδα για τα έτη 2010-2018.

Έτος	Καλλιεργούμενη έκταση (στρ)	Παραγωγή (tn)
2010	5.067.207	1.597.692
2011	4.038.187	1.406.131
2012	4.006.641	1.090.747
2013	3.872.324	1.065.241
2014	3.539.569	1.033.710
2015	3.333.549	785.660
2016	3.881.714	1.123.200
2017	2.962.536	721.050
2018	2.948.495	774.320

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (2019) που παρουσιάζονται στον πίνακα παραπάνω, παρατηρείται τα τελευταία χρόνια μια συνεχή μείωση (με μόνη εξαίρεση το 2016) τόσο των καλλιεργήσιμων εκτάσεων όσο και της παραγωγής σκληρού σίτου στη χώρα μας.



Διάγραμμα 1. Το ύψος παραγωγής, εισαγωγών, εξαγωγών και κατανάλωσης (tn) σκληρού σιταριού στην Ελλάδα για τα έτη 2014-2019.

Πίνακας 6. Το ύψος παραγωγής, εισαγωγών, εξαγωγών και κατανάλωσης (tn) σκληρού σιταριού στην Ελλάδα για τα έτη 2014-2019.

Έτος	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Παραγωγή	1.033.710	785.660	1.123.200	721.050	774.320	767.960
Εισαγωγές	103.327	116.448	206.189	172.878	82.542	94.252
Εξαγωγές	361.459	146.661	624.970	198.956	315.216	269.026
Κατανάλωση	775.578	755.447	704.419	694.972	541.646	593.186

Η εγχώρια παραγωγή σκληρού σίτου περιορίστηκε στο διάστημα των τελευταίων ετών, κυρίως εξαιτίας δυσμενών καιρικών συνθηκών, ιδιαίτερα το 2015 (-24%) και το 2017 (36%), αλλά και λόγω της μείωσης των τιμών παραγωγού. Η εξαγωγική επίδοση, ως ποσοστό της προσφοράς, κατέγραψε απότομη πτώση το 2015 (16%), επηρεαζόμενη από τις επιπτώσεις των capital controls που επιβλήθηκαν με το μνημόνιο, ενώ η μεγάλη άνοδος των εξαγωγών του 2016 φαίνεται να ήταν συνέπεια της συσσώρευσης ανεκτέλεστων υποχρεώσεων από την προηγούμενη περίοδο. Το 2018, οι εξαγωγές σκληρού σίτου επανήλθαν σε φυσιολογικό επίπεδο, εκτιμώμενες σε 315.000 τόνους αξίας 68 εκατ. Ευρώ, με βελτίωση της εξαγωγικής επίδοσης(36,8%). Οι εξαγωγές σκληρού σίτου περιορίστηκαν το 2019 σε 270.000 τόνους, αξίας 64 εκατ. Ευρώ, αλλά η μέση τιμή εξαγωγής ανήλθε σε 237 ευρώ/τόνο, παρουσιάζοντας σημαντική άνοδο σε σχέση με το προηγούμενο έτος (+10%). Η Ιταλία εξακολουθεί να αποτελεί την κυριότερη χώρα προορισμού, καλύπτοντας το μεγαλύτερο μέρος του όγκου εξαγωγών (56%), με δεύτερη στη σειρά την Τυνησία και Τρίτη την Τουρκία (19%). Ευνοϊκές, εξάλλου, θεωρούνται οι προοπτικές εξαγωγών σκληρού σίτου της χώρας το 2020, εξαιτίας της ισχυρής ζήτησης του προϊόντος, λόγω της ανόδου της κατανάλωσης ζυμαρικών, σε συνδυασμό με την προβλεπόμενη μείωση της παραγωγής στην ΕΕ και τον περιορισμό των αποθεμάτων. Οι εξελίξεις αυτές συνέβαλαν ήδη στη σημαντική άνοδο των τιμών, ιδιαίτερα αισθητή στην Ιταλία, όπου σύμφωνα με ορισμένες εκτιμήσεις οι τιμές σκληρού σίτου πρώτης ποιότητας κυμάνθηκαν τον Μάιο από 290-304 ευρώ/τόνο, καταγράφοντας αύξηση της τάξεως του 25% σε σχέση με τον αντίστοιχο μήνα του 2019.

1.2 Θρέψη και λίπανση καλλιεργειών

Βασικός στόχος της γεωργίας είναι να αυξηθεί η παραγωγή με τη μικρότερη οικονομική επιβάρυνση στο κόστος παραγωγής. Ταυτόχρονα επιδιώκεται και η αύξηση της ποιότητας των προϊόντων χωρίς να υποβαθμίζονται οι φυσικοί πόροι. Ένα από τα μέσα που χρησιμοποιείται λοιπόν στη σύγχρονη γεωργία είναι τα λιπάσματα. Για να κατανοηθεί ο ρόλος των λιπασμάτων στην φυτική παραγωγή πρέπει να ασχοληθούμε με τη θρέψη των φυτών. Τα φυτά είναι αυτότροφοι οργανισμοί, δηλαδή έχουν την μοναδική ικανότητα να φτιάχνουν τα συστατικά τους, όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη κ.α. από ανόργανα στοιχεία όπως άζωτο, (N), κάλιο (K), σίδηρο (Fe) κ.λπ., τα οποία παίρνουν απ' ευθείας από το έδαφος και τον αέρα. Με τη βοήθεια της φωτοσύνθεσης και άλλων βιοχημικών διεργασιών που ακολουθούν, μετατρέπουν τις απλές αυτές ανόργανες ουσίες σε οργανικές ενώσεις, που έχουν μεγάλη σημασία για την ύπαρξη της ζωής στον πλανήτη μας. Η φωτοσύνθεση είναι μια βιοχημική διεργασία στην οποία λαμβάνει χώρα η πρώτη βιοχημική αντίδραση, που δεσμεύει την ηλιακή ενέργεια και την μετατρέπει σε χημική ενέργεια. Στην πρώτη αυτή βιοχημική αντίδραση δεσμεύεται το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) με νερό (H_2O) και παράγεται γλυκόζη ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) και οξυγόνο (O_2). Το φυτό χρειάζεται ηλιακή ενέργεια για να παράγει με πρώτες ύλες ανόργανες ενώσεις (CO_2 και H_2O). Εκτός από αυτές τις ανόργανες ενώσεις το φυτό χρειάζεται, για τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης και άλλων βιοχημικών διεργασιών, και άλλα ανόργανα στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία, που είναι απαραίτητα στην θρέψη του φυτού είναι γνωστά ως θρεπτικά στοιχεία ή θρεπτικά συστατικά. Τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την θρέψη των φυτών παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 7).

Πίνακας 7. Βασικά θρεπτικά στοιχεία σε φθίνουσα σειρά σημαντικότητας (Πηγή: <http://www.ggde.gr>)

Μακροστοιχεία	
Πηγή	Θρεπτικά στοιχεία
Αέρας & νερό	C
	H
	O
Έδαφος	N
	Κύρια
	P
	K
	Δευτερεύοντα
	Ca
	Mg
	S
Ιχνοστοιχεία	
	Fe
	Mn
	Cu
	Zn
	B
	Mo
	Cl

Τα φυτά προσλαμβάνουν τον άνθρακα από το CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα) που υπάρχει στην ατμόσφαιρα και δευτερευόντως στο νερό, ενώ το υδρογόνο (H) και το οξυγόνο (O) κυρίως από το νερό του εδάφους και τον αέρα. Τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία, που χρειάζονται τα φυτά, προέρχονται από τα οργανικά και ανόργανα στερεά συστατικά του εδάφους. Εξαίρεση αποτελεί σ' αυτόν τον κανόνα το άζωτο (N), το οποίο μπορεί να δεσμευθεί από ορισμένους μικροοργανισμούς, που βρίσκονται σε συμβίωση με τις ρίζες των φυτών, που ανήκουν στην οικογένεια των ψυχανθών ή διαβιούν ελεύθερα στα εδάφη. Το άζωτο (N), ο φώσφορος (P), το κάλιο (K), και το θείο (S) ονομάζονται “μακροστοιχεία” επειδή τα φυτά έχουν ανάγκη σχετικά μεγάλες ποσότητες για την ανάπτυξή τους. Ο ρόλος των μακροστοιχείων στη φυτική παραγωγή έχει μεγάλη σημασία και η επίδραση τους στην ποσοτική απόδοση των φυτών αποδεικνύεται με άπειρα παραδείγματα από την γεωργική πράξη. Η έλλειψη ή ανεπαρκής ποσότητα ενός θρεπτικού στοιχείου από την θρέψη των φυτών δημιουργεί προβλήματα στην ανάπτυξη

των φυτών, τα οποία εκφράζονται με την μείωση των αποδόσεων των φυτών. Το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg) ανήκουν επίσης στα μακροστοιχεία. Τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία ονομάζονται “ίχνοστοιχεία” επειδή το φυτό χρησιμοποιεί μικρές ποσότητες (ίχνη), ενώ υπάρχουν και μη απαραίτητα στοιχεία όπως Νάτριο, πυρίτιο, αργίλιο κ.λπ.

Η προσθήκη των διαφόρων λιπασμάτων στο έδαφος έχει ως σκοπό να τα εφοδιάζει με θρεπτικά στοιχεία για τη θρέψη των φυτών και ως εκ τούτου έχουν άμεση επίδραση στη γεωργική παραγωγή. Η επίδραση των λιπασμάτων στην απόδοση των φυτών ακολουθεί το Νόμο του ελαχίστου δηλαδή η ανάπτυξη των φυτών εξαρτάται από τη λιγότερο διαθέσιμη θρεπτική ουσία (περιοριστικός παράγοντας) αντί για τη συνολική ποσότητα των διαθέσιμων παραγόντων. Η ποσότητα των γεωργικών προϊόντων επηρεάζεται από την ποσότητα των λιπασμάτων, που χρησιμοποιούνται για να καλυφθούν οι ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία.

1.2.1 Άζωτο

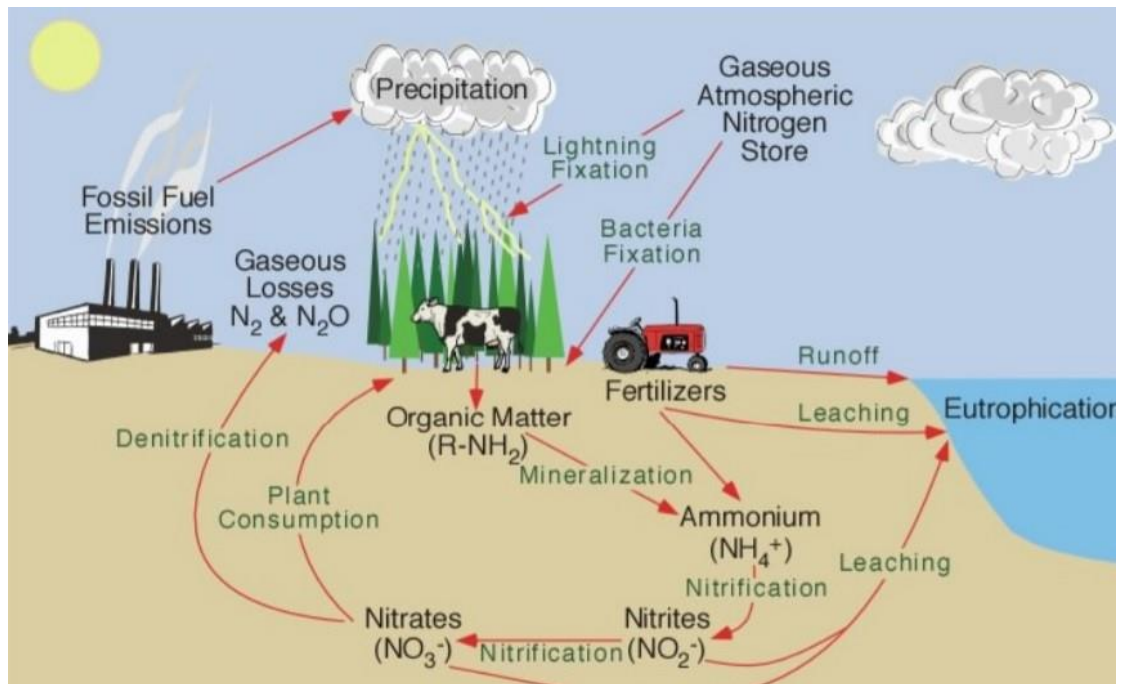
Από όλα τα στοιχεία μεταβολισμού που τα φυτά χρησιμοποιούν από το έδαφος, το άζωτο είναι αυτό που απαιτείται σε μεγαλύτερη ποσότητα. Το άζωτο υπάρχει σε οργανική και ανόργανη μορφή και το μεγαλύτερο ποσοστό του βρίσκεται σε σπόρους φύλλα και ρίζες. Η έλλειψη αζώτου σε σημαντικό βαθμό, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και της διάρκειας ανάπτυξης της φυλλικής επιφάνειας και κατά συνέπεια σε μικρότερη πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας και χαμηλότερους φωτοσυνθετικούς ρυθμούς (Fageria et al.2003). Η κατανόηση των μηχανισμών πρόσληψης και κυκλοφορίας του αζώτου στα φυτά, είναι άκρως σημαντική για την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και για την ποιότητα των αγροτικών προϊόντων. Μολονότι οι καλλιέργειες έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε άζωτο, οι ανάγκες για αζωτούχο λίπανση διαφέρουν χωρικά, διότι μέρος του αζώτου παρέχεται μέσω των βιοχημικών διεργασιών του εδάφους (Scharf, 2002, Meisinger, 2008). Η λίπανση μιας καλλιέργειας μπορεί να οδηγήσει σε κατά τόπους περίσσεια αζώτου, το οποίο είτε απορρέει στα υπόγεια ύδατα, είτε εξατμίζεται (π.χ. οξείδιο του αζώτου - αέριο που συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου). Το άζωτο είναι καθοριστικό συστατικό για την παραγωγικότητα και την ποιότητα των καλλιεργειών. Η υπολίπανση αζώτου μπορεί να επιφέρει χαμηλή παραγωγή ενώ η υπερλίπανση μπορεί να οδηγήσει σε καλή παραγωγή,

αλλά και σε ευαισθησία σε ασθένειες, συν του ότι δαπανούνται οικονομικοί πόροι χωρίς αντίκρισμα (Atkinson, 1989, Marschner, 1993).

1.2.1.1 Ο Βιογεωχημικός Κύκλος του Αζώτου (N)

Το άζωτο είναι ένα από τα βασικότερα στοιχεία στην φύση, το οποίο ελέγχει τον κύκλο του οργανικού υλικού στην βιόσφαιρα. Η συγκέντρωση και η διαθεσιμότητα των οργανικών και ανόργανων ενώσεων του αζώτου συνδέεται άμεσα με την παρουσία, ανάπτυξη και παραγωγικότητα όλων των οργανισμών σε χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα (Knicker, 2011). Παρ' όλο που το άζωτο αποτελεί το 78% κατ' όγκο της ατμόσφαιρας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από του οργανισμούς για την ικανοποίηση των αναγκών τους σε άζωτο. Σημαντικό μέρος των διεργασιών μετασχηματισμού στις διάφορες μορφές του πραγματοποιείται στο έδαφος. Έτσι ξεκινάει το πρώτο στάδιο του κύκλου του αζώτου που περιλαμβάνει τον μετασχηματισμό του αερίου αζώτου σε μία διαθέσιμη για τους μικροοργανισμούς μορφή με μία από τις παρακάτω διαδικασίες (Χατζημπίρος, 2001) :

- Η δέσμευση του αζώτου της ατμόσφαιρας (N fixation) από μικροοργανισμούς (ανήκουν στο γένος *Rhizobium spp*) που συμβιώνουν στις ρίζες των ψυχανθών (*leguminosae*) σχηματίζοντας τα φυμάτια.
- Η δέσμευση αζώτου από μη συμβιωτικούς μικροοργανισμούς που ζουν ελεύθεροι στο έδαφος και τα νερά (αερόβια βακτήρια του γένους *Clostridium* και μερικά κυανοφύκη, της οικογένειας *Nostococaceae*).
- Η μετατροπή του αζώτου σε οξείδια, από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις της ατμόσφαιρας και η μεταφορά αυτών στο έδαφος μέσω της βροχής κυρίως υπό την μορφή NO_3^- .
- Η βιομηχανική δέσμευση υπό μορφή NO_2 , CN , NH_3 , κατά την παρασκευή αζωτούχων λιπασμάτων Haber Bosch.



Εικόνα 2. Συνοπτική παρουσίαση του βιογεωχημικού κύκλου του Ν σε χερσαία οικοσυστήματα (Πηγή: <http://www.physicalgeography.net>)

Διαμορφώνεται λοιπόν ένας βιογεωχημικός κύκλος αζώτου (Εικόνα 2) στο οικοσύστημα με αμφίδρομη αλληλεπίδραση μεταξύ ατμόσφαιρας – εδάφους – οργανισμών (Ρουμπελάκη – Αγγελάκη, 2003).

Το 98% περίπου του εδαφικού αζώτου βρίσκεται ενσωματωμένο σε οργανικές ενώσεις, κυρίως υπό αμινική μορφή (NH_2). Σήμερα πολλές είναι οι μελέτες που καταδεικνύουν τόσο την άμεση δέσμευση τέτοιων ενώσεων από το φυτό (Neff et al., 2003), ως πηγή αζώτου για την θρέψη του, όσο και την έμμεση δέσμευση μέσω των μυκόρριζων που αναπτύσσουν (Finlay et al., 1992; Turnbull et al., 1995). Το ανόργανο άζωτο αποτελεί περίπου το 2% του εδαφικού αζώτου. Οι κυριότερες ανόργανες μορφές είναι η αμμωνιακή (NH_4^+), η νιτρική (NO_3^-) και υπό ορισμένες συνθήκες η νιτρώδης (NO_2^-) μορφή. Οι κυριότερες διεργασίες που καθορίζουν την κατάσταση και τη διαθεσιμότητα του αζώτου στο έδαφος συνοψίζονται στις παρακάτω:

1. Ανοργανοποίηση (Mineralization)
2. Ακινητοποίηση (Immobilization)
3. Νιτροποίηση (Nitrification)
4. Απονιτροποίηση (Denitrification)
5. Εξαέρωση (Volatilization)
6. Προσρόφηση (Sorption)

1.2.1.2 Διεργασίες που καθορίζουν την κατάσταση του αζώτου στο έδαφος

Η απεριόριστη προμήθεια ατμοσφαιρικού αζώτου βρίσκεται σε ισορροπία με τις διάφορες δεσμευμένες μορφές του εδάφους. Τα μόρια του αζώτου δεσμεύονται, με τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω ενώ επίσης τα λιπάσματα και η αποδόμηση οργανικού υλικού μέσω διεργασιών ελεγχόμενων κυρίως από μικροοργανισμούς απελευθερώνουν άζωτο στην ατμόσφαιρα. Ο κύκλος του αζώτου στο σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα περιλαμβάνει πολλές μετατροπές αυτού μεταξύ ανόργανης και οργανικής μορφής. Εκτός της δέσμευσης από την βιομηχανία και την καύση, όλες οι μετατροπές του αζώτου συντελούνται φυσικά. Παρόλα αυτά ο ανθρώπινος παράγοντας μπορεί να επηρεάσει πολλές από αυτές τις διαδικασίες μέσω δραστηριοτήτων διαχείρισης εδαφών και καλλιεργειών. Η τύχη των θρεπτικών στοιχείων, και ειδικότερα του αζώτου, είναι ιδιαίτερης σημασίας λόγω των περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων που έχουν οι διάφορες μορφές του στα επιφανειακά και υπόγεια νερά αλλά και της παραγωγής N_xO που συνδέονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

1. Ανοργανοποίηση/Ακίνητοποίηση

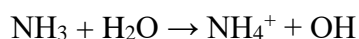
Κεντρικό στοιχείο στις ροές και τη διαθεσιμότητα των ευκίνητων μορφών αζώτου στο έδαφος είναι η ισορροπία μεταξύ δύο βιοχημικής φύσεως διεργασιών, της ανοργανοποίησης και ακίνητοποίησης (Šimek et al., 2001). Οι διεργασίες αυτές συνδέονται με τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών που αποτελούν την ετεροτροφική βιομάζα του εδάφους (Αναλογίδης, 2000). Η ανοργανοποίηση αναφέρεται στην απελευθέρωση NH_4^+ ή NH_3 μέσω μιας σειράς ενζυματικών αντιδράσεων οξειδωτικής διάσπασης της οργανικής ουσίας του εδάφους (αμινοποίηση, αμμωνιοποίηση) από έναν μεγάλο αριθμό μη εξειδικευμένων μικροοργανισμών, ενώ η ακίνητοποίηση περιλαμβάνει την αφομοίωση και ενσωμάτωση των ανόργανων μορφών αζώτου σε οργανικά συστατικά της ετεροτροφικής βιομάζας.

Είναι επόμενο λοιπόν ότι το ποσό του διαθέσιμου ανόργανου αζώτου για τα φυτά εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ των ρυθμών των δύο αυτών αντίθετων διεργασιών. Τι είναι όμως αυτό που ελέγχει την ισορροπία μεταξύ ανοργανοποίησης και ακίνητοποίησης; Η απάντηση βρίσκεται στην ποιότητα του οργανικού υλικού και ιδιαίτερα στον διαθέσιμο C σε σχέση με το διαθέσιμο N, δηλαδή στον λόγο C:N. (Hodge et al., 2000). Σαν γενικός κανόνας όταν αυτός ο λόγος παίρνει τιμές > 25:1 οι μικροοργανισμοί ακίνητοποιούν το άζωτο και σαν αποτέλεσμα μειώνεται το ποσό που

είναι διαθέσιμο για την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Αντίθετα, όταν ο λόγος παίρνει τιμές < 25:1 τότε ανόργανες μορφές αζώτου ελευθερώνονται και μπορούν να συσσωρευτούν στο έδαφος.

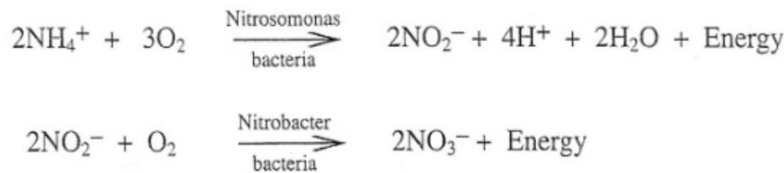
Εξαιρέση σε αυτόν τον κανόνα αποτελούν υποστρώματα, όπως ο χούμος ή η κομπόστα, όπου περιέχουν σύνθετα οργανικά μόρια τα οποία δύσκολα αποσυντίθεται με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ανοργανοποίηση του αζώτου (Robertson & Groffman, 2007). Στην πραγματικότητα η πρόβλεψη της συγκέντρωσης του ανόργανου αζώτου στο έδαφος είναι αρκετά δύσκολη διότι εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Εκτός από την ετερογένεια στη σύσταση των μικροοργανισμών του εδάφους και στην κατανομή της οργανικής ουσίας στο έδαφος, η ανοργανοποίηση επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως είναι η υφή και δομή εδάφους, η θερμοκρασία, η υγρασία, η διαθεσιμότητα O₂, η συγκέντρωση CO₂ (Šimek M and Cooper E. J. 2001). Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη του αζώτου που θα ελευθερωθεί και θα είναι τελικά διαθέσιμο για πρόσληψη από τα φυτά. Αν και η ακινητοποίηση του αζώτου θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια ανεπιθύμητη διαδικασία η οποία καθιστά το άζωτο προσωρινά μη διαθέσιμο για τα φυτά, η συμμετοχή της στη δυναμική του αζώτου στο έδαφος είναι σημαντική, καθώς συμβάλλει στη συγκράτηση του ευκίνητου αυτού θρεπτικού στοιχείου στο έδαφος, περιορίζοντας έτσι τη διαφυγή του προς την ατμόσφαιρα και τους υδάτινους αποδέκτες (Αναλογίδης, 2000)

Η ανοργανοποίηση του αζώτου στο έδαφος αποτελεί μια από τις βασικές διεργασίες με την οποία αυξάνεται το ποσό του αζώτου που είναι διαθέσιμο στα φυτά. Όταν η νεκρή οργανική ύλη είναι πλούσια σε άζωτο τότε οι ανάγκες των μικροοργανισμών για άζωτο καλύπτονται και πραγματοποιείται ανοργανοποίηση. Όταν όμως έχουμε νεκρή οργανική ύλη φτωχή σε άζωτο τότε οι μικροοργανισμοί το ενσωματώνουν σε οργανικά μόρια για την ικανοποίηση των αναγκών τους. Αυτό το στάδιο της αμμωνιοποίησης σχηματικά έχει ως εξής:



2. Νιτροποίηση

Νιτροποίηση είναι η διαδικασία βιολογικής οξείδωσης κατά την οποία η αμμωνία (NH₃) και η ιονισμένη της μορφή, το αμμώνιο (NH₄⁺), μετατρέπονται με τη βοήθεια αυτότροφων αλλά και ετερότροφων αερόβιων μικροοργανισμών του εδάφους σε νιτρικά ανιόντα (NO₃⁻) (Singh and Verna, 2007; Braker and Conrad, 2011).



Η νιτροποίηση λαμβάνει χώρα σε όλα τα εδάφη, όπου υπάρχει ως υπόστρωμα το NH_4^+ και οι συνθήκες υγρασίας, αερισμού και pH είναι ευνοϊκές. Το άθροισμα των ιόντων NH_4^+ και NO_3^- αποτελεί την ολική ποσότητα του ανόργανου αζώτου στα γεωργικά εδάφη, με σημαντική υπεροχή του NO_3^- , εκτός αν επικρατούν συνθήκες που παρεμποδίζουν τη νιτροποίηση, η συνηθέστερη των οποίων είναι το όξινο pH (Αναλογίδης, 2000). Αν και η νιτροποίηση είναι μία αβλαβής διεργασία για τα φυσικά οικοσυστήματα με μικρές εισροές αζώτου, η συμβολή της στις απώλειες αζώτου από τα γεωργικά εδάφη είναι σημαντική. Ο όγκος του αζώτου που χάνεται μέσω της διήθησης και της απονιτροποίησης των NO_3^- είναι αποτέλεσμα της νιτροποίησης, η οποία πρέπει να αναγνωριστεί ως η κύρια αιτία ρύπανσης των αγροσυστημάτων και η κύρια αιτία μικρής ικανότητας αξιοποίησης του αζώτου στις καλλιέργειες (Šimek et al., 2001). Στην πλειονότητα των γεωργικών εδαφών, η NH_3 μετατρέπεται ταχέως σε NO_3^- -N, το οποίο μπορεί να συσσωρευτεί στο εδαφικό διάλυμα σε υψηλές συγκεντρώσεις (Godde και Conrad, 2000). Επιπλέον, σε εδάφη που λιπαίνονται συστηματικά, η νιτροποίηση μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της γονιμότητας των εδαφών σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα με την πάροδο των ετών, μέσω της παραγωγής H^+ κατά την οξείδωση NH_4^+ (μείωση του pH).

Μέρος του νιτρικού αζώτου που παράγεται από τη νιτροποίηση ή προστίθεται στο έδαφος με τα ανόργανα λιπάσματα χάνεται στην ατμόσφαιρα μέσω της απονιτροποίησης, δηλαδή της αναγωγής του NO_3^- μέσω χημικών ή βιολογικών μηχανισμών, υπό συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας O_2 .

Νιτροποίηση από αυτότροφους μικροοργανισμούς

Η διεργασία της νιτροποίησης που πραγματοποιείται από αυτότροφους μικροοργανισμούς διεξάγεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο έχουμε την οξείδωση της NH_4^+ σε NO_2^- , η οποία καταλύεται από αμμωνι-οξειδωτικά βακτήρια (AOB) των γενών *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* και *Nitrosospira*. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η οξείδωση των NO_2^- σε NO_3^- που καταλύεται από νιτρο-οξειδωτικά βακτήρια (NOB) του γένους *Nitrobacter*. Το βασικό λειτουργικό ένζυμο για το πρώτο στάδιο της νιτροποίησης είναι η μονο-οξυγενάση της αμμωνίας (AMO). Η AMO είναι ένζυμο το

οποίο βρίσκεται στην κυτταροπλασματική μεμβράνη των χημειοαυτότροφων αερόβιων βακτηρίων που δρουν στο πρώτο στάδιο της νιτροποίησης. Στην αντίδραση στην οποία λαμβάνει μέρος το ένζυμο της AMO κατά τη νιτροποίηση ένα άτομο O_2 αντιδρά με την NH_4^+ σχηματίζοντας υδροξυλαμίνη (NH_2OH) (Irigoyen et al 2003). Το άλλο άτομο O_2 ανάγεται σχηματίζοντας H_2O . Έχει βρεθεί ότι πάνω από 60 ενώσεις μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία της AMO. Πρόσφατα, ωστόσο ανακαλύφθηκε πως τα βακτήρια δεν είναι οι μόνοι μικροοργανισμοί που πραγματοποιούν οξείδωση της NH_3 σε NO_2^- αλλά σε αυτή εμπλέκονται και μικροοργανισμοί του φύλου των *Thaumarchaeota* της Τάξης των Αρχαίων που έχουν βρεθεί σε χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα (Konneke et al. 2005; Treusch et al. 2005). Τα είδη αυτά επίσης διαθέτουν το ένζυμο της AMO, ωστόσο ο πλήρης μηχανισμός της οξείδωσης της NH_3 δεν έχει ακόμη αποσαφηνιστεί (Kim et al., 2011; Blainey et al, 2011). Όπως αναφέρει ο McCarty (1999) τα υποστρώματα ανάλογα με τη φύση τους μπορεί να έχουν ανταγωνιστική ή μη ανταγωνιστική δράση με την NH_3 . Η σύνδεση και η οξείδωση των υποστρωμάτων με ανταγωνιστική δράση πραγματοποιείται στο ενεργό μέρος του ενζύμου, στο σημείο ακριβώς που πραγματοποιείται η οξείδωση της NH_3 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναστολή της νιτροποίησης. Αντίθετα η σύνδεση των μη ανταγωνιστικών υποστρωμάτων πραγματοποιείται σε σημείο του ενζύμου της AMO διαφορετικό από το σημείο οξείδωσης της NH_3 . Σ' αυτή την περίπτωση η νιτροποίηση πραγματοποιείται με χαμηλούς ρυθμούς.

Κάποιες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί παρουσιάζουν μια εμφανή υπεροχή του πληθυσμού των AOA σε σχέση με τα AOB, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως στοιχείο ενός ίσως πιο αναβαθμισμένου ρόλου των AOA στην νιτροποίηση. Μια τέτοια υπόθεση όμως χρειάζεται ακόμα περισσότερη έρευνα, σε γονιδιακό και λειτουργικό επίπεδο ώστε να αποδειχθεί ότι η πληθυσμιακή υπεροχή συμβαδίζει με λειτουργική υπεροχή στην νιτροποίηση (Prosser et al., 2008). Ενδιάμεσα προϊόντα που παράγονται κατά το πρώτο στάδιο της νιτροποίησης μπορεί να δώσουν αέριες ενώσεις του N της γενικής μορφής N_xO , οι οποίες ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και αποτελούν αέριες ενώσεις του φαινομένου του θερμοκηπίου (Martikainen, 1985; Lipschultz et al., 1981).

Νιτροποίηση από ετερότροφους μικροοργανισμούς

Αρκετά γένη ετερότροφων βακτηρίων και μυκήτων έχουν την ικανότητα να οξειδώνουν την NH_3 είτε από οργανικά μόρια είτε από ανόργανα. Οι μικροοργανισμοί αυτοί οξειδώνουν την NH_3 ή μετατρέπουν το άζωτο οργανικών μορίων σε NH_2OH με τη βοήθεια του AMO. Στη συνέχεια η υδροξυλαμίνη οξειδώνεται σε νιτρώδη, αντίδραση η οποία ελέγχεται από το ένζυμο οξειδοαναγωγή της υδροξυλαμίνης (HAO). Από την οξείδωση αυτή απελευθερώνονται 4 ηλεκτρόνια, 2 από τα οποία επιστρέφουν στην AMO για τη συνέχιση της οξείδωσης της NH_3 . Τα υπόλοιπα 2 ηλεκτρόνια ικανοποιούν τις αναγωγικές ανάγκες του κυττάρου. Γίνεται φανερό ότι για τη συνέχιση της λειτουργίας της AMO είναι απαραίτητη η συνοξείδωση του προϊόντος της αντίδρασης που καταλύει. Το γεγονός αυτό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κινητική των αντιδράσεων όταν το υπόστρωμα δεν είναι η NH_3 (Subbarao et al. 2006). Σε σύγκριση με την αυτοτροφική νιτροποίηση, στην ετεροτροφική νιτροποίηση η οξείδωση της NH_3 δεν πραγματοποιείται για την διατήρηση της ενέργειας καθώς επίσης σε αυτήν εμπλέκονται διαφορετικά ένζυμα από αυτά των αυτότροφων νιτροποιητών.

Οι ρυθμοί νιτροποίησης των ετερότροφων νιτροποιητών είναι σημαντικά χαμηλότεροι από των αυτότροφων (Braker and Conrad, 2011). Στα όξινα δασικά εδάφη η νιτροποίηση από ετερότροφους μικροοργανισμούς αποτελεί το κυρίαρχο μονοπάτι νιτροποίησης (Cai et al., 2010).

Περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την νιτροποίηση

Η διεργασία της νιτροποίησης μπορεί να περιοριστεί από τη διαθεσιμότητα του υποστρώματος εκείνου που αποτελεί πηγή ενέργειας (NH_4^+ και NO_2^-). Το υπόστρωμα, ο αερισμός, υγρασία, η θερμοκρασία, το pH ασκούν σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη και ενεργότητα των νιτροποιητών και το λόγο αυτό γίνεται μια μικρή ανάλυση σε καθ' ένα από τους παράγοντες αμέσως μετά.

Υπόστρωμα

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την νιτροποίηση στην πλειοψηφία των εδαφών είναι η συγκέντρωση του υποστρώματος (NH_3). Πιο συγκεκριμένα οι De Boer et al, (1992) και Stark and Hart, (1997) ανέφεραν ότι οι ιδιότητες και η διαθεσιμότητα του υποστρώματος είναι πιο σημαντικές και από το εδαφικό pH κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης. Ο ρυθμός νιτροποίησης στα γεωργικά εδάφη είναι ταχύς

και υπερκαλύπτει τον ρυθμό πρόσληψης NO_3^- από τα φυτά υπό την προϋπόθεση επαρκούς αζωτούχου υποστρώματος. Τα αποθέματα NH_3 τα οποία χρειάζονται σαν υπόστρωμα για τη διαδικασία της νιτροποίησης μπορεί να υπάρχουν στο έδαφος είτε από προσθήκη αμμωνιακών λιπασμάτων, είτε από τη διαδικασία ανοργανοποίησης του οργανικού αζώτου (Αναλογίδης, 2000). Αύξηση λοιπόν της συγκέντρωσης της NH_3 συνοδεύεται με αντίστοιχη αύξηση του ρυθμού νιτροποίησης. Ένα επιπλέον θέμα είναι ανταγωνιστικότητα ανάμεσα στα διαθέσιμα υποστρώματα κάτι το οποίο δίνει τη δυνατότητα στους μικροοργανισμούς να χρησιμοποιήσουν το υπόστρωμα το οποίο ανοργανοποιείται πιο εύκολα. Το χώμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε περιείχε υψηλά ποσοστά αργίλου και πρέπει να αναφερθεί ότι τα κατιόντα του NH_4^+ προσροφόνται από τα αργιλικά ορυκτά. Οι νιτροποιητικοί μικροοργανισμοί είναι ευαίσθητοι σε ένα μεγάλο εύρος από οργανικές και ανόργανες ενώσεις και για συγκεντρώσεις αρκετά χαμηλότερες από αυτές που επιδρούν σε ετερότροφους οργανισμούς. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις μπορεί να προκληθεί και θάνατος των αυτότροφων νιτροποιητικών μικροοργανισμών, ενώ παρατηρούνται και διαφορές στην σύνθεση από τα Αρχαιοβακτήρια. Στις ενώσεις οι οποίες μπορεί να είναι τοξικές περιλαμβάνονται οργανικοί διαλύτες, αμίνες, πρωτεΐνες, φαινολικές ενώσεις, αλκοόλες, αιθέρες, κυανίδια (Prosser, 2011).

Επίδραση του αερισμού

Το διαθέσιμο οξυγόνο αποτελεί επίσης παράγοντα που καθορίζει την νιτροποίηση καθώς, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι νιτροποιητές είναι αερόβιοι μικροοργανισμοί. Η παρουσία του O_2 είναι απολύτως απαραίτητη για την ανάπτυξη τόσο των *Nitrosomonas* όσο και των *Nitrobacter*. Η μικρότερη συγκέντρωση διαλυμένου O_2 πρέπει να είναι 0.3mg/lt ώστε να συντηρείται η διεργασία της νιτροποίησης.

Συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου 1.0 mg/lt και πάνω θεωρείται ικανοποιητική στο νερό για τα *Nitrosomonas* και από 2.0 mg/lt και πάνω για τα *Nitrobacter*. Επειδή δε, η διάλυση O_2 στο νερό, εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία, ο συνδυασμός ανόδου θερμοκρασίας και οξυγόνωσης πρέπει να είναι ανάλογος.

Επίδραση της εδαφικής υγρασίας

Επειδή η υγρασία επηρεάζει τον αερισμό του εδαφικού συστήματος, η διαθέσιμη εδαφική υγρασία επηρεάζει τον ρυθμό παραγωγής του NO_3^- . Βέβαια η ύπαρξη και συνέχιση της ζωής των μικροοργανισμών του εδάφους δυσχεραίνεται από την έλλειψη νερού. Ο ρυθμός νιτροποίησης επιβραδύνεται όταν η υγρασία είναι υπερβολική, ή αντίθετα πολύ χαμηλή. Είναι ευρέως γνωστό ότι αναστολή της μικροβιακής δραστηριότητας συμβαίνει όταν οι τιμές της εδαφικής υγρασίας πέσουν κάτω από 30-35%. (Sentiford,1995). Αυτό το επιβεβαιώνουν και οι Breurer et al., (2002), δηλώνοντας ότι η υγρασία μπορεί να αναχαιτίσει τη διαδικασία της νιτροποίησης. Οι Zaman et al. (1999) βρήκαν ότι το βέλτιστο υδατικό δυναμικό του εδάφους προκρινόμενου να μετρηθούν ποσοστά νιτροποίησης ήταν 10 kPa.

Επίδραση της θερμοκρασίας

Ακολούθως και η θερμοκρασία επηρεάζει και συγκεκριμένα αύξηση της οδηγεί σε αύξηση της διαδικασίας της νιτροποίησης. Η βέλτιστη θερμοκρασία για νιτροποίηση βρίσκεται στο εύρος 25-35 °C τόσο για είδη του γένους *Nitrosomonas* (βακτήρια κυρίως για την οξείδωση NH_3) όσο και για τα *Nitrobacter* (βακτήρια κυρίως για την οξείδωση νιτωδών), ενώ δεν παρατηρείται δραστηριότητα σε θερμοκρασία μικρότερη από 5 °C ή υψηλότερη από 35 °C για τα *Nitrosomonas* και κάτω από 5 °C ή πάνω από 40 °C για τα *Nitrobacter*. Ο ρυθμός ανάπτυξης σχεδόν διπλασιάζεται για κάθε αύξηση θερμοκρασίας 10 °C, αλλά πέρα από τους 30 °C ξαφνικά μειώνεται. Στους 38 °C είναι ίδιος με τους 5 °C, ενώ στους 49 °C τα νιτροποιητικά βακτήρια πεθαίνουν. Η ανάπτυξη μειώνεται κατά 50% στους 18 °C, κατά 75% στους 8-10 °C, ενώ δεν υπάρχει καθόλου δραστηριότητα στους 4 °C, και τα νιτροποιητικά βακτηρία τελικά πεθαίνουν στους 0 °C. Οι μικροοργανισμοί αυτοί γενικότερα είναι ανθεκτικοί στις μικρές θερμοκρασίες, αλλά σε υψηλές θερμοκρασίες η ενεργητικότητα τους μειώνεται γιατί αποτελούνται από πρωτεΐνες.

Επίδραση του pH

Το pH του εδάφους είναι ένας καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει τις διεργασίες που γίνονται στο έδαφος. Οι επιδράσεις του στην σύνθεση και τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών έχουν μελετηθεί εντατικά (Kemmitt et al., 2006; Högberg et al., 2007a; Rousk et al., 2009). Είναι γενικά αποδεκτό ότι η αύξηση pH αυξάνει τον ρυθμό νιτροποίησης, ενώ τυχόν μείωση του pH καταστέλλει τη

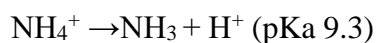
νιτροποίηση (Robertson, 1982; Tietema et al., 1992). Συνεπώς χαμηλά ποσοστά νιτροποίησης μπορούν να αποδοθούν και στο pH και όχι απαραίτητα στη διαθεσιμότητα υποστρώματος. Πιο συγκεκριμένα η νιτροποίηση λαμβάνει χώρα σε ένα ευρύ φάσμα pH (7 – 9,5), παρόλο που το βέλτιστο είναι το 8.5. Οι Wild et al. (1971) έδειξαν ότι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός νιτροποίησης σε pH 7.0 ήταν 50% του αντίστοιχου ρυθμού σε pH 8.0, με σχετικά γραμμική σχέση για τις ενδιάμεσες τιμές. Οι Engle και Alexander et al. (1958) παρατήρησαν μικρή μεταβολή του ρυθμού νιτροποίησης για τιμές του pH μεταξύ 7.2 και 8.0 και γραμμική μείωση του ρυθμού για τιμές κάτω από 7.2. Ενώ οι Hankinson and Schmidt (1988) έδειξαν ότι η ανάπτυξη και η ενεργότητα των νιτροποιητικών μικροοργανισμών μειώνεται δραματικά για τιμές του pH κάτω του ουδέτερου.

3. Απονιτροποίηση

Ένα μεγάλο εύρος, κυρίως ετερότροφων βακτηρίων κατέχουν μεταβολικά μονοπάτια που εμπλέκονται στην απονιτροποίηση η οποία πραγματοποιείται μόνο κάτω από συνθήκες έλλειψης O₂. Στα εδάφη η απονιτροποίηση παρατηρείται συνήθως μετά από βροχοπτώσεις, όπου οι εδαφικοί πόροι έχουν κορεστεί από νερό και το διαθέσιμο O₂ μειώνεται. Τυπικά η απονιτροποίηση ξεκινά όταν το 60% και πάνω των εδαφικών πόρων έχει πληρωθεί με νερό και συνεισφέρει σημαντικά στην παραγωγή και ελευθέρωση N₂O στην ατμόσφαιρα (Robertson & Groffman, 2007).

4. Εξάτμιση NH₃

Η ελευθέρωση NH₃ συνεισφέρει στην απώλεια αζώτου από το έδαφος που πραγματοποιείται με φυσικό τρόπο. Η αεριοποίηση της NH₃ εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα NH₃ και του NH₄⁺ στο έδαφος. Ακόμα εξαρτάται από το pH του εδάφους.



Μεγάλες ποσότητες NH₃ εμφανίζονται σε pH > 8.5, συνεπώς οι απώλειες της NH₃ ευνοούνται από υψηλές τιμές pH ή από αντιδράσεις που περιστασιακά το αυξάνουν. Αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 45 °C και συνθήκες υψηλής περιεκτικότητας υγρασίας στο έδαφος ευνοούν την αεριοποίηση (Tisdale et al, 1993).

1.2.1.3 Ο ρόλος του αζώτου στο φυτό

Το άζωτο αποτελεί τον πιο περιοριστικό παράγοντα στο σύνολο της αγροτικής παραγωγής ανά τον κόσμο. Οι Alessi και Power (1973) αναφέρουν πως υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ λίπανσης, ποικιλίας και περιβάλλοντος που οδηγεί στην διαφοροποίηση της απόδοσης σε καρπό και της ποιότητας του σπόρου. Η αζωτούχος λίπανση είναι συνάρτηση των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής και κυρίως της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας. Όσο αυξάνεται η υγρασία του εδάφους, τόσο περισσότερο άζωτο αξιοποιείται από τα φυτά.

Το άζωτο, αν και επηρεάζει διάφορες διεργασίες εντός του φυτού, συμβάλλει στην αύξηση του φυτού κυρίως μέσω της φωτοσύνθεσης. Η περιεκτικότητα των φύλλων σε χλωροφύλλη σχετίζεται θετικά με την φωτοσυνθετική ικανότητα του φυτού και βασικό δομικό στοιχείο της χλωροφύλλης είναι το άζωτο.

Η έλλειψη αζώτου σε σημαντικό βαθμό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και της διάρκειας ανάπτυξης της φυλλικής επιφάνειας και κατά συνέπεια σε μικρότερη πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας και χαμηλότερους φωτοσυνθετικούς ρυθμούς (Fageria et al.,2003). Επάρκεια αζώτου στο σιτάρι, αυξάνει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, το αδελφωμα, το φύλλωμα, το ύψος του βλαστού, την επιμήκυνση των μεσογονατίων διαστημάτων και το μέγεθος του στάχους (Παπακώστα,2008) καθώς επίσης και τον αριθμό των κόκκων ανά στάχυ, τον δείκτη συγκομιδής και την απόδοση σε καρπό. Υπερβολικές ποσότητες αζώτου, ευνοούν την ανάπτυξη του φυλλώματος και του βλαστού, προκαλούν πλάγιασμα και οψιμίζουν την καλλιέργεια (Καραμάνος, 1987). Η εισαγωγή στην καλλιέργεια νέων ποικιλιών με αυξημένη αντοχή στο πλάγιασμα, επέτρεψε τη χορήγηση μεγαλύτερων δόσεων αζώτου και συνέβαλε στην αύξηση των αποδόσεων (Dubetz & Wells,1968).

Τα αδέρφια πριν το γηρασμό τους μεταφέρουν αζωτούχες και άλλες οργανικές ουσίες στους βλαστούς που θα επιζήσουν (Lupton και Pinthus 1969, Rawson και Donald 1969). Το στέλεχος χρησιμεύει ως προσωρινή δεξαμενή υδατανθράκων και αζωτούχων ουσιών που κατόπιν ανακατανέμονται στους κόκκους κατά την περίοδο του γεμίσματος του κόκκου. Η συμμετοχή των προϊόντων αυτών στο γέμισμα του κόκκου είναι ιδιαίτερα υψηλή και φτάνει στο 50% κάτω από συνθήκες ξηρασίας (Austin et al.,1980). Παρά το γεγονός ότι παρατηρείται σημαντική μετακίνηση αζώτου από βλαστικά όργανα προς τους στάχεις κατά το γέμισμα των κόκκων, περίσσεια αζώτου στο έδαφος κατά την ίδια περίοδο αυξάνει αρκετά την περιεκτικότητα των καρπών σε πρωτεΐνη. Η περιεκτικότητα των καρπών σε ολικό άζωτο αυξάνει συνεχώς μέχρι τη φυσιολογική ωρίμανση. Από τις

διάφορες αζωτούχες ουσίες, ταχύτερα συσσωρεύονται η χορδεΐνη και η γλουτελίνη (Καραμάνος, 1987).

1.2.1.4 Η κατανομή και η μετακίνηση αζώτου στα φυτά

Το άζωτο, ως μακροστοιχείο, απαιτείται σε συγκριτικά μεγάλες ποσότητες από τα φυτά προκειμένου να ολοκληρώσουν τον βιολογικό τους κύκλο. Το 1-5% της ξηρής μάζας των φυτών αποτελείται από άζωτο, το οποίο αποτελεί βασικό συστατικό πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων, της χλωροφύλλης, ορισμένων συνενζύμων, των φυτο-ορμονών και δευτερογενών μεταβολιτών. Το μεγαλύτερο μέρος του αζώτου των φυτικών ιστών βρίσκεται ενσωματωμένο στις πρωτεΐνες, καταλαμβάνοντας το 85% του ολικού αζώτου. Τα νουκλεϊκά οξέα περιλαμβάνουν το 5% του ολικού αζώτου, ενώ ορισμένες υδατοδιαλυτές, χαμηλού μοριακού βάρους, οργανικές ενώσεις διαφόρων τάξεων το 5-10%.

Στα σιτηρά η βασική πηγή αζώτου για τον καρπό είναι το άζωτο που ανακατανέμεται από τα βλαστικά μέρη (Simpson et al., 1983). Η ποσότητα αυτού του αζώτου εξαρτάται από την ικανότητα ανακατανομής του αζώτου και από το ποσό που είναι διαθέσιμο, δηλαδή από τη σχέση πηγής-δεξαμενής. Ως δυναμικότητα πηγής κατά την περίοδο γεμίσματος του κόκκου, ορίζεται η ικανότητα του φυτού να προμηθεύει μεταβολίτες τους αναπτυσσόμενους κόκκους και ως δυναμικότητα δεξαμενής ορίζεται η δυναμική των κόκκων να αποθηκεύουν μεταβολίτες. Η προμήθεια με άζωτο είναι καθοριστικός παράγοντας του μεταβολισμού και η επίδρασή του στην οργανογένεση του σιταριού έχει τεκμηριωθεί βάσει ερευνών.

Το 60-92% του αζώτου που συσσωρεύεται στους κόκκους κατά την ωρίμανση, προέρχεται από την ανακατομή του αζώτου στο φυτό (Spiertz and de Vos 1983, Cox et al. 1985). Σε κάποιες περιπτώσεις το ολικό άζωτο που περιέχεται στο φυτό κατά την άνθηση μπορεί να είναι μέχρι και 90-100% του ολικού αζώτου κατά την ωρίμανση (Loffler et al., 1985). Το ποσό του αζώτου που είναι αποθηκευμένο στα βλαστικά όργανα του φυτού κατά την άνθηση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί το ποσό του αζώτου που είναι διαθέσιμο για ανακατανομή (Cox et al., 1986). Το ποσό του αζώτου που είναι αποθηκευμένο εξαρτάται από το επίπεδο του εδαφικού αζώτου, από το επίπεδο της αζωτούχου λίπανσης, τις συνθήκες ανάπτυξης κατά τη διάρκεια της περιόδου πριν την άνθηση και από το γένος (Cox et al., 1985).

Οι Boatwright και Haas (1961) αναφέρουν ότι μέχρι το ξεστάχασμα το μεγαλύτερο μέρος της ξηρής ουσίας έχει συσσωρευτεί και το περισσότερο άζωτο έχει

προσληφθεί από τα σιτηρά που καλλιεργούνται σε μεσογειακό κλίμα επειδή ο καιρός μετά την άνθηση είναι συνήθως ζεστός και ξηρός και έτσι η φωτοσύνθεση περιορίζεται. Συνεπώς, η απόδοση εξαρτάται κυρίως από τη μετακίνηση των προϊόντων φωτοσύνθεσης που είχαν σχηματιστεί πριν την άνθηση στους σπόρους. Η ικανότητα ανακατανομής του αζώτου εξαρτάται από τις συνθήκες ανάπτυξης κατά την περίοδο γεμίσματος του κόκκου και από το γενότυπο.

Οι Palta et al. (1994) έδειξαν ότι η ικανότητα ανακατανομής του αζώτου ήταν μεγάλη σε μεσογειακά περιβάλλοντα στα οποία τα φυτά υποφέρουν από υδατική καταπόνηση κατά τη διάρκεια του γεμίσματος του κόκκου. Αύξηση θερμοκρασίας μεταξύ 15-22 °C μείωσε την περίοδο ζωής του φυλλώματος (Spiertz,1977) και επιτάχυνε την μεταφορά του αζώτου από τους βλαστικούς ιστούς στο σιτάρι (Vos,1981). Οι Cox et al. (1986) έδειξαν ότι υψηλότερα επίπεδα αζωτούχου λίπανσης πριν την άνθηση οδηγούν σε μικρότερη ικανότητα μετακίνησης του αζώτου, καθώς η διαθεσιμότητα μεγαλύτερων ποσών αζώτου καθιστά τη μετακίνησή του μη απαραίτητη, ενώ στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Perez et al. (1983). Ο Halloran (1981) αναφέρει μείωση στην ικανότητα μετακίνησης του αζώτου όταν επικρατούν μη ευνοϊκές συνθήκες για την πρόσληψη αζώτου πριν την άνθηση, που συνδέονται με ξηρασία ή υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, οι ασθένειες του φυλλώματος μειώνουν τη μετακίνηση του αζώτου από τα βλαστικά μέρη του φυτού προς τους σπόρους κατά τη διάρκεια γεμίσματος του κόκκου (Dimmock και Gooding, 2002). Ακόμη, η ικανότητα μετακίνησης του αζώτου εξαρτάται και από το γενότυπο (Cox et al.,1986).

1.2.1.5 Πρόσληψη και μεταφορά νιτρικών ιόντων εντός του φυτικού σώματος

Πρόσληψη νιτρικών από τη ρίζα

Η πρόσληψη των νιτρικών ιόντων σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα τους στο εδαφικό διάλυμα και το ρυθμό διαπνοής. Αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει πολλαπλά σημεία ελέγχου και ρύθμισης λόγω της εκλεκτικότητας των μηχανισμών πρόσληψης. Στην πρόσληψη των νιτρικών ιόντων από τη ρίζα των ανώτερων φυτών εμπλέκονται δύο τύποι πρωτεϊνών-μεταφορέων. Οι μεταφορείς αυτοί κωδικοποιούνται από τις οικογένειες γονιδίων NRT1 και NRT2 και εδράζονται στην πλασματική μεμβράνη των επιδερμικών κυττάρων και των κυττάρων του φλοιώδους παρεγχύματος. Οι πρωτεΐνες NRT1 εμφανίζουν χαμηλή συγγένεια για τα νιτρικά ιόντα και λειτουργούν όταν οι συγκεντρώσεις των τελευταίων στο εξωτερικό διάλυμα είναι υψηλότερες των 0,5 mM, ενώ αντίστοιχα οι NRT2 παρουσιάζουν υψηλή συγγένεια για

το υπόστρωμα και εμπλέκονται στη μεταφορά των νιτρικών ιόντων όταν αυτά απαντώνται στο διάλυμα σε συγκεντρώσεις χαμηλότερες των 0,5mM (Siddiqi et al.,1990). Ανεξάρτητα από το είδος του μεταφορέα, η είσοδος των νιτρικών ιόντων εντός του κυττάρου διαμέσου της πλασματικής μεμβράνης πραγματοποιείται με φορά αντίθετη στην (έντονη) διαβάθμιση του ηλεκτροχημικού δυναμικού. Τα αρνητικά φορτισμένα νιτρικά ιόντα θα πρέπει να ξεπεράσουν δύο σημαντικά αρνητικά φράγματα, το αρνητικό δυναμικό της πλασματικής μεμβράνης αλλά και την υψηλότερη ενδοκυτταρική συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων έναντι αυτής του εξωτερικού μέσου. Συνεπώς, η εισροή νιτρικών ιόντων εντός του κυττάρου απαιτεί την κατανάλωση μεταβολικής ενέργειας. Πράγματι, η είσοδος των νιτρικών ιόντων μέσω των μεταφορέων NRT1 και NRT2 διαμέσου της πλασματικής μεμβράνης απαιτεί την συμμεταφορά πρωτονίων. Προκειμένου να διατηρηθεί η διαβάθμιση πρωτονίων μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης δαπανάται ATP από μια αντλία πρωτονίων (ATPάση) απελευθερώνοντας ένα πρωτόνιο προς το εξωτερικό του κυττάρου.

Οι μεταφορείς NRT2 των ανώτερων φυτών, αντίθετα με τους NRT1, προκειμένου να λειτουργήσουν απαιτούν την συνύπαρξη της πρωτεΐνης NRT3 η οποία διαθέτει μια διαμεμβρανική περιοχή που συνδέεται άμεσα με την NRT2. Επομένως εάν οι δύο πρωτεΐνες διαχωριστούν δεν εκτελούν μεμονωμένα μεταφορά νιτρικών ιόντων. Τα ένζυμα που απαιτούνται για την μεταφορά και αφομοίωση των νιτρικών ιόντων επάγονται από την παρουσία νιτρικών ιόντων στο περιβάλλον, ενώ σε περίπτωση συσσώρευσης νιτρικών ιόντων στα κύτταρα η πρόσληψη τους καταστέλλεται. Στα περισσότερα φυτικά είδη η πρόσληψη των νιτρικών ιόντων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του βιολογικού κύκλου και συνήθως μειώνεται σημαντικά κατά την άνθηση.

Κίνηση των νιτρικών ιόντων εντός των αγγείων του ξύλου και μεταφορά τους στο υπέργειο μέρος

Η πρόσληψη των νιτρικών ιόντων και η μεταφορά τους στο υπέργειο μέρος του φυτού αποτελεί μια διαδικασία η οποία ελέγχεται από μια σειρά μηχανισμών καθώς επίσης και από την εναλλαγή ημέρας-νύχτας. Η πρόσληψη και μεταφορά των νιτρικών ιόντων δεν ελέγχεται μόνο από τη διαθεσιμότητά τους στο έδαφος αλλά και από τις ανάγκες των φυτών (Marschner et al.,1996). Όταν η εδαφική διαθεσιμότητα είναι επαρκής, ο παράγοντας που κυρίως καθορίζει την πρόσληψη αζώτου είναι οι ανάγκες του φυτού.

Παρόλο που η μεταφορά των νιτρικών ιόντων είναι μια διαδικασία που επηρεάζεται από τις ημερονύκτιες εναλλαγές της διαπνευστικής δραστηριότητας, ιδιαίτερο ρόλο στη ρύθμισή της φαίνεται πως παίζει η αφομοίωση και ο μεταβολισμός των αζωτούχων ενώσεων στη ρίζα καθώς και ο μηχανισμός φόρτωσης των αγγείων του ξύλου (Gonzalez-Dugo et al.,2010). Πειράματα στο φυτό *Ricinus communis* με σύγχρονο έλεγχο της διαθεσιμότητας αζώτου στη ρίζα και μέτρηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων στον ανιόντα χυμό, του ρυθμού πρόσληψής τους από τη ρίζα και του ρυθμού μεταφοράς τους προς το υπέργειο μέρος, έδειξαν ότι η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στον ανιόντα χυμό ακολουθεί ημερήσιο ρυθμό και εμφανίζεται χαμηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ αυξάνεται έντονα κατά την διάρκεια της νύχτας. Αντίθετα, ο ρυθμός πρόσληψης εμφανίζει ημερήσιο μέγιστο κατά την φωτεινή περίοδο κυρίως λόγω της εντονότερης διαπνοής. Ωστόσο, ο ρυθμός μεταφοράς των νιτρικών ιόντων στο υπέργειο μέρος παρουσιάζει εντυπωσιακή σταθερότητα μεταξύ φωτεινής και σκοτεινής περιόδου, προφανώς επειδή κατά τη διάρκεια της ημέρας ένα σημαντικό μέρος του προσληφθέντος αζώτου συγκρατείται στη ρίζα (Herdel et al., 2001). Η πτώση της συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων του εδαφικού διαλύματος δεν επηρεάζει το χρονισμό των ημερονύκτιων ταλαντώσεων, παρά μόνο το εύρος τους (δηλαδή τις μέγιστες τιμές συγκέντρωσης του NO_3^-). Αύξηση της εδαφικής διαθεσιμότητας προκαλεί, εντός μερικών ωρών, αύξηση του ρυθμού πρόσληψης νιτρικών ιόντων και μεταφοράς αζωτούχων ενώσεων προς το υπέργειο μέρος η οποία ωστόσο είναι παροδική (Herdel et al.,2001).

Εκροή νιτρικών ιόντων

Η είσοδος και η διαφύλαξη των αζωτούχων συστατικών στα κύτταρα της επιδερμίδας και του φλοιώδους παρεγχύματος της ρίζας, είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την ανάπτυξη των φυτικών οργάνων, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συμβεί και εκροή νιτρικών ή αμμωνιακών ιόντων και αμινοξέων από τις ρίζες προς το εδαφικό διάλυμα. Αυτή η φαινομενικά σπάταλη από ενεργειακής άποψης διαδικασία, φαίνεται πως συνδέεται με την ύπαρξη περίσσειας αζώτου, ωστόσο η φυσιολογική σημασία της παραμένει ασαφής. Πιθανόν να παίζει τον ρόλο της ασφαλιστικής δικλείδας προκειμένου να αποτρέψει συσσώρευση νιτρικών σε τοξικά επίπεδα.

Η ενδοκυτταρική κατανομή των νιτρικών ιόντων

Σε αντίθεση με τα αμμωνιακά ιόντα τα οποία ενσωματώνονται ταχέως σε οργανικά συστατικά και παραμένουν στη ρίζα, τα νιτρικά ιόντα διανέμονται άμεσα σε όλα τα φυτικά όργανα. Σε επίπεδο κυττάρων ο κύριος όγκος NO_3^- συσσωρεύεται στα χυμοτόπια, από τα οποία είναι δυνατόν να ανακτηθούν. Συνεπώς τα νιτρικά ιόντα που συσσωρεύονται στο χυμοτόπιο συγκροτούν μια αποθήκη που μπορεί να προμηθεύσει το στοιχείο σε περίπτωση έλλειψης. Ωστόσο, το αποθηκευμένο αυτό άζωτο μπορεί να ικανοποιήσει μόνο ένα μέρος των αναγκών και εξαντλείται μέσα σε περίπου 48 ώρες από την επιβολή της έλλειψης νιτρικών. Η αποθήκευση νιτρικών στο χυμοτόπιο φαίνεται ότι έχει παροδικό χαρακτήρα αφού συμβαίνει κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν δεν υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω μεταβολισμού μέσω της αναγωγής των νιτρικών (Hawkesford et al. 2012)

1.2.1.6 Πρόσληψη αμμωνιακών ιόντων από τα φυτά

Η μεταφορά των αμμωνιακών ιόντων μέσω των μεμβρανών των κυττάρων της ρίζας, πραγματοποιείται κυρίως μέσω της οικογένειας μεταφορέων AMT/MEP/Rh. Η υποοικογένεια AMT1 μεταφέρει αμμωνιακά ιόντα μέσω πρωτεϊνών φορέων μεταφοράς NH_4^+ ή συμμεταφοράς NH_4^+/H^+ . Η υποοικογένεια AMT2/MEP περιλαμβάνει το διάλυλο μεταφοράς AmtB που έχει εντοπιστεί στο *Escherichia coli* και τους Mer1-3 μεταφορείς.

Στο *Arabidopsis*, οι μεταφορείς AtAMT1.1, AtAMT1.2 και AtAMT1.3 εμφανίζουν υψηλή συγγένεια με το υπόστρωμα για αυτό και μεταφέρουν τα NH_4^+ όταν τα τελευταία βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις, μικρότερες των 0,5 mM, στο εδαφικό διάλυμα. Οι AtAMT1.1 και AtAMT1.3 εκφράζονται στα κύτταρα της επιδερμίδας και του φλοιώδους παρεγχύματος της ρίζας ενώ οι AtAMT1.2 στα κύτταρα της ενδοδερμίδας και του φλοιώδους παρεγχύματος. Φαίνεται λοιπόν ότι δεν εμπλέκονται μόνο στην πρόσληψη των αμμωνιακών ιόντων, αλλά και στη μεταφορά του διαμέσου του αποπλάστη κατά την κατ' ακτίνα κίνηση. Σε συνθήκες έλλειψης αζώτου, τα γονίδια AtAMT1.1 υπερεκφράζονται ενώ όταν το φυτό επανατροφοδοτείται με αμμωνιακά ιόντα, η έκφραση των γονιδίων αυτών μειώνεται. Η ενδοκυτταρική αύξηση των αμμωνιακών ιόντων ή της γλουταμίνης λειτουργεί ως σήμα αντίδρασης που παρεμποδίζει την περαιτέρω πρόσληψή τους (Hawkesford et al. 2012).

Η πρόσληψη των αμμωνιακών ιόντων ακολουθεί τον ημερήσιο κύκλο και αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας έως ότου γίνει μέγιστη στο τέλος της

φωτοπεριόδου όπου, σταδιακά, αρχίζει να μειώνεται. Ο ημερήσιος κύκλος πρόσληψης των αμμωνιακών πιστοποιεί ότι η πρόσληψη αζώτου ρυθμίζεται από τα αποθέματα άνθρακα. Εξωτερική τροφοδοσία του φυτού με φωτοσυνθετικά προϊόντα κατά τη διάρκεια της νύχτας, οδηγεί σε εισροή αμμωνιακών ιόντων και σε υπερέκφραση των γονιδίων AtAMT1 και AtNRT2.1 που κωδικοποιούν πρωτεΐνες-μεταφορείς νιτρικών ιόντων στο *Arabidopsis* (Hawkesford et al., 2012).

1.2.1.7 Πρόσληψη οργανικού αζώτου

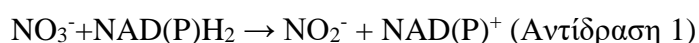
Εκτός των ανόργανων μορφών, και οι οργανικές μορφές του στοιχείου που υπάρχουν στο έδαφος, συμβάλλουν στη θρέψη των φυτών. Το οργανικό άζωτο στο έδαφος απαντάται με την μορφή πεπτιδίων, πρωτεϊνών, αμινοξέων και ουρίας. Τα πεπτίδια και οι πρωτεΐνες διασπώνται από πρωτεάσες που εκκρίνονται από μικροοργανισμούς του εδάφους. Η συγκέντρωση των ελεύθερων αμινοξέων στα γεωργικά εδάφη κυμαίνεται από 1-100 μM και αποτελεί το μεγαλύτερο κλάσμα οργανικού αζώτου που απαρτίζεται από διαλυτές ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους. Η πρόσληψη των αμινοξέων από τις ρίζες παρουσιάζει ενεργειακό όφελος, ωστόσο οι μικροβιακοί πληθυσμοί του εδάφους αποτελούν ισχυρό ανταγωνιστή όσον αφορά στην πρόσληψή τους. Παρόλα αυτά έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη μεταφορέων αμινοξέων στις ρίζες, ορισμένοι εκ των οποίων λειτουργούν μέσω ευνοϊκής διαβάθμισης πρωτονίων (Näsholm et al. 2009). Οι μεταφορείς αυτοί φαίνεται ότι εκτελούν εξειδικευμένες λειτουργίες σε διαφορετικούς τύπους κυττάρων ενώ η συγγένεια και η εξειδίκευση ως προς το υπόστρωμα ποικίλλουν.

Όσον αφορά στην ουρία, πρόκειται για πηγή εδαφικού αζώτου που είτε απαντάται φυσικά στα εδάφη, είτε χρησιμοποιείται ως αζωτούχο λίπασμα. Η ουρία είτε υδρολύεται σε αμμωνιακά ιόντα από το ένζυμο ουρεάση των μικροοργανισμών του εδάφους, είτε προσλαμβάνεται απευθείας από τις ρίζες. Τα περισσότερα φυτά διαθέτουν ένα μόνο γονίδιο που κωδικοποιεί την ουρεάση. Οι μεταφορείς της ουρίας διαμέσου των μεμβρανών είναι πιθανόν να συμπεριλαμβάνουν τον συμμεταφορέα πρωτονίων AtDUR3 που έχει εντοπιστεί στο *Arabidopsis* και που εμφανίζει υψηλή συγγένεια για την ουρία. Η παθητική μεταφορά της ουρίας επιτελείται από μια ομάδα της οικογένειας των πρωτεϊνών MIP (Major Intrinsic Proteins), των υδατοπορινών.

1.2.1.8 Η αφομοίωση του αζώτου από τα φυτά

Η αφομοίωση των νιτρικών ιόντων

Τα νιτρικά και τα αμμωνιακά ιόντα αποτελούν τις βασικές πηγές αζώτου των φυτών. Σε αερόβιες εδαφικές συνθήκες τα νιτρικά ιόντα συνιστούν την κύρια πηγή αζώτου. Τα ιόντα αυτά αφενός μεν χαρακτηρίζονται ως ιδιαιτέρως ευκίνητα, αφετέρου μπορούν να αποθηκευτούν στο χυμοτόπιο. Ωστόσο η χρήση τους στη βιοσύνθεση των πρωτεϊνών και των άλλων οργανικών συστατικών προϋποθέτει την αναγωγή τους σε αμμωνιακά ιόντα. Η αναγωγή αυτή εκτελείται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά στη μετατροπή των νιτρικών ιόντων σε νιτρώδη με απόσπαση δύο ηλεκτρονίων. Η αντίδραση αυτή καταλύεται στο κυτταρόπλασμα από το ένζυμο αναγωγάση των νιτρικών. Ως δότης ηλεκτρονίων προσφέρεται το συνένζυμο NAD(P)H (αντίδραση 1, Barker and Bryson,2012)



Οι αναγωγάσες των νιτρικών των ανώτερων φυτών αποτελούνται από δύο υπομονάδες, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει τρεις προσθετικές ομάδες: το φλαβινο-αδενινο-δινουκλεοτίδιο (FAD), την αίμη και ένα άτομο μολυβδαινίου. Το μολυβδάνιο σχηματίζει σύμπλοκο με ένα οργανικό μόριο που ονομάζεται πτερίνη.

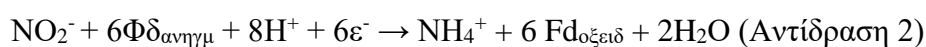
Η αναγωγάση των νιτρικών αποτελεί ένζυμο-κλειδί στην αφομοίωση του αζώτου, διαδικασία η οποία απαιτεί ιδιαίτερο ρυθμιστικό έλεγχο προκειμένου να αποφευχθεί η συσσώρευση των νιτρωδών σε τοξικά επίπεδα. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται σε διαφορετικά επίπεδα (μεταγραφικό, μεταφραστικό, μετα-μεταφραστικό) και περιλαμβάνει σύνθεση ή αποδόμηση του ενζύμου, αντιστρεπτή απενεργοποίησή του και ρύθμιση δραστηριότητας μέσω της συγκέντρωσης του υποστρώματος. Σε επίπεδο μεταγραφής και μετάφρασης η αναγωγάση των νιτρικών ρυθμίζεται από τη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων, την ύπαρξη φωτισμού και την επάρκεια σε φωτοσυνθετικά προϊόντα (Herdel et al.,2001). Η αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων στο εδαφικό διάλυμα προκαλεί επαγωγή της σύνθεσης της πρωτεΐνης. Σε μετα-μεταφραστικό επίπεδο το ένζυμο ενεργοποιείται μέσω αντιστρεπτής φωσφορυλίωσης από παράγοντες όπως η ύπαρξη φωτισμού και τα επίπεδα των υδατανθράκων (Taiz and Zeiger,2012).

Η δραστηριότητα της αναγωγάσης των νιτρικών γίνεται μέγιστη όσο αυξάνει ο ρυθμός έκτασης του φύλλου, ενώ αντίστοιχα μειώνεται δραστικά στα πλήρως

εκπτυγμένα φύλλα. Το γεγονός αυτό ίσως να εξηγεί γιατί περιορίζεται η χρήση των αποθηκευμένων νιτρικών ιόντων στα φύλλα που έχουν εισέλθει στη διαδικασία της γήρανσης. Στα περισσότερα φυτικά είδη υπάρχει δυνατότητα αναγωγής των νιτρικών τόσο στο βλαστό όσο και στη ρίζα. Η επιμέρους συμβολή των δύο αυτών οργάνων εξαρτάται από τη συγκέντρωση νιτρικών ιόντων του εξωτερικού διαλύματος. Εάν η συγκέντρωσή τους είναι χαμηλή, η αναγωγή τους επιτελείται κυρίως στη ρίζα. Όταν η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων του εξωτερικού διαλύματος αυξάνεται, η αναγωγή σε επίπεδο ρίζας καθίσταται περιοριστικός παράγοντας, οπότε αυξάνεται το κλάσμα των νιτρικών που μετακινείται και ανάγεται στο βλαστό. Εκτός αυτού, το είδος του συνοδού ιόντος κατά την μεταφορά των νιτρικών ιόντων που ανάγονται στη ρίζα σε σχέση με αυτά που μετακινούνται και ανάγονται στο βλαστό. Εάν το συνοδό ιόν είναι K^+ , η αναγωγή των νιτρικών ιόντων στις ρίζες παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, ενώ το αντίθετο συμβαίνει εάν τα συνοδά ιόντα είναι Ca^{2+} ή Na^+ (Hawkesford et al., 2012).

Η αναγωγή των νιτρικών αποτελεί ενεργοβόρο διαδικασία που απαιτεί ενέργεια που ισοδυναμεί σε κατανάλωση 15 mole ATP ανά mole νιτρικών. Στην περίπτωση που η αναγωγή συμβαίνει στα φύλλα, τα ενεργειακά αυτά ισοδύναμα εξασφαλίζονται μέσω της φωτοφωσφορλίωσης (Scheurwater et al., 2002). Σε συνθήκες έλλειψης ενέργειας (όπως υπό χαμηλό φωτισμό ή κατά την περίοδο της καρποφορίας), η περιορισμένη προμήθεια ισοδυνάμων μπορεί να οδηγήσει κατά τη διάρκεια έντονων αναγκών σε σκελετούς άνθρακα σε ανταγωνισμό μεταξύ της αναγωγής του CO_2 και της αναγωγής των νιτρικών ιόντων. Από την άλλη πλευρά σε συνθήκες υπερτροφοδότησης της φωτοσυνθετικής συσκευής και κινδύνου φωτοοξειδωτικής και φωτοπαρεμπόδισης, η αναγωγή των νιτρικών μπορεί να αναδειχτεί σε βαλβίδα εκτόνωσης της υπερπαραγωγής των ενεργειακών ισοδυνάμων (Hawkesford et al. 2012)

Κατά το δεύτερο στάδιο αναγωγής των νιτρικών, τα νιτρώδη ιόντα που προκύπτουν στο κυτταρόπλασμα από το πρώτο στάδιο μεταφέρονται στους χλωροπλάστες των φύλλων και στα πλαστίδια των ριζών. Στα οργανίδια αυτά, ανάγονται από το ένζυμο αναγωγάση των νιτρωδών σε αμμωνιακά ιόντα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση (Barker and Bryson, 2012):

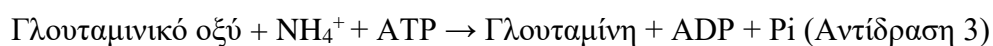


Η αναγωγή των νιτρωδών στους χλωροπλάστες επιτελείται με μεταφορά 6 ηλεκτρονίων από την ανηγμένη φερρεδοξίνη (η οποία ανάγεται μέσω της

φωτοσυνθετικής ροής ηλεκτρονίων) ενώ σε μη φωτοσυνθετικούς ιστούς από το NADPH που παράγεται μέσω της οδού των φωσφορικών πεντοζών (Taiz and Zeiger,2012). Τα ισοένζυμα της αναγωγής των νιτρωδών που εντοπίζονται στους χλωροπλάστες και στα πλαστίδια των ριζών έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: αποτελούνται από ένα μόνο πολυπεπτίδιο που περιέχει δύο προσθετικές ομάδες, ένα σύμπλεγμα σιδήρου θείου και μια εξειδικευμένη αίμη. Η ύπαρξη φωτισμού και η αυξημένη συγκέντρωση νιτρικών επάγουν την μεταγραφή της αναγωγής των νιτρωδών. Αντίθετα η συσσώρευση της ασπαραγίνης και της γλουταμίνης (τα οποία είναι τα τελικά προϊόντα της διαδικασίας) καταστέλλουν την επαγωγή αυτή.

Η αφομοίωση των αμμωνιακών ιόντων

Η αφομοίωση των αμμωνιακών ιόντων προς αμινοξέα και αμίδια πραγματοποιείται είτε στα μιτοχόνδρια είτε στους χλωροπλάστες. Η κύρια οδός για τη μετατροπή αυτή περιλαμβάνει τις διαδοχικές δράσεις της συνθετάσης της γλουταμίνης και της συνθετάσης του γλουταμινικού οξέος. Η συνθετάση της γλουταμίνης (GS) καταλύει την προσθήκη αμινομάδας στο γλουταμινικό οξύ, οπότε παράγεται γλουταμίνη (Αντίδραση 3)



Η αντίδραση αυτή απαιτεί την υδρόλυση ενός μορίου ATP και την παρουσία ενός δισθενούς κατιόντος όπως το Mg^{2+} ή το Co^{2+} ως συμπαραγόντα. Τα φυτά διαθέτουν δύο ισοένζυμα συνθετάσης της γλουταμίνης, ένα που εντοπίζεται στο κυτταρόπλασμα και ένα που εντοπίζεται στα πλαστίδια των ριζών ή στους χλωροπλάστες των φωτοσυνθετικών ιστών. Το κυτταροπλασματικό ισοένζυμο εκφράζεται σε βλαστάνοντα σπέρματα ή στις ηθμαγγειώδεις δεσμίδες των ριζών και των βλαστών και παράγουν ως φορέα αζώτου γλουταμίνη. Η πλαστιδιακή ισομορφή των ριζών παράγει αμίδια (γλουταμίνη, ασπαραγίνη) για τοπική καταναλωση, ενώ η χλωροπλαστική των βλαστών επαναφομοιώνει τα ιόντα NH_4^+ που παράγονται μέσω φωτοαναπνοής. Η έκφραση των πλαστιδιακών ισομορφών του ενζύμου επηρεάζεται από την ύπαρξη φωτισμού και τα επίπεδα των υδατανθράκων (Taiz and Zeiger,2012).

Η συνθετάση του γλουταμινικού οξέος(GOGAT) μεταφέρει την αμιδική ομάδα της γλουταμίνης στο α -κετογλουταρικό οξύ παράγοντας δύο μόρια γλουταμινικού οξέος. Τα φυτά περιέχουν δύο ισομορφές GOGAT. Η πρώτη δέχεται ηλεκτρόνια από το NADH

ενώ η δεύτερη από τη φερρεδοξίνη. Η πρώτη ισομορφή εντοπίζεται σε πλαστίδια των μη φωτοσυνθετικών ιστών όπως ρίζες ή ηθμαγγειώδεις δεσμίδες των αναπτυσσόμενων φύλλων. Στις ρίζες, η συνθετάση του γλουταμινικού οξέος παίζει ρόλο στην αφομοίωση των NH_4^+ που προέρχονται από το εδαφικό διάλυμα, ενώ στις ηθμαγγειώδεις δεσμίδες αφομοιώνει NH_4^+ που προέρχεται από τη γλουταμίνη (Αντιδράσεις 4 και 5) που έχει μεταφερθεί από τις ρίζες ή τα γηρασμένα φύλλα (Taiz and Zeiger, 2012).

Γλουταμίνη+2-οξογλουταρικό+NADP+H⁺→ 2Γλουταμινικό+NADP⁺ (Αντίδραση 4)

Γλουταμίνη+2-οξογλουταρικό+ Fd_{ανηγμ}→ 2Γλουταμινικό+Fd_{οξειδ} (Αντίδραση 5)

1.2.1.9 Ο ρόλος των ενώσεων οργανικού αζώτου χαμηλού μοριακού βάρους

Στα ανώτερα φυτά οι ενώσεις οργανικού αζώτου χαμηλού μοριακού βάρους χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσα παράγωγα κατά την αφομοίωση του ανόργανου αζώτου και τη σύνθεση οργανικών ενώσεων υψηλού μοριακού βάρους. Επίσης παίζουν σημαντικό ρόλο στη μεταφορά του αζώτου από τα όργανα-παραγωγούς στα όργανα-καταναλωτές. Οι ενώσεις οργανικού αζώτου χαμηλού μοριακού βάρους χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική πηγή αζώτου για τις περιόδους έλλειψης ανόργανου αζώτου (Hawkesford et al. 2012).

Πιο αναλυτικά, προκειμένου να μειωθεί το ενεργειακό κόστος που απαιτείται για την μεταφορά του αφομοιωμένου αζώτου από τη ρίζα στον βλαστό, ο κύριος όγκος του μεταφέρεται με την μορφή αζωτούχων ενώσεων με υψηλή αναλογία N/C (>0,4). Συνεπώς, στον ανιόντα χυμό των ριζών κυριαρχούν τα αμίδια γλουταμίνη (2N/5C) και ασπαραγίνη (4N/4C) (Hawkesford et al. 2012).

Σημαντικό ρόλο στη μεταφορά αζώτου παίζουν επίσης ορισμένες ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους, όπως οι αμίνες και οι πολυαμίνες, των οποίων η βιοσύνθεση πραγματοποιείται μέσω της αποκαρβοξυλίωσης αμινοξέων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ομάδας αυτής είναι η πουτρεσκίνη της οποίας η συγκέντρωση μπορεί να φτάσει το 1,2% της ξηρής ουσίας των φυτών. Πολύ υψηλή συγκέντρωση πουτρεσκίνης εντοπίζεται σε μεριστωματικούς ιστούς που τροφοδοτούνται με υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών ιόντων ή βρίσκονται σε τροφопενία καλίου (Hawkesford et al. 2012).

1.2.1.10 Συνέργεια στη θρέψη των φυτών με νιτρικά και αμμωνιακά ιόντα

Από τις πληροφορίες που παρατέθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, γίνεται φανερό ότι τα αμμωνιακά ιόντα θα έπρεπε να έχουν προτίμηση όσον αφορά στην απορρόφησή τους από τις ρίζες αφού η αφομοίωση των αμμωνιακών ιόντων δεν απαιτεί τα τεράστια ποσά ενέργειας που απαιτεί η αφομοίωση των νιτρικών ιόντων (Bloom et al., 1992). Η προτίμηση ενός φυτικού είδους ως προς τα νιτρικά ή αμμωνιακά ιόντα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, τόσο ενδογενείς όσο και περιβαλλοντικούς. Εξ' αυτών, οι παράγοντες που σχετίζονται με το εδαφικό περιβάλλον είναι ιδιαίτερα σημαντικοί. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι όταν τα φυτά τροφοδοτούνται με συνδυασμό αμμωνιακών και νιτρικών ιόντων επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί ανάπτυξης και υψηλότερες αποδόσεις. Ωστόσο, φυτικά είδη που είναι προσαρμοσμένα να επιβιώνουν σε όξινα εδάφη ή σε εδάφη με χαμηλό δυναμικό οξειδοαναγωγής (όπως κατακλυσμένα εδάφη) προτιμούν τα αμμωνιακά ιόντα. Αντίθετα φυτικά είδη που επιβιώνουν σε ασβεστώδη εδάφη προτιμούν τα νιτρικά ιόντα. Στην περίπτωση που ο εφοδιασμός του φυτού με άζωτο είναι χαμηλός και οι συγκεντρώσεις των δύο ειδών ιόντων είναι παρόμοιες, απορροφώνται κατά προτίμηση τα αμμωνιακά ιόντα. Επίσης εντονότερη απορρόφηση αμμωνιακών συμβαίνει όταν μειώνονται οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος ενώ σε θερμοκρασίες κάτω από 5 °C, η απορρόφηση των νιτρικών ιόντων σταματά (Hawkesford et al., 2012).

Καθώς τα νιτρικά ή τα αμμωνιακά ιόντα συνιστούν το 80% των συνολικών κατιόντων και ανιόντων που προσλαμβάνονται από τα φυτά, γίνεται αντιληπτό ότι η μορφή με την οποία απορροφώνται είναι δυνατό να επηρεάσει την πρόσληψη άλλων κατιόντων ή ανιόντων, την ρύθμιση του κυτταρικού pH και του pH της ριζόσφαιρας. Η αφομοίωση των αμμωνιακών ιόντων στις ρίζες παράγει ένα πρωτόνιο ανά μόριο αμμωνίου. Τα πρωτόνια αυτά εκκρίνονται κατά ένα μεγάλο μέρος στο εξωτερικό μέσο με σκοπό τη διατήρηση σταθερού κυτταρικού pH και ουδέτερου ηλεκτρικού δυναμικού το οποίο αντισταθμίζει την πλεονασματική πρόσληψη κατιόντων έναντι ανιόντων. Στην περίπτωση της θρέψης του φυτού και με τα δυο είδη ιόντων, τα πρωτόνια που απελευθερώνονται κατά την αφομοίωση του αμμωνιακού ιόντος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγωγή των νιτρικών ιόντων, καθιστώντας πιο εύκολη για το φυτό τη ρύθμιση του ενδοκυτταρικού pH (Hawkesford et al. 2012).

Η χημεία της ριζόσφαιρας επίσης επηρεάζεται από το είδος του ιόντος. Η τροφοδοσία με αμμωνιακά ιόντα είναι δυνατόν να μειώσει το pH της ριζόσφαιρας λόγω έκκρισης πρωτονίων ενώ η τροφοδοσία του φυτού με νιτρικά ιόντα να το αυξήσει, διότι

οδηγεί σε μια καθαρή πρόσληψη πρωτονίων από τη ριζόσφαιρα. Οι αλλαγές στο pH έχουν επίδραση στη διαθεσιμότητα των άλλων θρεπτικών στοιχείων όπως του φωσφόρου και των ιχνοστοιχείων.

Η μορφή με την οποία το άζωτο προσλαμβάνεται από το φυτό είναι σημαντική για τη βιοσύνθεση και τη λειτουργία ορισμένων φυτο-ορμονών και ιδιαίτερα των κυτοκινινών. Για παράδειγμα τα ένζυμα που εμπλέκονται στην βιοσύνθεση των κυτοκινινών επάγονται από τη θρέψη του φυτού με νιτρικά ιόντα και όχι με άλλο θρεπτικό στοιχείο. Ακόμα και όταν η ανάπτυξη ενός φυτού επιτελείται κυρίως με αμμωνιακά ιόντα, τα νιτρικά ιόντα είναι επωφέλη επειδή προκαλούν ένα συνδυασμένο αποτέλεσμα στα επίπεδα κυτοκινινών και IAA του βλαστού. Αντίθετα αν ένα φυτό αναπτύσσεται σχεδόν αποκλειστικά με νιτρικά ιόντα, καθυστερεί να εισέλθει στην αναπαραγωγική φάση λόγω της υπερβολικής συγκέντρωσης κυτοκινινών. Σε αυτή την περίπτωση ο εφοδιασμός του φυτού με αμμωνιακά μπορεί να επάγει την άνθηση, πιθανόν αυξάνοντας την βιοσύνθεση των πολυαμινών που λειτουργούν δευτερογενή σηματοδοτικά μόρια (Hawkesford et al. 2012).

1.2.1.11 Τοξικότητα αμμωνίου

Η πρόσληψη αμμωνιακών ιόντων σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση συμπτωμάτων τοξικότητας στα φυτά. Τα συμπτώματα της τοξικότητας αμμωνίου συμπεριλαμβάνουν χλώρωση των φύλλων, καχεξία στην ανάπτυξη, νεκρωτικές κηλίδες στα φύλλα και τελικά νέκρωση του φυτού. Παρότι η τοξικότητα που επιφέρουν τα αμμωνιακά ιόντα στο φυτικό μεταβολισμό δεν έχει πλήρως κατανοηθεί, έχει διατυπωθεί η άποψη ότι πιθανόν οφείλεται :

1. Στην παρεμπόδιση πρόσληψης κατιονικών θρεπτικών στοιχείων
2. Σε αδυναμία ρύθμισης του pH του κυττάρου
3. Σε διαταραχές του μεταβολισμού του άνθρακα επειδή η αφομοίωση των αμμωνιακών ιόντων απαιτεί την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων υδατανθράκων
4. Στην οξίνιση της ριζόσφαιρας που επάγεται από την πρόσληψη των αμμωνιακών μπορεί να οδηγήσει σε τοξικότητα αργιλίου, ιδιαίτερα σε όξινα εδάφη (Hawkesford et al.,2012).

1.2.1.12 Επίδραση αζώτου στην πρωτεΐνη του καρπού

Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές η συγκέντρωση πρωτεΐνης στο καρπό είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας της ποιότητας του σκληρού σιταριού (Jenner et. al., 1991; Johanson et al., 2001).

Η συγκέντρωση της πρωτεΐνης στο καρπό καθορίζεται από το γονότυπο και από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το άζωτο, η εδαφική υγρασία και η θερμοκρασία (Johanson et. al., 2001). Σε έρευνα βρέθηκε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αζωτούχος λίπανση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των αποθηκευμένων πρωτεϊνών, αρα και των συνολικών (Killen et. al., 1978). Γενικά, το πρωτεϊνικό περιεχόμενο αυξάνεται με την αζωτούχο λίπανση. Επίσης, το θείο αποτελεί βασικό συστατικό των πρωτεϊνών και επομένως σημαντικό θρεπτικό στοιχείο για την ποσότητα και για την ποιότητα της παραγόμενης πρωτεΐνης (Yara).

Το άζωτο είναι το βασικό δομικό συστατικό των πρωτεϊνών και έχει αποδειχθεί ότι τα επίπεδα του διαθέσιμου εδαφικού αζώτου έχουν μεγάλη επίδραση στη συγκέντρωση πρωτεΐνης στους σπόρους του σιταριού (Eilrich et al., 1973). Επίσης έχει αποδειχθεί ότι η αζωτούχος λίπανση συμβάλλει στην αύξηση της απόδοσης σε καρπό αλλά και της συγκέντρωσης πρωτεΐνης στους σπόρους. Αντίθετα παρατηρείται αρνητική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης της πρωτεΐνης στους σπόρους και της απόδοσης σε καρπό. Συνεπώς πρέπει να δοθεί έμφαση στη διαχείριση της αζωτούχου λίπανσης ώστε να διατηρηθεί μια ισορροπία μεταξύ της απόδοσης σε καρπό και του επιπέδου ποιότητας. Η συγκέντρωση πρωτεΐνης στον καρπό εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ της μεταφοράς υδατανθράκων και αζώτου στον καρπό (Jenner, 1991). Η συγκέντρωση πρωτεΐνης στους σπόρους δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητα του αζώτου στους σπόρους αλλά και από το επίπεδο των υδατανθράκων του φυτού (σχέση μεταξύ C και N κατά το γέμισμα του κόκκου) (Cox et al., 1986). Ο βαρύς κόκκος θα έχει υψηλό ποσοστό αμύλου και επομένως μικρό ποσοστό πρωτεΐνης.

Οι απαιτήσεις σε άζωτο για τη σύνθεση πρωτεΐνης στους αναπτυσσόμενους σπόρους ικανοποιούνται από την κινητοποίηση αζώτου που βρίσκεται στους βλαστικούς ιστούς και είχε αφομοιωθεί πριν την άνθηση και από την απευθείας πρόσληψη και αφομοίωση αζώτου κατά τη διάρκεια του γεμίματος των σπόρων. Η κινητοποίηση του αζώτου που είχε αφομοιωθεί πριν την άνθηση έχει προταθεί ως η κύρια πηγή αζώτου για τους σπόρους (Austin et al., 1977). Σε κάποιες περιπτώσεις, το συνολικό περιεχόμενο του αζώτου στα φυτά κατά την άνθηση φτάνει το 90-100% του συνολικού αζώτου κατά την ωρίμανση (Heitholt et al., 1990).

1.2.1.13 Δείκτες

Αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE)

Η αποδοτικότητα χρήσης του αζώτου (Nitrogen use efficiency, NUE) έχει περιγραφεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους (Cormier et al., 2016), αλλά ο περισσότερο αποδεκτός ορισμός είναι η παραγωγή καρπού ή βιομάζας, ανά μονάδα διαθέσιμου αζώτου (N) στο έδαφος (συμπεριλαμβανομένου του υπολειμματικού N στο έδαφος και των εισροών N μέσω λίπανσης), ή αλλιώς η οικονομικά μέγιστη παραγωγή ανά μονάδα αζώτου που εφαρμόστηκε, απορροφήθηκε, ή χρησιμοποιήθηκε από το φυτό για την παραγωγή σπόρου ή ιστού (Moll et al., 1982).

Η Αποδοτικότητα της χρήσης αζώτου:

- ✓ Είναι το καθαρό αποτέλεσμα της δέσμευσης του N (αποδοτικότητα πρόσληψης) και της μετατροπής του (απόδοση χρήσης) (Moll et al., 1982, SylvesterBradley & Kindred, 2009, Nyikako et al., 2014).
- ✓ Συμβάλλει όχι μόνο στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής στις καλλιέργειες του σιταριού (έως και 40%) (Bock et al., 1984) με λιγότερες εφαρμογές λιπασμάτων αλλά και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση των αζωτούχων λιπασμάτων (Good et al., 2007, Chen et al., 2014, Figeria & Baligar, 2005).

Κυρίαρχος στόχος είναι η αποτελεσματικότερη χρήση του N (NUE) σε επίπεδο τοπικό, περιφερειακό, εθνικό και σε παγκόσμια κλίμακα, με τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (EPA, 2012, Cui et al., 2013). Η αποτελεσματική διαχείριση του N περιλαμβάνει την επιλογή της καλλιέργειας, του ρυθμού ανάπτυξης της, του χρόνου εφαρμογής και της σωστής ποσότητας N (Malhi et al., 2001, Torbert et al., 2001, Otteson et al., 2007).

Γεωργική αποτελεσματικότητα αζώτου (NAE)

Ο δείκτης γεωργικής αποτελεσματικότητας αζώτου (Nitrogen Agronomic Efficiency) σχετίζεται με την ικανότητα της καλλιέργειας να αυξάνει την οικονομική της απόδοση (απόδοση σε σπόρο) σε σχέση την ποσότητα αζώτου που εφαρμόζεται:

$$NAE = (\text{Απόδοση σε σπόρο}_{\text{λιπ}} - \text{Απόδοση σε σπόρο}_{\text{μάρτυρας}}) / \text{Ποσότη. N}$$

και έχει μονάδες μετρήσεις τα Kg σπόρου/Kg N . Ο δείκτης αυτός περιγράφει λοιπόν την αποτελεσματικότητα της λίπανσης στη παραγωγή καρπού /κιλό N λιπάσματος.

Δείκτης συγκομιδής (HI)

Ο δείκτης συγκομιδής (Harvest index), είναι ποσοστό βάρους του καρπού προς το σύνολο της υπέργειας βιομάζας (Donald, 1962), είναι εξαιρετικά χρήσιμος ως δείκτης παραγωγικότητας για τις καλλιέργειες σιτηρών. Οι πιο κοντόσωμες ποικιλίες μπορεί να έχουν μεγαλύτερο δείκτη συγκομιδής από ό,τι οι υψηλόσωμες ποικιλίες. Ο υψηλός δείκτης συγκομιδής μπορεί να αποτελεί μέτρο της ικανότητας καταμερισμού των προϊόντων φωτοσύνθεσης στους σπόρους και στα στελέχη.

Ο δείκτης συγκομιδής μεταβάλλεται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και παίρνει υψηλότερες τιμές σε ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξης (Sharma κ.α., 1987). Σε καλλιεργητικές περιόδους που επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και συνθήκες έλλειψης νερού μειώνεται η φωτοσύνθεση με αποτέλεσμα να σχηματίζονται λιγότερα αδέρφια, λιγότερα στάχυα, λιγότεροι και μικρότεροι σπόροι ανά στάχυ και τελικά να μειώνεται η απόδοση σε σπόρο και ο δείκτης συγκομιδής.

Το άζωτο επηρεάζει την αύξηση και ανάπτυξη της καλλιέργειας, τη βιομάζα που παράγεται και τη διαθεσιμότητα των αμινοξέων για τη σύνθεση των πρωτεϊνών κατά τη διάρκεια σχηματισμού των κόκκων και κατά το σχηματισμό αποθηκευτικών πρωτεϊνών (Heilmeyer and Monson, 1994). Οι AiMulhim και Al-Tahir (1991) βρήκαν ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ ποσοστού φυτρώματος και επιπέδου αζώτου επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη συγκομιδής. Επίσης, οι Gonzalez-Ponce κ.α. (1992) αναφέρουν ότι ο δείκτης συγκομιδής επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ βροχόπτωσης, αζωτούχου λίπανσης και θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια γεμίσματος του κόκκου. Ειδικότερα, υψηλή βροχόπτωση και μέτριες θερμοκρασίες κατά την περίοδο γεμίσματος του κόκκου συσχετίζονται με αυξημένο δείκτη συγκομιδής και αυξημένη απόδοση ως αντίδραση στην αζωτούχο λίπανση, ενώ χαμηλή βροχόπτωση και υψηλές θερμοκρασίες κατά το γέμισμα του κόκκου συσχετίζονται με μειωμένο δείκτη συγκομιδής και μειωμένη απόδοση ως αντίδραση στην αζωτούχο λίπανση. Η υψηλή γονιμότητα του εδάφους αυξάνει την απόδοση και μειώνει το δείκτη συγκομιδής (Jeddel και Helm, 1992). Η έλλειψη νερού (Salam κ.α., 1991) και η άρδευση με αλατούχο νερό (Ahmed κ.α., 1993) μειώνει το δείκτη συγκομιδής και την απόδοση. Γενικά, η απόδοση μειώνεται με τη μείωση του δείκτη συγκομιδής (Bridger κ.α., 1995), αλλά οι συνθήκες

ανάπτυξης μπορεί να είναι τέτοιες που η απόδοση και η παραγωγή συνολικής βιομάζας να έχουν υψηλές τιμές και ο δείκτης συγκομιδής να έχει χαμηλές (Jeddel και Helm, 1992).

1.2.2 Λιπάσματα ενισχυμένης αποτελεσματικότητας

Τα λιπάσματα είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία της σύγχρονης γεωργίας. Η εφαρμογή λιπασμάτων στις γεωργικές πρακτικές αύξησε σημαντικά την παραγωγή τροφίμων, ζωοτροφών, καυσίμων, ινών και άλλων φυτικών προϊόντων. Ωστόσο, ένα σημαντικό μέρος των θρεπτικών ουσιών που εφαρμόζεται στο χωράφι δεν απορροφάται από τα φυτά και χάνεται μέσω έκπλυσης, εξάτμισης, νιτροποίησης ή άλλων μέσων. Αυτό αυξάνει το κόστος παραγωγής και μολύνει σοβαρά το περιβάλλον. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, τα λιπάσματα ενισχυμένης αποτελεσματικότητας παράγονται και χρησιμοποιούνται με τη μορφή λιπασμάτων ελεγχόμενης απελευθέρωσης και αναστολέων νιτροποίησης / ουρέασης. Στόχος είναι, ο ρυθμός απελευθέρωσης (ή γενικά η διαθεσιμότητα) αζώτου από ένα τέτοιο λίπασμα να είναι συγχρονισμένος με την περίοδο ταχείας ανάπτυξης των φυτών με σκοπό να καλυφθούν οι αυξημένες απαιτήσεις της καλλιέργειας σε άζωτο.

Η ενσωμάτωση ουσιών, σε μικρές ποσότητες, οι οποίες αναστέλλουν την ανεπιθύμητη αποδόμηση των λιπασμάτων με χημική ή μικροβιακή δράση είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές και οικονομικά αποδοτικές μεθόδους για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας των λιπασμάτων. Αυτή η κατηγορία λιπασμάτων αναφέρεται ως σταθεροποιημένα ή βιο-τροποποιημένα λιπάσματα (Trenkel 2010, Shavin 2000). Η αποτελεσματικότητα αυτής της ομάδας λιπασμάτων εξαρτάται επίσης από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, επειδή το έδαφος με υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων βοηθά επίσης στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητάς τους.

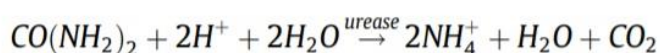
Οι αναστολείς νιτροποίησης και οι αναστολείς ουρέασης χρησιμοποιούνται συχνά στα λιπάσματα. Οι αναστολείς ουρέασης αναστέλλουν την υδρόλυση ουρίας, ενώ οι αναστολείς νιτροποίησης αναστέλλουν τη βιολογική οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό άζωτο (Trenkel 2010).

1.2.2.1. Αναστολείς ουρεάσης

Αρχικά, αξίζει να αναφερθούν ορισμένα πράγματα σχετικά με την ουρεάση. Το ένζυμο ουρεάση είναι κοινό στη φύση και υπάρχει σε ζώα, φυτά και μικροοργανισμούς. Στο έδαφος, το μεγαλύτερο μέρος του ενζύμου ουρεάσης προέρχεται από συνθέσεις που πραγματοποιούνται από μικροοργανισμούς και φυτικά υλικά (Bremner & Mulvaney 1978, Frankenberger & Tabatabai 1982). Ο Paulson και ο Kurtz υπολόγισαν ότι το 79-89% της δραστηριότητας ουρεάσης στα εδάφη προέρχεται από εξωκυτταρικά ένζυμα προσροφημένα στα κολλοειδή του εδάφους. Η δραστηριότητα του ενζύμου ουρεάσης είναι υψηλότερη στα φυτικά υλικά από ό,τι στο έδαφος, και επομένως περιοχές με υπολείμματα καλλιεργειών που δεν έχουν ενσωματωθεί, τείνουν να εμφανίζουν υψηλότερη ενζυματική δραστηριότητα. Ο Barreto και ο Westerman παρατήρησαν μια τριπλή αύξηση της δραστηριότητας ουρεάσης στο σύστημα χωρίς άροση, σε σύγκριση με εκείνη στο έδαφος μιας συμβατικής περιοχής που έχει οργωθεί.

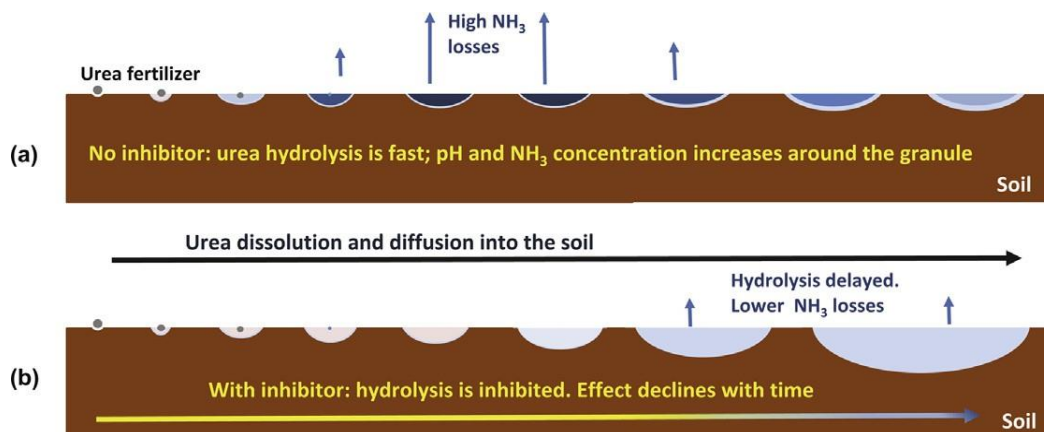
Η δραστηριότητα της ουρεάσης εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους. Σε συνθήκες ξηρού εδάφους, ο ρυθμός υδρόλυσης της ουρεάσης είναι χαμηλός (Volk 1966), ωστόσο, αυξάνεται σταδιακά καθώς η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό αυξάνεται έως ότου φτάσει το 20% (Bremner & Mulvaney 1978). Πάνω από αυτό το επίπεδο, η υδρόλυση δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις αλλαγές στην υγρασία του εδάφους. Επομένως, η υδρόλυση της ουρίας - και ο συνακόλουθος σχηματισμός NH_3 - τείνουν να είναι υψηλά σε υγρά εδάφη, ειδικά σε υψηλή θερμοκρασία. Αντίθετα, η ουρία που εφαρμόζεται σε ξηρά εδάφη έχει αργή υδρόλυση, αφήνοντας περισσότερο χρόνο για τη μείωση των απωλειών εξάτμισης με ενσωμάτωση στο έδαφος με μηχανικά μέσα, βροχή ή άρδευση.

Η υδρόλυση της ουρίας, που καταλύεται από ένζυμα ουρεάσης, είναι μια γρήγορη διαδικασία στα εδάφη και περιλαμβάνει την κατανάλωση πρωτονίων, αυξάνοντας το pH του εδάφους στη γύρω περιοχή των κόκκων λιπάσματος (Terman 1971, Ernst & Massey 1960). Οι Overrein και Moe έδειξαν αύξηση του pH του εδάφους από 6,5 σε 8,8 μετά από τρεις ημέρες εφαρμογής ουρίας. Η υδρόλυση ουρίας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αμμωνίου και CO_2 , σύμφωνα με την ακόλουθη απλουστευμένη εξίσωση (Cantarella H. et al. 2007) :



Καθώς η υδρόλυση ουρίας καταναλώνει πρωτόνια (H^+), το pH του εδάφους αυξάνεται οδηγώντας την ισορροπία μεταξύ NH_4^+ και NH_3 προς το σχηματισμό της αέριας μορφής.

Η ουρία είναι το πιο διαδεδομένο λίπασμα αζώτου (N), με προβλεπόμενη αύξηση της ετήσιας ζήτησης κατά 1,5% τα επόμενα χρόνια. Μετά την εφαρμογή της στο έδαφος, η ουρία υφίσταται υδρόλυση μέσω του ενζύμου ουρεάσης, προκαλώντας αυξήσεις στο pH του εδάφους στη γύρω περιοχή των κόκκων και με αποτέλεσμα απώλειες NH_3 που κατά μέσο όρο αγγίζουν το 16% του N εφαρμόστηκε παγκοσμίως και μπορεί να φτάσει το 40% ή περισσότερο κάτω από συνθήκες ζέστης και υγρασίας.



Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση της διάλυσης, διάχυσης και υδρόλυσης της ουρίας στο έδαφος α) χωρίς αναστολέα ουρεάσης, b) με αναστολέα ουρεάσης.

Όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 3), χωρίς αναστολέα (a), η υδρόλυση είναι γρήγορη (σκούρο μπλε χρώμα) προκαλώντας συσσώρευση NH_3 / NH_4^+ και αύξηση του pH κοντά στην επιφάνεια του εδάφους γύρω από τον κόκκο λιπάσματος, οδηγώντας στην εξάτμιση της NH_3 . Καθώς τα είδη αμμωνίας είναι λιγότερο ευκίνητα στο έδαφος, η διάχυση είναι περιορισμένη. Ο αναστολέας (b) διατηρεί την ουρία άνυδρη για κάποιο χρονικό διάστημα. Η ουρία δεν έχει ηλεκτρικά φορτία και διαχέεται εύκολα στο διάλυμα του εδάφους. Όταν η επίδραση του αναστολέα σταματά και η ουρία αρχίζει να υδρολύεται, τόσο το pH όσο και η συγκέντρωση των NH_3 / NH_4^+ είναι χαμηλότερα (ανοιχτό μπλε χρώμα) ως αποτέλεσμα της αραίωσης. Μέρος της ουρίας ενσωματώνεται στο έδαφος πριν από την υδρόλυση. Η NH_3 που παράγεται μέσα στο έδαφος διατηρείται από το αρνητικά φορτία του κολλοειδούς υλικού και οι απώλειες μειώνονται ακόμη και αν δεν πέσει βροχή ή δεν εφαρμοστεί άρδευση προκειμένου να ενσωματωθεί η ουρία στο έδαφος.

Η χρήση αναστολέων ουρεάσης είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση των απωλειών NH_3 . Αρκετές ενώσεις δρουν ως αναστολείς της ουρεάσης, αλλά μόνο το N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) έχει χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως, και είναι το πιο επιτυχημένο σε μια αγορά που έχει αυξηθεί 16% ετησίως τα τελευταία 10 χρόνια. Μόνο τα τελευταία χρόνια κυκλοφορούν και άλλες ενώσεις στο εμπόριο. (Candarella et al. 2018)

Υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις ενώσεις που αναστέλλουν τις ουρεάσες στα εδάφη. Μέταλλα όπως Ag, Hg, Cu, Cd, Co, Zn και άλλα ήταν από καιρό γνωστό ότι αναστέλλουν την υδρόλυση της ουρίας και δοκιμάστηκαν ως πρόσθετα σε λιπάσματα (Tabatabai 1977, Shaw 1954). Το βορικό οξύ μπορεί επίσης να μειώσει την υδρόλυση της ουρίας (Benini et al. 2004). Οι Bock και Kissel (1988) εξέτασαν τις πρώτες εργασίες με οργανικές ενώσεις που ελέγχθηκαν ως αναστολείς της ουρεάσης του εδάφους. Οι Kiss και Simihaian (2002) ανέφεραν ότι πάνω από 14.000 ενώσεις ή μίγματα ενώσεων έχουν δοκιμαστεί για τις επιδράσεις τους στη δραστηριότητα της ουρεάσης του εδάφους και πολλές από αυτές κατοχυρώθηκαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το σκοπό αυτό. Η υδροκινίνη και μερικές βενζοκινόνες ήταν γνωστό ότι αναστέλλουν τη δραστηριότητα της ουρεάσης, αλλά τα καλύτερα αποτελέσματα ελήφθησαν με ουσίες δομικά ανάλογες της ουρίας (Chien et al. 2009, Kiss & Simihaian 2002). Υπάρχουν πολλές ενώσεις στην τελευταία οικογένεια που έδειξαν ανασταλτικά αποτελέσματα, αλλά αυτή που ξεχώρισε και έφτασε με επιτυχία στην αγορά είναι το N-(η-βουτυλο) θειοφωσφορικό τριαμίδιο (NBPT), ξεκινώντας στα μέσα της δεκαετίας του 90'. Σήμερα, διάφορες μάρκες NBPT πωλούνται ως πρόσθετα στην ουρία σε πολλές χώρες παγκοσμίως. Μια σύνθεση που περιέχει NBPT και NPPT (N-(n-propyl) thiophosphoric triamide) έχει δοκιμαστεί επιτυχώς (Li Q. et al. 2015, Li S. et al. 2015) και έχει φτάσει στην αγορά τα τελευταία χρόνια όπως επίσης και ένας νέος αναστολέας ουρεάσης, το N-(2-nitrophenyl) phosphoric triamide (2-NPT), που αναπτύχθηκε στη Γερμανία στις αρχές της δεκαετίας του 2000, έχει δοκιμαστεί υπό συνθήκες πεδίου (Schraml et al. 2016) και βγήκε επίσης στην αγορά, η οποία όμως, μέχρι στιγμής, κυριαρχείται από το NBPT. (Candarella et al. 2018)

Μετά την εμπορική επιτυχία του NBPT και της μεγάλης δυνητικής αγοράς για πρόσθετα ουρίας, υπάρχει νέο ενδιαφέρον για νέα μόρια ή σκευάσματα αναστολέων ουρεάσης. Υπάρχει περιθώριο βελτίωσης, καθώς το NBPT έχει σχετικά μικρή περίοδο αποτελεσματικής αναστολής της ουρεάσης σε εδάφη, ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες (Trenkel 2010). Αρκετές ουσίες ανάλογες της ουρίας αποδείχθηκε ότι *in vitro*

αναστέλλουν αποτελεσματικότερα την υδρόλυση ουρίας από το NBPT (Domínguez et al. 2008) αλλά καμία από τις ενώσεις που δοκιμάστηκαν δεν είναι εμπορεύσιμη μέχρι στιγμής.

Οι αναστολείς της ουρεάσης, εφαρμόζονται κυρίως με υγρή σύνθεση, ως επικάλυψη σε κόκκους λιπάσματος ουρίας, το οποίο εγγυάται ένα ομοιογενές κάλυμμα και αποτελεσματικότητα (Trenkel 2010).

NBPT

Σε σύγκριση με την απλή ουρία, η ουρία που έχει ενισχυθεί με NBPT μειώνει την απώλεια NH_3 κατά περίπου 53%. Το κέρδος απόδοσης από τη χρήση NBPT είναι της τάξης του 6,0% και φτάνει έως 10,2% ανάλογα με τα είδη των καλλιεργειών. Οι αναστολείς νιτροποίησης συνήθως αυξάνουν την εξάτμιση της NH_3 και η ανάμιξή τους με τους αναστολείς ουρεάσης αντισταθμίζει εν μέρει τα οφέλη του τελευταίου στη μείωση της απώλειας NH_3 . Η αποτελεσματικότητα του NBPT για τη μείωση της απώλειας NH_3 είναι καλά τεκμηριωμένη, αλλά υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω βελτίωση για την αύξηση της περιόδου αναστολής και της διάρκειας ζωής της ουρίας που έχει εμπλουτιστεί με NBPT (Candarella et al. 2018).

Το NBPT έχει ήδη σταθερή θέση στην αγορά λιπασμάτων. Εκτιμάται ότι 14 Mt εξειδικευμένων λιπασμάτων, συμπεριλαμβανομένων λιπασμάτων ελεγχόμενης απελευθέρωσης, βραδείας απελευθέρωσης, ουρίας επικαλυμμένης με θείο, και λιπασμάτων με αναστολέα ουρεάσης και αναστολέα νιτροποίησης παρήχθησαν παγκοσμίως το 2016: η ουρία που περιείχε NBPT αντιστοιχούσε σε 7,4 Mt ή 53% (Ramsbacher 2017). Οι πωλήσεις εκτιμάται ότι αυξήθηκαν κατά 16% ετησίως τα τελευταία 10 χρόνια. Η ζήτηση για τους αναστολείς ουρεάσης αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται με ρυθμό 10-12% ετησίως τα επόμενα 10 χρόνια. Οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί μπορούν να βοηθήσουν στην αύξηση της ζήτησης για τέτοια προϊόντα. Για παράδειγμα, η Γερμανία έχει θεσπίσει νομοθεσία που απαιτεί από το 2020 όλα τα λιπάσματα ουρίας που χρησιμοποιούνται στη χώρα είτε να ενσωματωθούν στο έδαφος είτε να τροποποιηθούν με αναστολείς ουρεάσης (Ramsbacher 2017).

Όπως είπαμε πριν, οι αναστολείς ουρεάσης εφαρμόζονται κυρίως ως επικάλυψη σε κόκκους ουρίας. Το NBPT μπορεί επίσης να προστεθεί στην ουρία πριν από την κοκκοποίηση. Υπάρχει μικρή ή καθόλου διαφορά στην απόδοση του NBPT για τη μείωση των απωλειών NH_3 όταν επικαλύπτει ή ενσωματώνεται στον κόκκο ουρίας (Trenkel 2010, Watson 2008). Ωστόσο, η ενσωμάτωση NBPT στην ουρία πριν την

κοκκοποίηση παρέτεινε σημαντικά το χρόνο αποθήκευσης σε σύγκριση με τις εφαρμογές με επικάλυψη (Watson 2008).

Το NBPT μπορεί να απορροφηθεί από τα φυτά και να αλλάξει ορισμένες μεταβολικές οδούς μειώνοντας τη δραστικότητα ουρεάσης και τη δραστηριότητα συνθετάσης γλουταμίνης, οι οποίες σχετίζονται με την αφομοίωση N (Artola et al. 2011, Cruchaga 2013). Επομένως, το NBPT μπορεί να προκαλέσει παροδικό κιτρίνισμα των άκρων των φύλλων που προκαλείται από την τοξικότητα στην ουρία αμέσως μετά την εφαρμογή. Ωστόσο, τα φυτά συνήθως αναρρώνουν γρήγορα και δεν έχουν αναφερθεί επιδράσεις στην ανάπτυξη (Trenkel 2010, Artola et al. 2011).

Μηχανισμός δράσης των αναστολέων ουρεάσης

Πριν από την εμφάνιση οργανικών μορίων ως αναστολείς ουρεάσης στη γεωργία, τα μέταλλα δοκιμάστηκαν ευρέως (Tabatabai 1977, Shaw 1954). Ο Shaw (1954) αξιολόγησε τη δράση των μετάλλων και έδειξε αυτήν την ακολουθία ισχύος αναστολής ουρεάσης: $Ag^+ \sim Hg^{2+} > Cu^{2+} > Cd^{2+} > Co^{2+} > Ni^{2+} > Zn^{2+} = Sn^{2+} = Mn^{2+} = Pb^{2+}$. Τα μέταλλα αναστέλλουν την ουρεάση δημιουργώντας ένα χημικό δεσμό με μία ή περισσότερες δραστικές θέσεις σουλφυδρυλομάδας για την παραγωγή αδιάλυτων θειώδων. Κατά συνέπεια, το μέταλλο με μεγαλύτερη συγγένεια με το ένζυμο που σχηματίζει το πιο αδιάλυτο θειώδες άλας θα είναι ο ισχυρότερος αναστολέας (Shaw 1954). Συνήθως, η ανασταλτική δράση των μετάλλων είναι μικρότερη από αυτήν των φωσφοραμιδίων (Bock & Kissel 1988). Επιπλέον, η εφαρμογή βαρέων μετάλλων σε εδάφη μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα.

Το βορικό οξύ μπορεί επίσης να αναστέλλει την υδρόλυση της ουρίας επειδή δρα ως ανάλογο υπόστρωμα. Το ένζυμο ουρεάσης έχει στη δραστική του θέση δύο άτομα νικελίου συνδεδεμένα με ένα υδροξύλιο. Ο μηχανισμός της δράσης του βορικού οξέος στην ουρεάση είναι ότι ταιριάζει συμμετρικά μεταξύ των δύο κέντρων νικελίου και δείχνει μια γεωμετρική ομοιότητα με το μόριο της ουρίας (Benini 2004).

Το NBTP παρεμποδίζει ισχυρά 3 ενεργές περιοχές του ενζύμου της ουρεάσης σχηματίζοντας ένα δεσμό τρισδιάστατης φύσης με δυο κέντρα νικελίου και ένα οξυγόνο από την γέφυρα καρβαμιδικού που συνδέει τα δυο μέταλλα μειώνοντας την πιθανότητα της ουρίας να συνδεθεί με το άτομο του νικελίου. Άλλα παράγωγα του φωσφοραμιδίου παρόμοια με το NBPT, παρουσιάζουν τους ίδιους μηχανισμούς δράσης (Bock & Kissel 1988, Kiss & Simihaian 2002, Domínguez et al. 2008).

Το NBPT δεν είναι ο άμεσος αναστολέας της ουρεάσης, πρέπει να μετατραπεί σε N-(n-butyl) phosphoric triamide (NBPTO). Οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτήν τη μετατροπή δεν είναι σαφείς, αλλά η αντίδραση είναι ταχύτερη σε εδάφη με αερόβιες συνθήκες (συμβαίνουν σε λεπτά ή ώρες) και μπορεί να διαρκέσουν ημέρες κάτω από αναερόβιες συνθήκες (Watson 2000). Το NBPT έχει δείξει υψηλότερη αποτελεσματικότητα στην καθυστέρηση της υδρόλυσης ουρίας από την άμεση εφαρμογή του NBPTO, που υποβαθμίζεται ταχύτερα (Hendrickson & Douglass 1993).

Επίδραση στη βλάστηση και το μεταβολισμό των φυτών

Οι αναστολείς της ουρεάσης καθυστερούν την υδρόλυση της ουρίας στο έδαφος και, με αυτόν τον τρόπο, μειώνουν την ένταση που το pH του εδάφους και η συγκέντρωση $\text{NH}_3 / \text{NH}_4^+$ αυξάνονται στην περιοχή γύρω από τον κόκκο λιπάσματος, μειώνοντας έτσι την τοξική επίδραση της υψηλής συγκέντρωσης αμμωνίας στη βλάστηση των σπόρων (Grant & Bailey 1999, Grant et al. 2011, Xiaobin et al. 1955). Οι Grant και Bailey (1999) ανέφεραν μείωση της ζημιάς στους σπόρους λόγω της προσθήκης αναστολέα ουρεάσης στην ουρία σε σύγκριση με την ουρία χωρίς προσθήκη αναστολέα, γεγονός που αύξησε την πυκνότητα και πέτυχε μια υψηλότερη απόδοση κριθαριού. Σε μια μελέτη με ρύζι, οι Qi et al. (2012) έδειξαν ότι η προσθήκη αναστολέα στην ουρία μείωσε τη ζημιά στη βλάστηση των σπόρων και αύξησε την ανάπτυξη των ριζών και σε άλλη μελέτη μείωσε τη βλάβη στα φυτά κανόλα, με αποτέλεσμα την υψηλότερη απόδοση (Grant et al. 2011).

Σταθερότητα, διάρκεια ζωής και αποτελεσματικότητα των αναστολέων ουρεάσης

Το NBPT υποβαθμίζεται με την πάροδο του χρόνου όταν εφαρμόζεται στην ουρία, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη διάρκεια ζωής του ενισχυμένου λιπάσματος (Watson 2008, Gioacchini et al. 2000). Οι Watson et al. (2008) διαπίστωσαν ότι ο χρόνος ημιζωής αποθήκευσης της επεξεργασμένης με NBPT ουρίας ήταν 20 εβδομάδες στους 25 °C, αλλά η υποβάθμιση του NBPT ήταν πολύ μικρότερη όταν η ουρία αποθηκεύτηκε στους 4 °C. Ο Soares (2011) διαπίστωσε ότι η ουρία επικαλυμμένη με NBPT θα μπορούσε να αποθηκευτεί με ασφάλεια για 12 εβδομάδες στους 25 °C αλλά μόνο 4 εβδομάδες στους 35 °C. Ενώ αντίθετα, όταν το NBPT προστέθηκε στο τήγμα της ουρίας

πριν την κοκκοποίηση, η σταθερότητα ήταν μεγαλύτερη από όταν χρησιμοποιήθηκε ως επικάλυψη στους κόκκους της ουρίας (Watson 2008)

Το NBPT υφίσταται επίσης μικροβιακή υποβάθμιση στο έδαφος. Ο ρυθμός υποβάθμισης εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εδάφους, τη μικροβιακή δραστηριότητα και το pH του εδάφους. Το NBPTO, το προϊόν της οξείδωσης του NBPT, είναι πιο ευαίσθητο σε υποβάθμιση από το NBPT (Engel 2015), το οποίο εξηγεί γιατί ο αναστολέας είναι πιο σταθερός στο αποθηκευμένο λίπασμα από ό,τι όταν εφαρμόζεται στο έδαφος.

Ο Soares (2011) παρατήρησε ότι η ουρία με αναστολέα ουρεάσης μείωσε την εξάτμιση της NH_3 κατά 52-53%, σε σύγκριση με την απλή ουρία, σε εδάφη με pH (σε διάλυμα 0,01 M CaCl_2) 5,6 και 6,4, αλλά η μείωση ήταν μόνο 18% στο pH του εδάφους 4,5. Κατά συνέπεια, η αποτελεσματικότητα του αναστολέα ουρεάσης ήταν χαμηλότερη σε πολύ όξινα εδάφη από ότι σε ουδέτερα ή αλκαλικά εδάφη στη μετα-ανάλυση των Silva et al. (2017). Σε ζεστά εδάφη, η υποβάθμιση μπορεί να ξεκινήσει μετά από δύο έως τέσσερις ημέρες (Soares 2012) αλλά μπορεί να χρειαστούν έως και 10 ή 15 ημέρες σε εδάφη χαμηλής θερμοκρασίας, όπως αυτά σε περιοχές με εύκρατες κλιματικές συνθήκες (Watson 2008).

Συνήθως η αποτελεσματικότητα των αναστολέων ουρεάσης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την βασική απώλεια NH_3 ενός λιπάσματος με βάση την ουρία (Pan et al. 2016, Silva et al. 2017, Abalos et al. 2014, Linqvist et al. 2013). Με αυτήν την προσέγγιση, η αποτελεσματικότητα του αναστολέα ουρεάσης στη μείωση της απώλειας NH_3 θα είναι στο μέγιστο όταν οι συνθήκες για απώλεια NH_3 από την ουρία είναι ακραίες. Η ενσωμάτωση της ουρίας στο έδαφος και η άρδευση είναι πρακτικές διαχείρισης που μειώνουν αποτελεσματικά την απώλεια NH_3 από την ουρία (Holcomb et al. 2011, Rochette et al. 2013, Pan et al. 2016).

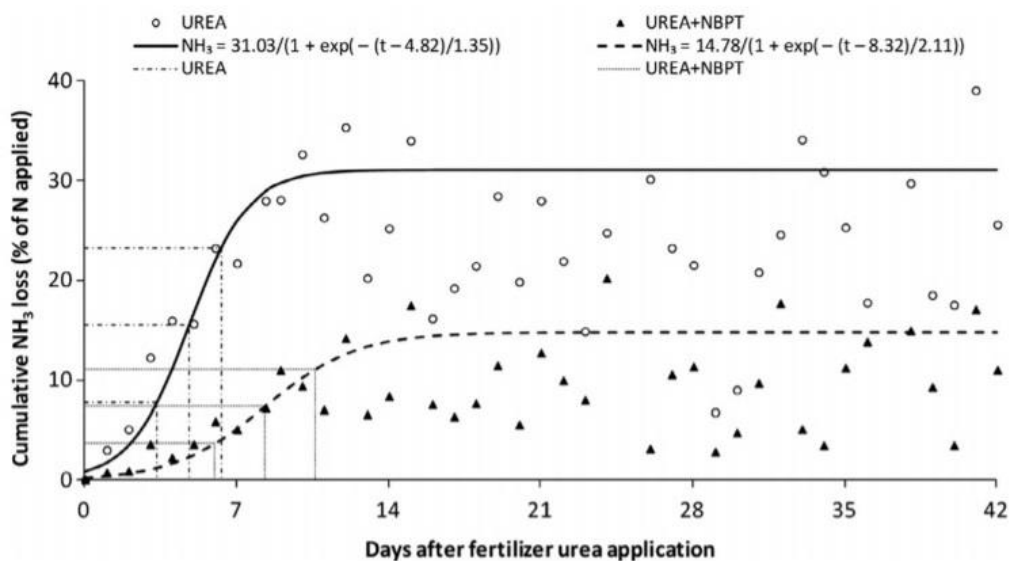
Η τμηματική (split) εφαρμογή ουρίας μπορεί είτε να ελαττώσει είτε να μην επηρεάσει τη μείωση της απώλειας NH_3 (Pan et al. 2016). Τέτοιες ασυνέπειες σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες και τις συνθήκες του εδάφους κατά τη διάρκεια της εφαρμογής λιπασμάτων. Επομένως, η αποτελεσματικότητα του αναστολέα ουρεάσης στη μείωση της απώλειας NH_3 στην τμηματική εφαρμογή εξαρτάται από τις συνθήκες εφαρμογής λιπάσματος και το μέγεθος της απώλειας NH_3 . Από την άλλη πλευρά, αυξάνοντας τα επίπεδα N (Pan et al. 2016, Turner et al. 2010), η εφαρμογή ουρίας πάνω σε υπολείμματα καλλιεργειών ή σε εδάφη με υψηλή υγρασία και θερμοκρασία, συνήθως προκαλεί αυξημένη απώλεια NH_3 (Cantarella et al. 2008, Pan et

al. 2016) και ως εκ τούτου, κάνει τη χρήση αναστολέων ουρεάσης περισσότερο ελκυστική ως εργαλείο για την αύξηση της αποτελεσματικότητας χρήσης αζώτου (NUE). Αντίθετα, χαμηλές θερμοκρασίες ή ξηρές συνθήκες μπορεί να περιορίσουν την υδρόλυση ουρίας και, συνεπώς, τις απώλειες NH_3 (Cantarella et al. 2008, Schraml 2016).

Δεδομένου ότι οι απώλειες NH_3 συνήθως συγκεντρώνονται τις πρώτες 2-5 ημέρες μετά την εφαρμογή ουρίας, η ιδανικές συνθήκες για την απόδοση των αναστολέων ουρεάσης είναι είτε η μηχανική της ενσωμάτωση, είτε βροχή ή άρδευση έως 5-7 ημέρες μετά τη λίπανση με ουρία που περιέχει αναστολέα, ενώ το ανασταλτικό δυναμικό παραμένει υψηλό, ανάλογα με τη θερμοκρασία του εδάφους ή την υγρασία. Πράγματι, τα αποτελέσματα των μελετών πεδίου έδειξαν μειώσεις της εξάτμισης της NH_3 υψηλότερες από 85%, λόγω της παρουσίας αναστολέα ουρεάσης, όταν εμφανίστηκε βροχή εντός 5 ημερών μετά την εφαρμογή της ουρίας στον αραβόσιτο. Οι απώλειες NH_3 της μη επεξεργασμένης ουρίας ήταν υψηλές: 37% του εφαρμοσμένου N στον αραβόσιτο, ενώ η αντίστοιχη απώλεια NH_3 της ουρίας με τον αναστολέα ουρεάσης ήταν 5% (Chien 2009).

Επίδραση των αναστολέων ουρεάσης στις απώλειες λόγω εξάτμισης NH_3 και στις αποδόσεις

Οι Silva et al. (2017) παρατήρησαν μια συσσωρευμένη απώλεια NH_3 31% για την ουρία και 15% για την ουρία με αναστολέα ουρεάσης σε ένα ευρύ φάσμα εδάφους, καιρού και διαχειρίσεων. Η μείωση της υδρόλυσης της ουρίας από τον αναστολέα ουρεάσης επιβραδύνει την απώλεια NH_3 τις ημέρες μετά τη λίπανση. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται ότι περίπου το 50% της συνολικής απώλειας NH_3 εμφανίστηκε 5 και 8 ημέρες μετά τη λίπανση με ουρία και ουρία + NBPT, αντίστοιχα (Εικόνα 4).



Εικόνα 4. Συνολική απώλεια NH_3 (% του N που εφαρμόστηκε) μέσα σε 42 ημέρες από την εφαρμογή ουρίας και ουρίας με αναστολέα ουρεάσης NBPT. (Πηγή : Silva et al. 2017)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα από τέσσερις ανεξάρτητες μετα-αναλύσεις σχετικά με την επίδραση των λιπασμάτων με αναστολείς ουρεάσης ή νιτροποίησης και ελεγχόμενης απελευθέρωσης στη μείωση της απώλειας NH_3 λόγω εξάτμισης, στην αύξηση των αποδόσεων και στην αύξηση της αποτελεσματικότητας χρήσης N (NUE).

Πίνακας 8. Συλλογή δεδομένων τεσσάρων μετα-αναλύσεων σχετικά με την επίδραση των αναστολέων ουρεάσης (UI), των λιπασμάτων ελεγχόμενης αποδέσμευσης (CRF) και των αναστολέων νιτροποίησης (NI) στις απώλειες NH_3 , στις αποδόσεις και στην αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE) σε σχέση με την απλή ουρία (%) (Πηγή: Candarella et al. 2018)

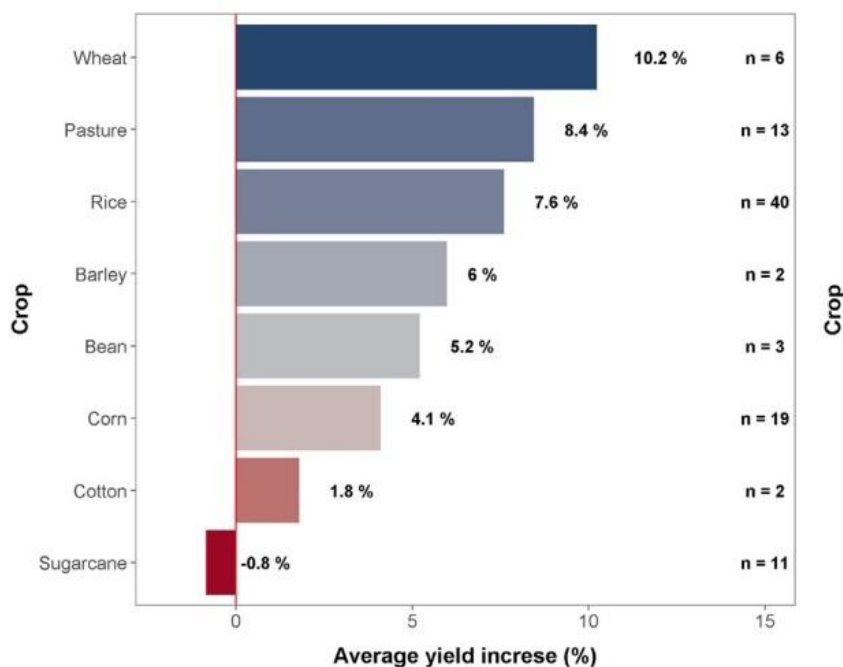
Meta-analyses papers	NH ₃ loss			Crop yield			NUE		
	UI	CRF	NI	UI	CRF	NI	UI	CRF	NI
Linguist BA et al.				5,0	6,5	6,0	5,0	2,0	13,0
Abalos D. et al				10,0		5,0	12,0		5,0
Pan B. et al.	-54,0	-68,0	38,0						
Silva AGB et al.	-52,0			5,2					

Συνοπτικά, ο εμπλουτισμός της ουρίας με αναστολέα ουρεάσης μείωσε την απώλεια NH_3 από 52 έως 54% σε σύγκριση με την ουρία χωρίς αναστολέα ουρεάσης.

Παρά το υψηλό δυναμικό των αναστολέων ουρεάσης να μειώσουν την απώλεια NH₃ (Cantarella et al. 2008, Pan et al.2016, Silva et al. 2017, Soares et al. 2012, Mira et al. 2017), η επίδραση στις αποδόσεις και στην αποδοτικότητα χρήσης N (NUE) είναι πολύ πιο περιορισμένη και κυμαίνεται από 5 έως 10%, και από 5 έως 12% αντίστοιχα.

Ο λόγος είναι ότι, σε πολλές περιπτώσεις, το μεγαλύτερο μέρος του N που απορροφάται από τις καλλιέργειες προέρχεται από το έδαφος, ενώ το άζωτο από την λίπανση είναι ένα συμπλήρωμα. Με αυτόν τον τρόπο, το N που αποθηκεύεται από τον αναστολέα ουρεάσης ενδέχεται να μην μεταφράζεται σε αυξήσεις απόδοσης (Silva et al. 2017). Ωστόσο, το N που διατηρείται στο σύστημα φυτού-εδάφους, ως συνέπεια της χρήσης αναστολέων ουρεάσης, μειώνοντας τις απώλειες του NH₃, συμβάλλει στη δημιουργία αποθεμάτων N του εδάφους. Επιπλέον, η λιγότερη εξάτμιση της NH₃ αποφέρει και περιβαλλοντικά οφέλη.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει ότι σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει ανά καλλιέργεια, το κέρδος απόδοσης κυμάνθηκε από -0,8% στο ζαχαροκάλαμο έως 10,02% στο σιτάρι. Οι καλλιέργειες δημητριακών έδειξαν τις υψηλότερες μεταβολές στις αποδόσεις λόγω της προσθήκης αναστολέα ουρεάσης, καθώς έχουν βραχύ κύκλο ανάπτυξης και ανταποκρίνονται θετικά στην αζωτούχο λίπανση.



Εικόνα 5. Μέση μεταβολή των αποδόσεων ανά καλλιέργεια μετά την εφαρμογή ουρίας με αναστολέα ουρεάσης(NBPT) σε σχέση με την εφαρμογή απλής ουρίας.(Πηγή: Candarella et al. 2018)

1.2.2.2. Αναστολείς νιτροποίησης

Σύμφωνα με τους Ruser και Schulz (2015), οι αναστολείς νιτροποίησης είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη μείωση των εκπομπών N_2O και των απωλειών NO_3^- λόγω έκπλυσης από καλλιεργήσιμα εδάφη που επιτρέπουν την αύξηση της NUE των συστημάτων καλλιέργειας. Οι περισσότεροι εμπορικοί αναστολείς νιτροποίησης αναστέλλουν την ενζυματική δραστηριότητα του AMO, του πρώτου ενζύμου που εμπλέκεται στη νιτροποίηση (Subbarao et al., 2006).

Η αναστολή του πρώτου σταδίου της οξειδωσης της NH_3 είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος μείωσης των εκπομπών N_2O , καθώς αυτή η παρέμβαση εμποδίζει όλες τις περαιτέρω ενζυματικές διεργασίες σχηματισμού N_2O άμεσα ή έμμεσα χωρίς να διακινδυνεύσει τη συσσώρευση NH_2OH που μπορεί να έχει τοξικές επιδράσεις στα Nitrosomonas (Agr και Stein, 2003). Οι αναστολείς νιτροποίησης μειώνουν άμεσα τους ρυθμούς νιτροποίησης και συνεπώς τη συγκέντρωση NO_3^- στο έδαφος που μπορεί να χρησιμεύσει ως υπόστρωμα για απονιτροποίηση. Κατά συνέπεια, οι δύο κύριες οδοί που είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό N_2O στα εδάφη μειώνονται σημαντικά μέσω της προσθήκης αναστολέων νιτροποίησης (Bremner and Yeomans, 1986; Ruser and Schulz, 2015). Επιπλέον, μια χαμηλότερη συγκέντρωση NO_3^- διεγείρει τους απονιτροποιητικούς μικροοργανισμούς για να μειώσει το N_2O και μετατοπίζει την αναλογία N_2 / N_2O προς υψηλότερα επίπεδα N_2 (Blackmer and Bremner, 1978; Cho and Sakdinan, 1978; Ruser et al., 2006). Έτσι, οι εκπομπές N_2O που αποδίδονται στην απονιτροποίηση μειώνονται περαιτέρω (έμμεσα), οπότε αυξάνεται η ισχύς της επίδρασης των αναστολέων νιτροποίησης σχετικά με την ατμοσφαιρική επιβάρυνση.

Εκτός από τον μετριασμό του N_2O , η συντήρηση NH_4^+ που προκαλείται από τους αναστολείς νιτροποίησης μπορεί επίσης να αποτρέψει τις απώλειες NO_3^- λόγω έκπλυσης. Λόγω του αυξημένου κινδύνου έκπλυσης του NO_3^- και ισχυρής μείωσης του διαθέσιμου προς τα φυτά N, αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό ειδικά για χονδρόκοκκα εδάφη με χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη σε συνδυασμό με έντονες βροχοπτώσεις ή άρδευση (Gaines and Gaines, 1994; Pfab et al., 2012). Μέσω της προσθήκης αναστολέων νιτροποίησης, αρκετές μελέτες επιβεβαίωσαν σημαντικά μειωμένες απώλειες N λόγω έκπλυσης από το λίπασμα με αποτέλεσμα βελτιωμένη NUE και αυξημένες οικονομικές αποδόσεις (Fangueiro et al., 2009; Federolf et al., 2016; Prasad and Power, 1995; Ruser and Schulz, 2015 Sutton et al., 1986).

Τρόπος δράσης

Έχουν περιγραφεί διάφοροι μηχανισμοί που αναστέλλουν το ίδιο το βασικό ένζυμο AMO ή επηρεάζουν την ενζυματική του δράση. Ο τρόπος δράσης των εγκεκριμένων αναστολέων νιτροποίησης κατηγοριοποιείται στις ακόλουθες ομάδες (Ruser and Schulz, 2015):

1. **Άμεση σύνδεση και αλληλεπίδραση με το AMO** (Keener and Agr, 1993). Η αναστολή του AMO μπορεί να εφαρμοστεί με ανταγωνιστική ή μη ανταγωνιστική αναστολή. Εάν η δραστική ουσία μοιάζει με NH_3 και ανταγωνίζεται τη δραστική θέση δέσμευσης του AMO, είναι ανταγωνιστική αναστολή. Εάν η προστιθέμενη ένωση δεσμεύεται σε μια δεύτερη θέση του AMO, η οποία δεν χρησιμοποιείται για δέσμευση NH_3 , και αλλάζει τον ενζυματικό σχηματισμό, η δέσμευση του υποστρώματος στην ενεργή θέση αποκλείεται ή / και η καταλυτική διαδικασία αναστέλλεται, είναι μη ανταγωνιστική αναστολή (Campbell και Reece, 2009). Οι Keener και Agr θεώρησαν ότι η δεσμευτική θέση για μη ανταγωνιστική αναστολή σε *Nitrosomonas ssp* είναι μη πολική λόγω της ανασταλτικής επίδρασης η οποία αυξάνεται καθώς ενισχύεται το μοριακό μέγεθος των υδρόφοβων αλκανίων και των αλογονωμένων υδρογονανθράκων.
2. **Αφαίρεση συμπαραγόντων (co-factors) από χηλικές ενώσεις** (Ruser and Schulz, 2015). Το AMO εντοπίζεται στη μεμβράνη των μικροοργανισμών με χαλκό (Cu) ως συμπάραγοντα (Agr et al., 2002). Η απομάκρυνση του συμπάραγοντα Cu με χηλίωση ενώσεων είναι, επομένως, ικανή να αναστέλλει το AMO (Bédard and Knowles, 1989). Ο McCarty (1999) υπέθεσε ότι αυτό το ανασταλτικό αποτέλεσμα εκτελείται με δέσμευση του Cu στην ενεργή θέση του AMO.
3. Οι αναστολείς ενζύμων που βασίζονται σε μηχανισμούς ορίζονται ως χημικές ενώσεις, οι οποίες έχουν μη αναστρέψιμη ανασταλτική δράση μετά την καταλυτική μετατροπή των ενώσεων από το κατάλληλο ένζυμο. Κυρίως, οδηγεί σε μια **μη αναστρέψιμη αναστολή του AMO**, που προκαλείται από ομοιοπολική σύνδεση του εξαιρετικά αντιδραστικού καταλυτικού προϊόντος και του οξειδωτικού ενζύμου (McCarty, 1999). Μερικά από αυτά τα εξαιρετικά δραστικά καταλυτικά προϊόντα δεσμεύονται μόνο με AMO (Hyman and Agr, 1992), ενώ άλλα δεσμεύονται ομοιοπολικά σε πολλά κυτταρικά συστατικά (Hyman et al., 1995; McCarty, 1999). Και στις δύο περιπτώσεις, μια de novo

σύνθεση μίας ή περισσότερων πρωτεϊνών είναι απαραίτητη για την εξουδετέρωση της ανασταλτικής επίδρασης. Κατά συνέπεια, η αναστολή γίνεται πιο εμφανής, όσο περισσότερες πρωτεΐνες πρέπει να συντεθούν *de novo* (Hyman et al., 1995).

Μια ακόμη σημαντική κατηγορία αναστολέων νιτροποίησης είναι ετεροκυκλικές ενώσεις N, ενώ ο τρόπος δράσης τους δεν έχει ακόμη αποσαφηνιστεί (McCarty, 1999). Οι McCarty και Bremner (1989) έδειξαν ότι οι ετεροκυκλικές ενώσεις N με δύο ή τρία παρακαίμενα άτομα N, ανέστειλαν την οξειδωση της NH_3 στο έδαφος σημαντικά σε σύγκριση με τις ετεροκυκλικές ενώσεις N με λιγότερα ή χωρίς παρακαίμενα άτομα N.

Διαφορετικοί αναστολείς νιτροποίησης ποικίλλουν στον τρόπο δράσης τους και ως επί το πλείστον, δεν είναι δυνατόν να ταξινομηθεί ένας αναστολέας νιτροποίησης αυστηρά σε μία ομάδα αναστολέων λόγω της δραστηκής ένωσης ή των δραστικών ενώσεων που επηρεάζει/επηρεάζουν πολλούς τρόπους δράσης ταυτόχρονα (Ruser and Schulz, 2015).

Γενικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των αναστολέων νιτροποίησης

Όπως συνοψίζεται από τους Subbarao et al. (2006), η αποτελεσματική αναστολή της νιτροποίησης από αναστολείς νιτροποίησης στο πεδίο σχετίζεται με πολλές αλληλεπιδράσεις με φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς παράγοντες. Οι αναστολείς νιτροποίησης διαφέρουν ως προς την κινητικότητά τους και την παραμονή τους στα εδάφη λόγω διαφορετικών χημικών χαρακτηριστικών όπως η υδατοδιαλυτότητα και η πτητικότητα. Επομένως, η αποτελεσματικότητά τους ποικίλλει κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Γενικά, η ίδια κινητικότητα στα εδάφη με το NH_4^+ είναι βολική, αλλά μόνο μερικοί από τους αναστολείς νιτροποίησης έχουν αυτήν την ιδιότητα (Subbarao et al., 2006). Επιπλέον, οι αναστολείς νιτροποίησης που είναι πτητικοί δεν έχουν μεγάλη επιμονή στο έδαφος λόγω της απώλειας εξάτμισης μέσω των πόρων του εδάφους. Ωστόσο, αναστέλλουν τη νιτροποίηση πιο γρήγορα από τους αναστολείς με υψηλότερη επιμονή (Ashworth et al., 1977).

Εκτός από τα χημικά χαρακτηριστικά τους, οι αναστολείς νιτροποίησης επηρεάζονται έντονα από περιβαλλοντικές συνθήκες, ειδικά από παράγοντες του εδάφους, οι οποίοι επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά τους διαφορετικά. Οι Irigoyen

et al. (2003) ανέφεραν ότι η θερμοκρασία του εδάφους είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για την επιμονή των αναστολέων στα εδάφη. Οι περισσότερες μελέτες παρατήρησαν μείωση της σταθερότητας των αναστολέων νιτροποίησης με αυξανόμενες θερμοκρασίες εδάφους. Σε θερμοκρασία εδάφους ≤ 5 °C, η νιτροποίηση μπορεί να ανασταλεί μέσω προσθέτων έως έξι μήνες (Slangen and Kerkhoff, 1984; Zerulla et al., 2001). Από θερμοκρασίες εδάφους άνω των 10 °C, υπάρχει γραμμική μείωση της αποτελεσματικότητας της αναστολής και σε θερμοκρασίες ≥ 25 °C, η συντήρηση NH_4^+ συμβαίνει μόνο δύο έως τρεις εβδομάδες για τους περισσότερους από τους αναστολείς, όπου ειδικά οι πτητικοί αναστολείς είναι λιγότερο σταθεροί σε υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας (Prasad and Power, 1995; Subbarao et al., 2006; Zerulla et al., 2001). Ο αρνητικός συσχετισμός μεταξύ της θερμοκρασίας του εδάφους και της ανασταλτικής επίδρασης δικαιολογείται από τη μείωση της επιμονής και την αυξανόμενη βιολογική δραστηριότητα των νιτροποιητών σε υψηλότερες θερμοκρασίες εδάφους.

Λόγω των διαφορετικών χημικών χαρακτηριστικών τους, οι αναστολείς νιτροποίησης επηρεάζονται διαφορετικά από την υφή και την οργανική ύλη του εδάφους (Slangen and Kerkhoff, 1984). Σε γενικές γραμμές, έχει αναφερθεί ότι οι παρεμποδιστές νιτροποίησης έχουν χαμηλότερη επιμονή και αποτελεσματικότητα σε αργιλώδη εδάφη και όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη ($\geq 1\%$). Αυτό οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο απορρόφησης και στο ρυθμό αποσύνθεσης των αναστολέων νιτροποίησης (McClung and Wolf, 1980). Κατά συνέπεια, η απορρόφηση των αναστολέων νιτροποίησης από την οργανική ύλη του εδάφους μειώνει την κινητικότητά τους, την πτητικότητα και τη βιοδραστικότητα που οδηγεί σε μειωμένη ανασταλτική επίδραση (Keeney, 1986). Επιπλέον, οι πτητικοί αναστολείς έχουν μειωμένη αποτελεσματικότητα όσο υψηλότερο είναι το πορώδες του εδάφους.

Συνήθως, οι αναστολείς νιτροποίησης δείχνουν υψηλότερο δυναμικό αναστολής με την υγρασία του εδάφους κάτω από το σημείο κορεσμού, πιθανώς λόγω μειωμένης δραστηριότητας των νιτροποιητών (Subbarao et al., 2006), όπου η υδατοδιαλυτότητα των αναστολέων νιτροποίησης είναι καθοριστική. Δεδομένου ότι όσο υψηλότερη είναι η διαλυτότητα στο νερό, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος έκπλυσης και, στη συνέχεια, τόσο χαμηλότερη είναι η ανασταλτική επίδραση μετά την διαβροχή του εδάφους μέσω έντονων βροχοπτώσεων ή άρδευσης (Ruser and Schulz, 2015; Zerulla et al., 2001). Επιπλέον, οι πτητικοί αναστολείς καθίστανται πιο ασταθείς σε κορεσμένα εδάφη λόγω υψηλότερης υδρόλυσης και πτητικοποίησης (Hendrickson and Keeney, 1979; Slangen and Kerkhoff, 1984).

Το pH του εδάφους επηρεάζει τη συγκρότηση των νιτροποιητικών οργανισμών και κατά συνέπεια η αποτελεσματικότητα των αναστολέων νιτροποίησης εξαρτάται έμμεσα από το ποια ομάδα νιτροποιητών επηρεάζεται κυρίως από τον αναστολέα. Επιπλέον, η χημική σταθερότητα και αποτελεσματικότητα των αναστολέων νιτροποίησης ποικίλλει ανάλογα με το pH του εδάφους, οπότε ένα εύρος pH από 3 έως 7 καλύπτεται από τους περισσότερους εμπορεύσιμους αναστολείς νιτροποίησης (Slangen and Kerkhoff, 1984; Subbarao et al., 2006).

Οι αναστολείς νιτροποίησης ως στρατηγική για τον μετριασμό του N₂O

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, λόγω του αριθμού των χημικών, φυσικών και βιολογικών παραγόντων που επηρεάζουν διαφορετικά την ανασταλτική αποτελεσματικότητα του κάθε αναστολέα νιτροποίησης, αναφέρθηκε ένα ευρύ φάσμα δυναμικών μείωσης N₂O. Ωστόσο, πολλές μελέτες έχουν δείξει με συνέπεια, ότι οι αναστολείς νιτροποίησης μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές N₂O από οργανική ή ανόργανη λίπανση (Ruser and Schulz, 2015). Ωστόσο, το ύψος των εκπομπών N₂O που αναφέρθηκε μετά τη λίπανση, καθώς και οι δυνατότητες μείωσής του μέσω προσθήκης αναστολέα νιτροποίησης διέφεραν έντονα λόγω διαφορετικών πειραματικών συνθηκών. Οι Ruser και Schulz (2015) ανέφεραν το υψηλότερο δυναμικό μείωσης των εκπομπών N₂O για το 1,2,4 Triazole και 3-Methylpyrazole (TZ & MP) με 55% σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο λίπασμα (n = 2), ακολουθούμενο από dicyandiamide (DCD) με 40% (n = 79), 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) 34% (n = 17), νιτραπυρίνη 32% (n = 12) και 3,4-dimethylpyrazole succinic (DMPSA) 28% (n = 1).

Εμπορεύσιμοι αναστολείς νιτροποίησης

3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP)

Ο Wissemeyer (αναφερόμενος στους Ruser and Schulz, 2015) υπέθεσε ότι ο τρόπος δράσης του DMPP, ο οποίος ανήκει σε ετεροκυκλικές ενώσεις N με δύο παρακείμενα άτομα N, αναφέρεται σε χηλικές ενώσεις χαλκού. Το DMPP, χρησιμοποιήθηκε εντατικά και δοκιμάστηκε στη γεωργία τις τελευταίες δεκαετίες και έχει επιβεβαιωθεί ως περιβαλλοντικά ασφαλές από τοξικολογικές και οικοτοξικολογικές δοκιμές (Andreae, 1999; Roll, 1999). Επιπλέον, δεν εντοπίστηκαν αρνητικές επιπτώσεις στα καλλιεργούμενα φυτά (Zerulla et al., 2001). Έτσι, το DMPP αποδείχθηκε ως κατάλληλος αναστολέας νιτροποίησης, ο οποίος βελτιώνει τις

οικονομικές και οικολογικές απαιτήσεις μειώνοντας έντονα τις απώλειες έκπλυσης NO_3 και τις εκπομπές N_2O από ανόργανα λιπάσματα με συνέπεια τη βελτίωση της απόδοσης βιομάζας και σιτηρών (Subbarao et al., 2006; Weiske et al., 2001).

Σε σύγκριση με άλλους αναστολείς νιτροποίησης, το DMPP έχει την ίδια κινητικότητα στα εδάφη με το NH_4^+ που αποτρέπει τον διαχωρισμό αυτών των δύο ενώσεων. Αυτό το μεγάλο όφελος οδηγεί σε ισχυρότερη αναστολή της οξείδωσης της NH_3 (McCarty, 1999; Prasad and Power, 1995; Serna et al., 2000; Yu et al., 2007; Zerulla et al., 2001). Με βάση τα αποτελέσματα των Azam et al. (2001), οι Ruser και Schulz (2015) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο χωρικός διαχωρισμός του DMPP απ το N του λιπάσματος μετά την εφαρμογή εξαρτάται από την υφή του εδάφους και την περιεκτικότητα σε χούμο. Υποθέτουν ότι ο διαχωρισμός του NH_4^+ και του DMPP μπορεί να είναι ταχύτερος καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα σε άργιλο λόγω μειωμένου δυναμικού απορρόφησης κατιόντων. Επιπλέον, περίμεναν έναν επιταχυνόμενο διαχωρισμό αυτών των δύο ενώσεων, καθώς μειώνει την ποσότητα των συμπλόκων αργίλου-χούμου λόγω της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας θέσεων προσρόφησης σε ανόργανα αργιλικά ή οργανικά μόρια, γεγονός που οδηγεί σε καθυστερημένη διάχυση του DMPP.

Ωστόσο, ο πιο σημαντικός παράγοντας στη διάρκεια της αναστολής της νιτροποίησης μέσω των αναστολέων νιτροποίησης είναι η θερμοκρασία του εδάφους (Irigoyen et al., 2003). Μια μελέτη επώασης από τους Zerulla et al. (2001) χωρίς φυτά έχει δείξει, ότι στους 5°C το DMPP ανέστειλε τη νιτροποίηση για 140 ημέρες όπου η νιτροποίηση του προστιθέμενου NH_4^+ από τον μάρτυρα χωρίς DMPP ολοκληρώθηκε εντός αυτού του χρονικού πλαισίου. Σε θερμότερες συνθήκες εδάφους 20°C η νιτροποίηση ολοκληρώθηκε εντός 7-21 ημερών από τον μάρτυρα χωρίς αναστολέα νιτροποίησης και εντός 40 ημερών με το DMPP. Οι Chen et al. (2010) ανέφεραν παρόμοια αποτελέσματα σχετικά με τη διατήρηση του NH_4^+ από ένα πείραμα επώασης σε ένα αργιλοπηλώδες έδαφος με ή χωρίς DMPP. Επιπλέον, ανίχνευσαν τις εκπομπές N_2O και παρατήρησαν σημαντική μείωση των εκπομπών N_2O λόγω του DMPP σε σύγκριση με τον μάρτυρα υπό διαφορετικές θερμοκρασίες εδάφους (5°C , 15°C και 25°C) και επιπέδου υγρασίας εδάφους (40% και 60% πληρότητα).

Τα αποτελέσματα 136 μελετών πεδίου κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και συστήματα καλλιέργειας επιβεβαίωσαν ότι το DMPP μπορεί να αυξήσει την απόδοση της καλλιέργειας για αρκετές γεωργικές καλλιέργειες και να αυξήσει τη μέση απόδοση σπόρου αραβοσίτου κατά 0,24 τόνους/ha (Pasda et al., 2001). Γενικά, μια

μεγαλύτερη αύξηση της απόδοσης μέσω της προσθήκης DMPP παρατηρήθηκε στα αμμώδη εδάφη, όσο υψηλότερο ήταν το επίπεδο βροχόπτωσης και κατά συνέπεια όσο υψηλότερος ήταν ο κίνδυνος απώλειας N λόγω έκπλυσης NO_3^- .

Οι Weiske et al. (2001) δεν εντόπισαν καμία επίδραση τόσο του DMPP όσο και του DCD στην απόδοση του κριθαριού, του αραβοσίτου και του χειμερινού σιταριού σε ένα τριετές πείραμα πεδίου. Τέλος, με βάση κάποιες μετα-αναλύσεις, οι Yang et al. (2016) παρατήρησαν υψηλότερη απόδοση DMPP σε εδάφη με ουδέτερο pH.

3,4-dimethylpyrazole succinic (DMPSA)

Η δραστική μείωση της αποτελεσματικής αναστολής με την αύξηση των θερμοκρασιών του εδάφους καταδεικνύει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των αναστολέων νιτροποίησης κάνοντάς τους πιο επίμονους. Ο αναστολέας νιτροποίησης DMPSA αναπτύχθηκε για να συνδυάσει το γενικά γνωστό ανασταλτικό αποτέλεσμα του DMP με τη συμπεριφορά απελευθέρωσης του οργανικού οξέος ηλεκτρικό οξύ. Επομένως, πρέπει να προηγηθεί μια μικροβιακή αποικοδόμηση του ηλεκτρικού οξέος πριν από την απελευθέρωση της δραστικής ανασταλτικής ουσίας και θα πρέπει να οδηγήσει σε καθυστερημένη και παρατεταμένη ανασταλτική δράση (Pacholski et al., 2016). Λόγω του γεγονότος ότι η αντιδραστική ένωση αυτού του αναστολέα νιτροποίησης είναι παρόμοια με το DMPP, μπορεί να υποθεθεί ότι και οι δύο εμφανίζουν τον ίδιο τρόπο δράσης.

Μέχρι τώρα, λίγες μόνο μελέτες εξέτασαν την επίδραση του DMPSA όσον αφορά τις εκπομπές N_2O , τη δυναμική του N_{min} στο έδαφος, το NUE και την απόδοση. Ωστόσο, το DMPSA αποδείχθηκε ότι καθυστερεί την νιτροποίηση και μείωσε τις εκπομπές N_2O σε συνδυασμό με ανόργανα λιπάσματα (Pacholski et al., 2016). Η προσθήκη DMPSA σε ουρία ή ασβεστόχο νιτρική αμμωνία (CAN) μείωσε τις εκπομπές N_2O σε μια έρευνα πεδίου και ένα πείραμα επώασης μεταξύ 60% και 90% σε σύγκριση με το συμβατικό λίπασμα (Pacholski et al., 2016). Ομοίως, οι Guardia et al. (2018) εντόπισαν καθυστερημένη νιτροποίηση και σημαντική μείωση των εκπομπών N_2O μέσω της προσθήκης DMPSA σε σύγκριση με τη λίπανση χωρίς αναστολέα νιτροποίησης κατά την περίοδο καλλιέργειας αραβοσίτου. Σε ένα ισπανικό πείραμα πεδίου, η προσθήκη DMPSA πέτυχε σημαντική μείωση των κλιμακούμενων, λόγω απόδοσης, εκπομπών N_2O παρά την σημαντική αύξηση των αποδόσεων αραβοσίτου ή βιομάζας (Guardia et al., 2017; Pacholski et al., 2016).

Nitrapyrin

Η Νιτραπυρίνη είναι μια υποκατεστημένη ετεροκυκλική ένωση N η οποία είναι πολύ διαλυτή σε οργανικούς διαλύτες (McCarty and Bremner, 1989).

Θεωρείται ότι ο κύριος τρόπος αναστολής AMO είναι η Cu-χηλική επίδραση αυτής της ενεργού ένωσης και προκαλείται από το χλωριούχο Cl⁻ (χλωριούχο) και τη CCL₃- ομάδα η οποία αντικαθίσταται στο άτομο C που προσδένεται στο άτομο N του δακτυλίου. Ωστόσο, οι Vannelli και Hooper παρατήρησαν μια μη ανταγωνιστική καθώς και μια φαινομενικά αδύναμη αναστολή στον μηχανισμό του AMO από τη Νιτραπυρίνη. Έτσι, μια αυστηρή ταξινόμηση της νιτραπυρίνης σε μία μόνο ομάδα ανασταλτικού μηχανισμού είναι ανέφικτη. Λόγω της σχετικά υψηλής τάσης ατμών, απαιτείται ενσωμάτωση σε βάθος εδάφους 5 έως 10 cm για να αποφευχθεί η εξάτμιση αυτού του αντιδραστικού υποστρώματος (Subbarao et al., 2006). Επιπλέον, η απελευθέρωση της νιτραπυρίνης στο περιβάλλον ήταν πολύ συζητήσιμη λόγω του ότι ανήκει στις οργανικές ενώσεις χλωρίου (Zerulla et al., 2001). Ο Trenkel (1997) επιβεβαίωσε ένα διαφορετικό τοξικολογικό πρόβλημα και αναφέρθηκε σε διαβρωτικές και εκρηκτικές ιδιότητες της νιτραπυρίνης.

Η Νιτραπυρίνη περιορίζεται στην ανασταλτική της αποτελεσματικότητα λόγω της μέσης κινητικότητας στο έδαφος (χαμηλότερη από το NH₄⁺) (Pasda et al., 2001) και της τάσης της να συνδέεται με την οργανική ουσία στα εδάφη (Keeney, 1986). Οι Hendrickson και Keeney (1987) και Sahrawat κ.α. (1987) ανέφεραν ότι η επίδραση της Νιτραπυρίνης ως αναστολέας νιτροποίησης στα οργανικά εδάφη είναι αναποτελεσματική λόγω της προσρόφησης από την οργανική ουσία και ακολουθείται από μειωμένη κινητικότητα, βιοδραστικότητα, αποτελεσματικότητα και παρατεταμένη παραμονή στο έδαφος. Όσον αφορά το pH του εδάφους, αναφέρθηκε ότι η νιτραπυρίνη είναι σταθερή σε εύρος μεταξύ 2,7 και 11,9 (Slangen και Kerkhoff, 1984). Παρατηρήθηκε, ότι η νιτραπυρίνη ήταν πιο αποτελεσματική στο ελαφρώς όξινο έως ουδέτερο επίπεδο pH, οπότε η υψηλότερη ευαισθησία των νιτροποιητών έναντι της νιτραπυρίνης σε αυτό το εύρος προκαλείται σε μεγάλο βαθμό από τη σχέση μεταξύ του pH και της οικολογίας των στοχευμένων οργανισμών νιτροποίησης (Hendrickson and Keeney, 1978; Slangen and Kerkhoff, 1984). Η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους έχει επίσης αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα της νιτραπυρίνης. Η υδρόλυση αυτού του αναστολέα νιτροποίησης αυξάνεται με την υψηλότερη υγρασία του εδάφους και τη θερμοκρασία του εδάφους (Hendrickson and Keeney, 1979). Κανονικά, η νιτραπυρίνη

αποσυντίθεται εντός 30 ημερών υπό θερμές εδαφικές συνθήκες, ωστόσο, είναι πολύ ανθεκτική και σταθερή κάτω από ψυχρότερες εδαφικές συνθήκες με χρόνο ημιζωής 43 έως 77 ημέρες στους 10 °C, αλλά μόνο 9 έως 16 ημέρες στους 20 °C (Slangen and Kerckhoff, 1984).

Dicyandiamide (DCD)

Η δραστική ένωση DCD ανιχνεύθηκε ως αναστολέας νιτροποίησης στις αρχές της δεκαετίας του 1920 (Prasad et al., 1971). Ο κυρίως ανασταλτικός μηχανισμός του DCD είναι η επίδραση της χηλικής ένωσης χαλκού. Με αυτόν τον τρόπο, το DCD έχει συγκεκριμένη βακτηριοστατική και καμία βακτηριοκτόνο επίδραση στο *Nitrosomonas*, που σημαίνει ότι το DCD καταστέλλει μόνο τη βιολογική δραστηριότητα, ούτε σκοτώνει βακτήρια ούτε έχει γενική ανασταλτική επίδραση στη βιολογική δραστηριότητα, εξαιρουμένης της νιτροποίησης (Amberger, 1989, 1986). Η υποβάθμιση και η αποδοτικότητα του DCD εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, την υγρασία, την υφή, το pH και την ποσότητα οργανικής ουσίας του εδάφους.

Μια μελέτη που περιελάμβανε έξι διαφορετικά εδάφη καθόρισε τον χρόνο ημιζωής του DCD σε διαφορετικές θερμοκρασίες εδάφους (Kelliher et al., 2008). Ο χρόνος ημιζωής του DCD ήταν σχεδόν 120 ημέρες σε μέση θερμοκρασία εδάφους 8 °C, αλλά μειώθηκε έντονα με την αύξηση των θερμοκρασιών του εδάφους και κατέγραψε χρόνο ημιζωής περίπου 20 ημέρες στους 20 °C. Ομοίως, ο Vilsmeier (1980) ανέφερε μια ανασταλτική επίδραση του DCD έως και 80 ημέρες σε θερμοκρασία εδάφους 8 °C και μια ταχεία μείωση της επιμονής του σε 20 ή 40 ημέρες όταν οι θερμοκρασίες αυξήθηκαν στους 20 °C. Οι Irigoyen et al. (2003) επιβεβαίωσαν αυτά τα ευρήματα και εντόπισαν μια ανασταλτική δράση του DCD για 3 μήνες στους 10 °C αλλά μόνο για μία εβδομάδα στους 30 °C.

Η πολλαπλάσια υψηλότερη κινητικότητα του DCD σε σύγκριση με το NH_4^+ προωθεί εύκολα την έκπλυση από τη ριζική ζώνη και κατά συνέπεια μειώνει την αποτελεσματικότητά του (McCarty and Bremner, 1989; Pasda et al., 2001), ειδικά σε κορεσμένα από νερό ελαφρά εδάφη (Ruser και Schulz, 2015; Zerulla et al., 2001). Γενικά, η ανασταλτική επίδραση του DCD μειώνεται με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους (Hendrickson and Keeney, 1979). Επιπρόσθετα, οι Slangen και Kerckhoff (1984) ανέφεραν αυξημένη υποβάθμιση του DCD σε αμμώδη εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία λόγω της χρησιμοποίησης του DCD ως πηγής N από

ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Οι Puttanna et al. (1999) ανέφεραν μείωση της αναστολής του DCD με αυξανόμενο επίπεδο pH, όπου εξήγησαν αυτό το αποτέλεσμα με αυξημένη βιολογική δραστικότητα των νιτροποιητών και των ετερότροφων.

Η αποτελεσματικότητα του DCD ως αναστολέας νιτροποίησης όσον αφορά την έκλυση NO₃, τις εκπομπές N₂O και τη βελτιωμένη NUE επιβεβαιώθηκε από πολλές μελέτες υπό διαφορετικές καλλιέργειες και κλιματολογικές συνθήκες (Amberger, 1989; Di και Cameron, 2004, 2002).

2. Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της λίπανσης με λιπάσματα που περιέχουν αναστολείς νιτροποίησης και ουρεάσης, στις αποδόσεις και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας σκληρού σίτου (*Triticum turgidum ssp. durum*)

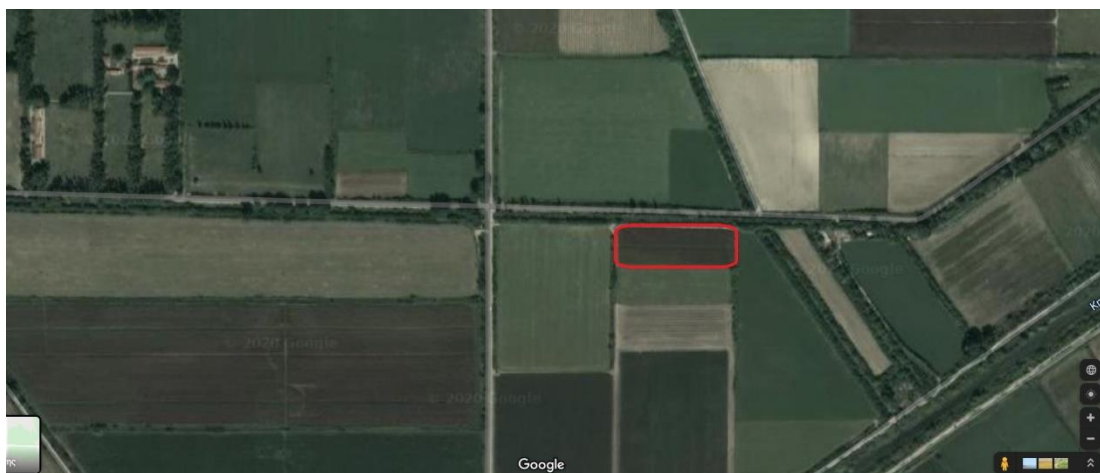
3. Υλικά και μέθοδοι

3.1 Περιοχή έρευνας

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Αλιάρτου. Η περιοχή βρίσκεται σε υψόμετρο 95 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και οι συντεταγμένες είναι 38°23'52" N, 23°6'35" E.

Ο πειραματικός αγρός έχει συνολική επιφάνεια 26 X 28 m = 728 m² όπου εγκαταστάθηκε σκληρό σιτάρι, ποικιλία Simeto. Ο αγρός χωρίστηκε σε πειραματικά τεμάχια με εμβαδόν 20 m² έκαστο. Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 19/11/2019 με σπαρτική μηχανή, μαζί με την βασική λίπανση, και η επιφανειακή λίπανση εφαρμόστηκε στις 22/1/2020, ενώ η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στις 19/6/2020.

Η προηγούμενη καλλιέργεια ήταν βαμβάκι. Τα υπολείμματα από την καλλιέργεια δεν συλλέχθηκαν από τον αγρό αλλά ενσωματώθηκαν στο έδαφος μετά τη συγκομιδή ώστε να επιταχυνθεί η αποικοδόμησή τους.



Εικόνα 6. Απεικόνιση του αγροκτήματος σε earth map. (Ιστοσελίδα www.google.com/maps)

3.2 Διερεύνηση δεδομένων

3.2.1 Προσδιορισμός εδαφικών παραμέτρων

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκε μία δειγματοληψία εδάφους πριν την σπορά. Με τον εδαφολήπτη συλλέχθηκε χώμα σε βάθος 30 cm από την επιφάνεια του εδάφους. Ο κύλινδρος είχε διάμετρο 20 cm. Η ανάλυση του εδάφους έγινε στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Στον Πίνακα 9 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αγρού που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα. Το έδαφος είναι αλκαλικό ενώ διακρίνεται από ικανοποιητική περιεκτικότητα σε οργανική ουσία.

Πίνακας 9. Φυσιχοημικά χαρακτηριστικά του πειραματικού αγρού

pH	8
EC	1,11 mS/cm
Οργανική ουσία	3,47%
P	21,25
CaCO₃	11,38%
K	319,09

3.2.2 Κλιματολογικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του πειράματος

Η περιγραφή του κλίματος της περιοχής έρευνας έγινε με βάση τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού στην περιοχή του Αγίου Δημητρίου στην Κωπαΐδα, που

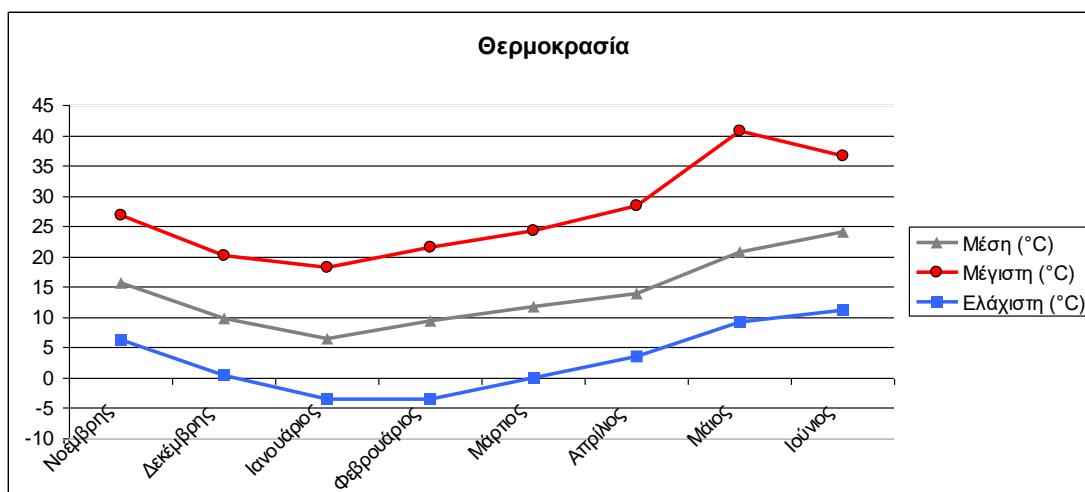
ανήκει στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και απέχει 13 χιλιόμετρα από τον πειραματικό αγρό.

Για τη περίοδο αυτή έγινε συλλογή ορισμένων δεδομένων, από το μετεωρολογικό σταθμό, για να ελεγχθούν οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διάρκεια του φυτρώματος και της ανάπτυξης των φυτών. Επισημαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας και του ύψους της βροχής.

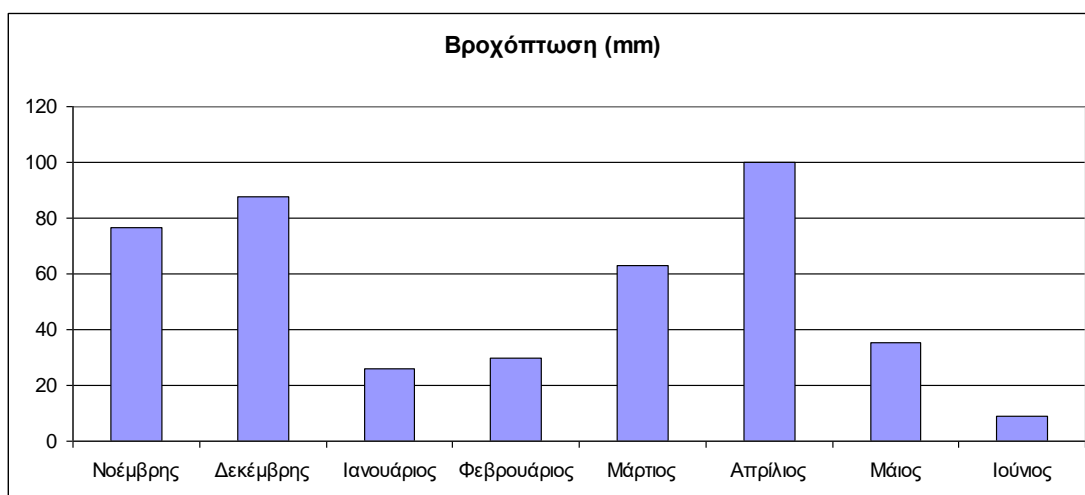
Η θερμοκρασία του αέρα, στο περιβάλλον της οποίας αναπτύσσεται κάθε φυτικός οργανισμός, πρέπει να καλύπτει ένα εύρος τιμών, που είναι συνάρτηση του φυτικού είδους με τη θερμοκρασία, έτσι ώστε η ανάπτυξή του να φτάσει στο μέγιστο σύμφωνα με το γονότυπό του. Στο εύρος των τιμών αυτών περιλαμβάνονται οι άριστες και οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας του αέρα για τα διαφορετικά φαινολογικά στάδια του κάθε φυτικού είδους. Οι θερμοκρασίες αυτές ποικίλουν σημαντικά τόσο μεταξύ αυτοφυών και καλλιεργούμενων φυτικών ειδών όσο και μεταξύ των καλλιεργούμενων φυτών, ενώ η διαφοροποίηση των απαιτήσεων, σε θερμοκρασία κάθε φαινολογικού σταδίου, μειώνεται σημαντικά μεταξύ των ποικιλιών του ίδιου φυτικού είδους. Οι άριστες θερμοκρασίες για την επίτευξη της καλύτερης ποιότητας για τις βιολογικές δραστηριότητες των φυτών κυμαίνονται σε ευρεία όρια και εξαρτώνται σημαντικά από τη γεωγραφική εξάπλωση του φυτού (Χρονοπούλου-Σερέλη και Φλόκας, 2010)

Η καταγραφή του ύψους της βροχής είναι σημαντική γιατί ο εμπλουτισμός του εδάφους με νερό μέσω των βροχοπτώσεων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία της καλλιέργειας. Ιδιαίτερη σημασία έχει η γνώση των απαιτήσεων των φυτών σε εδαφικό νερό σε συνάρτηση με το στάδιο ανάπτυξής τους. Το ποσοστό του ύψους της βροχής που συγκρατείται από την υπερκείμενη του εδάφους βλάστηση, είναι συνάρτηση του είδους του φυλλώματος (το μπιζέλι με τα σύνθετα στενόφυλλα), της πυκνότητας τους και της διαμόρφωσης των φυτειών. Επίσης οι βροχές ανάλογα με την εποχή του έτους και το φαινολογικό στάδιο ανάπτυξης, στο οποίο βρίσκεται η καλλιέργεια, μπορούν να αποβούν και καταστροφικές π.χ. αποξήρανση καρπών λόγω απωλειών χυμού (Χρονοπούλου-Σερέλη και Φλόκας, 2010).

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η διακύμανση της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας ανά μήνα (Διάγραμμα 2) και του ύψους βροχής σε mm (Διάγραμμα 3), κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Η συνολική βροχόπτωση από Νοέμβριο 2019 έως Ιούνιο 2020 ήταν 426,7 mm (Πίνακας 10).



Διάγραμμα 2. Απεικόνιση της διακύμανσης της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του πειράματος.



Διάγραμμα 3. Απεικόνιση μηνιαίας βροχόπτωσης (mm) κατά την διάρκεια του πειράματος

Πίνακας 10. Μ.ο. μηνιαίων βροχοπτώσεων (mm) και θερμοκρασιών(°C), μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία ανά μήνα κατά τη διάρκεια του πειράματος.

	Νοέ	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Σύνολο
Βροχόπτωση	76,8	87,5	26	29,8	62,8	99,8	35,2	8,8	426,7
Θερμοκρασία :Μέση	15,7	9,8	6,4	9,3	11,8	13,9	20,8	24	
Μέγιστη	26,8	20,2	18,1	21,6	24,2	28,4	40,6	36,6	
Ελάχιστη	6,2	0,4	-3,6	-3,6	-0,1	3,5	9,1	11,2	

3.2.3 Φυτικό υλικό

Η ποικιλία του σπόρου που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Simeto, τα χαρακτηριστικά της οποίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 11).

Πίνακας 11. Χαρακτηριστικά ποικιλίας σκληρού σιταριού Simeto.

Φυτικό είδος	<i>Triticum durum</i> , Poaceae
Ποικιλία	SIMETO
Γενεαλογία	Cameti8 X Valnova
Ύψος	Μέτριο 80-85 cm
Στάχης	Επιμήκης, μέτριος με μαύρα άγανα
Σπόρος	Επιμήκης, μεγάλος
Πρωιμότητα	Πρώιμη
Αδέλφωμα	Μέτριο
Λίπανση	Μέχρι 16 μονάδες N
Αντοχή στο ψύχος	Ικανοποιητική
Αντοχή σε ξηροθερμικές συνθήκες	Μεγάλη
Αντοχή σε πλάγιασμα	Μεγάλη
Αντοχή σε ωίδιο	Μέτρια
Αντοχή σε σκωρίαση	Μέτρια
Αντοχή σε σεπτόρια	Μέτρια
Σπορά	Νοέμβρη-Δεκέμβρη
Σπόρος/στρ	20-23 kg
Πρωτεΐνη	14-14,8 %
Ποιότητα γλουτένης	Καλή
Βάρος 1000 σπόρων	36-39 gr

3.3 Πειραματικό σχέδιο

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε ήταν αυτό των τυχαιοποιημένων πλήρων ομάδων (Randomized Complete Block Design). Είναι ένα πειραματικό σχέδιο

το οποίο χρησιμοποιείται ευρύτητα στο γεωργικό πειραματισμό και σκοπός της τοποθέτησης των επεμβάσεων κατά ομάδες είναι η μεγιστοποίηση της παραλλακτικότητας μεταξύ των ομάδων και η ελαχιστοποίηση της παραλλακτικότητας μέσα στις ομάδες (block).

Μερικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου σχεδίου είναι η πιθανή μείωση του πειραματικού σφάλματος εάν η ομαδοποίηση είναι επιτυχής και η αύξηση της ευαισθησία του πειράματος, η αύξηση του κύκλου των εφαρμογών των αποτελεσμάτων όταν οι διάφορες ομάδες τοποθετούνται σε διαφορετικές τοποθεσίες και η ανάλυση είναι σχετικά απλή.

Για τις ανάγκες του πειράματος, το αγροτεμάχιο χωρίστηκε σε 4 blocks/επαναλήψεις με συνολικό πλάτος 26 m και συνολικό μήκος 28 m. Το κάθε block χωρίστηκε σε 7 τεμάχια πλάτους 5m και μήκους 4m όπου εφαρμόστηκαν οι επεμβάσεις (επίπεδα λίπανσης).

		4m	4m	4m	4m	4m	4m	4m
5m	Block 1	N:27% CAN+DMPSA	N:27% CAN	N:40% S:5,7% Ουρία+NBPT	N:46% Ουρία	N:46% Ουρία+NBPT	N:40% Ουρία	Control
	2m							
5m	Block 2	N:27% CAN	N:46% Ουρία	N:40% Ουρία	Control	N:27% CAN+DMPSA	N:40% S:5,7% Ουρία+NBPT	N:46% Ουρία+NBPT
	2m							
5m	Block 3	N:46% Ουρία+NBPT	Control	N:27% CAN+DMPSA	N:40% S:5,7% Ουρία+NBPT	N:46% Ουρία	N:27% CAN	N:40% Ουρία
	2m							
5m	Block 4	N:40% S:5,7% Ουρία+NBPT	N:40% Ουρία	N:27% CAN	N:46% Ουρία+NBPT	Control	N:27% CAN+DMPSA	N:46% Ουρία

Εικόνα 7. Πειραματικό σχέδιο. Απεικονίζονται οι ομάδες και οι επεμβάσεις που εφαρμόστηκαν στον πειραματικό αγρό.

3.4 Καλλιεργητικές φροντίδες και ημερομηνίες εφαρμογής τους κατά τη διάρκεια του πειράματος.

3.4.1 Κατεργασία εδάφους

Η κατεργασία του εδάφους πραγματοποιήθηκε πριν τη σπορά με μηχανήματα του παραγωγού τα οποία ήταν ο καλλιεργητής και η δισκοσβάρνα.

Με τον καλλιεργητή πραγματοποιείται πρωτογενής κατεργασία, δηλαδή κατεργασία η οποία γίνεται αμέσως μετά την προηγούμενη καλλιέργεια και κύριο στόχο έχει να επαναδιαμορφώσει το πορώδες του εδάφους. Εφαρμογή καλλιεργητή γίνεται για αναμόχλευση εδάφους χωρίς να το αναστρέφει κι αυτό επιτυγχάνεται με το μικρό υνί που βρίσκεται στο πρόσθιο μέρος των κατακόρυφων στελεχών.

Πολλές φορές στο αγρόκτημα γίνονται εργασίες ισοπέδωσης μικρής κλίμακας, ιδιαίτερα όταν δημιουργούνται μεγάλες ανωμαλίες από την κίνηση βαρέων μηχανημάτων μέσα στα χωράφια στα πλαίσια μιας άλλης εργασίας.

Η δισκοσβάρνα ανήκει στην ομάδα των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για δευτερογενή κατεργασία, η οποία γίνεται στα πλαίσια του σχηματισμού της σποροκλίνης. Πιο συγκεκριμένα, με τη δευτερεύουσα κατεργασία επιτυγχάνεται:

1. Η ισοπέδωση της επιφάνειας του χωραφιού.
2. Η καταστροφή όλων των φυτών συμπεριλαμβανομένων και των ζιζανίων.
3. Η ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων και λιπασμάτων στην επιφανειακή στρώση.
4. Η αύξηση της ζώνης της ριζόσφαιρας και η ταχύτερη αφομοίωση του νερού των βροχοπτώσεων.
5. Η αποκατάσταση της συνοχής των εδαφοτεμαχιδίων με συμπίεση του κατώτερου τμήματος της αρόσιμης ζώνης - σποροκλίνης (5-10 cm). (Γέμτος, Μπουραζάνης, Φουντάς, 2009)

3.4.2 Σπορά (Ημερομηνία και Ποσότητα σπόρων)

Οι σπόροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ποικιλίας Simeto και κατά την σπορά χρησιμοποιήθηκαν 25kg σπόρου/στρ. Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 19/11/2019 με σπαρτική μηχανή για να εξασφαλιστεί με αυτόν τον τρόπο η ομοιομορφία στις αποστάσεις επί της γραμμής και στο βάθος σποράς.

3.4.3 Λίπανση

Η μοναδική επέμβαση που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ήταν η λίπανση. Η βασική λίπανση πραγματοποιήθηκε μαζί με την σπορά, στις 19/11/2019, ενώ η επιφανειακή πραγματοποιήθηκε στις 22/1/2020. Τα λιπάσματα και οι ποσότητές τους που εφαρμόστηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12).

Πίνακας 12. Οι ποσότητες λιπάσματος και αζώτου όπως εφαρμόστηκαν ανά επέμβαση κατά την διάρκεια του πειράματος, τόσο κατά την βασική όσο και κατά την επιφανειακή λίπανση

Περιγραφή	Βασική Λίπανση		Επιφανειακή Λίπανση		Συνολικό N (Kg/στρ)
	Kg λιπάσματος/στρ	Kg N/στρ	Kg λιπάσματος/στρ	Kg N/στρ	
CONTROL	14,5 as NP+S	1,74			1,74
Ουρία 40% N	14,5 as NP+S	1,74	35,7	14,28	16,02
Ουρία 46% N	14,5 as NP+S	1,74	31	14,26	16
Ουρία 40% N + NBPT	14,5 as NP+S	1,74	35,7	14,28	16,02
Ουρία 46% N + NBPT	14,5 as NP+S	1,74	31	14,26	16
CAN 27% N	14,5 as NP+S	1,74	53	14,31	16,05
CAN 27% N + DMPSA	14,5 as NP+S	1,74	53	14,31	16,05

3.4.4 Συγκομιδή

Στις 19/06/20 πραγματοποιήθηκε η συγκομιδή από την ερευνητική ομάδα με σκοπό να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις και αναλύσεις στο εργαστήριο. Την ίδια ημέρα, ο παραγωγός συγκόμισε την συνολική έκταση του αγροτεμαχίου.

3.5 Παρατηρήσεις και μετρήσεις

Οι παρατηρήσεις και οι προσδιορισμοί αφορούσαν αγρονομικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά και ήταν ίδιες για όλες τις επεμβάσεις και όσο το δυνατόν με την ίδια συχνότητα. Με τελικό σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης κάθε επιπέδου λίπανσης μετρήθηκε η ανάπτυξη και η αύξησή τους.

Η αύξηση των φυτών σημειώνεται με δύο διεργασίες: τον πολλαπλασιασμό και το μέγλωμα των κυττάρων, και μπορούμε να τη μετρήσουμε με βάση το βάρος, το μήκος, τη διάμετρο, τον όγκο, το νωπό βάρος, την ολική πρωτεΐνη, την ολική περιεκτικότητα σε DNS ή μέσω μέτρησης του αριθμού των κυττάρων. Η πορεία αύξησης μπορεί να παρασταθεί ως αθροιστική καμπύλη (σιγμοειδής καμπύλη) ή σε

σχέση με το χρόνο (απόλυτη καμπύλη με απόλυτα υψηλότερο σημείο). Όμως η αύξηση δεν είναι μία απλή συνάρτηση του χρόνου, αλλά εξαρτάται και από άλλους παράγοντες και κυρίως από τα θρεπτικά στοιχεία, τη θερμοκρασία κ.α. (Σιδηράς, 2005).

Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια του Γ.Π.Α. ήταν οι εξής:

- ✓ Ύψος φυτού (cm)
- ✓ Ξηρό βάρος φυτών (Kg/str)
- ✓ Αριθμός φύλλων
- ✓ Μήκος ταξιανθίας(cm)
- ✓ Βάρος 1000 σπόρων(gr)
- ✓ Απόδοση σε κόκκους(Kg/str)
- ✓ Πρωτεΐνη κόκκων(%)
- ✓ Άζωτο κόκκου(%)
- ✓ Απόδοση σε πρωτεΐνη(Kg/str)
- ✓ Απόδοση σε άζωτο(Kg N/str)
- ✓ Γεωργική αποτελεσματικότητα αζώτου (NAE)
- ✓ Αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE)
- ✓ Δείκτης συγκομιδής (HI)

Ύψος φυτού

Για την μέτρηση του ύψους, λήφθηκε υπόψιν το υπέργειο τμήμα του φυτού. Συγκεκριμένα από το λαιμό έως το τελευταίο πλήρως ανεπτυγμένο φύλλο και στο στάδιο της καρποφορίας, από το λαιμό έως την πλήρως ανεπτυγμένη ταξιανθία.

Ξηρό βάρος

Για τον προσδιορισμό του ξηρού βάρους, ελήφθησαν από τον πειραματικό αγρό δείγματα 2 φυτών από κάθε επέμβαση και τοποθετήθηκαν σε κλίβανο σε θερμοκρασία 65 °C για 48 ώρες. Μετά την ξήρανση τους στον κλίβανο, ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας και ακολούθησε η αναγωγή των μετρήσεων σε επίπεδο στρέμματος.

Άζωτο κόκκων

Το άζωτο προσδιορίστηκε με την μέθοδο Kjeldahl. Το N των πρωτεϊνών και των μη πρωτεϊνικής φύσης αζωτούχων ουσιών, μετατρέπεται σε ανόργανο N [θειικό αμμώνιο-(NH₄)₂SO₄] με πυκνό θειικό οξύ παρουσία καταλύτη. Στη συνέχεια, το

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ μετατρέπεται σε θειικό νάτριο (Na_2SO_4) με καυστικό νάτριο (40% NaOH) και απελευθερώνεται αμμωνία (NH_3), η οποία συλλέγεται με απόσταξη σε ειδικό διάλυμα βορικού οξέος (receiver solution) και τιτλοδοτείται με 20 διάλυμα HCl γνωστής κανονικότητας. Αναλυτικότερα τα βήματα της μεθόδου Kjeldahl είναι τα εξής:

Καύση (ή πέψη)

- Ζυγίζεται 0,5 gr δείγματος (W) με ακρίβεια 0,1 mg, σε καθαρό σωλήνα Kjeldahl των 250 ml. Σε κάθε παρτίδα αναλύσεων πρέπει να συμπεριλαμβάνεται και ένας άδειος (χωρίς δείγμα) σωλήνας που χρησιμεύει ως τυφλή δοκιμή (τυφλό δείγμα). Τα τυφλά δείγματα αποσκοπούν στην ανίχνευση παρουσίας NH_3 που δεν οφείλεται στο δείγμα.
- Μετά τη ζύγιση προστίθεται σε κάθε σωλήνα ένα δισκίο καταλύτη Kjeldahl και 13 ml πυκνού H_2SO_4 (96-98%) με τη χρήση δοσομετρικής αντλίας. Με ελαφρή ανακίνηση αναδεύεται το περιεχόμενο του σωλήνα.
- Οι σωλήνες μεταφέρονται στην εστία καύσης με ειδικό στατό, συνδέονται με τον πολλαπλό απαγωγό (για την ασφαλή απομάκρυνση των ατμών του οξέος κατά την καύση) και θερμαίνονται στους 420 ± 10 °C για 1 ώρα.
- Μετά το πέρας της καύσης οι σωλήνες απομακρύνονται από την εστία και ψύχονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (με τον απαγωγό) για περίπου 30-45 λεπτά.

Απόσταξη και τιτλοδότηση

- Μετά την ψύξη, ο κάθε σωλήνας μεταφέρεται στην αυτόματη συσκευή, τοποθετείται σε ειδική θέση και σφραγίζεται.
- Μέσα στο σωλήνα προστίθεται αυτόματα 80 ml κρύου απιονισμένου νερού (για την διαλυτοποίηση των θειικών αλάτων) και 50 ml διαλύματος 40% NaOH .
- Στη συνέχεια μέσω ατμογεννήτριας εισέρχεται στο σωλήνα ατμός, ο οποίος αναδεύει το μείγμα και υποβοηθά στην αντίδραση του $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ με το NaOH για τη γρήγορη απελευθέρωση της NH_3 .
- Η εκλυόμενη NH_3 συμπυκνώνεται και υγροποιείται στον ψυκτήρα της συσκευής και συλλέγεται σε ειδικό δοχείο, στο οποίο έχουν προστεθεί αυτόματα 30 ml διαλύματος υποδοχής (receiver solution).
- Με την είσοδο της NH_3 στο διάλυμα υποδοχής σχηματίζεται πράσινο χρώμα. Στη συνέχεια γίνεται αυτόματη τιτλοδότηση με διάλυμα 0,1N HCl (μέσω ενσωματωμένης δοσομετρικής αντλίας), μέχρι πλήρους εξουδετέρωσης της NH_3

η οποία καθορίζεται από ένα γκριζο-ελαφρά ερυθρό χρωματισμό (λόγω των δεικτών) στο δοχείο (ο χρωματισμός ανιχνεύεται αυτόματα από ειδικό φασματοφωτόμετρο στη βάση του δοχείου). Καταγράφεται ο όγκος του οξέος (με ακρίβεια 0,001ml) που χρησιμοποιήθηκε για το τυφλό δείγμα (V_T), και για κάθε δείγμα (V_δ).

Ο υπολογισμός του N(%) γίνεται με τον εξής τύπο:

$$N (\%) = \frac{(V_\delta - V_T) \times 0,1 \times 1,4}{W \times 10}$$

Όπου:

V_δ = όγκος (ml) 0,1N HCl που απαιτήθηκε για το δείγμα

V_T = όγκος (ml) 0,1N HCl που απαιτήθηκε για το τυφλό δείγμα

0,1= η κανονικότητα του διαλύματος HCl

1,4= τα mg αζώτου που αντιστοιχούν σε κάθε ml 0,1N HCl για την πιλοδότηση της NH_3

10= συντελεστής μετατροπής από mg/g σε %

W= βάρος δείγματος (g)

Πρωτεΐνη κόκκων

Πρωτεΐνη κόκκων = Άζωτο κόκκων * 5,83

Το 5,83 είναι ο συντελεστής που χρησιμοποιείται στα σιτηρά, σύμφωνα με τον FAO.

Απόδοση σε πρωτεΐνη

Απόδοση σε πρωτεΐνη = Πρωτεΐνη κόκκων (%) * Απόδοση σε κόκκους (kg/str)

Απόδοση σε άζωτο

Απόδοση σε άζωτο = Άζωτο κόκκου (%) * Απόδοση σε κόκκους (kg/str)

Αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE)

$$NUE = \frac{Nuptake_{fert} - Nuptake_{control}}{applied\ N\ fertilizer}$$

Όπου,

$Nuptake_{fert}$ = συνολικό άζωτο σε κόκκους σε υποτεμάχια που εφαρμόστηκε λίπανση

$Nuptake_{control}$ = συνολικό άζωτο σε κόκκους στο μάρτυρα.

Δείκτης Συγκομιδής (HI)

$$HI = \frac{Y_{seed}}{Y_{biomass} + Y_{seed}}$$

Όπου,

Y_{seed} = Απόδοση σε κόκκους

$Y_{biomass}$ = Ξηρό βάρος ολόκληρου φυτού

Γεωργική αποτελεσματικότητα αζώτου (NAE)

$$NAE = \frac{grain\ yield_{fertilized}\ (kg) - grain\ yield_{unfertilized}}{applied\ N\ (kg)}$$

Όπου,

$grain\ yield_{fertilized}$ = Απόδοση σε κόκκους σε υποτεμάχια που εφαρμόστηκε λίπανση

$grain\ yield_{unfertilized}$ = Απόδοση σε κόκκους στο μάρτυρα

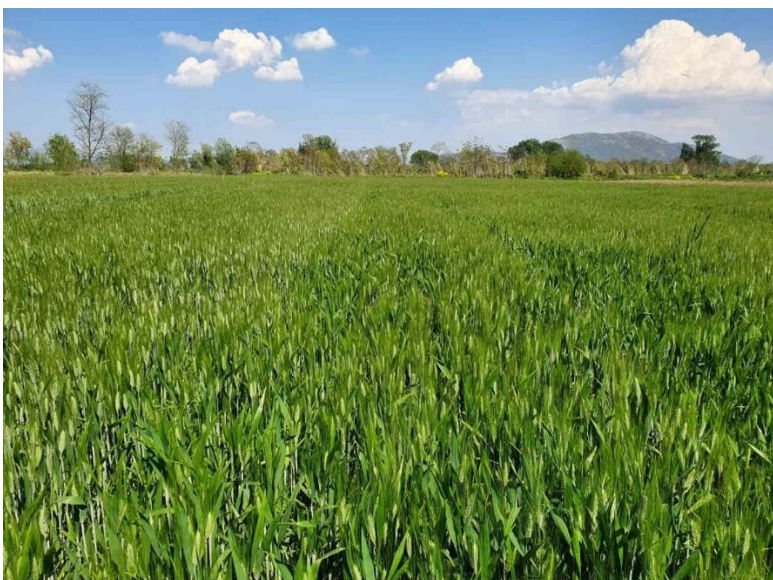
3.6 Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε με το στατιστικό πρόγραμμα Statistica (StatSoft, 1996). Πραγματοποιήθηκε ανάλυση παραλλακτικότητας (ANOVA) για τα δεδομένα του πειράματος και οι συγκρίσεις των μέσων όρων για στατιστικά σημαντικές διαφορές πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο LSD (Least Significant Difference). Οι στατιστικά σημαντικές διαφορές εκτιμήθηκαν σε επίπεδο σημαντικότητας 5% ($P < 0,05$).

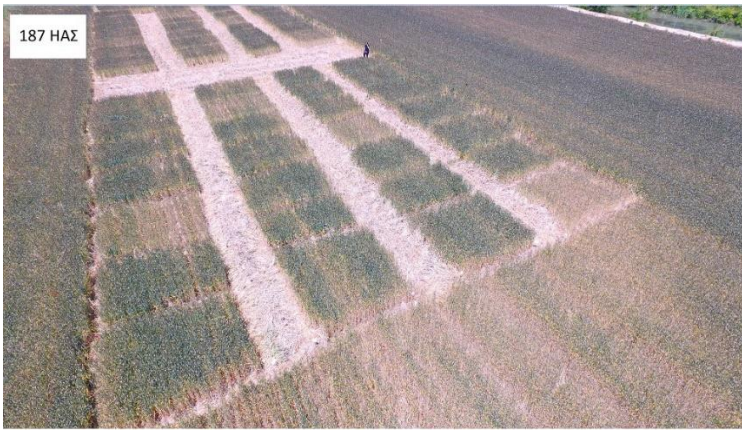
3.7 Άποψη αγρού κατά την διάρκεια του πειράματος



Εικόνα 8. Άποψη του αγρού στις 15 ΗΑΣ



Εικόνα 9. Άποψη του αγρού 161 ΗΑΣ



Εικόνα 10. Άποψη αγρού στις 187 ΗΑΣ



Εικόνα 11. Άποψη αγρού στις 208 ΗΑΣ



Εικόνα 12. Άποψη αγρού την ημέρα της συγκομιδής (213 ΗΑΣ)

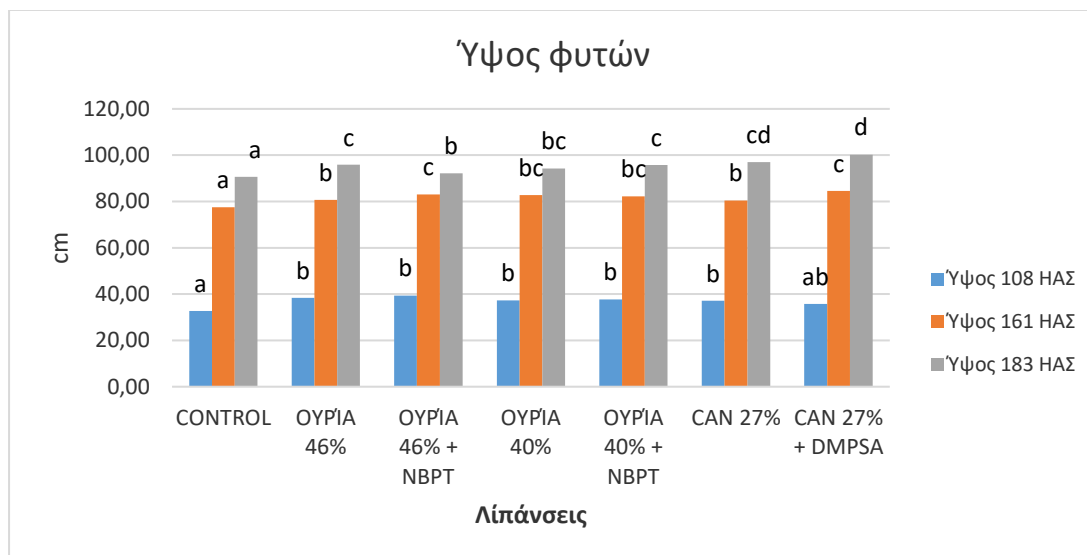


Εικόνα 13. Άποψη αγρού την ημέρα της συγκομιδής (213 ΗΑΣ)

4. Αποτελέσματα

4.1 Φαινολογία

4.1.1 Ύψος φυτών



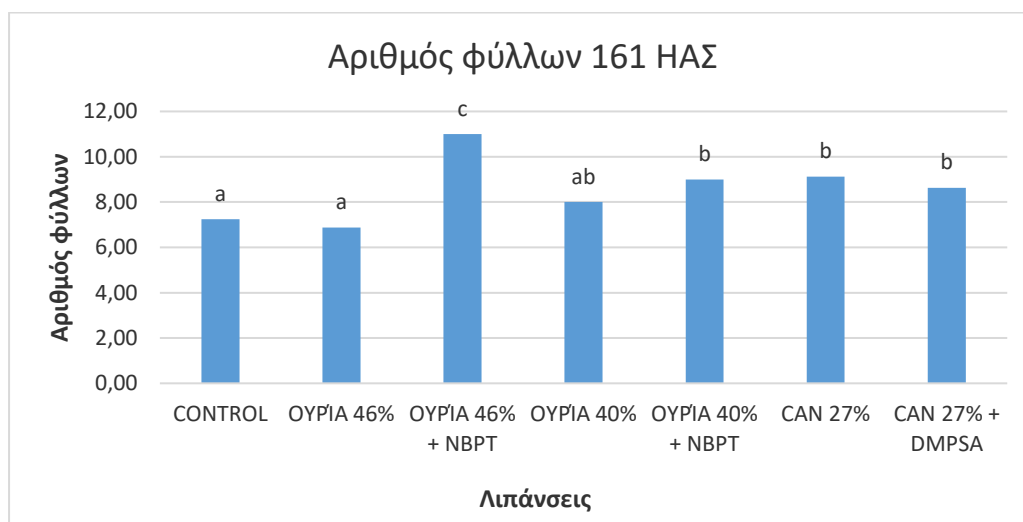
Διάγραμμα 4. Ύψος φυτών 108, 161 και 183 ΗΑΣ (τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$ για κάθε ημερομηνία)

Το ύψος των φυτών στις 108 ΗΑΣ κυμάνθηκε μεταξύ 32,75 cm (Control) και 39,38 cm (Ουρία 46% N+NBPT) και δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων.

Στις 161 ΗΑΣ, η τιμές του ύψους που μετρήθηκαν ήταν από 77,5 cm (Control) μέχρι 84,63 cm (Can 27% N +DMPSA) και μετά την στατιστική ανάλυση δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 46% N+NBPT (83 cm) και Can 27% N+DMPSA(84,63 cm) , ενώ μεταξύ των επεμβάσεων Can 27% N(80,38 cm) και Can 27% N+DMPSA(84,63 cm) παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές.

Στις 183 ΗΑΣ το ύψος έφτασε σε επίπεδα μεταξύ 90,69 cm (Control) και 100,25 cm (Can 27% N+DMPSA) και παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 46% N(95,88 cm) και Ουρία 46% N+NBPT (92,13 cm) όσο και μεταξύ των Ουρία 40% N+NBPT (95,81 cm) και Can 27% N+DMPSA(100,25 cm), ενώ δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 46% N (95,88 cm) και Ουρία 40% N+NBPT (95,81cm).

4.1.2 Αριθμός φύλλων

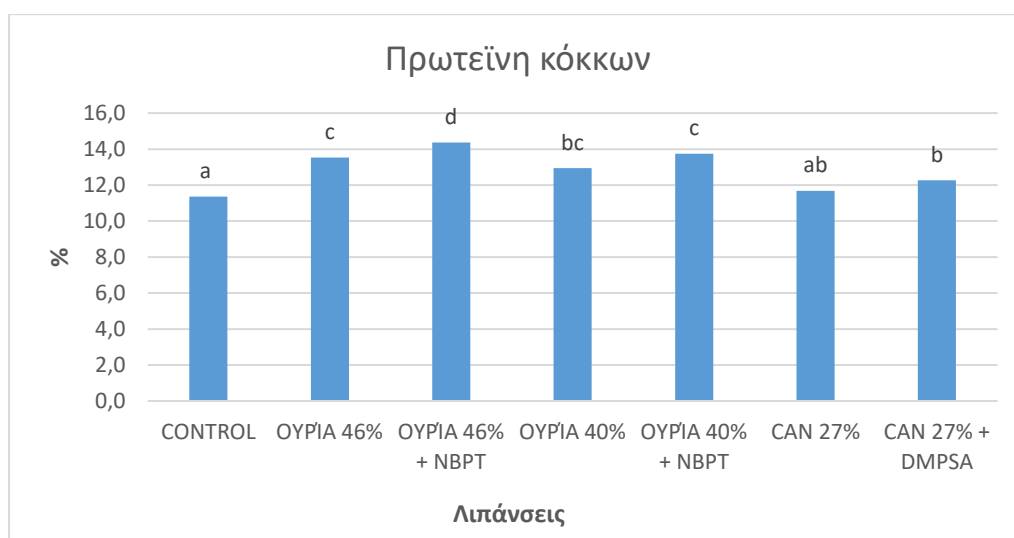


Διάγραμμα 5. Αριθμός φύλλων ανά φυτό στις 161 ΗΑΣ. (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0.05$)

Ο αριθμός των φύλλων στις 161 ΗΑΣ κυμάνθηκε μεταξύ 6,88(Ουρία 46% N) και 11(Ουρία 46% N+NBPT) και μετά την στατιστική ανάλυση δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Can 27% N(9,13) και Can 27% N+DMPSA(8,63), ενώ σημαντικές διαφορές υπήρξαν μεταξύ των Ουρία 46% N+NBPT (11) και Ουρία 40% N+NBPT (9).

4.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά

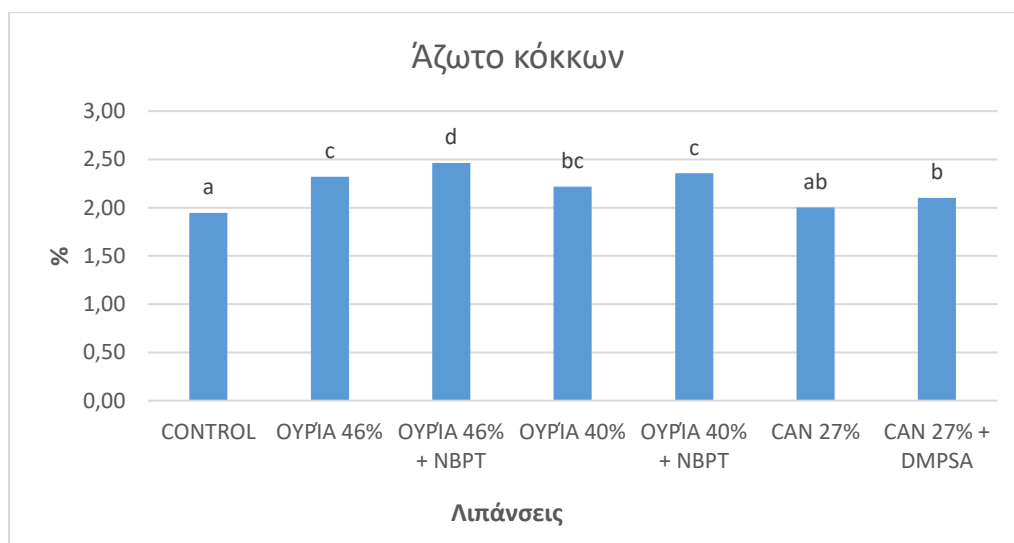
4.2.1 Περιεκτικότητα κόκκων σε πρωτεΐνη



Διάγραμμα 6. Πρωτεΐνη κόκκων (%) (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Η πρωτεΐνη κόκκων κυμάνθηκε μεταξύ 11,4%(Control) και 14,4%(Ουρία 46% N+NBPT). Μετά την στατιστική ανάλυση, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 40% N (12,9%) και Ουρία 46% N(13,5%) όσο και μεταξύ των Can 27% N(11,7%) και Can 27% N+DMPSA(12,3%).. Αντίθετα, παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 46% N+NBPT (14,4%) και Ουρία 40% N+NBPT (13,7%).

4.2.2 Άζωτο κόκκων

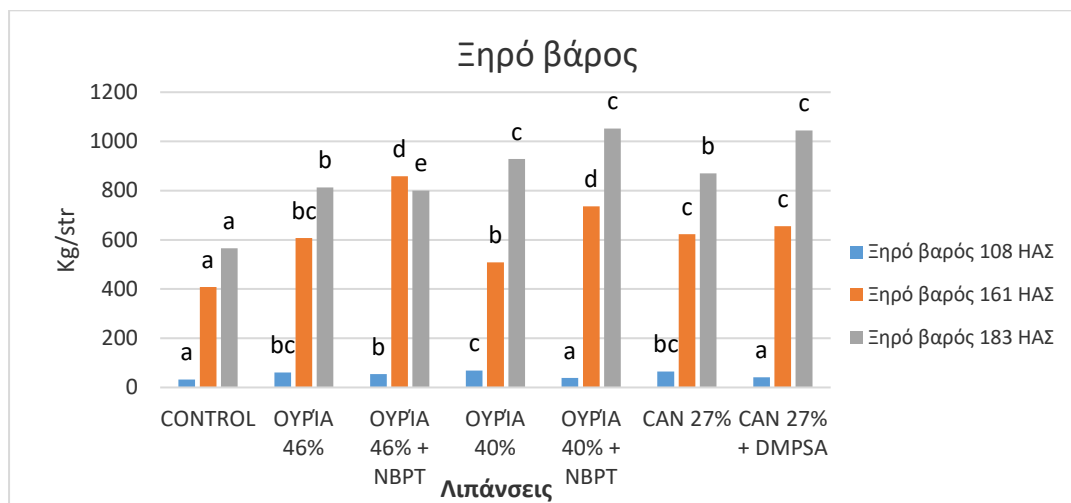


Διάγραμμα 7. Περιεκτικότητα κόκκων σε άζωτο (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Το ποσοστό αζώτου στους κόκκους κυμάνθηκε μεταξύ 1,95%(Control) και 2,46% (Ουρία 46% N+NBPT). Μετά την στατιστική ανάλυση δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Can 27% N(2%) και Can 27% N+DMPSA(2,1%) ούτε μεταξύ των Ουρία 40% N(2,22%) και Ουρία 40% N+NBPT (2,36%). Αντίθετα, φαίνεται να παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 46% N+NBPT (2,46%) και Can 27% N+DMPSA(2,10%).

4.3 Συστατικά απόδοσης

4.3.1 Ξηρό βάρος φυτών



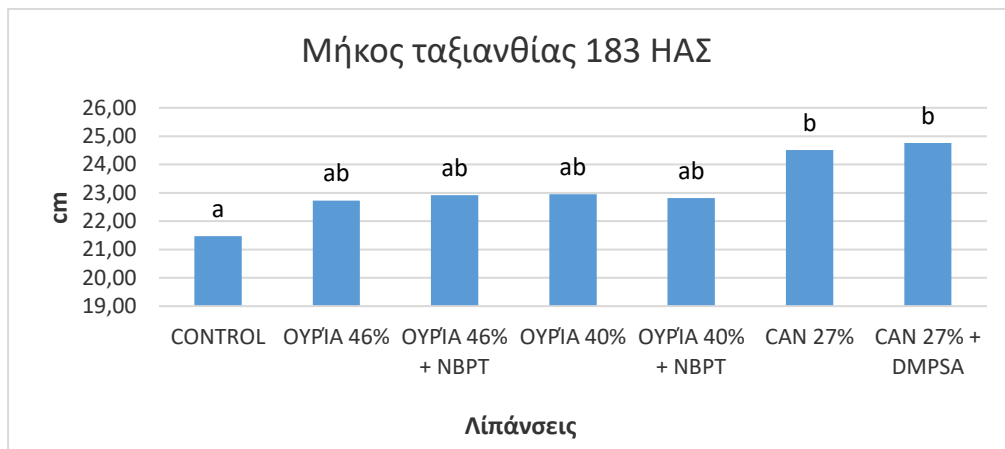
Διάγραμμα 8. Ξηρό βάρος φυτών στις 108,161 και 183 ΗΑΣ. (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$ για κάθε ημερομηνία)

Το ξηρό βάρος των φυτών στις 108 ΗΑΣ κυμάνθηκε από 32 Kg/στρ (Control) έως 68,5 Kg/στρ (Ουρία 40% N). Μετά την στατιστική ανάλυση διαπιστώθηκε πως το ξηρό βάρος στις 108 ΗΑΣ δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 40% N+NBPT (39 Kg/στρ) και Can 27% N+DMPSA (41,5 Kg/στρ), ενώ διέφερε σημαντικά μεταξύ των Ουρία 46% N+NBPT (54,5 Kg/στρ) και Ουρία 40% N+NBPT (39 Kg/στρ).

Αργότερα, στις 161 ΗΑΣ, το ξηρό βάρος βρισκόταν μεταξύ 408 Kg/στρ (Control) και 858,33 Kg/στρ (Ουρία 46% N+NBPT) και διαπιστώθηκε πως δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 46% N+NBPT (858,33 Kg/στρ) και Ουρία 40% N+NBPT (735,83 Kg/στρ), ενώ εντοπίστηκε σημαντική διαφορά μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 40% N+NBPT (735,83 kg str⁻¹) και Can 27% N (623,33 Kg/στρ).

Τέλος, στις 183 ΗΑΣ, το ξηρό βάρος έφτασε σε επίπεδα μεταξύ 565 Kg/στρ (Control) και 1052 Kg/στρ (Ουρία 40% N+NBPT), και παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 46% N+NBPT (800 Kg/στρ) και Ουρία 40% N+NBPT (1052 Kg/στρ) καθώς επίσης και μεταξύ των Can 27% N (870 Kg/στρ) και Can 27% N + DMPSA (1044 Kg/στρ), ενώ δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των Ουρία 40% N+NBPT (1052 Kg/στρ) και Can 27% N+DMPSA (1044 Kg/στρ).

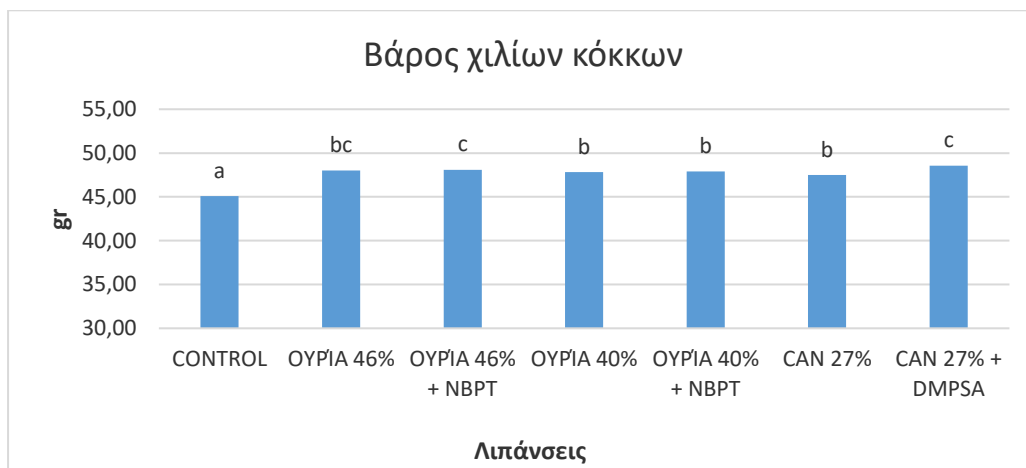
4.3.2 Μήκος ταξιανθίας



Διάγραμμα 9. Μήκος ταξιανθίας στις 183 ΗΑΣ. (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Το μήκος της ταξιανθίας στις 183 ΗΑΣ κυμάνθηκε μεταξύ 21,48cm(Control) και 24,76cm(Can 27% N+DMPSA) και μετά την στατιστική ανάλυση δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων.

4.3.3 Βάρος χιλίων σπόρων



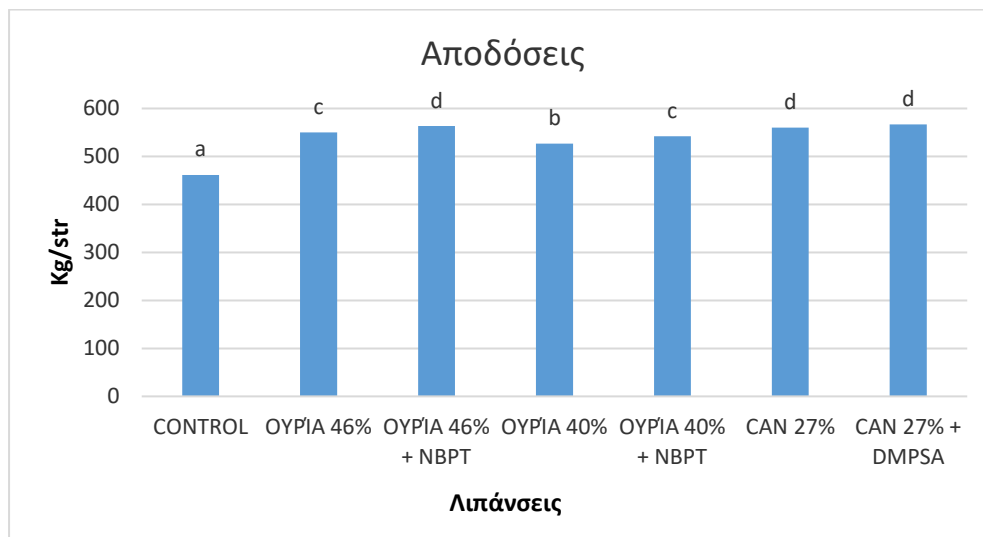
Διάγραμμα 10. Βάρος χιλίων κόκκων. (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Το βάρος 1000 κόκκων στις 213 ΗΑΣ κυμάνθηκε μεταξύ 45,10gr (Control) και 48,54gr (Can 27% N+DMPSA). Μετά την στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 46% N+NBPT (48,1gr) και Can 27% N+DMPSA(48,54) και μεταξύ των Ουρία 40% N (47,81gr) και Can 27% N(47,50gr), ενώ παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των

Can 27% N(47,50gr) και Can 27% N+DMPSA(48,54gr) και μεταξύ των Ουρία 46% N+NBPT (48,10gr) και Ουρία 40% N+NBPT (47,90gr).

4.4 Αποδόσεις

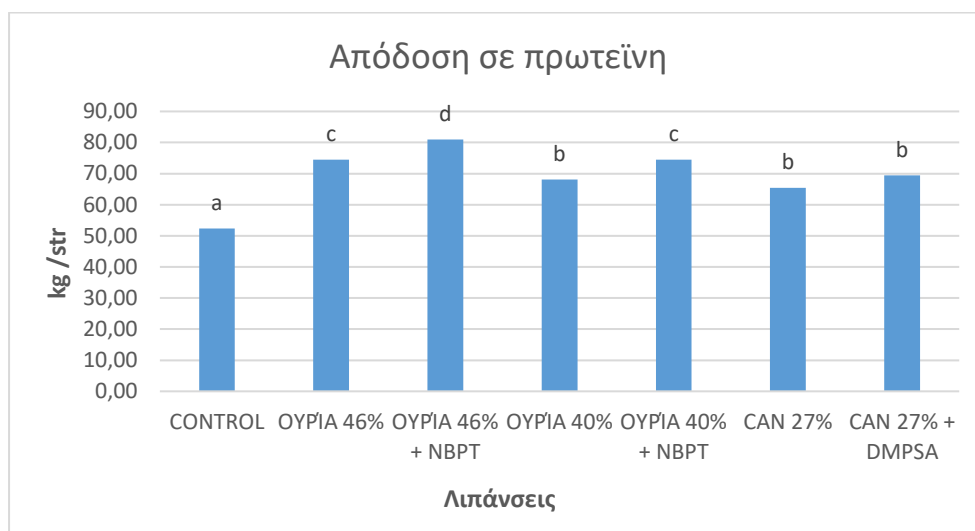
4.4.1 Αποδόσεις σε κόκκους



Διάγραμμα 11. Αποδόσεις σε κόκκους. (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Οι αποδόσεις κυμάνθησαν σε επίπεδα μεταξύ 461,59 Kg/στρ (Control) και 566,83 Kg/στρ (Can 27% N+DMPSA). Από την στατιστική ανάλυση δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Can 27% N(560,45 Kg/στρ) και Can 27% N+DMPSA(566,83 Kg/στρ). Αντίθετα, μεταξύ των Ουρία 46% N+NBPT (563,41 Kg/στρ) και Ουρία 40% N+NBPT (542,33 Kg/στρ) φαίνεται ότι υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

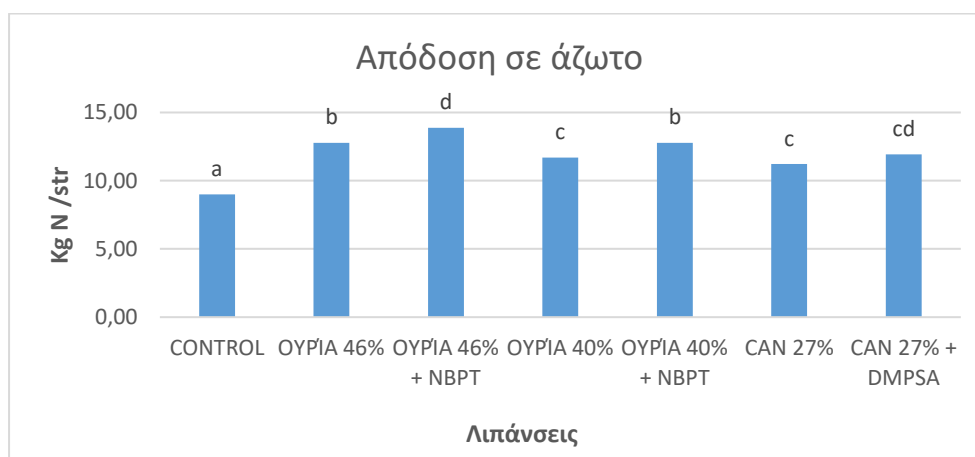
4.4.2 Αποδόσεις σε πρωτεΐνη



Διάγραμμα 12. Απόδοση σε πρωτεΐνη κόκκων (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Η απόδοση σε πρωτεΐνη κυμάνθηκε από 52,39 Kg/στρ (Control) έως 80,96 Kg/στρ (Ουρία 46% N+NBPT). Από την στατιστική ανάλυση δεν προέκυψαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Can 27% N(65,46 Kg/στρ) και Can 27% N+DMPSA(69,49 Kg/στρ), ενώ προέκυψαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των Ουρία 40% N (68,13 Kg/στρ) και Ουρία 40% N+NBPT (74,52 Kg/στρ).

4.4.3 Αποδόσεις σε άζωτο



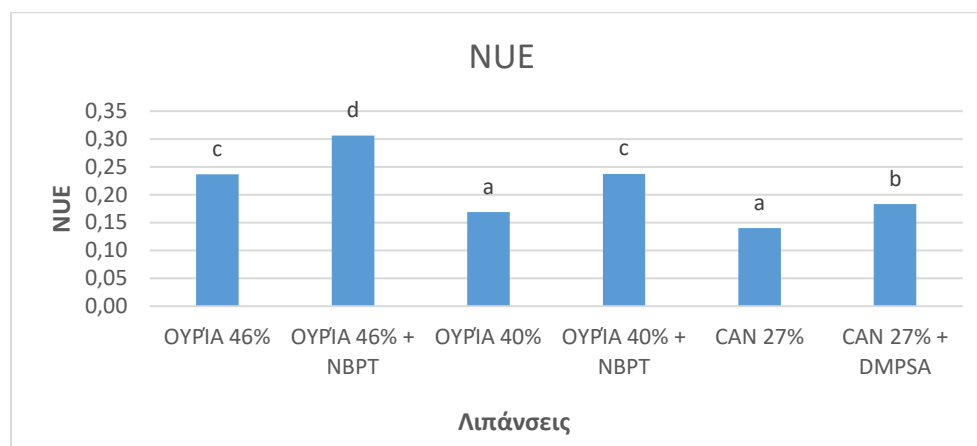
Διάγραμμα 13. Απόδοση σε άζωτο στους κόκκους (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Η υψηλότερη απόδοση σε άζωτο παρατηρείται στην επέμβαση Ουρία 46% N+NBPT με 13,89 Kg N/στρ, ενώ η χαμηλότερη στην επέμβαση του μάρτυρα με 8,98 Kg N/στρ. Μετά την στατιστική ανάλυση δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές

μεταξύ των επεμβάσεων Can 27% N(11,22 Kg N/στρ) , Can 27% N+DMPSA(11,92 Kg N/στρ) και Ουρία 40% N(11,69 Kg N/στρ), ενώ αντίθετα μεταξύ των Ουρία 40% N+NBPT (12,78 Kg N/στρ) και Ουρία 46% N+NBPT (13,89 Kg N/στρ) προέκυψαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

4.5 Δείκτες εκτίμησης

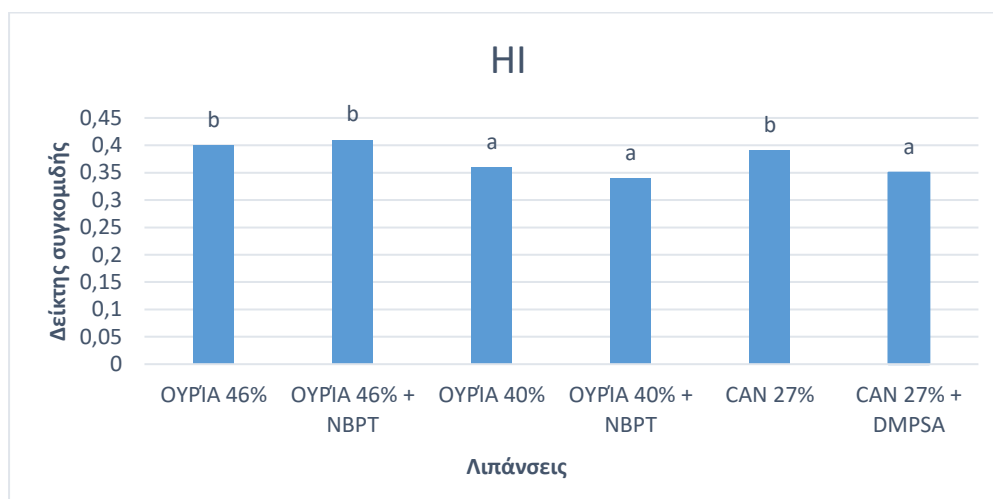
4.5.1 Αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (Nitrogen Use Efficiency- NUE)



Διάγραμμα 14. Αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE). (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Η αποδοτικότητα της χρήσης αζώτου κυμάνθηκε από 0,14(Can 27% N) έως 0,31(Ουρία 46% N+NBPT). Από την στατιστική ανάλυση δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 40% N(0,17) και Can 27% N(0,14). Αντιθέτως, τόσο μεταξύ των Ουρία 46% N+NBPT (0,31) και Ουρία 40% N+NBPT (0,24) όσο και μεταξύ των Can 27% N(0,14) και Can 27% N+DMPSA(0,18) παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

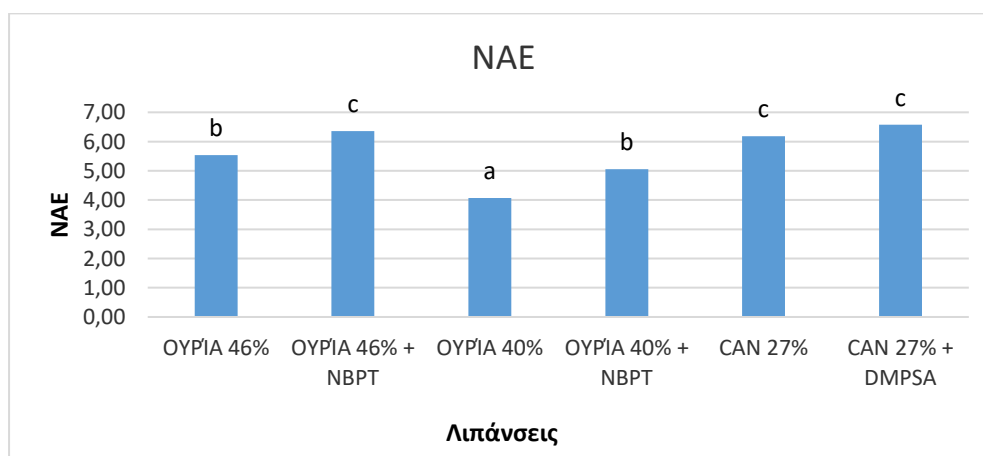
4.5.2 Δείκτης συγκομιδής (Harvest Intex-HI)



Διάγραμμα 15. Δείκτης συγκομιδής (HI) (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Ο δείκτης συγκομιδής κυμάνθηκε από 0,34(Ουρία 40% N+NBPT) έως 0.41(Ουρία 46% N+NBPT). Από την ανάλυση δεν προέκυψαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Ουρία 40% N(0,36), Can 27% N+DMPSA(0,35) και Ουρία 40% N+NBPT (0,34). Επίσης, δεν εντοπίστηκαν στατιστικές διαφορές και μεταξύ των Can 27% N(0,39), Ουρία 46% N+NBPT (0,41) και Ουρία 46% N (0,40).

4.5.3 Γεωργική Αποτελεσματικότητα αζώτου (Nitrogen Agronomic Efficiency-NAE)



Διάγραμμα 16. Δείκτης γεωργικής αποτελεσματικότητας αζώτου. (Τα διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν διαφορές για επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$)

Η γεωργική αποτελεσματικότητα του αζώτου (NAE) κυμάνθηκε από 4,07(Ουρία 40% N) έως 6,58(Can 27% N+DMPSA). Μετά την στατιστική ανάλυση, δεν προκύπτουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων Can 27% N(6,18) και Can 27% N+DMPSA(6,58), ενώ μεταξύ των Ουρία 40% N+NBPT (5,05) και Ουρία 46% N+NBPT (6,36) φαίνεται να εντοπίζονται στατιστικά σημαντικές διαφορές.

5. Συμπεράσματα-Συζήτηση

Το μεγαλύτερο ύψος φυτών (183 ΗΑΣ) τόσο για τα συμβατικά όσο και για τα λιπάσματα με τους αναστολείς νιτροποίησης και ουρεάσης, παρατηρείται στις επεμβάσεις με τα λιπάσματα CAN, ωστόσο μεταξύ των επεμβάσεων CAN 27% N (97,06 cm) και CAN 27%N+ DMPSA (100,25cm) η διαφορά δεν αξιολογείται ως στατιστικά σημαντική ($P<0,05$). Αντίθετα, στις επεμβάσεις ουρίας με 46% N παρατηρείται σημαντική διαφορά με την επέμβαση Ουρία 46% N (95,88cm) να εμφανίζει μεγαλύτερο ύψος από τα φυτά της επέμβασης Ουρία 46% N+NBPT (92,13cm).

Η χρήση της ουρίας με και χωρίς αναστολέα ουρεάσης, οδήγησε σε παραγωγή κόκκων με μεγαλύτερο ποσοστό πρωτεΐνης σε σχέση με την χρήση CAN με και χωρίς αναστολέα νιτροποίησης. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, τόσο στα συμβατικά όσο και στα παρεμποδισμένα λιπάσματα, παρατηρήθηκε στις επεμβάσεις ουρίας με 46%N. Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση Ουρία 46% N παρήχθησαν κόκκοι με 13,5% πρωτεΐνη και στην επέμβαση Ουρία 46% N + NBPT κόκκοι με 14,4% πρωτεΐνη, διαφορά που αξιολογείται ως στατιστικά σημαντική ($P<0.05$), ενώ μεταξύ των άλλων λιπασμάτων (συμβατικά-παρεμποδισμένα) δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές.

Όσον αφορά στο ξηρό βάρος των φυτών (183 ΗΑΣ), τόσο για τα συμβατικά όσο και για τα παρεμποδισμένα λιπάσματα, εμφανίζεται μέγιστο στις επεμβάσεις με ουρία 40%N, ωστόσο η διαφορά της επέμβασης Ουρία 40%N (929 Kg/στρ) και Ουρία 40%N + NBPT (1052 Kg/στρ) δεν αξιολογείται ως στατιστικά σημαντική ($P<0.05$). Αντίθετα, η χρήση του αναστολέα νιτροποίησης στο λίπασμα CAN σημείωσε σημαντική διαφορά σε σύγκριση με το συμβατικό λίπασμα CAN. Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση CAN

27%N σημειώθηκε ξηρό βάρος 870 Kg/στρ ενώ στην επέμβαση CAN 27% N + DMPSA 1044 Kg/στρ.

Η χρήση CAN (με ή χωρίς αναστολέα νιτροποίησης) οδήγησε σε μεγαλύτερο μήκος ταξιανθίας σε σχέση με την χρήση λιπασμάτων ουρίας (με ή χωρίς αναστολέα ουρεάσης) χωρίς όμως να παρατηρείται καμία στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των επεμβάσεων ($P < 0,05$).

Το βάρος 1000 σπόρων με την χρήση λιπασμάτων ουρίας δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές με την ύπαρξη του αναστολέα ουρεάσης σε σχέση με τα συμβατικά λιπάσματα. Αντίθετα η παρουσία του αναστολέα νιτροποίησης με την χρήση λιπάσματος CAN σημείωσε σημαντική διαφορά σε σχέση με το συμβατικό λίπασμα CAN. Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση CAN 27%N σημειώθηκε βάρος 1000 σπόρων 47,5 gr, ενώ στην επέμβαση CAN 27% N+DMPSA 48,54 gr.

Η επίδραση του αναστολέα ουρεάσης με την χρήση λιπασμάτων ουρίας στην απόδοση σε κόκκους είναι στατιστικά σημαντική ($P < 0,05$), αντίθετα η επίδραση του αναστολέα νιτροποίησης με χρήση λιπάσματος CAN, δεν απέφερε σημαντική αύξηση της απόδοσης σε σχέση με το συμβατικό λίπασμα CAN. Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση Ουρία 46%N επετεύχθη απόδοση 550,28 Kg/στρ ενώ στην επέμβαση Ουρία 46%N+NBPT η απόδοση αυξήθηκε κατά 2,39% και έφτασε τα 563,41 Kg/στρ. Στην επέμβαση Ουρία 40%N σημειώθηκε απόδοση 526,65 Kg/στρ ενώ στην επέμβαση Ουρία 40%N+NBPT η απόδοση αυξήθηκε κατά 2,98% και ανήλθε στα 542,33 Kg/στρ. Όσον αφορά τα λιπάσματα CAN, αξίζει να σημειωθεί ότι έφεραν υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τα λιπάσματα ουρίας, χωρίς όμως η μεταξύ τους διαφορά να κρίνεται ως στατιστικά σημαντική ($P < 0,05$). Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση CAN 27%N επετεύχθη απόδοση 560,45 Kg/στρ ενώ στην επέμβαση CAN 27% N + DMPSA η απόδοση εμφανίζεται αυξημένη κατά 1,13% και ανέρχεται στα 566,83 Kg/στρ.

Για την απόδοση σε πρωτεΐνη παρατηρήθηκε πως η χρήση του αναστολέα ουρεάσης στα λιπάσματα ουρίας έφερε σημαντική διαφορά σε σχέση με τα συμβατικά λιπάσματα ουρίας, πράγμα που δεν συνέβη με την χρήση του αναστολέα νιτροποίησης στο λίπασμα CAN σε σχέση με το συμβατικό λίπασμα CAN. Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση Ουρία 46%N σημειώθηκε απόδοση σε πρωτεΐνη 74,49 Kg/στρ, ενώ στην επέμβαση Ουρία 46% N+NBPT η απόδοση σε πρωτεΐνη αυξήθηκε κατά 8,69% ανήλθε σε 80,96 Kg/στρ. Στην επέμβαση Ουρία 40%N η απόδοση σε πρωτεΐνη έφτασε στα 68,13 Kg/στρ ενώ στην επέμβαση Ουρία 40% N+NBPT αυξήθηκε κατά 9,32% και ανήλθε σε 74,52 Kg/στρ. Τέλος, στην επέμβαση CAN 27%N η απόδοση σε πρωτεΐνη

έφτασε τα 65,46 Kg/στρ και στην επέμβαση CAN 27%N +DMPSA αυξήθηκε κατά 6,14% και άγγιξε τα 69,49 Kg/στρ.

Η αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE) φαίνεται να επηρεάστηκε από την χρήση των αναστολέων στα λιπάσματα, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε σημαντική αύξηση του δείκτη σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά λιπάσματα. Πιο συγκεκριμένα στην επέμβαση Ουρία 46% N ο δείκτης NUE ήταν 0,24, ενώ στην επέμβαση Ουρία 46%N+NBPT αυξήθηκε κατά 29,17% και έφτασε το 0,31. Στην επέμβαση Ουρία 40%N ο δείκτης NUE ήταν 0,17 ενώ στην επέμβαση Ουρία 40%N+NBPT αυξήθηκε κατά 41,18% φτάνοντας το 0,24. Τέλος, στην επέμβαση CAN 27%N ο δείκτης NUE ήταν 0,14 ενώ στην επέμβαση CAN 27%N+DMPSA έφτασε στο 0,18, αυξημένος κατά 28,57%. Όπως παρατηρούμε τόσο στα συμβατικά όσο και στα παρεμποδισμένα λιπάσματα, η χρήση CAN αντί ουρίας έφερε χαμηλότερες τιμές για τον δείκτη NUE.

Η χρήση της ουρίας με 46%N στην συμβατική και στην παρεμποδισμένη της μορφή σημείωσε τις μεγαλύτερες τιμές για τον δείκτη συγκομιδής (HI) σε σχέση με τα υπόλοιπα λιπάσματα. Ωστόσο μεταξύ της συμβατικής και παρεμποδισμένης της μορφής δεν καταγράφηκε στατιστικά σημαντική διαφορά ($P < 0.05$). Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση Ουρία 46%N ο δείκτης συγκομιδής ήταν 0,4 και στην επέμβαση Ουρία 46%N+NBPT ήταν 0,41. Στις επεμβάσεις ουρίας με 40%N παρατηρήθηκε μια μείωση του δείκτη συγκομιδής με την παρουσία του αναστολέα ουρεάσης που ωστόσο δεν κρίνεται στατιστικά σημαντική ($P < 0,05$). Στην επέμβαση Ουρία 40%N ο δείκτης συγκομιδής ήταν 0,36 και στην επέμβαση Ουρία 40%N+NBPT ήταν 0,34. Τέλος, στα λιπάσματα CAN, εντοπίστηκε στατιστικά σημαντική μείωση ($P < 0,05$) του δείκτη συγκομιδής με την παρουσία του αναστολέα νιτροποίησης. Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση CAN27%N ο δείκτης συγκομιδής ήταν 0,39 ενώ στην επέμβαση CAN 27%N+DMPSA ήταν 0,35.

Η χρήση CAN με ή χωρίς αναστολέα νιτροποίησης οδήγησε σε μεγαλύτερες τιμές του δείκτη γεωργικής αποτελεσματικότητας αζώτου (NAE) σε σχέση με τα αντίστοιχα λιπάσματα ουρίας, ωστόσο η χρήση του αναστολέα νιτροποίησης δεν προκάλεσε στατιστικά σημαντική μεταβολή στον δείκτη NAE. Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση CAN27%N ο δείκτης NAE ήταν 6,18 και στην επέμβαση CAN27%N+DMPSA ήταν 6,58. Αντίθετα, η χρήση του αναστολέα ουρεάσης στα λιπάσματα ουρίας, έφερε στατιστικά σημαντικές μεταβολές σε σχέση με τα συμβατικά λιπάσματα ουρίας. Ο δείκτης NAE στην επέμβαση Ουρία 46%N ήταν 5,54 ενώ στην

επέμβαση Ουρία 46%N+NBPT ήταν 6,36, και στην επέμβαση Ουρία 40%N ήταν 4,07 ενώ στην επέμβαση Ουρία 40%N+NBPT ήταν 5,05.

Συνοψίζοντας:

- ✓ Οι αποδόσεις αυξήθηκαν με την χρήση των αναστολέων νιτροποίησης και ουρεάσης από 1,14 έως 2,98%, με τα λίπασμα CAN να οδηγούν σε μεγαλύτερες αποδόσεις σε σχέση με τα λιπάσματα της ουρίας τόσο στην συμβατική όσο και στην παρεμποδισμένη τους μορφή.
- ✓ Η περιεκτικότητα του κόκκου σε πρωτεΐνη αυξήθηκε με την προσθήκη αναστολέων σε όλες τις περιπτώσεις με τις επεμβάσεις ουρίας με 46% N να παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τόσο για τα συμβατικά όσο και για τα παρεμποδισμένα λιπάσματα.
- ✓ Ο δείκτης NUE αυξήθηκε από 28,57 έως 41,18% με την προσθήκη των αναστολέων στα λιπάσματα.
- ✓ Ο δείκτης NAE αυξήθηκε με την προσθήκη αναστολέων σε όλα τα λιπάσματα (από 6,47 έως 24,08%).
- ✓ Ο δείκτης συγκομιδής (HI) μειώθηκε σημαντικά με την χρήση αναστολέα νιτροποίησης στο λίπασμα CAN.

Το N είναι το πιο σημαντικό θρεπτικό συστατικό των φυτών όσον αφορά την απόδοση. Η έλλειψη αζώτου σύμφωνα με τους Basso et al. (2013), οδηγεί σε μικρότερη συσσώρευση βιομάζας, μειωμένη φωτοσυνθετική ικανότητα καθώς επίσης και σε μειωμένες αποδόσεις και χαμηλή πρωτεΐνη στους παραγόμενους σπόρους, πράγμα που καθιστά την λίπανση με άζωτο καθοριστικής σημασίας για την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Το άζωτο αυξάνει το ύψος του φυτού και το ξηρό του βάρος (Bahmanyar & Ranjbar, 2008) και βελτιώνει την θρέψη των φυτών καθώς και την ποιότητα των παραγόμενων σπόρων (Wang; Vinocur; Altman, 2003).

Η αξιολόγηση διαφορετικών στρατηγικών λίπανσης, όπως η πηγή αζώτου, η χρήση αναστολέων ή ο χρόνος εφαρμογής σε επίπεδο εκμεταλλεύσεων απαιτεί όχι μόνο την μέτρηση των απωλειών αζώτου αλλά και την εξέταση των επιπτώσεων στην απόδοση και την ποιότητα των καλλιεργειών η οποία επηρεάζεται από τη διαχείριση της αζωτούχου λίπανσης (Massoudifar et al., 2014). Στην περίπτωση του σιταριού (*Triticum aestivum* L.), η συγκέντρωση και η σύνθεση της πρωτεΐνης επηρεάζεται από την παροχή NH_4^+ και NO_3^- και την διαθεσιμότητά τους στο χρόνο (Fuertes- Mendizábal et al., 2013).

Οι Garrido-Lestache et al. (2005) ερευνήσαν την επίδραση του επιπέδου λίπανσης με άζωτο σε καλλιέργεια σκληρού σιταριού κάτω από μεσογειακές συνθήκες (Ισπανία). Η απόδοση σε σπόρο αυξήθηκε σημαντικά μόνο μεταξύ του μάρτυρα και της επέμβασης με 10 Kg N/στρ, ενώ δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση όταν το επίπεδο λίπανσης ανέβηκε στα 15 και 20 Kg N/στρ. Ωστόσο, η πρωτεΐνη του κόκκου ανταποκρίθηκε πολύ θετικά στα αυξανόμενα επίπεδα αζώτου που εφαρμόστηκαν. Στην επέμβαση του μάρτυρα η πρωτεΐνη ήταν 10,7%, στα 10 Kg N/στρ 12,7%, στα 15 Kg N/στρ. 13,9% και στα 20 Kg N/στρ. 14,6%. Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκαν συνολικά 16 Kg N/στρ και η πρωτεΐνη κυμάνθηκε μεταξύ των επεμβάσεων (πλην του μάρτυρα) από 11,7 έως 14,4% με σαφές πλεονέκτημα των παρεμποδισμένων λιπασμάτων σε σχέση με τα συμβατικά. Η βελτιστοποίηση της ανόργανης λίπανσης με άζωτο με στόχο την αύξηση της αποτελεσματικότητας χρήσης του αζώτου (NUE) είναι βασικό ζήτημα και στόχος της εφαρμοσμένης έρευνας στα γεωργικά συστήματα. Η αποτελεσματικότητα χρήσης του αζώτου στις καλλιέργειες σιτηρών παγκοσμίως εκτιμήθηκε γύρω στο 33% (Raun & Johnson, 1999), κυμαινόμενη από 14 έως 59% στο σιτάρι (Melaj et al, 2003; Lopez-Bellido et al. , 2005), που υποδηλώνει ότι οι τρέχουσες στρατηγικές που ακολουθούνται στην λίπανση με άζωτο είναι εξαιρετικά αναποτελεσματικές. Η αποτελεσματικότητα χρήσης του αζώτου στην παραγωγή σιτηρών μπορεί να είναι χαμηλή λόγω των απωλειών του αζώτου προς το περιβάλλον (λόγω εξάτμισης, έκπλυσης κλπ.). Για να μειωθούν αυτές οι απώλειες, η εφαρμογή λιπάσματος θα πρέπει να στοχεύει στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αντιστοίχιση της απαίτησης του φυτού σε άζωτο, με το διαθέσιμο άζωτο στο έδαφος. Άρα η εφαρμογή του αζώτου θα πρέπει να γίνεται κατά το στάδιο ανάπτυξης που επιτρέπει στο φυτό την ταχεία πρόσληψή του (Raun et al., 2008). Οι Garrido-Lestache et al. (2004) παρατήρησαν ότι ο χρόνος εφαρμογής και οι πολλαπλές εφαρμογές αζώτου επηρέασαν την περιεκτικότητα των κόκκων σε πρωτεΐνη, η οποία κορυφώθηκε όταν το μισό ή το 1/3 του αζώτου που εφαρμόστηκε συνολικά(15 kg N/στρ), εφαρμόστηκε κατά την επιμήκυνση του στελέχους και σε ορισμένες περιπτώσεις μόνο κατά το αδελφωμα. Ωστόσο η επίδραση των πολλαπλών εφαρμογών αζώτου στην ποιότητα των κόκκων ήταν ασαφής σε άλλες μελέτες (Ayoub et al., 1994; Garrido-Lestache et al., 2005). Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ευεργετικά αποτελέσματα από την εφαρμογή λιπασμάτων με αναστολείς νιτροποίησης ή/και ουρεάσης για την ενίσχυση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών (Prasad and Power, 1995; Pasda et al., 2001), καθώς παρέχουν έναν τρόπο μείωσης των απωλειών αζώτου και αυξάνουν την αποτελεσματικότητα της χρήσης

αζώτου. Τέτοια λιπάσματα έχουν την δυνατότητα να αυξήσουν τις αποδόσεις των καλλιεργειών καθυστερώντας τις διαδικασίες μετασχηματισμού του αζώτου συγχρονίζοντας έτσι την διαθεσιμότητα αζώτου στο έδαφος με την μέγιστη ζήτηση της καλλιέργειας (Franzen, 2011). Οι αναστολείς ουρεάσης αποτρέπουν ή καθυστερούν τον ρυθμό υδρόλυσης της ουρίας για 7 έως 14 ημέρες, αποκλείοντας τις θέσεις δέσμευσης των ενζύμων ουρεάσης (Trenkel 2010), ενώ οι αναστολείς νιτροποίησης αναστέλλουν τη βιολογική οξείδωση του NH_4^+ σε NO_3^- για 4 έως 10 εβδομάδες αναστέλλοντας την δραστηριότητα των νιτροποιητικών βακτηρίων (Trenkel 2010; Franzen 2011). Επιπλέον αυτά τα λιπάσματα δίνουν την δυνατότητα μονής εφαρμογής αποφεύγοντας τους χρονικούς και οικονομικούς περιορισμούς που συνδέονται με τις πολλαπλές εφαρμογές λιπασμάτων κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Στην έρευνα των Raza et al. (2019) που πραγματοποιήθηκε στην Κίνα, η χρήση αναστολέα νιτροποίησης στην καλλιέργεια σιταριού με μονή εφαρμογή 16 Kg N/στρ, αύξησε κατά μέσο όρο την απόδοση σε σπόρο κατά 5,84% και τον δείκτη NUE κατά 53%. Οι Thapa et al. (2015), σε έρευνα που πραγματοποίησαν στις ΗΠΑ, παρατήρησαν αύξηση στις αποδόσεις κατά 3,4% με την χρήση αναστολέα νιτροποίησης, ενώ η περιεκτικότητα των παραγομένων σπόρων σε πρωτεΐνη μειώθηκε ανεπαίσθητα. Σύμφωνα με την συλλογή δεδομένων από 6 έρευνες, οι Canterella et al.(2018) αναφέρουν πως η χρήση αναστολέα ουρεάσης σε λιπάσματα ουρίας έφερε κατά μέσο όρο αύξηση 10,2% στην απόδοση σε καλλιέργεια σιταριού, αντίθετα οι McKenzie et al. (2010) αναφέρουν πως η χρήση αναστολέα δεν επηρέασε την απόδοση σε σπόρο και την περιεκτικότητα των κόκκων σε πρωτεΐνη σε χειμερινό σιτάρι που καλλιεργήθηκε στον Καναδά.

Οι Guardia et al. (2018) εφάρμοσαν σε σιτάρι λιπάνσεις ουρίας με αναστολείς νιτροποίησης ή/και ουρεάσης (12 Kg N/στρ). Από την έρευνα αυτή προέκυψε μικρή αύξηση στην απόδοση σε σπόρο (της τάξης του 1,48%) στην επέμβαση της ουρίας με αναστολέα ουρεάσης NBPT σε σχέση με την απλή ουρία, ενώ το άζωτο κόκκου αυξήθηκε κατά 3,85% και η αποδοτικότητα της χρήσης αζώτου (NUE) κατά 7,2%. Αντίστοιχα, στην παρούσα μελέτη η ποσοστιαία μεταβολή της απόδοσης στα λιπάσματα ουρίας με αναστολέα ουρεάσης σε σχέση με τα συμβατικά λιπάσματα είναι 2,39% (για Ουρία 46% N+NBPT) και 2,98% (για Ουρία 40% N+NBPT), το άζωτο κόκκου εμφανίζεται αυξημένο κατά 6,03 και 6,31%, και ο δείκτης NUE αυξήθηκε κατά 29,17 και 41,18% αντίστοιχα. Σε τριετή μελέτη των Romero et al. (2017) που πραγματοποιήθηκε στις ΗΠΑ, η χρήση του NBPT δεν επηρέασε καθόλου τον δείκτη γεωργικής αποτελεσματικότητας αζώτου (NAE) σε σχέση με την εφαρμογή της ουρίας

χωρίς τον αναστολέα. Αυτό δεν συνέβη στην παρούσα μελέτη, καθώς ο δείκτης NAE αυξήθηκε κατά 14,8 % για την Ουρία 46% N + NBPT και κατά 24,08% για την Ουρία 40% N + NBPT.

Στα πλαίσια της προσπάθειας για περιορισμό των απωλειών του αζώτου προς το περιβάλλον, και με δεδομένες τις συνθήκες που επικρατούν στην Μεσόγειο, οι Guardia et al. (2020) αναφέρουν πως η χρήση ασβεστούχου νιτρικής αμμωνίας (CAN) αντί ουρίας θα μπορούσε να μετριάσει τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Σύμφωνα με τους Hagin et al. (1990), η εφαρμογή νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου με την χρήση CAN σε ημιξηρικές συνθήκες χωρίς άρδευση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη διαθεσιμότητα αζώτου και επομένως να είναι μια αποτελεσματική στρατηγική για την ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Στην παρούσα μελέτη, η χρήση CAN (με και χωρίς τον αναστολέα νιτροποίησης DMPSA) παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τα λιπάσματα ουρίας που εφαρμόστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, η επέμβαση CAN 27% N απέδωσε 560 Kg/στρ ενώ στην επέμβαση CAN 27%N +DMPSA επετεύχθη απόδοση αυξημένη κατά 1,14%, δηλαδή 566,83 Kg/στρ. Στην επέμβαση CAN 27% N το άζωτο κόκκου ανήλθε σε 2% και ο δείκτης NUE σε 0,14, ενώ στην επέμβαση CAN 27% N +DMPSA το άζωτο κόκκου ανήλθε σε 2,1% και ο δείκτης NUE αυξήθηκε κατά 28,57% και έφτασε το 0,18. Αυτά τα ευρήματα, έρχονται σε σύγκρουση με την μελέτη των Guardia et al. (2020) όπου στην έρευνα που πραγματοποίησαν, η χρήση του CAN με αναστολέα νιτροποίησης DMPSA έφερε μειωμένη απόδοση σε σπόρο κατά 0,5%, μειωμένο άζωτο κόκκου και μειωμένο δείκτη NUE κατά 25,86%. Σε αυτό όμως το σημείο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αποτελεσματικότητα των αναστολέων νιτροποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα και την κατανομή των βροχοπτώσεων σε καλλιεργείες χωρίς άρδευση (Abalos et al. 2017).

6. Βιβλιογραφία

Ξένη βιβλιογραφία

1. Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, Guardia G, Vallejo A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agric Ecosyst Environ* 2014;189:136–44.
2. Abalos D, Sanz-Cobena A, Andreu G, Vallejo A.. Rainfall amount and distribution regulate DMPP effects on nitrous oxide emissions under semiarid Mediterranean conditions. *Agric Ecosyst Environ*. 2017 238:36–45.
3. Alessi, J. and J.F. Power. Effect of source and rate of nitrogen on N-uptake and fertilizer efficiency by spring wheat and barley. *Agron. J.* 1973 65: 53-55
4. Andreae, M. (1999): ENTEC® (DMPP) - ein neuer Ammoniumstabilisator: ökotoxikologische Bewertung, in Proceedings of a Scientific Colloquium. BASF AG (ed.) Düngen mit einer neuen Technologie Innovation in der Düngung ENTEC®, BASF Agricultural Center Limburgerhof, Germany, pp. 45–49.
5. Arp, D. J., Sayavedra-Soto, L. A., Hommes, N. G.: Molecular biology and biochemistry of ammonia oxidation by *Nitrosomonas europaea*. *Arch. Microbiol.* 2002,178, 250–255.
6. Arp, D. J., Stein, L. Y.: Metabolism of inorganic N compounds by ammoniaoxidizing bacteria. *Crc. Cr. Rev. Bioch. Mol.* 2003 38, 471–495.
7. Artola E, Cruchaga S, Ariz I, Moran JF, Garnica M, Houdusse F, et al. Effect of N- (n-butyl) thiophosphoric triamide on urea metabolism and the assimilation of ammonium by *Triticum aestivum* L. *Plant Growth Regul* 2011;63(1):73–9.
8. Ashworth, J., Briggs, G. G., Evans, A. A., Matula, J.: Inhibition of nitrification by nitrapyrin, carbon disulphide and trithiocarbonate. *J. Sci. Food Agric.* 1977 28, 673– 683.
9. Austin, R.B., J. Bingham, R.D. Blackwell, J.T. Evans M.A. Ford, C.L. Morgan, and M. Taylor. Genetic improvements in winter wheat since 1900 and associated physiological changes. *J. Agric Sci*, 1980, 94: 675-690
10. Ayoub, M., Guertin, S., Fregeau-Reid, J., Smith, D.L., 1994. Nitrogen fertilizer effect on breadmaking quality of hard red spring wheat in eastern Canada. *Crop Science* 34, 1346–1352.
11. Azam, F., Benckiser, G., Müller, C., Ottow, J. C. G. (2001): Release, movement and recovery of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate

- from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions. *Biol. Fertil. Soils* 34, 118–125.
12. Bahmanyar, M., and G. Ranjbar. 2008. The role of potassium in improving growth indices and increasing. *Journal of Applied Sciences* 8:1280–5.
 13. Barker, A.V. & Bryson, G.M. (2012). Nitrogen, In: *Books in Soils, Plants, and the Environment, Vol. 117- Handbook of Plant Nutrition* (Baker, A.V., Pilbeam, D.J. eds. CRC Press, Boca Raton, pp. 21-50.
 14. Barreto HJ, Westerman RL. Soil urease activity in winter wheat residue management systems. *Soil Sci Soc Am J* 1989;53:1455–8
 15. Basso, B., Cammarano, D., Fiorentino, C., & Ritchie, J. T. (2013). Wheat yield response to spatially variable nitrogen fertilizer in Mediterranean environment. *European journal of Agronomy*, 51, 65-70.
 16. Bédard, C., Knowles, R. (1989): Physiology, biochemistry, and specific inhibitors of CH₄, NH₄⁺, and CO oxidation by methanotrophs and nitrifiers. *Microbiol. Mol. Biol. R.* 53, 68–84.
 17. Benini S, Rypniewski WR, Wilson KS, Mangani S, Ciurli S. Molecular details of urease inhibition by boric acid: insights into the catalytic mechanism. *J Am Chem Soc* 2004;126:3714–5.
 18. Blackmer, A. M., Bremner, J. M. (1978): Inhibitory effect of nitrate on reduction of N₂O to N₂ by soil microorganisms. *Soil Biol. Biochem.* 10, 187–191.
 19. Blainey PC, Mosier AC, Potanina A, Francis CA, Quake SR (2011) “Genome of a LowSalinity Ammonia-Oxidizing Archaeon Determined by Single-Cell and Metagenomic Analysis”. *PLoS ONE* 6(2): e16626. doi:10.1371/journal.pone.0016626
 20. Bloom, A.J., Sukrapanna, S.S., Warner, R.L. 1992. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology*, 99:1294-1301
 21. Boatwright, G.O. and H.J. Haas. 1961. Development and composition of spring wheat as influenced by nitrogen and phosphorus fertilization. *Argon. J.* 53:33-36
 22. Bock BR, Kissel DE. Ammonia volatilization from urea fertilizers. Muscle Shoals, AL, USA: National Fertilizer Development Center – NFDC; 1988
 23. Braker R., and G. Conrad. (2011) "Diversity, Structure, and Size of N₂O-Producing Microbial Communities in Soils—What Matters for Their

- Functioning?" *Advances in Applied Microbiology* vol75. London: Elsevier Inc., 33-70.
24. Bremner JM, Mulvaney RL. Urease activity in soils. In: Burns RG, editor. *Soil enzymes*. London: Academic Press; 1978. p. 149–96
 25. Bremner, J. M., Yeomans, J. C. (1986): Effects of nitrification inhibitors on denitrification of nitrate in soil. *Biol. Fertil. Soils* 2, 173–179
 26. Breuer, L., Kiese, R., and Butterbach-Bahl, K.: Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain-forest soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 834–844, 2002
 27. Cai, Y., Ding, W., Zhang, X., Yu, H., and Wang, L. (2010) "Contribution of heterotrophic nitrification to nitrous oxide production in a long-term N-fertilized arable black soil." *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41: 2264–2278.
 28. Campbell, N. A., Reece, J. B. (2009): *Biologie*, 8th ed. Pearson Education Deutschland GmbH, Munich, Germany
 29. Cantarella H, Trivelin PCO, Contin TLM, Dias FLF, Rossetto R, Marcelino R, et al. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. *Sci Agric* 2008;65(4):397–401.
 30. Cantarella H.; Otto R.; Soares J.R.; Silva A.G., Agronomic Efficiency of NBPT as a Urease Inhibitor: A review, *Journal of Advanced Research*, 2018, 13, 19-27
 31. Cantarella H. In: Novaes RF, Hugo AVV, Barros NF, Cantarutti RB, Neves JCL, editors. *Fertilidade do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 375–470.
 32. Chien SH, Prochnow LI, Cantarella H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Adv Agron* 2009;102:267–322.
 33. Cho, C. M., Sakdinan, L. (1978): Mass spectrometric investigation on denitrification. *Can. J. Soil Sci.* 58, 443–457.
 34. Cox M.C., Qualset C.O., Rains D.W., 1985. Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat.I. Dry matter and nitrogen accumulation. *Crop Sci.* 25: 430-435
 35. Cox M.C., Qualset C.O., Rains D.W., 1985. Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat.II. Nitrogen assimilation in relation to grain yield and protein. *Crop Sci.* 25: 435-440

36. Cruchaga S, Lasa B, Jauregui I, González-Murua C, Aparicio-Tejo PM, Ariz I. Inhibition of endogenous urease activity by NBPT application reveals differential N metabolism responses to ammonium or nitrate nutrition in pea plants: a physiological study. *Plant Soil* 2013;373:813–27.
37. D.W. Kent-Jones and A.J. Amos, 1957, Modern cereal chemistry, Liverpool, Notthern Pub. Co.
38. De Boer, W., Tietema, A., Klein Gunnewick, P.J.A., 1992. The chemolithotrophic ammonium-oxidizing community in a nitrogen saturated acid forest in relation to pHdependent nitrifying activity. *Soil Biology & Biochemistry* 24, 229–234.
39. Di, H. J., Cameron, K. C. (2002): The use of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), to decrease nitrate leaching and nitrous oxide emissions in a simulated grazed and irrigated grassland. *Soil Use Manag.* 18, 395–403.
40. Di, H. J., Cameron, K. C. (2004): Effects of temperature and application rate of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on nitrification rate and microbial biomass in a grazed pasture soil. *Aust. J. Soil Res.* 42, 927–932.
41. Dimmock, J., and M.J. Gooding. 2002. The influence of foliar diseases, and their control by fungicides, on the protein concentration in wheat grain: A review. *J. Agric Sci. (Cambridge)* 138:349-366
42. Dittert, K., Bol, R., King, R., Chadwick, D., Hatch, D. (2001): Use of a novel nitrification inhibitor to reduce nitrous oxide emission from 15N-labelled dairy slurry injected into soil. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 15, 1291–1296.
43. Domínguez MJ, Sanmartín C, Font M, Palop JA, San Francisco S, Urrutia O, et al. Design, synthesis, and biological evaluation of phosphoramidate derivatives as urease inhibitors. *J Agric Food Chem* 2008;56:3721–31.
44. Dubetz, S., & Wells, S. A. (1968). Reaction of barley varieties to nitrogen fertilizer. *The Journal of Agricultural Science*, 70(3), 253-256.
45. Dvorak J., (1995), Luo M. C., Akhunov E. D., (2010), N.I. Vavilov's Theory of Centers of Diversity in the Light of Current Understanding of Wheat Diversity, Domestication and Evolution, *Czech J. Genet. Plant Breed.*, 47: 20-27
46. Eilrich G.L., Hageman R.H., 1973. Nitrate reductase activity and its relationship to accumulation of vegetative and grain nitrogen in wheat. *Crop Sci.* 13: 257-261
47. Engel RE, Towey BD, Gravens E. Degradation of the urease inhibitor NBPT as affected by soil pH. *Soil Sci Soc Am J* 2015;79(6):1674–83

48. Engle M.S. και Akexander M. (1958). Growth and autotrophic metabolism of *Nitrosomonas europae*. *J. Bact.* 76:217.
49. Ernst JW, Massey HF. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *Soil Sci Soc Am J* 1960;24(2):87–90
50. Fageria, N. K., & Prabhu, A. S. (2003). Response of lowland rice to nitrogen application and seed treatment with fungicide doses to blast control. *Pesq. Agropec. Brasileira*, 39, 123-129.
51. Fangueiro, D., Fernandes, A., Coutinho, J., Moreira, N., Trindade, H. (2009): Influence of two nitrification inhibitors (DCD and DMPP) on annual ryegrass yield and soil mineral N dynamics after incorporation with cattle slurry. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 40, 3387–3398.
52. Fatima S., Arshad M., Khalil S., Ali A., Amjad M. S., & Kausar R., (2014). Utilization of synthetics for drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum*), *International journal of Biosciences* 5(1): 104-112.
53. Federolf, C.-P., Westerschulte, M., Olf, H. W., Broll, G., Trautz, D. (2016): Enhanced nutrient use efficiencies from liquid manure by positioned injection in maize cropping in northwest Germany. *Eur. J. Agron.* 75, 130–138.
54. Finlay, R.D., A. Frostegard, A.M. Sonnerfeldt. (1992) "Utilization of organic and inorganic nitrogen sources by ectomycorrhizal fungi in pure culture and in symbiosis with *Pinus contorta* Dougl. ex Loud." *New Phytologist*. 120:105-115.
55. Finney K F, Yamazaki W T, Moore V L, Rubenthaler G L. 1987. Quality of hard, soft, and durum wheats. In: Heyne E G, ed., *Wheat and Wheat Improvement*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, *Soil Science Society of America*, Madison, WI. pp. 677–748.
56. Frankenberger WT, Tabatabai MA. Amidase and urease activities in plants. *Plant Soil* 1982
57. Franzen, D.W. 2011. Nitrogen extenders and additives for field crops. Rep. SF-1581. North Dakota State Univ., Fargo. (διαθέσιμο στο : <https://www.ag.ndsu.edu/publications/crops/nitrogen-extenders-and-additives-for-field-crops/sf1581.pdf>)
58. Fuertes-Mendizábal T, González-Torralba J, Arregui LM, González-Murua C, González-Moro MB, Estavillo JM. 2013. Ammonium as sole N source improves grain quality in wheat. *J Sci Food Agr.* 93:2162–2171.

59. Gaines, T. P., Gaines, S. T. (1994): Soil texture effect on nitrate leaching in soil percolates. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25, 2561–2570.
60. Garrido-Lestache E.; Lopez-Bellido R.J.; Lopez-Bellido L. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *Europ. J. Agronomy* 23 (2005) 265–278.
61. Garrido-Lestache, E., López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., 2004. Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 85, 213–236.
62. Gioacchini P, Giovannini C, Marzadori C, Antisari LV, Simoni A, Gessa C. Effect of N-(n-butyl)thiophosphoric triamide added to peat and leather in urea-based fertilizers on urea hydrolysis and ammonia volatilization. *Commun Soil Sci Plant Anal* 2000;31(19–20):3177–91
63. Godde, M., and Conrad, R. (2000). Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture. *Biol. Fertil. Soils* 32, 120–128.
64. Gonzalez-Dugo, V., Durand J.L., Gastal, F. 2010. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30:529-544
65. Gooding M.J. and Davies W.P., (1997). Wheat production and utilization. Systems, Quality and the Environment, (Eds) CAB International, Cambridge, UK, pp. 355.
66. Grant CA, Bailey LD. Effect of seed-placed urea fertilizer and N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) on emergence and grain yield of barley. *Can J Plant Sci* 1999;79(4):491–6
67. Grant CA, Derksen DA, McLaren D, Irvine RB. Nitrogen fertilizer and urease inhibitor effects on canola seed quality in a one-pass seeding and fertilizing system. *Field Crop Res* 2011;121:201–8.
68. Guardia G., Carmen González-Murua , Teresa Fuertes-Mendizábal & Antonio Vallejo (2020) The scarcity and distribution of rainfall drove the performance (i.e., mitigation of N oxide emissions, crop yield and quality) of calcium ammonium nitrate management in a wheat crop under rainfed semiarid conditions, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66:13, 1827-1844.
69. Guardia, G., Cangani, M. T., Andreu, G., Sanz-Cobena, A., García-Marco, S., Álvarez, J. M., Recio-Huetos, J., Vallejo, A. (2017): Effect of inhibitors and

- fertigation strategies on GHG emissions, NO fluxes and yield in irrigated maize. *F. Crop. Res.* 204, 135–145.
70. Guardia, G., Sanz-Cobena, A., Sanchez-Martín, L., et al., 2018. Urea-based fertilization strategies to reduce yield-scaled N oxides and enhance bread-making quality in a rainfed Mediterranean wheat crop. *Agric. Ecosyst. Environ.* 265(June), 421-431.
 71. Gustafson P., Raskina O., Ma X. and Nevo E., (2009) Wheat evolution, domestication, and improvement. In: Carver BF (ed) *Wheat: Science and trade*. Wiley, Danvers, pp 5-30.
 72. Hagin J, Olsen SR, Shaviv A. 1990. Review of interaction of ammonium-nitrate and potassium nutrition of crops. *J Plant Nutr.* 13(10):1211–1226.
 73. Halloran, G.M. 1981. Cultivar differences in nitrogen translocation in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 32:535-544
 74. Hankinson T.R. και Schmidt E.L. (1988). An Acidophilic and a Neutrophilic Nitrobacter Strain Isolated from the Numerically Predominant Nitrite-Oxidizing Population of an Acid Forest Soil. *Appl Environ Microbiol.* 54(6):1536–1540.
 75. Haun, J.R. (1973) Visual Quantification of Wheat Development. *Agronomy Journal*, 66, 116-119.
 76. Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager Moller, I., White, P. (2012). Functions of macronutrients, In: *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (Marschner, P. ed.). Academic Press, London, pp. 135-189
 77. Heitholt, J. J., Croy, L. I., Maness, N. O., & Nguyen, H. T. (1990). Nitrogen partitioning in genotypes of winter wheat differing in grain N concentration. *Field crops research*, 23(2), 133-144.
 78. Hendrickson LL, Douglass EA. Metabolism of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) in soils. *Soil Biol Biochem* 1993;25 (11):1613–28.
 79. Hendrickson, L. L., Keeney, D. R. (1979): Effect of some physical and chemical factors on the rate of hydrolysis of Nitrapyrin (N-Serve). *Soil Biol. Biochem.* 11, 47–50.
 80. Herdel, K., Schmidt, P., Feil, R., Mohr, A., & Schurr, U. (2001). Dynamics of concentrations and nutrient fluxes in the xylem of *Ricinus communis*—diurnal

- course, impact of nutrient availability and nutrient uptake. *Plant, Cell & Environment*, 24(1), 41-52
81. Hodge A., Robinson D., Fitter A. 2000. Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen? *Trends in Plant Science*, 5: 304-308.
 82. Högberg, M.N., Höberg, P., Myrold, D.D., 2007a. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three? *Oecologia* 150, 590-601.
 83. Holcomb JC, Sullivan DM, Horneck DA, Clough GH. Effect of irrigation rate on ammonia volatilization. *Soil Sci Soc Am J* 2011;75(6):2341–7.
 84. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A. & Maskell K., 1995, Climate change 1995, The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Published by the press syndicate of the University of Cambridge, United Kingdom.
 85. Hyman, M. R., Arp, D. J. (1992): ¹⁴C²H₂- and ¹⁴CO₂-labeling studies of the de Novo synthesis of polypeptides by *Nitrosomonas europaea* during recovery from acetylene and light inactivation of ammonia monooxygenase. *J. Biol. Chem.* 267, 1534–1545.
 86. Hyman, M. R., Russell, S. A., Ely, R. L., Williamson, K. J., Arp, D. J. (1995): Inhibition, Inactivation, and Recovery of Ammonia-Oxidizing Activity in Cometabolism of Trichloroethylene by *Nitrosomonas europaea*. *Appl. Environ. Microbiol.* 61, 1480–1487.
 87. Irigoyen I., Muro J., Azpilikueta M., Aparicio-Tejo P. and Lumsfus C. 2003 Ammonium Oxidation Kinetics in the Presence of Nitrification Inhibitors DCD and DMPP at Various Temperatures. *Australian Journal of Soil Research* 41: 1177-1183.
 88. Jenner, C. F., Ugalde, T. D., & Aspinall, D. (1991). The physiology of starch and protein deposition in the endosperm of wheat. *Functional Plant Biology*, 18(3), 211- 226
 89. Johanson E., Prieto- Linde M.L. & Jonsson, J.O. (2001). Effects of wheat cultivar and nitrogen application on storage protein composition and breadmaking quality. *Cereal Chemistry* 78: 19-25.
 90. Keener, W. K., Arp, D. J. (1993): Kinetic-Studies of Ammonia Monooxygenase Inhibition in *Nitrosomonas europaea* by Hydrocarbons and Halogenated

- Hydrocarbons in an Optimized Whole-Cell Assay. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 2501–2510.
91. Keeney, D. R. (1986): Inhibition of nitrification in soils, in Nitrification. IRL Press, Oxford, pp. 99–115.
 92. Kelliher, F. M., Clough, T. J., Clark, H., Rys, G., Sedcole, J. R. (2008): The temperature dependence of dicyandiamide (DCD) degradation in soils: A data synthesis. *Soil Biol. Biochem.* 40, 1878–1882.
 93. Kemmitt, S.J., Wright, D., Goulding, K.W.T., Jones, D.L., 2006. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 898e911.
 94. Killen G. J., Newman C.W., Eslick R.F. & El-Negoumy A.M. (1978). The effect of nitrogen fertilizer on the nutritional quality of barley. *Proc. West. Sec. Am. Sec. Am. Soc. Anim. Sci.* 29: 169-171.
 95. Kim, B.K., M.Y. Jung, D.S. Yu, S.J. Park, T.K. Oh, S.K. Rhee and J.F. Kim. (2011) "Genome Sequence of an Ammonia-Oxidizing Soil Archaeon, "Candidatus Nitrosoarchaeum koreensis" MY1." *Journal of Bacteriology.* 5539–5540.
 96. Kiss S, Simihaian M. Improving efficiency of urea fertilizers by inhibition of soil urease activity. Doordrech: Kluwer Academic Publishers; 2002
 97. Klepper, B., Rickman, R.W., and Peterson, C.M.. 1982. Quantitative characterization of vegetative development in small cereal grains. *Agron. J.* 74: 789–792.
 98. Knicker Heike , 2011 Soil organic N - An under-rated player for C sequestration in soils
 99. Konneke, M., A.E. Bernhard, J.R. de la Torre, C.B. Walker, J.B. Waterbury and D.A. Stahl (2005) "Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon." *Nature.* 437:543-546
 100. Li Q, Yang A, Wang Z, Roelcke M, Chen X, Zhang F-S, et al. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China. *Field Crop Res* 2015;175:96–105.
 101. Li S, Li J, Lu J, Wang Z. Effect of mixed urease inhibitors on N losses from surface-applied urea. *Int J Agric Sci Technol* 2015;3(1):23–7
 102. Linquist BA, Liu L, van Kessel C, van Groenigen KJ. Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: meta-analysis of yield and nitrogen uptake. *Field Crop Res* 2013;154:246–54.

103. Lipschultz, F., O.C. Zafiriou, F.C. Wofsy, M.B. McElroy, F.W. Valois and S.W. Watson. (1981) "Production of NO and N₂O by nitrifying bacteria ." *Nature*. 294:641-643.
104. Löffler, C.M., T.I. Rauch and R.H. Busch. 1985. Kernel and plants protein relationships on hard red spring wheat. *Crop Sci.* 25: 521-524
105. López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., Redondo, R., 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Research* 94, 86–97.
106. Lupton, F.G.H. and M.J. Pinthus.1969. Carbohydrate translocation from small tillers to spike producing shoots in wheat. *Nature (London)* 221:483-484.
107. Marschner, H., Kirkby, E., Cakmak, I. 1996. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. *Journal of Experimental Botany*, 47: 1255-1263.
108. Massoudifar O, Darvish Kodjouri F, Noor Mohammadi G, Mirhadi MJ. 2014. Effect of nitrogen fertilizer levels and irrigation on quality characteristics in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Arch Agron Soil Sci.* 60(7):925–934.
109. McCarty W. G. 1999 Modes of Action of Nitrification Inhibitors. *Biology and Fertility of Soils* 29:1-9
110. McCarty, G. W. (1999): Modes of action of nitrification inhibitors. *Biol. Fertil. Soils* 29, 1–9.
111. McCarty, G. W., Bremner, J. M. (1989): Inhibition of nitrification in soil by heterocyclic nitrogen compounds. *Biol. Fertil. Soils* 8, 204–211.
112. McClung, B., Wolf, D. C. (1980): Nitrification inhibition by nitrapyrin and terrazole in compost amended soil. *Agron. Abstr.* 171.
113. Melaj, M.A., Echeverría, H.E., López, S.C., Studdert, G., Andrade, F., Bárbaro, N.O., 2003. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Agronomy Journal* 95, 1525–1531.
114. Mira AB, Cantarella H, Souza-Netto GJM, Moreira LA, Kamogawa MY, Otto R. Optimizing urease inhibitor usage to reduce ammonia emission following urea application over crop residues. *Agric Ecosys Environ* 2017, 248:105–12.
115. Moragues M. & McMaster G., 2012, System to Uniquely Name Wheat Plant Structures, The Crop Science Society of America, Inc.

116. Mulder, A., A.A. van de Graaf, L.A. Robertson and J.G. Kuenen. (2006) "Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor." *FEMS Microbiology Ecology*. (16)3: 177–184.
117. Näsholm, T., Kielland, K. & Ganeteg, U. (2009). Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist*, 182, 31-48.
118. Neff JC, Chapin FS III, Vitousek PM. (2003). Breaks in the cycle: dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 1: 205–211
119. Orlof A.A., (1923). The geographical center of origin and the area of cultivation of durum wheat-T. durum Desf. *Bulletin of Applied Botany and Plant Breeding*, 13.
120. Overrein LN, Moe PG. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. *Soil Sci Soc Am J* 1967;31(1):57–61.
121. Pacholski, A., Berger, N., Bustamante, I., Ruser, R., Guillermo, G., Mannheim, T. (2016): Effects of the novel nitrification inhibitor DMPSA on yield, mineral N dynamics and N₂O emissions, in International Nitrogen Initiative Conference “Solutions to Improve Nitrogen Use Efficiency for the World.” Melbourne, Australia, pp. 4–8.
122. Palta J.A., T. Kobata, N.C. Turner and R. Fillery. 1994. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influence by postanthesis water deficits. *Crop Sci*. 34: 118-124
123. Pan B, Lam SK, Mosier A, Luo Y, Chen D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis. *Agric Ecosyst Environ* 2016;232:283–9.
124. Pasda, G., Hahndel, R., Zerulla, W., 2001. Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops. *Biology and Fertility of Soils* 34, 85–97.
125. Paulson KN, Kurtz LT. Locus of urease activity in soil. *Soil Sci Soc Am J* 1969;33 (6):897–901
126. Perez, P., R. Martinez Carrasco, L. Sanchez de la Puente. 1983. Uptake and distribution of nitrogen in wheat plants supplied with different amounts of nitrogen after stem elongation. *Ann. Appl. Biol.* 102: 399-406

127. Pfab, H., Palmer, I., Buegger, F., Fiedler, S., Müller, T., Ruser, R. (2012): Influence of a nitrification inhibitor and of placed N-fertilization on N₂O fluxes from a vegetable cropped loamy soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 150, 91–101.
128. Philips S.,(1995). Poaceal. In I. Hedberg and S. Edwards, eds., Flora of Ethiopia and Eritrea. Department of Systematic Botany, Uppsala University, Sweden, and the National Herbarium, Adolis Ababa University, Ethiopia, Volume 7, pp 59-63.
129. Porter J. Gawith M., (1999), Temperatures and the growth and development of wheat: a review, *European Journal of Agronomy*, 10(1): 23-26.
130. Prasad, R., Power, J. F. (1995): Nitrification inhibitors for agriculture, health, and the environment. *Adv. Agron.* 54, 233–281.
131. Prasad, R., Power, J.F., 1995. Nitrification inhibitors for agriculture, health, and the environment. *Advances in Agronomy* 54, 233–281.
132. Prosser, J.I., W.N. Graeme. (2008)"relative contributions of arhaea and bacteria to aerobic ammonia oxidation in the environment." *Environmental Microbiology.* 10(11):2931-2941.
133. Prosser, James I. (2011)"Soil nitrifiers and nitrification." in Nitrification. Washington, DC: ASM press. 347-383.
134. Puttanna, K., Gowda, N. M. N., Rao, E. V. S. P. (1999): Effect of concentration, temperature, moisture, liming and organic matter on the efficacy of the nitrification inhibitors benzotriazole, o -nitrophenol, m -nitroaniline and dicyandiamide. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 54, 251–257.
135. Qi XWW, Shah F, Peng S, Huang J, Cui K, Liu H, et al. Ammonia volatilization from urea-application influenced germination and early seedling growth of dry direct-seeded rice. *Sci World J* 2012;2012(Article ID 857472. Doi:10.1100/2012/757472):7p.
136. Ramspacher A. Assessment of the global market for slow and controlled release, stabilized and water-soluble fertilizers. Presentaton at IFA strategic forum 2017. Paris: IFA – International Fertilizer Association; 2017 November 2017.
137. Raun, W.R., Johnson, G.V., 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal* 91, 357–363.
138. Raun, W.R., Solie, J.B., Taylor, R.K., Arnall, D.B., Mack, C.J., Edmonds, D.E., 2008. Ramp calibration strip technology for determining midseason nitrogen rates in corn and wheat. *Agronomy Journal* 100, 1088–1093.

139. Rawson, H.M. and C.M. Donald. 1969. The absorption and distribution of nitrogen, after floret initiation in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 20: 799-808
140. Robertson G. P., P. M. Groffman. (2007) "Nitrogen Transformations." in *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*, 3rd edition. Oxford, UK: Elsevier Inc., 341- 364.
141. Robertson, G.P., 1982. Factors regulating nitrification in primary and secondary succession. *Ecology* 63, 1561e1573
142. Rochette P, Angers DA, Chantigny MH, Gasser M-O, MacDonald JD, Pelster DE, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? *J Environ Qual* 2013;42(6):1635–42.
143. Roll, R. (1999): Zur Toxikologie von DMPP, in Proceedings of a Scientific Colloquium. BASF AG (ed.) Düngen mit einer neuen Technologie Innovation in der Düngung ENTEC®, BASF Agricultural Center Limburgerhof, Germany, pp. 39–44.
144. Rosegrant, M.W., Agcoili-Sombilla, M. & Perez, N. 1995. Global food projections to 2020: Implications for investment. Food, Agriculture and the Environment Discussions Paper No. 5, Washington D.C., IFPRI
145. Rousk, J., Brookes, P.C., Bååth, E., 2009. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. *Applied and Environmental Microbiology* 75, 1589e1596.
146. Ruser, R., Flessa, H., Russow, R., Schmidt, G., Buegger, F., Munch, J. C. (2006): Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biol. Biochem.* 38, 263–274.
147. Ruser, R., Schulz, R. (2015): The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils - a review. *Dev. Plant Soil Sci.*
148. Sahrawat, K. L., Keeney, D. R., Adams, S. S. (1987): Ability of nitrapyrin, dicyandiamide and acetylene to retard nitrification in a mineral and an organic soil. *Plant Soil* 101, 179–182.
149. Scheurwater, I., Koren, M., Lambers, H., Atkin, O.K. 2002. The contribution of roots and shoots to whole plant nitrate reduction in fast and slow growing grass species. *Journal of Experimental Botany*, 53: 1635-1642
150. Schraml M, Gutser R, Maier H, Schmidhalter U. Ammonia loss from urea in grassland and its mitigation by the new urease inhibitor 2-NPT. *J Agric Sci* 2016;154(8):1453–62.

151. Serna, M. D., Bañuls, J., Quiñones, A., Primo-Millo, E., Legaz, F. (2000): Evaluation of 3,4-dimethylpyrazole phosphate as a nitrification inhibitor in a Citrus-cultivated soil. *Biol. Fertil. Soils* 32, 41–46.
152. Shaw WHR. The inhibition of urease by various metal ions. *J Am Chem Soc* 1954;7:2160–3
153. Silva AGB, Sequeira CH, Sermarini RA, Otto R. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: a meta-analysis. *Agron J* 2017;109(1):1–13.
154. Šimek M and Cooper E. J. 2001. Nitrogen Use Efficiency in Temperate Zone Arable Lands. In: Shiyomi M, Koizumi H., ed. *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C., pp. 228-251.
155. Simpson, R.J., H. Lambers and M.J. Dalling. 1983. Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiol.* 71: 7-14
156. Slangen, J. H. G., Kerkhoff, P. (1984): Nitrification inhibitors in agriculture and horticulture: A literature review. *Fertil. Res.* 5, 1–76.
157. Soares JR, Cantarella H, Menegale MLC. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrifications inhibitors. *Soil Biol Biochem* 2012;52:82–9.
158. Soares JR. Effect of urease and nitrification inhibitors on NH₃ volatilization with surface-application of urea to soil. Campinas: Agronomic Institute of Campinas; 2011
159. Spiertz J.H.J. and N.M. de Vos. 1983. Agronomical and physiological aspects of the role of nitrogen in yield formation of cereals. *Plant soil.* 75: 379-391
160. Stark, J.M., Hart, S.C., 1997. High rates of nitrification and nitrate turnover in undisturbed coniferous forests. *Nature* 385, 61–64.
161. Subbarao V. G., Ito O., Sahrawat L. K., Berry L. W., Nakahara K., Ishikawa T., Watanabe T., Suenaga K., Rondon M. and Rao I. 2006 Scope and Strategies for Regulation of Nitrification in Agricultural Systems—Challenges and Opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences*. Publisher Taylor and Francis.
162. Subbarao, G. V., Ito, O., Sahrawat, K. L., Berry, W. L., Nakahara, K., Ishikawa, T., Watanabe, T., Suenaga, K., Rondon, M., Rao, I. (2006): Scope and Strategies for Regulation of Nitrification in Agricultural Systems—Challenges and Opportunities. *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* 25, 303–335.

163. Sutton, A. L., Huber, D. M., Jones, D. D., Kelly, D. T., Bache, D. H. (1986): Use of nitrification inhibitors with summer applications of swine manure. *Appl. Eng. Agric. ASAE*. 2, 179–185.
164. Tabatabai MA. Effects of trace elements on urease activity in soils. *Soil Biol Biochem* 1977;9(1):9–13
165. Terman GL. Volatilization losses of nitrogen as ammonia from surface-applied fertilizers, organic amendments, and crop residues. *Adv Agron* 1979;31:189–223.
166. Thapa R.; Chatterjee A.; Awale R.. Stabilized Nitrogen Fertilizers and Application Rate Influence Nitrogen Losses under Rainfed Spring Wheat. (2015). *Agron. J.* 107:1885–1894
167. Tietema, A., Warmerdam, B., Lenting, E., Riemer, L., 1992. Abiotic factors regulating nitrogen transformations in the organic layer of acid forest soils: moisture and pH. *Plant and Soil* 147, 69-78.
168. Trenkel, M.E. 2010. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: *An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture*. 2nd ed. Int. Fert. Assoc., Paris.
169. Treusch, A.H., S. Leininger, A. Kletzin, S.C. Schuster, H.P. Klenk and C. Schleper. (2005) "Novel genes nitrite reductase and Amo-related proteins indicate a role of uncultivated mesophilic crenarchaeota in nitrogen cycling." *Environmental Microbiology*. 7:1985-1995.
170. Turnbull, M.H., R. Goodball, G.R. Stewart. (1995) "The impact of mycorrhizal colonization upon nitrogen source utilization and metabolism in seedlings of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Eucalyptus maculata* Hook." *Plant, Cell and Environment*. 18:1386-1394
171. Turner DA, Edis RB, Chen D, Freney JR, Denmead OT, Christie R. Determination and mitigation of ammonia loss from urea applied to winter wheat with N-(n-butyl) thiophosphoric triamide. *Agric Ecosyst Environ* 2010;137(3–4):261–6
172. Vannelli, T., Hooper, A. B. (1992): Oxidation of nitrapyrin to 6-chloropicolinic acid by the ammonia-oxidizing bacterium *Nitrosomonas europaea*. *Appl. Environ. Microbiol.* 58, 2321–2325.
173. Vavilov, N.I. 1931. Linnaean species as a system . Presented at the V International Botanical Congress in Cambridge , August , 1930.
174. Vilsmeier, K. (1980): Dicyandiamidabbau im Boden in Abhängigkeit von der Temperatur. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 143, 113–118.

175. Volk GM. Efficiency of fertilizer urea as affected by method of application, soil moisture, and lime. *Agron J* 1966;58(3):249–52
176. Vos, J. 1981. Effects of temperature and nitrogen supply on post-floral growth of wheat, measurements and simulations. *Agric. Recs. Reports 911* Pudoc, Wageningen
177. W. E. Kronstad, 1998, Agricultural development and wheat breeding in the 20th Century, Oregon State University, Corvallis, Oregon, U.S.A.
178. Wang, W., B. Vinocur, and A. Altman. 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta* 218 (1):1–14
179. Watson CJ, editor. Urease activity and inhibition – principles and practices. London: The International Fertilizer Society Meeting; 2000
180. Watson CJ, Akhonzada NA, Hamilton JTG, Matthews DI. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Use Manag* 2008;24:246–53.
181. Weiske, A., Benckiser, G., Herbert, T., Ottow, J. C. G. (2001): Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in comparison to dicyandiamide (DCD) on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments. *Biol. Fertil. Soils* 34, 109–117.
182. Weiske, A., Benckiser, G., Ottow, J. C. G. (2001): Effect of the new nitrification inhibitor DMPP in comparison to DCD on nitrous oxide (N₂O) emissions and methane (CH₄) oxidation during 3 years of repeated applications in field experiments. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 57–64
183. Wild H.E., Sawyer C.N. και McMahan, T.C. (1971). Factors Affecting Nitrification Kinetics. *J. Water Pollut. Control Fed.* 43:1845-1854.
184. Xiaobin W, Jingfeng X, Grant CA, Bailey LD. Effects of placement of urea with a urease inhibitor on seedling emergence, N uptake and dry matter yield of wheat. *Can J Soil Sci* 1995;75:449–52
185. Y. Pomeranz und J. A. Shellenberger, 1971: Bread Science and Technology. 262 Seiten, 93 Abb. 26 Tab. The AVI Publishing Company, Westport, Connecticut.

186. Yang, M., Fang, Y., Sun, D., Shi, Y. (2016): Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. *Sci. Rep.* 6, 22075.
187. Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421.
188. Zaman, M., Di, H. J., Cameron, K. C., and Frampton, C. M.: Gross nitrogen mineralization and nitrification rates and their relationships to enzyme activities and the soil microbial biomass in soils treated with dairy shed effluent and ammonium fertilizer at different water potentials, *Biol. Fert. Soils*, 29, 178–186, 1999
189. Zerulla, W., Barth, T., Dressel, J., Erhardt, K., Horchler von Locquenghien, K., Pasda, G., Rädle, M., Wissemeier, A. (2001): 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) - A new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biol. Fertil. Soils* 34, 79–84.
190. Zeven A.C. and Zhukovsky P.M., (1975). Dictionary of Cultivated Plants and Their Centers of Diversity. Wageningen University, the Netherlands.

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Taiz, L., Zeiger, E. 2012. *Φυσιολογία φυτών* Taiz, L., Zeiger, E (πρωτότυπο), Θάνος, Κ. (Ελληνική μετάφραση) eds.). Utopia Publishing
2. Αναλογίδης Α. Δ. 2000 Έδαφος, θρεπτικά στοιχεία και φυτική παραγωγή. Εκδόσεις ΑΓΡΟ-τύπος Α.Ε., Αθήνα.
3. Βαχαμίδης Α. Πέτρος, 2013, *Μελέτη της επίδρασης διαφορετικού βαθμού υδατικής καταπόνησης στην αναπαραγωγική ανάπτυξη εγχώριων πληθυσμών και ποικιλιών σκληρού σιταριού *Triticum turgidum ssp. durum**.
4. Καραμάνος Α., 1992. «*Τα σιτηρά των Εύκρατων Κλιμάτων*», Ανωτάτη Γεωπονική Σχολή Αθηνών, Αθήνα.
5. Καραμάνος Α.Ι., 1987. *Τα σιτηρά των εύκρατων κλιμάτων*. Αθήνα 1987.
6. Λόλας, Π.Χ. 2003. *Ζιζανιολογία: Ζιζάνια - Ζιζανιοκτόνα, Τύχη & Συμπεριφορά στο Περιβάλλον*. Θεσσαλονίκη. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία.
7. Παπακώστα-Τασοπούλου, Δ. 2008. *Ειδική Γεωργία Ι (Τεύχος Α), Σιτηρά (Χειμερινά, Εαρινά)*. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Θεσ/νίκη. σελ. 25-60 και 125-131.

8. Ρουμπελάκη - Αγγελάκη, Κ.Α. (2003) "*Μεταβολισμός του Αζώτου.*" σε *Φυσιολογία Φυτών - απο το μόριο στο περιβάλλον*. Ηράκλειο, Κρήτη: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης. 259-308.
9. Σφήκας Α., 1995, «*Ειδική Γεωργία Ι. Σιτηρά, Ψυχανθή και Χορτοδοτικά φυτά*», Α.Π.Θ., Εκδόσεις: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.
10. Χατζημπίρος Κ. 2001 *Οικολογία , Οικοσυστήματα και προστασία περιβάλλοντος*, Εκδόσεις Συμμετρία Αθήνα
11. Χρονοπούλου-Σερέλη και Φλόκας. 2010. *Μαθήματα Γεωργικής Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ζήτη.

Ιστοσελίδες

1. Ινστιτούτο Σιτηρών www.cerealinstitute.gr
2. European Commission, Agri-food Data Portal. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <https://agridata.ec.europa.eu/extensions/DataPortal/home.html>
3. FAO, How to Feed the World in 2050 Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/en/>