



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ, ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ
& ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

Επίδραση compost και μικροβιακών εμβολίων στη διαθεσιμότητα
φωσφόρου και την ανάπτυξη φυτών μαρουλιού

Κωνσταντίνος Ε. Γυπαράκης

Επιβλέπων Καθηγητής:

Οιχαλιώτης Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΓΠΑ

ΑΘΗΝΑ, 2023

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΑΦΟΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

Επίδραση compost και μικροβιακών εμβολίων στη διαθεσιμότητα
φωσφόρου και την ανάπτυξη φυτών μαρουλιού

“Effect of compost and microbial inoculants on phosphorus availability
and growth of lettuce plants”

Κωνσταντίνος Ε. Γυπαράκης

Εξεταστική επιτροπή:

Οιχαλιώτης Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΓΠΑ

Γασπαράτος Διονύσιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

Τσικνιά Μυρτώ, Μεταδιδακτορική ερευνήτρια ΓΠΑ

Επίδραση compost και μικροβιακών εμβολίων στη διαθεσιμότητα φωσφόρου και την ανάπτυξη φυτών μαρουλιού

*ΠΜΣ Φυσικοί Πόροι, Γεωπεριβάλλον, Γεωπληροφορικής και Γεωργικής Μηχανικής
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής
Εργαστήριο Εδαφολογίας και Γεωργικής Χημείας*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός αυτού του πειράματος είναι η επίδραση compost και μικροβιακών εμβολίων στη διαθεσιμότητα του φωσφόρου αλλά και την πρόσληψή του από φυτά μαρουλιού. Τοποθετήθηκαν 192 γλάστρες, οι οποίες χωρίστηκαν σε 96 γλάστρες με έδαφος και 96 γλάστρες μείγμα έδαφος-compost σε αναλογία 10:1. Στη συνέχεια οι γλάστρες που είχαν έδαφος χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες, 32 γλάστρες σε κάθε ομάδα, ανάλογα με την πηγή φωσφόρου (τριπλό υπερφωσφορικό λίπασμα, φωσφορίτης και φυτικό οξύ), σε ίσες ποσότητες φωσφόρου. Το ίδιο πλάνο εφαρμόζεται και για την ομάδα του μείγματος. Ακολούθως, η κάθε ομάδα γλαστρών και στις 2 περιπτώσεις (έδαφος και μείγμα) χωρίζεται σε τέσσερις οκτάδες ανάλογα με τα τέσσερα επίπεδα μικροοργανισμών: καθόλου μικροοργανισμοί (No Microbes), δενδρόμορφοι μυκορριζικοί μύκητες (AMF), πρώτο μείγμα βακτηρίων (BAC I), δεύτερο μείγμα βακτηρίων (BAC II).

Η πηγή φωσφόρου τριπλό υπερφωσφορικό λίπασμα ενισχύει την ανάπτυξη και θρέψη των φυτών είτε στην περίπτωση του εδάφους, είτε στην περίπτωση του μείγματος. Τα φυτά με πηγή φωσφόρου φυτικό οξύ είχαν παραπλήσια αποτελέσματα με αυτά των οποίων η πηγή φωσφόρου είναι το τριπλό υπερφωσφορικό λίπασμα. Η εφαρμογή φωσφορίτη σε αλκαλικά ή ουδέτερα εδάφη δεν προσφέρει θετικά αποτελέσματα. Το compost ενίσχυσε την ανάπτυξη των φυτών. Ενισχύθηκαν και τα φυτά με πηγή φωσφόρου τον φωσφορίτη. Οι μικροοργανισμοί συνολικώς δεν επέφεραν θετικά αποτελέσματα.

Επιστημονική περιοχή: Εδαφολογία

Λέξεις κλειδιά: Φώσφορος, φωσφορίτης, compost, μαρούλι, φυτικό οξύ, τριπλό υπερφωσφορικό λίπασμα

Effect of compost and microbial inoculants on phosphorus availability and growth of lettuce plants

*MSc Natural Resources, Geoenvironment, Geoinformatics and Agricultural Engineering
Department of Natural Resources & Agricultural Engineering
Laboratory of Soil Science & Agricultural Chemistry*

ABSTRACT

The purpose of this experiment is the effect of compost and microbial inoculants on the availability of phosphorus and its uptake by lettuce plants. 192 pots were placed, which were divided into 96 pots with soil and 96 pots with a soil-compost mixture in a ratio of 10:1. Then the pots with soil were divided into three groups, 32 pots in each group, depending on the source of phosphorus (triple superphosphate fertilizer, rock phosphate and phytate), in equal amounts of phosphorus. The same plan applies to the mixture group. Subsequently, each group of pots in both cases (soil and mixture) is divided into four octets according to the four levels of microorganisms: no microorganisms (No Microbes), arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), first mixture of bacteria (BAC I), second mixture bacteria (BAC II).

The source of phosphorus triple superphosphate fertilizer enhances the growth and nutrition of plants either in the case of the soil or in the case of the mixture. Plants with the phosphorus source phytate had similar results to those whose phosphorus source is triple superphosphate fertilizer. The application of rock phosphate on alkaline or neutral soils does not offer positive results. Compost enhanced plant growth. The plants were also strengthened with rock phosphate as a source of phosphorus. The microorganisms overall did not produce positive results.

Scientific area: Soil Science

Keywords: Phosphorus, rock phosphate, compost, lettuce, phytate, triple superphosphate fertilizer

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και συντέλεσαν στην εκπόνηση και την συγγραφή της.

Συγκεκριμένα ευχαριστώ τον καθηγητή του Εργαστηρίου Εδαφολογίας και Γεωργικής Χημείας Κο Κωσταντίνο Οιχαλιώτη, που με εμπιστεύτηκε αναθέτοντας μου τη διπλωματική εργασία, για τη βοήθεια, τις γνώσεις και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την μεταδιδάκτορα Κα Τσικνιά Μυρτώ και υποψήφιο διδάκτορα Λεβέντη Γεώργιο για την υπομονή, τον χρόνο που μου αφιέρωσε, την καθοδήγηση, τις γνώσεις, τις συμβουλές της και για τη βοήθεια της.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Κο Τσιγωνάκη Δημήτρη από το εργαστήριο Γενική και Γεωργική Μικροβιολογία και τον προπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Γιάννη Κομματά.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή του Εργαστηρίου Εδαφολογίας και Γεωργικής Χημείας Κο Διονύση Γασπαράτο που δέχτηκε να είναι στην τριμελή επιτροπή παρακολούθησης της εργασίας αλλά και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε κατά τις μεταπτυχιακές μου σπουδές.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην υποψήφια διδάκτορα Νικολάου Χριστίνα, τον Κο Στέλιο Δάλλα και την Δρ. Δάφνη Ιωάννου καθώς και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου για τη βοήθεια και την υπέροχη συνεργασία.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Κύκλος του Φωσφόρου	2
1.3. Ανόργανος φώσφορος στα εδάφη	4
1.4. Διαλυτότητα ανόργανου φωσφόρου σε όξινα εδάφη.....	6
1.5. Διαλυτότητα ανόργανου φωσφόρου σε υψηλές τιμές pH.	9
1.6. Οργανικός φώσφορος των εδαφών	9
1.6.1. Η φύση των οργανικών ενώσεων του εδαφικού φωσφόρου	9
1.6.2. Ανοργανοποίηση του οργανικού φωσφόρου.....	11
1.7. Τρόποι με τους οποίους τα φυτά μπορούν να αποκτήσουν φώσφορο.....	11
1.8. Ένζυμα που συμμετέχουν στον κύκλο του φωσφόρου.	12
1.8.1. Φωσφομονοεστεράσες	13
1.8.2. Φωσφοδιεστεράσες.....	13
1.8.3. Inorganic pyrophosphatase	14
1.8.4. Trimetaphosphatase	15
1.9. Κομποστοποίηση	15
1.9.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της κομποστοποίησης	17
1.9.2. Αξιολόγηση ωρίμανσης για την ποιότητα του compost.....	17
1.10. Φωσφορίτες (Rock Phosphates).....	20
1.11. Άλατα φυτικού οξέως (Phytate)	21
1.12. Μυκορριζικοί μύκητες.....	22
1.12.1. Γενικά.....	22
1.12.2. Κατηγορίες Μυκορριζών	23
1.12.3. Δενδρόμορφοι μυκορριζικοί μύκητες.....	24
1.12.4. Μυκορριζική Συμβίωση	25
1.12.5. AMF και οι μηχανισμοί τους για την πρόσληψη του φωσφόρου.....	29
1.13. Βακτήρια που διαλυτοποιούν τον φώσφορο (PSB) και οι μηχανισμοί τους για την πρόσληψη του	30
1.14. ΜΑΡΟΥΛΙ	34
1.14.1. Γενικά.....	34

1.14.2.	Πολλαπλασιασμός.....	35
1.14.3.	Απαιτήσεις σε κλίμα και έδαφος	35
1.14.4.	Εχθροί και ασθένειες.....	36
1.15.	Οικονομικά στοιχεία καλλιέργειας στην Ελλάδα και στον κόσμο.....	36
1.16.	Σκοπός του πειράματος.....	39
2.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	40
2.1.	Γενικά.....	40
2.2.	Φυτικό υλικό.....	40
2.3.	Βιολογικό υλικό	40
2.4.	Οργανικό Υπόστρωμα	41
2.5.	Πηγές Φωσφόρου	42
2.6.	Πειραματική Διαδικασία.....	42
2.7.	Μέτρηση μορφολογικών και φυσιολογικών Παραμέτρων	44
2.7.1.	SPAD Μετρήσεις	44
2.7.2.	Normalized difference vegetation index (NDVI).....	44
2.7.3.	Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (NDRE)	45
2.7.4.	Relative Water Content (%).....	45
2.7.5.	Φωτοσυνθετική δραστηριότητα φύλλων	46
2.8.	Εδαφοανάλυση.....	46
2.8.1.	Εκτίμηση pH (ενεργότητα ιόντων H ⁺) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας	47
2.8.2.	Προσδιορισμός της κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους.....	47
2.8.3.	Προσδιορισμός της Ικανότητας Ανταλλαγής Κατιόντων (I.A.K).	48
2.8.4.	Προσδιορισμός Οργανικής Ουσίας	48
2.8.5.	Προσδιορισμός Ανθρακικών Αλάτων.	48
2.8.6.	Προσδιορισμός των ανταλλάξιμων κατιόντων καλίου, ασβεστίου, μαγνησίου και νατρίου που εκχυλίζονται με οξικό αμμώνιο (NH ₄ OAC, 1N, pH=7).	49
2.8.7.	Προσδιορισμός ιχνοστοιχείων (Fe,Cu,Zn,Cu).....	49
2.8.8.	Προσδιορισμός ολικού αζώτου.....	49
2.8.9.	Προσδιορισμός διαθέσιμου εδαφικού φωσφόρου με την μέθοδο Olsen.....	50
2.9.	Φυτοανάλυση.....	51
2.10.	Ανάλυση Compost.....	51
2.11.	Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου στον φωσφορίτη (Rock Phosphate).....	52

2.12.	Στατιστική Ανάλυση.....	52
3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	53
3.1.	Αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών.....	55
3.1.1.	Νωπό βάρος υπέργειου τμήματος.....	55
3.1.2.	Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος.....	57
3.1.3.	Νωπό βάρος υπόγειου τμήματος.....	59
3.1.4.	Ξηρό βάρος υπόγειου τμήματος.....	61
3.1.5.	Shoot to root.....	63
3.1.6.	Αριθμός Φύλλων.....	65
3.2.	Αποτελέσματα στη φυσιολογία των φυτών.....	68
3.2.1.	Relative Water Content % (RWC %).....	68
3.2.2.	Ρυθμός Φωτοσύνθεσης.....	70
3.2.3.	Στοματική Αγωγιμότητα.....	72
3.2.4.	Ρυθμός Διαπνοής.....	74
3.2.5.	Μεσοκυττάριο CO ₂	76
3.2.6.	Photosynthetic Water Use Efficiency (PWUE).....	78
3.2.7.	Intrinsic Water Use Efficiency (iWUE).....	80
3.2.8.	Carbon Use Efficiency (CUE).....	82
3.2.9.	SPAD.....	84
3.2.10.	NDVI.....	86
3.2.11.	NDRI.....	88
3.3.	Αποτελέσματα για την κατάσταση του φωσφόρου.....	92
3.3.1.	Συγκέντρωση φωσφόρου στα φύλλα.....	92
3.3.2.	Συγκέντρωση P στις ρίζες.....	96
3.3.3.	Πρόσληψη P από τις ρίζες.....	98
3.3.4.	Συνολική Πρόσληψη P.....	100
3.3.5.	Διαθέσιμος Εδαφικός P.....	102
3.3.6.	P Uptake Efficiency.....	104
3.3.7.	P Utilization Efficiency.....	106
3.3.8.	Physiological P Use Efficiency.....	108
3.3.9.	P Use Efficiency.....	110
3.4.	Αποτελέσματα άλλων στοιχείων.....	116

3.4.1. Συγκέντρωση Καλίου στα φύλλα	116
3.4.2. Πρόσληψη Καλίου από τα φύλλα	118
3.4.3. Συγκέντρωση Καλίου στις ρίζες.....	120
3.4.4. Πρόσληψη Καλίου από τις ρίζες.....	122
3.4.5. Συγκέντρωση Νατρίου στα φύλλα.....	124
3.4.6. Πρόσληψη Νατρίου στα Φύλλα	126
3.4.7. Συγκέντρωση Νατρίου στις Ρίζες.....	128
3.4.8. Πρόσληψη Νατρίου στις Ρίζες.....	130
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	134
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	135
5.1. Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	135
5.2. Ελληνική Βιβλιογραφία.....	139
5.3. Διαδικτυακή Βιβλιογραφία	139

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Ο φώσφορος αποτελεί το δεύτερο θρεπτικό στοιχείο μετά το άζωτο ως προς την σημασία του για την γεωργική παραγωγή, αλλά και την λειτουργία εδαφικών και υδάτινων οικοσυστημάτων. Ο φλοιός της Γης (Earth's crust) περιλαμβάνει περίπου 1200 mg P/kg, ενώ οι συγκεντρώσεις του στο έδαφος κυμαίνονται μεταξύ 200-800 mg P/kg. (White and Hammond, 2008). Η διαθεσιμότητά του στα φυτά εξαρτάται από φυσικές και χημικές αντιδράσεις όπως ρόφηση / εκρόφηση και κατακρήμνιση / διάλυση και βιολογικές διαδικασίες όπως ανοργανοποίηση και ακινητοποίηση.

Επίσης, ο φώσφορος (P) είναι απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο των φυτών. Αποτελεί βασικό συστατικό των νουκλεϊνικών οξέων, τα οποία ως συστατικά του DNA μεταφέρουν την γενετική πληροφορία, και ως μονάδες του RNA, συμβάλλουν στην μετάφραση της γενετικής πληροφορίας. Παρατηρείται επίσης, στα φωσφορολιπίδια, τα οποία απαντώνται στις κυτταρικές μεμβράνες, πιο συγκεκριμένα με τη μορφή φωσφορικού διεστέρα.

Η οργανική ένωση αδενοσινοτριφωσφορικό οξύ (ATP) περιέχει φώσφορο. Η ATP βοηθά στην μεταφορά, πρόσληψη και ανάκτηση ενέργειας. Η ATP αποτελείται από αδερίνη η οποία προσκολλάται στο σάκχαρο ριβόζη το οποίο προσκολλάται σε τρεις φωσφορικές ομάδες. Οι φωσφορικές ομάδες ενώνονται με δεσμούς υψηλής ενέργειας. Όταν σπάνε οι δεσμοί απελευθερώνονται υψηλά ποσά ενέργειας τα οποία μεταφέρονται σε άλλα μόρια για την πραγματοποίηση άλλων βιοχημικών αντιδράσεων.

1.2. Κύκλος του Φωσφόρου

Κατά την αποσάθρωση μητρικών πετρωμάτων, μέσω της διάλυσης ορυκτών που περιέχουν φώσφορο όπως είναι ο απατίτης, απελευθερώνονται φωσφορικά ιόντα, τα οποία μπορεί να καταλήξουν στο έδαφος.

Στο εδαφικό διάλυμα η συγκέντρωση του φωσφόρου κυμαίνεται από 0.001 mg/L σε άγονα εδάφη έως 1 mg/L σε πλούσια, πολύ λιπασμένα εδάφη. Τα φυτά απορροφούν τον φώσφορο του εδαφικού διαλύματος υπό την μορφή φωσφορικών ανιόντων (HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-) αλλά και υπό την μορφή οργανικών ενώσεων του φωσφόρου. Το pH του εδαφικού διαλύματος καθόριζει την χημική μορφή του φωσφόρου που υπάρχει στο εδαφικό διάλυμα. Σε ισχυρά όξινα εδάφη (pH 4-5.5) απαντάται κυρίως το δισόξινο φωσφορικό ιόν (H_2PO_4^-), ενώ το όξινο φωσφορικό ιόν (HPO_4^{2-}) κυριαρχεί σε αλκαλικά εδάφη. Σε ουδέτερα εδάφη επικρατούν και οι δύο χημικές μορφές του φωσφόρου.

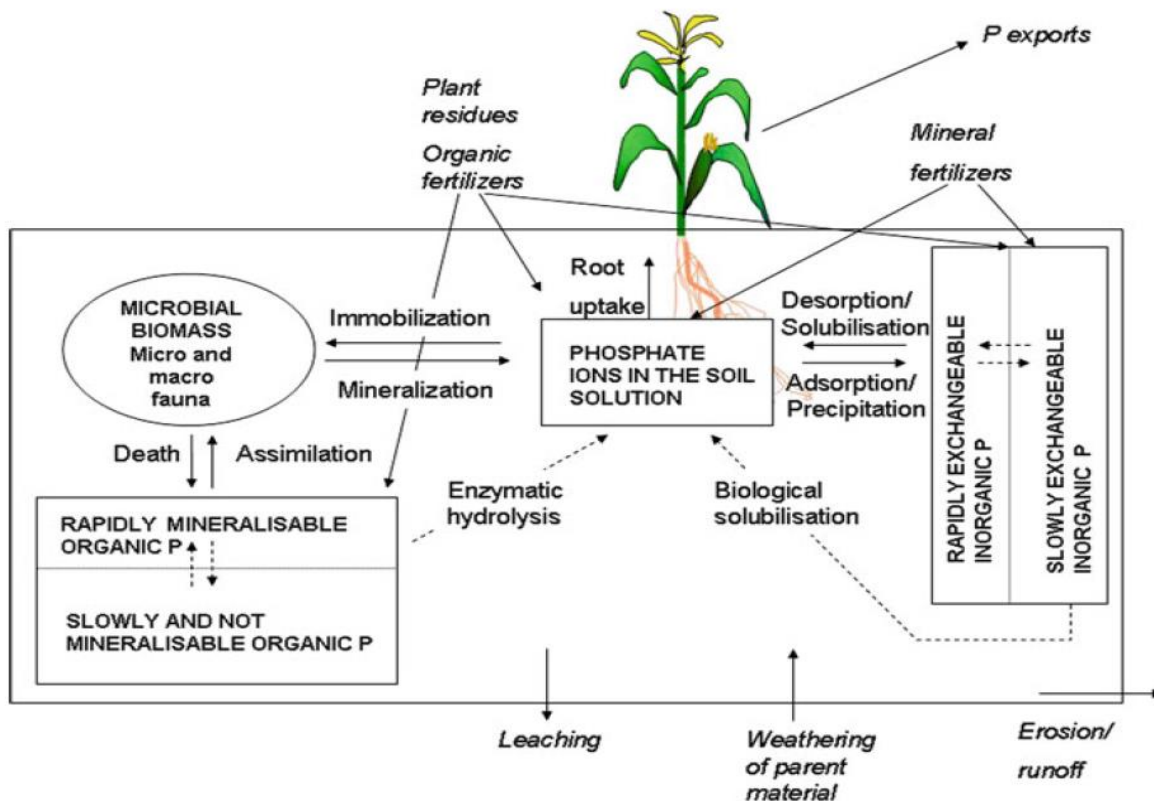
Η κίνηση των φωσφορικών ανιόντων προς τις επιφάνειες των ριζών είναι αργή. Η μεταφορά του ανόργανου φώσφορου μέσω μαζικής ροής νερού στην επιφάνεια της ρίζας είναι αμελητέα και η διάχυση του στα εδάφη είναι τυπικά της τάξης των κλασμάτων του χιλιοστού την ημέρα. Επομένως η πρόσληψη του από τις ρίζες των φυτών είναι περιορισμένη.

Διαλυτές μορφές φωσφόρου προέρχονται από την αποσύνθεση φυτικών υπολειμμάτων, και αποβλήτων από ζώα και ανθρώπους. Τα φυτικά υπολείμματα αποσυντίθενται από τους μικροοργανισμούς, δεσμεύουν προσωρινά ένα μέρος του φωσφόρου στα κύτταρα τους και ανοργανοποιούν άλλο μέρος φωσφόρου. Η ανοργανοποίηση προσφέρει στο έδαφος διαλυτές μορφές φωσφόρου ικανές να προσληφθούν από τα φυτά.

Οι μορφές φωσφόρου που συναντάμε στο έδαφος είναι 3:

1. ο οργανικός φώσφορος. Ο οργανικός φώσφορος διαιρείται σε 3 κατηγορίες, στον ενεργό, στον βραδέως αποδομούμενο και στον μη ενεργό.
2. ο φώσφορος που δεσμεύεται σε ενώσεις ασβεστίου και δευτερευόντως του μαγνησίου. Οι ενώσεις αυτές απαντώνται κυρίως σε αλκαλικά εδάφη.
3. ο φώσφορος που δεσμεύεται σε ενώσεις σιδήρου, μαγγανίου ή αργιλίου. Οι ενώσεις αυτές απαντώνται σε όξινα εδάφη.

Υπάρχουν αρκετά μονοπάτια με τα οποία χάνεται ο φώσφορος από το εδαφικό σύστημα. Ένα από αυτά είναι η απορρόφηση του από τα φυτά (0,5-5 kg/στρέμμα/έτος στη συγκομιζόμενη βιομάζα). Η διάβρωση απομακρύνει εδαφικά τεμαχίδια που φέρουν φώσφορο. Τα επιφανειακά νερά απορροής απομακρύνουν διαλυτές μορφές του φωσφόρου. Πραγματοποιείται επίσης η έκπλυσή του στα υπόγεια νερά.



Εικόνα 1: Ο κύκλος του φωσφόρου στο σύστημα έδαφος-φυτό. Πηγή : Bünemann et al., 2011

1.3. Ανόργανος φώσφορος στα εδάφη

Σε σχέση με τα υπόλοιπα μακροθρεπτικά που υπάρχουν στο εδαφικό διάλυμα, ο φώσφορος αποτελεί το στοιχείο που παρατηρείται με τις μικρότερες συγκεντρώσεις στο εδαφικό διάλυμα. Επίσης, στα εδάφη διαπιστώνεται η ακινητοποίηση του ανόργανου φωσφόρου. Η συγκέντρωσή του στο εδαφικό διάλυμα, καθώς και η κίνησή του μέσα στο έδαφος οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος αφορά τη διαλυτότητα των ορυκτών που περιέχουν φώσφορο και ο δεύτερος τη δέσμευση και προσρόφηση των φωσφορικών ανιόντων στις επιφάνειες των εδαφικών τεμαχιδίων.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των ανόργανων φωσφορικών ενώσεων που υπάρχει στα εδάφη διακρίνονται σε δύο μεγάλες ομάδες. Η πρώτη ομάδα αναφέρεται στις ενώσεις που περιέχουν ασβέστιο και λιγότερο συχνά μαγνήσιο, και η δεύτερη στις ενώσεις που περιέχουν σίδηρο, αργίλιο και λιγότερο συχνά μαγγάνιο.

Οι ενώσεις φωσφορικού ασβεστίου σε υψηλές τιμές pH είναι ιδιαίτερα σταθερές και αρκετά αδιάλυτες. Ως εκ τούτου, σε ουδέτερα προς αλκαλικά εδάφη αυτές οι ενώσεις συνιστούν τις κυρίαρχες μορφές ανόργανου φωσφόρου. Καθώς το pH του εδάφους μειώνεται οι μορφές αυτές αρχίζουν να διαλυτοποιούνται και να απομακρύνονται σε όξινα εδάφη.

Σε αντίθεση με την προηγούμενη ομάδα, η ομάδα με τις ενώσεις του φωσφόρου με ένυδρα οξείδια – υδροξείδια του σιδήρου, του μαγγανίου και του αργιλίου, διαλύονται πολύ δύσκολα σε ισχυρά όξινα εδάφη και γίνονται περισσότερο διαλυτά όσο το pH του εδάφους αυξάνεται.

Πίνακας 1 : Ανόργανες ενώσεις που φέρουν φώσφορο και απαντώνται συχνά στο έδαφος.

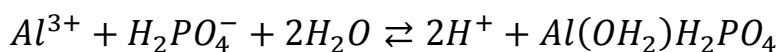
Ένωση	Χημικός τύπος
Ενώσεις σιδήρου και αργιλίου	
Στρεγκίτης	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Βαρισκίτης	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Ενώσεις ασβεστίου	
Φθοριοαπατίτης	$[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaF}_2$
Ανθρακικός απατίτης	$[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaCO}_3$
Υδροξυαπατίτης	$[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$
Οξυαπατίτης	$[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2] \cdot \text{CaO}$
Φωσφορικό τριασβέστιο	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
Φωσφορικό οκτασβέστιο	$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Φωσφορικό διασβέστιο	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Φωσφορικό μονοασβέστιο	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Πηγή : Brady N.C., Weil R.R., 2008

1.4. Διαλυτότητα ανόργανου φωσφόρου σε όξινα εδάφη

Οι σχετικά μη διαθέσιμες μορφές του φωσφόρου που εμφανίζονται στα εδάφη εξαρτώνται σημαντικά από το pH των εδαφών. Στα όξινα εδάφη αφορούν κυρίως, αντιδράσεις με τα στοιχεία Al, Fe ή Mn, είτε ως διαλυμένα ιόντα, είτε ως οξειδία ή ένυδρα οξειδία. Σε πολλούς τύπους εδαφών, τα ένυδρα οξειδία λειτουργούν ως επικάλυψη των εδαφικών τεμαχιδίων καθώς και ως ενδιάμεσες επικαθήσεις στις πυριτικές αργίλους τύπου 1:1.

Η αντίδραση των ιόντων $H_2PO_4^-$ με τα διαλυμένα ιόντα Fe^{3+} , Al^{3+} και Mn^{3+} , οδηγεί προς τον σχηματισμό αδιάλυτων υδροξυφωσφορικών κατακρημνισμάτων. Τα μόλις κατακρημνισμένα υδροξυφωσφορικά είναι ελαφρώς διαλυτά. Επομένως, ο φώσφορος είναι εν μέρει διαθέσιμος στα φυτά στην αρχή. Όσο περνάει ο χρόνος, τα κατακρημνισμένα υδροξυφωσφορικά γίνονται λιγότερο διαλυτά και ο φώσφορος γίνεται εξ ολοκλήρου μη διαθέσιμος για τα φυτά.



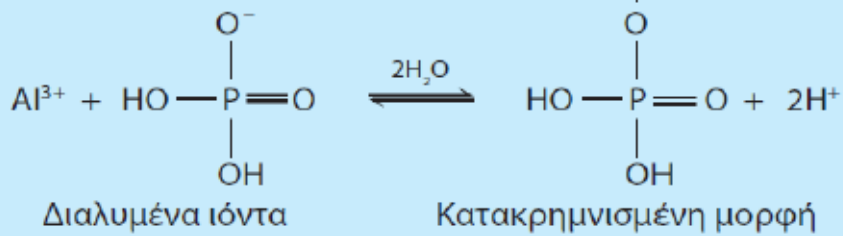
Επίσης, ένας άλλος τύπος αντίδρασης δέσμευσης φωσφόρου είναι οι αντιδράσεις ανταλλαγής ανιόντων εξωτερικής σφαίρας. Το ιόν $H_2PO_4^-$ έλκεται από θετικά φορτία που αναπτύσσονται στις επιφάνειες των οξειδίων σιδήρου και αργιλίου και στις άκρες των καολινιτικών αργίλων. Ως αποτέλεσμα, σχηματίζονται σύμπλοκα στην εξωτερική στοιβάδα από τα προσροφημένα ανιόντα και αντικαθιστούν συγκεκριμένα ανιόντα ή οργανικά οξέα. Ο φώσφορος μπορεί να γίνει διαθέσιμος για τα φυτά αλλά με μικρό ρυθμό.

Το μονοσθενές ανιόν μπορεί να αντιδράσει με τις επιφάνειες των οξειδίων Al και Fe προς τον σχηματισμό ενός συμπλόκου μέσα στην στοιβάδα. Δηλαδή, το δισόξινο φωσφορικό ιόν αντικαθιστά ένα δομικό OH_2 ή μία ομάδα OH , με αποτέλεσμα τον σχηματισμό συμπλόκου μέσα στη στοιβάδα. Σε αυτή την αντίδραση, η οποία είναι αντιστρεπτή, το φωσφορικό ανιόν είναι δεσμευμένο

ισχυρά, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αντικατάσταση από άλλα ανιόντα. Όσο περνάει ο καιρός το φωσφορικό ιόν μπορεί να αντικαταστήσει ένα υδροξύλιο σχηματίζοντας μία γέφυρα μεταξύ δύο πυρήνων. Με αυτό τον τρόπο, το φωσφορικό ανιόν γίνεται μέρος του ορυκτού του οξειδίου. Αυτό αναδεικνύει πόσο χαμηλή γίνεται η απελευθέρωση του φωσφορικού ιόντος στο εδαφικό διάλυμα. Με την πάροδο του χρόνου, το φωσφορικό ανιόν εισέρχεται μέσα στη δομή του οξειδίου, οποίο ονομάζεται απορροφημένο, και αποτελεί τη λιγότερη διαθέσιμη μορφή φωσφόρου.

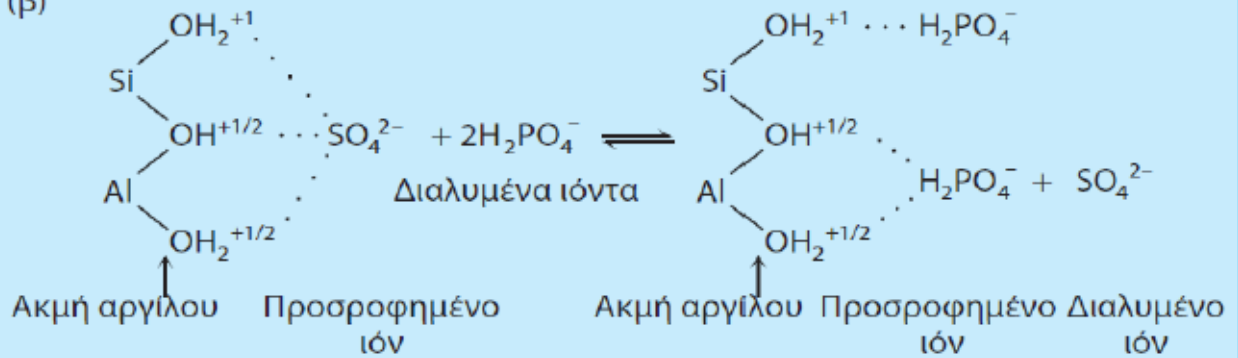
Αντιδράσεις κατακρήμνισης

(α)



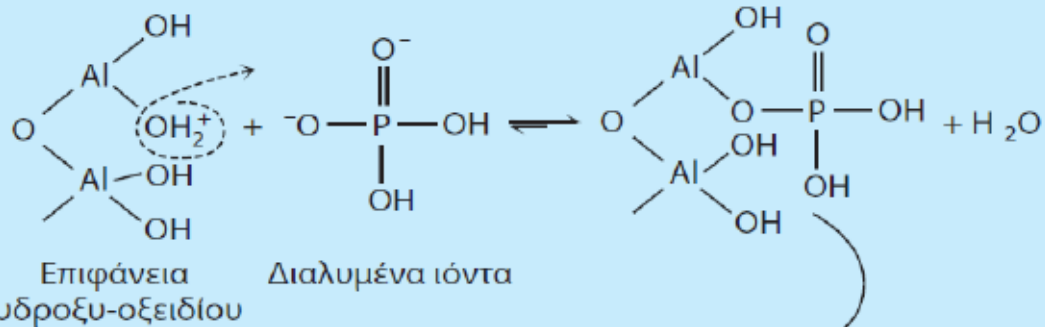
Αντιδράσεις ανταλλαγής ανιόντων (εξωτερικής σφαίρας)

(β)



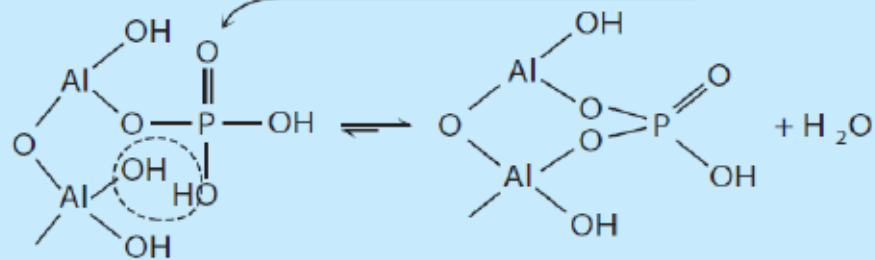
Αντιδράσεις με τις επιφάνειες των οξειδίων Al και Fe (εσωτερικής σφαίρας)

(γ)



Δημιουργία σταθερής γέφυρας μεταξύ δύο πυρήνων (εσωτερικής σφαίρας)

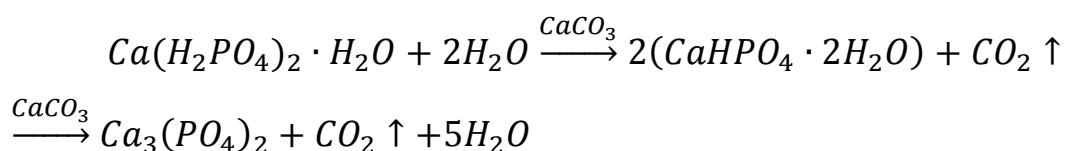
(δ)



Εικόνα 2: Μερικές από τις αντιδράσεις μέσω των οποίων τα φωσφορικά ιόντα μετακινούνται από το εδαφικό διάλυμα και δεσμεύονται, αντιδρώντας με το σίδηρο και το αργίλιο διαφόρων ένυδρων οξειδίων. Πηγή : Brady N.C., Weil R.R., 2008

1.5. Διαλυτότητα ανόργανου φωσφόρου σε υψηλές τιμές pH.

Στα αλκαλικά εδάφη παρατηρούνται ενώσεις φωσφορικού ασβεστίου των οποίων η διαλυτότητά καθορίζει τη διαθεσιμότητα του φωσφόρου. Τα ιόντα $H_2PO_4^-$ αντιδρούν ταχέως με το ασβέστιο σχηματίζοντας μια σειρά προϊόντων μειούμενης διαλυτότητας. Για παράδειγμα το φωσφορικό μονο-ασβέστιο, που είναι διαλυτή ένωση, αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο του εδάφους, προς τον σχηματισμό φωσφορικού δι-ασβεστίου (ελαφρώς διαλυτό) και στη συνέχεια φωσφορικού τρι-ασβεστίου (πολύ μικρή διαλυτότητα).



Όσο προχωράμε προς τα δεξιά, η διαθεσιμότητα του φωσφόρου στα φυτά μειώνεται. Το φωσφορικό τρι-ασβέστιο ($Ca_3(PO_4)_2$) μπορεί να υποστεί περαιτέρω αντιδράσεις και να σχηματιστούν ακόμη περισσότερες αδιάλυτες ενώσεις (απατίτες).

1.6. Οργανικός φώσφορος των εδαφών

Η περιεκτικότητα των εδαφών σε οργανικό φώσφορο ποικίλλει σημαντικά. Το κλάσμα αυτό μπορεί να απαρτίζει το 20 έως 80 % του συνολικού φωσφόρου στους επιφανειακούς ορίζοντες των εδαφών.

1.6.1. Η φύση των οργανικών ενώσεων του εδαφικού φωσφόρου

Μέχρι τώρα δεν έχει εξακριβωθεί πλήρως η χημική σύσταση του μισού περίπου οργανικού φωσφόρου στα εδάφη. Οι ενώσεις που έχουν προσδιοριστεί χωρίζονται σε τρεις μεγάλες ομάδες :

1. Φωσφορικά της ινοσιτόλης.
2. Νουκλεϊνικά οξέα

3. Φωσφορολιπίδια

Εκτός από τις τρεις μεγάλες, στον οργανικό φώσφορο απαντώνται επίσης και φωσφοροπρωτεΐνες, φωσφορικά σάκχαρα, γλυκεροφωσφορικά και φωσφονικά (phosphonates)

Τα φωσφορικά της ινοσιτόλης αφθονούν μεταξύ των τριών μεγάλων ομάδων και σε μερικές περιπτώσεις θεωρείται πως καταλαμβάνουν περισσότερο από το 50% του συνολικού οργανικού φωσφόρου που υπάρχει. Έχουν αρκετά στερεοϊσομερή από τα οποία, τα myo-, scyllo-, και D- chiroinositol σε μορφή φωσφορικών εστέρων έχουν απομονωθεί από το έδαφος. Εντός των φυτών έχει βρεθεί το εξαφωσφορικό της myo-ινοσιτόλης ή φυτικό οξύ και άλατα του Ca-Mg. Το φυτικό οξύ είναι ένωση στην οποία τα φυτά αποθηκεύουν στους σπόρους τους τον φώσφορο.

Τα νουκλεϊνικά οξέα καταλαμβάνουν ένα πολύ μικρό ποσοστό του εδαφικού οργανικού φωσφόρου (μέχρι 3%), αν και προστίθενται πιθανώς στο έδαφος μέσω της αποσύνθεσης μικροβιακών, φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων σε μεγαλύτερες ποσότητες από τους περισσότερους φωσφορικούς εστέρες. Μπορούν να ανοργανοποιηθούν σε ταχείς ρυθμούς και να ενσωματωθούν στην μικροβιακή βιομάζα.

Ο φώσφορος στα φωσφορολιπίδια κυμαίνεται μεταξύ 0,5-7,0% του συνολικού οργανικού φωσφόρου στο έδαφος. Τα φωσφορογλυκερίδια πιθανώς να αποτελούν το κυρίαρχο κλάσμα των φωσφορολιπιδίων. Έχει παρατηρηθεί πως τα φωσφορολιπίδια καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού φωσφόρου στους φυτικούς ιστούς, ενώ στο έδαφος αποτελεί μικρό ποσοστό. Ενδεχομένως, η σύνθεσης τους και η αποδόμησή τους στο έδαφος να πραγματοποιείται σε ταχείς ρυθμούς.

Πίνακας 2 : Κατανομή των οργανικών ενώσεων του φωσφόρου σε μερικά εδάφη.

Soils from	Inositol P	Lipid P	Nucleic acid P
Australia	0.4–38	—	—
Bangladesh	9–83	0.5–7.0	0.2–2.3
Britain	24–58	0.6–0.9	0.6–2.4
Canada	11–23	0.9–2.2	—
New Zealand	5–43	0.7–3.1	—
Nigeria	23–30	—	—
U.S.A.	3–52	—	0.2–1.8

Πηγή: Dalai 1977

1.6.2. Ανοργανοποίηση του οργανικού φωσφόρου

Η διαδικασία ανοργανοποίησης και ακινητοποίησης του οργανικού φωσφορου που καταλήγει στο έδαφος είναι παρόμοια με αυτή του αζώτου. Ακινητοποίηση του διαλυτού φωσφόρου συμβαίνει όταν ο λόγος C/P των ενσωματούμενων υλικών είναι μεγαλύτερος από περίπου 300/1, ενώ ανοργανοποίηση συμβαίνει όταν ο λόγος είναι μικρότερος από περίπου 200/1. Η ταχύτητα ανοργανοποίησης του οργανικού φωσφορου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως θερμοκρασία, υγρασία, εδαφικό pH.

1.7. Τρόποι με τους οποίους τα φυτά μπορούν να αποκτήσουν φώσφορο

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους τα φυτά μπορούν να αποκτήσουν ανόργανο φώσφορο. Στην ανεπάρκεια του εδαφικού φωσφορου οι ρίζες των φυτών προκαλούν οξίνιση της ριζόσφαιρας και εκκρίνουν οργανικά ανιόντα μικρού μοριακού βάρους και φωσφατάσες για να διαλυτοποιούν ανόργανο

φώσφορο από ανόργανες και οργανικές πηγές. Επίσης, τα φυτά επενδύουν μεγαλύτερο ποσοστό της βιομάζας τους στο ριζικό τους σύστημα. Η μορφολογία του ριζικού συστήματος αλλάζει, όχι μόνο για την αποτελεσματικότερη γενική εκμετάλλευση του όγκου του εδάφους, αλλά και με την στοχευμένη εκμετάλλευση τμημάτων με μεγάλη διαθεσιμότητα ανόργανου φωσφόρου. Αυξάνοντας τον ρυθμό πρόσληψης ανόργανου φωσφόρου από το εδαφικό διάλυμα, παρατηρείται μια αύξηση στην ικανότητα των ριζών να προσλαμβάνουν ανόργανο P. Τέλος, τα περισσότερα φυτά σχηματίζουν συμβιωτικές σχέσεις με μυκορριζικούς μύκητες. Οι υφές των μυκορριζικών μυκήτων αυξάνουν την επιφάνεια για την πρόσληψη ανόργανου P, επεκτείνονται σε εδαφικούς πόρους που είναι πολύ μικροί για να εισέλθουν οι ρίζες των φυτών και σε μερικές περιπτώσεις υδρολύουν οργανικές ενώσεις του φωσφόρου.

1.8. Ένζυμα που συμμετέχουν στον κύκλο του φωσφόρου.

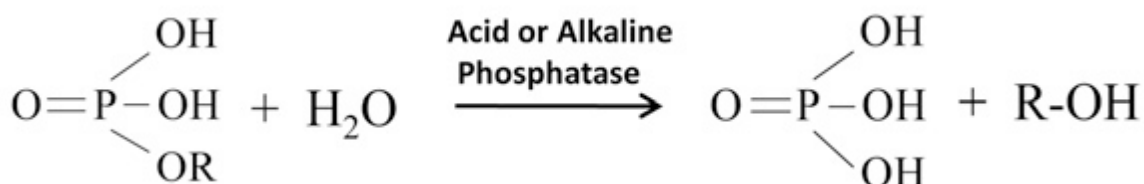
Οι φωσφατάσες παίζουν σημαντικό ρόλο στον μετασχηματισμό των οργανικών μορφών P του εδάφους, οι οποίες αποτελούν σημαντικό ποσοστό (τουλάχιστον 50%) του συνολικού P του εδάφους, που διαφορετικά θα παρέμεναν ακινητοποιημένες και δομικά μη διαθέσιμες για πρόσληψη από τα φυτά. Οι δραστηριότητες των φωσφατάσεων μεσολαβούν στη μετατροπή και ανακύκλωση του οργανικού P στο έδαφος, συν των οργανικών μορφών P που εφαρμόζονται σε λιπάσματα και κοπριά, σε ελεύθερα φωσφορικά άλατα (PO_4^{3-}) που μπορούν να προσληφθούν από τα φυτά και τους μικροοργανισμούς του εδάφους.

Οι φωσφατάσες είναι η γενική ομάδα ενζύμων που καταλύουν την υδρόλυση τόσο των εστέρων όσο και των ανυδριτών του H_3PO_4 . Οι φωσφατάσες ταξινομούνται σε φωσφομονοεστεράσες, φωσφοδιεστεράσες και φωσφοτριεστεράσες με βάση τον αριθμό των εστερικών δεσμών και επίσης σε

ένζυμα που δρουν σε ανυδρίτες που περιέχουν φωσφορύλιο ή σε αυτά που δρουν σε δεσμούς P-N.

1.8.1. Φωσφομονοεστεράσες

Οι φωσφομονοεστεράσες είναι οι πιο μελετημένες φωσφατάσες στο έδαφος. Οι φωσφομονοεστεράσες, όπως η όξινη φωσφατάση και η αλκαλική φωσφατάση ταξινομούνται ανάλογα με τις τιμές pH. Οι φωσφομονοεστεράσες υδρολύουν μια ποικιλία φωσφομονοεστέρων στο έδαφος, συμπεριλαμβανομένων των β-γλυκεροφωσφορικών, φαινυλοφωσφορικών, β-ναφθυλοφωσφορικών και p-νιτροφαινυλοφωσφορικών.



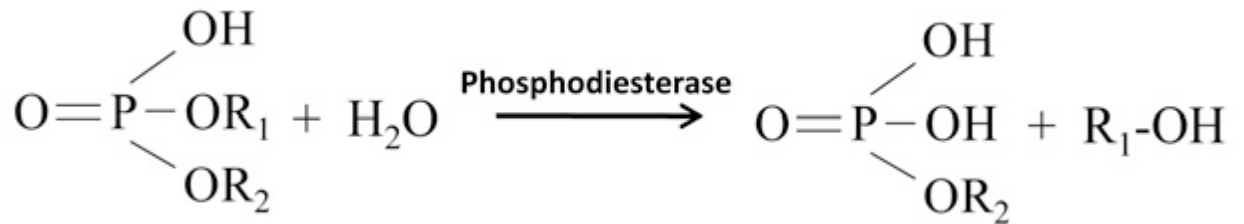
Εικόνα 3 : Γενική εξίσωση κατά την οποία οι φωσφομονοεστεράσες καταλύουν την υδρόλυση φωσφομονοεστέρων σε φωσφορικά. (Πηγή : Dick., 2011)

Οι φωσφομονοεστεράσες (αλκαλική φωσφατάση και όξινη φωσφατάση) προέρχονται κυρίως από μικροβιακές κοινότητες του εδάφους, αλλά η όξινη φωσφατάση απελευθερώνεται επίσης και από τα φυτά. Επιπλέον, πιστεύεται ότι εντός της μικροβιακής κοινότητας του εδάφους, οι πληθυσμοί των μυκήτων αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πηγή φωσφομονοεστερασών.

1.8.2. Φωσφοδιεστεράσες

Η φωσφοδιεστεράση είναι η δεύτερη πιο μελετημένη φωσφατάση στα εδάφη μετά τις φωσφομονοεστεράσες. Η δράση της φωσφοδιεστεράσης έχει ανιχνευθεί σε διάφορα φυτά, ζώα και μικροοργανισμούς. Αυτό το ένζυμο είναι περισσότερο γνωστό για τη συμμετοχή του στην αποδόμηση των νουκλεϊκών

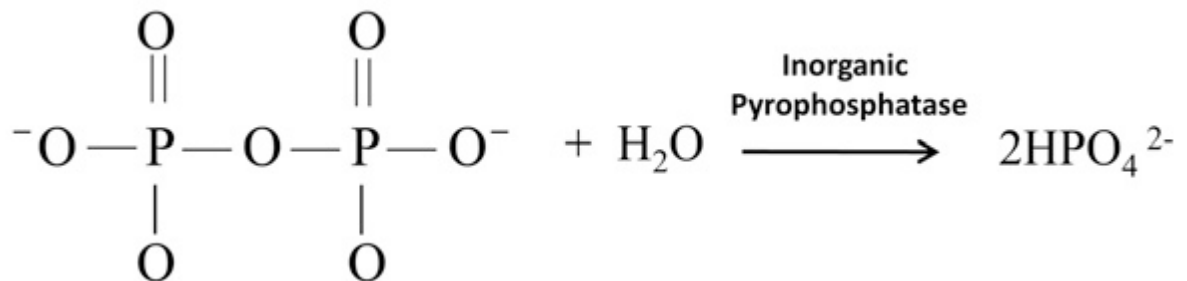
οξέων και των φωσφολιπιδίων, τα οποία αποτελούν ένα κύριο συστατικό των οργανικών εισροών P στο έδαφος.



Εικόνα 4 : Γενική εξίσωση κατά την οποία οι φωσφοδιεστεράσες καταλύουν την υδρόλυση των φωσφοδιεστέρων. (Πηγή : Dick., 2011)

1.8.3. Inorganic pyrophosphatase

Η παρουσία της έχει αναφερθεί σε βακτήρια, έντομα, ιστούς θηλαστικών και φυτά. Ωστόσο, πολύ περιορισμένες πληροφορίες είναι διαθέσιμες σχετικά με τη δραστηριότητα αυτής της φωσφατάσης, και μόλις το 1983 έγινε διαθέσιμη μια ακριβής μέθοδος για τον προσδιορισμό της. Η ανόργανη πυροφωσφατάση καταλύει την υδρόλυση του πυροφωσφορικού σε φωσφορικό.



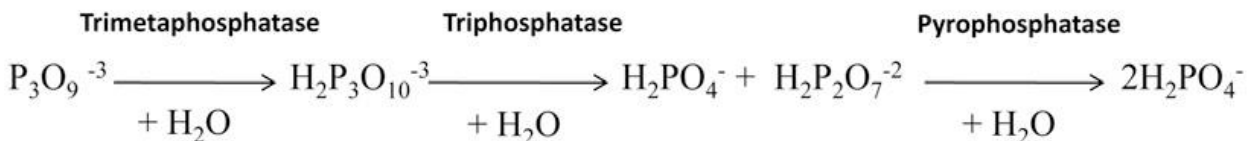
Εικόνα 5 : Γενική εξίσωση κατά την οποία η ανόργανη πυροφωσφατάση καταλύει την υδρόλυση του πυροφωσφορικού σε φωσφορικό. (Πηγή : Dick, 2011)

Η φορμαλδεΰδη, το φθόριο, τα οξάλικά και τα ανθρακικά αναστέλλουν τη δραστηριότητα αυτού του ενζύμου στα εδάφη. Επίσης, αναστέλλεται από πολλά μέταλλα και τα AsO_4^{3-} , BO_3^{2-} , MoO_4^{2-} , PO_4^{3-} , VO^{2+} και WO_4^{2-} είναι

ανταγωνιστικοί αναστολείς. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, ωστόσο, πολλά μέταλλα είναι ενεργοποιητές της πυροφωσφατάσης.

1.8.4. Trimetaphosphatase

Αυτό το ένζυμο είναι σημαντικό για τον κύκλο του P επειδή συμμετέχει στην υδρόλυση ενός κυκλικού πολυφωσφορικού που δεν απορροφάται στο έδαφος, γνωστού ως τριμεταφωσφορικό. Το τριμεταφωσφορικό ($P_3O_9^{3-}$) υδρολύεται από μια σειρά βιοχημικών αντιδράσεων για να δώσει φωσφορικά άλατα που απορροφώνται από τα εδάφη όπως τριφωσφορικά ($H_2P_3O_{10}^{3-}$), πυροφωσφορικά ($H_2P_2O_7^{2-}$) και διόξινα φωσφορικά (δηλαδή, $2H_2PO_4^-$), τα οποία καταλύονται από τριμεταφωσφατάση, τριφωσφατάση και πυροφωσφατάση.



Εικόνα 6 : Υδρόλυση του τριμεταφωσφορικού μέσα από μια σειρά βιοχημικών αντιδράσεων. (Πηγή : Dick., 2011)

Έχει βρεθεί ότι η δράση της τριμεταφωσφατάσης συσχετίζεται με τον οργανικό άνθρακα, το ολικό άζωτο, αλλά και την περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο.

1.9. Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση οργανικών αποβλήτων ορίζεται ως μια βιολογική - οξειδωτική διαδικασία που περιλαμβάνει την ανοργανοποίηση και μερική χουμοποίηση της οργανικής ύλης, που οδηγεί σε ένα σταθεροποιημένο τελικό προϊόν, απαλλαγμένο από φυτοτοξικότητα και παθογόνα και με χουμικές ιδιότητες (Bernal M.P. et al, 2009).

Η βασική διαδικασία της κομποστοποίησης είναι η εξώθερμη οξείδωση της οργανικής ύλης, η οποία μετατρέπεται από ετερότροφους μικροοργανισμούς μέσω δύο βασικών φάσεων κομποστοποίησης: η φάση της βιολογικής οξείδωσης (biooxidative phase) και η φάση της ωρίμανσης. Η πρώτη φάση αποτελείται από τρία στάδια:

- Μεσόφιλο
- Θερμόφιλο
- Επαναφοράς (Cooling)

Κατά τη διάρκεια του μεσόφιλου σταδίου, μεσόφιλα βακτήρια και μύκητες αποδομούν απλές ενώσεις όπως σάκχαρα, αμινοξέα και πρωτεΐνες, αυξάνοντας γρήγορα τη θερμοκρασία. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ο μικροβιακός μετασχηματισμός της οργανικής ύλης σε υψηλό ρυθμό και παράγεται θερμότητα λόγω της οξείδωσης της οργανικής ύλης. Όταν η παραγωγή ενέργειας είναι υψηλότερη από την απώλεια ενέργειας από τη σωρό κομποστοποίησης, τότε η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 60°C – 70 °C . Στο θερμόφιλο στάδιο, ευνοούνται κυρίως βακτήρια.

Το θερμόφιλο στάδιο χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες και ο μετασχηματισμός της οργανικής ύλης επιτελείται κυρίως από οργανοετεροτροφικά βακτήρια. Αποδομούν λίπη, κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και μικρό μέρος λιγνίνης. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η μέγιστη αποδόμηση της οργανικής ύλης καθώς και η καταστροφή παθογόνων και ζιζανίων.

Στο cooling στάδιο, οι τιμές θερμοκρασιών μειώνονται σε τιμές θερμοκρασίας δωματίου, λόγω της μείωσης της μικροβιακής δραστηριότητας. Σε αυτό το στάδιο η σωρός αποικίζεται από μεσόφιλους μικροοργανισμούς (μύκητες, ακτινοβακτήρια), οι οποίοι μπορούν να αποδομούν αργά λιγνίνη, κυτταρίνη και

ημικυτταρίνη. Κατά τη διάρκεια του θερμόφιλου σταδίου αυτοί οι μικροοργανισμοί είναι ανενεργοί και επιζούν ως σπόρια ή άλλες αδρανείς μορφές.

Κατά τη φάση της ωρίμανσης, η θερμοκρασία αντανακλά τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος, δεν λαμβάνει χώρα επαναθέρμανση και πραγματοποιείται αργή μικροβιακή σταθεροποίηση και χουμοποίηση της οργανικής ύλης. Κατά το στάδιο αυτό φαίνεται να παράγονται και φυτοδιεγερτικές ενώσεις.

1.9.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της κομποστοποίησης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη διαδικασία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες που αλληλοεπηρεάζονται. Η πρώτη κατηγορία αφορά εκείνους που εξαρτώνται από τη σύνθεση του μείγματος της κομποστοποίησης, όπως ισορροπία θρεπτικών στοιχείων, pH, μέγεθος τεμαχιδίων, πορώδες και υγρασία. Η ισορροπία θρεπτικών στοιχείων καθορίζεται κυρίως από τον λόγο C/N. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τους παράγοντες που εξαρτώνται κυρίως από τη διαχείριση της διαδικασίας της κομποστοποίησης, δηλαδή, συγκέντρωση οξυγόνου, θερμοκρασία και περιεκτικότητα σε νερό.

1.9.2. Αξιολόγηση ωρίμανσης για την ποιότητα του compost

Τα ανώριμα και κακώς σταθεροποιημένα κομπόστ μπορούν να δημιουργήσουν μια σειρά προβλημάτων κατά την αποθήκευση, την εμπορία και τη χρήση. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης αυτά τα υλικά μπορεί να αναπτύξουν αναεροβικούς θύλακες (anaerobic pockets) που μπορεί να οδηγήσουν σε οσμές, ή/και την ανάπτυξη τοξικών ή εύλεκτων ενώσεων. Η συνεχιζόμενη αποδόμηση όταν αυτά τα υλικά προστίθενται στο έδαφος ή στα μέσα ανάπτυξης μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών λόγω του μειωμένου οξυγόνου και/ή του διαθέσιμου αζώτου ή της παρουσίας φυτοτοξικών ενώσεων. Η

ωριμότητα και η σταθερότητα του κομπόστ χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά. Ωστόσο, το καθένα αναφέρεται σε συγκεκριμένες ιδιότητες αυτών των υλικών. Υπήρξαν και θα συνεχίσουν να γίνονται προσπάθειες για την ανάπτυξη και τη βελτίωση μεθόδων που αξιολογούν τη σταθερότητα και την ωριμότητα, αλλά δεν υπάρχει καμία καθολικά αποδεκτή και εφαρμοσμένη μέθοδος.

Η σταθερότητα αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο στάδιο κατά το οποίο δεν προκύπτουν πλέον θερμοφιλικές φάσεις. Σχετίζεται με το είδος των οργανικών ενώσεων που απομένουν και την προκύπτουσα βιολογική δραστηριότητα στο υλικό.

Η ωρίμανση είναι ο βαθμός ή το επίπεδο πληρότητας της κομποστοποίησης. Η ωρίμανση δεν περιγράφεται από μία μόνο ιδιότητα και επομένως εκτιμάται καλύτερα περισσότερων παραμέτρων. Επηρεάζεται εν μέρει από τη σχετική σταθερότητα του υλικού, αλλά περιγράφει επίσης την επίδραση άλλων χημικών ιδιοτήτων του κομπόστ στην ανάπτυξη των φυτών. Ορισμένα ανώριμα κομπόστ μπορεί για παράδειγμα να περιέχουν υψηλές ποσότητες ελεύθερης αμμωνίας, ορισμένα οργανικά οξέα ή άλλες υδατοδιαλυτές ενώσεις που μπορούν να περιορίσουν τη βλάστηση των σπόρων και την ανάπτυξη των ριζών.

Σύμφωνα με το CCQC (California Compost Quality Council) ο χαρακτηρισμός ενός δείκτη ωρίμανσης απαιτεί από τον παραγωγό να παρέχει την αναλογία C:N του τελικού προϊόντος και να αναφέρει τουλάχιστον μία παράμετρο από καθεμία από τις ακόλουθες λίστες των ομάδων A και B. Τα δείγματα κομποστοποίησης απαιτείται πρώτα να βρίσκονται εντός του εύρους των τιμών της αναλογίας C:N, πριν από την εξέταση των αποτελεσμάτων από δοκιμές στις ομάδες A και B.

Πίνακας 3 : Τιμές που καθορίζουν τη σταθερότητα ενός compost

Group A (Stability)	Rating		
	Very Stable	Stable	Less Stable
Specific Oxygen Uptake Rate (mg O ₂ per g OM per d)	< 12	12 - 36	> 36
Carbon Dioxide Evolution Rate (mg CO ₂ -C per g OM per d)	< 2	2 - 8	> 8
Dewar Self-Heating Test (Dewar Index)	V	IV	III, II, or I
Headspace Carbon Dioxide (color-code for Solvita CO ₂)	7 - 8	5 - 6	1 - 4
Biologically Available Carbon (mg CO ₂ -C per g OC per d)	< 2	2 - 4	> 4

Πηγή : California Compost Quality Council, 2001

Πίνακας 4 : Τιμές που καθορίζουν την ωρίμανση ενός compost

Group B (Maturity Indicator)	Rating		
	Very Mature	Mature	Immature
Ammonium, (mg kg ⁻¹ dw)	< 75	75 - 500	> 500
Ammonium:Nitrate Ratio ³ , (unitless ratio)	< 0.5	0.5 - 3.0	> 3.0
Seedling Emergence, (% of control), AND	> 90 and	80 - 90 and	< 80 and
Seedling Vigor, (% of control)	> 95	85 - 95	< 85
In-Vitro Germination and Root Elongation , (% of control)	> 90	80 - 90	< 80
Earthworm Bioassay: The Minnesota "Z"-Test (% weight gain)	< 20	20 - 40	> 40
Ammonia, (color-code for Solvita NH ₃)	5	4	3 - 1
Volatile Fatty Acids, (mmoles g ⁻¹ dw)	< 200	200 - 1,000	> 1,000

Πηγή : California Compost Quality, 2001

1.10. Φωσφορίτες (Rock Phosphates)

Οι φωσφορίτες ή φωσφορικά πετρώματα είναι παγκόσμιος αλλά ανακριβής όρος που περιγράφει το οποιοδήποτε φυσικό γεωλογικό υλικό το οποίο περιέχει ένα ή περισσότερα φωσφορικά ορυκτά κατάλληλα για εμπορική χρήση.

Τα ορυκτά των φωσφορικών πετρωμάτων διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την προέλευση τους, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες τους. Τα κύρια φωσφορικά ορυκτά είναι αυτά που περιέχουν ασβέστιο (Ca), απατίτες. Καθαρός φθοριοαπατίτης περιέχει 42% πεντοξείδιο του φωσφόρου.

Πέντε κύριοι τύποι φωσφορικών πόρων (phosphate resources) που εξορύσσονται είναι:

- Θαλάσσια φωσφορικά κοιτάσματα
- Πυριγενή φωσφορικά κοιτάσματα
- Μεταμορφωμένα φωσφορικά κοιτάσματα
- Αυτά που έχουν προκύψει από ζωντανούς οργανισμούς (Biogenic deposits)
- Αυτά που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της αποσάθρωσης

Περίπου το 75% των παγκόσμιων φωσφορικών πόρων προέρχονται από ιζηματογενή, θαλάσσια φωσφορικά κοιτάσματα, 15-20% από πυριγενή και αποσάθρωμένα κοιτάσματα και μόλις 1-2% από βιογενή κοιτάσματα (biogenic deposits), κυρίως συσσωρεύσεις γκουανό από πτηνά και νυχτερίδες.

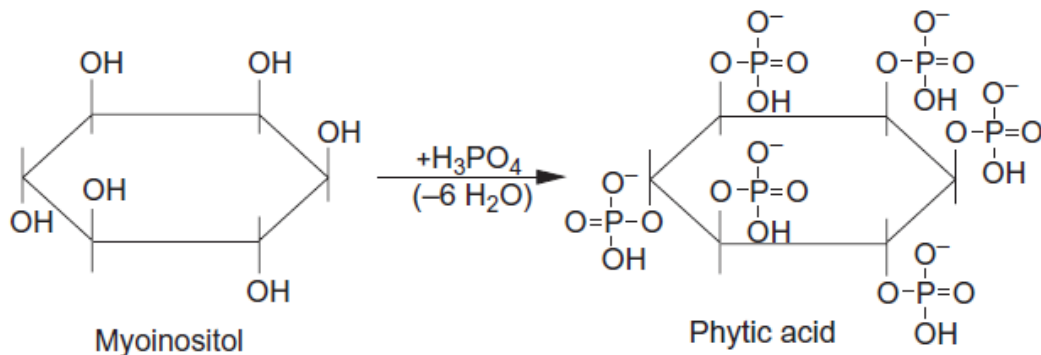
Μερικά φωσφορικά ορυκτά που απαντώνται σε πυριγενή, μεταμορφωμένα και ιζηματογενή πετρώματα είναι:

- Φθοριοαπατίτης ($(Ca_{10}(PO_4)_6F_2)$)
- Υδροξυ-απατίτης ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$)
- Carbonate-hydroxy-apatites ($Ca_{10}(PO_4,CO_3)_6(OH)_2$)
- Φρανκολίτης

Τα φωσφορικά λιπάσματα παράγονται από πρώτες ύλες οι οποίες είναι κυρίως ιζηματογενούς, πυριγενούς και βιογενούς προέλευσης. Τα φωσφορικά πετρώματα συγκεντρώνονται και στη συνέχεια υποβάλλονται σε χημική επεξεργασία με θειικό και φωσφορικό οξύ, μετατρέπομενα σε διαλυτά φωσφορικά λιπάσματα, όπως υπερφωσφορικό (SSP) και τριπλά υπερφωσφορικό (TSP), καθώς και φωσφορικό μονοαμμώνιο (MAP) και φωσφορικό διαμμώνιο (DAP).

1.11. Άλατα φυτικού οξέως (Phytate)

Το φυτικό οξύ είναι η τυπική μορφή αποθήκευσης του P σε σπόρους και άλλα όργανα των φυτών. Είναι άλατα του φυτικού οξέως, της μυο-ινοσιτόλης, του εξακιφωσφορικού. Συντίθεται από την κυκλική αλκοόλη μυο-ινοσιτόλης με εστεροποίηση των υδροξυλομάδων με φωσφορικές ομάδες. Η λειτουργία του φυτικού οξέως είναι να παρέχει στο σπορόφυτο μια πηγή P για τη σύνθεση μεμβρανικών λιπιδίων και νουκλεϊκών οξέων.



Εικόνα 7 : Εστεροποίηση των υδροξυλομάδων της κυκλικής αλκοόλης μυο-ινοσιτόλης με φωσφορικές ομάδες ώστε να προκύψει το φυτικό οξύ. (Πηγή : Marschner, 2012)

Το άλας του φυτικού οξέως που περιέχει Ca-Mg ονομάζεται phytate. Το φυτικό οξύ έχει μεγάλη συνάφεια με τον σίδηρο Fe ψευδάργυρο Zn αλλά και

βαρέα μέταλλα, κάτι το οποίο μπορεί να σημαντικό για τη δέσμευση βαρέων μετάλλων και ως εκ τούτου την απομάκρυνσή τους από τις ρίζες.

Στα φλοιώδη κύτταρα των ριζών οικοτύπων της *Deschampsia caespitosa*, ανεκτικών στον ψευδάργυρο και σε άλλα φυτικά είδη, ο ψευδάργυρος καταλαμβάνει έως και το 60% των θέσεων φορτίου του φυτικού οξέος. Σύμφωνα με τους Ockenden et al. (2004) στους σπόρους λαχανικών και στους κόκκους δημητριακών τα κύρια phytates είναι τα άλατα που περιέχουν K-Mg. Οι Lott et al. (2009) αναφέρουν ότι οι αναλογίες του K, Mg και επίσης του Ca που σχετίζονται με το φυτικό οξύ ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ των φυτικών ειδών και ακόμη και μεταξύ των διαφορετικών ιστών ενός σπόρου. Ο φώσφορος των phytates αποτελεί περίπου το 50% του συνολικού P στους σπόρους λαχανικών, το 60-70% στους κόκκους των δημητριακών και περίπου το 86% στο πίτουρο σιταριού.

1.12. Μυκορριζικοί μύκητες

1.12.1. Γενικά

Οι μυκορριζικοί μύκητες είναι μια ετερογενής ομάδα από διαφορετικές τάξεις μυκήτων. Συνδέονται πάντα με τις ρίζες των ανωτέρων φυτών (higher plants), πάνω από το 90% των φυτικών ειδών, συμπεριλαμβανομένων και των δασικών δέντρων, λειμώνων αγροστωδών (wild grasses) και πολλών καλλιεργούμενων φυτών. Από αυτή τη σχέση επωφελούνται και τα φυτά ξενιστές και οι μυκορριζικοί μύκητες. Τα φυτά ξενιστές είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη και αναπαραγωγή των μυκήτων, ενώ οι μυκορριζικοί μύκητες βελτιώνουν τη θρεπτική κατάσταση των φυτών ξενιστών τους, επηρεάζοντας την ανόργανη θρέψη, την απορρόφηση νερού, την ανάπτυξη και την αντοχή στις ασθένειες.

Οι μυκορριζικοί μύκητες αναπτύσσουν εκτενές δίκτυο από υφές στο έδαφος, το οποίο συνδέει φυτικές κοινότητες προσφέροντας επιπλέον και οριζόντια μεταφορά των θρεπτικών. Αλληλοεπιδρούν με το φυτό-ξενιστή, σε ειδικά

διαμορφωμένες συμβιωτικές διεπιφάνειες (symbiotic interfaces) επι των κυτταρικών μεμβρανών.

1.12.2. Κατηγορίες Μυκορριζών

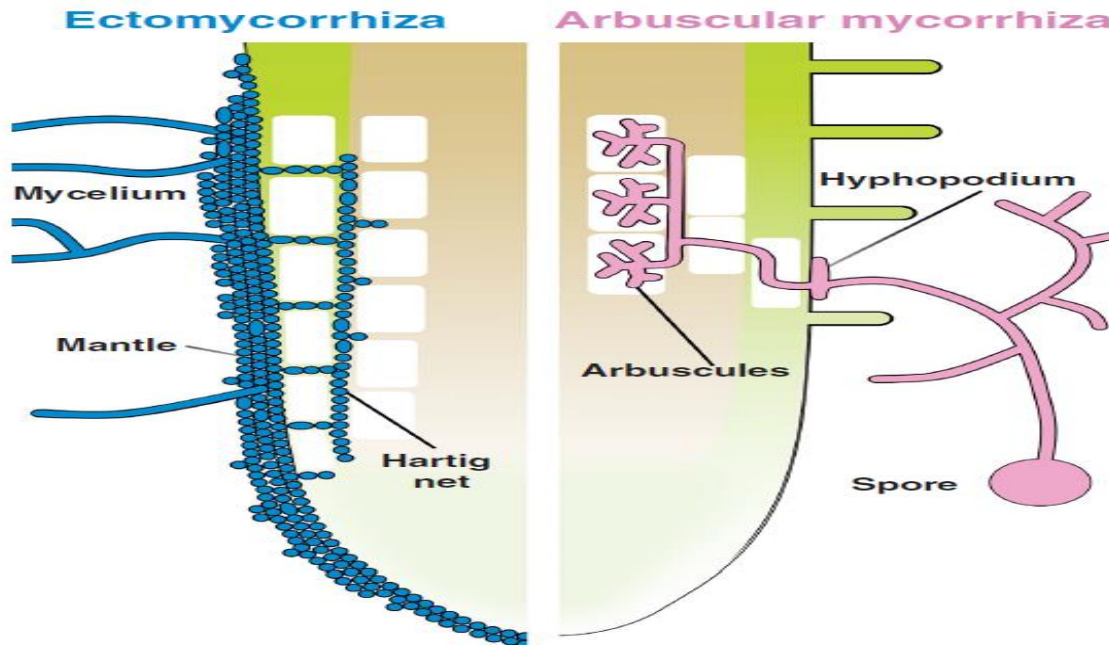
Οι μυκορριζικοί μύκητες κατηγοριοποιούνται σε δύο μεγάλες ομάδες, τις εκτομυκόρριζες και τις ενδομυκόρριζες.

Μια εκτομυκορριζική ρίζα χαρακτηρίζεται από την παρουσία τριών δομικών συστατικών: ένα περίβλημα ή μανδύα από ιστό των μυκήτων που περικλείει τη ρίζα, μια εσωτερική ανάπτυξη υφών μεταξύ των επιδερμικών και φλοιωδών κυττάρων που ονομάζεται δίκτυο Hartig και ένα σύστημα υφών (hyphal elements) που αναπτύσσεται προς τα έξω (το εξωριζικό extraradical ή εξωτερικό external μυκήλιο) που σχηματίζουν λειτουργικές συνδέσεις τόσο με το έδαφος όσο και με τους σπόρους (sporocarps) των μυκήτων που σχηματίζουν τις εκτομυκόρριζες. (Smith and Read, 2008)

Παρατηρούνται κυρίως σε φυτά της οικογένειας Pinaceae που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο, Fagaceae που υπάρχουν στο βόρειο ημισφαίριο και κάποια στο νότιο ημισφαίριο καθώς και σε τροπικά δάση της Ν.Α. Ασίας. (Smith and Read, 2008).

Ενδομυκόρριζα: Οι μύκητες σχηματίζουν δομές μεταξύ των κυττάρων του φλοιού της ρίζας και αναπτύσσεται ανάμεσα στα κύτταρα (intercellularly). Στη διεπιφάνεια μύκητα-φυτού, οι κυτταρικές μεμβράνες του μύκητα και του φυτού είναι σε άμεση επαφή μεταξύ τους. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ενδομυκορριζών. Οι πιο γνωστοί είναι οι δενδρόμορφοι μυκορριζικοί μύκητες (arbuscular mycorrhiza), οι ενδομυκόρριζες που σχηματίζονται μεταξύ φυτικών ειδών της οικογένειας Ericaceae και βασιδιομυκητών ή μεταξύ φυτικών ειδών της οικογένειας

Monotropaceae και ασκομυκήτων και ενδομυκόρριζες που σχηματίζονται μεταξύ φυτικών ειδών της οικογένειας Orchidaceae και βασιδιομυκήτων.



Εικόνα 8: Αποικισμός ρίζας από εκτομυκόρριζα (αριστερά) και AMF (δεξιά) (Bofante P., Genre A., 2010). Ο εκτομυκορριζικός μύκητας περιβάλλει με έναν παχύ μανδύα την κορυφή της ρίζας στενά appressed υφών ενώ το δίκτυο Hartig αναπτύσσεται γύρω από τα επιδερμικά κύτταρα. Οι ενδομυκορριζικοί μύκητες (AMF) δεν αποικίζουν την κορυφή της ρίζας. Οι υφές αναπτύσσονται από ένα σπόρο και παράγουν ένα υποπόδιο στην επιδερμίδα της ρίζας. Ο αποικισμός της ρίζας συνεχίζεται ενδοκυτταρικά και ανάμεσα στα κύτταρα και καταλήγει με τον σχηματισμό δενδρόμορφων, μικρών μυκηλιακών δέντρων, μέσα στα εσωτερικά κύτταρα του φλοιού του φυτού σε επαφή με τις κυτταρικές μεμβράνες.

1.12.3. Δενδρόμορφοι μυκορριζικοί μύκητες

Οι δενδρόμορφοι μυκορριζικοί μύκητες (AMF) σχηματίζουν τον πιο κοινό τύπο μυκορριζών. Σχηματίζονται σε μια τεράστια ποικιλία φυτών ξενιστών από υποχρεωτικά συμβιωτικούς μύκητες που αναταξινομήθηκαν με βάση τις αλληλουχίες DNA σε ένα ξεχωριστό φύλο των μυκήτων, το φύλλο Glomeromycota. Οι μύκητες αυτοιέχουν την προέλευσή τους πιθανώς πάνω από

1000 εκατομμύρια χρόνια πριν και οι συμβιώσεις των δενδρόμορφων μυκορριζών μυκήτων (AM) είναι επίσης εξαιρετικά αρχαίες (Smith and Read, 2008).

Ένας δενδρόμορφος μυκορριζικός μύκητας έχει τρία σημαντικά συστατικά: την ίδια τη ρίζα, τις μυκηλιακές δομές εντός και μεταξύ των κυττάρων της ρίζας και το μυκήλιο που αναπτύσσεται στο έδαφος στο περιβάλλον της ριζόσφαιρας (extraradical mycelium). Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, αναλόγως των δομών που σχηματίζουν τα κύτταρα του φλοιού. Ο τύπος Arum στον οποίο παρατηρούνται κυρίως δενδρόμορφα και στον τύπο Paris στον οποίο παρατηρούνται κυρίως σπειρώματα υφών. Το φυτό-ξενιστής, καθώς και το γονιδίωμα παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό του τύπου (Smith and Read, 2008).

Οι AMF έχουν αναγνωριστεί ως υποχρεωτικοί συμβιωτές ενός πολύ μεγάλου φάσματος φυτικών ειδών. Οι συμβιώσεις είναι βιοτροφικές και αμοιβαίες, οι μακροπρόθεσμες συμβατές αλληλεπιδράσεις βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην αμφίδρομη μεταφορά θρεπτικών ουσιών προς το φυτό και φωτοσυνθετικού υλικού προς τον μύκητα, μερικές φορές συμπληρώνονται από άλλα οφέλη για το φυτό όπως η ανοχή στην ξηρασία και τις ασθένειες (Smith and Read, 2008).

1.12.4. Μυκορριζική Συμβίωση

Η αντίληψη του φυτού-ξενιστή από το προσυμβιωτικό μυκήλιο γίνεται με τη μεσολάβηση εκκρίσεων ρίζας (root exudates). Οι υπεύθυνες ενώσεις που απελευθερώνονται από τη ρίζα και διαχέονται σε μικρή απόσταση, πριν εκπλυθούν ή αποδομηθούν, έχουν αναγνωριστεί ως στριγγολακτόνες. Διεγείρουν τον μεταβολισμό και τη διακλάδωση των AMF, μια αλλαγή στο μοτίβο ανάπτυξης των μυκηλίων που πιστεύεται ότι αυξάνει τις πιθανότητες συνάντησης με τον ξενιστή. Οι στριγγολακτόνες έχουν επίσης ορμονικό ρόλο στην αναστολή της πλευρικής

διακλάδωσης των βλαστών. Η διαρροή των στριγγολακτονών από τις ρίζες στο έδαφος και η ταχεία υδρόλυσή τους τις έχουν καταστήσει ιδανικές για σηματοδότηση της εγγύτητας των ριζών στη ριζόσφαιρα.

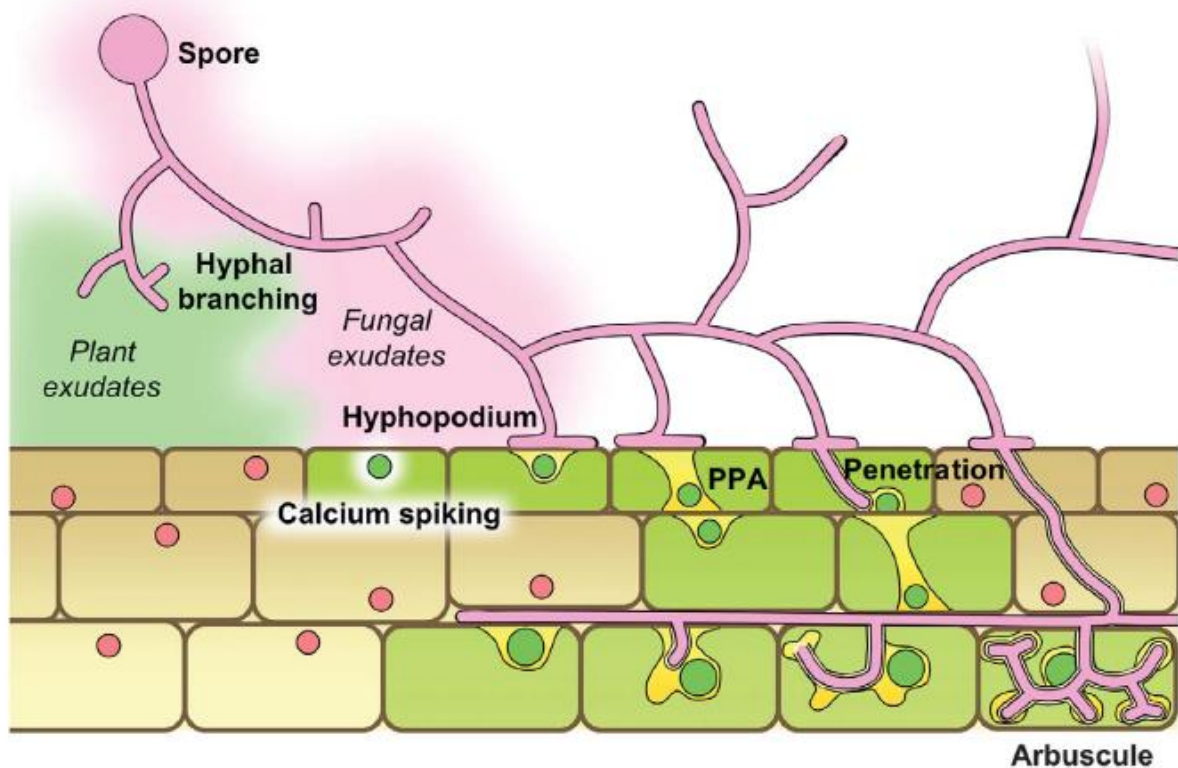
Οι AMF δεν είναι ανενεργοί κατά την προσυμβιωτική ανάπτυξή τους. Ένας μοριακός διάλογος προηγείται του αποικισμού ρίζας, κρατώντας τους εταίρους ενήμερους για την αμοιβαία εγγύτητά τους. Αν και τα υπεύθυνα μόρια δεν έχουν ακόμη αναγνωριστεί, τα βιοενεργά μόρια μυκήτων AM αποδείχθηκαν μικρότερα από 3 kDa, εν μέρει λιπόφιλα και προτάθηκε ότι διαθέτουν σκελετό χιτίνης. Αυτά τα διαχυτικά σήματα, που συχνά αναφέρονται ως «παράγοντες Myc» είναι γνωστό ότι γίνονται αντιληπτά από το φυτό. Οι αποκρίσεις των φυτών στους παράγοντες Myc κυμαίνονται από το μοριακό έως το επίπεδο οργάνου και αποτελούν μέρος ενός επαναπρογραμματισμού υπό τον έλεγχο της λεγόμενης οδού κοινής συμβίωσης της οδού μεταγωγής σήματος (the signal-transduction pathway) που προετοιμάζει το φυτό για επιτυχημένη σύνδεση τόσο με μύκητες AM όσο και με αζωτοδεσμευτικά βακτήρια.

Ο μύκητας και το φυτό έρχονται σε φυσική επαφή στην επιφάνεια των ριζών. Οι υφές του μύκητα σχηματίζουν το υποπόδιο (hyphopodium). Είναι διογκώσεις οι οποίες προσφύονται στο κυτταρικό τοίχωμα μερικών επιδερμικών κυττάρων. Η ανάπτυξη του υποποδίου ακολουθείται από μια παύση που μπορεί να διαρκέσει για 4 – 6 ώρες. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, ο ξενιστής σχηματίζει μια κυτταρική δομή η οποία προκαθορίζει τη διαδρομή του μύκητα μέσα στα κύτταρα του φυτού. Η κυτταρική δομή ονομάζεται προ-διεισδυτικός μηχανισμός (prepenetration apparatus, PPA). Αφού ολοκληρωθεί ο PPA, μια λεπτή υφή (hyphal tip) κατευθύνεται μέσω του επιδερμικού κυτταρικού τοιχώματος και κατά μήκος της διαδρομής του PPA. Εκείνη τη στιγμή, η περιμυκηλιακή μεμβράνη (perifungal membrane) θεωρείται ότι είναι συναρμολογημένη. Η ανάπτυξη της περιμυκηλιακής μεμβράνης σηματοδοτεί την

εμφάνιση της συμβιωτικής διεπαφής, του στενού ενδοκυτταρικού διαμερίσματος που επιτρέπει στους AMF να αναπτυχθούν μέσα στο φυτικό κύτταρο χωρίς να διαρρηγνύουν την ακεραιότητά του.

Η περιμυκητιακή μεμβράνη περιβάλλει τα δενδρόμορφα, τα οποία μορφολογικά μοιάζουν με μικρά δέντρα. Τα δενδρόμορφα είναι εφήμερες δομές με εκτιμώμενη διάρκεια ζωής 4 – 5 ημέρες. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα το κύτταρο-ξενιστής επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση.

Όταν σχηματιστούν τα δενδρόμορφα, το εξωριζικό μυκήλιο διακλαδίζεται και επεκτείνεται πλέον στο περιβάλλον της ριζόσφαιρας και περαιτέρω αυτής. Οι εξωτερικές υφές επεκτείνονται γύρω από τις υπόλοιπες ρίζες και επαναμολύνουν.



Εικόνα 9 : Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας αποικισμού από AMF (Bofante P., Genre A., 2010). Η βλάστηση ενός σπορίου που βρίσκεται σε ηρεμία ξεκινά από την παραγωγή μυκηλίου που εξερευνά το γύρω περιβάλλον του. Όταν αντιληφθεί τις εκκρίσεις που απελευθερώνονται από τη ρίζα του ξενιστή, τότε δημιουργούνται επαναλαμβανόμενες διακλαδώσεις υφών, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την πιθανότητα συμβίωσης. Εν τω μεταξύ, οι εκκρίσεις από τον μύκητα γίνονται αντιληπτές από τη ρίζα, η οποία προκαλεί «ταλαντώσεις» του ασβεστίου (calcium spiking), μέσω της ενεργοποίησης της κοινής οδού σηματοδότησης SYM. Η μεταγωγή σήματος οδηγεί στην ενεργοποίηση κυτταρικών και μεταγραφικών (transcriptional) αποκρίσεων. Μετά την επαφή του μύκητα με το φυτό, σχηματίζεται και προσκολλάται ένα υποπόδιο στην επιφάνεια της ρίζας. Αυτό προκαλεί τη συγκέντρωση κυτταροπλάσματος που ονομάζεται προ-διδεισδυτικός μηχανισμός (PPA) στο επιδερμικό κύτταρο που έρχεται σε επαφή και στο υποκείμενο εξωτερικό κύτταρο του φλοιού. Ακολούθως ο μύκητας αποικίζει ενδοκυττάρικα τον ξενιστή (intracellular fungal colonization) και αυτός ο αποικισμός ακολουθά τη διαδρομή του PPA προς το εσωτερικό του φλοιού. Σε αυτό το σημείο ενδοκυτταρικές υφές μπορούν να αναπτυχθούν κατά μήκος του άξονα της ρίζας. Ο μηχανισμός PPA αναπαράγεται στα εσωτερικά κύτταρα του φλοιού που έρχονται σε επαφή. Τελικά, σχηματίζονται δενδρόμορφα σε κάποια κύτταρα, που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του κυτταρικού όγκου, σχηματίζοντας μια εκτεταμένη επιφάνεια για ανταλλαγή θρεπτικών ουσιών.

1.12.5. AMF και οι μηχανισμοί τους για την πρόσληψη του φωσφόρου

Οι AMF μπορούν να αυξήσουν την πρόσληψη του φωσφόρου (P) σε φτωχά σε P εδάφη, με αύξηση του ρυθμού πρόσληψης P (εισροή P) ανά μονάδα δενδρόμορφης μυκορριζικής ρίζας. Αυτός ο αυξημένος ρυθμός πρόσληψης P μεσω των AMF επιτυγχάνεται λόγω της υψηλής αποτελεσματικότητας με την οποία οι επιφάνειες των υφών απορροφούν P από το έδαφος, σε σύγκριση με τις επιφάνειες των ριζών (Sharif and Claassen, 2011). Μπορούν να επεκτείνουν το δίκτυο των μυκορριζικών υφών για να φτάσει πέρα από τη ριζόσφαιρα, απορροφώντας ανόργανο P (P_i) από υφές των AMF μέσω μυκηλιακών μεταφορέων P_i έως και 25 cm γύρω από τις ρίζες, μετατοπίζοντας τον P_i σε ενδοκυτταρικές μυκηλιακές δομές στα κύτταρα του φλοιού της ρίζας (Smith et al., 2011). Επίσης, αποθηκεύουν τον P με τη μορφή πολυφωσφορικών αλάτων, έτσι ώστε οι μύκητες να μπορούν να διατηρήσουν τα εσωτερικά επίπεδα P_i σχετικά χαμηλά, μεταφέροντας αποτελεσματικά τον P από το έδαφος σε φυτικές υφές (soil to plant based hyphae) μέσω απρεσσορίων και από το εξωριζικό (extraradical) μυκήλιο στο ενδοριζικό (intraradical) μυκήλιο (Pepe et al., 2020). Οι AMF έχουν υφές μικρής διαμέτρου (2-20 μm) που τους επιτρέπουν να έχουν πρόσβαση σε μικρούς πόρους του εδάφους και να επιτυγχάνουν μεγαλύτερους ρυθμούς εισροής φωσφόρου για μια δεδομένη επιφάνεια (Jakobsen et al., 1992). Επιπλέον, οι AMF μπορούν να περιορίσουν την ζώνη απεμπλουτισμού σε P (depletion zone) γύρω από τις ρίζες ή τις υφές (Smith et al., 2011).

Οι εξωριζικές υφές των AMF μπορούν να μεταφέρουν βακτήρια που διαλυτοποιούν τον φώσφορο (phosphate solubilizing bacteria) PSB σε περιοχές με οργανικό φώσφορο (P) και να ενισχύσουν την ανοργανοποίηση του οργανικού P τόσο σε συνθήκες *in vitro* καλλιέργειας όσο και σε συνθήκες εδάφους. Τα βακτήρια κινούνται σε μια παχιά μεμβράνη νερού που σχηματίζεται γύρω από τις μυκηλιακές υφές. Ωστόσο, τα βακτήρια δεν μπορούν να μεταφερθούν εκεί που

υπάρχει ο οργανικός φώσφορος χωρίς πηγή ενέργειας με τη μορφή υφικών εκκρίσεων (Jiang et al, 2020). Τέλος, έχει αναφερθεί πως οι εξωριζικές υφές AMF μπορούν να υδρολύουν οργανικό φώσφορο (Koide and Kabir, 2000).

1.13. Βακτήρια που διαλυτοποιούν τον φώσφορο (PSB) και οι μηχανισμοί τους για την πρόσληψη του

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί με τους οποίους τα PSB μπορούν να μετατρέψουν τις μη διαθέσιμες μορφές του φωσφόρου για τα φυτά σε διαθέσιμες. Τα στελέχη των PSB ανήκουν σε πολλά γένη βακτηρίων, όπως για παράδειγμα *Achromobacter*, *Actinomadura*, *Aerobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Chryseobacterium*, *Delftia*, *Enterobacter*, *Gordonia*, *Klebsiella*, *Pantoea*, *Phyllobacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Rhodococcus*, *Serratia*, *Streptomyces*, *Thiobacillus*, *Xanthobacter*, *Xanthomonas* και μπορούν να διαλυτοποιούν αδιάλυτες ενώσεις ανόργανου φωσφόρου όπως όξινο φωσφορικό ασβέστιο, υδροξυαπατίτη, φωσφορικό τρι-ασβέστιο και φωσφορίτες (rock phosphates) και ανοργανοποιούν οργανικές ενώσεις του φωσφόρου σε μορφές που είναι εύκολα διαθέσιμες για τα φυτά.

Τα PSB παράγουν από τον μεταβολισμό τους οργανικά οξέα όπως 2-κετογλυκονικό, ασπαρτικό, κιτρικό, γλυκονικό, λακτικό, μαλικό, μαλονικό, οξαλικό. Τα οργανικά οξέα μπορούν να διαλυτοποιούν τον φώσφορο από ανόργανες επιφάνειες μέσω ligand-promoted dissolution (διαλυτοποίηση προκαλούμενη από προσδέτες) ή ligand exchange (ανταλλαγή προσδετών). Επιπλέον, τα PSB μπορούν έμμεσα να μειώσουν το pH της ριζόσφαιρας και να αυξήσουν τα επίπεδα του φωσφόρου επηρεάζοντας το ριζικό σύστημα και, κατά συνέπεια, αυξάνοντας τις εκκρίσεις της ρίζας. Δεδομένου ότι οι εκκρίσεις της ρίζας περιέχουν διαφορετικούς χηλικούς παράγοντες και οργανικά οξέα, μπορούν να αυξήσουν τη διαθεσιμότητα του ριζοσφαιρικού P. Τα οργανικά οξέα μπορούν

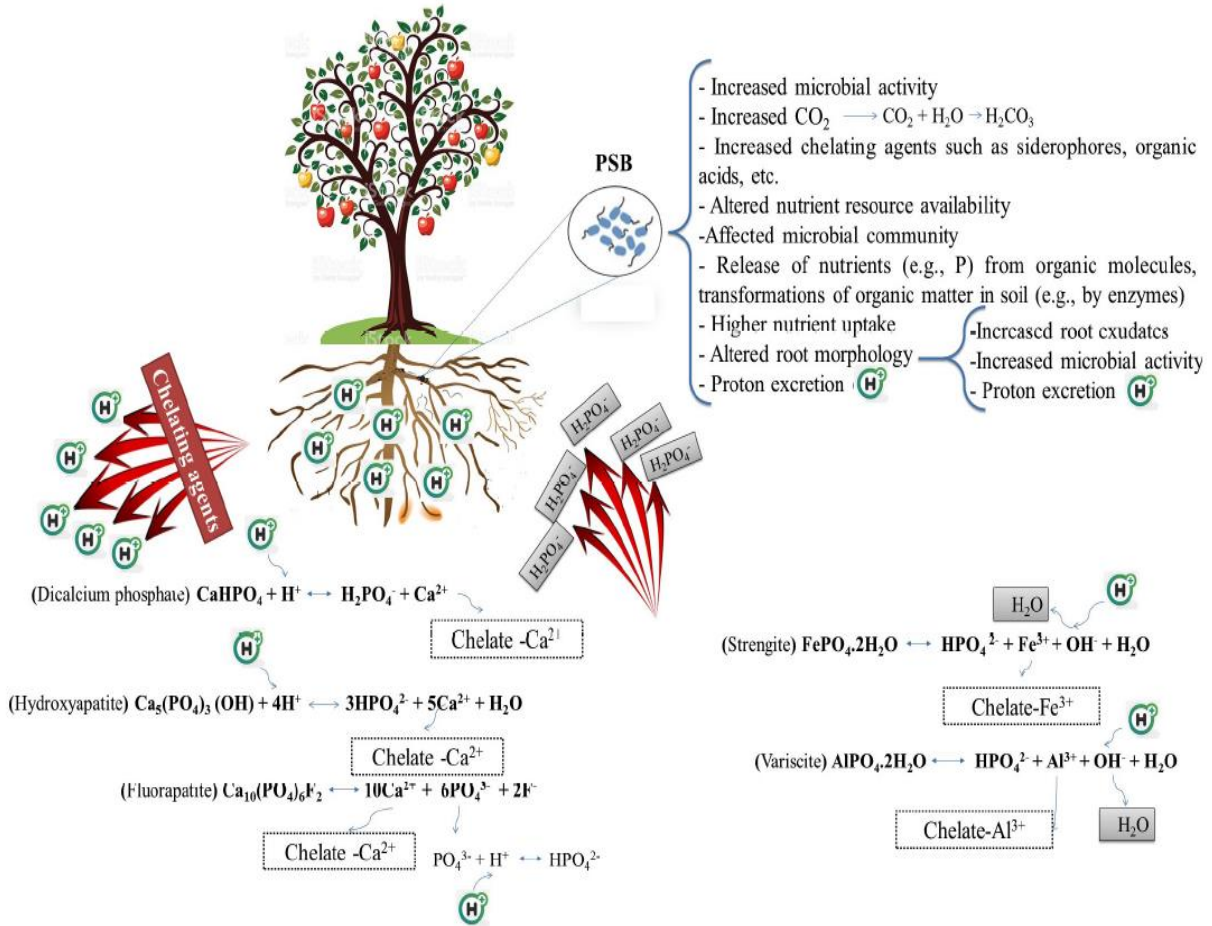
να ενισχύσουν τα επίπεδα P της ριζόσφαιρας μειώνοντας το pH. Επιπλέον τα ανιόντα των οργανικών οξέων ανταγωνίζονται τα φωσφορικά άλατα για τις θέσεις δέσμευσης ή ακόμη και αντικαθιστούν τα προσροφημένα φωσφορικά άλατα στις αργιλικές επιφάνειες του εδάφους, όπως άμορφα οξειδία αργιλίου, γκαιτίτης, καολινίτης και μοντμοριλλονίτης.

Εκτός από οργανικά οξέα, τα PSB παράγουν ανόργανα οξέα όπως ανθρακικό οξύ (H_2CO_3), θειικό οξύ (H_2SO_4), νιτρικό οξύ (HNO_3). Προκαλούν την οξειδωση ενώσεων του θείου για να παραχθεί το θειικό οξύ παρουσία οξυγόνου ή οξειδώνουν ανόργανες ενώσεις του αζώτου. Επίσης, κατά τη μικροβιακή αναπνοή και την αποδόμηση της οργανικής ύλης παράγεται διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το οποίο παρουσία νερού μετατρέπεται σε H_2CO_3 . Τα οξέα αυτά μπορούν να μειώσουν το pH της ριζόσφαιρας με αποτέλεσμα να αυξηθεί η διαθεσιμότητα του φωσφόρου.

Τα PSB μπορούν να παράγουν σιδεροφόρα, τα οποία είναι οργανικές ενώσεις που έχουν την ικανότητα να χηλικοποιούν τον τρισθενή σίδηρο κάνοντας τον διαθέσιμο για τα φυτά και τους μικροοργανισμούς. Τα σιδεροφόρα μπορούν να ενισχύσουν τη διαθεσιμότητα του φωσφόρου για τα φυτά μέσω ανταλλαγής προσδετών (ligand exchange) και να χηλικοποιούν στοιχεία όπως Al^{3+} , Ca^{2+} και Fe^{3+} , τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν σύμπλοκα με τον φώσφορο.

Ένας μηχανισμός των PSB που βοηθούν τα φυτά στη δέσμευση του φωσφόρου είναι με την παραγωγή Indole – 3 – Acetic Acid (IAA) ή ένζυμα που τροποποιούν τις πρόδρομες ουσίες του αιθυλενίου των φυτών όπως 1-aminocyclopropane 1- carboxylic acid (ACC) deaminase. Το ένζυμο ACC deaminase εμποδίζει την ανάπτυξη του πρόδρομου για την παραγωγή του αιθυλενίου μορίου, και επηρεάζει το πως ο φώσφορος επιδρά την ανάπτυξη της ρίζας. Το αιθυλένιο μπορεί να καθορίσει πως θα εξαπλωθεί η ρίζα αναλόγως τη

διαθεσιμότητα του φωσφόρου. Το βακτηριακό IAA ενισχύει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και αυξάνει τις εκκρίσεις των ριζών. Οι εκκρίσεις περιέχουν οργανικά οξέα που μειώνουν το ριζοσφαιρικό pH, σχηματίζουν και αυξάνουν την κινητικότητα συμπλόκων με απαραίτητα ιόντα.



Εικόνα 10 Ο ρόλος που παίζουν τα βακτήρια που διαλυτοποιούν φωσφορικά (PSB) στη βελτίωση της ικανότητας των φυτών να αποκτούν τον φώσφορο του εδάφους αλλάζοντας τις ισορροπίες ρόφησης που μπορεί να αυξήσουν την καθαρή μεταφορά ιόντων ορθοφωσφορικού στο εδαφικό διάλυμα. Τα πρωτόνια και οι χηλικοί παράγοντες μετάλλων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στη διαλυτοποίηση των καταβυθισμένων μορφών φωσφόρου (φωσφορικά άλατα αργιλίου και φωσφορικά άλατα σιδήρου σε όξινες συνθήκες και φωσφορικά ασβέστιο ή μαγνήσιο σε αλκαλικές συνθήκες). Η αρχή του Le Chatelier δηλώνει ότι η αύξηση της συγκέντρωσης μιας συγκεκριμένης ουσίας οδηγεί στη μετατόπιση της ισορροπίας έτσι ώστε η κατανάλωση αυτής της ουσίας να αυξάνεται και η μείωση της συγκέντρωσης ενός υλικού προάγει την ισορροπία προς την παραγωγή του εν λόγω υλικού. Οι χηλικοί παράγοντες (οργανικά ανιόντα, σιδεροφόρα, κ.λπ.) απομακρύνουν τα ιόντα Al^{3+} , και Ca^{2+} και Fe^{3+} από την αντίδραση και προκαλούν τη μετατόπιση της ισορροπίας έτσι ώστε να παράγονται περισσότερα H_2PO_4^- και HPO_4^{2-} . Η προσθήκη ιόντος H^+ προκαλεί επίσης την προσαρμογή της ισορροπίας για να ενθαρρύνει τη μείωση των ιόντων H^+ , οδηγώντας στην παραγωγή περισσότερων H_2PO_4^- και HPO_4^{2-} .

1.14. ΜΑΡΟΥΛΙ

1.14.1. Γενικά

Το μαρούλι *Lactuca sativa* L. με τους διάφορους τύπους που διακρίνεται είναι το πιο δημοφιλές και διαδεδομένο κηπευτικό της οικογένειας των Asteraceae. Είναι φυτό ψυχρής εποχής και καλλιεργείται σε περιοχές και εποχές που επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες. Είναι κατά κανόνα υπαίθρια καλλιέργεια, αλλά καλλιεργείται και σε θερμοκήπια.

Ομάδες – Τύποι Μαρουλιού

Τα μαρούλια που καλλιεργούνται σήμερα, ανάλογα με τη μορφή και τη διάταξη των φύλλων τους τον κοντό ή μακρύ βλαστό και τον σχηματισμό ή απουσία κεφαλής, διακρίνονται στις ακόλουθες ομάδες:

1. **Κως ή Ρωμάνα (Cos or Romaine) *Lactuca sativa* var. *romana* D.C. ή *Longifolia*.**
2. **Λείο, κεφαλωτό (Butterhead) *Lactuca sativa* var. *capitata* D.C.**
3. **Κατσαρό κεφαλωτό (Crisphead, Iceberg ή Curly) *Lactuca sativa* var. *capitata* D.C.**
4. **«Χαλαρό ανοικτό φύλλωμα» = «Σαλάτες» (Looseleaf) *Lactuca sativa* var. *crispa***

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν μαρούλι τύπου Ρωμάνα. Είναι φυτό όρθιο, ψηλό, με λεπτή επιμήκη χαλαρή κεφαλή στο εσωτερικό και λεπτά μακριά φύλλα στο εξωτερικό, με χρώμα συνήθως σκούρο πράσινο στα εξωτερικά φύλλα και πρασινοκίτρινο στα εσωτερικά. Σε σχέση με τα μαρούλια τύπου Butterhead, ο τύπος αυτός είναι πιο ανθεκτικός στις δύσκολες καιρικές συνθήκες. Είναι μαρούλι που προτιμάται στην Ελλάδα, στη Μέση Ανατολή και στη Β. Αφρική.

Διακρίνονται και ποικιλίες τύπου Cos ή Romaine:

- Parris Island Cos
- Gramsi
- Paris White noga

- Marvel
- Salvius
- Julius
- Linou
- Silvna
- Bacio F₁
- Merlin F₁

1.14.2. Πολλαπλασιασμός

Στην Ελλάδα η σπορά του μαρουλιού στα σπορεία ξεκινά από Αύγουστο ή Σεπτέμβριο και συνεχίζεται μέχρι Φεβρουάριο-Μάρτιο και η συγκομιδή πραγματοποιείται από Οκτώβριο μέχρι Μάιο-Ιούνιο.

Ο πολλαπλασιασμός του μαρουλιού γίνεται με σπόρο είτε απευθείας στο χωράφι, μέθοδος που σπάνια ακολουθείται στην Ελλάδα, είτε αναπτύσσονται φυτάρια σε σπορεία και ακολουθεί μεταφύτευση.

1.14.3. Απαιτήσεις σε κλίμα και έδαφος

1.14.3.1. Απαιτήσεις σε κλίμα

Το μαρούλι είναι ψυχρής εποχής κηπευτικό. Για την ανάπτυξη του, ιδανικές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι 19-23^oC και κατά τη διάρκεια της νύκτας 7-11^oC. Στους κεφαλωτούς τύπους μαρουλιού, θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 30^oC προκαλούν στασιμότητα στην ανάπτυξη και δημιουργούν προϋποθέσεις για σχηματισμό πρόωρων ανθικών στελεχών, πίκραση και αποτυχία σχηματισμού κεφαλών. Οι φυλλώδεις τύποι μαρουλιού είναι πιο ανθεκτικοί σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών.

1.14.3.2. Απαιτήσεις σε έδαφος

Το μαρούλι καλλιεργείται σε πολλούς τύπους εδαφών. Απαιτεί έδαφος πολύ πλούσιο σε οργανική ύλη, με υψηλό βαθμό υδατοϊκανότητας και να στραγγίζει καλά. Τα αμμοπηλώδη εδάφη πλούσια σε οργανική ύλη είναι τα πιο κατάλληλα εδάφη. Το άριστο pH κυμαίνεται από 6,0-7,5. Τέλος, το μαρούλι είναι ευαίσθητο σε συνεκτικά εδάφη και στην παρουσία υψηλής συγκέντρωσης αλάτων.

1.14.4. Εχθροί και ασθένειες

Μυκητολογικές ασθένειες που έχουν αναπτύσσονται στο μαρούλι είναι ο βοτρυτής, η σκληρωτινίαση, ο περονόσπορος, και το ωίδιο. Επίσης, μύκητες όπως *Pythium spp.* και *Rhizoctonia solani* προσβάλλουν τα πολύ νεαρά φυτά στο σπορείο. Οι εντομολογικές προσβολές που έχουν παρατηρηθεί στο μαρούλι είναι από αφίδες, αλευρώδη, θρίπα, σαλιγκάρια, έντομα εδάφους. Σημαντικές ιώσεις που προκαλούν ζημιές είναι το μωσαϊκό του μαρουλιού, η οποία μεταφέρεται με τον σπόρο και διαδίδεται με τις αφίδες και η ασθένεια των διογκωμένων νεύρων. Τέλος, υπάρχουν και οι φυσιολογικές ανωμαλίες του μαρουλιού στις οποίες περιλαμβάνονται το φυσιολογικό κάψιμο των φύλλων, το περιθωριακό κάψιμο των φύλλων και η υάλωση ή κάψιμο των νεύρων των φύλλων.

1.15. Οικονομικά στοιχεία καλλιέργειας στην Ελλάδα και στον κόσμο

Το μαρούλι έχει διαδοθεί και καλλιεργείται σχεδόν σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη και μήκη της υφελίου ως ετήσιο κηπευτικό.

Το 2020, η καλλιέργεια του μαρουλιού κατέλαβε έκταση 1.226.407 εκτάρια από τα οποία το 2.4%, 71.42%, 13.91%, 11.66%, και 0.58% προέρχονται από Αφρική, Ασία, Αμερική, Ευρώπη και Ωκεανία αντίστοιχα. Για το ίδιο έτος, η Κίνα είχε τη μεγαλύτερη καλλιεργούμενη έκταση παγκοσμίως, ενώ το Πουέρτο Ρίκο είχε τη μεγαλύτερη απόδοση. Ακολουθεί μετά η Ιορδανία, το Κουβέϊτ, το Βέλγιο

Μπαχρέιν. Την μεγαλύτερη παραγωγή σε τόνους είχε η Κίνα και ακολουθούν Η.Π.Α, Ινδία, Ισπανία Ιταλία.

Πίνακας 5 : Στοιχεία καλλιέργειας για κάθε ήπειρο για το έτος 2020.

	Παραγωγή (ton)	Έκταση (ha)	Απόδοση (ton/ha)
Αφρική	567.583	29.760	19,0720
Ασία	17.427.652	875.879	19,8973
Αμερική	5.609.872	170.597	32,8838
Ευρώπη	3.892.163	143.020	27,2141
Ωκεανία	162.917	7.114	22,9009
Παγκοσμίως	27.660.446	1.226.407	128,9681

Πηγή : Faostat (www.fao.org)

Πίνακας 6 : Παραγωγή, καλλιεργούμενες εκτάσεις και απόδοση της καλλιέργειας το 2020 σε παγκόσμιο επίπεδο.

Κατάταξη	Παραγωγή	Έκταση	Απόδοση
1	Κίνα	Κίνα	Πουέρτο Ρίκο
2	Η.Π.Α.	Η.Π.Α	Ιορδανία
3	Ινδία	Ινδία	Κουβεϊτ
4	Ισπανία	Ισπανία	Βέλγιο
5	Ιταλία	Ιταλία	Μπαχρέιν
6	Ιαπωνία	Τουρκία	Η.Π.Α.
7	Μεξικό	Μεξικό	Λαϊκή Δημοκρατία του

			Κονγκό
8	Βέλγιο	Ιαπωνία	Κονγκό
9	Τουρκία	Γαλλία	Ουγγαρία
10	Γαλλία	Ιράν	Δανία

Πηγή : Faostat (www.fao.org)

Στην Ελλάδα, όσο αφορά την καλλιεργούμενη έκταση την χρονική περίοδο 2016-2020 παρατηρείται πτωτική τάση, ενώ το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει με την απόδοση. Στο τομέα της παραγωγής, υπήρξε μια απότομη πτώση το έτος 2019.

Πίνακας 7 : Παραγωγή, καλλιεργούμενες εκτάσεις και απόδοση της καλλιέργειας στο διάστημα 2016-2020 στην Ελλάδα.

Έτος	Παραγωγή	Έκταση	Απόδοση (ton/ha)
2016	73.303	4.637	15,8083
2017	68.096	4.662	14,6066
2018	71.900	4.170	17,2422
2019	63.270	3.470	18,2334
2020	67.980	3.760	18,0798

Πηγή : Faostat (www.fao.org)

Για το έτος 2020, η Ελλάδα σε παγκόσμιο επίπεδο κατέλαβε την 27^η θέση στις καλλιεργούμενες εκτάσεις και στην παραγωγή και την 53^η θέση στις αποδόσεις. Εντός Ευρώπης, καταλαμβάνει την 8^η θέση στις καλλιεργούμενες εκτάσεις και στην παραγωγή, ενώ την 20^η θέση στις αποδόσεις.

1.16. Σκοπός του πειράματος

Ο σκοπός αυτού του πειράματος είναι να διερευνηθεί η επίδραση compost και μικροβιακών εμβολίων στη διαθεσιμότητα του φωσφόρου αλλά και την πρόσληψή του από φυτά μαρουλιού. Το compost παρουσιάζει συχνά θετική επίδραση στη διαθεσιμότητα και την πρόσληψη φωσφόρου από τα φυτά. Αυτή επίδραση οφείλεται στην αποδόμηση του οργανικού φωσφόρου αλλά και στη διαλυτοποίηση δυσδιάλυτων ανόργανων ενώσεων (ενώσεις με το ασβέστιο, σίδηρο και αργίλιο). Τα μικροβιακά εμβόλια διαλυτοποιούν τον ανόργανο φώσφορο καθώς και εκκρίνουν φωσφατάσες. Η αλληλεπίδρασή τους με το ριζικό σύστημα των φυτών συνεισφέρει σε αποτελεσματικότερη θρέψη και βελτίωση τους.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Γενικά

Το πείραμα ξεκίνησε 24/03/2022 και ολοκληρώθηκε 10/05/2022. Η μεταφύτευση, καλλιεργητικές φροντίδες και δειγματοληψία πραγματοποιήθηκαν στο θερμοκήπιο του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Μικροβιολογίας και οι μορφολογικές, φυσιολογικές και οι αναλύσεις θρεπτικών στοιχείων έγιναν στο Εργαστήριο Εδαφολογίας και Γεωργικής Χημείας.

2.2. Φυτικό υλικό

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν φυτά μαρουλιού τύπου Ρωμάνα. Οι ποικιλίες στον τύπο αυτό μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το χρώμα, ως προς την πρωιμότητα, ως προς την αντοχή στον σχηματισμό ανθοφόρου βλαστού σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και μεγάλης ημέρας, ως προς την ανθεκτικότητα σε ασθένειες και ως προς την εποχή καλλιέργειας. Είναι ο κατεξοχήν τύπος που καλλιεργείται στην Ελλάδα.

2.3. Βιολογικό υλικό

Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 1 στέλεχος ενδομυκορριζικού μύκητα και 2 μείγματα βακτηρίων που διαλυτοποιούν φώσφορο. Ο μύκητας είναι ο AMF 20 ο οποίος είναι στέλεχος του είδους *Funeliformis mosseae* και προέρχεται από προηγούμενες απομονώσεις από εδαφικά δείγματα πολλών περιοχών καλλιέργειας κηπευτικών στην Ελλάδα.

Το πρώτο μείγμα βακτηρίων (BAC I) περιέχει 3 είδη ριζοσφαιρικών απομονώσεων βακτηρίων. Το πρώτο με κωδικό όνομα D1R7 είναι βακτήριο *Shingobacterium* sp.. Το βακτήριο αυτό παράγει αυξητική ορμόνη (IAA), διαλυτοποιεί τον φώσφορο κάνοντας τον διαθέσιμο για τα φυτά και παράγει σιδηροφόρα. Τέλος, έχει παρατηρηθεί *in vitro* πως δεν εμποδίζει τη δράση

κάποιου παθογόνου μικροοργανισμού. Το δεύτερο με κωδικό όνομα D2R1 είναι *Acinetobacter* sp.. Το βακτήριο αυτό παράγει αυξητική ορμόνη (IAA), διαλυτοποιεί τον φώσφορο κάνοντας τον διαθέσιμο για τα φυτά και έχει κινητικότητα. Τέλος, βρέθηκε πως εμποδίζει τη δράση του παθογόνου μικροοργανισμού *Rhizoctonia solani* in vitro. Το τρίτο βακτήριο με κωδικό όνομα D9R1 είναι *Erwinia* sp.. Το βακτήριο αυτό παράγει αυξητική ορμόνη (IAA), διαλυτοποιεί τον φώσφορο, παράγει σιδηροφόρα και έχει κινητικότητα. Τέλος, βρέθηκε πως εμποδίζει τη δράση των παθογόνων μικροοργανισμών *Verticillium dahlia*, *F. Oxysporum*.

Το δεύτερο μείγμα βακτηρίων (BAC II) περιέχει 4 είδη βακτηρίων. Το πρώτο είναι το *Azotobacter vinelandii*, το οποίο απομονώθηκε από διάφορα εδαφικά δείγματα και χαρακτηρίζεται ως αζωτοδεσμευτικό βακτήριο. Το δεύτερο *Pseudomonas* sp, το οποίο απομονώθηκε από σκληρό σιτάρι ποικιλία *Capeiti* στην περιοχή Σκούρτα από τη ριζόσφαιρα. Δεσμεύει το άζωτο, διαλυτοποιεί τον φώσφορο, παράγει σιδηροφόρα και εκκρίνει NH_4^+ . Το τρίτο βακτήριο είναι *Azospirillum* sp.. Απομονώθηκε από μαλακό σιτάρι, ποικιλία *Yecora*, στη περιοχή Γόννοι, από την επιφάνεια ριζών. Δεσμεύει το άζωτο, διαλυτοποιεί τον φώσφορο, παράγει σιδηροφόρα, αυξητική ορμόνη και εκκρίνει NH_4^+ . Το τέταρτο βακτήριο *Azospirillum* sp. Απομονώθηκε από βρόμη, ποικιλία *Κασσάνδρα*, περιοχή *Ινστιτούτο Σιτηρών Θεσσαλονίκης*, από τη ριζόσφαιρα. Δεσμεύει το άζωτο, διαλυτοποιεί τον φώσφορο, παράγει σιδηροφόρα, αυξητική ορμόνη και εκκρίνει NH_4^+ .

2.4. Οργανικό Υπόστρωμα

Το compost που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα δημιουργήθηκε από υπολείμματα καλλιεργειών *μανιταριού* και *βαμβάκι*.

2.5. Πηγές Φωσφόρου

Χρησιμοποιήθηκαν 3 πηγές φωσφόρου για την εκτέλεση του πειράματος. Η πρώτη πηγή είναι λίπασμα τριπλό υπερφωσφορικό (0-46-0), η δεύτερη πηγή είναι φωσφορίτης (rock phosphate) και η τρίτη πηγή είναι το φυτικό οξύ (phytate, $C_6H_{18}O_{24}P_6$).

2.6. Πειραματική Διαδικασία

Στις 28/03/2022 τοποθετήθηκαν στο θερμοκήπιο 192 γλάστρες χωρητικότητας 2 L. Στις 96 γλάστρες υπήρχε μόνο έδαφος και στις υπόλοιπες 96 μείγμα έδαφος-compost σε αναλογία 10:1. Οι γλάστρες που είχαν έδαφος χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες, 32 γλάστρες σε κάθε ομάδα, ανάλογα με την πηγή φωσφόρου. Η 1^η ομάδα είχε το λίπασμα τριπλό υπερφωσφορικό (0-46-0) σε ποσότητα 1 g, στη 2^η τοποθετήθηκε rock phosphate και στην 3^η τοποθετήθηκε το phytate σε ποσότητα 1,42 ml. Το ίδιο πλάνο εφαρμόστηκε και στις 96 γλάστρες που περιέχουν το μείγμα.

Στη συνέχεια, η κάθε ομάδα γλαστρών και στις 2 περιπτώσεις (έδαφος και μείγμα) χωρίζεται σε τέσσερις οκτάδες ανάλογα με τα τέσσερα επίπεδα μικροοργανισμών: καθόλου μικροοργανισμοί (No Microbe), ενδομυκόρριζες (AMF), πρώτο μείγμα βακτηρίων (BAC I), δεύτερο μείγμα βακτηρίων (BAC II). Επομένως, έχουμε 24 μεταχειρίσεις με 8 επαναλήψεις η κάθε μεταχείριση.

Πίνακας 7 : Οι μεταχειρίσεις του πειράματος

1	Soil -P ₂ O ₅ - No microbe	13	Soil + 10% compost -P ₂ O ₅ - No microbe
2	Soil - P ₂ O ₅ - AMF	14	Soil + 10% compost - P ₂ O ₅ - AMF
3	Soil - P ₂ O ₅ - Bac I	15	Soil + 10% compost - P ₂ O ₅ - Bac I

4	Soil – P ₂ O ₅ - Bac II	16	Soil + 10% compost – P ₂ O ₅ - Bac II
5	Soil –RockP - No microbe	17	Soil + 10% compost –RockP - No microbe
6	Soil – RockP - AMF	18	Soil + 10% compost – RockP - AMF
7	Soil – RockP - Bac I	19	Soil + 10% compost – RockP - Bac I
8	Soil – RockP - Bac II	20	Soil + 10% compost – RockP - Bac II
9	Soil –Phytate - No microbe	21	Soil + 10% compost –Phytate - No microbe
10	Soil – Phytate - AMF	22	Soil + 10% compost – Phytate - AMF
11	Soil – Phytate- Bac I	23	Soil + 10% compost – Phytate- Bac I
12	Soil – Phytate- Bac II	24	Soil + 10% compost – Phytate- Bac II

Για τον εμβολιασμό των φυτών με AMF20 χρησιμοποιήθηκαν περίπου 2 κουταλιές. Για τον εμβολιασμό των γλαστρών με τα μείγματα βακτηρίων (BAC I και BAC II) χρησιμοποιήθηκαν 15 ml καλλιέργειας.

Εκτός από την άρδευση, κατά την ανάπτυξη των φυτών και μέχρι το τέλος του πειράματος εφαρμόστηκε λίπανση με διάλυμα Hoagland, το οποίο ήταν ελλειμματικό σε φώσφορο για να παρατηρηθεί η διαθεσιμότητα του φωσφόρου στο έδαφος και στο μείγμα που θα προκύψει από τις τρεις πηγές φωσφόρου, η ανάπτυξη των φυτών και να εξασφαλιστεί ο αποικισμός των φυτών με AMF. Η εφαρμογή της ποσότητας του διαλύματος του Hoagland δεν ήταν σταθερή. Τέλος, δύο εβδομάδες πριν τη συγκομιδή έγινε εφαρμογή διαλύματος NH₄NO₃ 1M.

2.7. Μέτρηση μορφολογικών και φυσιολογικών Παραμέτρων

2.7.1. SPAD Μετρήσεις

Ο SPAD (Soil Plant Analysis Development) μετρητής παρέχει γρήγορη και μη – καταστροφική προσέγγιση που επιτρέπει στους χρήστες να εκτιμήσουν την χλωροφύλλη στα φύλλα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την παρακολούθηση των υπό-καταπόνηση φυτών και τον προσδιορισμό της κατάστασης του αζώτου (N) *in situ*. (Zhaofeng Yuan et al., 2016). Οι μετρήσεις SPAD υπολογίζονται με βάση δύο τιμές μετάδοσης: τη μετάδοση του κόκκινου φωτός στα 650 nm, που απορροφάται από τη χλωροφύλλη και τη μετάδοση του υπέρυθρου φωτός στα 940 nm, στην οποία δεν λαμβάνει χώρα απορρόφηση χλωροφύλλης.

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής SPAD-502 και τοποθετήθηκε σε μια θέση 2/3 της απόστασης από τη βάση του φύλλου μέχρι την κορυφή (Zhaofeng Yuan et al., 2016).

2.7.2. Normalized difference vegetation index (NDVI)

Ο NDVI είναι ένας από τους πιο κοινούς δείκτες που εφαρμόζεται ευρέως για την παρακολούθηση της δυναμικής της βλάστησης (monitoring vegetation dynamic). Αυτός ο δείκτης κυμαίνεται μεταξύ - 1 και 1 όπου οι τιμές μικρότερες από το μηδέν κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου δείχνουν ότι δεν υπάρχει κάλυψη βλάστησης, ενώ τιμές μεγαλύτερες από το μηδέν περιγράφουν τη διαθέσιμη βλάστηση.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Το NIR είναι ζώνη κοντά στο υπέρυθρο (0,841–0,876 μm) και το RED είναι η ζώνη του κόκκινου (0,620–0,670 μm).

2.7.3. Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (NDRE)

Το Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (NDRE) είναι μια ελαφρά αλλαγή στο παραδοσιακό NDVI και έχει υιοθετηθεί για χρήση με δεδομένα ανάκλασης υψηλής φασματικής ανάλυσης. Το NDRE λαμβάνει υπόψη μια στενότερη ζώνη κύματος για την απορρόφηση χλωροφύλλης.

2.7.4. Relative Water Content (%)

Ο RWC είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υδατικής κατάστασης του φυτού όταν αυτό υποφέρει λόγω υδατικής καταπόνησης (Barr and Weatherley, 1962). Μετρείται στα φύλλα και ορίζεται ως το περιεχόμενο σε νερό ενός φυτού ως ποσοστό εκείνου σε κατάσταση σπαργής. Εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους, την ικανότητα απορρόφησης νερού από τη ρίζα και την υδραυλική αγωγιμότητα των ιστών του βλαστού και ρίζας.

Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε μετά την συγκομιδή των φυλλαρίων. Από κάθε φυτό επιλέχθηκε ένα φυλλάριο.

Ο υπολογισμός της μεταβλητής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους Sade et al. (2015) με τα παρακάτω βήματα

1. Έγινε κοπή των φυλλαρίων μαζί με τον μίσχο και μετρήθηκε το βάρος του νεπού φυτικού ιστού (FW).
2. Τα φυλλάρια τοποθετήθηκαν σε πλαστικές σακούλες στις οποίες είχαν τοποθετηθεί περίπου 10 ml διαλύματος 5mM CaCl₂ με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο μίσχος των φυλλαρίων να βρίσκεται μέσα στο διάλυμα. Παρέμειναν για 24 ώρες με σκοπό να κορεστούν πλήρως με το διάλυμα.
3. Υπολογισμός βάρους των κορεσμένων φυτικών δειγμάτων (TW).
4. Εισαγωγή φυλλαρίων σε φούρνο (60⁰C) για 3 μέρες.
5. Μέτρηση ξηρού βάρους των δειγμάτων (DW).
6. Υπολογισμός RWC%.

$$RWC\% = \frac{FW-DW}{TW-DW} \times 100$$

2.7.5. Φωτοσυνθετική δραστηριότητα φύλλων

Οι φυσιολογικές παράμετροι που μετρήθηκαν ήταν ο καθαρός ρυθμός της φωτοσύνθεσης (net photosynthetic rate), ο ρυθμός διαπνοής (transpiration rate), η συγκέντρωση CO₂ στους μεσοκυττάριους χώρους και η αγωγιμότητα των στοματίων των φύλλων (stomatal conductance). Οι μετρήσεις έγιναν με τη φορητή συσκευή μέτρησης της φωτοσύνθεσης Li-COR-6400 (Li-COR, Lincoln, USA). Τα βασικά στοιχεία της συσκευής είναι:

- 1) οι αναλυτές αερίων CO₂ και H₂O (infrared gas analyzers – IRGAs)
- 2) ο θάλαμος εισαγωγής του φύλλου (leaf chamber) με τους διάφορους αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτεινής ακτινοβολίας
- 3) το σύστημα καταγραφής (console system) για την καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων.

Η μέθοδος στηρίζεται σε ποσοτικές μετρήσεις ανταλλαγής αερίων στη ζώνη επαφής των φύλλων και της ατμόσφαιρας. Σημειώνεται ότι, κατά τη μέτρηση η ένταση του φωτισμού και η συγκέντρωση του CO₂ εντός του θαλάμου μέτρησης ήταν καθορισμένες στα 1200 μmol m⁻²s⁻¹ και 380 mg/l, αντίστοιχα.

2.8. Εδαφοανάλυση

Το εδαφικό δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, αεροξηράνθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (21°C-27°C). Ακολούθησε η λειοτρίβισή του και τέλος περάστηκε από κόσκινο 2mm. Μετά ακολουθούν οι χημικές αναλύσεις του εδάφους με τις αντίστοιχες μεθόδους.

2.8.1. Εκτίμηση pH (ενεργότητα ιόντων H⁺) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Για τον προσδιορισμό του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού δείγματος χρησιμοποιήθηκε αναλογία δείγματος : ηλεκτρολύτη, 1:5 w/v. Για τον προσδιορισμό του pH χρησιμοποιήθηκε ως ηλεκτρολύτης διάλυμα 0,01 M CaCl₂ (Hendershot et al., 2008) ενώ για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας απιονισμένο νερό (distilled H₂O). Το pH υπολογίστηκε ηλεκτρομετρικά με τη χρήση ηλεκτροδίου και η ηλεκτρική αγωγιμότητα με αγωγιμόμετρο.

2.8.2. Προσδιορισμός της κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους βασίζεται στην μέθοδο του Βουγιούκου. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην ταχύτητα καθίζησης των εδαφικών τεμαχιδίων, η οποία περιγράφεται από τον νόμο του Stoke's.

Ζυγίστηκαν 50 g εδάφους και τοποθετήθηκαν σε κύπελλο αναμείκτη. Αργότερα, προστέθηκε 40 ml διάλυμα διασποράς και συμπληρώθηκε μέχρι ενός σημείου με απιονισμένο νερό. Πραγματοποιείται ανάδευση για 5-8 λεπτά σε χαμηλές στροφές. Το περιεχόμενο του κυπέλλου μεταφέρεται στον ειδικό ογκομετρικό κύλινδρο Βουγιούκου και τοποθετείται το πυκνόμετρο. Συμπλήρωση με απιονισμένο νερό μέχρι τα 1130 ml που αναγράφεται στον κύλινδρο και στη συνέχεια απομακρύνεται το πυκνόμετρο. Κλείνοντας τον ογκομετρικό κύλινδρο, αναμειγνύεται το περιεχόμενό του αναστρέφοντας τον κύλινδρο αρκετές φορές. Αφού ολοκληρωθεί η αναστροφή, τοποθετείται το πυκνόμετρο. Με την πάροδο 40 δευτερολέπτων λαμβάνεται η πρώτη ένδειξη και ταυτοχρόνως σημειώνεται η θερμοκρασία του αιωρήματος με το θερμόμετρο. Η πρώτη ένδειξη αποτελεί το σύνολο της ιλύος και της αργίλου. Αφήνεται σε ηρεμία ο κύλινδρος και με την πάροδο δύο ωρών λαμβάνουμε τη δεύτερη ένδειξη και τη θερμοκρασία. Η δεύτερη

ένδειξη αντιστοιχεί στο κλάσμα της αργίλου εφόσον το σύνολο της ιλύος έχει καθιζάνει.

2.8.3. Προσδιορισμός της Ικανότητας Ανταλλαγής Κατιόντων (I.A.K).

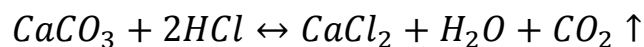
Ο προσδιορισμός της I.A.K. πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο του οξικού νατρίου. Στο πρώτο στάδιο τα ανταλλάξιμα κατιόντα του κολλοειδούς αντικαθίστανται από κατιόντα Na^+ . Έπειτα, στο δεύτερο στάδιο απομακρύνεται η περίσσεια των ιόνων Na^+ . Η συγκέντρωση των ιόντων Na^+ αντικαθίστανται από κατιόντα NH_4^+ . Η συγκέντρωση των ιόντων Na^+ του εκχυλίσματος, προσδιορίζεται με τη βοήθεια του φλογοφωτόμετρου.

2.8.4. Προσδιορισμός Οργανικής Ουσίας

Ο προσδιορισμός της οργανικής ουσίας έγινε κατά «Walkley-Black». Η μέθοδος στηρίζεται στην οξείδωση μέρους του οργανικού εδαφικού άνθρακα από ένα ισχυρό οξειδωτικό μέσο, το διχρωμικό κάλιο ($\text{K}_2 \text{Cr}_2 \text{O}_7$), σε ισχυρά όξινο περιβάλλον (πυκνό H_2SO_4).

2.8.5. Προσδιορισμός Ανθρακικών Αλάτων.

Ο προσδιορισμός ανθρακικών αλάτων πραγματοποιήθηκε με βάση την μέθοδο Bernard. Ο προσδιορισμός του επί τις % CaCO_3 στηρίζεται στην ογκομέτρηση του εκλυόμενου $\text{CO}_2 \uparrow$ το οποίο παράγεται από την αντίδραση του HCl με τα ανθρακικά άλατα του εδάφους.



2.8.6. Προσδιορισμός των ανταλλάξιμων κατιόντων καλίου, ασβεστίου, μαγνησίου και νατρίου που εκχυλίζονται με οξικό αμμώνιο (NH₄OAC, 1N, pH=7).

Με τη χρησιμοποίηση του οξικού αμμωνίου ως εκχυλιστικού, εκχυλίζονται από το έδαφος τα κατιόντα που βρίσκονται στο εδαφικό διάλυμα και αυτά που είναι προσροφημένα στις επιφάνειες ανταλλαγής και εύκολα εφοδιάζουν το εδαφικό διάλυμα.

Η εκχύλιση των ανταλλαξιμων κατιόντων με το οξικό αμμώνιο, βασίζεται στην εναλλαγή όλων των μονοσθενών και δισθενών κατιόντων από τις κολλοειδείς επιφάνειες από την περίσσεια κατιόντα αμμωνίου. Τα κατιόντα K⁺ και Na⁺.

2.8.7. Προσδιορισμός ιχνοστοιχείων (Fe,Cu,Zn,Cu)

Ο προσδιορισμός τους στηρίζεται στη μέθοδο εκχύλισης με D.T.P.A. Η θεωρητική βάση για την εκχύλιση DTPA είναι η ισορροπία του μετάλλου στο έδαφος με τον χηλικό παράγοντα (chelating agent). Το D.T.P.A. σε pH=7,3 επιτρέπει να εκχυλίσει Fe και άλλα μέταλλα. Οι μετρήσεις έγιναν στην ατομική απορρόφηση.

2.8.8. Προσδιορισμός ολικού αζώτου

Η προσδιορισμός του ολικού αζώτου πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Kjeldahl. Ο προσδιορισμός του ολικού αζώτου που περιγράφεται στη μέθοδο αναφέρεται στο ποσό του οργανικού αζώτου, που περιέχεται στην οργανική ουσία του εδάφους. Περιλαμβάνει όμως και ανόργανες μορφές αμμωνιακού αζώτου που βρίσκονται στο έδαφος.

2.8.9. Προσδιορισμός διαθέσιμου εδαφικού φωσφόρου με την μέθοδο Olsen

Η μέθοδος «Olsen» χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό του διαθέσιμου κλάσματος του εδαφικού φωσφόρου. Κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική για εδάφη με $\text{pH} > 6,5$ και σχετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε διαθέσιμο φωσφόρο.

Ο εδαφικός φωσφόρος εκχυλίζεται από το έδαφος με διάλυμα NaHCO_3 συγκέντρωσης 0.5M σε $\text{pH} 8.5$. Με το διάλυμα αυτό επιτυγχάνουμε τα εξής:

1. Εκχυλίζονται οι υπό διαλυτή μορφή ευρισκόμενες ενώσεις του φωσφόρου και τα ανταλλάξιμα φωσφορικά ανιόντα.
2. Στα ασβεστούχα (αλκαλικά), ή στα ουδέτερα εδάφη που περιέχουν διάφορες μορφές φωσφορικού Ca, ένα μέρος του φωσφόρου των μορφών αυτών διαλυτοποιείται και τα φωσφορικά ιόντα εισέρχεται στο διάλυμα, ενώ το Ca^{2+} κατακρημνίζεται ως CaCO_3 .
3. Ένα μέρος του φωσφόρου που περιέχεται σε φωσφορικά άλατα Fe και Al, (είναι μικρό σε εδάφη με ουδέτερο ή αλκαλικό pH) διαλύτοποιείται και εκχυλίζεται, λόγω του υψηλού pH του διαλύματος εκχύλισης.
4. Στο εκχύλισμα προστίθεται διάλυμα ανάπτυξης κυανού χρώματος (διάλυμα Murphy – Riley ασκορβικού οξέως). Η μέθοδος στηρίζεται στην αντίδραση των φωσφορικών με μολυβδαινικά ιόντα σε όξινο περιβάλλον προς σχηματισμό ενός φωσφορο-μολυβδαινικού συμπλόκου που έχει κίτρινο χρώμα. Ωστόσο, επειδή η ευαισθησία της μεθόδου είναι μικρή, επακολουθεί αναγωγή των φωσφορο-μολυβδαινικών ιόντων με ασκορβικό οξύ παρουσία ιόντων αντιμονίου (Sb^{+3}) προς ένα έγχρωμο προϊόν, το κυανούν του

μολυβδαινίου. Η απορρόφηση του χρώματος προσδιορίζεται φασματοφωτομετρικά στα 880 nm.

2.9. Φυτοανάλυση

Η ανάλυση των φυτικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους Mills and Jones (1996). Αφού έγινε η ξήρανση των φυτικών δειγμάτων, ακολούθησε η λειοτρίβισή τους με ειδικό μύλο άλεσης. Στη συνέχεια, ποσότητα 0,5 g φυτικού δείγματος τοποθετήθηκε σε κάψες πορσελάνης με σκοπό την ξηρή καύση σε φούρνο, στους 550⁰C για 4 ώρες με σκοπό την οξείδωση της οργανικής ύλης και την παραλαβή της τέφρας. Στην τέφρα προστέθηκε HNO₃ 65%, ώστε όλα τα στοιχεία εκτός του αζώτου N να βρίσκονται σε διαλυτή μορφή. Τέλος, ακολούθησε προσδιορισμός των στοιχείων με την κατάλληλη μέθοδο.

Η συγκέντρωση του φωσφόρου στο εκχύλισμα πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη χρώματος κατά Murphy-Riley (Murphy-Riley, 1962). Η συγκέντρωση των ιόντων K⁺ και Na⁺ του εκχυλίσματος προσδιορίστηκαν στο φλογοφωτόμετρο.

2.10. Ανάλυση Compost

Για τον προσδιορισμό όλων των στοιχείων εκτός του αζώτου, η διαδικασία είναι παραπλήσια με αυτή των φυτικών δειγμάτων. Ο προσδιορισμός του ολικού αζώτου έγινε με την μέθοδο Kjeldahl.

Ο προσδιορισμός της οργανικής ύλης έγινε με την μέθοδο της απώλειας βάρους στην καύση (Loss on Ignition). Το δείγμα ξηράθηκε στους 105⁰C για μια μέρα και στη συνέχεια αποτεφρώθηκε στους 450⁰C-500⁰C.

Για τον προσδιορισμό του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδαφικού δείγματος χρησιμοποιήθηκε αναλογία δείγματος : ηλεκτρολύτη, 1:5 w/v. Ο ηλεκτρολύτης και στις δύο αναλύσεις είναι το απιονισμένο νερό.

2.11. Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου στον φωσφορίτη (Rock Phosphate)

Για τον προσδιορισμό του ολικού φωσφόρου στο φωσφορίτη (rock phosphate) χρησιμοποιήθηκε ως προεργασία, πριν την διαδικασία ανάπτυξης χρώματος, το αντιδραστήριο aqua regia.

2.12. Στατιστική Ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με ανάλυση της διακύμανσης (Two - way ANOVA). Θεωρήθηκαν δύο διπαραγοντικά πειράματα, ένα σε έδαφος και ένα σε έδαφος+ compost. Στο κάθε διπαραγοντικό πείραμα, ο πρώτος παράγοντας είναι η ύπαρξη μικροοργανισμών που έχει 4 επίπεδα (0, AMF, BAC I και BAC II), ο δεύτερος είναι οι τρεις πηγές φωσφόρου (λίπασμα τριπλό υπερφωσφορικό, rock phosphate, phytate). Πραγματοποιήθηκε έλεγχος ύπαρξης αλληλεπίδρασης μεταξύ των επεμβάσεων. Οι συγκρίσεις των μέσων όρων πραγματοποιήθηκαν μέσω του Duncan's Multiple Range Test για διάστημα εμπιστοσύνης 95% ($\alpha = 0,05$) και έγιναν με το πακέτο agricolae του προγράμματος R, Package Version 1.2-3 (Mendiburu, 2015). Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με την χρήση της βιβλιοθήκης ggplot2 (Wickham, 2016) του προγράμματος R.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Πίνακας 8: Φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους πριν τις επεμβάσεις.

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης	Αποτέλεσμα	Μέθοδος
Sand	%	58.3	Bouyoucos Hydrometer
Silt	%	28	Bouyoucos Hydrometer
Clay	%	13.7	Bouyoucos Hydrometer
pH	pH units	7.69	1:5 (w/v) CaCl ₂ (0.01 M) extract
Carbonate Equivalent	%	8.4	Bernard Calcimeter Method
E.C.E.	cmol ₍₊₎ / kg	20.5	NaOAc (1 N, pH = 8.2)
Organic Matter	%	0.51	Modified Walkley-Black
Electrical Conductivity (EC)	dS/m	0.149	1:5 (w/v) H ₂ O extract
Potassium (K)	ppm	92	NH ₄ OAc (1 N, pH = 7)
Sodium (Na)	ppm	70	NH ₄ OAc (1 N, pH = 7)
Calcium (Ca)	ppm	6522	NH ₄ OAc (1 N, pH = 7)
Magnesium (Mg)	ppm	447	NH ₄ OAc (1 N, pH = 7)
Iron (Fe)	ppm	10	DTPA Extract
Zinc (Zn)	ppm	1	DTPA Extract
Mn (Manganese)	ppm	4	DTPA Extract
Copper (Cu)	ppm	1	DTPA Extract
Total Nitrogen	%	0.045	Kjeldahl digestion
Phosphorus (P)	ppm	1.17	Olsen / NaHCO ₃ (0.5 M, pH = 8.5) extract - Murphy-Riley colorimetric method

Πίνακας 9: Φυσικοχημικές ιδιότητες του compost

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης	Αποτέλεσμα	Μέθοδος
pH	pH units	8.02	1:5 (w/v) H ₂ O extract
Electrical Conductivity (EC)	dS/m	2.35	1:5 (w/v) H ₂ O extract
Organic Matter	%	73.29	LOI
Total Nitrogen	%	2.86	Kjeldahl digestion
Phosphorus (P)	ppm	1327.43	HNO ₃ 65% extract
Potassium (K)	ppm	15300	HNO ₃ 65% extract
Sodium (Na)	ppm	1075	HNO ₃ 65% extract
Calcium (Ca)	ppm	63131	HNO ₃ 65% extract
Magnesium (Mg)	ppm	9513	HNO ₃ 65% extract
Iron (Fe)	ppm	2951	HNO ₃ 65% extract
Zinc (Zn)	ppm	95.72	HNO ₃ 65% extract
Manganese (Mn)	ppm	240.55	HNO ₃ 65% extract
Copper (Cu)	ppm	21.35	HNO ₃ 65% extract

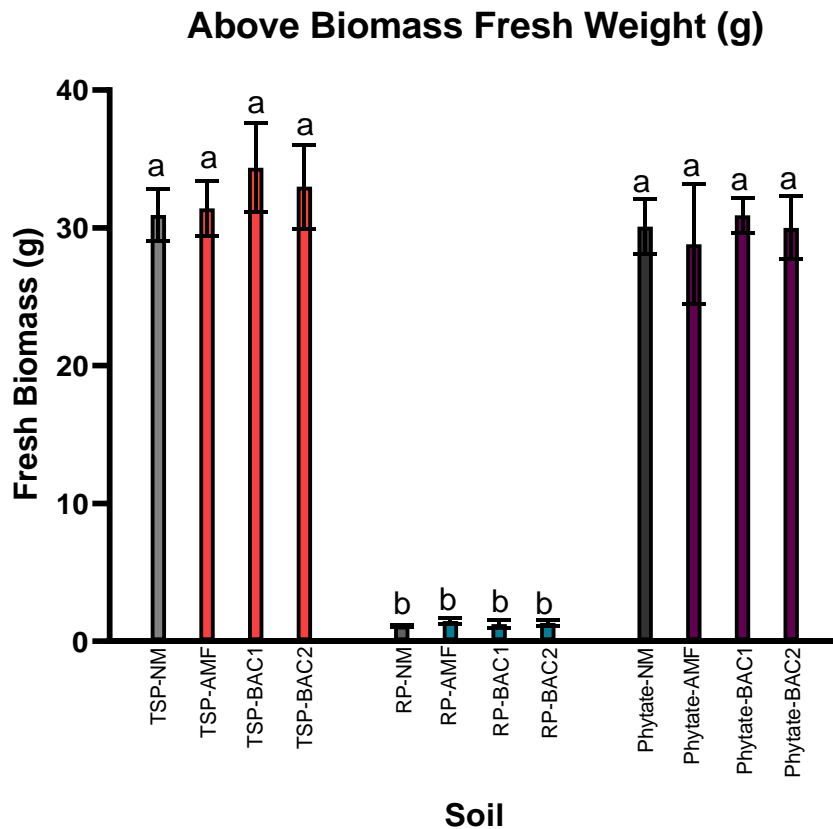
Πίνακας 10: Χημικές ιδιότητες Rock Phosphate

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης	Αποτέλεσμα	Μέθοδος
Total P	ppm	135817.49	Aqua Regia
Total K	ppm	755	Aqua Regia
Total Na	ppm	1645	Aqua Regia
Total Ca	ppm	283250	Aqua Regia
Total Mg	ppm	4518.75	Aqua Regia
Total Fe	ppm	3292	Aqua Regia
Total Zn	ppm	146.11	Aqua Regia
Total Mn	ppm	13	Aqua Regia
Total Cu	ppm	17.2	Aqua Regia

Ως μάρτυρες θεωρούνται οι επεμβάσεις με τις τρεις διαφορετικές πηγές φωσφόρου και κανένα μικροβιακό εμβόλιο, δηλαδή, TSP-NM, RP-NM και Phytate-NM. Οι μάρτυρες συγκρίνονται κυρίως με τις επεμβάσεις που έχουν ίδια πηγή φωσφόρου με αυτούς.

3.1. Αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών.

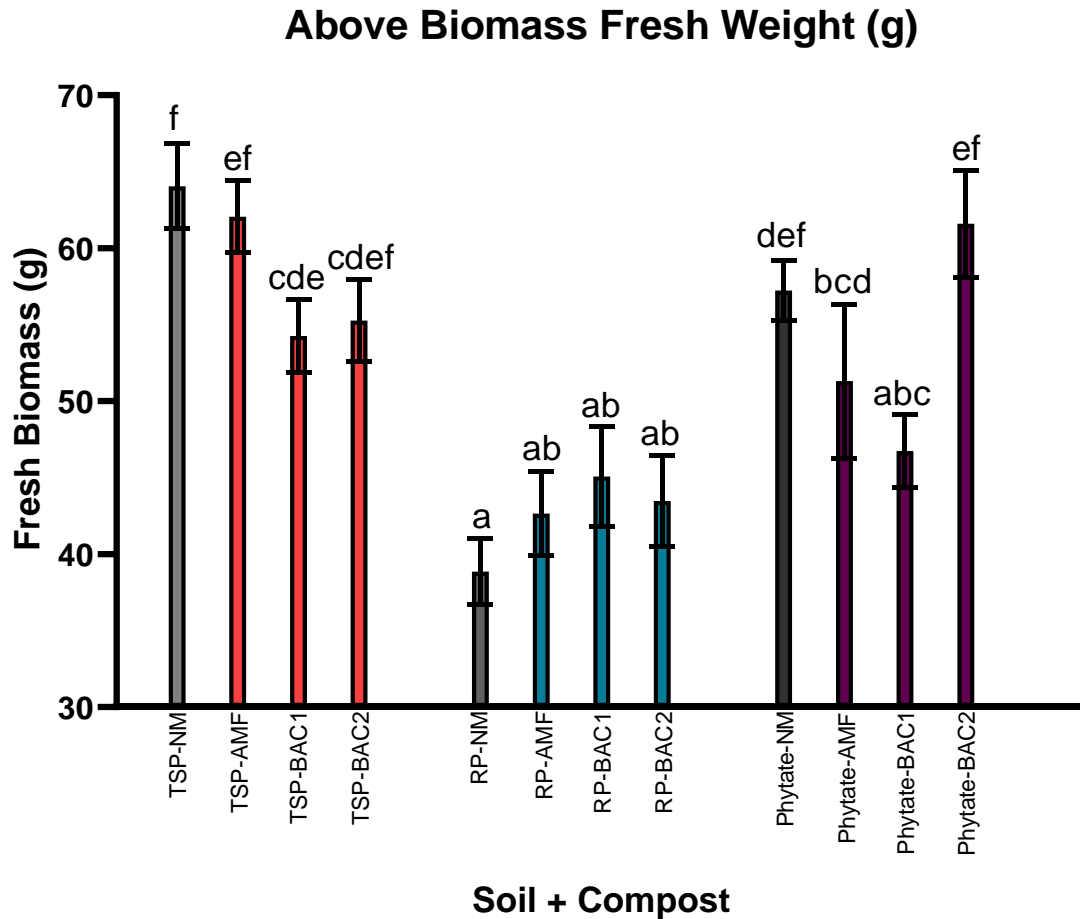
3.1.1. Νωπό βάρος υπέργειου τμήματος.



Διάγραμμα 1 : Νωπό βάρος υπέργειου τμήματος. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Για αυτή την μέτρηση δεν παρατηρείται σημαντική στατιστικώς διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων μικροβιακών επεμβάσεων και των αντίστοιχων τριών μαρτύρων. Η πηγή φωσφόρου παρουσιάζει σημαντική στατιστικώς επίδραση στη νωπή βιομάζα του υπέργειου τμήματος μεταξύ των διαφορετικών επεμβάσεων

φωσφόρου, ενώ τα μικροβιακά εμβόλια και η αλληλεπίδραση τους δεν επηρεάζει στατιστικώς σημαντικά αυτή την μέτρηση. Γενικώς, μεταξύ των πηγών φωσφόρου, σπουδαία υστέρηση παρουσιάζουν οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου RP.

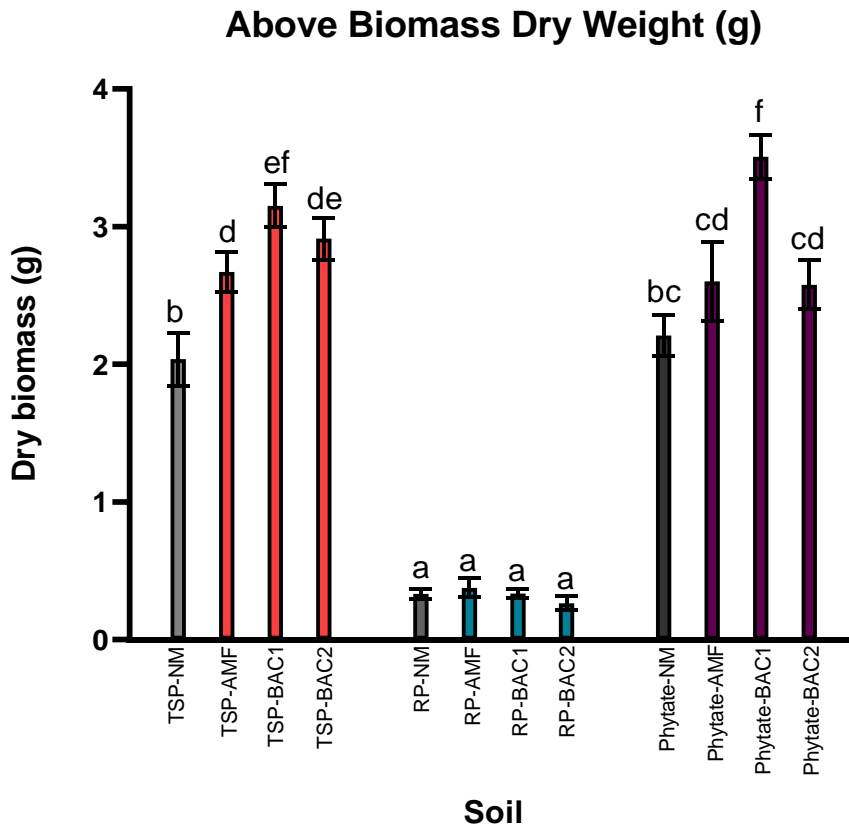


Διάγραμμα 2: Νωπό βάρος υπέργειου τμήματος. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στην περίπτωση εδάφους + compost, ο μάρτυρας TSP-NM παρουσιάζει σημαντική στατιστικώς διαφορά με την μεταχείριση TSP-BAC1 και ο μάρτυρας Phytate-NM με την μεταχείριση Phytate-BAC1. Γενικά, παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές στις επεμβάσεις με πηγή φωσφόρου TSP. Όπως στην περίπτωση με έδαφος, έτσι και σε αυτή μικρότερες τιμές παρατηρούνται στις

μεταχειρίσεις με rock phosphate, αλλά σαφώς μεγαλύτερες από αυτές του εδάφους. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην προσθήκη compost στο έδαφος.

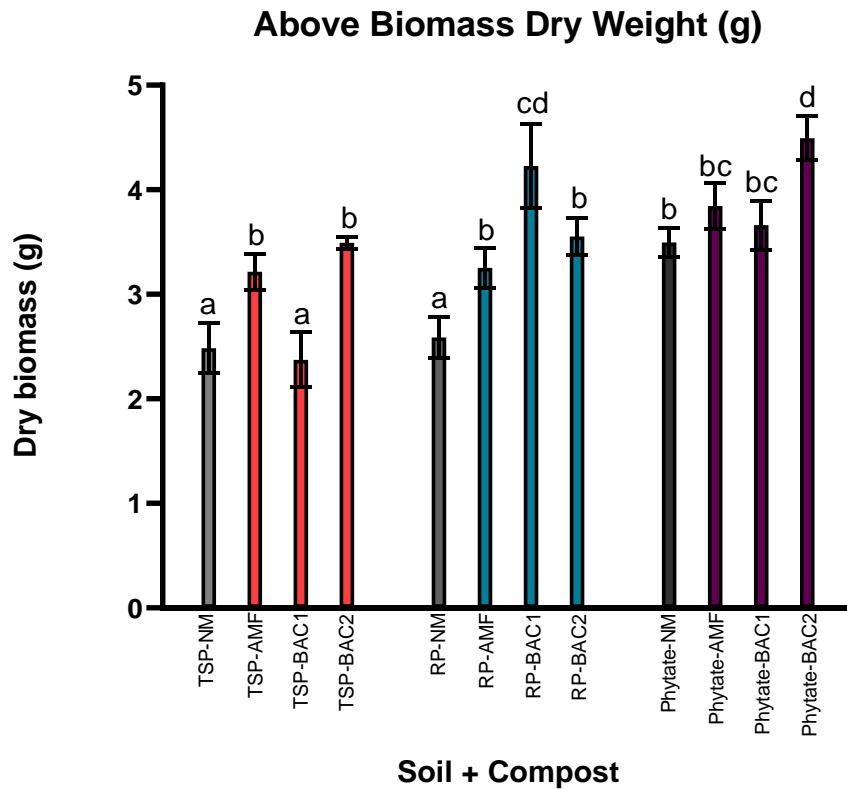
Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος



Διάγραμμα 3: Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Ο μάρτυρας TSP-NM παρουσιάζει σημαντικές στατιστικώς διαφορές με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις TSP που συνδυάστηκαν με μικροοργανισμούς και έχουν μεγαλύτερες τιμές από τον μάρτυρα. Μέγιστη τιμή παρουσιάζει η επέμβαση TSP-BAC1 3.15 g, ενώ ο μάρτυρας 2.04 g. Ο μάρτυρας phytate-NM με 2.21 g διαφέρει στατιστικώς με την μεταχείριση Phytate- BAC1 3.51 g. Οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου RP παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές. Σε αντίθεση με αυτό το πείραμα, οι Alloush et Clark (2001), εφάρμοσαν στο πείραμά τους rock phosphate

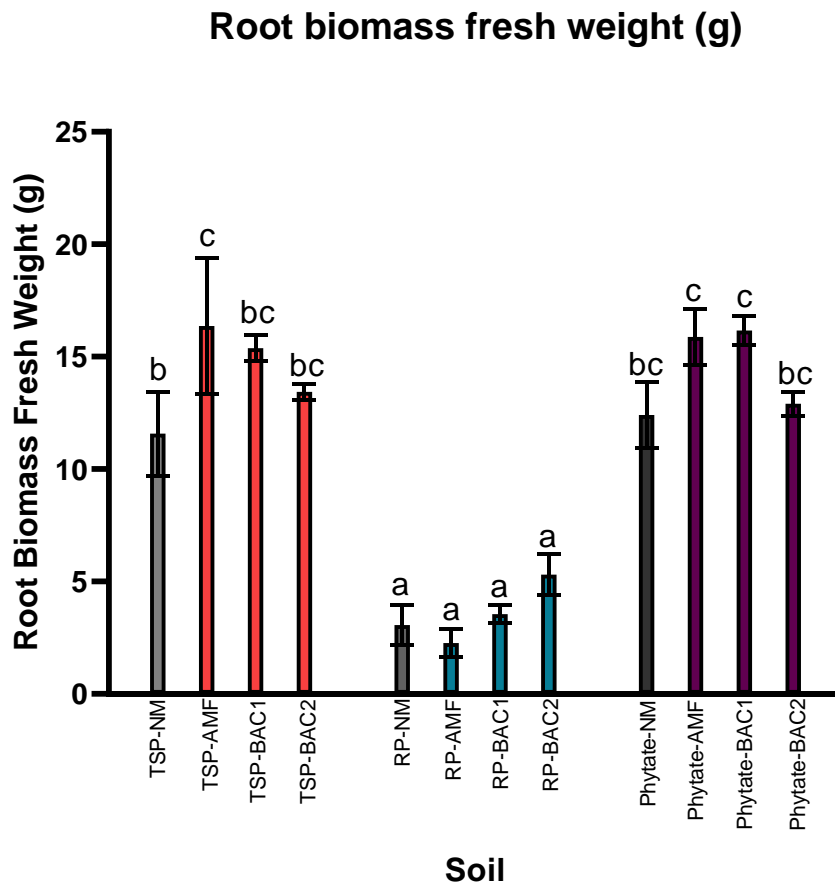
σε όξινο έδαφος και παρατήρησαν σημαντική αύξηση στην υπέργεια βιομάζα του καλαμποκιού.



Διάγραμμα 4: Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

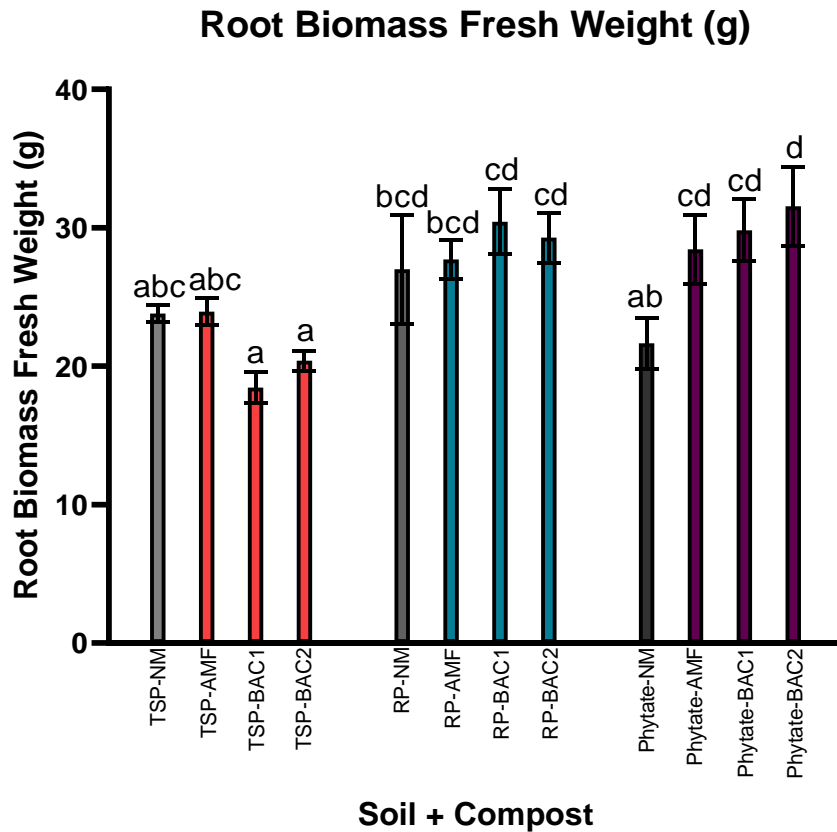
Στο πείραμα με την προσθήκη compost ο μάρτυρας TSP-NM έχει μέση τιμή ξηρού βάρους 2.485 g και παρουσιάζει σημαντικές στατιστικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις TSP-AMF και TSP-BAC2 με μέσες τιμές 3.215 g και 3.492 g αντίστοιχα. Ο μάρτυρας RP-NM διαφέρει σημαντικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις RP. Ο μάρτυρας Phytate-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση Phytate-BAC2. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως τόσο η πηγή φωσφόρου όσο και τα μικροβιακά εμβόλια έχουν σημαντική στατιστική επίδραση στο ξηρό βάρος και παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων.

3.1.2. Νωπό βάρος υπόγειου τμήματος



Διάγραμμα 5: Νωπό βάρος υπόγειου τμήματος. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στο νωπό βάρος υπόγειου τμήματος ο μάρτυρας TSP-NM διαφέρει σημαντικά με την επέμβαση TSP-AMF, ενώ οι υπόλοιποι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις μικροβιακά ενισχυμένες μεταχειρίσεις. Σημαντική στατιστικώς επίδραση παρουσίασε τόσο η πηγή φωσφόρου, όσο και τα μικροβιακά εμβόλια. Η αλληλεπίδραση τους δεν ήταν σημαντική.

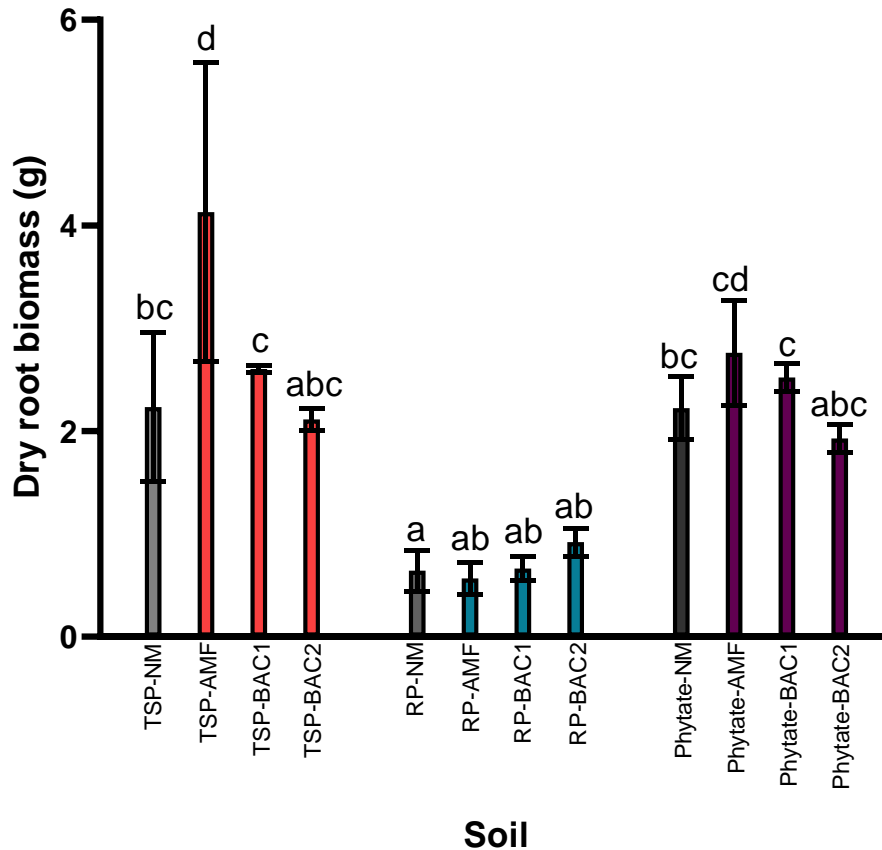


Διάγραμμα 6: Νωπό βάρος υπόγειου τμήματος. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στην περίπτωση του μείγματος έδαφος και compost μόνο ο μάρτυρας Phytate-NM παρουσιάζει σημαντικές στατιστικώς διαφορές με τις υπόλοιπες επεμβάσεις με Phytate. Η πηγή φωσφόρου επηρεάζει σημαντικά αυτή την μέτρηση και η αλληλεπίδραση των παραγόντων δεν είναι σημαντική.

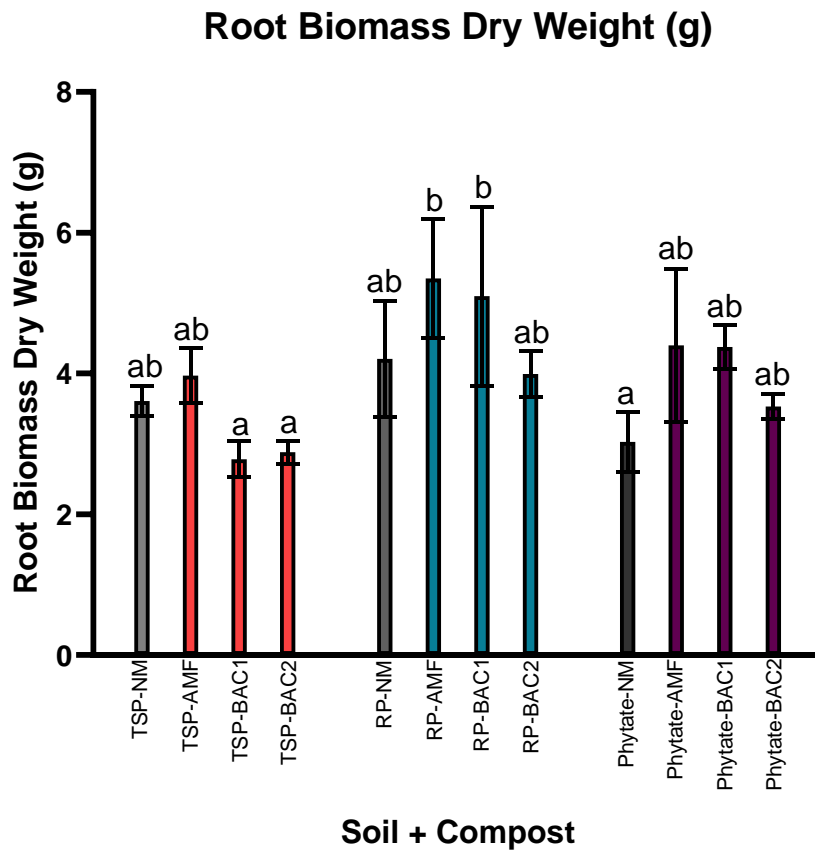
3.1.3. Ξηρό βάρος υπόγειου τμήματος

Root biomass dry weight (g)



Διάγραμμα 7: Ξηρό βάρος υπόγειου τμήματος. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

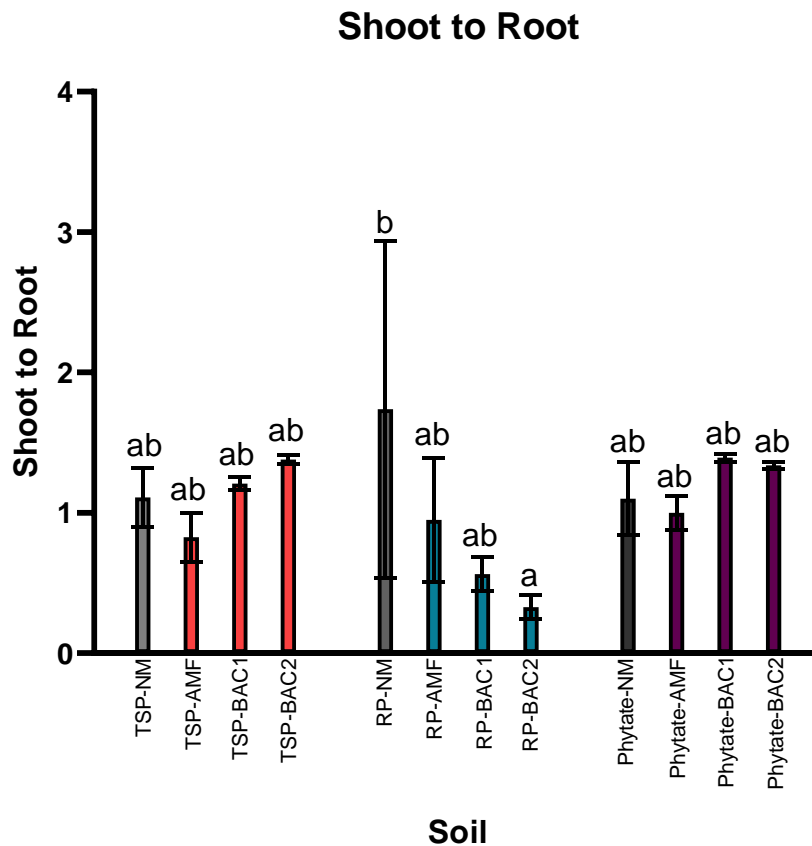
Στο έδαφος ο μάρτυρας TSP-NM με μέση τιμή 2.24 g παρουσιάζει σημαντικές στατιστικώς διαφορές με την μεταχείριση TSP-AMF με μέση τιμή 4.13 g. Μόνο η πηγή φωσφόρου επηρεάζει σημαντικά αυτή την μέτρηση, ενώ η αλληλεπίδραση των παραγόντων δεν παρουσιάζει σημαντική επίδραση.



Διάγραμμα 8: Ξηρό βάρος υπόγειου τμήματος. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

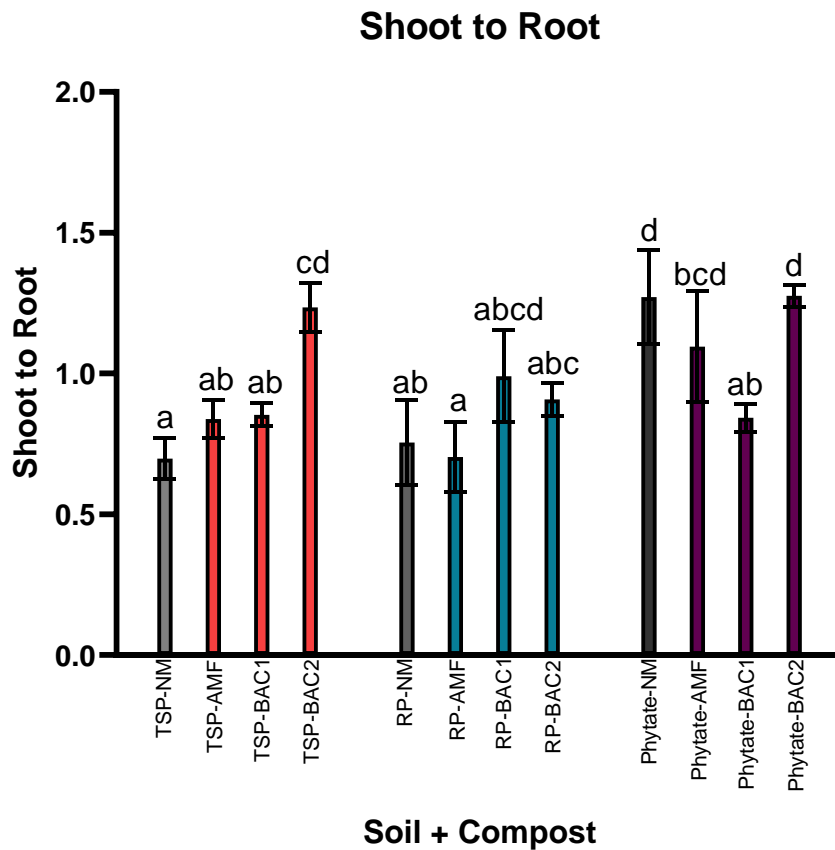
Στο μείγμα έδαφος και compost οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντικές στατιστικές διαφορές με καμία μεταχείριση. Γενικά, στις μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου RP παρατηρούνται υψηλές τιμές σε σχέση με μεταχειρίσεις των άλλων πηγών. Αξίζει να σημειωθεί πως η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική επίδραση στο ξηρό βάρος του υπόγειου τμήματος και δεν υπάρχει στατιστικώς σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ της πηγής φωσφόρου και των μικροβιακών εμβολίων.

3.1.4. Shoot to root



Διάγραμμα 9: Λόγος Shoot to Root. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

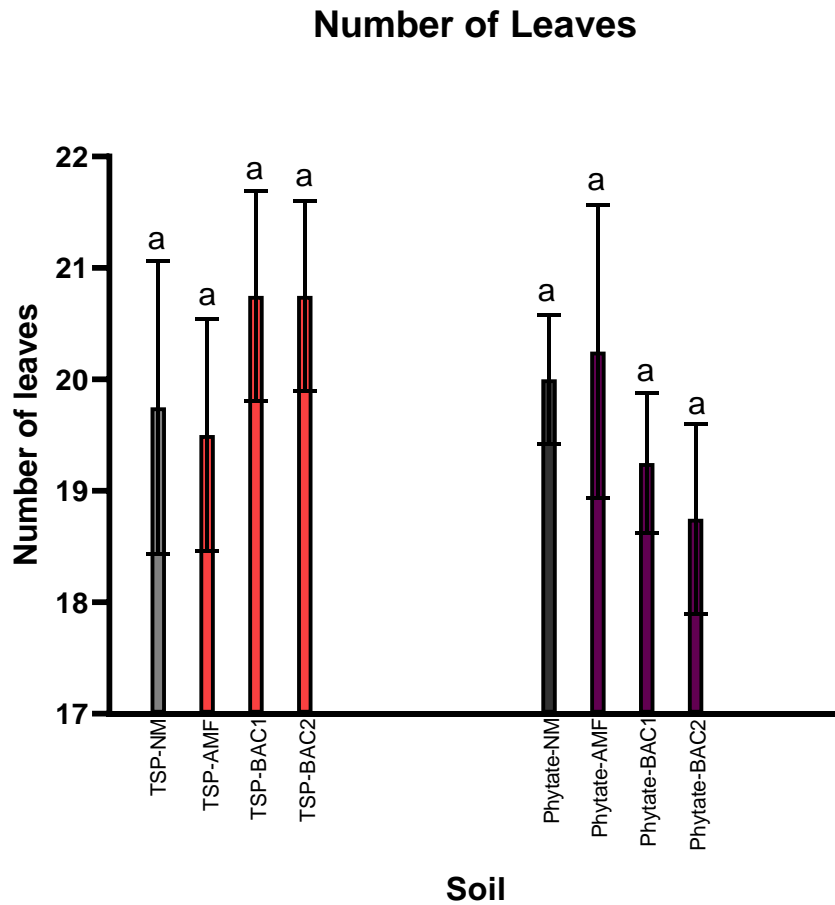
Οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντικές στατιστικώς διαφορές με τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Ούτε η διαφορετική πηγή φωσφόρου φαίνεται να παρουσιάζει σημαντική επίδραση.



Διάγραμμα 10: Λόγος Shoot to Root. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

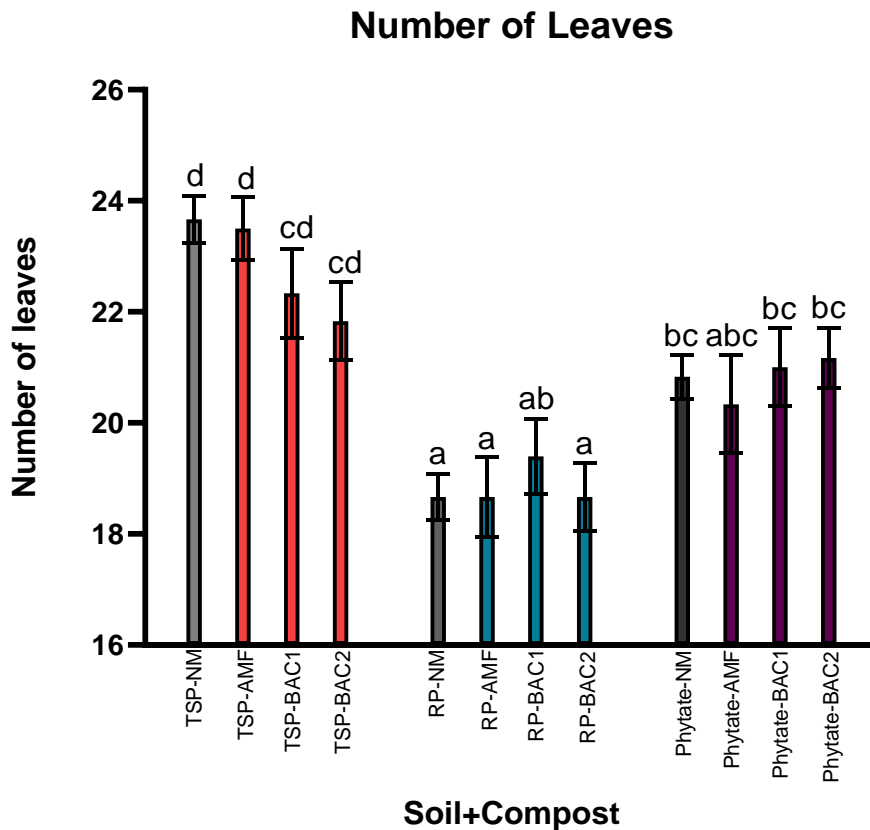
Σε αυτή την περίπτωση ο μάρτυρας TSP-NM με μέση τιμή 0.6977 παρουσιάζει σημαντικές στατιστικές διαφορές με την μεταχείριση TSP-BAC2 η οποία έχει μέση τιμή 1.2352. Επίσης, ο μάρτυρας Phytate-NM με μέση τιμή 1.2352 διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση Phytate-BAC1 με μέση τιμή 0.8428. Πρέπει να αναφερθεί πως τόσο η πηγή φωσφόρου όσο και τα μικροβιακά εμβόλια παρουσίασαν σημαντική στατιστικώς επίδραση στον λόγο shoot to root.

3.1.5. Αριθμός Φύλλων



Διάγραμμα 11: Αριθμός φύλλων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στον αριθμό των φύλλων, οι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Να σημειωθεί πως στις μεταχειρίσεις με RP δεν υπήρχαν φύλλα. Κανένας παράγοντας δεν επηρεάζει σημαντικά αυτή την μέτρηση.



Διάγραμμα 12: Αριθμός φύλλων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Όπως και στην περίπτωση του εδάφους έτσι και στον συνδυασμό εδάφους με compost οι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις αντίστοιχες μικροβιακές μεταχειρίσεις. Μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στις επεμβάσεις με πηγή φωσφόρου TSP. Τέλος, η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση στον αριθμό των φύλλων και δεν παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ της πηγής φωσφόρου και των μικροβιακών εμβολίων.

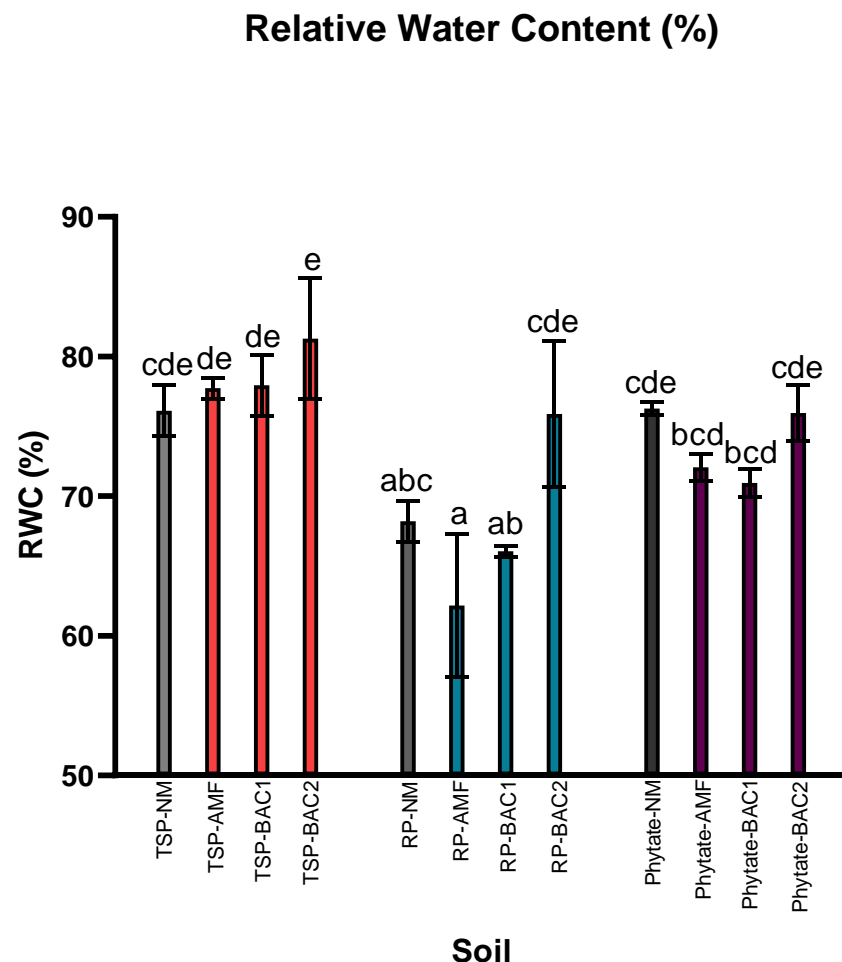
Οι μετρήσεις στην περίπτωση του εδάφους έδειξαν πως η πηγή φωσφόρου RP δεν βοήθησε στην ανάπτυξη των φυτών. Αυτό φάνηκε από τις χαμηλές τιμές της βιομάζας του υπέργειου και υπόγειου τμήματος των φυτών, τον αριθμό των

φύλλων. Αυτό μάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι το pH του εδάφους είναι αλκαλικό. Οι Rajan et al (1996) αναφέρουν πως η αυξανόμενη παροχή πρωτονίων (H^+) ενισχύει τη διαλυτοποίηση των rock phosphate. Σε αντίθεση με αυτό το πείραμα, οι Alloush et Clark (2001) εφάρμοσαν rock phosphate σε όξινο έδαφος για την ανάπτυξη του καλαμποκιού. Τα αποτελέσματα ήταν θετικά, υπήρξε επαρκής ανάπτυξη της καλλιέργειας, το οποίο υποδεικνύει πως πραγματοποιήθηκε διαλυτοποίηση rock phosphate με αποτέλεσμα να αυξηθεί η διαθεσιμότητα του φωσφόρου. Τέλος, ο λόγος shoot to root στις επεμβάσεις με RP είναι χαμηλότερος σε σύγκριση με τις άλλες πηγές φωσφόρου. Έχει παρατηρηθεί από άλλες έρευνες πως ο λόγος μειώνεται όταν η ανάπτυξη καλλιεργειών περιορίζεται από τον φώσφορο. (Fredeen, Rao & Terry, 1989; Rufty, MacKown & Israel, 1990). Σε συνθήκες ανεπάρκειας φωσφόρου, τα φυτά ανταποκρίνονται με αναστολή της φωτοσύνθεσης και αύξηση του λόγου root to shoot. Η αύξηση του λόγου οφείλεται στη μείωση της ανάπτυξης του βλαστού και της αύξησης κατανομής του άνθρακα στις ρίζες. (Hermans et al, 2016). Παρόμοια αποτελέσματα έδειξαν τα φυτά και στην περίπτωση μείγματος έδαφος και compost.

Στην περίπτωση compost και έδαφος παρατηρείται μεγαλύτερη ενίσχυση στην ανάπτυξη των φυτών. Μάλιστα, ακόμα και στην περίπτωση με πηγή φωσφόρου το rock phosphate τα φυτά αναπτύχθηκαν σε σχέση με αυτά του εδάφους. Ανάλογα αποτελέσματα έδειξαν και οι Ditta et al (2018).

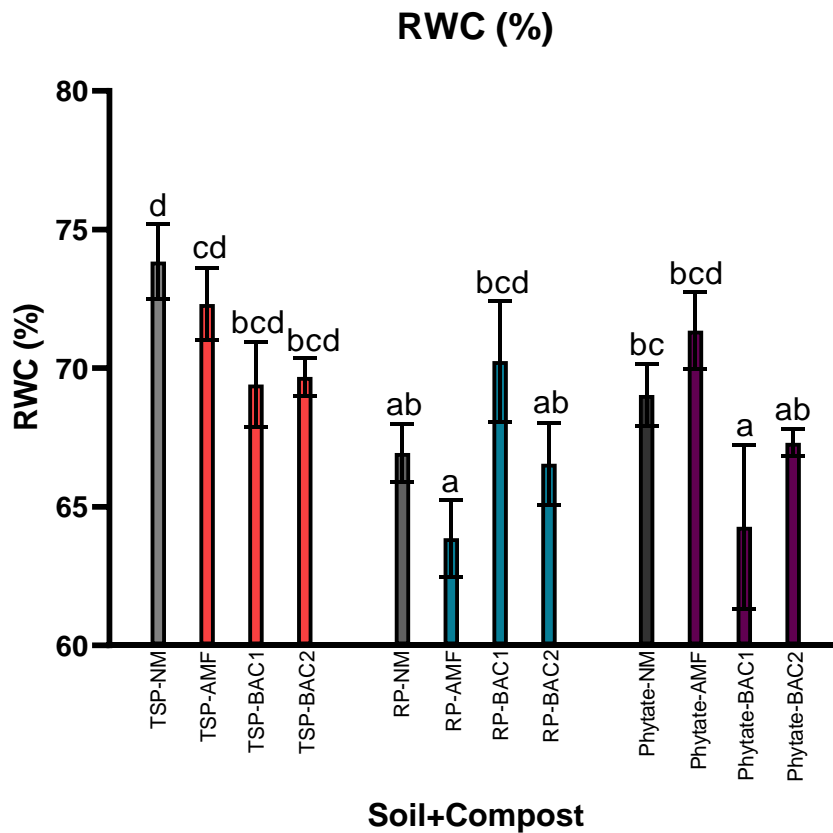
3.2. Αποτελέσματα στη φυσιολογία των φυτών

3.2.1. Relative Water Content % (RWC %)



Διάγραμμα 13: RWC των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στη μέτρηση του σχετικού υδατικού περιεχομένου (relative water content) ο μάρτυρας RP-NM παρουσιάζει σημαντική στατιστικώς διαφορά με την μεταχείριση RP-BAC2. Ο μάρτυρας έχει μέση τιμή 68.21%, ενώ η μεταχείριση RP-BAC2 75.89%. Γενικά η επέμβαση με BAC2 τείνει να αυξάνει το σχετικό υδατικό περιεχόμενο με όλες τις πηγές φωσφόρου. Τόσο η πηγή φωσφόρου όσο και τα μικροβιακά εμβόλια επηρέασαν σημαντικά το σχετικό υδατικό περιεχόμενο ενώ η αλληλεπίδρασή τους δεν ήταν σημαντική.

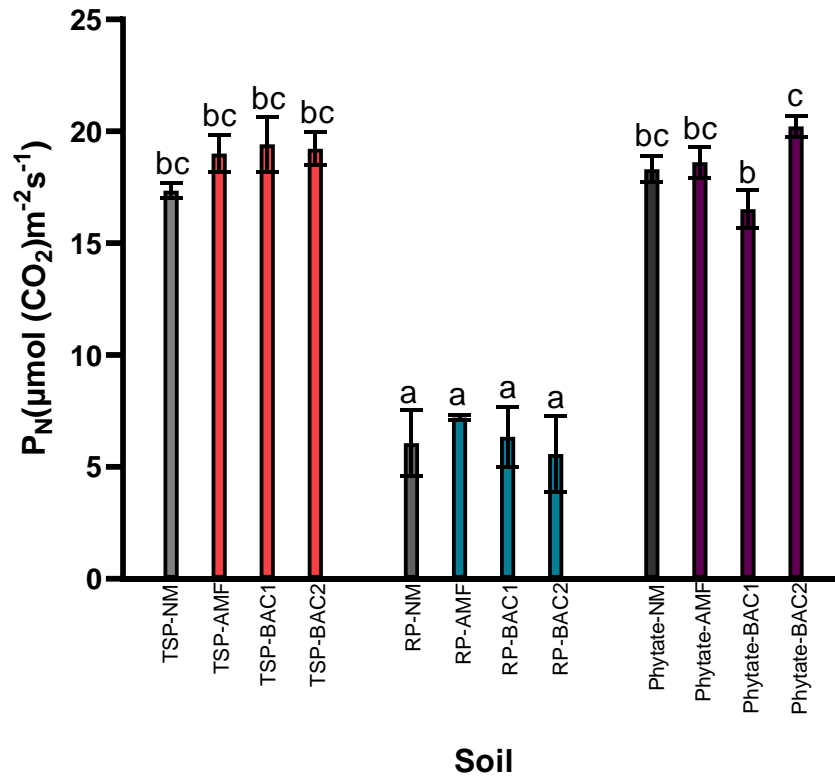


Διάγραμμα 14: RWC των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Σε αυτή την περίπτωση, ο μάρτυρας Phytate-NM με μέση τιμή RWC (%) 69.03% διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση Phytate-BAC1 με μέση τιμή 64.28%. Τέλος, η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση στο σχετικό υδατικό περιεχόμενο και όχι τα μικροβιακά εμβόλια και η αλληλεπίδρασή τους είναι σημαντική.

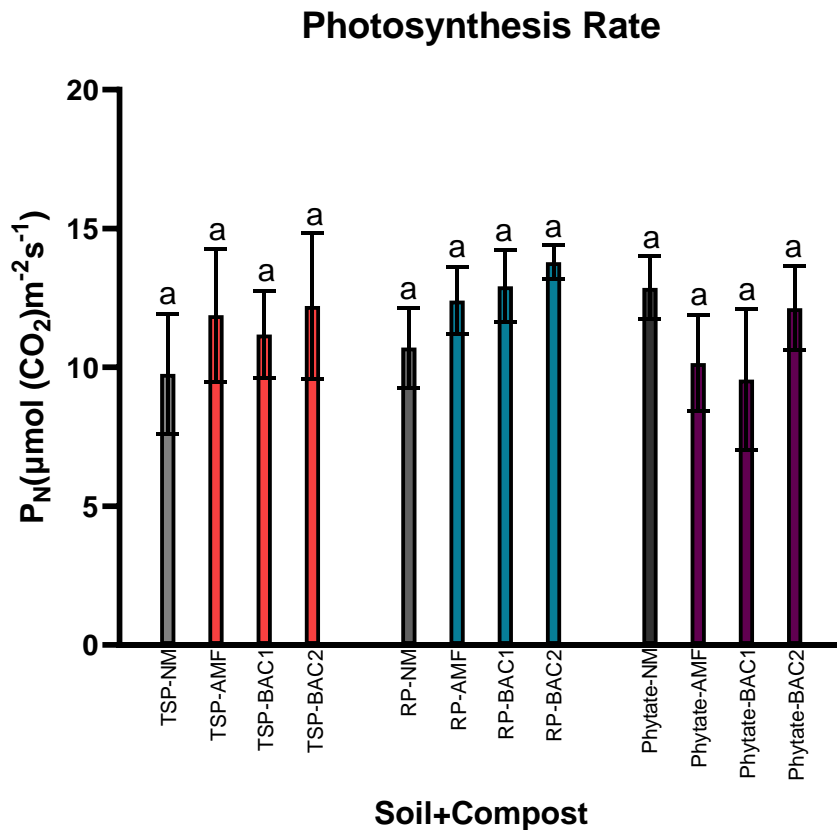
3.2.2. Ρυθμός Φωτοσύνθεσης

Photosynthesis Rate



Διάγραμμα 15: Ρυθμός φωτοσύνθεσης των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

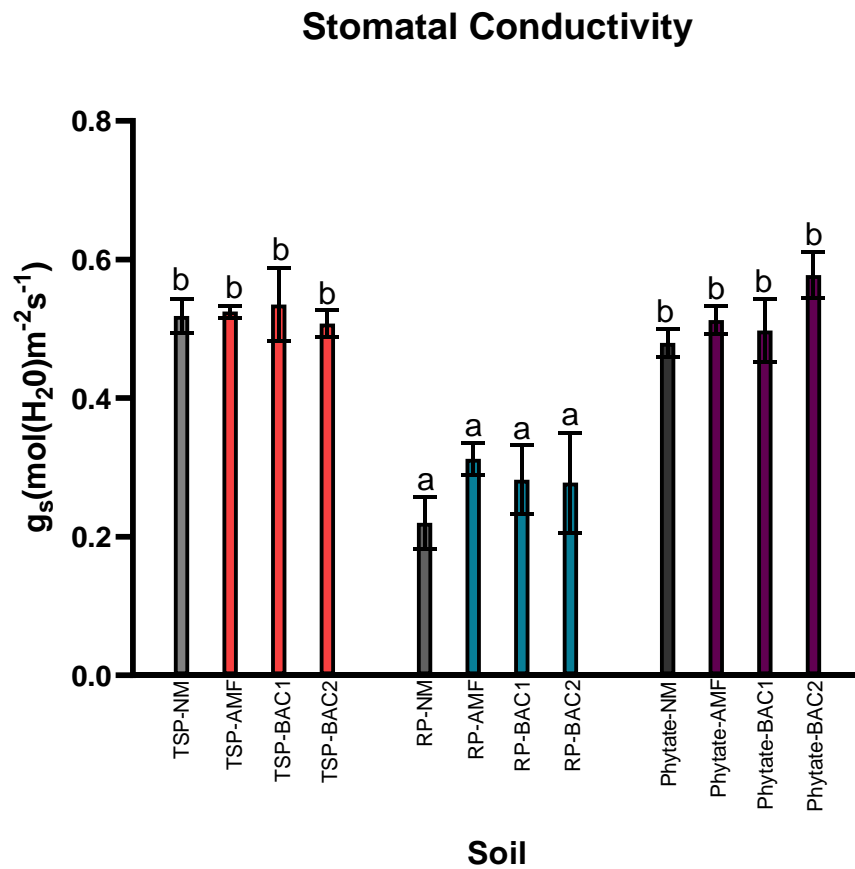
Στο έδαφος οι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις μεταχειρίσεις. Στις επεμβάσεις με RP ο ρυθμός φωτοσύνθεσης είναι μικρότερος από τις υπόλοιπες επεμβάσεις με διαφορετικές πηγές φωσφόρου. Σημαντική στατιστικώς επίδραση είχε μόνο η πηγή φωσφόρου και η αλληλεπίδραση των δύο παραγόντων δεν ήταν σημαντική.



Διάγραμμα 16: Ρυθμός φωτοσύνθεσης των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Η μεταχείριση Phytate-BAC1 παρουσίασε την μικρότερη μέση τιμή με 9.56 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ενώ η μεγαλύτερη μέση τιμή παρατηρήθηκε στην μεταχείριση RP-BAC2 με 13.78 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Όμως, οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντικές στατιστικές διαφορές με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Τέλος, τόσο η πηγή φωσφόρου, όσο τα μικροβιακά εμβόλια δεν παρουσίασαν σημαντική στατιστικώς επίδραση στον ρυθμό της φωτοσύνθεσης καθώς και η αλληλεπίδρασή τους δεν ήταν σημαντική.

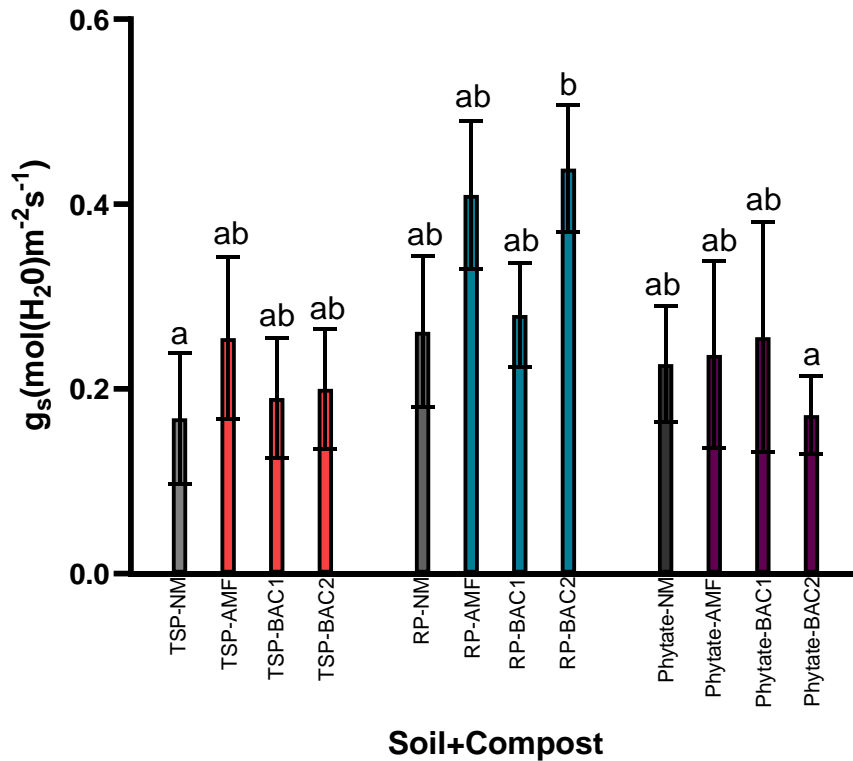
3.2.3. Στοματική Αγωγιμότητα



Διάγραμμα 17: Στοματική αγωγιμότητα των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Όπως και στον ρυθμό φωτοσύνθεσης, έτσι και στην στοματική αγωγιμότητα, οι μεταχειρίσεις δεν διαφέρουν σημαντικά από τους μάρτυρες για κάθε πηγή φωσφόρου, και οι επεμβάσεις με πηγή φωσφόρου RP παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις άλλες επεμβάσεις που έχουν διαφορετικές πηγές. Τέλος, μόνο η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην στοματική αγωγιμότητα.

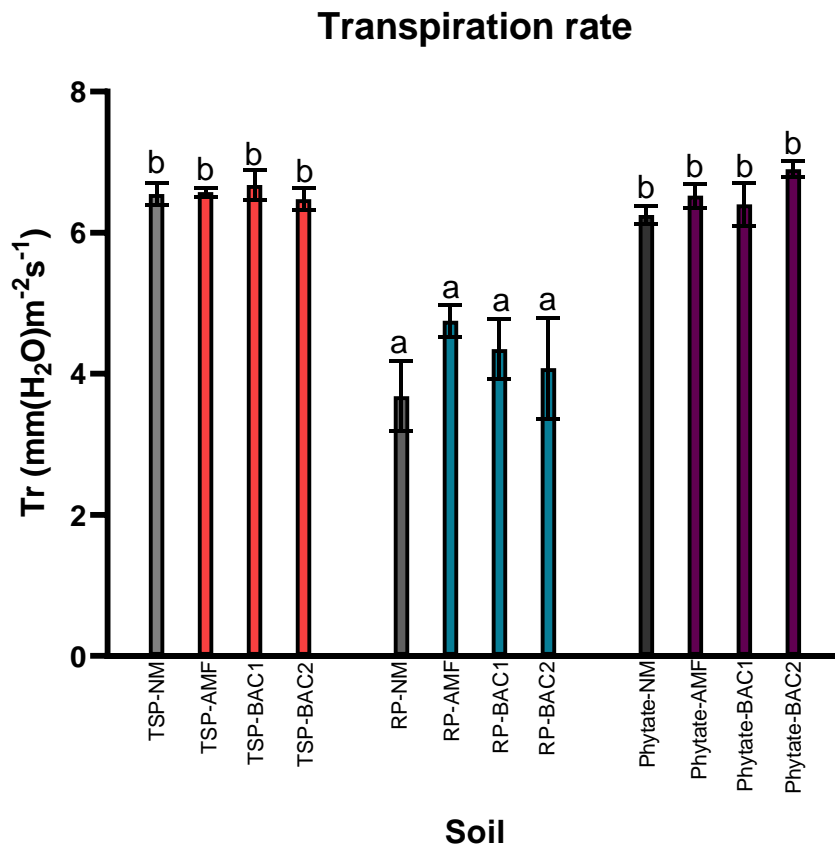
Stomatal Conductivity



Διάγραμμα 18: Στοματική αγωγιμότητα των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

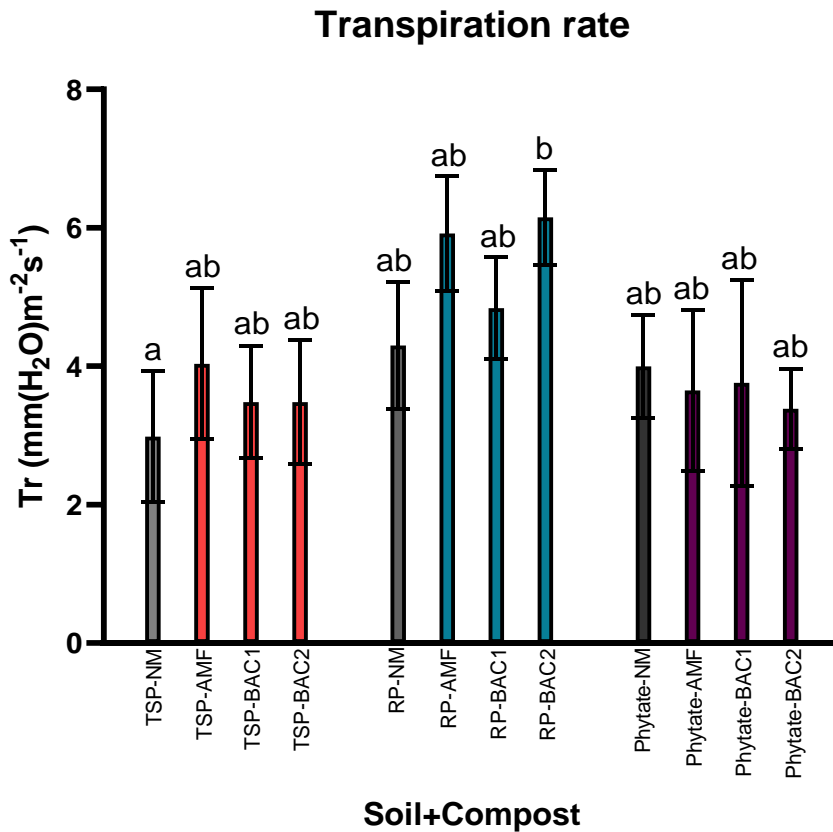
Οι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις μεταχειρίσεις. Η μεταχείριση RP-BAC2 παρουσιάζει την μεγαλύτερη μέση τιμή, $0.438 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

3.2.4. Ρυθμός Διαπνοής



Διάγραμμα 19: Ρυθμός διαπνοής των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

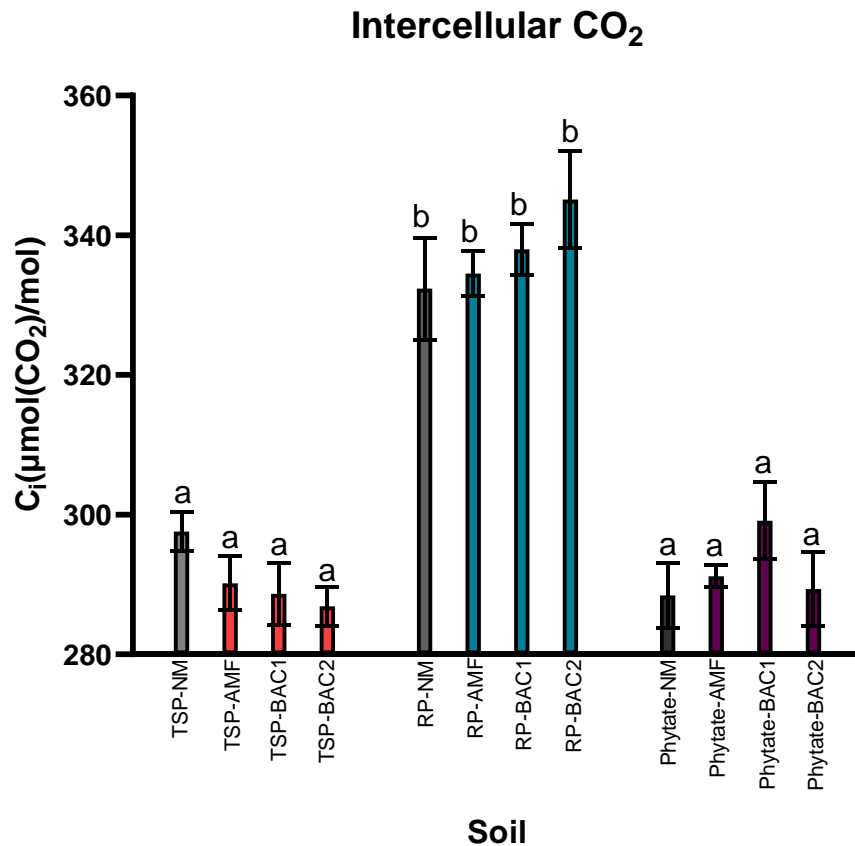
Δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των μαρτύρων και των αντίστοιχων μεταχειρίσεων. Οι τιμές του ρυθμού διαπνοής με πηγή φωσφόρου RP διαφέρουν από αυτές των άλλων πηγών και είναι μικρότερες. Μόνο η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά σε αυτή την μέτρηση.



Διάγραμμα 20: Ρυθμός διαπνοής των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

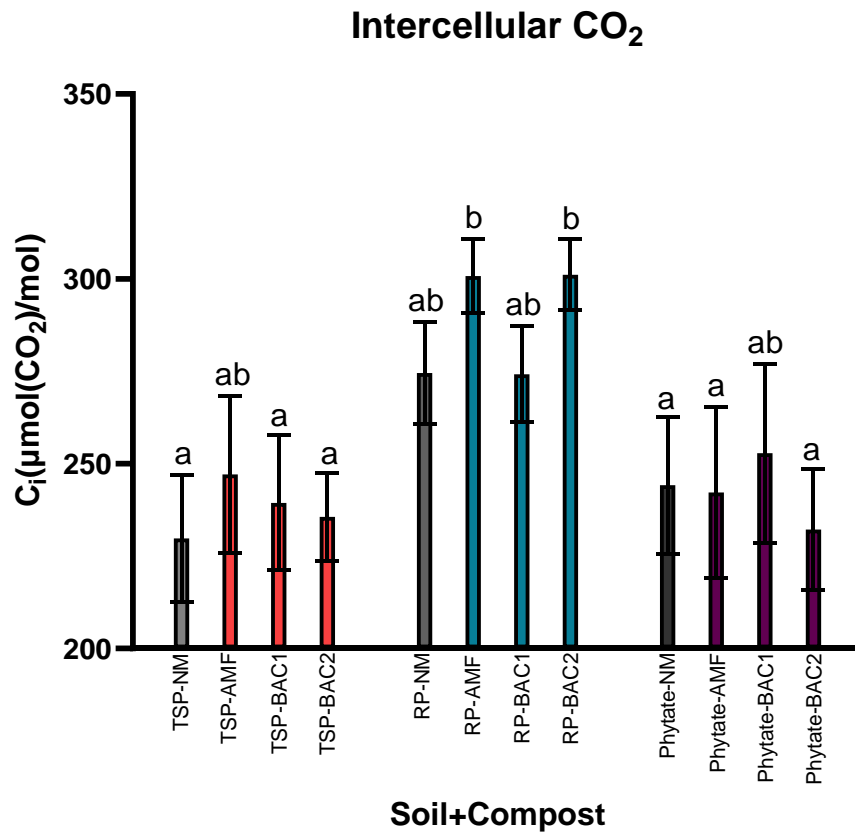
Στην περίπτωση έδαφος και compost πάλι οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντικές στατιστικές διαφορές με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Σε αντίθεση με το έδαφος οι τιμές των επεμβάσεων με RP δεν διαφέρουν σε σχέση με τις τιμές των υπόλοιπων πηγών.

3.2.5. Μεσοκυττάριο CO₂



Διάγραμμα 21: Μεσοκυττάριο CO₂ των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

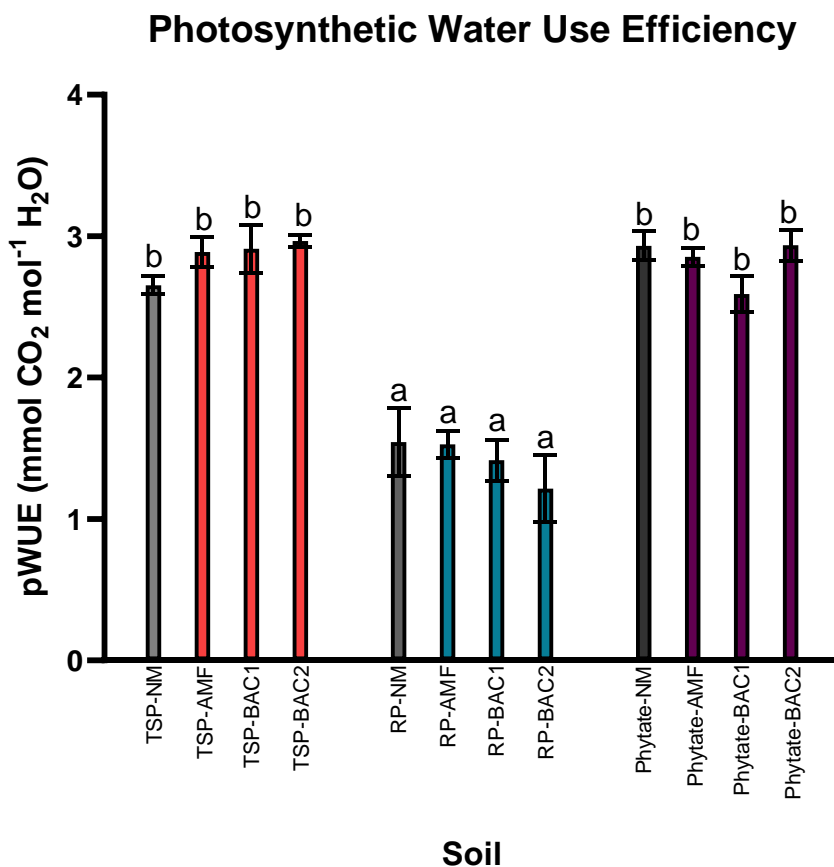
Οι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Στις επεμβάσεις με RP οι τιμές του ενδοκυτταρικού CO₂ είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές των άλλων πηγών (TSP και Phytate). Τέλος μόνο η πηγή φωσφόρου έχει στατιστικώς σημαντική επίδραση.



Διάγραμμα 22: Μεσοκυττάριο CO₂ των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Οι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις μεταχειρίσεις. Μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στις επεμβάσεις με RP, όπως και στην περίπτωση τους εδάφους. Μόνο η πηγή φωσφόρου παρουσιάζει σημαντική στατιστική επίδραση σε αυτή την μέτρηση.

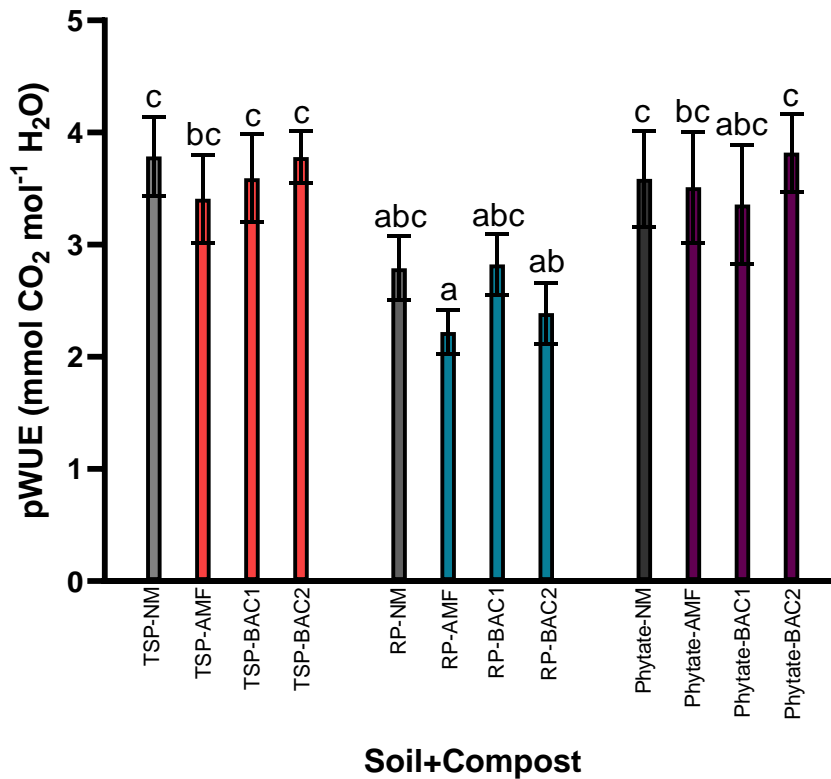
3.2.6. Photosynthetic Water Use Efficiency (PWUE)



Διάγραμμα 23: pWUE των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στην φωτοσυνθετική αποδοτικότητα χρήσης νερού οι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Χαμηλές τιμές εμφανίζουν οι επεμβάσεις με RP, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά με τις επεμβάσεις των άλλων πηγών φωσφόρου. Οι επεμβάσεις με TSP και οι επεμβάσεις με Phytate δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Τέλος, μόνο η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση στη φωτοσυνθετική αποδοτικότητα χρήσης νερού.

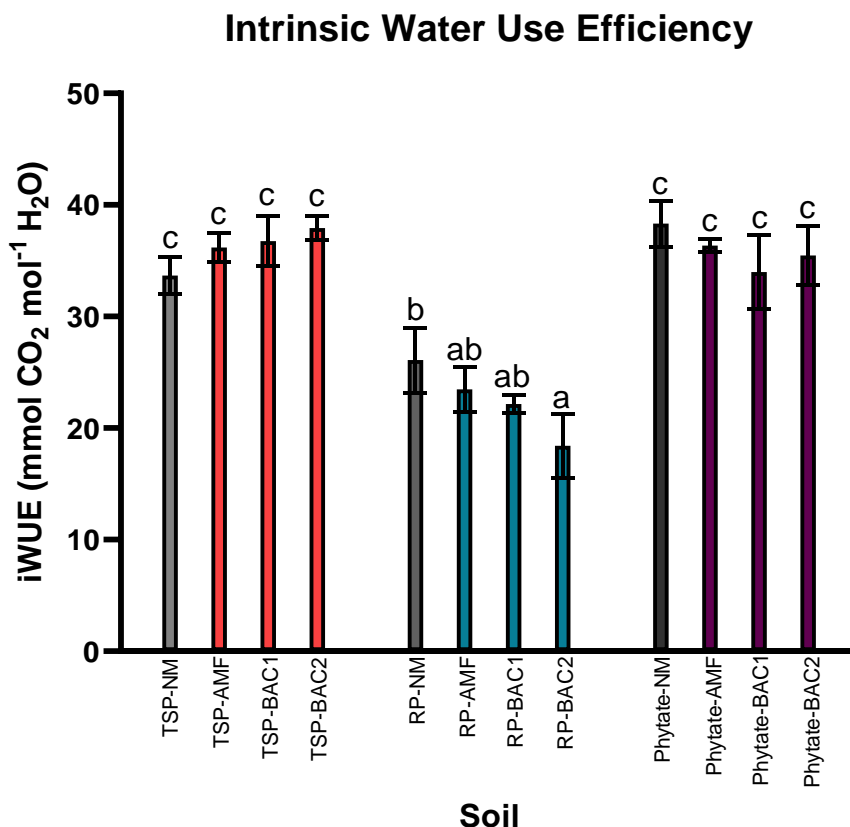
Photosynthetic Water Use Efficiency



Διάγραμμα 24: pWUE των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Ανάλογα αποτελέσματα προέκυψαν και στην περίπτωση του εδάφους με compost. Η πηγή φωσφόρου παρουσιάζει σημαντική στατιστικώς επίδραση σε αυτή την μέτρηση.

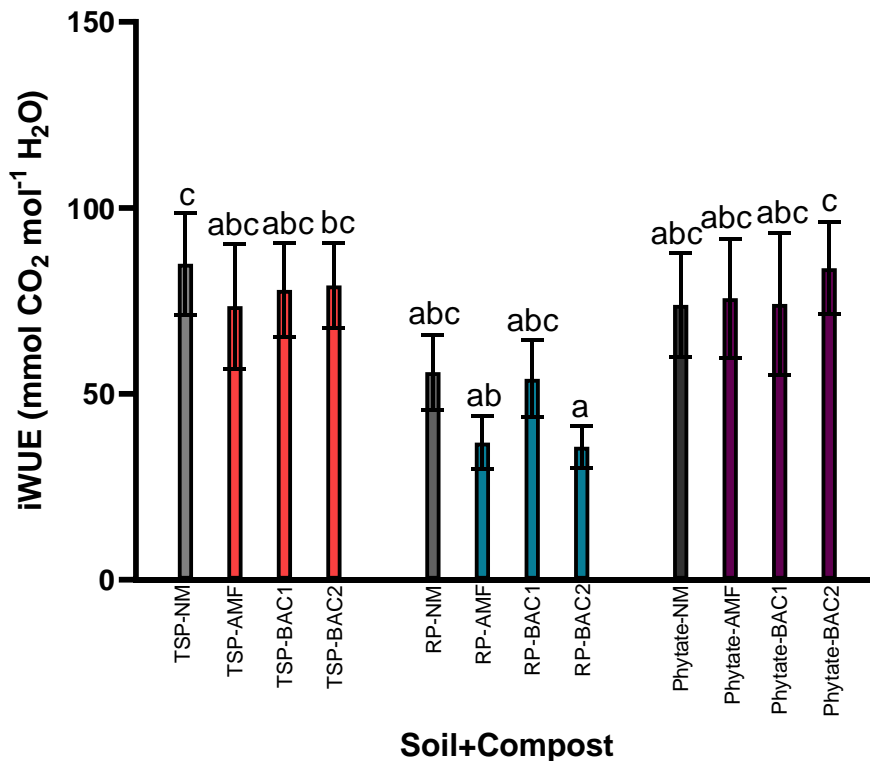
3.2.7. Intrinsic Water Use Efficiency (iWUE)



Διάγραμμα 25: iWUE των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στην intrinsic water use efficiency (εγγενή αποδοτικότητα χρήσης νερού) ο μάρτυρας RP-NM με μέση τιμή 26.1 mmol CO₂ mol⁻¹ H₂O εμφανίζει σημαντική στατιστικώς διαφορά με την μεταχείριση RP-BAC2 με μέση τιμή 18.41 mmol CO₂ mol⁻¹ H₂O. Οι υπόλοιποι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις μεταχειρίσεις. Τέλος, μόνο η πηγή φωσφόρου RP έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση μειώνοντας την iWUE συγκριτικά με τις πηγές TSP & Phytate.

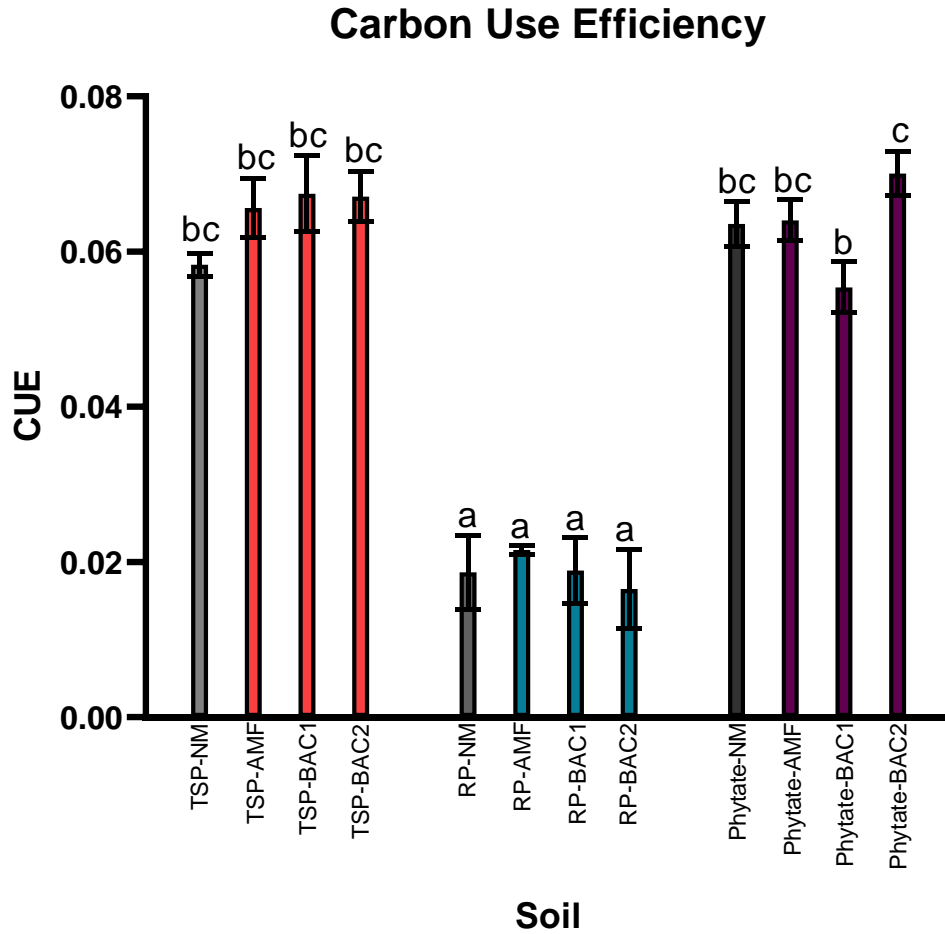
Intrinsic Water Use Efficiency



Διάγραμμα 26: iWUE των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

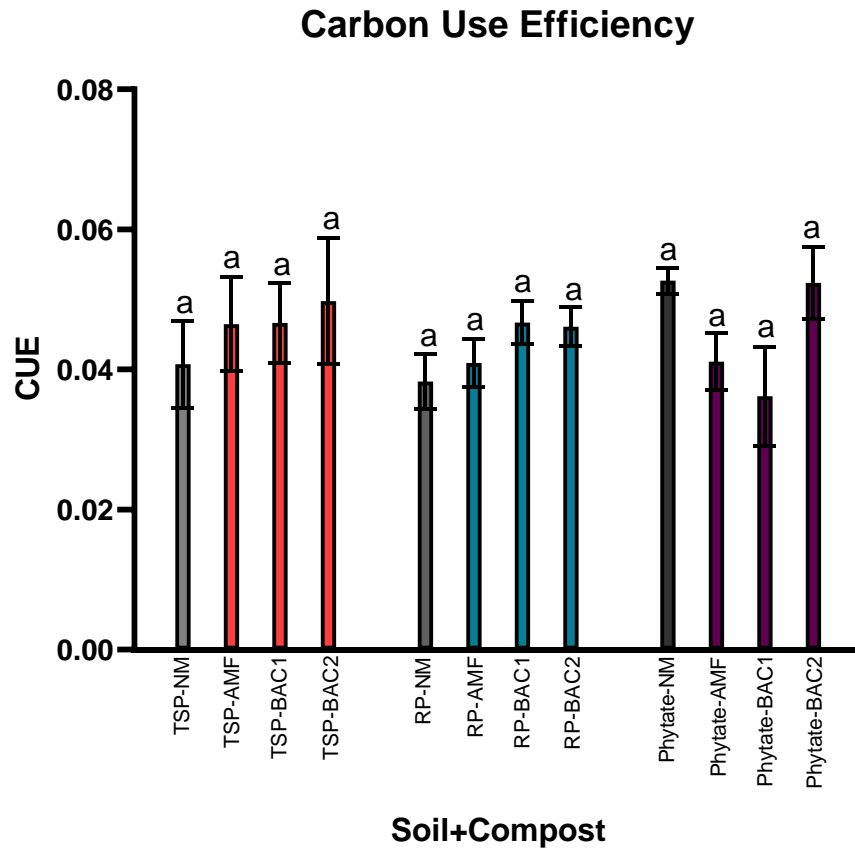
Στην περίπτωση του εδάφους με compost οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντική στατιστικώς διαφορά με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Όπως και στο έδαφος μικρότερες τιμές παρατηρούνται στις επεμβάσεις με RP. Η πηγή φωσφόρου παρουσιάζει σημαντική στατιστικώς επίδραση σε αυτή την μέτρηση.

3.2.8. Carbon Use Efficiency (CUE)



Διάγραμμα 27: CUE των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

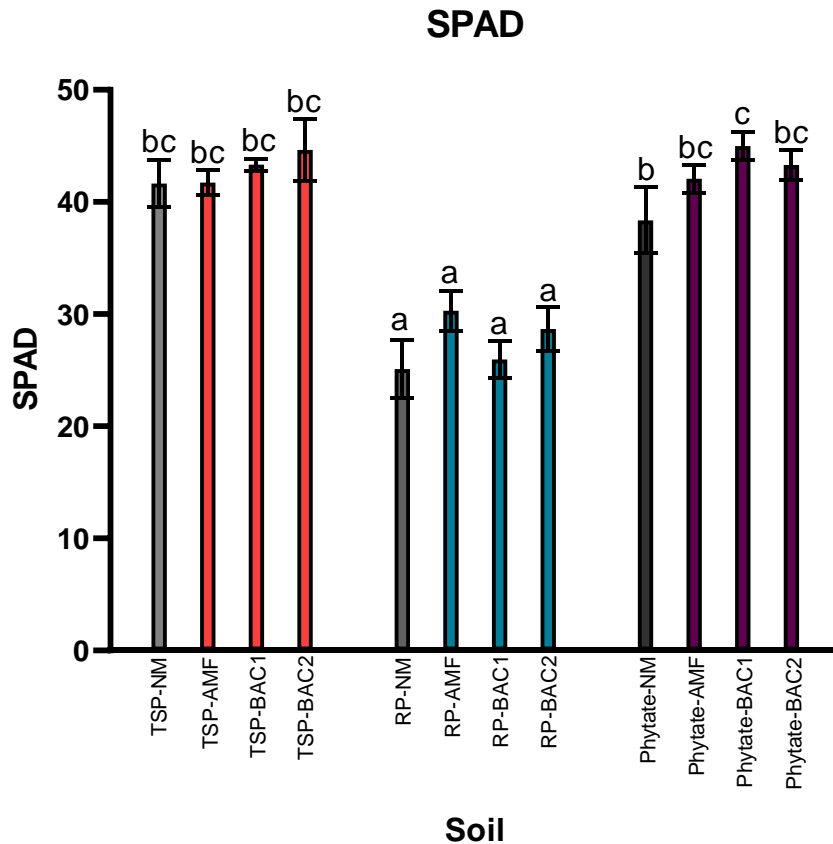
Στην μέτρηση CUE οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντική στατιστικώς διαφορά με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Διαφορά παρατηρείται μόνο μεταξύ των μεταχειρίσεων Phytate-BAC1 και Phytate-BAC2. Μικρές τιμές εμφανίζουν όλες οι επεμβάσεις με RP. Τέλος, μόνο η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση.



Διάγραμμα 28: CUE των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

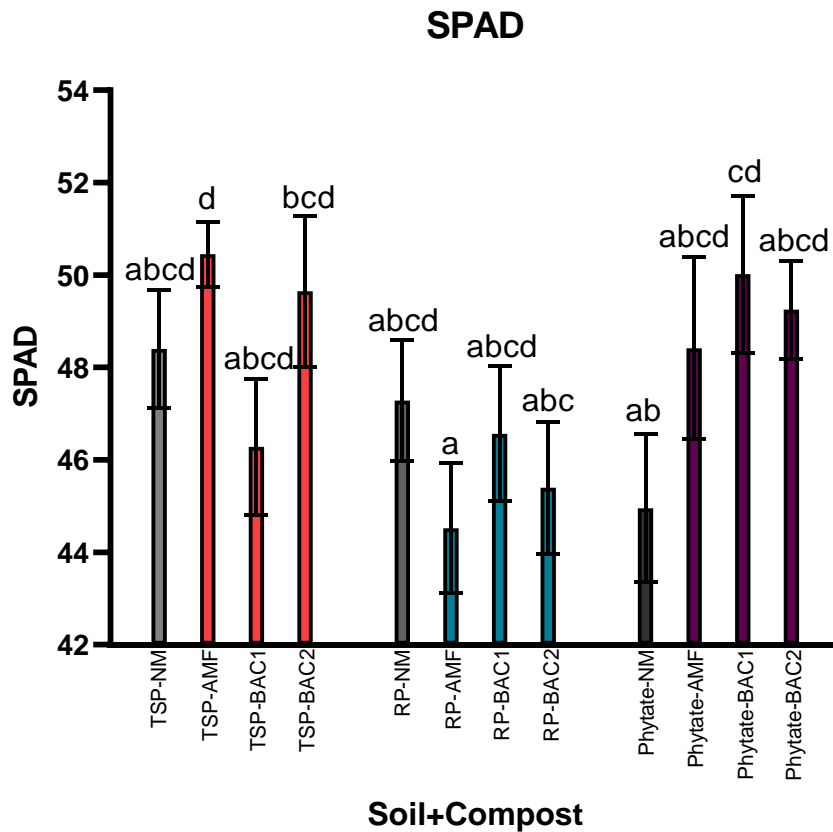
Για αυτή την μέτρηση δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές στατιστικώς διαφορές μεταξύ των μαρτύρων και αντίστοιχων μεταχειρίσεων, καθώς και των πηγών φωσφόρου μεταξύ τους. Τόσο η πηγή φωσφόρου όσο και τα μικροβιακά εμβόλια δεν παρουσίασαν σημαντική στατιστικώς επίδραση για την μέτρηση CUE και η αλληλεπίδραση τους δεν ήταν σημαντική.

3.2.9. SPAD



Διάγραμμα 29: SPAD των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

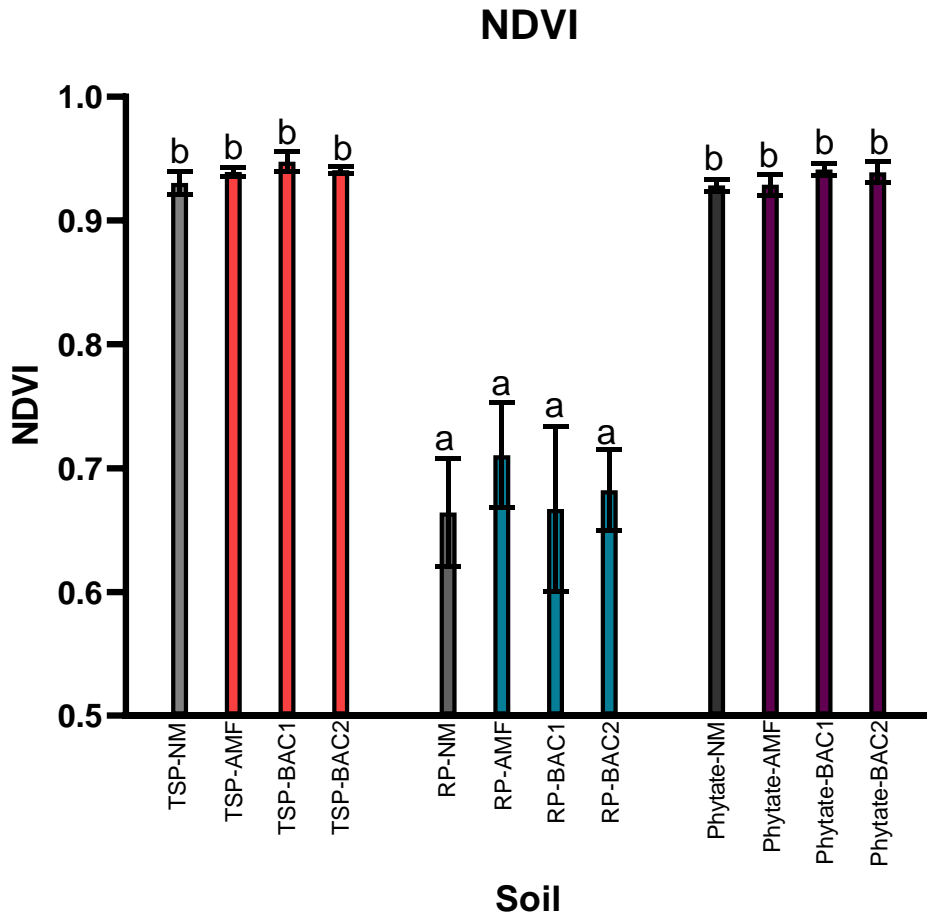
Στην μέτρηση SPAD για την περίπτωση του εδάφους ο μάρτυρας Phytate-NM παρουσιάζει σημαντική στατιστικώς διαφορά με την μεταχείριση Phytate-BAC1. Οι χαμηλότερες τιμές παρουσιάζονται στις μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου RP. Μόνο η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση στην μέτρηση SPAD.



Διάγραμμα 30: SPAD των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

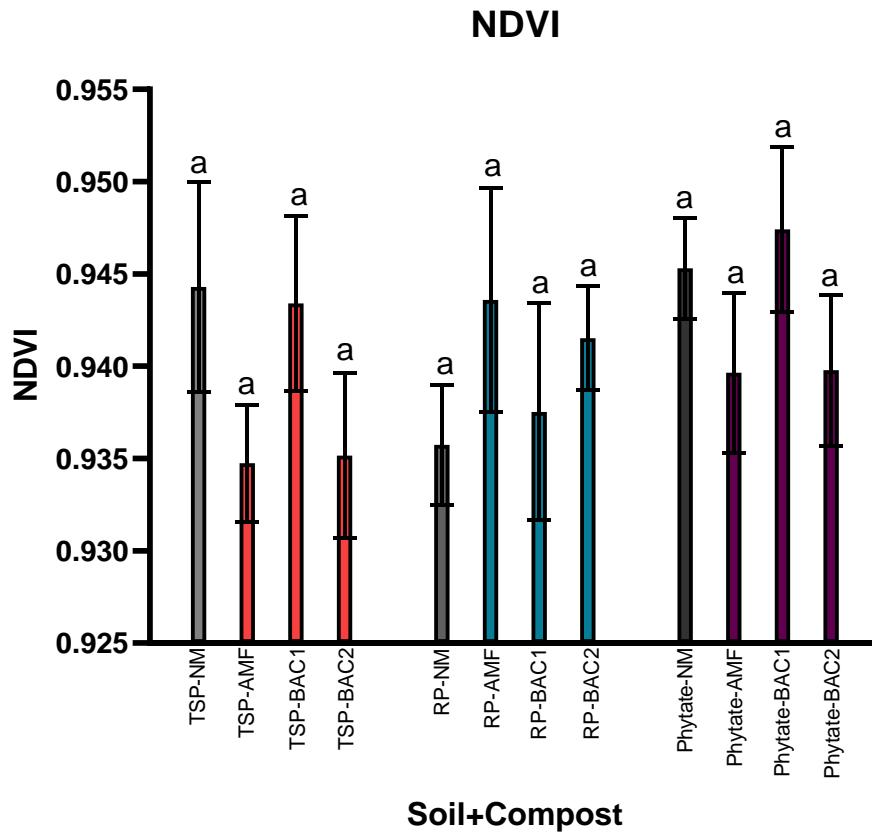
Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και στην περίπτωση του εδάφους με το compost με τον μάρτυρα Phytate-NM να διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση Phytate BAC1. Η πηγή φωσφόρου παρουσίασε μειωμένες τιμές στην μέτρηση SPAD.

3.2.10. NDVI



Διάγραμμα 31: NDVI των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

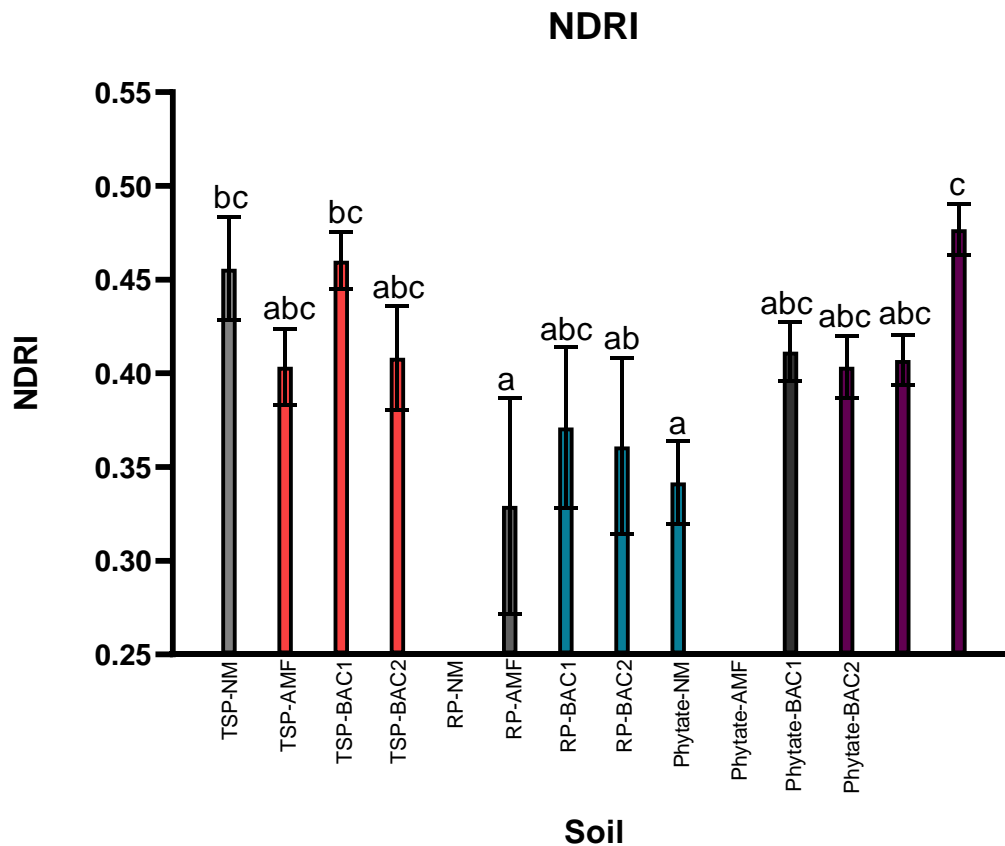
Στο έδαφος οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντικές στατιστικές διαφορές με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Χαμηλές τιμές NDVI παρατηρούνται στις επεμβάσεις με RP, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά με τις επεμβάσεις των υπόλοιπων πηγών φωσφόρου. Μόνο η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστική επίδραση στη μέτρηση αυτή.



Διάγραμμα 32: NDVI των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

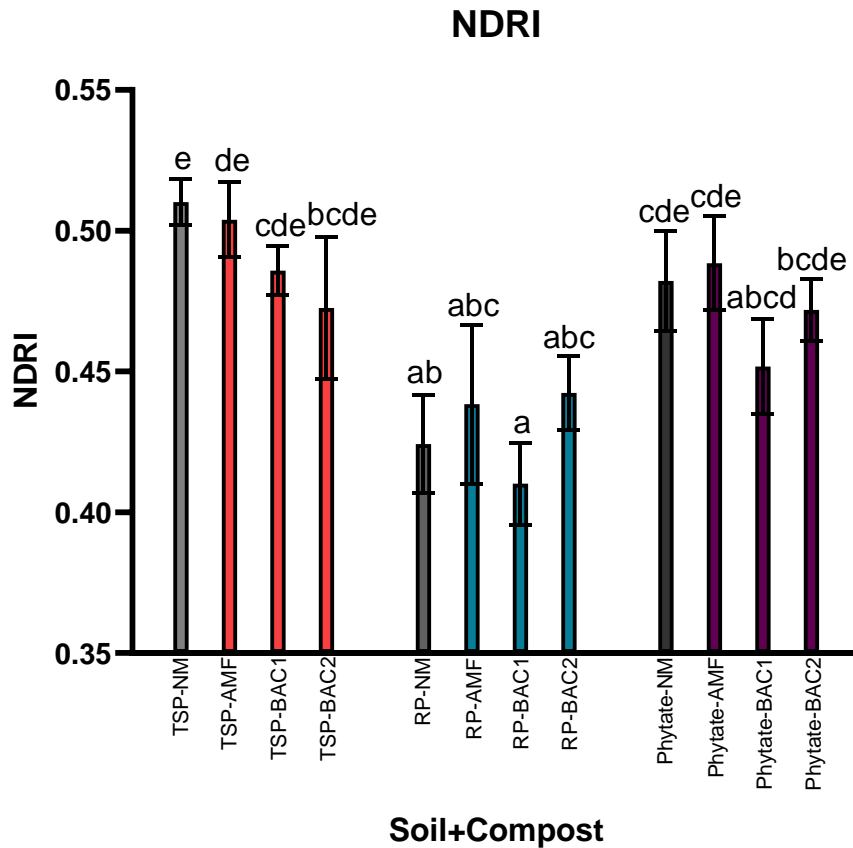
Στην μέτρηση NDVI παρουσία compost δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ των μαρτύρων και των αντίστοιχων μεταχειρίσεων. Τόσο η πηγή φωσφόρου όσο και τα μικροβιακά εμβόλια δεν παρουσίασαν σημαντική στατιστική επίδραση στην μέτρηση αυτή, και η αλληλεπίδρασή τους δεν ήταν σημαντική.

3.2.11. NDRI



Διάγραμμα 33: NDRI των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντικές στατιστικώς διαφορές με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στις επεμβάσεις με RP. Μόνο η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση στη μέτρηση NDRI (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 34: NDRI των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και στην περίπτωση του εδάφους με το compost. Μόνο η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση στη μέτρηση (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).

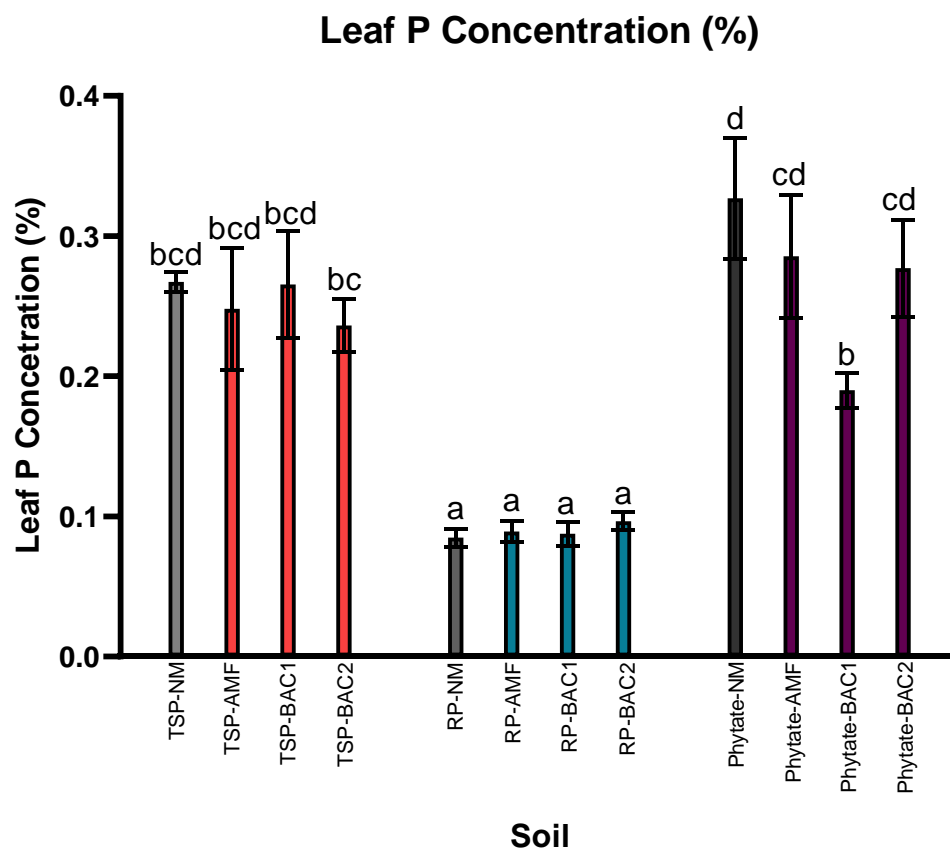
Στο έδαφος οι επεμβάσεις με RP έχουν χαμηλές τιμές RWC, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από τις επεμβάσεις με TSP και Phytate. Η μη διαθεσιμότητα του φωσφόρου περιόρισε την ανάπτυξη των φυτών, το οποίο πιθανόν να προκαλεί μικρές τιμές RWC (%). Επίσης, λόγω του ανεφοδιασμού με φώσφορο από RP τα φυτά έδειξαν χαμηλές τιμές ρυθμού φωτοσύνθεσης, ρυθμού διαπνοής και στοματικής αγωγιμότητας. Αντιθέτως, οι πηγές φωσφόρου TSP και Phytate

τροφοδοτούν το έδαφος με φώσφορο με αποτέλεσμα να έχουν υψηλές τιμές. Οι χαμηλές τιμές του ρυθμού φωτοσύνθεσης στις μεταχειρίσεις με RP μπορεί να οφείλεται στη μείωση του ρυθμού ανάπλασης (regeneration) του Ribulose 1,5 bishophate παρά στην επίδραση στην ενεργοποίηση του Rubisco (Rao and Terry 1989) και επίσης στη μειωμένη εξαγωγή φωσφορικής τριόζης από τους χλωροπλάστες στο κυτταρόπλασμα με αντάλλαγμα Pi μέσω του μεταφορέα Pi (Stitt and Quick, 1989). Οι χαμηλές τιμές της στοματικής αγωγιμότητας μπορεί να οφείλονται στον περιορισμό των στομάτων (stomatal limitation). Όμως, οι τιμές του μεσοκυττάριου CO₂ (Ci) στις επεμβάσεις με RP είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές των επεμβάσεων των άλλων πηγών. Ο μάρτυρας RP-NM διαφέρει με τον μάρτυρες TSP-NM και Phytate-NM. Αυτή διαφορά μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι μεσόφυλλοι παράγοντες είναι πιο ευαίσθητοι από τους στοματικούς παράγοντες και ότι ο στοματικός μηχανισμός δεν είναι στενά συνδεδεμένος με τον μεσόφυλλο μηχανισμό για να διατηρηθεί σταθερό το μεσοκυττάριο CO₂ (Jacob and Lawlor, 1991). Επίσης, οι Jacob and Lawlor (1991) αναφέρουν πως εξαιτίας αυτών των αιτιών η αποδοτικότητα χρήσης νερού θα μειωθεί λόγω ανεπάρκειας φωσφόρου. Όντως στο πείραμα αυτό λόγω της ανεπαρκούς τροφοδοσίας φωσφόρου στα φυτά στις επεμβάσεις με RP και η φωτοσυνθετική αποδοτικότητα χρήσης νερού (pWUE) και η εγγενής αποδοτικότητα χρήσης νερού (iWUE) παρουσιάζουν χαμηλές τιμές. Το ίδιο συμβαίνει με την αποδοτικότητα χρήσης του άνθρακα (CUE). Το περιεχόμενο της χλωροφύλλης στις μεταχειρίσεις με πηγές φωσφόρου TSP, RP και Phytate δεν διαφέρει σημαντικά από τους μάρτυρες τους. Δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων με πηγές φωσφόρου TSP και Phytate, αλλά μεταξύ TSP-RP και Phytate-RP. Αυτό υποδηλώνει ότι παίζει ρόλο η πηγή φωσφόρου για τη ανάπτυξη των φυτών. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει για τις μετρήσεις NDVI και NDRI, οι οποίες είναι μετρήσεις που αφορούν την ευρωστία μιας καλλιέργειας.

Στην περίπτωση του εδάφους με το compost παρατηρείται σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων RP-AMF και RP-BAC1 με τιμές 63.87% και 73.25% αντιστοίχως. Μια πιθανή εξήγηση μπορεί να είναι τα διαφορετικά μικροβιακά εμβόλια. Πιο συγκεκριμένα, το compost αποτελεί μια επιπλέον πηγή φωσφόρου που μπορεί να τροφοδοτήσει τα φυτά με φώσφορο. Όμως οι δενδρόμορφοι μυκορριζικοί μύκητες επιδρούν καλύτερα όταν υπάρχει έλλειψη τροφοδοσίας (Smith, 2008) και ως εκ τούτου οι AMF μπορεί να μην δημιούργησαν μεγάλο αποικισμό. Επομένως, δεν τροφοδοτούσαν επαρκώς τα φυτά με νερό. Επίσης, σημαντική στατιστικώς διαφορά παρουσιάζει η μεταχείριση Phytate-BAC1 (64.27%) με τον μάρτυρα Phytate-NM (69.03%) και την μεταχείριση Phytate-AMF. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην υψηλή συγκέντρωση νατρίου στα φύλλα που έχει η μεταχείριση Phytate-BAC1. Η υψηλή συγκέντρωση νατρίου μπορεί να είναι αποτέλεσμα αφυδάτωσης εξαιτίας της αυξανόμενης απώλειας νερού από τα κύτταρα. Οι τιμές ρυθμού φωτοσύνθεσης, στοματικής αγωγιμότητας και ρυθμού διαπνοής των μεταχειρίσεων δεν διαφέρουν σημαντικά από τους αντίστοιχους μάρτυρες. Σε σχέση με αυτές του εδάφους οι επεμβάσεις με RP σε έδαφος + compost έδειξαν μεγαλύτερες τιμές με την πιο πιθανή αιτία να είναι τροφοδοσία φωσφόρου από το compost. Επιπλέον, οι τιμές του ρυθμού φωτοσύνθεσης, στοματικής αγωγιμότητας και ρυθμού διαπνοής των επεμβάσεων με πηγή φωσφόρου TSP και Phytate στο έδαφος είναι μεγαλύτερες από αυτές του εδάφους με την προσθήκη compost. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει με πηγή φωσφόρου RP, δηλαδή μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στην περίπτωση του εδάφους με το compost. Ίδιο μοτίβο ακολουθεί και η αποδοτικότητα χρήσης άνθρακα. Για τις υπόλοιπες μετρήσεις η προσθήκη compost έδωσε μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις τιμές του εδάφους. Το πιο πιθανόν είναι το compost τροφοδοτούσε τα φυτά με θρεπτικά στοιχεία.

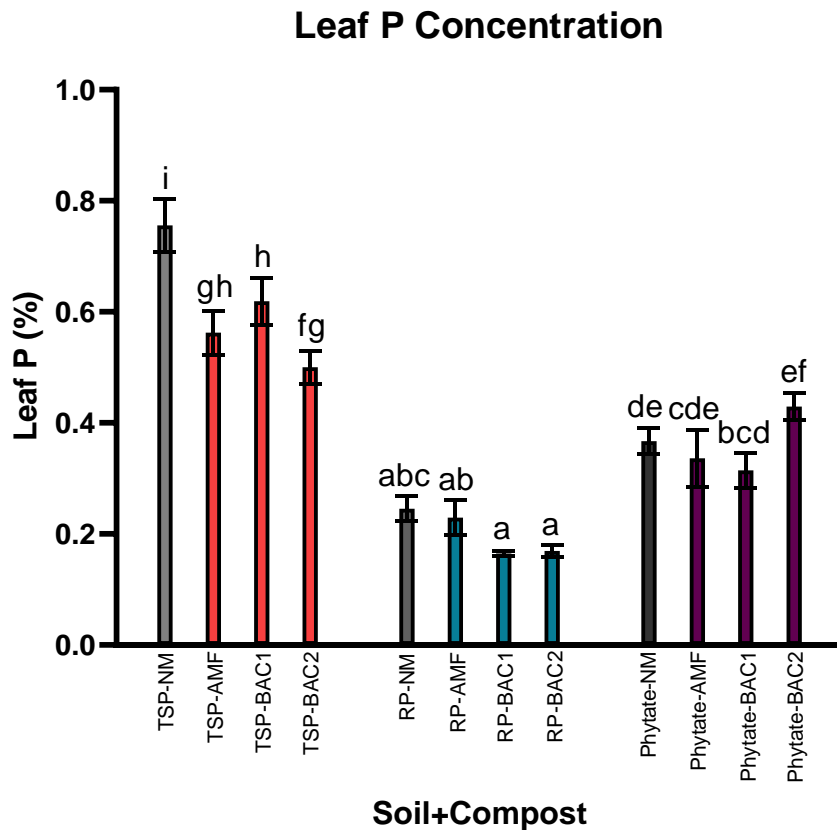
3.3. Αποτελέσματα για την κατάσταση του φωσφόρου

3.3.1. Συγκέντρωση φωσφόρου στα φύλλα



Διάγραμμα 35: Συγκέντρωση P(%) φύλλων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

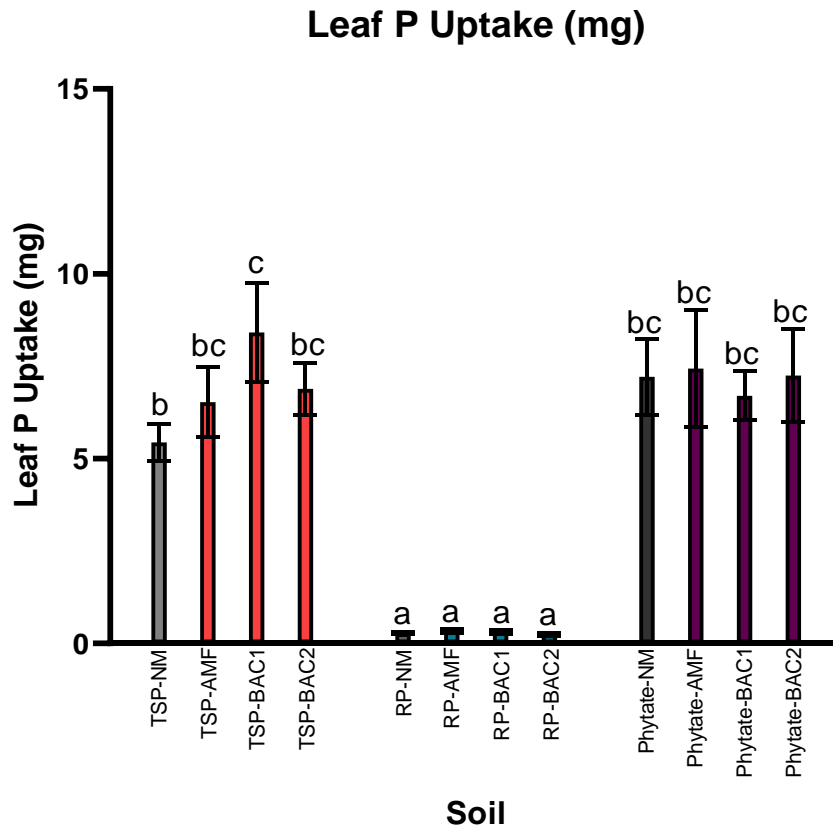
Οι μάρτυρες TSP-NM και RP-NM δεν παρουσιάζουν σημαντικές στατιστικές διαφορές με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Ο μάρτυρας Phytate-NM (0,33%) παρουσιάζει σημαντική στατιστική διαφορά με την μεταχείριση Phytate-BAC1 (0,19%). Τέλος μόνο, η πηγή φωσφόρου επηρεάζει σημαντικά την συγκέντρωση φωσφόρου στα φύλλα (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 36: Συγκέντρωση P(%) φύλλων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

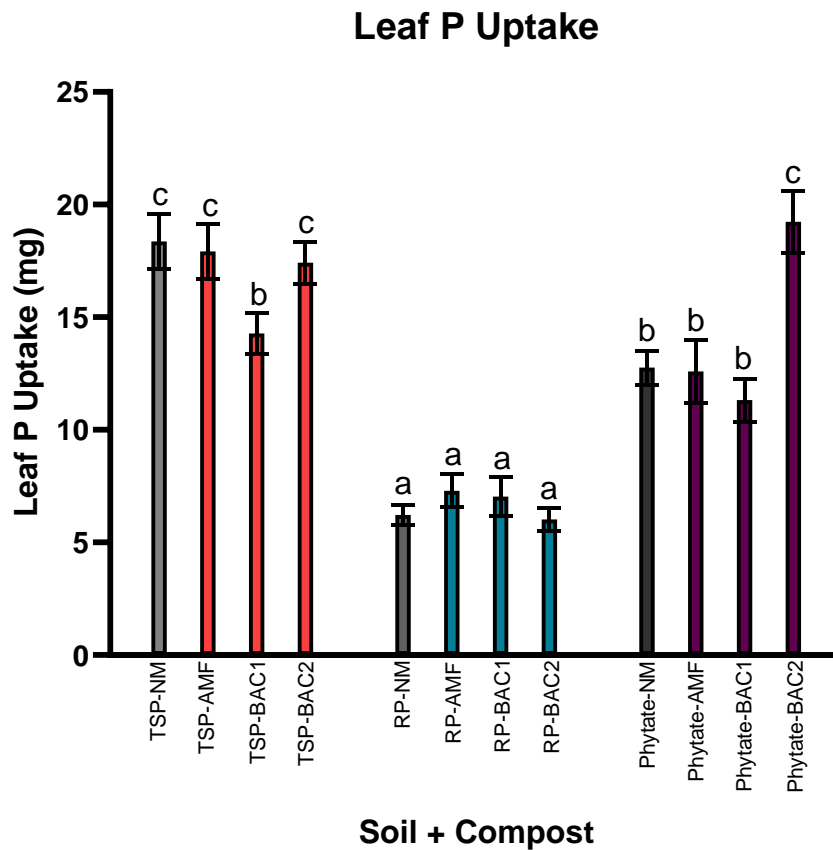
Οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου TSP διαφέρουν σημαντικά από τον μάρτυρα και παρουσιάζουν μικρότερες τιμές από αυτόν. Επίσης οι μεταχειρίσεις TSP-BAC1 και TSP-BAC2 διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου RP δεν διαφέρουν σημαντικά από τον μάρτυρα και δεν υπάρχουν σημαντικές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Τέλος ο μάρτυρας Phytate-NM δεν παρουσιάζει σημαντικές στατιστικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις, αλλά παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ των Phytate-BAC1 και Phytate-BAC2. Τόσο η πηγή φωσφόρου (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) όσο και τα μικροβιακά εμβόλια έχουν σημαντική στατιστική επίδραση στη συγκέντρωση του φωσφόρου στα φύλλα και υπάρχει στατιστικώς σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων.

3.3.1. Πρόσληψη P από τα φύλλα



Διάγραμμα 37: Πρόσληψη P(mg) από τα φύλλα. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

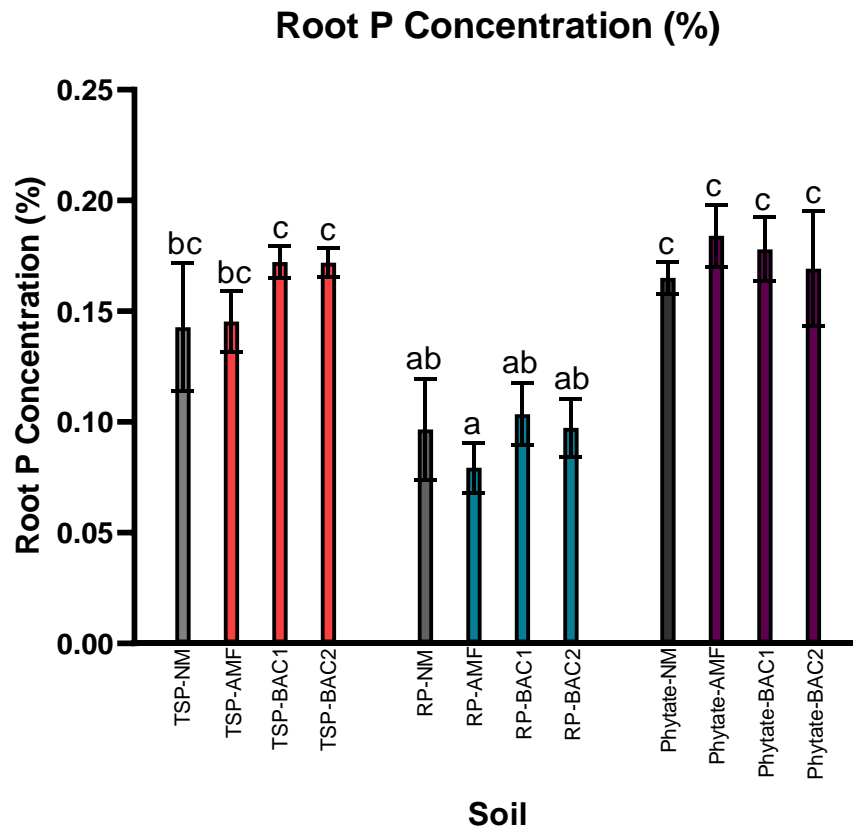
Ο μάρτυρας TSP-NM με μέση τιμή πρόσληψης φωσφόρου με 5.44 mg διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-BAC1 με μέση τιμή 8.42 mg. Δεν παρατηρούνται άλλες σημαντικές διαφορές στην περίπτωση του εδάφους. Τέλος, μόνο η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην πρόσληψη φωσφόρου από τα φύλλα (εξαιρετικά μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 38: Πρόσληψη P(mg) από τα φύλλα. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές

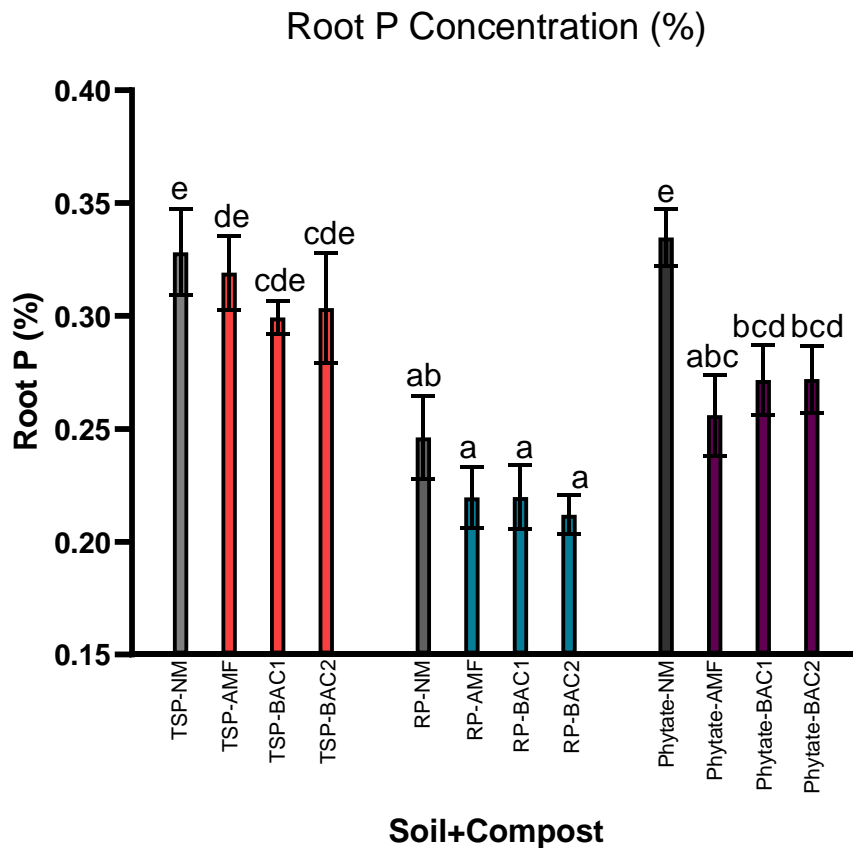
Στην περίπτωση του εδάφους με compost ο μάρτυρας TSP-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-BAC1. Επίσης, ο μάρτυρας Phytate-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση Phytate-BAC2. Οι δύο παράγοντες επιδρούν σημαντικά σε αυτή την μέτρηση και παρουσιάζονται σαφώς μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP..

3.3.2. Συγκέντρωση P στις ρίζες



Διάγραμμα 39: Συγκέντρωση P(%) ριζών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

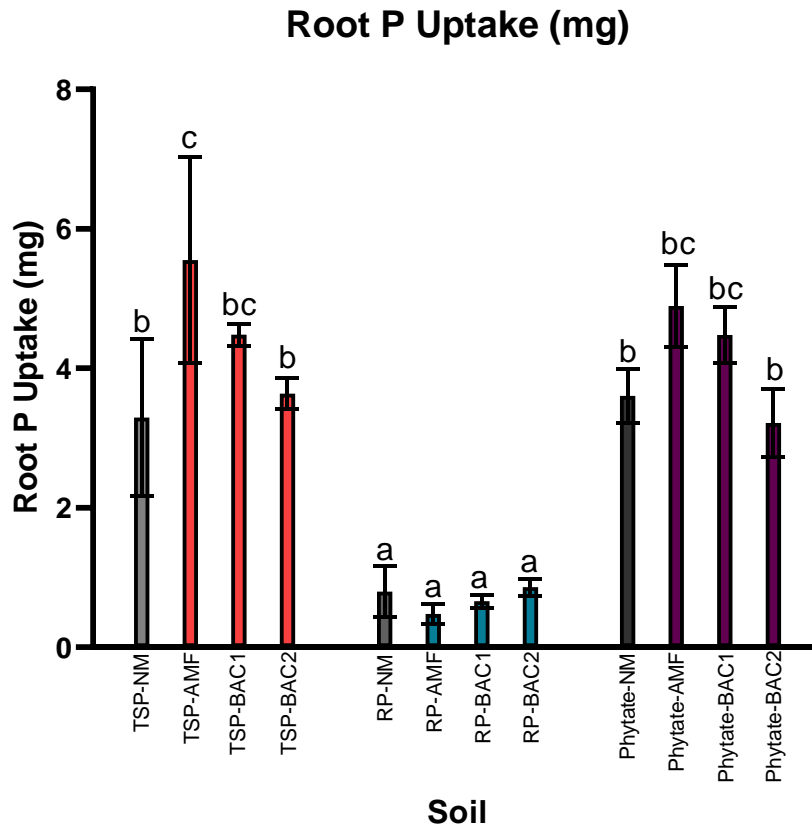
Οι μάρτυρες δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές με τις μεταχειρίσεις. Η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στη συγκέντρωση του φωσφόρου στις ρίζες (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 40: Συγκέντρωση P(%) ριζών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

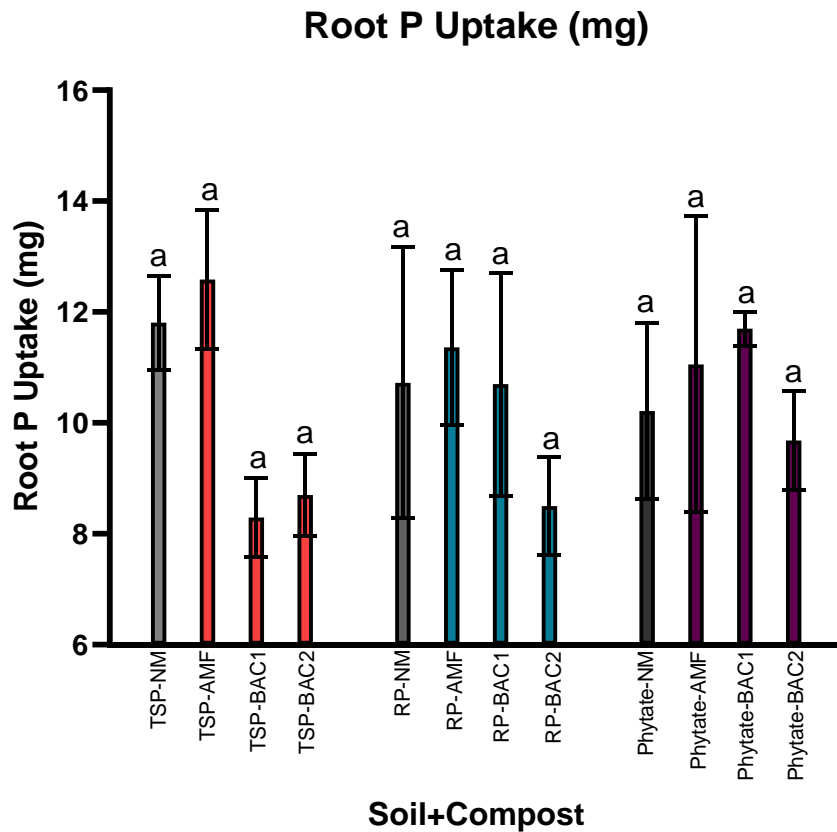
Στην περίπτωση του εδάφους με το compost ο μάρτυρας Phytate-NM διαφέρει σημαντικά με τις υπόλοιπες αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Η πηγή φωσφόρου (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) και τα μικροβιακά εμβόλια έχουν στατιστικώς σημαντική επίδραση στη συγκέντρωση φωσφόρου των ριζών αλλά η αλληλεπίδρασή τους δεν ήταν σημαντική.

3.3.3. Πρόσληψη P από τις ρίζες



Διάγραμμα 41: Πρόσληψη P(mg) από τις ρίζες. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

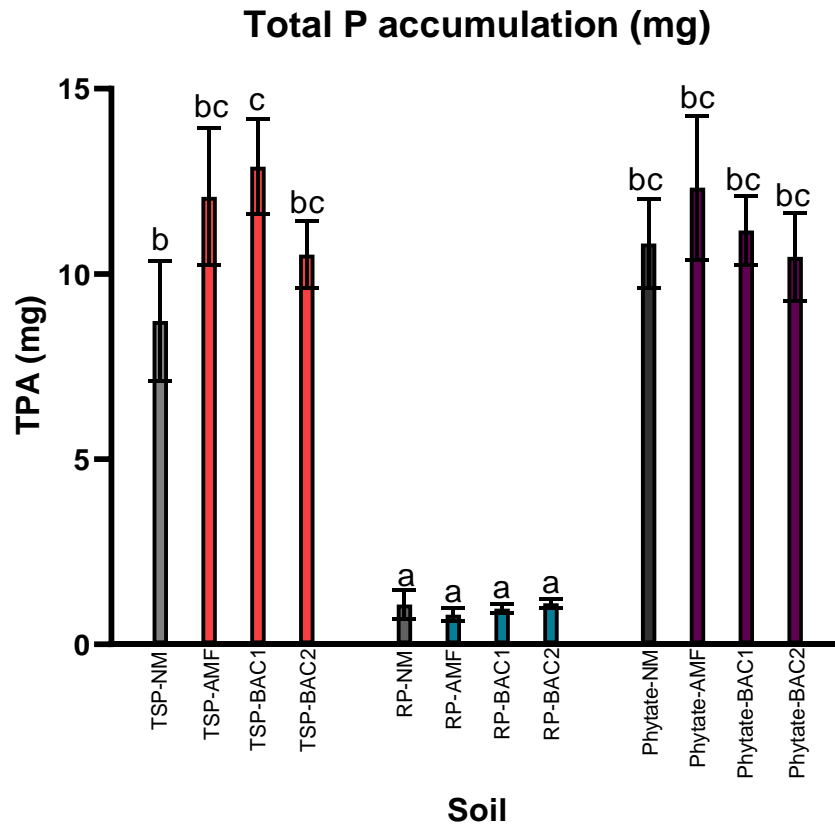
Στην περίπτωση του εδάφους μόνο ο μάρτυρας TSP-NM με μέση τιμή 3.29 mg διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-AMF με μέση τιμή 5.55 mg. Μόνο η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην μέτρηση αυτή (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 42: Πρόσληψη P(mg) από τις ρίζες. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

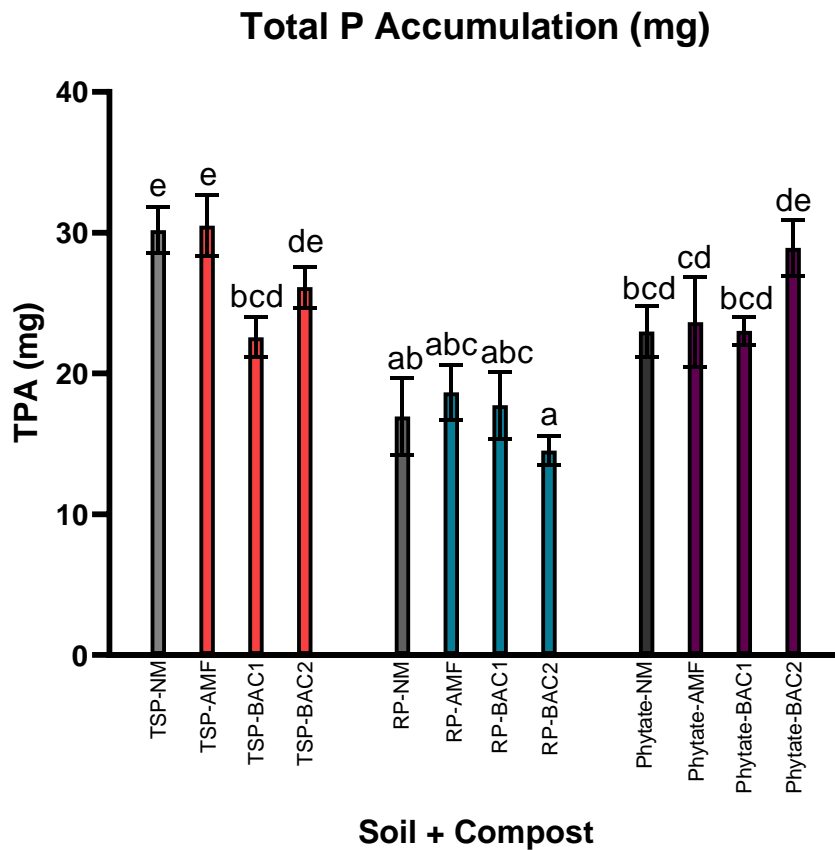
Στο μείγμα εδάφους-compost δεν παρατηρούνται στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μαρτύρων και των μεταχειρίσεων. Κανένας παράγοντας δεν επιδρά στατιστικώς σημαντικά σε αυτή την μέτρηση.

3.3.4. Συνολική Πρόσληψη P



Διάγραμμα 43: Συνολική πρόσληψη P(mg) από τα φυτά. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

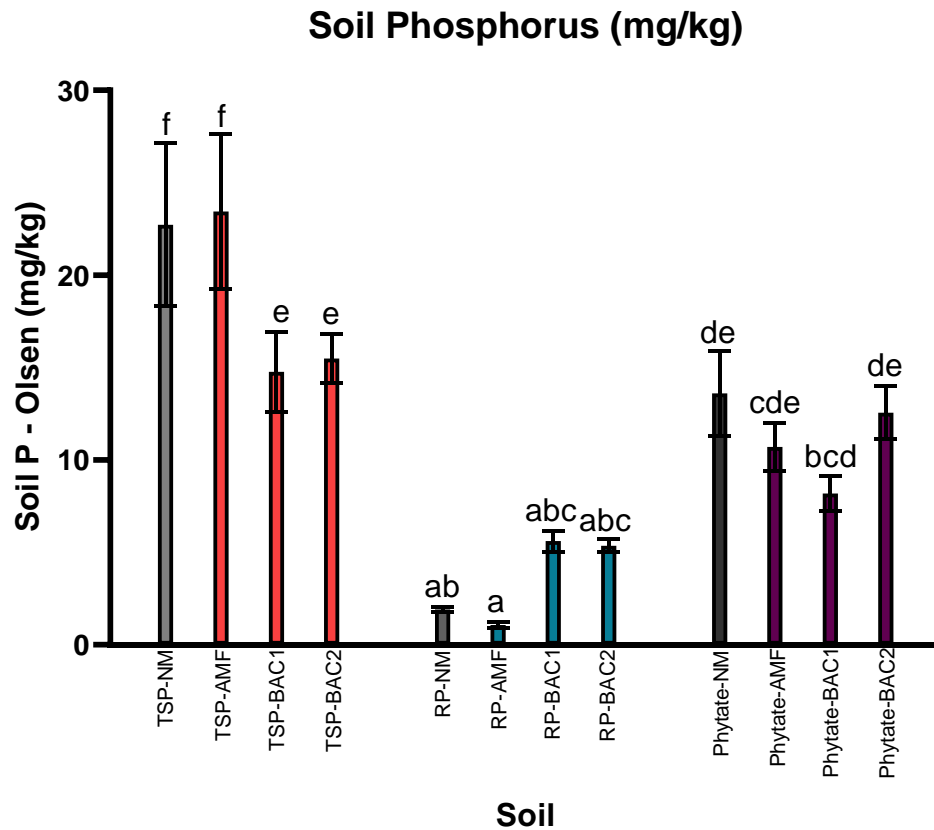
Στη συνολική πρόσληψη φωσφόρου μόνο ο μάρτυρας TSP-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-BAC1. Η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στη μέτρηση αυτή (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 44: Συνολική πρόσληψη P(mg) από τα φυτά. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στο έδαφος με το compost πάλι ο μάρτυρας TSP-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-BAC1. Η πηγή φωσφόρου έχει σημαντική στατιστικώς επίδραση (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP). Σημαντική είναι και η αλληλεπίδραση της πηγής φωσφόρου και των μικροβιακών εμβολίων.

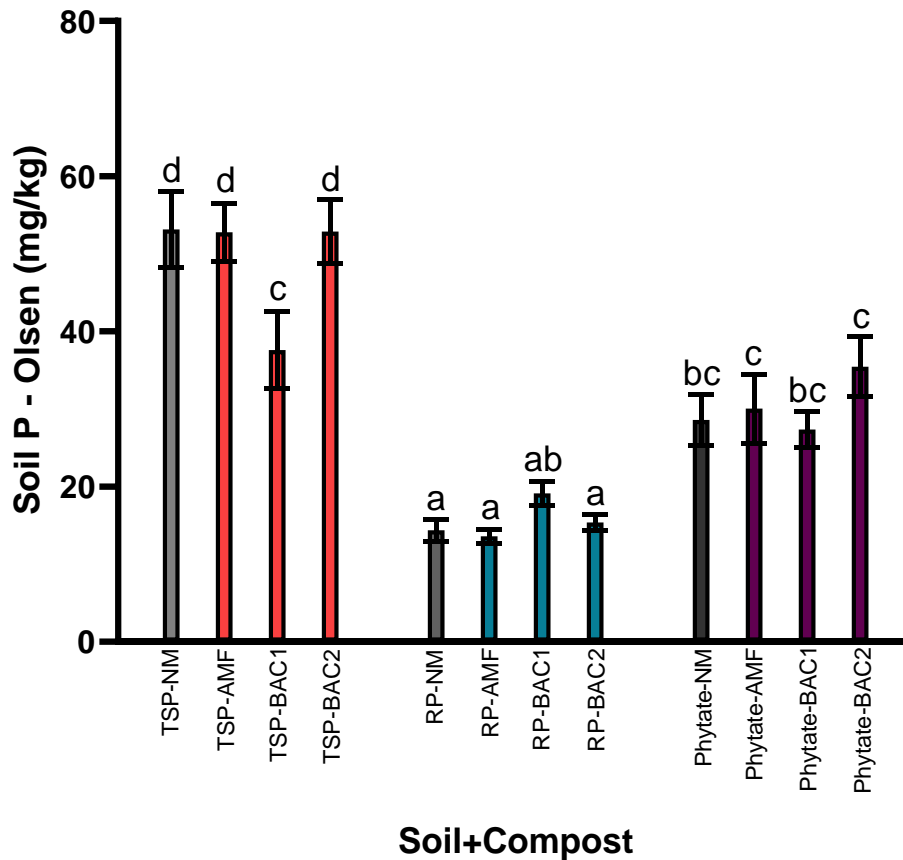
3.3.5. Διαθέσιμος Εδαφικός P



Διάγραμμα 45: Διαθέσιμος εδαφικός P(mg/kg). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στον διαθέσιμο εδαφικό φώσφορο ο μάρτυρας TSP-NM με μέση τιμή 22.7 mg/kg διαφέρει σημαντικά με τις μεταχειρίσεις TSP-BAC1 και TSP-BAC2 με μέσες τιμές 14.8 mg/kg και 15.5 mg/kg, αντίστοιχα. Τέλος, η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά σε αυτή την μέτρηση (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια).

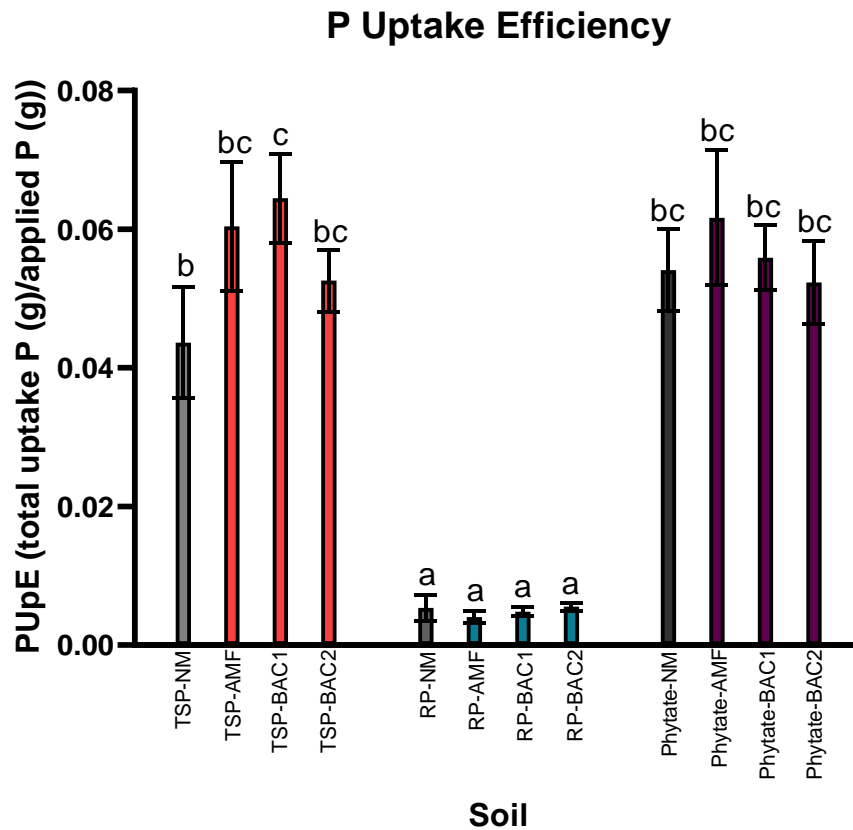
Soil Phosphorus (mg/kg)



Διάγραμμα 46: Διαθέσιμος εδαφικός P(mg/kg). Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στο έδαφος με το compost ο μάρτυρας TSP-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-BAC1. Οι υπόλοιποι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις μεταχειρίσεις. Τέλος, η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά σε αυτή την μέτρηση (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια).

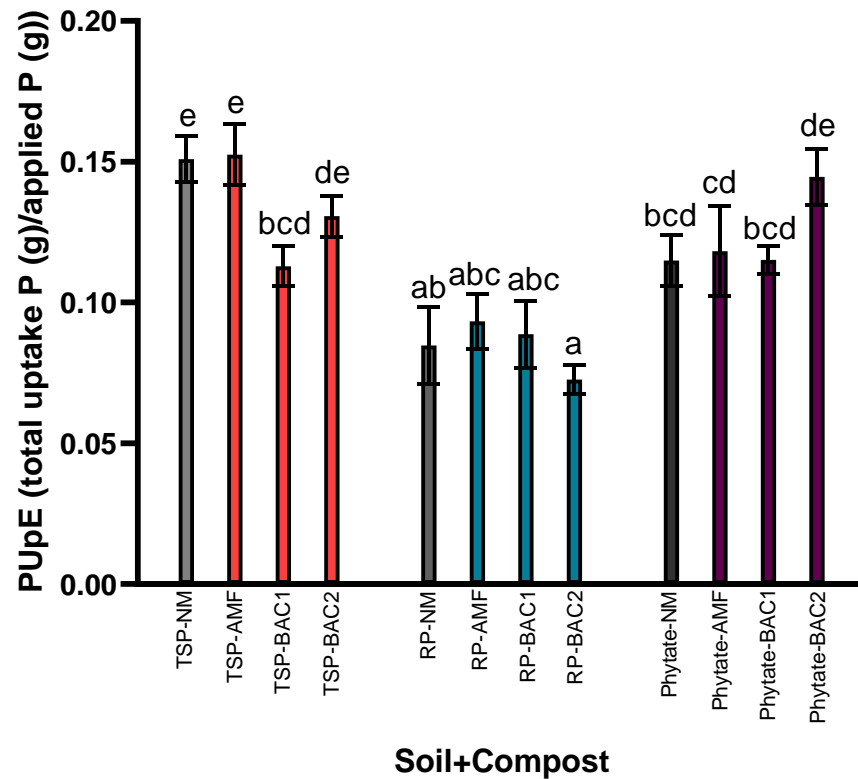
3.3.6. P Uptake Efficiency



Διάγραμμα 47: PUPE (g/g) των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στο έδαφος ο μάρτυρας TSP-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-BAC1. Οι υπόλοιποι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Τέλος, μόνο η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην αποδοτικότητα πρόσληψης του φωσφόρου (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).

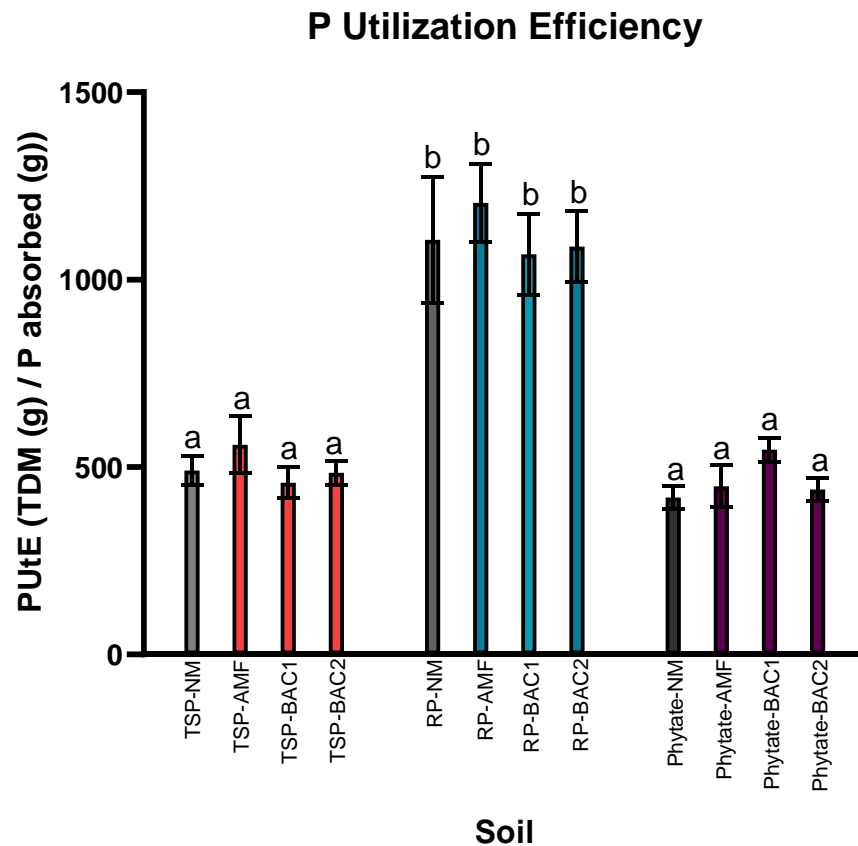
P Uptake Efficiency



Διάγραμμα 48: PUrE (g/g) των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Όπως στο έδαφος έτσι και στο μείγμα ο μάρτυρας TSP-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-BAC1 και υπόλοιποι μάρτυρες δεν διαφέρουν με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Τέλος, η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην αποδοτικότητα πρόσληψης του φωσφόρου (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια).

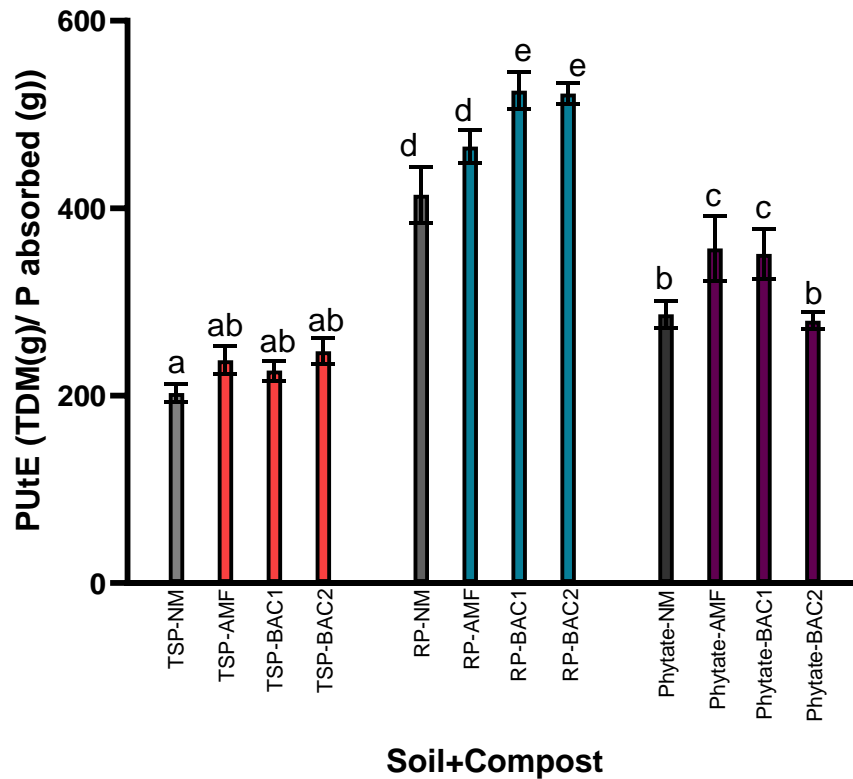
3.3.7. P Utilization Efficiency



Διάγραμμα 49: PUtE (g/g) των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στην αποδοτικότητα χρήσης του φωσφόρου οι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις μεταχειρίσεις για την περίπτωση του εδάφους. Η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στη μέτρηση αυτή (υψηλότερες τιμές με την εφαρμογή RP).

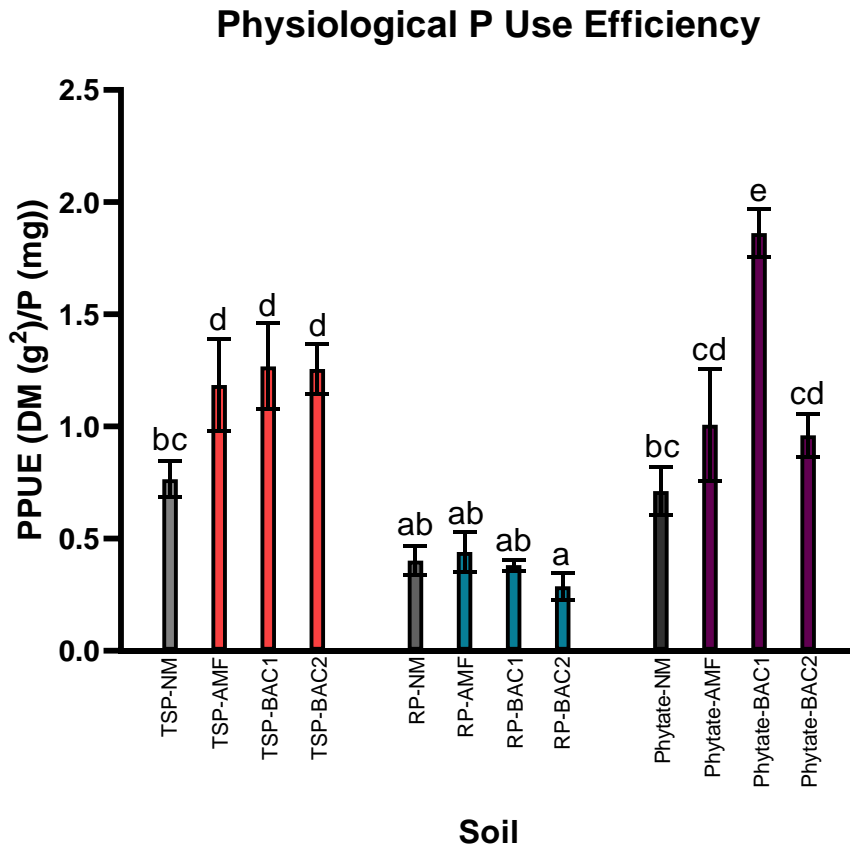
P Utilization Efficiency



Διάγραμμα 50: PUtE (g/g) των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Αντιθέτως στην περίπτωση του compost με το έδαφος ο μάρτυρας RP-NM διαφέρει σημαντικά με τις μεταχειρίσεις RP-BAC1 και RP-BAC2. Επίσης, ο μάρτυρας Phytate-NM διαφέρει σημαντικά με τις μεταχειρίσεις Phytate-AMF και Phytate-BAC1. Τέλος, στην αποδοτικότητα χρήσης του φωσφόρου η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά (αυξημένες τιμές με την εφαρμογή RP) καθώς και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια).

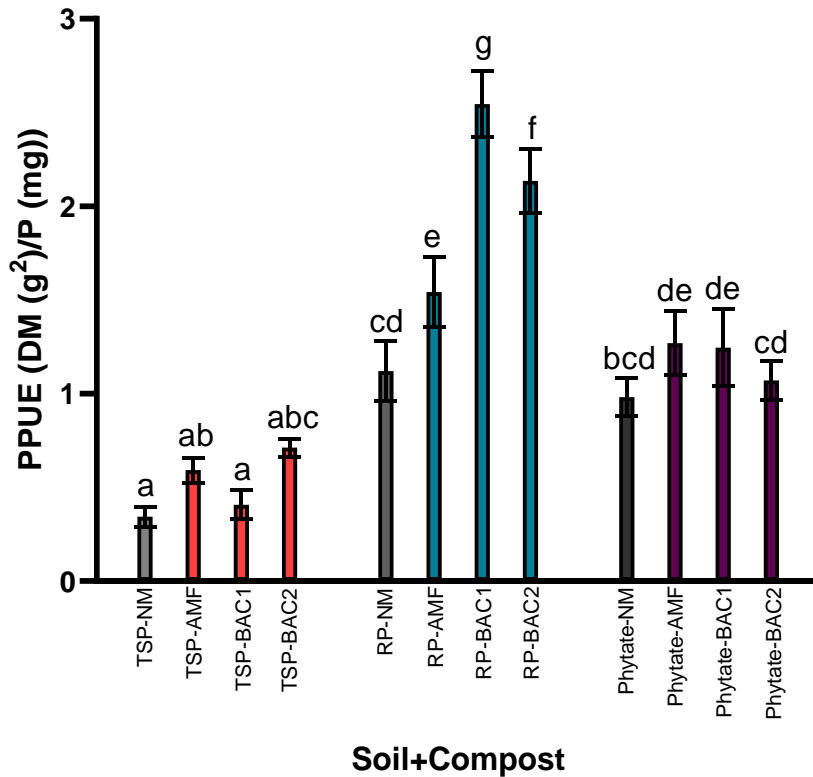
3.3.8. Physiological P Use Efficiency



Διάγραμμα 51: PPUE (g²/mg) των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στην μέτρηση PPUE στις γλάστρες με το έδαφος ο μάρτυρας TSP-NM διαφέρει σημαντικά και με τις τρεις μεταχειρίσεις. Επιπλέον, ο μάρτυρας Phytate-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση Phytate-BAC1. Τέλος, η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) καθώς και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια).

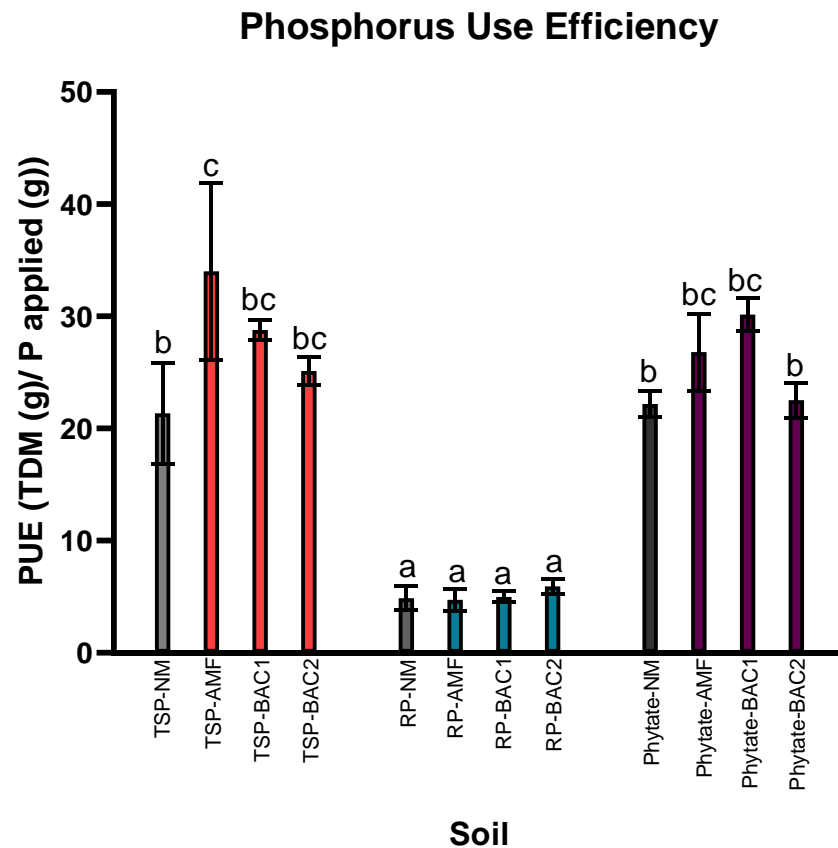
Physiological P Use Efficiency



Διάγραμμα 52: PPUE (g²/mg) των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

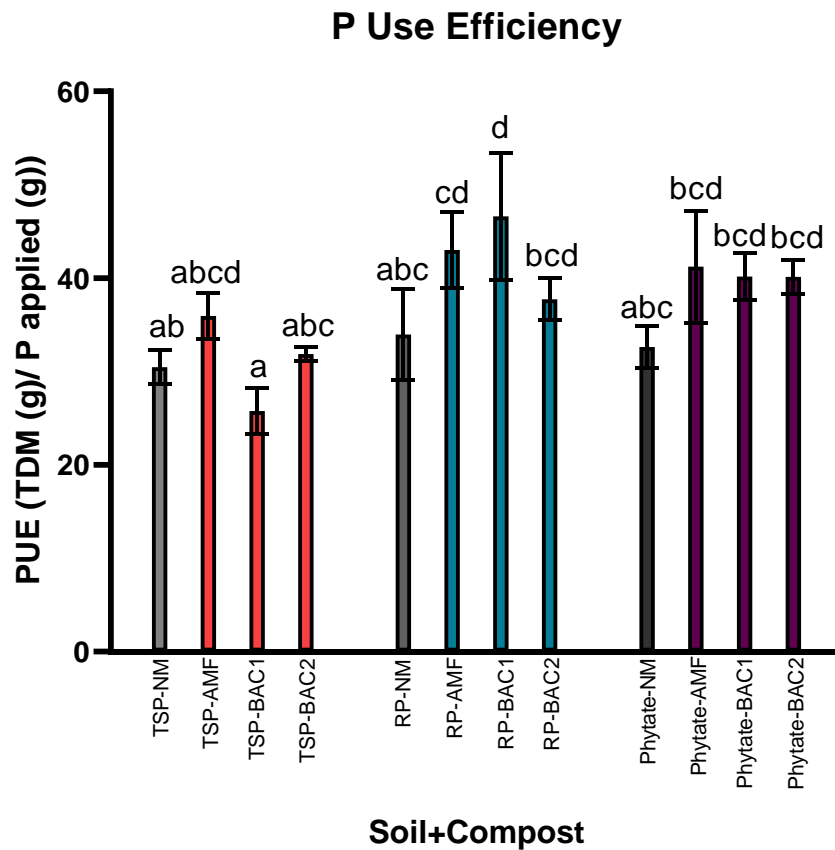
Στην περίπτωση του εδάφους με το compost ο μάρτυρας RP-NM διαφέρει σημαντικά και με τις τρεις μεταχειρίσεις. Η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά (αυξημένες τιμές με την εφαρμογή RP) καθώς και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια).

3.3.9. P Use Efficiency



Διάγραμμα 53: PUE (g/g) των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Ο μάρτυρας TSP-NM μέση τιμή 21.4 g/g διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση TSP-AMF με μέση τιμή 34 g/g. Οι υπόλοιποι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις μεταχειρίσεις. Η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην μέτρηση PUE (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 54: PUE (g/g) των φυτών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στο έδαφος με το compost ο μάρτυρας RP-NM διαφέρει σημαντικά με την μεταχείριση RP-BAC1. Οι υπόλοιποι μάρτυρες δεν διαφέρουν σημαντικά με τις αντίστοιχες μεταχειρίσεις. Στην μέτρηση PUE σημαντική στατιστικώς επίδραση παρουσίασε μόνο η πηγή φωσφόρου.

Στις γλάστρες με το έδαφος παρατηρούμε πως οι μυκορριζικοί μύκητες δεν επηρέασαν σημαντικά τον διαθέσιμο εδαφικό φώσφορο. Οι El-Sherbeny et al., (2022) στο πείραμα τους χρησιμοποίησαν ως πηγή φωσφόρου φωσφορικό μονοασβέστιο σε τρία επίπεδα, παρατήρησαν ότι οι AMF ενίσχυσαν το διαθέσιμο φώσφορο της ριζόσφαιρας. Επίσης, στην περίπτωση της πηγής φωσφόρου TSP, τα

εδάφη με τα μείγματα βακτηρίων BAC1 και BAC2 παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλές τιμές διαθέσιμου εδαφικού φωσφόρου σε σχέση με τον μάρτυρα. Ανάλογα αποτελέσματα έδειξαν και οι Zai et al (2021). Οι AMF αυξάνουν τον όγκο του εδάφους που μπορεί να εξερευνηθεί ανά μονάδα μήκους ρίζας (Smith et al, 2008). Όμως το μείγμα βακτηρίων BAC1 ενίσχυσε την πρόσληψη του φωσφόρου στα φύλλα. Οι Prakash and Arora (2019) αναφέρουν πως το PSB στελέχος STJP εμβολιασμένο σε έδαφος με ταυτόχρονη προσθήκη λιπάσματος τριφωσφορικού ασβεστίου αύξησε την πρόσληψη του φωσφόρου στα φύλλα αλλά και γενικώς στο φυτό *M. arvensis*, σε σχέση με τη προσθήκη μόνο του λιπάσματος. Ανάλογα αποτελέσματα προέκυψαν σε αυτό το πείραμα. Οι γλάστρες με RP είχαν χαμηλό περιεχόμενο με φώσφορο. Τα φυτά με πηγή φωσφόρου Phytate δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά με τον μάρτυρα όσο αφορά την πρόσληψη του φωσφόρου σε φύλλα και ρίζες καθώς και στο διαθέσιμο φώσφορο του εδάφους. Οι Wang et al. (2017) χρησιμοποιώντας δύο ποικιλίες καλαμποκιού αναφέρουν πως σε φυτά εμβολιασμένα με AMF αυξήθηκε η πρόσληψη φωσφόρου και η βιομάζα του βλαστού με την αύξηση της προσθήκης Phytate, σε σχέση με τα μη εμβολιασμένα. Η μελέτη των Martinez et al. (2015) έδειξε πως τα ριζοβακτήρια που διαλυτοποιούν phytate (phytate-mineralizing rhizobacteria, PMR) δεν ενίσχυσε σταθερά τη βιομάζα και την πρόσληψη φωσφόρου σε φυτά που καλλιεργήθηκαν σε εδάφη Andisols. Ωστόσο, τα αποτελέσματά τους έδειξαν επίσης αύξηση (~14%) στην περιεκτικότητα σε P στους ιστούς φυτών βρώμης που εμβολιάστηκαν με *Enterobacter* sp. N0-29PA in PN χώμα. Επιπλέον, στα φυτά βρώμης εμβολιασμένα με *Enterobacter* sp. Το N0-29PA παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της φυτικής βιομάζας (~29%) και της πρόσληψης P (~47%). Στην ίδια έρευνα ο εμβολιασμός με στελέχη *Bacillus* sp. N1-19NA ή *Enterobacter* sp. N0-29PA σημείωσε σημαντική αύξηση στο διαθέσιμο εδαφικό φώσφορο του ριζοσφαιρικού εδάφους σε σχέση με εδάφη εμβολιασμένα με άλλα στελέχη ή με

επεμβάσεις που δεν εμβολιάστηκαν. Όσον αφορά τις μετρήσεις PUPE, PUTE και PUE τα φυτά με πηγές φωσφόρου TSP και Phytate παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές PUPE και PUE σε σχέση με τα φυτά των οποίων η πηγή φωσφόρου είναι RP. Αντιθέτως, υψηλές τιμές PUTE παρουσιάζουν τα φυτά με πηγή φωσφόρου RP. Ο Sandana (2016) παρατήρησε πως οι γονότυποι πατάτας υπό ανεπάρκεια φωσφόρου είχαν μεγαλύτερες τιμές PUPE, PUTE και PUE από τους ίδιους γονότυπους που καλλιεργήθηκαν σε επάρκεια φωσφόρου. Υπάρχουν μελέτες που σημειώνουν αύξηση της μέτρησης PUTE σε συνθήκες ανεπάρκειας φωσφόρου (Leiser et al., 2014; Gemenet et al. 2015). Σε αυτή την μελέτη, οι μικρές τιμές PUPE και PUE στα φυτά με πηγή φωσφόρου RP μπορεί να οφείλεται στον χαμηλό ρυθμό διαλυτοποίησης του rock phosphate. Επίσης, στα φυτά με πηγή φωσφόρου TSP, η επέμβαση TSP-BAC1 διαφέρει σημαντικά με τον αντίστοιχο μάρτυρα στη μέτρηση PUPE, ενώ η επέμβαση TSP-AMF διαφέρει σημαντικά με τον μάρτυρα στην μέτρηση PUE. Οι Emami et al. (2020) διαπίστωσαν πως τα ριζοσφαιρικά βακτήρια, τα ενδόφυτα αλλά και το μείγμα αυτών αύξησαν τις τιμές PAE (P acquisition efficiency). Τα βακτήρια και τα ενδόφυτα τροποποίησαν το ριζικό σύστημα με την παραγωγή IAA. Οι Zhang et al. (2016) έδειξαν πως οι AMF αύξησαν τις τιμές της μέτρησης PAE σε χαμηλά επίπεδα λίπανσης, όμως η επίδραση των AMF μείωσε τις τιμές της μέτρησης φαινομενικής PAE. Εξήγησαν πως οι AMF εξαρτώνται από τη συγκέντρωση του φωσφόρου, και συσχετίζονται με τις βιολογικές αποδόσεις και τις οικονομικές αποδόσεις. Αυτές οι εξαρτήσεις των AMF είναι πιο σημαντικές στις μεταχειρίσεις χωρίς λίπανσης σε σχέση με αυτές με λίπανση. Αυτό σημαίνει πως οι μεταχειρίσεις με AMF είχαν χαμηλότερες τιμές φαινομενικής PAE σε σχέση με αυτές που δεν εμβολιάστηκαν. Στη μέτρηση PPUE οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου TSP διαφέρουν σημαντικά από τον αντίστοιχο μάρτυρα και παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές, οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου RP δεν διαφέρουν σημαντικά με τον αντίστοιχο μάρτυρά τους και η

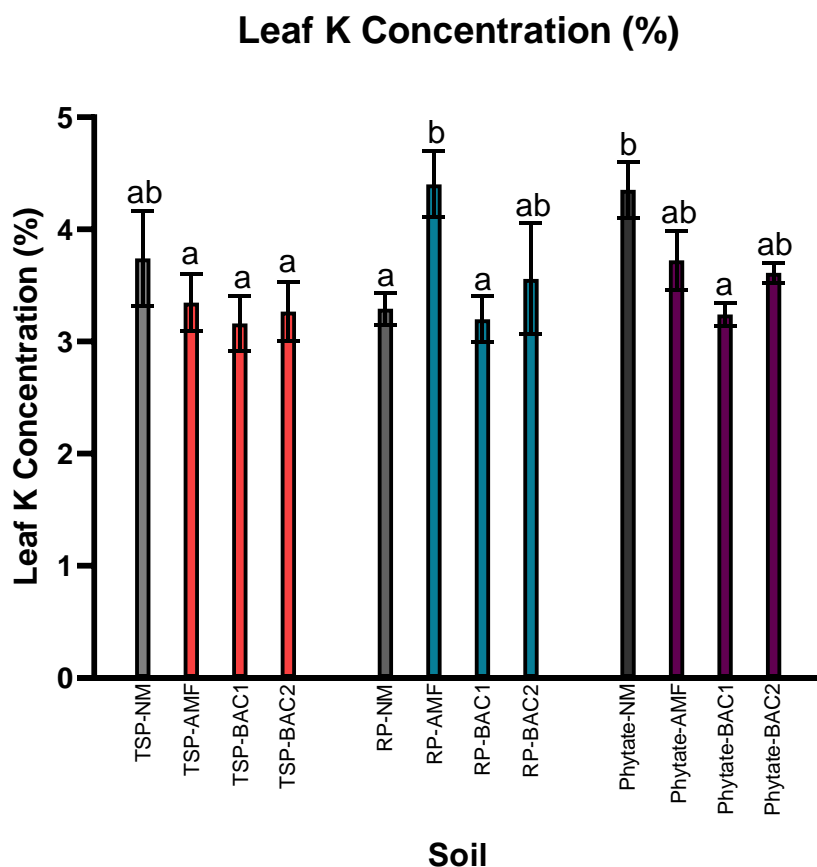
μεταχείριση Phytate-BAC1 διαφέρει σημαντικά έχοντας υψηλότερη τιμή από τον μάρτυρα. Ο Al-Karakis (2002), σε αντίθεση με αυτή την μελέτη, παρατήρησε πως τα εμβολιασμένα με AMF σκόρδα είχαν μικρότερες τιμές από τα μη εμβολιασμένα. Εξηγεί πως αυτό μπορεί να οφείλεται στη χρήση υδατανθράκων από τους AMF για την ανάπτυξή τους σε βάρος της ανάπτυξης του φυτού ξενιστή. Οι Sarkar et al. (2021) στο πείραμά τους αναφέρουν πως η δράση των βακτηρίων (single ή co-inoculation) μαζί με ανόργανη θρέψη δεν οδήγησε σε σημαντικές διαφοροποιήσεις.

Στην περίπτωση του εδάφους με το compost σε όλες τις μεταχειρίσεις ανεξαρτήτως της πηγής φωσφόρου ο εμβολιασμός με AMF δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές, σε σχέση με τους αντίστοιχους μάρτυρες, στην πρόσληψη του φωσφόρου από τα φυτά καθώς και στη διαθεσιμότητα του εδαφικού φωσφόρου. Οι Liu et al (2019) αναφέρουν πως στο πείραμά τους ο εμβολιασμός με AMF στα φυτά δεν είχε σημαντική επίδραση στην πρόσληψη φωσφόρου. Αντίθετα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν από την μελέτη των Zhang et al (2019). Οι Alloush et (2000) χρησιμοποιώντας δύο πηγές φωσφόρου (KH_2PO_4 , Rock Phosphate) και οργανικό υλικό κοπριά επισημαίνουν πως η πρόσληψη του φωσφόρου από τους βλαστούς μεταξύ μεταχειρίσεων AMF+RP+OM και OM+RP δεν διαφοροποιείται σημαντικά. Στην περίπτωση των μειγμάτων βακτηρίων δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων και των αντίστοιχων μαρτύρων στη διαθεσιμότητα εδαφικού φωσφόρου εκτός από την μεταχείριση TSP-BCA1, στην οποία σημειώνεται σημαντική μείωση σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα. Οι Ali et al. (2020) στο πείραμα τους έδειξαν πως η διαλυτοποίηση του φωσφόρου από βακτήρια που διαλυτοποιούν το φώσφορο (PSB) ενισχύθηκε με την προσθήκη βιοεξανθρακόματος (Biochar) που οφείλεται στην μείωση της ακινητοποίησης του φωσφόρου. Αντιθέτως, στη μελέτη αυτή δεν παρατηρούνται ανάλογα αποτελέσματα. Στην πρόσληψη φωσφόρου από τα φύλλα

σημαντική μείωση παρατηρείται από την μεταχείριση TSP-BAC1 σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην υψηλή συγκέντρωση Na^+ στα φύλλα (Διαγράμματα 63-66). Αντίθετα σημαντική αύξηση σημειώνεται από την μεταχείριση Phytate-BAC2. Αυτό το αποτέλεσμα συνάδει με τα αποτελέσματα των (Ali et al 2020). Στην περίπτωση των φυτών με πηγή φωσφόρου RP δεν υπάρχει κάποια σημαντική διαφοροποίηση. Αντιθέτως, οι Kaleem Abbasi M. et Manzoor M. (2018), αναφέρουν πως ο συνδυασμός RP, κοπριάς πουλερικών και PSBs παρουσίασε μεγαλύτερη διαθεσιμότητα εδαφικού φωσφόρου σε σχέση με τον συνδυασμό εφαρμογής κοπριάς πουλερικών και RP. Στην μέτρηση PUTE οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου RP και πιο συγκεκριμένα αυτές που είχαν τα δύο μείγματα βακτηρίων διαφέρουν σημαντικά από τον αντίστοιχο μάρτυρά τους, έχοντας υψηλότερες τιμές. Ανάλογα αποτελέσματα έδειξαν και οι Abbasi et al. (2015) στο πείραμά τους.

3.4. Αποτελέσματα άλλων στοιχείων

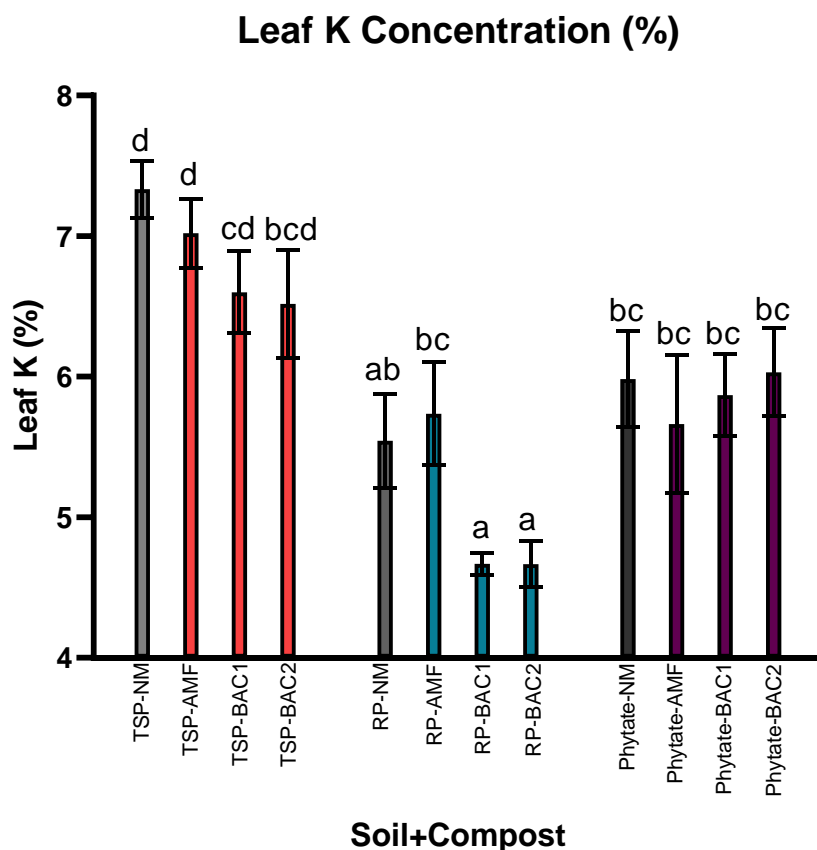
3.4.1. Συγκέντρωση Καλίου στα φύλλα



Διάγραμμα 55: Συγκέντρωση K(%) φύλλων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στις επεμβάσεις με πηγή φωσφόρου TSP οι μεταχειρίσεις δεν διαφέρουν σημαντικά από τον αντίστοιχο μάρτυρά τους. Αντιθέτως, στις επεμβάσεις των υπόλοιπων πηγών υπάρχουν διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, η μεταχείριση RP-AMF με μέση τιμή συγκέντρωσης 4.4%, παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα, με μέση τιμή συγκέντρωσης 3.29%. Η μεταχείριση Phytate-BAC1 με μέση τιμή 3.24% παρουσιάζει σημαντική μείωση σε σχέση με

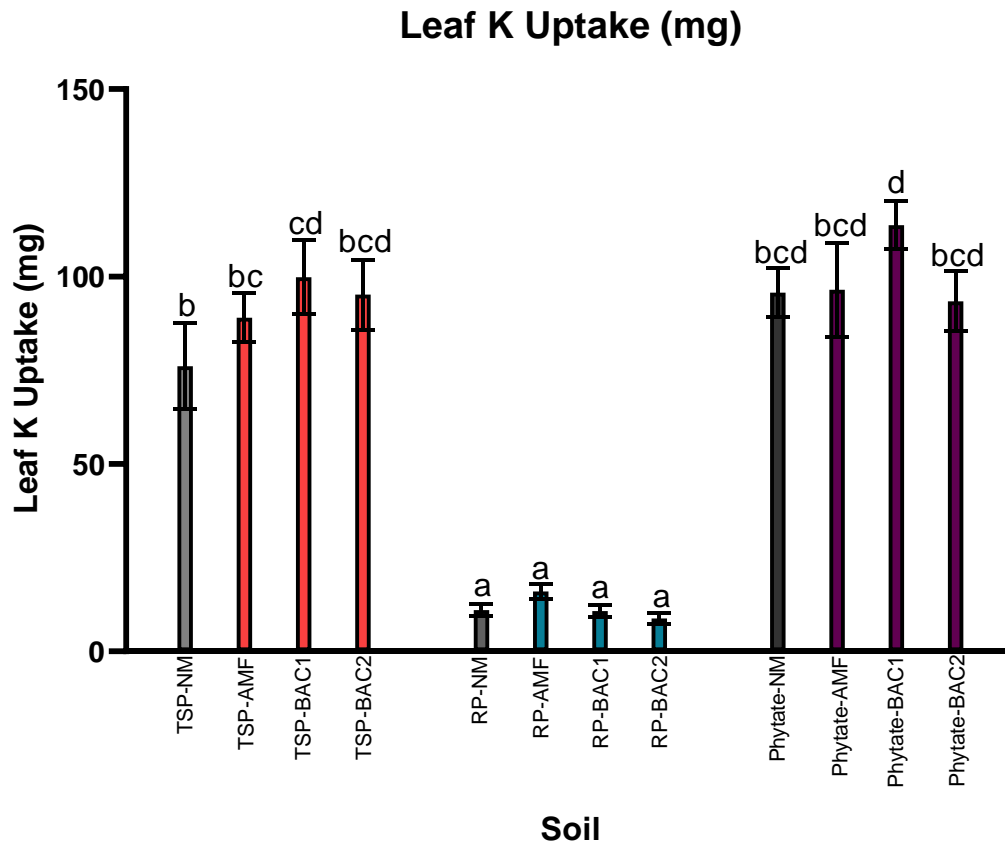
τον μάρτυρα, 4.35%. Τέλος, μόνο η ύπαρξη μικροβιακών εμβολίων επιδρά σημαντικά στη συγκέντρωση καλίου στα φύλλα.



Διάγραμμα 56: Συγκέντρωση K(%) φύλλων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

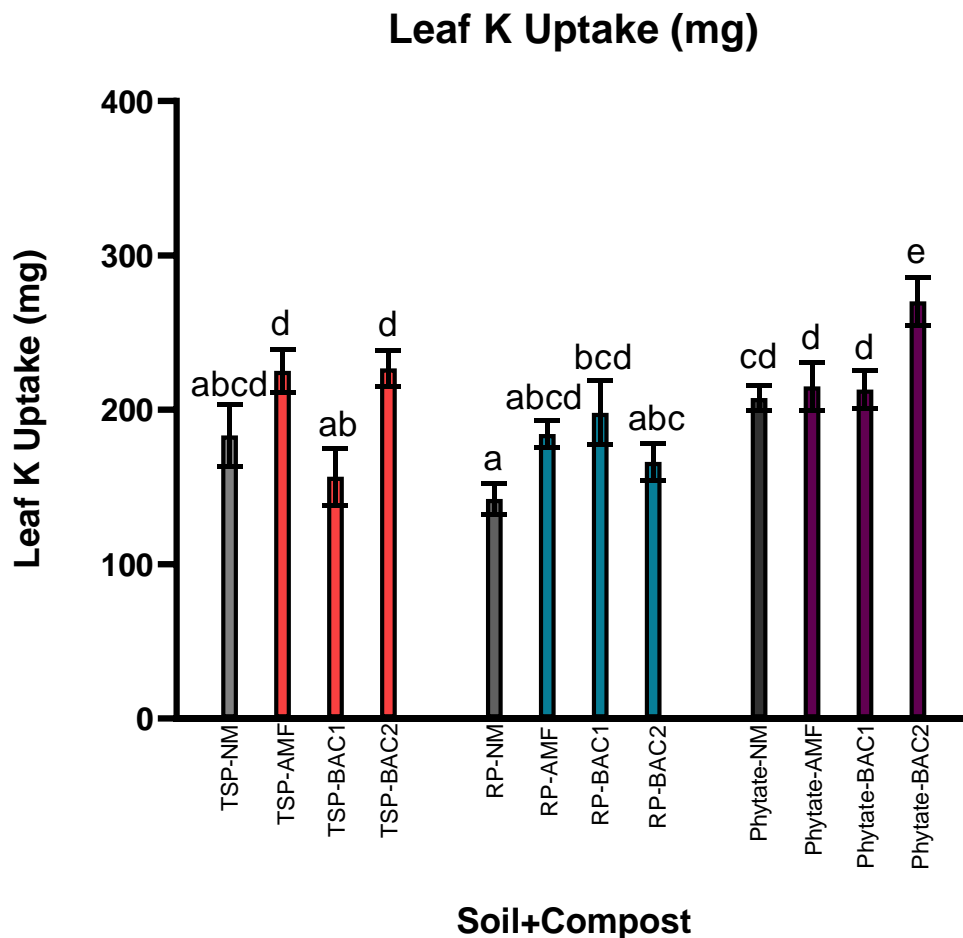
Στην περίπτωση του μείγματος εδάφους με compost, όλες οι μεταχειρίσεις, ανεξαρτήτως της πηγής φωσφόρου, δεν σημειώνουν σημαντική διαφορά με τους αντίστοιχους μάρτυρες. Η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά σε αυτή την μέτρηση (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).

3.4.2. Πρόσληψη Καλίου από τα φύλλα



Διάγραμμα 57: Πρόσληψη K(mg) από τα φύλλα. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

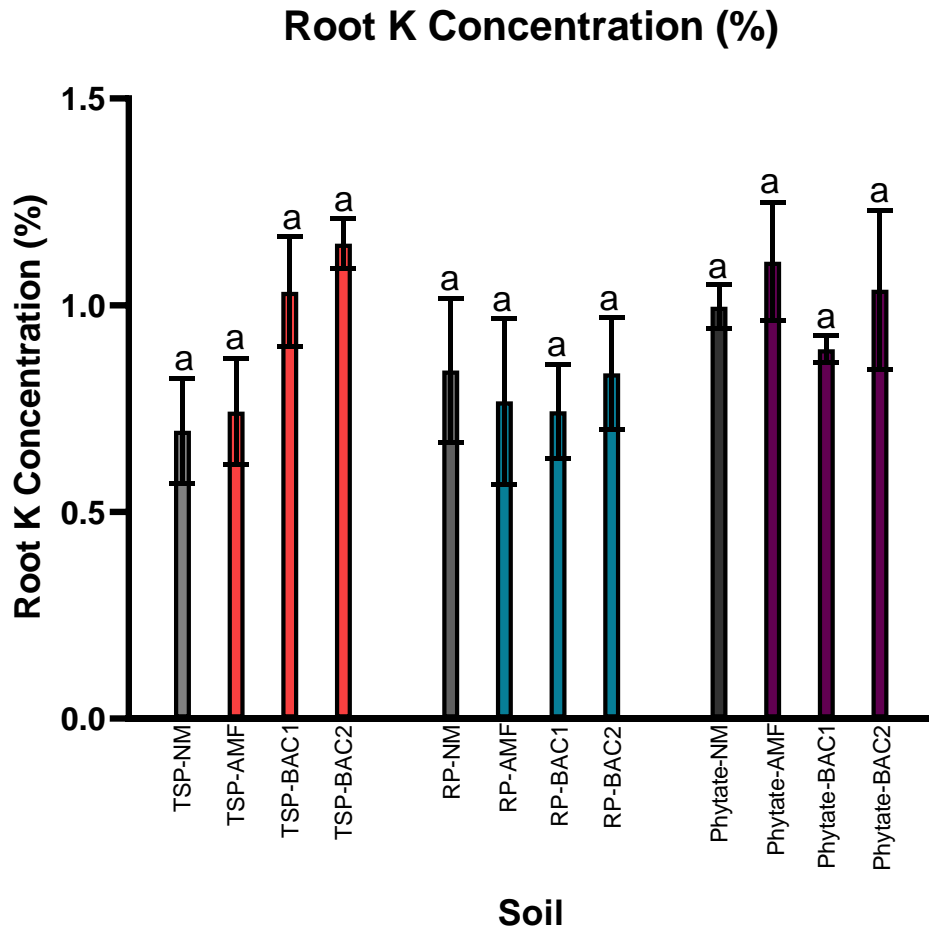
Στο έδαφος η πρόσληψη του καλίου από τα φύλλα σημαντική διαφορά συναντάται σε 1 μεταχείριση. Η μεταχείριση TSP-BAC1 με μέση τιμή 99.81 mg παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα με μέση τιμή 76.03 mg. Τέλος, μόνο η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην πρόσληψη του καλίου από τα φύλλα (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 58: Πρόσληψη K(mg) από τα φύλλα. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

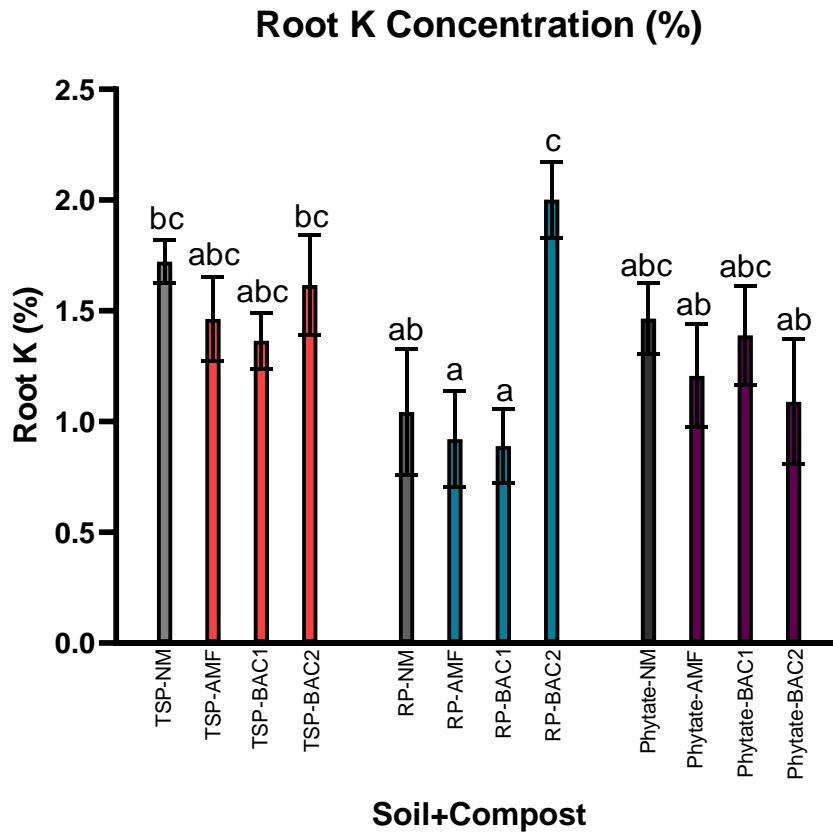
Στο μείγμα εδάφους-compost οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου TSP δεν σημειώνουν σημαντικές διαφορές με τον αντίστοιχο μάρτυρα. Αντιθέτως, η μεταχείριση RP-BAC1 με μέση τιμή 198.07 mg παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα 142.25 mg. Επιπλέον, η μεταχείριση Phytate-BAC2 με μέση τιμή 270.2 mg σημειώνει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα 207.56 mg. Τέλος, η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) καθώς και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια).

3.4.3. Συγκέντρωση Καλίου στις ρίζες



Διάγραμμα 59: Συγκέντρωση K(%) ριζών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

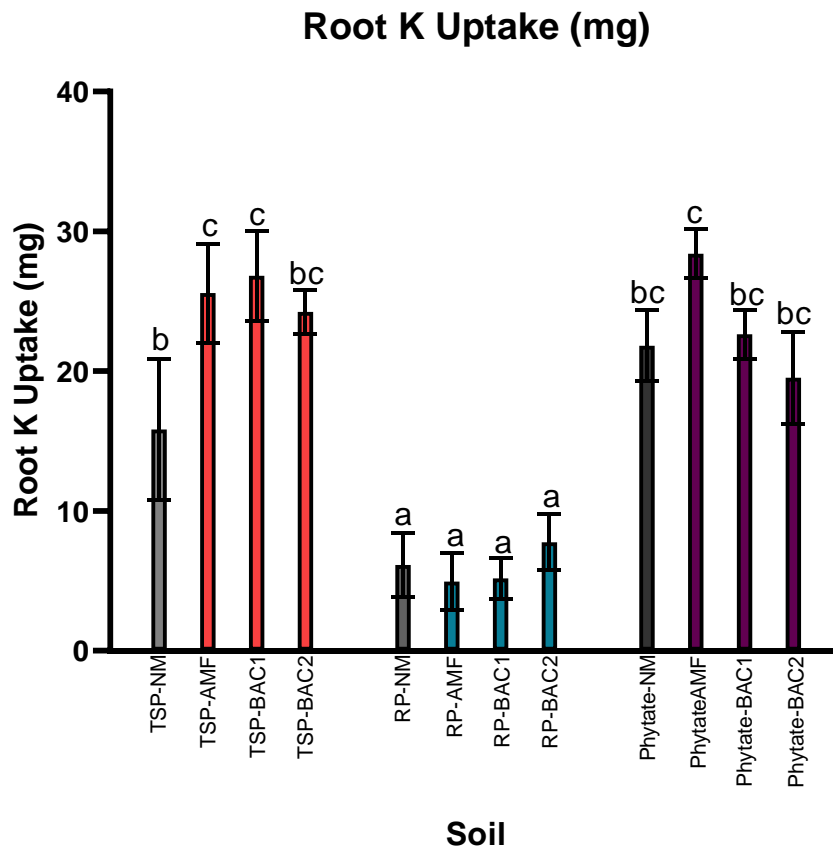
Οι μεταχειρίσεις, ανεξαρτήτως της πηγής φωσφόρου, δεν διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τους αντίστοιχους μάρτυρες. Επίσης, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων με διαφορετικές πηγές φωσφόρου..



Διάγραμμα 60: Συγκέντρωση K(%) ριζών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

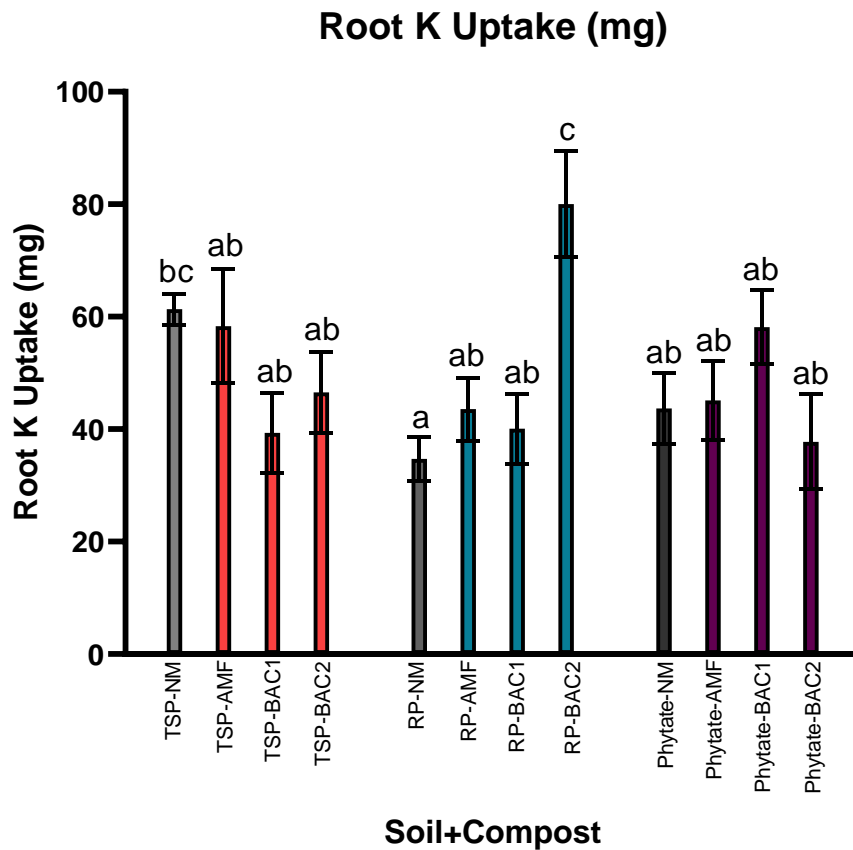
Στην περίπτωση του εδάφους-compost η μεταχείριση RP-BAC2 με μέση τιμή 2%, παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα με μέση τιμή 1.04%. Κανένας παράγοντας δεν επιδρά σημαντικά στη συγκέντρωση καλίου στις ρίζες.

3.4.4. Πρόσληψη Καλίου από τις ρίζες



Διάγραμμα 61: Πρόσληψη K(mg) από τις ρίζες. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

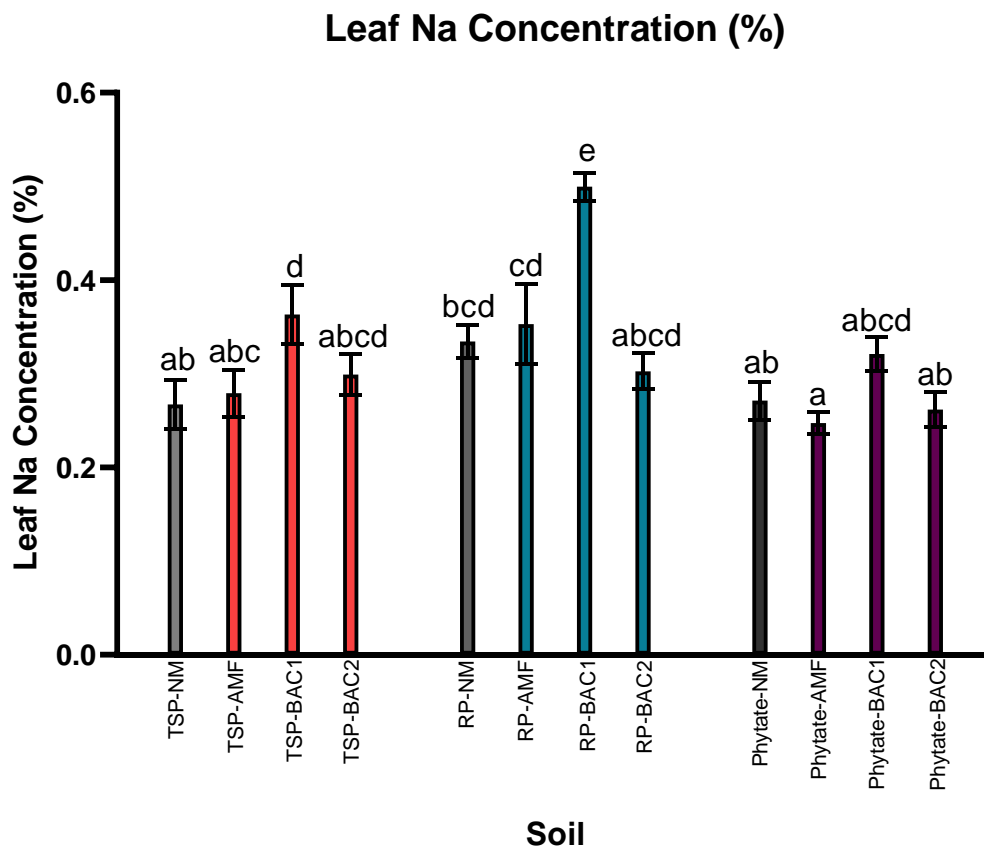
Σημαντικές διαφορές στην πρόσληψη καλίου από τις ρίζες παρατηρούνται σε μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου TSP. Πιο συγκεκριμένα, οι μεταχειρίσεις TSP-AMF και TSP-BAC1 με 25.6 mg και 26.82 mg αντίστοιχα παρουσιάζουν σημαντική αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρά τους με μέση τιμή 15.83 mg. Τέλος, μόνο η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην πρόσληψη του καλίου από τις ρίζες (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 62: Πρόσληψη K(mg) από τις ρίζες. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

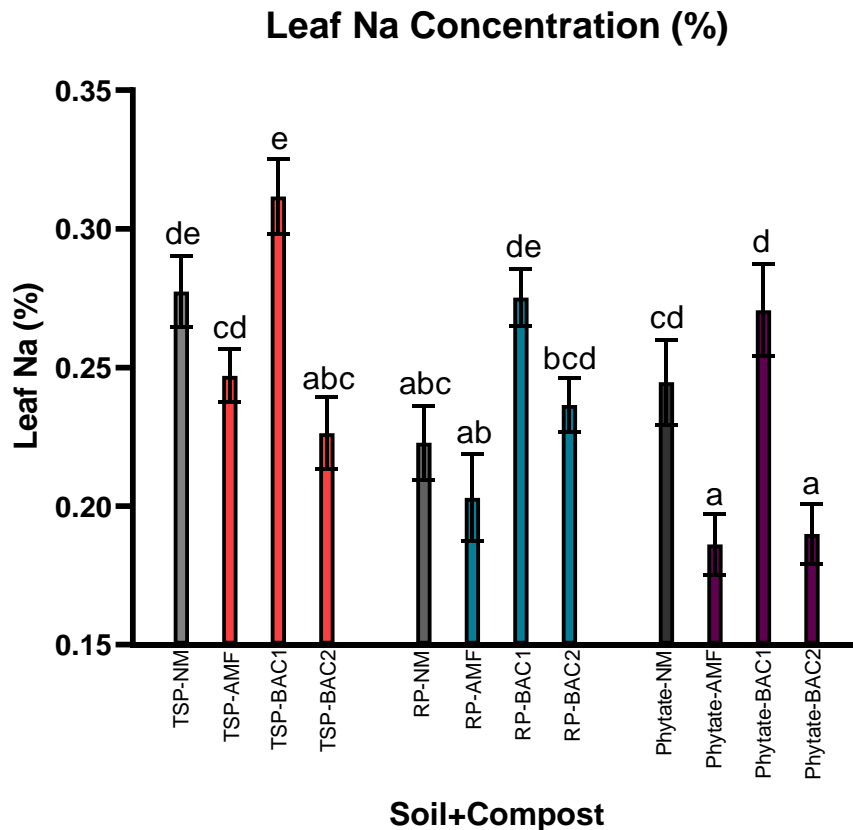
Στην περίπτωση του μείγματος εδάφους-compost σημαντική διαφορά συναντάται στην μεταχείριση RP-BAC2 με τον αντίστοιχο μάρτυρα. Σημειώνει σημαντική αύξηση με μέση τιμή 80 mg ενώ ο μάρτυρας έχει μέση τιμή 34.72 mg. Τέλος, η πηγή φωσφόρου και τα μικροβιακά εμβόλια δεν επιδρούν σημαντικά σε αυτή την μέτρηση.

3.4.5. Συγκέντρωση Νατρίου στα φύλλα



Διάγραμμα 63: Συγκέντρωση Na(%) φύλλων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

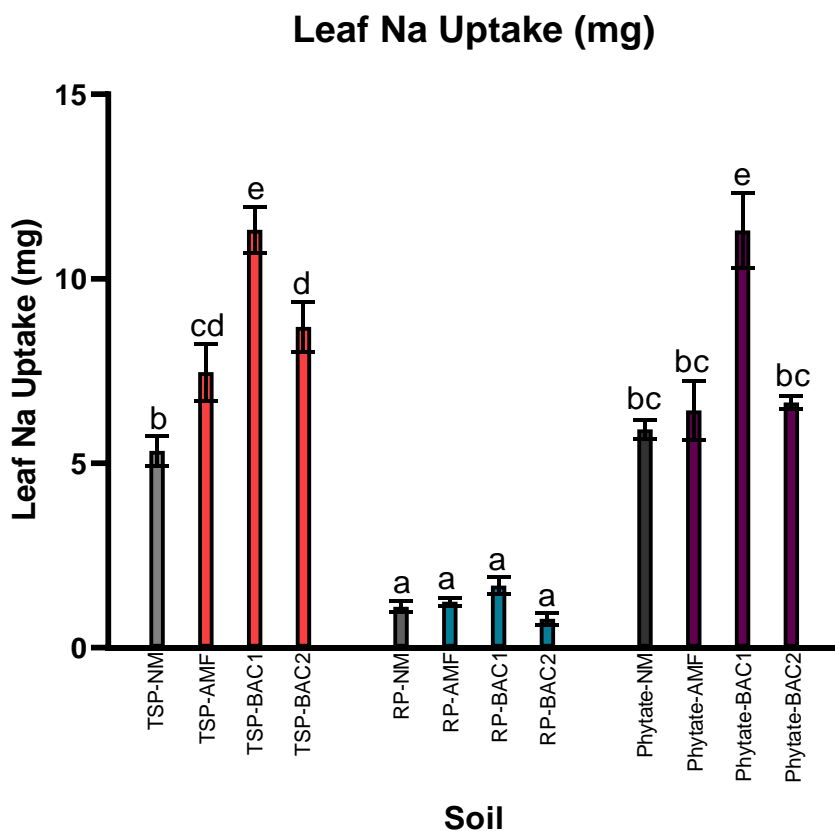
Οι μεταχειρίσεις TSP-BAC1 και RP-BAC1 παρουσιάζουν σημαντική αύξηση σε σχέση με τους αντίστοιχους μάρτυρες. Αναλυτικότερα, η μέση τιμή συγκέντρωσης νατρίου στα φύλλα για την μεταχείριση TSP-BAC1 είναι 0.36% ενώ ο μάρτυρας 0.27% και η μεταχείριση RP-BAC1 0.49% και ο αντίστοιχος μάρτυρας 0.33%. Τέλος, η πηγή φωσφόρου και τα μικροβιακά εμβόλια επιδρούν σημαντικά στην μέτρηση αυτή.



Διάγραμμα 64: Συγκέντρωση Na (%) φύλλων. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

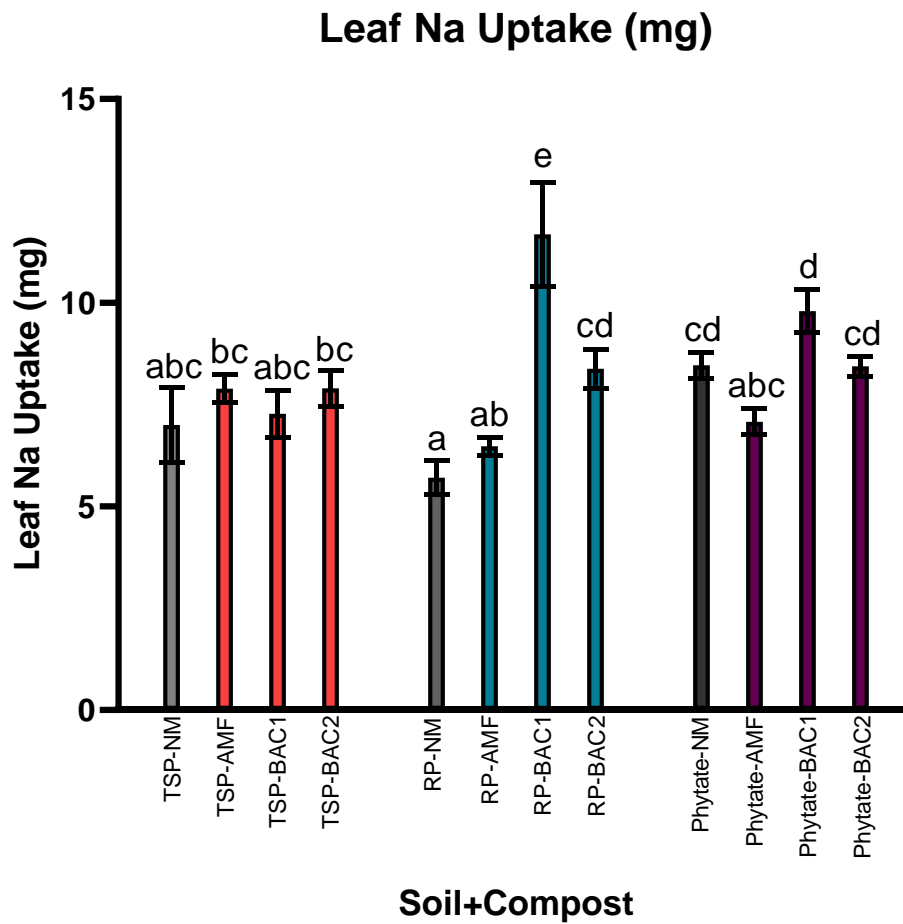
Στην περίπτωση εδάφους-compost η μεταχείριση TSP-BAC2 με 0.23% σημειώνει σημαντική μείωση σε σχέση με τον μάρτυρα, 0.28%. Επίσης, η μεταχείριση RP-BAC1 με μέση τιμή 0.28% παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα, 0.22%. Τέλος, οι μεταχειρίσεις Phytate-AMF και Phytate-BAC2 με μέσες τιμές 0.186% και 0.19% αντίστοιχα παρουσιάζουν σημαντική μείωση σε σχέση με τον μάρτυρα 0.24%. Τόσο η πηγή φωσφόρου, όσο και τα μικροβιακά εμβόλια επιδρούν σημαντικά στην μέτρηση αυτή.

3.4.6. Πρόσληψη Νατρίου στα Φύλλα



Διάγραμμα 65: Πρόσληψη Na(mg) από τα φύλλα. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

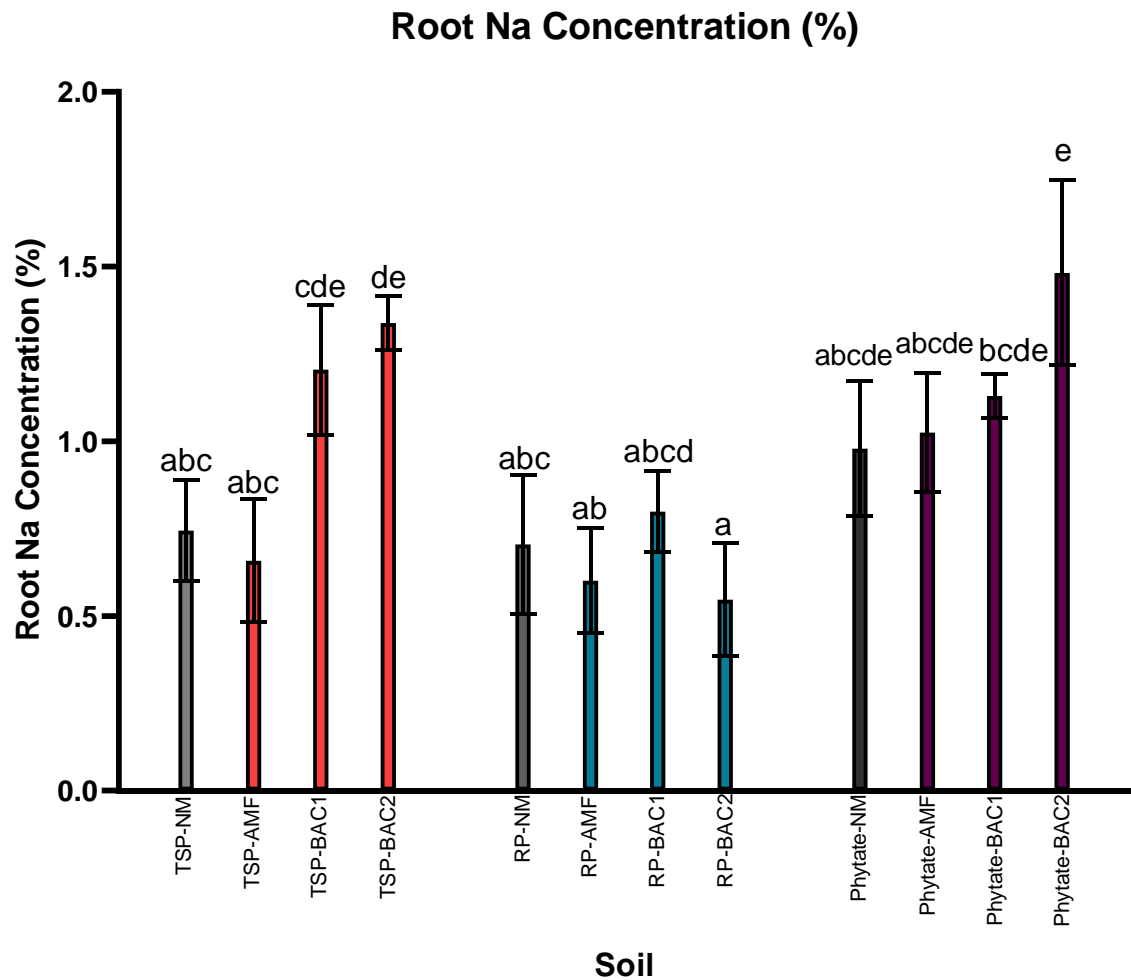
Οι μεταχειρίσεις με πηγή φωσφόρου TSP διαφέρουν σημαντικά από τον αντίστοιχο μάρτυρα. Οι μέσες τιμές των μεταχειρίσεων TSP-AMF, TSP-BAC1 και TSP-BAC2 είναι 7.47 mg, 11.33 mg και 8.69 mg, αντίστοιχα και ο μάρτυρας 5.33 mg. Επιπλέον, η μεταχείριση Phytate-BAC1 με μέση τιμή 11.31 mg σημειώνει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα 5.92 mg. Τέλος, η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) καθώς και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια).



Διάγραμμα 66: Πρόσληψη Na(mg) από τα φύλλα. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

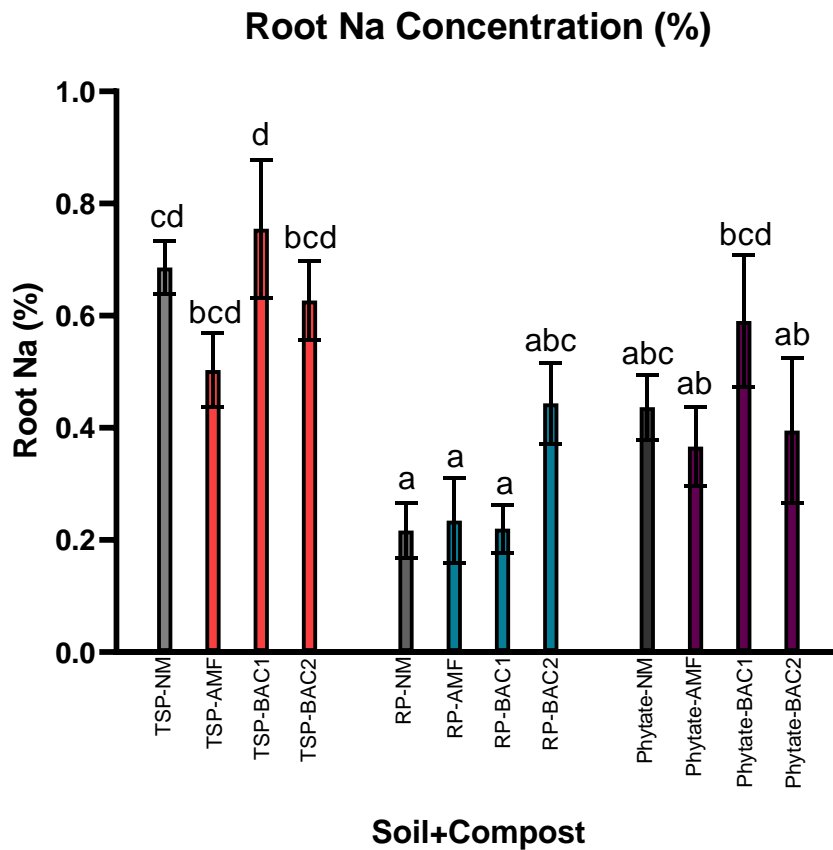
Στο μείγμα οι μεταχειρίσεις RP-BAC1 και RP-BAC2 με 11.68 mg και 8.38 mg παρουσιάζουν σημαντική αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα, 5.7 mg..

3.4.7. Συγκέντρωση Νατρίου στις Ρίζες



Διάγραμμα 67: Συγκέντρωση Na (%) ριζών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

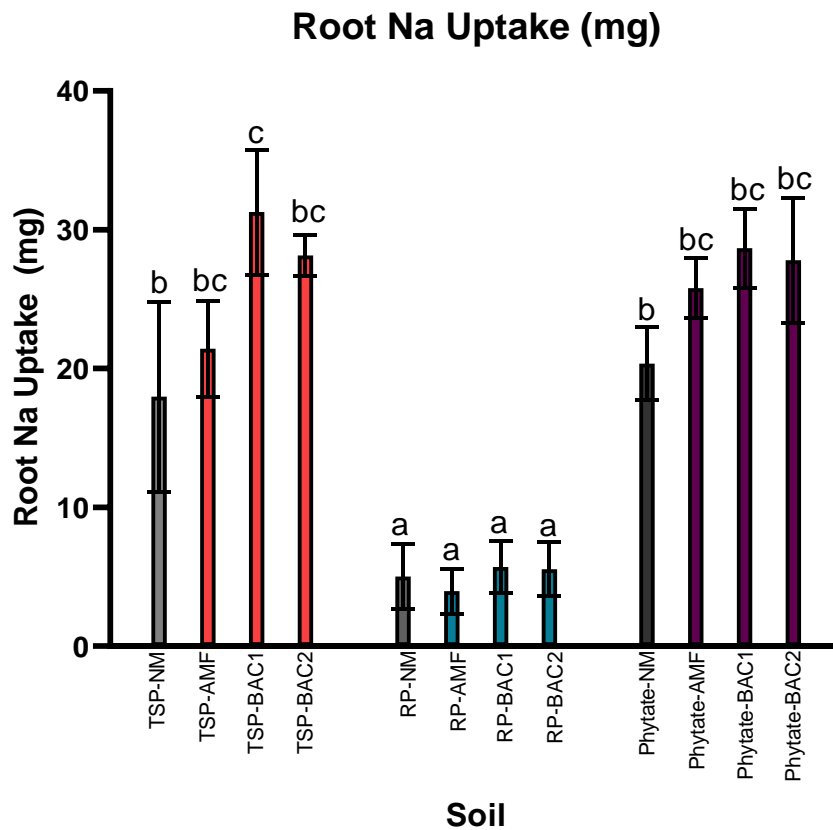
Όσο αφορά την συγκέντρωση του νατρίου στις ρίζες, στην περίπτωση του εδάφους, η μεταχείριση TSP-BAC2 με μέση τιμή 1.34% παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα, 0.74%. Η πηγή φωσφόρου και τα μικροβιακά εμβόλια επιδρούν σημαντικά σε αυτή την μέτρηση, αλλά η αλληλεπίδρασή τους δεν είναι σημαντική.



Διάγραμμα 68: Συγκέντρωση Na (%) ριζών. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

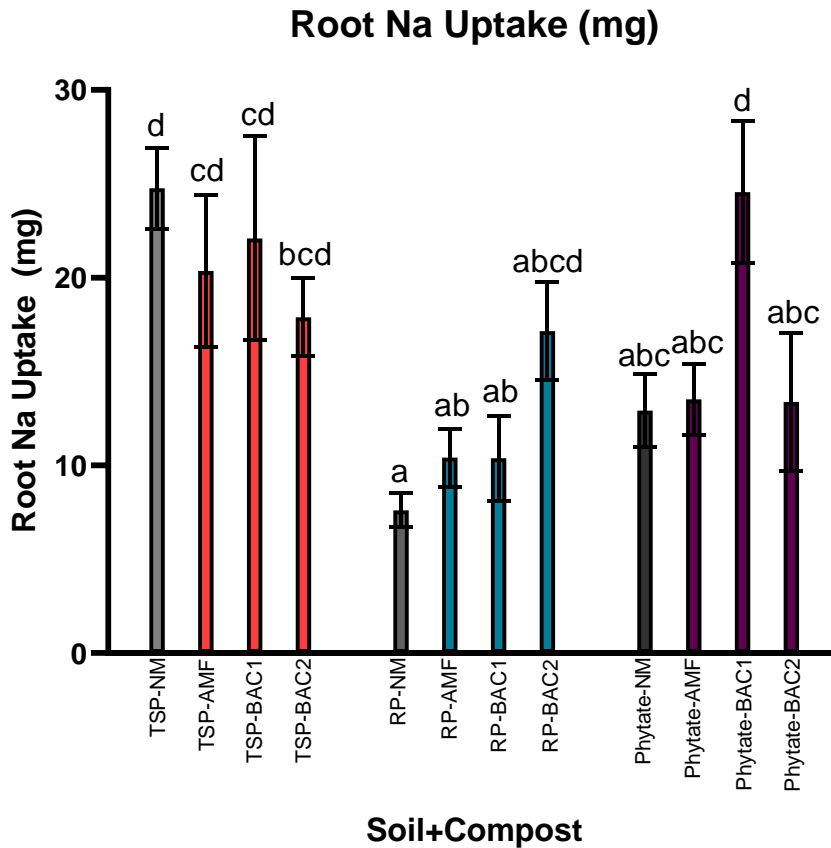
Αντιθέτως, στην περίπτωση του μείγματος δεν παρατηρείται κάποια σημαντική στατιστικά διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων και των αντίστοιχων μαρτύρων τους. Η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά στην συγκέντρωση του νατρίου στις ρίζες για την περίπτωση του μείγματος (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).

3.4.8. Πρόσληψη Νατρίου στις Ρίζες



Διάγραμμα 69: Πρόσληψη Na(mg) από τις ρίζες. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Στην πρόσληψη νατρίου από τις ρίζες για το έδαφος, η μεταχείριση TSP-BAC1 με μέση τιμή 31.28 mg σημειώνει σημαντική αύξηση σε σχέση με τον μάρτυρα TSP-NM, 17.98 mg. Τέλος, η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP).



Διάγραμμα 70: Πρόσληψη Na(mg) από τις ρίζες. Διαφορετικά γράμματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. **10**

Στο μείγμα, η μεταχείριση Phytate-BAC1 με μέση τιμή 24.57 mg παρουσιάζει σημαντική αύξηση στη πρόσληψη νατρίου από τις ρίζες σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα, 12.91 mg. Τέλος, η πηγή φωσφόρου επιδρά σημαντικά (μειωμένες τιμές με την εφαρμογή RP) καθώς και παρουσιάζεται σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (πηγή φωσφόρου και μικροβιακά εμβόλια)..

Γενικώς, είτε είναι η περίπτωση του εδάφους είτε είναι η περίπτωση του μείγματος και ανεξαρτήτως της πηγής φωσφόρου, οι AMF δεν ενισχύουν σημαντικά την πρόσληψη του καλίου στα φύλλα. Σε μελέτες των Mohamed et al.

(2014) και Alloush et al (2000) αναφέρεται πως η δράση των AMF ενίσχυσαν την πρόσληψη των βλαστών σε κάλιο. Στην περίπτωση των μειγμάτων των βακτηρίων, στο έδαφος το μείγμα BAC1 και πηγή φωσφόρου TSP αύξησε σημαντικά την πρόσληψη καλίου από τα φύλλα, ενώ στην περίπτωση εδάφους-compost, το μείγμα BAC1 μαζί με RP ενίσχυσαν την πρόσληψη καλίου και το μείγμα BAC2 μαζί με Phytate ως πηγή φωσφόρου αύξησαν σημαντικά την πρόσληψη καλίου από τα φύλλα σε σχέση με τον αντίστοιχο μάρτυρα. Οι Estrada-Bonilla et al. (2020) παρατήρησαν στο πείραμα τους πως η προσθήκη PSB σε επεμβάσεις με compost-TSP και compost-RP δεν οδήγησε σε σημαντική βελτίωση.

Όσον αφορά το νάτριο, στην περίπτωση του εδάφους, η συγκέντρωση του νατρίου ανεξαρτήτως της πηγής φωσφόρου δεν διαφέρει σημαντικά σε σχέση με αυτήν των αντίστοιχων μαρτύρων όταν εφαρμόζονται AMF. Όμως, στην πρόσληψη του νατρίου από τα φύλλα, η μεταχείριση TSP-AMF παρουσιάζει σημαντική αύξηση. Οι Al Karaki et Hammand (2001) στο πείραμα τους αναφέρουν, στην περίπτωση που τα φυτά δεν καταπονούνται από αλατότητα, οι συγκεντρώσεις νατρίου των καρπών των φυτών που εμβολιάστηκαν με AMF αλλά και οι προσλήψεις νατρίου από τους καρπούς δεν διέφεραν σημαντικά από μη εμβολιασμένα φυτά. Ο Al-Karaki (2000) έδειξε πως οι συγκεντρώσεις νατρίου των βλαστών σε φυτά εμβολιασμένα με AMF, σε συνθήκες που τα φυτά δεν καταπονούνται από αλατότητα, ήταν μικρότερες σε σχέση με αυτές των μη εμβολιασμένων, ενώ η πρόσληψη νατρίου των εμβολιασμένων με AMF φυτών δεν διαφέρουν σημαντικά από τα μη εμβολιασμένα. Στο μείγμα έδαφος-compost, η επέμβαση Phytate-AMF σημείωσε σημαντική μείωση στη συγκέντρωση νατρίου στα φύλλα σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ στην πρόσληψη νατρίου από τα φύλλα δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά ανεξαρτήτως της πηγής φωσφόρου. Οι Alloush et al (2000) δεν παρατήρησαν κάποιες σημαντικές αλλαγές στη συγκέντρωση του νατρίου.

Στο έδαφος, οι μεταχειρίσεις TSP-BAC1, TSP-BAC2 και Phytate-BAC2 σημειώνουν σημαντικά υψηλές τιμές πρόσληψης νατρίου από τα φύλλα και στις υπόλοιπες μεταχειρίσεις δεν υπάρχει σημαντική διαφορά. Οι Abd El-Azeem et al. (2012) στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν 3 βακτηριακά στελέχη και παρατήρησαν ότι τα φύλλα (shoot) των φυτών εμβολιασμένων ξεχωριστά με τα 3 βακτηριακά στελέχη σε συνθήκες που δεν καταπονούνται από την αλατότητα δεν διέφεραν σημαντικά από τον μάρτυρα. Στο μείγμα έδαφος-compost οι μεταχειρίσεις TSP-BAC1 και RP-BAC1 παρουσιάζουν υψηλές σημαντικά τιμές συγκέντρωσης νατρίου στα φύλλα, η μεταχείριση Phytate-BAC2 χαμηλή τιμή συγκέντρωσης, ενώ οι υπόλοιπες μεταχειρίσεις με τα δύο μείγματα βακτηρίων δεν διαφέρουν σημαντικά. Στην πρόσληψη νατρίου από τα φύλλα μόνο οι μεταχειρίσεις RP-BAC1 και RP-BAC2 διαφέρουν σημαντικά από τον μάρτυρα. Οι Panwar et al. (2016) σε φυτά ροβίτσας (mung beans), σε συνθήκες που δεν καταπονούνται από την αλατότητα, παρατήρησαν ότι τα εμβολιασμένα φυτά με PGPR (plant growth promoting rhizobacteria) δεν διέφεραν σημαντικά από τα μη εμβολιασμένα στη συγκέντρωση νατρίου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας υπόψιν τα αποτελέσματα του πειράματος μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Στην περίπτωση του εδάφους η χρήση του ανόργανου λιπάσματος βοήθησε στην ανάπτυξη των φυτών, στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών αλλά και στην παροχή φωσφόρου στα φυτά.
- Η χρήση rock phosphate δεν επέφερε θετικά αποτελέσματα στη θρέψη των φυτών, λόγω του χαμηλού ρυθμού διαλυτοποίησης για τις δεδομένα εδαφικές συνθήκες (αλκαλικές). Από τα αποτελέσματα του πειραματισμού χρήση rock phosphate σε εδάφη με ουδέτερο ή αλκαλικό pH φαίνεται ότι δεν ενδείκνυται.
- Τα φυτά με πηγή φωσφόρου Phytate είχαν παραπλήσια αποτελέσματα με τα φυτά που είχαν ως πηγή φωσφόρου TSP.
- Οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, δεν προσέφεραν συστηματικά θετικές επιδράσεις στα φυτά. Γενικώς, οι μεταχειρίσεις των φυτών ανεξαρτήτως πηγής φωσφόρου μαζί με τους μικροοργανισμούς δεν διέφεραν, πλην εξαιρέσεων που αξίζει να μελετηθούν περαιτέρω, από τους μάρτυρες.
- Στο μείγμα εδάφους-compost, το compost φαίνεται πως αποτελεί σημαντική πηγή θρεπτικών στοιχείων. Τα φυτά με RP στο μείγμα αναπτύχθηκαν πολύ καλύτερα σε σχέση με αυτά του εδάφους. Αυτό σημαίνει πως το compost παρείχε θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών.
- Γενικώς, όπως και στην περίπτωση του εδάφους, έτσι και στο μείγμα τα αποτελέσματα μεταξύ των πηγών φωσφόρου TSP και Phytate είναι παραπλήσια και οι μικροοργανισμοί, πλην εξαιρέσεων, δεν είχαν κάποια συστηματικά θετική επίδραση.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

5.1. Ξενόγλωση Βιβλιογραφία

Abbasi, M.K., Musa, N., & Manzoor, M. (2015). Mineralization of soluble P fertilizers and insoluble rock phosphate in response to phosphate-solubilizing bacteria and poultry manure and their effect on the growth and P utilization efficiency of chilli (*Capsicum annum* L.), *Biogeosciences* 12, 4607–4619.

Abbasi, M.K. & Manzoor, M. (2018). Biosolubilization of phosphorus from rock phosphate and other P fertilizers in response to phosphate solubilizing bacteria and poultry manure in a silt loam calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 181, 345-356.

Abd El-Azeem, S.A.M., Elwan, M.W.M, Sung, JK. & Ok, Y.S. (2012). Alleviation of Salt Stress in Eggplant (*Solanum melongena* L.) by Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43, 1303-1315.

Al-Karaki, G.N. & Hammad, R. (2001). MYCORRHIZAL INFLUENCE ON FRUIT YIELD AND MINERAL CONTENT OF TOMATO GROWN UNDER SALT STRESS. *Journal of Plant Nutrition* 24, 1311-1323.

Al-Karaki, G.N. (2002). BENEFIT, COST, AND PHOSPHORUS USE EFFICIENCY OF MYCORRHIZAL FIELD-GROWN GARLIC AT DIFFERENT SOIL PHOSPHORUS LEVELS. *Journal of Plant Nutrition* 25, 1175-1184.

Ali, M.A., Ajaz, M.M., Rizwan, M., Qayyum, M.F., Arshad, M., Hussain, S., Ahmad, N. & Qureshi, M.A. (2020). Effect of biochar and phosphate solubilizing bacteria on growth and phosphorus uptake by maize in an Aridisol. *Arabian Journal of Geosciences* 13, 333.

Alloush, G.A., Zeto, S.K. & Clark, R.B. (2000). Phosphorus source, organic matter, and arbuscular mycorrhiza effects on growth and mineral acquisition of chickpea grown in acidic soil. *Journal of Plant Nutrition* 23, 1351-1369.

Alloush, G.A, & Clark R.B. (2001). MAIZE RESPONSE TO PHOSPHATE ROCK AND ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN ACIDIC SOIL. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 231-254.

Barr, H.D., & Weatherley, P.E. (1962). A Re-Examination of the Relative Turgidity Techniques for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15, 413-428.

Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral, R., (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* 100, 5444-5453.

Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant – fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications* 1, 1-11.

Bünemann, E., Oberson, A. & Frossard, E. (2011). Phosphorus in Action.

California Compost Quality Council (CCQC) (2001). Compost Maturity Index, Technical Report.

Carter, M.R., & Gregorich, E.G. (2008). *Soil Sampling and Methods of Analysis* 2nd edition.

- Dalai, R.C. (1977). Soil Organic Phosphorus. *Advances in Agronomy*. 29, 83-117.
- Dick, R.P. (2011). *Methods of Soil Enzymology*.
- Ditta, A., Muhammad, J., Imtiaz, M., Mehmood, S., Qian, Z. & Tu, S. (2018). Application of rock phosphate enriched composts increases nodulation, growth and yield of chickpea. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 7, 33-40.
- El-Sherbeny, T.M.S., Mousa, A.M. & El- Sayed, ES.R. (2022). Use of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization to improve the yield of onion (*Allium cepa* L.) plant. *Saudi Journal of Biological Sciences* 29, 331-338.
- Emami, S., Alikhani, H.A., Pourbabae, A.A., Etesami, H., Motasharezadeh, B. & Sarmadian, F. (2020). Consortium of endophyte and rhizosphere phosphate solubilizing bacteria improves phosphorous use efficiency in wheat cultivars in phosphorus deficient soils. *Rhizosphere* 14, 100196.
- Estrada-Bonilla, G.A., Durrer, A. & Cardoso, E.J.B.N. (2020). Use of compost and phosphate-solubilizing bacteria affect sugarcane mineral nutrition, phosphorus availability, and the soil bacterial community. *Applied Soil Ecology* 157, 103760.
- Etesami, H., and Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 156, 225–246.
- Fredeen, A.L., Rao, I.M., & Terry N. (1989). Influence of Phosphorus Nutrition on Growth and Carbon Partitioning in *Glycine max*. *Plant Physiology* 89, 225-230
- Gemenet, D.C., Hash, C.T., Sanogo, M.D., Sy, O., Zangre, R.G., Leiser, W.L. & Haussmann, B.I.G. (2015). Phosphorus uptake and utilization efficiency in West African pearl millet inbred lines. *Field Crops Research*. 171, 54–66.
- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology*. 60, 579–598.
- Hermans, C., Hammond, J.P., White, P.J. & Verbruggen N. (2006). How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends in Plant Science* 11, 610-617.
- Hoagland, D.R. & Arnon, D.I. (1938). The water culture method for growing plants without soil. *CALIFORNIA AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION Circular* 347
- Jacob, J. & Lawlor, D.W. (1991). Stomatal and Mesophyll Limitations of Photosynthesis in Phosphate Deficient Sunflower, Maize and Wheat Plants. *Journal of Experimental Botany* 42, 1003-1011.
- Jakobsen, I., Gazey, C., and Abbott, L. K. (2001). Phosphate transport by communities of arbuscular mycorrhizal fungi in intact soil cores. *New Phytologist* 149, 95–103.
- Jiang, F., Zhang, L., Zhou, J., Georgeand, T.S., Feng, G. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance mineralisation of organic phosphorus by carrying bacteria along their extraradical hyphae. *New Phytologist* 230, 304 – 315.
- Khan, M. S., Zaidi, A., and Wani, P. A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture—a review. *Agronomy Sustainable for Development*. 27, 29–43.

Koide, R.T. and Kabir, Z. (2000). Extraradical hyphae of the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* can hydrolyse organic phosphate. *New Phytologist* 148, 511-517.

Leiser, W.L., Rattunde, H.F., Weltzien, E., Haussmann, B.G. (2014). Phosphorus uptake and use efficiency of diverse West and Central African sorghum genotypes under field conditions in Mali. *Plant and Soil* 377, 383–394.

Lindsay, W.L. & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of American Journal* 42, 421-428.

Liu, M., Che, Y., Wang, L., Zhao, Z., Zhang, Y., Wei, L. & Xiao Y. (2019). Rice straw biochar and phosphorus inputs have more positive effects on the yield and nutrient uptake of *Lolium multiflorum* than arbuscular mycorrhizal fungi in acidic Cd-contaminated soils. *Chemosphere* 235, 32-39.

Lott, N.A.J., Bojarski, M., Kolasa, J., Batten, D.G. & Campbell L.C. (2009). A review of the phosphorus content of dry cereal and legume crops of the world. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology* 8, 351-370.

Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* 3rd edition.

Martinez, O.A, Crowley, D.E., Mora, M.L. & Jorquera, M.A. (2015). Short-term study shows that phytate-mineralizing rhizobacteria inoculation affects the biomass, phosphorus (P) uptake and rhizosphere properties of cereal plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 15, 153-166.

Melesse, A.M., Abteu, W. & Senay, G. (2019). *Extreme Hydrology and Climate Variability*.

Mendiburu, F.D. (2015). *Statistical Procedures for Agricultural Research*.

Mills, H.A., & Jones, J.B. (1996). *Plant Analysis Handbook II: A Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide*.

Mohamed, A.A, Eweda, W.E.E., Heggo, A.M. & Hassan E.A. (2014). Effect of dual inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and sulphur-oxidising bacteria on onion (*Allium cepa* L.) and maize (*Zea mays* L.) grown in sandy soil under greenhouse conditions. *Annals of Agriculture Sciences* 59, 109-118.

Murphy, J., & Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.

Ockenden, I., Dorsch, A.J., Reid Marcia M., Lin, L., Grant, K.L., Raboy, V. & Lott, N.A.J. (2004). Characterization of the storage of phosphorus, inositol phosphate and cations in grain tissues of four barley (*Hordeum vulgare* L.) low phytic acid genotypes. *Plant Science* 167, 1131-1142.

Panwaar, M., Tewari, R. & Nayyar, H. (2016). Native halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria *Enterococcus* and *Pantoea* sp. improve seed yield of Mungbean (*Vigna radiata* L.) under soil salinity by reducing sodium uptake and stress injury. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 22, 445-459.

Pepe, A., Giovannetti, M. & Sbrana, C. (2020). Appressoria and phosphorus fluxes in mycorrhizal plants: connections between soil-and plant-based hyphae. *Mycorrhiza* 30, 589–600.

Prakash, J., Arora, N.K. (2019). Phosphate-solubilizing *Bacillus* sp. enhances growth, phosphorus uptake and oil yield of *Mentha arvensis* L. *3 Biotech* 9, 126.

Rajan, S.S.S., Watkinson, J.H., & Sinclair A.G. (1996). Phosphate Rocks for Direct Application to Soils. *Advances in Agronomy* 57, 77-159.

Rao, I.M. & Terry, N. (1989). Leaf Phosphate Status, Photosynthesis, and Carbon Partitioning in Sugar Beet: I. Changes in Growth, Gas Exchange, and Calvin Cycle Enzymes. *Plant Physiology* 90, 814-819.

Rufty Jr, T.W., MacKown, C.T., & Israel, D.W. (1990). Phosphorus Stress Effects on Assimilation of Nitrate. *Plant Physiology* 94, 328-333.

Sade, N., Galkin, E., & Moshelion M. (2015). Measuring Arabidopsis, Tomato and Barley Leaf Relative Water Content (RWC). 5, 1451

Sandana, P. (2016). Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. *European Journal of Agronomy* 76, 95-106.

Sarkar, D., Sankar, A., Devika, O.S., Singh, S., Shikha, Parijar, M., Rakshit, A., Sayyed, R.Z., Gafur, A., Ansari, M.J., Danish, S., Fahad, S. & Datta, R. (2021). Optimizing nutrient use efficiency, productivity, energetics, and economics of red cabbage following mineral fertilization and biopriming with compatible rhizosphere microbes. *Science Report* 11, 15680.

Sharif, M., & Claassen, N. (2011). Action mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in phosphorus uptake by *Capsicum annuum* L. *Pedosphere* 21, 502–511.

Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., and Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus* 2:587.

Smith, S.E. & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd edition.

Smith, S. E., Jakobsen, I., Grønlund, M., & Smith, F.A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology*. 156, 1050–1057.

Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., & Sumner, M.E. (1996). *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5.3.

Stitt, M. & Quick, W.P. (1989). Photosynthetic carbon partitioning: its regulation and possibilities for manipulation. *Physiologia Plantarum* 77, 633-641.

Van Straaten, P. (2002). *Rocks for Crops: Agrominerals of Sub-Saharan Africa*.

Wang, X-X., Hoffland, E., Feng, G. & Kuyper, T.W. (2017). Phosphate Uptake from Phytate Due to Hyphae-Mediated Phytase Activity by Arbuscular Mycorrhizal Maize. *Front. Plant Sci.* 8:684.

White, P.J. & Hammond, J.P. (2008). *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions*.

Wickham, H. (2016). *ggplot2: elegant graphics for data analysis*. Springer.

Yuan, Z., Cao, Q., Zhang, K., Ata-Ul-Karim, S.T., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W. & Liu, X. (2016). Optimal Leaf Positions for SPAD Meter Measurement in Rice. *Frontiers in Plant Science*.7:719.

Zhang, S., Wang, L., Ma, F., Zhang, X. & Fu, D. (2016). Arbuscular mycorrhiza improved phosphorus efficiency in paddy fields. *Ecological Engineering* 95, 64-72.

Zhang, F., Liu, M., Li, Y., Che, Y., Xiao, Y. (2019). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa*. *Science of Total Environment* 655, 1150-1158.

Zai, X.M., Fan, J.J., Hao, Z.P., Liu, X.M. & Zhang, W.X. (2021). Effect of co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing fungi on nutrient uptake and photosynthesis of beach palm under salt stress environment. *Sci Rep* 11, 5761.

5.2. Ελληνική Βιβλιογραφία

Ολύμπιος, X.M. (2015). Η τεχνική της καλλιέργειας των υπαίθριων καλλιεργειών. Αθήνα.

Brady, N.C. & Weil, R.R. (2015). Η φύση και οι ιδιότητες του εδάφους. 14th edition. (Ελληνική Επιμέλεια)

5.3. Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

www.fao.org