



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

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΟΥΔΩΝ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΓΕΩΡΓΙΑ,
ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΦΥΤΩΝ & ΣΤΗΝ ΑΓΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Μελέτη της επίδρασης των rgrr στα μορφολογικά και φυσιολογικά
χαρακτηριστικά του αραβοσίτου (*Zea mays L.*)



Δημήτριος Κ. Τσουβαλάς

Επιβλέπων Καθηγητής:
Μπιλάλης Δημήτριος, Καθηγητής ΓΠΑ

ΑΘΗΝΑ 2022

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

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Μελέτη της επίδρασης των pgpr στα μορφολογικά και φυσιολογικά
χαρακτηριστικά του αραβοσίτου (*Zea mays L.*)

Study of the effect of pgpr on the morphological and physiological
characteristics of (*Zea mays L.*)

Δημήτριος Κ. Τσουβαλάς

Εξεταστική επιτροπή:

Μπιλάλης Δημήτριος, Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)

Κακαμπούκη Ιωάννα, Επίκουρος καθηγήτρια ΓΠΑ

Τραυλός Ηλίας, Αναπληρωτής καθηγητής ΓΠΑ

Μελέτη της επίδρασης των pgrp στα μορφολογικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά του αραβοσίτου (*Zea mays L.*)

ΠΜΣ Καινοτόμες Εφαρμογές στην Αειφορική Γεωργία, στη Βελτίωση των φυτών και στην Αγρομετεωρολογία
Τμήμα Φυτικής Παραγωγής
Εργαστήριο Γεωργίας

Περίληψη

Η συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού της Γης έχει ως αποτέλεσμα την ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση των επισιτιστικών αναγκών. Από τη μία πλευρά, για την κάλυψη των παραπάνω αναγκών, τα τελευταία χρόνια, τα χημικά λιπάσματα εφαρμόζονται με αλόγιστο ρυθμό, λόγω των επιβεβαιωμένων ιδιοτήτων τους ως προς την προαγωγή της φυτικής ανάπτυξης αλλά και της τελικής απόδοσης των καλλιεργειών. Από την άλλη πλευρά, η ανεξέλεγκτη χρήση των χημικών έχει προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις, τόσο στο περιβάλλον, όσο και στην ανθρώπινη υγεία. Για το λόγο αυτό, η αναζήτηση νέων και πιο φιλικών προς το περιβάλλον καλλιεργητικών μεθόδων, αποτελεί προτεραιότητα για την επιστημονική κοινότητα. Μία εκ των μεθόδων αυτών περιλαμβάνει τη χρήση βακτηρίων που σχετίζονται την προαγωγή της φυτικής ανάπτυξης. Οι ευεργετικές ιδιότητες των PGPB (Plant Growth Promoting Bacteria) έχουν επαληθευτεί από πληθώρα ερευνητών, ενώ όλο και περισσότερες μελέτες εστιάζουν στην εύρεση καινοτόμων και πιο ανθεκτικών στελεχών. Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται την επίδραση μιας ομάδας ριζοβακτηρίων φυτικής ανάπτυξης (*Bacillus subtilis*, *Bacillus mojavensis*, *Bacillus thuringiensis* και *Bacillus amyloliquefaciens*) με τη συμβολή δυο διαφορετικών carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθο) στα μορφολογικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά, αλλά και την απόδοση του αραβοσίτου (*Zea mays L.*). Η απαρχή του πειράματος έλαβε χώρα τον Απρίλιο του 2022 και τελείωσε το Σεπτέμβριο του 2022, δηλαδή διάρκειας 5 μηνών. Βελτίωση στα μορφολογικά χαρακτηριστικά σημειώθηκε κατά τη χορήγηση σχεδόν κάθε βιοδιεγέρτη και πιο αναλυτικά, κατά την τελευταία μέτρηση του νωπού βάρους των φυτών, μεταξύ των επεμβάσεων, ξεχώρισαν τα στελέχη των *Bacillus amyloliquefaciens* και *Bacillus thuringiensis* με υγρό διάλυμα ως carrier, αυξάνοντας μέχρι και 12% περισσότερο από ότι ο μάρτυρας.

Παράλληλα, βελτίωση σημειώθηκε και κατά τις μετρήσεις του ξηρού βάρους και συγκεκριμένα, κατά την τελευταία μέτρηση, το στέλεχος του *Bacillus mojavensis* οδήγησε σε αύξηση της τάξεως του 22% περισσότερο από το μάρτυρα. Εξίσου σημαντικές παρατηρήθηκαν οι αυξήσεις και στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών αραβοσίτου. Σημαντικά επηρεάστηκε ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των φυτών από κάθε σχεδόν βιοδιεγέρτη, με πιο αξιοσημείωτη την επέμβαση που χορηγήθηκε το Z3 στέλεχος του *Bacillus subtilis* με υγρό διάλυμα, καταγράφοντας ποσοστιαία αύξηση 21% από το μάρτυρα, ενώ το ίδιο δεν ισχύει κατά τη χορήγηση του 548 στελέχους του *Bacillus subtilis*, καθώς είχε αρνητική επιρροή στο ρυθμό φωτοσύνθεσης. Θετική ήταν η επίδραση σχεδόν κάθε βιοδιεγέρτη στο ρυθμό διαπνοής των φυτών αραβοσίτου, με την επέμβαση, όπου χορηγήθηκε το στέλεχος Z3 του *Bacillus subtilis* με ζεόλιθο σημειώνοντας αύξηση 22% συγκριτικά με το μάρτυρα.

Στη συνέχεια, η στοματική αγωγιμότητα και η περιεχόμενη χλωροφύλλη δέχτηκαν θετική επιρροή μετά από τη χορήγηση σχεδόν κάθε βιοδιεγέρτη. Αφενός, ευεργετικά με την υψηλότερη επίδοση έδρασε το στέλεχος 557 του *Bacillus subtilis* με υγρό διάλυμα, οδηγώντας

σε αύξηση 42% από τη στοματική αγωγιμότητα που σημείωσε ο μάρτυρας και αφετέρου το *Bacillus amyloliquefaciens* οδηγώντας σε αύξηση 37% από την περιεχόμενη χλωροφύλλη του μάρτυρα. Τέλος, σημαντική ήταν και η βελτίωση της απόδοσης των επεμβάσεων όπου χορηγήθηκε PGPB και συγκεκριμένα κατά την επέμβαση του στελεχούς 548 του *Bacillus subtilis*, οδηγώντας σε αύξηση 18% σε σύγκριση με το μάρτυρα. Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση των παραπάνω βιοδιεγερτών είχε θετική επιρροή στην ανάπτυξη των φυτών αραβοσίτου, ενώ προτείνεται η έρευνα περισσότερων στελεχών, ώστε να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός που θα επιφέρει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Επιστημονική περιοχή: Βιολογική γεωργία

Λέξεις-Κλειδιά: Αειφορία, βιοδιεγέρτες, ριζοβακτήρια φυτικής ανάπτυξης, αραβόσιτος, νωπό βάρος, ξηρό βάρος, ρυθμός φωτοσύνθεσης, χλωροφύλλη, απόδοση.

Study of the effect of pgpr on the morphological and physiological characteristics of (*Zea mays L.*)''

MSc Innovative Applications in Sustainable Agriculture, Plant Breeding and Agrometeorology

Faculty of Crop Science

Laboratory of Agronomy

Abstract

The continuous growth of the world's population has resulted in ever-increasing food needs. On the one hand, to meet these needs, in recent years chemical fertilizers have been applied at an indiscriminate rate, due to their proven properties in promoting plant growth and the final yield of crops. On the other hand, the uncontrolled use of chemicals has caused adverse effects on both the environment and human health. Hence, the research for new and more environmentally friendly cultivation methods is considered as a priority for the scientific community. One of these methods involves the use of bacteria associated with the promotion of plant growth. The beneficial properties of PGPB (Plant Growth Promoting Bacteria) have been verified by a vast amount of researchers, and even more studies are focusing on finding innovative and more resistant strains. This study focuses on the effect of a group of plant growth rhizobacteria (*Bacillus subtilis*, *Bacillus mojavensis*, *Bacillus thuringiensis* and *Bacillus amyloliquefaciens*) with the contribution of two different carriers (liquid solution and zeolite) on the morphological and physiological characteristics and yield of maize (*Zea mays L.*). The start of the experiment took place in April 2022 and ended in September 2022, a duration of 5 months. Improvement in morphological characteristics was noted during the application of almost every biostimulant and at the last measurement of fresh plant weight, *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus thuringiensis* strains with liquid solution resulted in an increase up to 12% more than the control. At the same time, improvement was also observed during dry weight measurements and during the last measurement, the *Bacillus mojavensis* strain led to an increase of up to 22% more than the control. Similarly significant increases were observed in the physiological characteristics of maize plants. Plant photosynthetic rate was significantly affected by almost every biostimulant, the most notable being the treatment administered with the Z3 strain of *Bacillus subtilis* in liquid solution, recording a percentage increase of 21% from the control, while the same did not happen when the 548 strain of *Bacillus subtilis* was added along with liquid solution, as it had a negative influence on photosynthetic rate. The effect of almost every biostimulant on transpiration rate of maize plants was positive, with the plot, where *Bacillus subtilis* strain Z3 with zeolite was added, showing an increase of 22% compared to the control.

Furthermore, stomatal conductance and chlorophyll content received a positive influence after the addition of almost every biostimulant. *Bacillus subtilis* strain 557 in liquid solution acted beneficially with the highest performance, leading to an increase of 42% from the stomatal conductivity recorded by the control. Additionally, *Bacillus amyloliquefaciens* leading to an increase of 37% from the chlorophyll content of the control.

Finally, there was also a significant improvement in the performance of the yield. Plants treated with *Bacillus subtilis* strain 548, along with liquid solution as carrier, led to an 18% increase compared to the control. In conclusion, the incorporation of these biostimulants had a

positive influence on the growth of maize plants, and it is recommended that more strains should be studied in order to find the appropriate combination that will bring about the optimum result.

Scientific area: Organic farming

Key-words: Sustainability, biostimulants, plant growth promoting bacteria, maize, fresh weight, dry weight, photosynthetic rate, chlorophyll content, yield.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους, οι οποίοι συνέβαλαν με το δικό τους ξεχωριστό τρόπο, άμεσα ή/και έμμεσα στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Μπιλάλη Δημήτριο για την αμέριστη εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου και τις γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη την ακαδημαϊκή χρονιά, αλλά και κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής. Ακολουθώς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα δυο μέλη της τριμελούς εξεταστικής και συμβουλευτικής επιτροπής, κυρία Κακαμπούκη Ιωάννα και τον κύριο Τραυλό Ηλία για το γνωστικό υπόβαθρο που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια παρακολούθησης του μεταπτυχιακού προγράμματος. Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ, τόσο στην κυρία Ευθυμιάδου Ασπασία όσο και στον κύριο Κατσένιο Νικόλαο, αφενός για τη συνεχή επιστημονική τους καθοδήγηση κατά τη διεξαγωγή μέχρι και το πέρας της συγκεκριμένης μελέτης και αφετέρου για τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχαν.

Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένεια μου αλλά και τους φίλους μου, των οποίων η στήριξη ήταν κομβικής σημασίας σε κάθε στάδιο της ακαδημαϊκής μου σταδιοδρομίας, μέχρι και σήμερα.

Με την άδειά μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της.

Την είδε που έστριβε στην γωνία.

Μόλις είχαν φιληθεί
και αυτή βρήκε στα κρυφά
την ευκαιρία
να αγοράσει
ένα ψημένο καλαμπόκι
διευρύνοντας
με άμυλο και αλάτι
τον γευστικό της ορίζοντα.

(Το σθένος των λέξεων, Αξελός Λουκάς)

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	13
1.1.	Γενικά.....	13
1.1	Στρεμματικές αποδόσεις	15
1.2	Ταξινόμηση.....	16
1.3	Χρήσεις	17
1.3.1	Ανθρώπινη Διατροφή.....	18
1.3.2	Ζωοτροφή.....	20
1.3.3	Βιοκαύσιμο	20
1.3.4	Άλλες χρήσεις	20
1.4	Χημική Σύσταση.....	21
1.5	Μορφολογικά χαρακτηριστικά	23
1.5.1	Ριζικό σύστημα	23
1.5.2	Βλαστός.....	23
1.5.3	Φύλλα.....	24
1.5.4	Αναπαραγωγικά Όργανα.....	24
1.5.5	Καρπός.....	25
1.6	Στάδια ανάπτυξης	25
1.7	Προσαρμοστικότητα	27
1.7.1	Θερμοκρασία	27
1.7.2	Ανάγκες σε άρδευση	28
1.7.3	Έδαφος.....	28
1.8	Βακτήρια Ενίσχυσης Φυτικής Ανάπτυξης (Plant Growth Promoting Bacteria).....	29
1.8.1	Γενικά.....	29
1.8.2	Μηχανισμοί δράσης των PGPR	30
1.8.3	Τρόποι εφαρμογής των PGPR	34
1.8.4	Μελέτες για την επίδραση των PGPR σε καλλιέργεια αραβοσίτου	34
1.8.5	Μελέτη για την επίδραση των PGPR σε διάφορες καλλιέργειες.....	36
1.9	PGPR Σκευάσματα	37
1.10	Μεταφορείς-Carriers.....	38
1.10.1	Υδατικό διάλυμα.....	38
1.10.2	Ζεόλιθος.....	39

1.11	Σκοπός του πειράματος.....	40
2	Υλικά και μέθοδοι	42
2.1	Περιοχή διεξαγωγής πειράματος και πειραματικός σχεδιασμός.....	42
2.2	Απομόνωση και καλλιέργεια των PGP βακτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν	45
2.3	Μετρήσεις	46
2.4	Στατιστική Ανάλυση.....	48
3	Αποτελέσματα	49
3.1	Μορφολογικές Μετρήσεις	49
	Νωπό Βάρος Φυτών 54 ΗΜΣ	49
	Νωπό Βάρος Φυτών 86 ΗΜΣ	50
	Νωπό Βάρος Φυτών 134 ΗΜΣ	51
	Ξηρό Βάρος Φυτών 54 ΗΜΣ.....	52
	Ξηρό Βάρος Φυτών 86 ΗΜΣ.....	53
	Ξηρό Βάρος Φυτών 134 ΗΜΣ.....	54
3.2	Φυσιολογικές Μετρήσεις	56
	Ρυθμός φωτοσύνθεσης.....	56
	Ρυθμός διαπνοής	57
	Στοματική αγωγιμότητα.....	58
	Συγκέντρωση χλωροφύλλης	60
3.3	Μετρήσεις Απόδοσης.....	62
4	Συζήτηση	64
5	Συμπεράσματα	70
6	Βιβλιογραφία	73

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1 Ποσότητα παραγωγής αραβοσίτου σε τόνους ανά χώρα (FAOSTAT 2021).....	13
Εικόνα 2 Διάγραμμα απεικόνισης της παγκόσμιας παραγωγής αραβοσίτου και απόδοσης των καλλιεργειών αραβοσίτου από το 2000-2020 (FAOSTAT,2021)	15
Εικόνα 3 Οι δέκα μεγαλύτερες χώρες παραγωγού αραβοσίτου παγκοσμίως (FAOSTAT. 2021)	16
Εικόνα 4 Ποσοστιαία κατανομή της παραγωγής αραβοσίτου ανά ήπειρο.(FAOSTAT, 2020) ..	16
Εικόνα 5 Στάδια ανάπτυξης αραβοσίτου (FAO, 2020).....	27
Εικόνα 6 Άμεσοι και έμμεσοι μηχανισμοί των PGPR (Mashabela et al., 2022)	34
Εικόνα 7 Σπόροι αραβοσίτου (υβρίδιο DKC 6980) (Προσωπικό αρχείο).....	42
Εικόνα 8 Χορήγηση ζεόλιθου στα φυτά αραβοσίτου (Προσωπικό αρχείο)	43

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1 Ταξινόμηση αραβοσίτου	17
Πίνακας 2 Ποσοστιαία προσεγγιστική χημική σύνθεση των κύριων τμημάτων των σπόρων αραβοσίτου (Watson & Ramstad, 1987)	21
Πίνακας 3 Χημική Σύσταση 100 g εδάδιμου αραβοσίτου (Rouf Shah et al., 2016).....	22
Πίνακας 4 Φυσικοχημικές ιδιότητες πειραματικού αγρού	45
Πίνακας 5 Συγκεντρώσεις των PGPB και των carriers που χορηγήθηκαν, η βέλτιστη οξύτητα και η παραγωγή αυξίνης	45

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

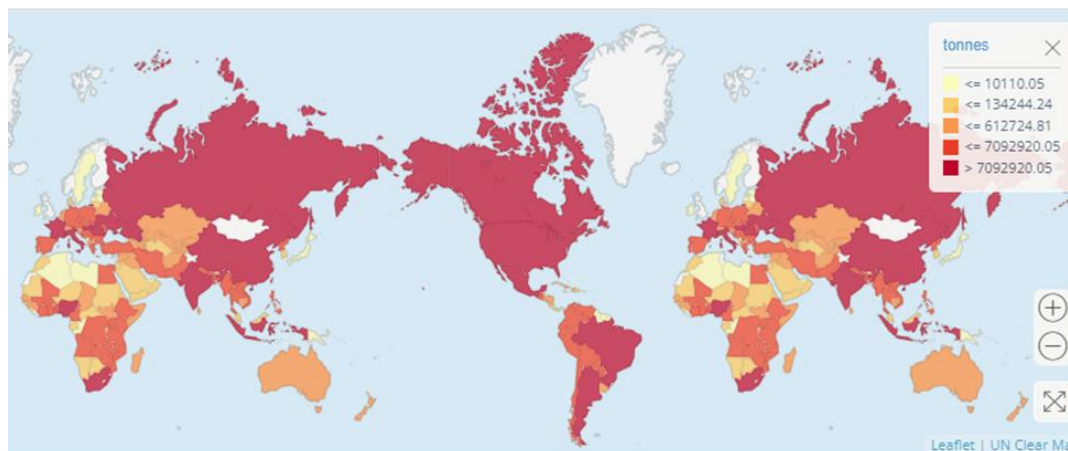
Διάγραμμα 1 Καιρικές συνθήκες αγρού (1).....	47
Διάγραμμα 2 Καιρικές συνθήκες αγρού (2).....	47
Διάγραμμα 3. Επίδραση στο νωπό Βάρος 54 ΗΜΣ.....	49
Διάγραμμα 4. Επίδραση στο νωπό Βάρος 86 ΗΜΣ.....	50
Διάγραμμα 5 Ε Επίδραση στο νωπό Βάρος 134 ΗΜΣ.	51
Διάγραμμα 6 Επίδραση στο ξηρό Βάρος 54 ΗΜΣ.	52
Διάγραμμα 7 Επίδραση στο ξηρό Βάρος 86 ΗΜΣ.....	53
Διάγραμμα 8 Επίδραση στο ξηρό Βάρος 134 ΗΜΣ.....	55
Διάγραμμα 9 Επίδραση στο ρυθμό φωτοσύνθεσης.....	56
Διάγραμμα 10 Επίδραση στο ρυθμό διαπνοής.....	57
Διάγραμμα 11 Επίδραση στη στοματική αγωγιμότητα.	58
Διάγραμμα 12 Επίδραση του παράγοντα PGPB στην περιεχόμενη χλωροφύλλη.....	60
Διάγραμμα 13 Επίδραση του παράγοντα Carrier (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στην περιεχόμενη χλωροφύλλη.....	61
Διάγραμμα 14 Επίδραση του παράγοντα PGPB στην απόδοση.....	62
Διάγραμμα 15 Επίδραση του παράγοντα Carrier στην απόδοση.....	63

1 Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Ο αραβόσιτος (*Zea Mays L.*) ανήκει στην οικογένεια των *Poaceae*, ενώ αποτελεί το μοναδικό είδος του γένους *Zea*. Η πρώτη επαφή του ανθρώπου με τον αραβόσιτο υπολογίζεται πως έγινε πριν από 7000 – 10000 χρόνια, Νότια του Μεξικού, αλλά και στην περιοχή της Γουατεμάλας. Ο αραβόσιτος εισήχθη και καθιερώθηκε ως μια από τις σημαντικότερες καλλιέργειες παγκοσμίως, μέχρι και σήμερα, από τον Κολόμβο το 1493. Τα οφέλη και οι δυνατότητες του αραβοσίτου αναγνωρίστηκαν από τις πρώτες κιόλας φορές που καλλιεργήθηκε. Για το λόγο αυτό διαδόθηκε άμεσα και αποτέλεσε μια από τις συνηθέστερες επιλογές καλλιέργειας, για κάθε παραγωγό, ανά τον κόσμο (Hallauer & Carena, 2009).

Ο αραβόσιτος ανήκει σε εκείνη την κατηγορία καλλιεργειών, μαζί με το ρύζι και το σιτάρι, των οποίων η συμμετοχή τους στην κάλυψη των επισιτιστικών αναγκών του ανθρώπου, είναι καταλυτική. Ωστόσο πέρα από τη συμμετοχή στην ανθρώπινη διατροφική πυραμίδα, τα προϊόντα αραβοσίτου απαντώνται επίσης και σε ζωοτροφές και σε καύσιμα. Δυο από τα χαρακτηριστικά που κάνουν την καλλιέργειά του ιδιαίτερα ξεχωριστή είναι ότι αφενός η προσαρμοστικότητά του είναι η μεγαλύτερη από κάθε άλλη καλλιέργεια και αφετέρου η μορφολογική και δομική ποικιλομορφία του (Gore et al., 2009; Springer et al., 2009; Tenaillon & Charcosset, 2011).



Εικόνα 1 Ποσότητα παραγωγής αραβοσίτου σε τόνους ανά χώρα (FAOSTAT 2021)

Ο αραβόσιτος θεωρείται C4 φυτό. Στην κατηγορία των C4 φυτών ανήκουν εκείνα τα φυτά των οποίων η πρώτη ένωση άνθρακα στη φωτοσύνθεση, αποτελείται από τέσσερα άτομα άνθρακα. Ακόμα, η απόδοση των C4 φυτών είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τα C3 φυτά. Επίσης, τα C4 φυτά προσαρμόζονται πιο εύκολα σε περιβάλλοντα με αντίξοες συνθήκες (υψηλές θερμοκρασίες, υδατικές καταπονήσεις). Επίσης, η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη στα C4 φυτά. Επομένως, αναμένεται να παρατηρηθούν μεγαλύτεροι ρυθμοί φωτοσύνθεσης και κατ' επέκταση υψηλότερες ικανότητες απόδοσης στα C4 φυτά (Fageria, 2016).

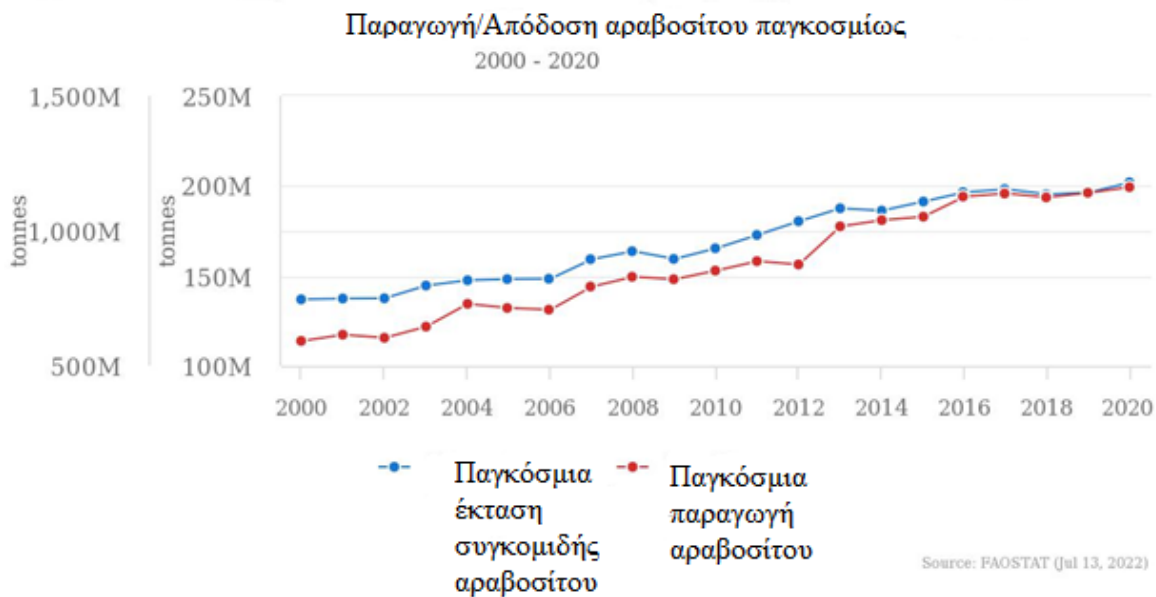
Καταλυτικό ρόλο στην εξέλιξη της καλλιέργειας του αραβοσίτου έπαιξε η πορεία του γενετικού υλικού, ξεκινώντας από τις ποικιλίες και μεταβαίνοντας στα υβρίδια. Συγκεκριμένα, στις Η.Π.Α., το 1950 είχε ήδη ολοκληρωθεί η παραπάνω μετάβαση, σε διάστημα μικρότερο από εκείνο της δεκαετίας. Εκατοντάδες μελέτες που εστίασαν στη μελέτη των υβριδίων του αραβοσίτου συνέβαλαν στην τελική προτίμηση των υβριδίων από τους παραγωγούς, καθώς τα αποτελέσματα που παρουσίασαν, σχετικά με κάποιες σημαντικές παραμέτρους, όπως η απόδοση και η αντοχή στη ξηρασία, απομάκρυνε τις αρχικές αμφιβολίες τους. Η εντατικότερη καλλιέργεια υβριδίων οδήγησε σε υψηλότερες και σταθερότερες τιμές των αποδόσεων, το οποίο οφείλεται κατά κύριο λόγο στην καλύτερη προσαρμοστικότητα σε όλο και περισσότερα οικοσυστήματα, στη μεγαλύτερη αντοχή τους σε περιόδους ξηρασίας και στην ευκολότερη συγκομιδή τους κατά τη συγκομιδή (Crabb, 1947).

Η δυνατότητα των βιοτύπων να προσαρμόζονται σε πολλά και διαφορετικά κλίματα, είναι ξεχωριστή. Επομένως, για την επιλογή του καταλληλότερου γενετικού υλικού, θα πρέπει να μελετηθούν αρχικά οι συνθήκες του εκάστοτε οικοσυστήματος. Ορισμένα από τα βοτανικά χαρακτηριστικά του αραβοσίτου, καθώς και ο βιολογικός κύκλος συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με την προσαρμοστικότητα και την ορθή καλλιεργητική τεχνική (Papastylianou Papasotiriou et al., 2016).

Σε εγχώριο επίπεδο, ο αραβόσιτος καλλιεργείται κυρίως σε περιοχές της Μακεδονίας, της Θράκης, της κεντρικής Ελλάδας και της Πελοποννήσου (Paschalidis et al., 2015).

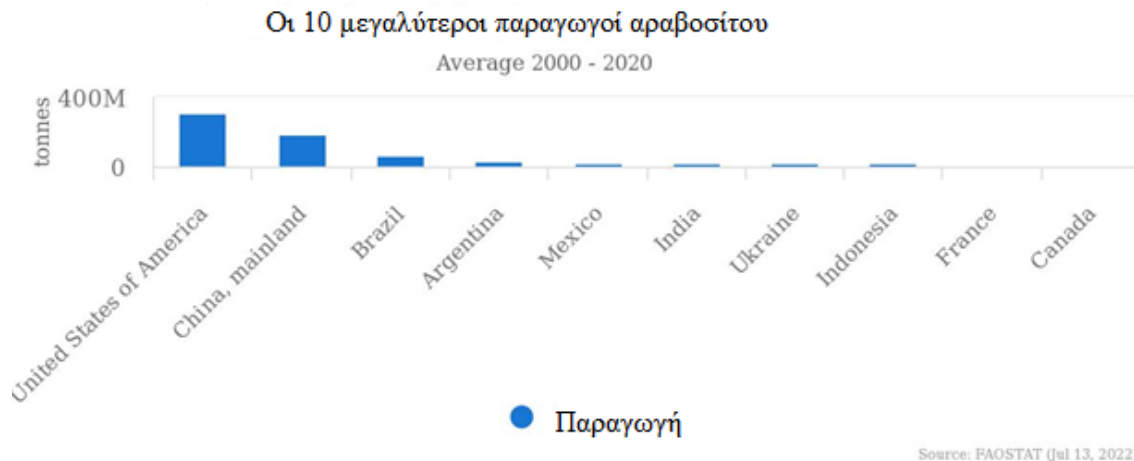
1.1 Στρεμματικές αποδόσεις

Σύμφωνα με στοιχεία που συλλέχθηκαν σχετικά με την παγκόσμια καλλιέργεια αραβοσίτου, το έτος 2020, παρουσίασαν ότι η συνολική παραγωγή που συγκομίστηκε, ξεπέρασε τους 1,1 δισεκατομμύρια τόνους αραβοσίτου στα 197 εκατομμύρια εκτάρια, όπου καλλιεργήθηκε. Η καλλιέργεια αραβοσίτου καταλαμβάνει το 38% της παγκόσμιας παραγωγής δημητριακών, υποδηλώνοντας την προτίμηση της από τους παραγωγούς (FAOSTAT 2020).



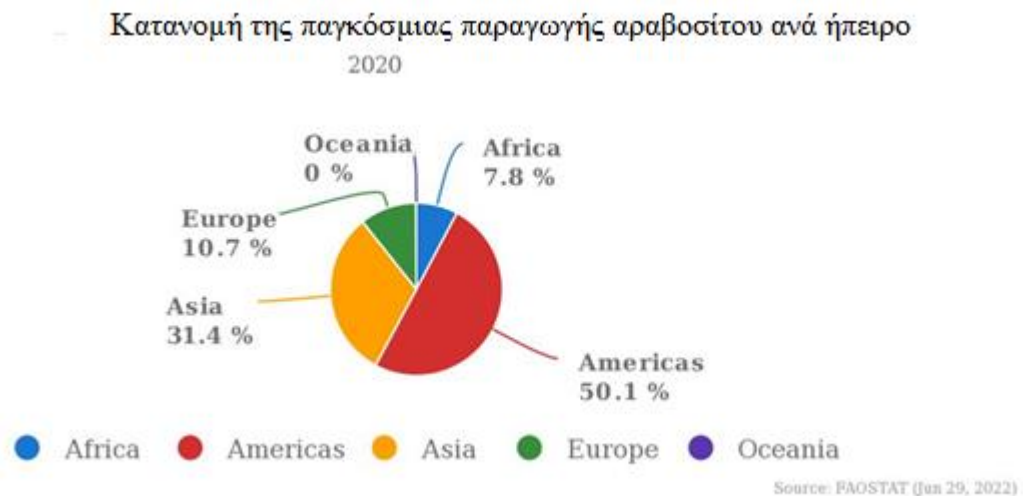
Εικόνα 2 Διάγραμμα απεικόνισης της παγκόσμιας παραγωγής αραβοσίτου και απόδοσης των καλλιεργειών αραβοσίτου από το 2000-2020 (FAOSTAT,2021)

Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής κατέχουν την πρώτη θέση σε παραγωγή καλαμποκιού, αφού το 2020 καταγράφηκε παραγωγή 360,2 εκατομμυρίων τόνων καλαμποκιού. Δεύτερη και τρίτη θέση κατέχουν η Κίνα και η Βραζιλία, όπου σημειώθηκε παραγωγή 260,7 και 104 εκατομμυρίων τόνων καλαμποκιού αντίστοιχα (FAOSTAT 2020).



Εικόνα 3 Οι δέκα μεγαλύτερες χώρες παραγωγού αραβοσίτου παγκοσμίως (FAOSTAT, 2021)

Στην Ελλάδα, η συνολική έκταση των αροτραίων καλλιεργειών για το έτος 2019 ανέρχεται στα 1705,01 χιλιάδες εκτάρια, εκ των οποίων τα 109,73 χιλιάδες εκτάρια σπάρθηκαν με αραβόσιτο (ELSTAT, 2019).



Εικόνα 4 Ποσοστιαία κατανομή της παραγωγής αραβοσίτου ανά ήπειρο. (FAOSTAT, 2020)

1.2 Ταξινόμηση

Ο αραβόσιτος ανήκει στη φυλή *Maydeae* ή *Tripsaceae*. Ως προς την οικογένεια, υπάγεται στα αγρωστώδη, γνωστά και ως *Poaceae* ή *Gramineae* και είναι το μοναδικό είδος του γένους

Zea. Τα φυτά της φυλής *Maydeae* περιλαμβάνουν 8 γένη, 5 ανατολικής και 3 αμερικάνικης προέλευσης. Από τα αμερικάνικα γένη, το πιο χαρακτηριστικό είναι το *Euchlaena*, το οποίο φυλογενετικά είναι το πλησιέστερο στο γένος *Zea*. Ο αραβόσιτος στη σύγχρονη εποχή θεωρείται αποτέλεσμα διασταυρώσεων μεταξύ του αρχικού απόγονου του αραβοσίτου και των δυο άλλων γενών, συμπέρασμα που έχει συνεισφέρει στην ετεροζυγωτία του φυτού (Καραμάνος Α., 1999).

Βασίλειο	<i>Plantae</i>
Υποβασίλειο	<i>Tracheobionta</i>
Υπερομοταξία	<i>Spermatophyta</i>
Συνομοταξία	<i>Magnoliophyta</i>
Ομοταξία	<i>Liliopsida</i>
Τάξη	<i>Cyperales</i>
Οικογένεια	<i>Poaceae</i>
Γένος	<i>Zea</i>
Είδος	<i>Zea mays</i>

Πίνακας 1 Ταξινόμηση αραβοσίτου

1.3 Χρήσεις

Ο αραβόσιτος χρησιμοποιείται κυρίως για τον καρπό του ως ζωοτροφή στις ανεπτυγμένες χώρες, ως βασικό συστατικό στην ανθρώπινη διατροφή κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες αλλά και για την παραγωγή βιομάζας. Οι κατάλληλοι βιότυποι αραβοσίτου, θα πρέπει να επιλέγονται ανάλογα με τη χρήση για την οποία θα προορίζεται το τελικό προϊόν.

Ανάλογα με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά, τη δομή και τις ιδιότητες που έχει το άμυλο των κόκκων, το καλαμπόκι κατατάσσεται σε επτά διαφορετικούς τύπους. Ο πιο δημοφιλής είναι ο οδοντοειδής αραβόσιτος - *Zea mays indentata* (**Dent corn**). Κύριο χαρακτηριστικό του κόκκου του οδοντοειδούς αραβοσίτου είναι η συσσώρευση του υαλώδους αμύλου στις παρείες του ενδοσπερμίου, αλλά και ο περιορισμός του αλευρώδους τόσο στην κεντρική περιοχή, όσο και στην κορυφή. Κατά την ωρίμανση, σχηματίζεται κοιλότητα στην περιοχή του κόκκου η οποία σε συνδυασμό με την επιμήκη και πεπλατυσμένη μορφή του κόκκου, προσδίδει μια μορφή δοντιού, στην οποία οφείλεται και το όνομα της κατηγορίας αυτής. Η ανάπτυξή τους είναι μεγάλη και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κατά πλειοψηφία για ενσίρωση. Ο συγκεκριμένος τύπος αραβοσίτου θεωρείται ο πιο διαδεδομένος και ο πιο παραγωγικός, σε παγκόσμιο επίπεδο.

Πέρα από τον οδοντοειδή αραβόσιτο υπάρχει επίσης και ο αλευρώδης αραβόσιτος - *Zea mays amylacea* (**Floury corn**), ο οποίος χρησιμοποιείται κύριως για την παρασκευή αλευριού. Επιπροσθέτως, ο σκληρόκοκκος αραβόσιτος - *Zea mays indurata* (**Flint corn**), ο οποίος ήταν πολύ διαδεδομένος τύπος στην Ελλάδα, αλλά με την εισαγωγή των αμερικάνικων υβριδίων, ο τύπος αυτός αντικαταστάθηκε σε μεγάλο βαθμό. Παράλληλα, υπάρχει ο μικρόκοκκος αραβόσιτος - *Zea mays everta* (**Pop-Corn**). Το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του τύπου αυτού είναι η έκρηξη των κόκκων, μόλις θερμανθούν αρκετά, αποδίδοντας μια λευκή μάζα, με όγκο τριάντα φορές μεγαλύτερο του αρχικού. Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στην πίεση που ασκούν οι εγκλωβισμένοι υδρατμοί, εντός του κόκκου. Καλλιεργείται σχεδόν αποκλειστικά στις Η.Π.Α. και χρησιμοποιείται για τη διατροφή του ανθρώπου. Στη συνέχεια, απαντάται ο σακχαρώδης αραβόσιτος - *Zea mays saccharate* (**Sweet Corn**), οι κόκκοι του οποίου προορίζονται αποκλειστικά για ανθρώπινη κατανάλωση, λόγω της γλυκιάς τους γεύσης και επομένως η συγκομιδή τους πραγματοποιείται πριν τη φυσιολογική τους ωρίμανση, δηλαδή προτού οι κόκκοι αρχίσουν να συρρικνώνονται. Η λίστα με τους τύπους αραβόσιτου περιλαμβάνει και τον κηρώδης αραβόσιτος - *Zea mays ceratina* (**Waxy corn**). Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή κολλητικών ουσιών λόγω του υψηλού μοριακού βάρους και της δομής του μορίου της άμυλοπηκτίνης. Ωστόσο, βρίσκει χρήση και ως εδώδιμο. Προέρχεται από την Ανατολική Ασία, αλλά πλέον καλλιεργείται και στις Η.Π.Α. Τέλος, υπάρχει και ο επενδεδυμένος αραβόσιτος - *Zea mays tunicata* (**Pod Corn**). Τα φυτά αυτής της κατηγορίας δεν καλλιεργούνται συστηματικά. Προορίζονται συνήθως για χλωρή μάζα. Πέρα από τους τύπους που αναφέρθηκαν, υπάρχουν και νεοσύστατοι τύποι με πιο βελτιωμένα χαρακτηριστικά, οι οποίοι καλλιεργούνται σε μικρότερο βαθμό με ιδιότητες που ποικίλλουν ανάλογα τη χρήση για την οποία προορίζονται. Μερικοί από τους γνωστότερους νεοσύστατους τύπους αραβόσιτου είναι το QPM (Quality Protein Maize), το baby corn και το λευκό καλαμπόκι. (Καραμάνος Α., 1999; Παπακώστα - Τασοπούλου Δ., 2008)

1.3.1 Ανθρώπινη Διατροφή

Ο αραβόσιτος αποτελεί βασικό συστατικό της διατροφής του ανθρώπου, κυρίως στην Αφρική, τη Νότια Αμερική και ορισμένες χώρες της Ασίας. Το Λεσότο αποτελεί τη νούμερο ένα χώρα σε κατανάλωση αραβόσιτου, κατά κεφαλήν, όπου συγκεκριμένα καταναλώνονται ημερησίως 433 g αραβόσιτου ανά κάτοικο προσλαμβάνοντας με αυτόν τον τρόπο 36,3 g πρωτεΐνης. Ο αραβόσιτος συμμετέχει στην καθημερινή διατροφή τους, είτε κατά την

κατανάλωση κούακερ (Mielie pap), είτε ως βασικό συστατικό στο ψωμί (leqebekoane). Μετά το Λεσότο, το Μαλάουι και η Ζάμπια ακολουθούν τη σειρά των χωρών με την υψηλότερη κατανάλωση αραβοσίτου ως βασική τροφή, όπου η ημερήσια κατανάλωση ανέρχεται στα 354 και 325 g αραβοσίτου κατά κεφαλήν (FAO 2018). Ωστόσο, παρά την υψηλή συμμετοχή του στη διατροφή μεγάλης μερίδας ανθρώπων παγκοσμίως, η θρεπτική αξία των προϊόντων του είναι χαμηλή. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως σε ελλείψεις που υπάρχουν σε ορισμένα αμινοξέα, όπως η λυσίνη και η τρυπτοφάνη.(Chaudhary, 2013). Η συμβολή του αραβοσίτου στη διατροφή του ανθρώπου έχει αρκετά οφέλη. Αρχικά, το σύμπλεγμα βιταμινών B που περιέχονται στον αραβόσιτο δρουν ευεργετικά στο δέρμα, τα μαλλιά, την καρδιά, τον εγκέφαλο και το πεπτικό σύστημα. Επίσης, παρεμποδίζει την εμφάνιση ρευματοπάθειας καθώς δύναται να βελτιώσει την κινητικότητα των αρθρώσεων. Ακόμα, η παρουσία των βιταμινών A,C,K, σε συνδυασμό με τη β-καροτίνη και το σελήνιο, συμβάλλουν στη βελτίωση της λειτουργίας του θυρεοειδούς αδένου αλλά και του ανοσοποιητικού συστήματος. Το μετάξι του αραβοσίτου, δηλαδή οι κλωστικές ίνες του, βρίσκει εφαρμογή σε πολλές θεραπείες, οι οποίες πραγματοποιούνται σε πολλές χώρες όπως η Ινδία, η Κίνα, η Ισπανία, η Γαλλία αλλά και η Ελλάδα. Ορισμένες από τις θεραπείες, που συνεισφέρει το μετάξι αραβοσίτου είναι κατά της πέτρας στα νεφρά, των λοιμώξεων του ουροποιητικού συστήματος, του ίκτερου και της κατακράτησης υγρών. Παράλληλα, δύναται να βελτιώσει την αρτηριακή πίεση, να υποστηρίξει τη λειτουργία του ήπατος, αλλά και να παράγει χολή. Επιπροσθέτως, δρα ως ενυδατικό για πληγές, οιδήματα και έλκη. Τέλος, το αφένημα, που η σύστασή του απαρτίζεται από τμήματα μεταξιού, ριζών και φύλλων αραβοσίτου, συνιστάται για την αντιμετώπιση ναυτιών, εμετών και προβλημάτων στην ουροδόχο κύστη.

Πέρα από την κατανάλωση του σπόρου, ο αραβόσιτος συμμετέχει στη διατροφική πυραμίδα του ανθρώπου και μέσω των παραπροϊόντων του. Στο αραβοσιτέλαιο συγκεκριμένα, συναντώνται ορισμένα λιπαρά οξέα τα οποία είναι απαραίτητα για τον άνθρωπο, με πιο σημαντικό το λινολεϊκό οξύ, διότι διατηρεί σε φυσιολογικά επίπεδα την αρτηριακή πίεση, έχει ρυθμιστικό ρόλο στα επίπεδα χοληστερόλης και βοηθάει στην πρόληψη καρδιαγγειακών παθήσεων (Birringer et al., 2002; Dupont et al., 1990; Sen et al., 2006). Επιπλέον, η βιταμίνη E, η οποία αποτελεί συστατικό του αραβοσιτελαίου και είναι γνωστή για τις αντιοξειδωτικές ιδιότητες, αποτρέπει την εξάπλωση του οξειδωτικού stress στις βιολογικές μεμβράνες ενώ εξυπηρετεί και στην πρόληψη της αθηροσκλήρωσης (Lemcke-Norojärvi et al., 2001; Ricciarelli et al., 2001). Τέλος, όλο και περισσότερες μελέτες επαληθεύουν ότι η παρουσία της GNA

λεκτίνης, (*Galanthus nivalis* agglutinin) συμβάλλει στη καταπολέμηση του ιού HIV, δηλαδή του ιού που προκαλεί AIDS (Kaur et al., 2021; Park et al., 2021).

1.3.2 Ζωοτροφή

Ο αραβόσιτος αποτελεί κύρια πηγή ενέργειας στη διατροφή των ζώων, καθώς προσφέρει μέχρι και 30% πρωτεΐνη, 60% ενέργεια και 90% άμυλο, συμβάλλοντας σημαντικά στην ανάπτυξή τους (Dado, 1999). Ωστόσο, οι ποσότητες ορισμένων αμινοξέων, όπως η λυσίνη και η τρυπτοφάνη, είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα με αποτέλεσμα να μην μπορούν να καλύψουν τις διατροφικές ανάγκες των μονογαστρικών ζώων (Qi et al., 2022). Γενετικές τροποποιήσεις και νέα υβρίδια αποτελούν αντικείμενα μελέτης πολλών επιστημόνων, ώστε να αντισταθμιστεί η έλλειψη των βασικών αμινοξέων. Το Quality Protein Maize (QPM) αποτελεί ένα γενετικά τροποποιημένο είδος αραβοσίτου, το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς. Συγκεκριμένα στην Κίνα, η καλλιέργεια QPM, (var. Zhong Dan-9409) σημείωσε αύξηση της απόδοσης κατά 8-15%, αλλά και πολύ σημαντική αύξηση στην περιεκτικότητα λυσίνης και τρυπτοφάνης κατά 80%. Η αντικατάσταση του κανονικού αραβοσίτου με QPM, δεν είχε σημαντική επίδραση στην πεπτικότητα των αμινοξέων από τα πουλερικά. Αντίθετα, στην περίπτωση των χοίρων, ήταν αρκετά υψηλότερη και κατ' επέκταση σημειώθηκε αύξηση του σωματικού τους βάρους, στα διάφορα στάδια ανάπτυξής τους (Shafiq et al., 2009).

1.3.3 Βιοκαύσιμο

Ο αραβόσιτος καλλιεργείται παραδοσιακά για τη διατροφική του αξία σε όλη την Αμερική, ωστόσο, κατά την τελευταία δεκαετία, ένα σημαντικό ποσοστό του καλλιεργείται και για παραγωγή αιθανόλης (USDA, 2010). Το άμυλο που περιέχεται στους κόκκους του αραβοσίτου είναι εκείνο που μπορεί, εκτός των άλλων, να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή βιοαιθανόλης. Συγκεκριμένα, η καλλιέργεια των φυτών που δύναται να παράγουν αιθανόλη, έχει τριπλασιαστεί τα τελευταία χρόνια, όπου το 2011 σημειώθηκε παραγωγή 52.6 δισεκατομμυρίων λίτρων αιθανόλης (RFA, 2012). Σύμφωνα με ένα μοντέλο προσομοίωσης που δημιουργήθηκε από ερευνητές στην Αμερική, ο αραβόσιτος μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή 3-5,4 χιλιάδων λίτρων αιθανόλης ανά εκτάριο (Zhuang et al., 2013). Τέλος, τα βιοκαύσιμα με βάση τον αραβόσιτο έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακα (Zeri et al., 2011).

1.3.4 Άλλες χρήσεις

Το λεβουλινικό οξύ, μια χημική ουσία η οποία προέρχεται από τον αραβόσιτο, έχει ξεκινήσει να συναντάται πλέον στη σύσταση πολλών αντιψυκτικών, με σκοπό την

αντικατάσταση εκείνων των τοξικών συστατικών που έχουν βάση το πετρέλαιο. Επιπλέον, πολλά πλαστικά και υφάσματα σήμερα φτιάχνονται από αποθέματα καλαμποκιού. (Jabran & Farooq, 2007) Το άμυλο του αραβοσίτου συνεισφέρει ακόμα στην κατασκευή κεραμικών, χαρτιών και χαρτονιών, καλλυντικών και φαρμακευτικών (Orhun, 2013). Τέλος, μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη φυτοεξυγίανση, ως χαρακτηριστικό της καλλιέργειας. Παρατηρήθηκε σημαντική συσσώρευση βαρέων μετάλλων καδμίου και μολυβδαινίου από το έδαφος στα φύλλα του αραβοσίτου. Το παραπάνω συμπέρασμα, σε συνδυασμό με την ανεκτικότητα του αραβοσίτου σε καταπόνηση από βαρέα μέταλλα, συνιστά τη συγκεκριμένη καλλιέργεια ως μια εναλλακτική πρόταση για τις αναπτυσσόμενες χώρες, σχετικά με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και αποκατάσταση (Wuana & Okieimen, 2010).

1.4 Χημική Σύσταση

Παρατηρώντας τη χημική σύσταση των βασικών τμημάτων του πυρήνα του αραβοσίτου, πολύ εύκολα μπορεί να διακρίνει κανείς ορισμένες βασικές διαφορές, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 2. Το περικόρπιο χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε ακατέργαστες ίνες, σε ποσοστό 87%. Επικρατέστερες ακατέργαστες ίνες είναι η ημικυτταρίνη κατά 67%, η κυτταρίνη κατά 23% και 0.1% η λιγνίνη (Burge and Duensing. 1989). Παράλληλα, το ενδοσπέρμιο περιλαμβάνει υψηλά επίπεδα αμύλου, σε ποσοστό 87.6%, και πρωτεΐνες σε ποσοστό 8%. Τα ακατέργαστα λιπαρά εντός του ενδοσπερμίου θεωρούνται σχετικά χαμηλά σε συγκέντρωση. Αντίθετα στο έμβρυο περιλαμβάνεται μεγάλη συγκέντρωση από ακατέργαστα λιπαρά, κατά μέσο όρο 33%. Το έμβρυο διαθέτει ακόμη υψηλά επίπεδα πρωτεΐνης, κατά 18.4%, αλλά και αρκετά μεταλλικά στοιχεία (Watson & Ramstad, 1987).

Χημική Σύσταση	Περικόρπιο	Ενδοσπέρμιο	Έμβρυο
Πρωτεΐνη	3.7	8	18.4
Αιθέρια Έλαια	1	0.8	33.2
Ακατέργαστες ίνες	86.7	2.7	8.8
Τέφρα	0.8	0.3	10.5
Άμυλο	7.3	87.6	8.3
Ζάχαρη	0.34	0.62	10.8

Πίνακας 2 Ποσοστιαία προσεγγιστική χημική σύνθεση των κύριων τμημάτων των σπόρων αραβοσίτου (Watson & Ramstad, 1987)

Η χημική σύσταση 100 g εδώδιμου αραβοσίτου παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 3. Πληθώρα βιταμινών επίσης συναντώνται στον πυρήνα του καρπού (βιταμίνη C, βιταμίνη E κλπ.). Το κάλιο είναι ο μεγαλύτερος, σε συγκέντρωση, εκπρόσωπος των θρεπτικών εντός του πυρήνα. Η παρουσία του καλίου σε μεγάλα επίπεδα είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς το συγκεκριμένο στοιχείο απουσιάζει από τη διατροφή του μέσου ανθρώπου (Kumar and Jhariya, 2013). Το άμυλο αποτελείται από 20-30% αμυλόζη, ενώ το υπόλοιπο 70-80% από αμυλοπηκτίνη. Οι πρωτεΐνες που περιέχονται εντός του ενδοσπερμίου περιέχουν υψηλά επίπεδα ζεΐνης και γλουτενίνης. Ωστόσο η συγκέντρωση ορισμένων βασικών αμινοξέων όπως η λυσίνη και η τρυπτοφάνη, είναι χαμηλή. Η ποιότητα της γλουτενίνης του καλαμποκιού είναι χαμηλή για το λόγο αυτό, τα προϊόντα που προκύπτουν από τον αραβόσιτο, όπως το ψωμί από καλαμποκάλευρο, δεν προκαλούν φούσκωμα. Ανακεφαλαιώνοντας, ο αραβόσιτος θεωρείται τροφή, η οποία είναι πλούσια σε ενέργεια, με χαμηλή συγκέντρωση σε πρωτεΐνες, υψηλό συντελεστή πεπτικότητας, αλλά και μικρή περιεκτικότητα σε ινώδεις ουσίες (Παπακώστα – Τασοπούλου Δ., 2008).

Σύσταση 100 g εδώδιμου αραβοσίτου	Βάρος
Υδατάνθρακες	71.88 g
Πρωτεΐνες	8.84 g
Λιπαρά	4.57 g
Ίνες	2.15 g
Τέφρα	2.33 g
Υγρασία	10.23 g
Φώσφορος	348 mg
Νάτριο	15.9 mg
Θείο	114 mg
Ριβοφλαβίνη	0.1 mg
Αμινοξέα	1.78 mg
Μεταλλικά Στοιχεία	1.5 g
Ασβέστιο	10 g
Σίδηρος	2.3 mg
Κάλιο	286 mg
Θειαμίνη	0.42 mg
Βιταμίνη C	0.12 mg
Μαγνήσιο	139 mg
Χαλκός	0.14 mg

Πίνακας 3 Χημική Σύσταση 100 g εδώδιμου αραβοσίτου (Rouf Shah et al., 2016)

1.5 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Ο αραβόσιτος είναι ετήσιο φυτό, μονοκότυλο, μόνουκο - δίκλινο και ανήκει στην οικογένεια των αγρωστωδών (*Poaceae*). Τα φυτά παρουσιάζουν μεταξύ τους σημαντικές διαφορές σε χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος και τη μορφή τους. Οι διαφορές αυτές εξαρτώνται από το βιολογικό τους κύκλο καθώς και τη χρήση για την οποία προορίζονται.

1.5.1 Ριζικό σύστημα

Η οικογένεια των *Poaceae* είναι η μοναδική οικογένεια στο φυτικό βασίλειο που σχηματίζει ενδογενείς πρωτογενείς ρίζες. Το ριζικό σύστημα του αραβόσιτου έχει μοναδική δομή, η οποία εξασφαλίζει την αποτελεσματική απορρόφηση του νερού και των θρεπτικών συστατικών του εδάφους, καθώς επίσης συμβάλλει σημαντικά και στη στήριξη του φυτού. Ο σχηματισμός του ριζικού συστήματος του αραβόσιτου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ένα ενδογενές γενετικό πρόγραμμα, όπως επίσης από τις αλληλεπιδράσεις με τη ριζόσφαιρα, αλλά και από τη δυνατότητα προσαρμογής του στις περιβαλλοντικές μεταβολές (Hochholdinger, 2009). Παράλληλα το ριζικό σύστημα του αραβόσιτου είναι πλούσιο, θησσανώδες, ενώ έχει τη δυνατότητα να φτάσει σε βάθος μέχρι και τα 2,5 μέτρα. Ωστόσο, ο κύριος όγκος κατά βάση στα πρώτα 60 εκατοστά βάθος εδάφους (Δαλιάνης, 1983). Οι ρίζες του αραβόσιτου διακρίνονται σε 3 βασικές κατηγορίες, τις εμβρυακές, τις μόνιμες (crown roots) και τις εναέριες (brace roots). (Καραμάνος Α., 1999)

1.5.2 Βλαστός

Ο βλαστός ή αλλιώς το στέλεχος είναι συμπαγής, κυλινδρικής διατομής, που φέρει πάνω του συνήθως 8-21 μεγάλου μήκους μεσογονάτια. Τόσο στο εσωτερικό του στελέχους, όσο και στις εναέριες ρίζες, εμπεριέχεται εντεριώνη, η οποία προσδίδει αντοχή στο πλάγιασμα και μεγαλύτερη συμπάγεια στο βλαστό. Οι ιδιότητες που παρέχει η εντεριώνη είναι αρκετά σημαντικές για ένα φυτό, του οποίου το ύψος μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και τα 2,5 μέτρα. Με εξαίρεση τον υψηλότερο κόμβο, κάθε κόμβος φέρει την καταβολή ενός οφθαλμού. Οι οφθαλμοί βρίσκονται κατ' εναλλαγή πάνω στο βλαστό. Οι κατώτεροι οφθαλμοί και κυρίως αυτοί που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ευθύνονται για το σχηματισμό των αδελφιών, το οποίο είναι ένα χαρακτηριστικό ανεπιθύμητο για τον αραβόσιτο, ενώ οι οφθαλμοί που βρίσκονται στα ανώτερα τμήματα του στελέχους είναι ανθοφόροι και όταν εξελιχθούν μπορούν να παράγουν σπάδικα ή σπάδικες (Καραμάνος, 1992; Παπακώστα – Τασοπούλου Δ., 2008).

Ορισμένα από τα νέα υβρίδια αραβοσίτου στοχεύουν στη μειωμένη ανάπτυξη αδελφιών, ιδιότητα η οποία συνδυάζεται και από την αυξημένη πυκνότητα σποράς (Rotili et al., 2021).

1.5.3 Φύλλα

Τα φύλλα του αραβόσιτου αναπτύσσονται κατ' εναλλαγή, ανά ένα σε κάθε κόμβο. Ο αριθμός των φύλλων ποικίλλει ανά φυτό από 8 έως 48 στους διάφορους βιοτύπους ο αραβοσίτου. Έχει μελετηθεί ότι ο αριθμός των φύλλων είναι ανάλογος της διάρκειας ανάπτυξης του φυτού. Έτσι οι πρώιμες ποικιλίες έχουν 9 έως 10 φύλλα, οι μέσης πρωιμότητας 17 έως 21 ενώ οι όψιμες ποικιλίες έχουν περισσότερα από 40 φύλλα. Τα φύλλα του αραβόσιτου αποτελούνται από έναν κολεό, ο οποίος περιβάλλει το μεσογονάτιο μέχρι τον αμέσως επόμενο κόμβο. Επίσης, αποτελείται από ένα λογχοειδές έλασμα καθώς και τη γλωσσίδα. Ο κολεός παρεμποδίζει τη θραύση του στελέχους του αραβοσίτου. Το μήκος και το πλάτος του ελάσματος κυμαίνεται από 30 - 150 cm και από 4 - 15 cm αντίστοιχα. Η πάνω επιφάνεια του φύλλου χαρακτηρίζεται από την παρουσία τριχών και μεγάλων στοματίων, ενώ η κάτω επιφάνεια είναι λεία και περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό στοματίων αλλά μικρότερου μεγέθους, συγκριτικά με την πάνω επιφάνεια. Ορισμένοι γενότυποι στο σημείο διαχωρισμού του κολεού με το έλασμα, υπάρχει μια μεμβρανώδης εκβλάστηση η οποία ονομάζεται γλωσσίδιο (Καραμάνος, 1992; Παπακώστα - Τασοπούλου Δ., 2008).

1.5.4 Αναπαραγωγικά Όργανα

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο αραβόσιτος είναι φυτό μόνικο - δίκλινο, στα άνθη του οποίου σχηματίζονται ταξιανθίες. Τα αρσενικά και τα θηλυκά άνθη σχηματίζουν χωριστές ταξιανθίες στο ίδιο φυτό. Η αρσενική ταξιανθία ονομάζεται φόβη, ενώ η θηλυκή ταξιανθία σπάδικας.

- i. Φόβη: Η αρσενική ταξιανθία του αραβόσιτου αναπτύσσεται ως προέκταση στην κορυφή του στελέχους. Κατά μήκος του ανώτερου άκρου του κεντρικού άξονα εκφύονται σταχύδια κατά ζεύγη. Κάθε σπάδικας αποτελείται συνήθως από 4-15 ζεύγη σταχυδίων. Εκτιμάται πως μια φόβη δύναται να παράγει 2-5 εκατομμύρια γυρέοκοκκους, αν και αυτός ο αριθμός εξαρτάται και από το γονότυπο. Το μήκος της είναι περίπου 30 εκατοστά και είναι ιδιαίτερα εύθραυστη. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική σε περιπτώσεις όπου πρέπει να απομακρυνθεί η φόβη, όπως σε περιπτώσεις σποροπαραγωγής υβριδίων.

- ii. Σπάδικας: Ο αραβόσιτος αναπτύσσει σπάδικα ή σπάδικες, πλευρικά του κεντρικού στελέχους, περίπου στο μέσο του βλαστού και είναι στάχης. Κατά το στάδιο της άνθισης και περίπου 7-10 μέρες μετά την εμφάνιση της φόβης, εμφανίζονται και οι πρώτοι στύλοι του σπάδικα. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η κατάταξη του αραβοσίτου ως πρωτανδρικό φυτό. Αποτελείται από γόνατα που φέρουν φύλλα, οφθαλμούς και μεσογονάτια. Σε όλο το μήκος του σπάδικα κατανέμονται τα σταχύδια σε ζεύγη. Ο αριθμός των σειρών των σταχυδίων είναι πάντα ζυγός και εξαρτάται τόσο από το γενότυπο, όσο και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος που επικρατούν. Κάθε σταχύδιο περιέχει δυο άνθη, εκ των οποίων μόνο το ένα είναι γόνιμο και τα οποία περικλείονται από τα λέπυρα. Τα άνθη περιβάλλονται από το χιτώνα και τη λεπίδα. Τα ώριμα άνθη περικλείουν στο εσωτερικό τους τρεις στήμονες. Τέλος, κάθε σπάδικας περιλαμβάνει κατά μέσο όρο 30-50 σταχύδια. Άρα, ο σπάδικας έχει τη δυνατότητα να παράγει από 150 σπόρους μέχρι και 1500. (Papastylianou Papasotiriou et al., 2016; Καραμάνος, 1992).

1.5.5 Καρπός

Ο καρπός του αραβοσίτου είναι καρύωση. Μέγεθος και σχήμα αποτελούν χαρακτηριστικά που συνδέονται άμεσα με το βιότυπο του καλαμποκιού. Αποτελείται από 4 επί μέρους τμήματα: τον ποδίσκο, το τμήμα που συνδέει το σπόρο με τον άξονα, από το περικάρπιο, που έχει ρόλο προστατευτικό, ενάντια σε παθογόνους, το ενδοσπέρμιο, που έχει ρόλο αποθηκευτικό για τα θρεπτικά που απαιτούνται για την ανάπτυξη και το έμβρυο, το οποίο αποτελεί σε μικρογραφία το νεαρό φυτό. Παράλληλα, το έμβρυο χωρίζεται σε δυο τμήματα, τον εμβρυακό ή βλαστικό άξονα και το ασπίδιο, που είναι η μοναδική κοτυληδόνα του σπόρου. Ενδοσπέρμιο και περικάρπιο μαζί συντελούν το φλοιό του σπόρου (Papastylianou Papasotiriou et al., 2016; Παπακώστα – Τασοπούλου Δ., 2008).

1.6 Στάδια ανάπτυξης

Η διάρκεια του βιολογικού κύκλου του αραβοσίτου υπολογίζεται μεταξύ 110-150 μέρες, εύρος το οποίο μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα το υβρίδιο αλλά και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Θεωρείται φυτό καθορισμένης ανάπτυξης με διακριτά τα στάδια τόσο της βλαστητικής όσο και της αναπαραγωγικής ανάπτυξης. Τα στάδια της ανάπτυξης κατηγοριοποιούνται ως εξής:

I. Βλαστικό στάδιο ανάπτυξης:

- Σπορά- Φύτρωμα
- Ανάπτυξη ριζικού συστήματος
- Καλάμωμα – Ανάπτυξη υπέργειου τμήματος
- Διαφοροποίηση μεριστώματος από βλαστικά σε αναπαραγωγικά

II. Αναπαραγωγικό σύστημα ανάπτυξης

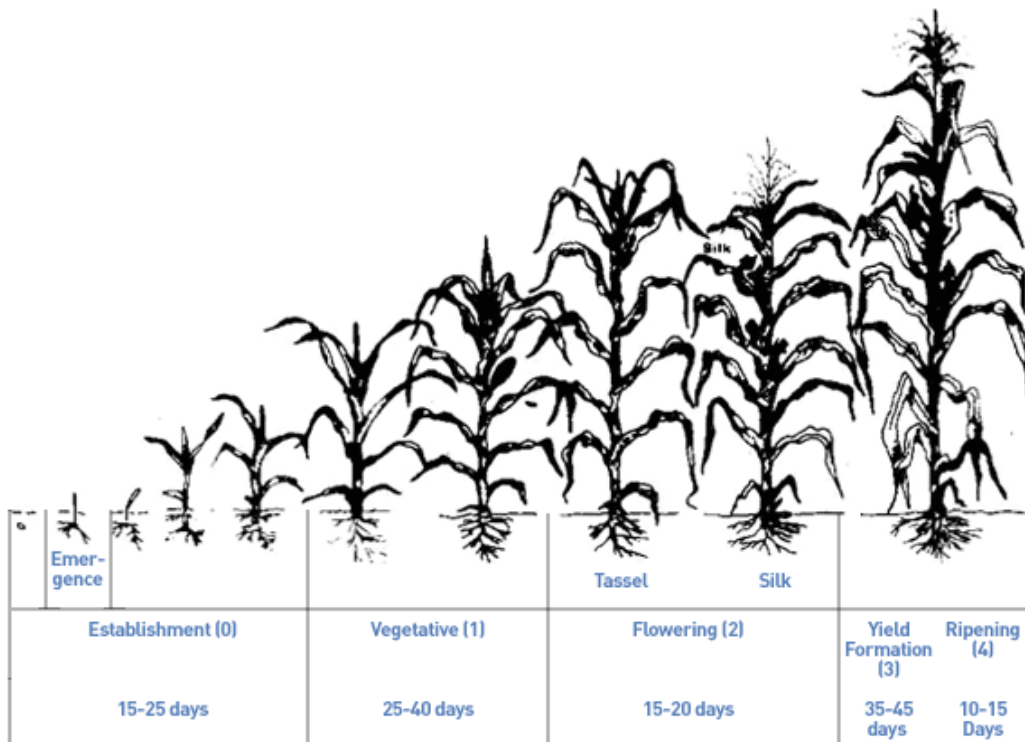
- Έκπτυξη ταξιανθιών
- Άνθιση
- Γονιμοποίηση
- Γέμισμα καρπού
- Ωρίμανση
- Γήρανση – ξήρανση καρπού

Το αρχικό στάδιο του βιολογικού κύκλου του αραβοσίτου απαρτίζεται από τη βλάστηση του σπόρου, το φύτρωμα και την έκπτυξη του πρώτου φυταρίου. Κατά τη σπορά, ο καρπός αλληλεπιδρά με την υγρασία του εδάφους. Μέσω του περικαρπίου, απορροφά νερό με αποτέλεσμα να ξεκινήσει να διογκώνεται. Μετά από 2-3 ημέρες, επιμηκύνεται το ριζίδιο και η κολεόριζα και κατ' επέκταση βγαίνουν από το περικάρπιο. Το ριζίδιο συνεχίζει να μεγαλώνει, ενώ παράλληλα εμφανίζονται και οι πρώτες εμβρυακές ρίζες, οι οποίες έχουν τόσο στηρικτικό όσο και απορροφητικό ρόλο για το νεαρό φυτό. Ο χρόνος μεταξύ σποράς και φυτρώματος εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία, την υγρασία και τον αερισμό του εδάφους.

Η βλαστητική ανάπτυξη περιλαμβάνει την ταχεία ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, την επιμήκυνση των μεσογονατίων του στελέχους, καθώς και τη γρήγορη εμφάνιση και ανάπτυξη των φύλλων. Η διαφορά στα χρονικά διαστήματα μεταξύ φυτρώματος και εμφάνισης φόβης καθορίζει το χαρακτηρισμό του γονότυπου ως πρώιμο ή όψιμο.

Κατά την άνθιση, αρχικά εμφανίζεται η αρσενική ταξιανθία (φόβη) και μετά από 7-10 μέρες εμφανίζεται και η θηλυκή ταξιανθία (σπάδικας). Η γύρη ωριμάζει και μεταφέρεται με τη βοήθεια του ανέμου. Η διπλή γονιμοποίηση που λαμβάνει χώρα στον αραβόσιτο ευθύνεται για την παρατήρηση του φαινομένου ξενίας, με την κυριαρχία δηλαδή των γονιδίων γύρης (πατρική

κυριαρχία). Μετά το πέρας της γονιμοποίησης, ο κόκκος αναπτύσσεται, ενώ παράλληλα αρχίζει να περιβάλλεται από ένα γαλακτώδες υγρό, πλούσιο σε σάκχαρα, το οποίο μετά από 15 μέρες, μετατρέπεται σε άμυλο (Papastyliανου Papasotiriου et al., 2016; Καραμάνος, 1992).



Εικόνα 5 Στάδια ανάπτυξης αραβοσίτου (FAO, 2020)

1.7 Προσαρμοστικότητα

Ανατρέχοντας στην ιστορική αναδρομή της εξάπλωσης της καλλιέργειας του αραβοσίτου παγκοσμίως, καταλυτικό ρόλο σε αυτήν έπαιξε η ευρεία προσαρμοστικότητα του αραβοσίτου να αναπτύσσεται σε ποικίλα οικοσυστήματα με διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η έρευνα για αναζήτηση βελτιωμένων υβριδίων αραβοσίτου με ακόμα μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα θεωρείται επιτακτική από την επιστημονική κοινότητα, τα τελευταία χρόνια. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η σύσταση του εδάφους και οι ανάγκες σε νερό συμβάλλουν στην τελική απόδοση της καλλιέργειας και θα αναλυθούν παρακάτω.

1.7.1 Θερμοκρασία

Ο αραβόσιτος θεωρείται φυτό θερμών κλιμάτων. Για την ομαλή ανάπτυξη του φυτού κατά το βιολογικό του κύκλο προτείνεται η απουσία παγετού για τουλάχιστον 120 μέρες. Κατά το στάδιο του φυτρώματος, ο αραβόσιτος βλαστάνει από τους 10 °C και πάνω, με μέγιστη

ιδανική τους 20 °C. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 10-15 °C, η διάρκεια του σταδίου του φυτρώματος αυξάνεται και μπορεί να φτάσει μέχρι και τις 14 μέρες (Papastylianou Papasotiriou et al., 2016). Οι ρυθμοί αύξησης και φωτοσύνθεσης μεγιστοποιούνται σε θερμοκρασίες 30-35 °C. Η χρονική διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης του βλαστού συνδέεται άρρηκτα με την παράμετρο της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, όσο οι θερμοκρασίες προσεγγίζουν το άριστο εύρος (24-30 °C), τόσο επιταχύνεται η βλαστητική ανάπτυξη και τόσο πρωϊμότερη γίνεται η εμφάνιση της φόβης. Αντίθετα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες επιβραδύνουν το ρυθμό της αυξήσεως και κατά συνέπεια προκαλούν οψίμιση. Κρίσιμη θερμοκρασία, η οποία, αν ξεπεραστεί, μειώνει σημαντικά την απόδοση, βρίσκεται περίπου στους 32 °C (Καραμάνος, 1992; Παπακώστα – Τασοπούλου Δ., 2008).

1.7.2 Ανάγκες σε άρδευση

Ο αραβόσιτος θεωρείται φυτό με υψηλές υδατικές ανάγκες, καθώς η παραγωγικότητα σε ξηρά ουσία είναι μεγάλη. Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σιτηρά, ο αραβόσιτος έχει την υψηλότερη δυνητική απόδοση. Για τη μέγιστη παραγωγή εκτιμάται πως οι απαιτήσεις σε νερό είναι περίπου 500-800 mm, εύρος το οποίο εξαρτάται και από το κλίμα της περιοχής.

Σημαντική είναι η κάλυψη των υδατικών αναγκών κατά το στάδιο όπου το φύλλο έχει αναπτυχθεί πλήρως, διότι τότε παρατηρείται η μεγαλύτερη κατανάλωση σε νερό. Στην Ελλάδα, η εφαρμογή αρδεύσεων είναι ιδιαίτερα απαραίτητη κατά την περίοδο Ιουλίου-Αυγούστου όπου σημειώνονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες (Καραμάνος Α., 1999). Αντικείμενο μελέτης για πολλούς επιστήμονες αποτελεί η εύρεση υβριδίων αραβόσιτου με υψηλή ανεκτικότητα σε ακραίες θερμοκρασίες, σε υδατική καταπόνηση και άλλων επίκαιρων προβλημάτων που έχουν δημιουργηθεί από την κλιματική μεταβολή (Cairns et al., 2021; El Sabagh et al., 2018).

1.7.3 Έδαφος

Το ιδανικό έδαφος για την ανάπτυξη του αραβόσιτου, θεωρείται εκείνο που περιλαμβάνει μεγάλο βάθος, μέσης σύστασης, καλώς αποστραγγιζόμενο και με μεγάλη ικανότητα συγκράτησης νερού. Τα παραπάνω εδαφικά χαρακτηριστικά συνεισφέρουν στην αρμονική ανάπτυξη και λειτουργία του ριζικού συστήματος του αραβόσιτου καθώς και τον καλύτερο ανεφοδιασμό σε θρεπτικά στοιχεία και νερό. Με τους κατάλληλους χειρισμούς του εδάφους, ο αραβόσιτος δύναται να αναπτυχθεί σε μεγάλη ποικιλία εδαφών. Η ιδανική οξύτητα του εδάφους (pH) για τον αραβόσιτο κυμαίνεται μεταξύ 5,6-7,5 δηλαδή ελαφρά όξινο. Η παρουσία αλάτων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την τελική παραγωγή (Καραμάνος Α., 1999).

1.8 Βακτήρια Ενίσχυσης Φυτικής Ανάπτυξης (Plant Growth Promoting Bacteria)

1.8.1 Γενικά

Στη σύγχρονη εποχή, η βιολογική γεωργία έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό και ως αποτέλεσμα, όλο και περισσότεροι παραγωγοί επιλέγουν την συγκεκριμένη μέθοδο. Η δημοτικότητα αυτή οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα πλεονεκτήματα που παρέχει, τόσο στον τομέα της ανθρώπινης υγείας, όσο και στο περιβαλλοντικό της αντίκτυπο (Stolze & Lampkin, 2009). Είναι γνωστό πως τα φυτά αποτελούν κύριο ξενιστή για έναν πολύ μεγάλο αριθμό από μικροοργανισμούς οι οποίοι αποτελούν το φυτικό μικροβίωμα (Michelmore et al., 2017). Οι μικροοργανισμοί αυτοί μπορεί είτε να έχουν ευεργετικές ιδιότητες για το φυτό, είτε να έχουν παρεμποδιστικές ιδιότητες, είτε η αλληλεπίδρασή τους να είναι ουδέτερη. Η περιοχή της ριζόσφαιρας του φυτού αποτελεί σημείο συγκέντρωσης για ένα μεγάλο πλήθος μικροοργανισμών, γεγονός που οφείλεται στην έκκριση ουσιών, τόσο υψηλού όσο και χαμηλού μοριακού βάρους, από τις ρίζες (Walker et al., 2003). Έχει υπολογιστεί πως σε ένα γραμμάριο ρίζας αποικίζουν περίπου 10^9 - 10^{11} βακτηριακά κύτταρα και κατ' επέκταση η μικροβιακή δραστηριότητα είναι ιδιαίτερα έντονη (Berg et al., 2016). Ένα από τα κεφάλαια της βιολογικής γεωργίας, το οποίο ιστορικά έχει ξεκινήσει εδώ και πολλά χρόνια, αλλά εξελίσσεται μέχρι και σήμερα, αποτελούν τα βακτήρια εκείνα τα οποία προωθούν τη φυτική ανάπτυξη και είναι γνωστά ως Plant Growth Promoting Bacteria (Bashan, 1998; Kloepper, 1978). Σύμφωνα με τον du Jardin, οι βιοδιεγέρτες είναι κάθε ουσία ή μικροοργανισμός που εφαρμόζεται στα φυτά με σκοπό την ενίσχυση της θρέψης των φυτών, την αποδοτικότητα, την ανοχή σε αβιοτικές καταπονήσεις ή/και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καλλιεργειών, ανεξάρτητα από την περιεκτικότητά τους σε θρεπτικά συστατικά (du Jardin, 2015). Τα βακτήρια της προαναφερόμενης κατηγορίας διακρίνονται σε δυο βασικές ομάδες, ανάλογα με το σημείο στο οποίο εντοπίζονται. Αφενός, υπάρχουν τα Plant Growth Promoting Rhizobacteria, βακτήρια που απαντώνται στη ριζόσφαιρα, τόσο στην επιφάνεια των ριζών αλλά και ένα χιλιοστό υπό την επιφάνεια των ριζών (Figueiredo et al., 2010) και αφετέρου τα βακτήρια εκείνα που εμφανίζονται εσωτερικά του φυτού και χαρακτηρίζονται ως ενδοφυτικά (Lacava & Azevedo, 2013).

1.8.2 Μηχανισμοί δράσης των PGPR

Τα PGPR συμμετέχουν εδώ και πολλές δεκαετίες στην προσπάθεια που καταβάλλει η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα για μια πιο αειφορική και βιώσιμη γεωργία. Οι κύριες λειτουργίες τους αποσκοπούν στη βελτίωση της φυτικής ανάπτυξης. Σε αυτές υπάγονται η τροφοδότηση του φυτού με επαρκή θρεπτικά στοιχεία, στη προώθηση της φυτικής ανάπτυξης με ποικίλους τρόπους (π.χ. παραγωγή φυτορμονών), η παρεμπόδιση των φυτοπαθογόνων οργανισμών, η βελτίωση της εδαφικής δομής και η βιοσυσσώρευση ανόργανων υπολειμμάτων (Hayat et al., 2010). Πιο σύγχρονες έρευνες παρουσίασαν και τις ευεργετικές τους ιδιότητες ως προς τη εξυγίανση των εδαφών (Zaidi et al., 2006). Οι μηχανισμοί με τους οποίους δρουν τα PGP βακτήρια διαφέρουν ανάλογα με το γένος και το στέλεχος που θα χρησιμοποιηθεί. Κατά τη δράση τους, μπορούν να χρησιμοποιήσουν είτε έναν μηχανισμό μεμονωμένα, είτε κάποιον συνδυασμό τους (Podile & Kishore, 2006). Οι μηχανισμοί δράσης των PGPR, ως προς την προαγωγή της φυτικής ανάπτυξης και απόδοσης των φυτών αποτελούν αντικείμενο για περεταίρω έρευνα, καθώς δεν έχουν αποσαφηνιστεί με ακρίβεια. Ωστόσο αρκετές μελέτες έχουν δείξει πως ορισμένα είδη και στελέχη των PGPR, κατάφεραν μέσω κάποιων μηχανισμών, όπως π.χ. η βελτίωση της δέσμευσης του αζώτου και η δημιουργία ανταγωνιστικού περιβάλλοντος για τους φυτοπαθογόνους, να βελτιώσουν μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών (Efthimiadou et al., 2020). Οι μηχανισμοί αυτοί διακρίνονται σε 2 βασικές κατηγορίες, τους άμεσους και τους έμμεσους μηχανισμούς, οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω.

i. Άμεσοι μηχανισμοί δράσης:

Ένας βασικός άμεσος μηχανισμός δράσης των ριζοβακτηρίων είναι η παραγωγή φυτορμονών. Ως φυτορμόνες ορίζονται οι οργανικές αυτές ουσίες που συντίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες σε συγκεκριμένο τμήμα του φυτού και μεταφέρονται σε άλλο τμήμα, επηρεάζοντας στοχευμένες φυσιολογικές διεργασίες (Santner & Estelle, 2009). Οι προαναφερόμενες ορμόνες συνεισφέρουν στη φυτική ανάπτυξη. Μια από τις πιο δημοφιλείς είναι η αυξίνη ή ινδολοξικό οξύ ή IAA (indole acetic acid) που παράγεται στο ακραίο μερίστωμα και διαχέεται σε όλο το φυτό. Είναι υπεύθυνη για την αύξηση της πυκνότητας και του μήκους του ριζικού συστήματος και κατ' επέκταση της συνολικής βιομάζας. Πέρα από την αυξίνη, έχει παρατηρηθεί η ανάπτυξη και άλλων φυτορμονών όπως η γιββερελίνες (Gas) και οι κυτοκινίνες. Οι γιββερελίνες συμμετέχουν σε καταλυτικές διεργασίες του φυτού, όπως η ανάδυση και η ανάπτυξη βλαστών και φύλλων. Παράλληλα, οι κυτοκινίνες συνεισφέρουν στην ανταπόκριση

του φυτού σε εξωγενείς παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων και νερού στη ρίζα αλλά έχουν και σημαντικό ρόλο σε καταπονήσεις που οφείλονται, τόσο σε βιοτικούς, όσο και αβιοτικούς παράγοντες (Maheshwari et al., 2015).

Ένας επιπρόσθετος άμεσος μηχανισμός είναι αυτός της διαλυτοποίησης φωσφορικών. Ο φώσφορος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία για τη φυτική ανάπτυξη. Η εντατικοποίηση της γεωργίας και οδηγεί σε κατάχρηση χημικών σκευασμάτων. Μία από τις χαρακτηριστικές συνέπειες του παραπάνω φαινομένου είναι η ολοένα και αυξανόμενη συγκέντρωση αδιάλυτου φωσφόρου στο έδαφος (Granada et al., 2018). Εκτιμάται πως περίπου 5,7 δισεκατομμύρια εκτάρια γης, αδυνατούν να τον αξιοποιήσουν αποτελεσματικά (Mouazen & Kuang, 2016). Για το λόγο αυτό, πληθώρα ερευνών λαμβάνουν χώρα παγκοσμίως, με σκοπό την εύρεση τρόπων για την αποτελεσματική αξιοποίηση του φωσφόρου από τα φυτά. Η χορήγηση PGP ριζοβακτηρίων δύναται να συνεισφέρει στη διαλυτοποίηση φωσφορικών ενώσεων. Συγκεκριμένα, γίνεται έκκριση οργανικών οξέων και φωσφατάσων, τα οποία μετατρέπουν τις αδιάλυτες μορφές φωσφορικών σε διαλύτες, καθιστώντας τον P πιο διαθέσιμο (Idriss et al., 2002).

Στη λίστα με τους άμεσους μηχανισμούς των PGPR απαντάται και η πρόσληψη σιδήρου. Ο σίδηρος βρίσκεται σε αφθονία στα εδάφη και οι ανάγκες των φυτών στο συγκεκριμένο ιχνοστοιχείο δεν απαιτούν μεγάλες συγκεντρώσεις του. Ωστόσο, λόγω των μορφών που συνήθως συναντάται, δηλαδή σε κατιόντα Fe^{3+} , τον καθιστά μη αφομοιώσιμο για τα φυτά. Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα της αφομοίωσης, θα πρέπει να βρεθεί τρόπος ώστε τα Fe^{3+} να μετατραπούν σε Fe^{2+} , ώστε να μπορούν να προσληφθούν από τα φυτά (Rahimi et al., 2020). Για την αποτελεσματική αξιοποίηση του Fe από τα φυτά τα PGPR μπορούν να συμβάλλουν καθώς διαθέτουν μηχανισμό κατά τον οποίο, οι ουσίες που εκκρίνονται, δημιουργούν χηλικές ενώσεις (iron-chelating), τους σιδηροφόρους. Οι σιδηροφόροι αναλαμβάνουν την πρόσληψη των Fe^{3+} του εδάφους αλλά και την μεταφορά τους εντός των κυττάρων (Wang et al., 1993).

Τέλος, ένας εξίσου βασικός άμεσος μηχανισμός των PGPR είναι η δέσμευση του αζώτου. Το N θεωρείται το σημαντικότερο θρεπτικό στοιχείο για τη φυτική ανάπτυξη. Η κάλυψη των αναγκών του φυτού σε άζωτο γίνεται, είτε μέσω της αποδόμησης οργανικών ενώσεων, είτε μέσω της ατμοσφαιρικής αζωτοδέσμευσης N, είτε μέσω της βιολογικής αζωτοδέσμευσης. Αξίζει να σημειωθεί πως το 97% των φυσικών αποθεμάτων N προέρχονται

μέσω της βιολογικής αζωτοδέσμευσης (Tang et al., 2020). Πληθώρα ερευνών έχει εστιάσει στη δέσμευση του αζώτου, ως άμεσο μηχανισμό των PGPR. Μια από αυτές, κατέληξε στο συμπέρασμα πως τα ριζοβακτήρια που προωθούν τη φυτική ανάπτυξη μέσω αρκετών διεργασιών, μια εκ των οποίων είναι η ανάπτυξη της επιφάνειας του ριζικού συστήματος. Ένα πλούσιο ριζικό σύστημα δύναται να εκκρίνει ριζικές ουσίες σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, προσελκύοντας μεγαλύτερο πληθυσμό μικροοργανισμών και κατ' επέκταση ενισχύοντας τη μικροβιακή δραστηριότητα. Μετά το πέρας ενός συνόλου διεργασιών, το φυτό καταφέρνει και δεσμεύει ακόμα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αζώτου (Adesemoye et al., 2009). Τέλος, οι βιοδιεγέρτες δύναται να προωθήσουν τη δράση του ενζυμικού σύμπλοκου της νιτρογενάσης, με αποτέλεσμα την αύξηση της δέσμευσης του αζώτου από το φυτό (Çakmakçi et al., 2007).

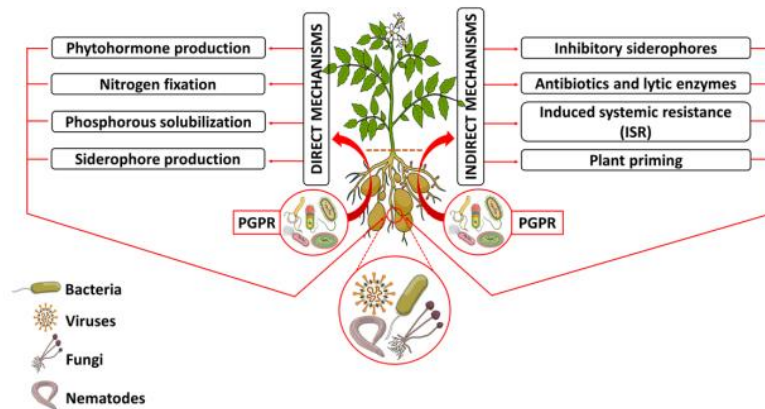
ii. Έμμεσοι μηχανισμοί:

Στους έμμεσους μηχανισμούς των PGPR υπάγεται η παραγωγή αντι-μυκητιακών μεταβολιτών (Anti-fungal Metabolites). Παράσιτα και παθογόνοι οργανισμοί, αποτελούν βασικοί εχθροί για την ομαλή ανάπτυξη των καλλιεργειών. Οι κλασικές καλλιεργητικές μέθοδοι, στην πλειοψηφία τους, εστιάζουν την αντιμετώπισή τους με τη χρήση χημικών σκευασμάτων. Η εντατικοποίηση της γεωργίας οδήγησε σε κατάχρηση αυτών των σκευασμάτων. Συνεπώς, προβλήματα όπως οι ρυπάνσεις και οι υποβαθμίσεις των οικοσυστημάτων άρχισαν να εμφανίζονται όλο και συχνότερα. Παράλληλα, η βιοποικιλότητα των παθογόνων οργανισμών έχει εμπλουτιστεί καθώς πολλοί από αυτούς μεταφέρονται μέσω του αέρα, του νερού και των αγροτικών μηχανημάτων από οικοσύστημα σε οικοσύστημα. Η αντικατάσταση των χημικών σκευασμάτων με φιλικότερες προς το περιβάλλον μεθόδους, ερευνάται από μεγάλη μερίδα επιστημόνων. Στις μεθόδους αυτές συγκαταλέγονται τα PGPR, τα οποία έχει βρεθεί πως παράγουν ουσίες που δύναται να αντιμετωπίσουν παθογόνους μικροοργανισμούς (Ali et al., 2020). Συγκεκριμένα, δημιουργούν ένα περιβάλλον ανταγωνιστικό, με σκοπό την παρεμπόδιση της ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών (Efthimiadou et al., 2020; Katsenios et al., 2021). Οι οργανικές ουσίες αυτές, που ονομάζονται μεταβολίτες, είναι χαμηλού μοριακού βάρους. Μεταξύ των αντιμεταβολιτών, συμπεριλαμβάνονται και τα αντιβιοτικά. Τα αρνητικά βακτήρια κατά Gram(-), είναι υπεύθυνα για την παραγωγή των αντιβιοτικών εκείνων που δρουν αποτελεσματικά ενάντια των φυτοπαθογόνων. Ορισμένα παραδείγματα αντιβιοτικών που

παράγονται είναι τα φεναζίνη-1-καρβοξυλικό οξύ (phenazine-1-carboxylic acid), φεναζίνη-1-καρβοξαμίδιο (phenazine-1-carboxamide), 2,4 διακέτυλο φλωρογλυκινόλη (2,4 diacetyl phloroglucinol), πυολουτεορίνη (pyoluteorin) και πυρολνιτρίνη (pyrolnitrin) (Lugtenberg & Kamilova, 2009).

Στη συνέχεια, ένας άλλος μηχανισμός των PGPR είναι η δημιουργία ανταγωνισμού για την πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων και των θέσεων προς αποικισμό. Ο ανταγωνισμός των PGPR ως προς τον αποικισμό της ριζόσφαιρας και την πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων έναντι των παθογόνων, τα καθιστά μια ασφαλέστερη, προς το περιβάλλον, λύση για την αντικατάσταση των χημικών σκευασμάτων. Το αποτέλεσμα αυτό επιτυγχάνεται μέσω διάφορων διεργασιών, όπως η αναγνώριση χημικών σημάτων, η αντιοξειδωτική δράση και η παραγωγή βιομεμβράνης (biofilm). Για το λόγο αυτό, η εύρεση ειδών και στελεχών PGPR που διαθέτουν χαρακτηριστικά υψηλού ανταγωνισμού έναντι των παθογόνων, μελετώνται συστηματικά (Santoyo et al., 2021). Ο παραπάνω μηχανισμός χρησιμοποιείται κυρίως από τα είδη και στελέχη του γένους *Pseudomonas*, τα οποία αναπτύσσουν μεγάλους πληθυσμούς στη ριζόσφαιρα, ενώ διαθέτουν υψηλή προσαρμοστικότητα ως προς το περιβάλλον και τις θρεπτικές τους απαιτήσεις (Biessy & Filion, 2021).

Ακολούθως, οι αλληλεπιδράσεις κάποιων PGPR με τις ρίζες των φυτών δύναται να ενεργοποιήσουν έναν ακόμα έμμεσο μηχανισμό που ονομάζεται “ανάπτυξη διασυστηματικής αντοχής” (Induced Systemic Resistance, ISR). Κατά τον μηχανισμό αυτό, οι φυτορμόνες γιασμονικό οξύ (Jasmonic acid, JA) και αιθυλένιο (Ethylene, ET) έχουν καταλυτικό ρόλο στην επιτυχή ανάπτυξη αντοχής ενάντια των φυτοπαθογόνων οργανισμών (Mashabela et al., 2022).



Εικόνα 6 Άμεσοι και έμμεσοι μηχανισμοί των PGPR (Mashabela et al., 2022)

1.8.3 Τρόποι εφαρμογής των PGPR

Οι μέθοδοι εφαρμογής των PGPR στα φυτά ποικίλλουν και παράλληλα έχουν διαφορετικό αντίκτυπο στα τελικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, πληθώρα ερευνών έχει εστιάσει στην επίδραση των διαφορετικών διαδικασιών εφαρμογής τους στα φυτά.

Η εφαρμογή των PGPR στα φύλλα των φυτών και συγκεκριμένα ψεκάζοντας τη φυλλική τους επιφάνεια, αποτελεί μία από τις μεθόδους χορήγησης. Ακόμα, μελέτες έχουν εστιάσει στη χορήγηση των PGPR, τόσο στις ρίζες των νεαρών φυτών, όσο και απευθείας στο έδαφος, σε πολύ μικρή απόσταση από τα φυτά. Επίσης, επιτυχώς ενσωματώθηκαν τα ριζοβακτήρια αυτά και κατά την εμφάνιση των σπόρων, προτού λάβει χώρα η σπορά (Efthimiadou et al., 2020). Μια καινοτόμα στρατηγική αναφέρει τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσδώσει η συνδυαστική εφαρμογή των PGPR με νανοϋλικά, όπως ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος και το τιτάνιο. Ωστόσο περεταίρω μελέτες απαιτούνται για την καλύτερη διερεύνηση των θετικών και αρνητικών επιδράσεων, στη ριζόσφαιρα του φυτού (Nayana et al., 2020). Τέλος, καθώς τα αποτελέσματα ποικίλλουν ανάλογα με τον τρόπο που εφαρμόζονται, πολλοί ερευνητές έχουν συνδυάσει 2 ή περισσότερους τρόπους ώστε να τους συγκρίνουν (Efthimiadou et al., 2020; Esitken et al., 2010).

1.8.4 Μελέτες για την επίδραση των PGPR σε καλλιέργεια αραβοσίτου

Είναι γνωστό πως η βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του αραβοσίτου, αποτελεί αντικείμενο συνεχής μελέτης για την επισιτιστική κοινότητα, με σκοπό την κάλυψη των αυξανόμενων επισιτιστικών αναγκών. Επίσης, μελέτη για την αξιοποίηση των αλατούχων

εδαφών, με τη χρήση PGPR, πραγματοποιήθηκε από τον M. Irfan και τους συνεργάτες του, καλλιεργώντας αραβόσιτο σε πειραματικό αγρό του Πακιστάν. (Irfan et al., 2019) Η ευαισθησία του αραβοσίτου στην αλατότητα (Estrada et al., 2013), επαληθεύτηκε από το μάρτυρα του πειράματος, ενώ αντίθετα οι επεμβάσεις όπου χορηγήθηκαν στελέχη των *Pseudomonas syringae*, *Enterobacter aerogenes* και *Pseudomonas fluorescens* συνδυαστικά με διάφορα carriers, αύξησαν σημαντικά την τελική απόδοση των φυτών αραβοσίτου (Irfan et al., 2019). Σε συνθήκες υδατικού stress, η απόδοση του αραβοσίτου παρέμεινε σε ικανοποιητικά επίπεδα, ύστερα από χορήγηση των PGPR *Cupriavidus necator* (1C2) και *Pseudomonas fluorescens* (S3X), η οποία αύξησε την αποτελεσματική αφομοίωση αζώτου (N) και φωσφόρου (P) από τα φυτά (Pereira et al., 2020). Τόσο η διαφυλλική όσο και η εδαφική μέθοδος χορήγησης ριζοβακτηρίων φυτικής ανάπτυξης (*Azotobacter chroococcum*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus megatherium*) επίδρασαν θετικά στα αγρονομικά χαρακτηριστικά του αραβοσίτου (Efthimiadou et al., 2020). Είναι γνωστό πως κατά τη διαδικασία της απονιτροποίησης, μεγάλη ποσότητα αζώτου χάνεται και ακολούθως εκπέμπεται σε μορφή αερίου (NO₂) στην ατμόσφαιρα. (Syakila & Kroeze, 2011) Ωστόσο, η χορήγηση ριζοβακτηρίων που έχουν προωθούν τη φυτική ανάπτυξη, δύναται να μετριάσει τις απώλειες αυτές, σε συνάρτηση με το εδαφικό άζωτο και τον εδαφικό άνθρακα που είναι διαθέσιμος. Όσο μικρότερη είναι η επιρροή του άνθρακα στη δράση των απονιτροποιητικών βακτηρίων, τόσο μεγαλύτερη ήταν η συγκέντρωση του αζώτου που ήταν αφομοιώσιμη από τα φυτά του αραβοσίτου (Florio et al., 2019). Παρά την έκθεση φυτών αραβοσίτου σε υψηλές συγκεντρώσεις καδμίου (Cd), στελέχη του γένους *Enterobacter* και *Klebsiella* κατάφεραν μετριάσουν τις επιπτώσεις της τοξικότητας, καθώς δεν επηρεάστηκαν οι ευεργετικές τους ιδιότητες. Αντίθετα, στελέχη του γένους *Bacillus* και *Leifsonia* παρουσίασαν ευαισθησία στην τοξικότητα και κατά συνέπεια μειωμένη απόδοση (Ahmad et al., 2016). Οι Zemrany et al. μελέτησαν την επίδραση του PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 στο ριζικό σύστημα των φυτών του αραβοσίτου. Συγκεκριμένα παρατήρησαν σημαντική αύξηση στη βιομάζα και το μήκος των ριζών, ενώ η διάμετρος των ριζών δεν επηρεάστηκε ιδιαίτερα. Ως αποτέλεσμα των αυξήσεων αυτών, οι ρίζες των φυτών που χορηγήθηκε το προαναφερόμενο ριζοβακτήριο είχαν μεγαλύτερη επιφάνεια από τους μάρτυρες και κατ' επέκταση μεγαλύτερη αλληλεπίδραση με τα εδαφικά τεμαχίδια αλλά και έκκριση μεγαλύτερων ποσοτήτων οργανικών ενώσεων, στην περιοχή της ριζόσφαιρας (El Zemrany et al., 2007). Τέλος, έρευνα που πραγματοποιήθηκε σχετικά με την αλληλεπίδραση τριών διαφορετικών PGPR με φυτά

αραβοσίτου κατέληξε σε συμπεράσματα που επαληθεύουν τις ευεργετικές τους ιδιότητες. Ακριβέστερα, η ενσωμάτωση των *Pseudomonas fluorescens* και *Pseudomonas putida* οδήγησε σε σημαντική αύξηση του ποσοστού βλαστικότητας, του αριθμού φύλλων, της φυλλικής επιφάνειας αλλά και τον καλύτερο δείκτη ευρωστίας. Ως προς το ύψος των φυτών αραβοσίτου, οι σημαντικότερες αυξήσεις καταγράφηκαν στις επεμβάσεις όπου προστέθηκε αποκλειστικά το *Azospirillum lipoferum*, ενώ ταυτόχρονα στις ίδιες επεμβάσεις σημειώθηκαν οι υψηλότερες τιμές υπόγειας ξηράς ουσίας (Noumanov et al., 2013).

1.8.5 Μελέτη για την επίδραση των PGPR σε διάφορες καλλιέργειες

Προφανώς και η καλλιέργεια αραβοσίτου αποτελεί μία από τις εκατοντάδες καλλιέργειες και όχι η μοναδική, στην οποία έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα σχετικά με την αλληλεπίδρασή τους με τα ριζοβακτήρια φυτικής ανάπτυξης. Η κατακλείδα των περισσότερων ερευνών περιλαμβάνει θετικά συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τη χορήγηση των PGPR και μια ανασκόπηση τους θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Αρχικά, η συγκαλλιέργεια μάραθου (*Foeniculum vulgare L.*) με φασόλι (*Phaseolus vulgaris L.*) ευνοήθηκε σημαντικά από την προσθήκη PGPR των γενών *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Rhizobium* και *Pantoea* καθώς παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στα παραγωγικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά και των δυο φυτών (Rezaei-Chiyaneh et al., 2020). Επιπλέον, φυτοπροστατευτικό ρόλο είχαν PGPR των γενών *Bacillus* και *Pseudomonas*, ριζοβακτήρια γνωστά για τις ανταγωνιστικές τους ιδιότητες ενάντια σε ορισμένους παθογόνους μικροοργανισμούς, σε καλλιέργεια ρυζιού και τσαγιού (Suryadi et al., 2019), συμπέρασμα που επαληθεύουν και οι Annapurna et al., παρατηρώντας την αντιμετώπιση φυτοπαθογόνων από τα PGPR, μέσω του μηχανισμού της επαγωγικής συστηματικής αντίστασης ISR (Annapurna et al., 2013). Ακόμα, ριζοβακτήρια που εντοπίστηκαν στη ριζόσφαιρα καλλιέργειας τομάτας, αντιμετώπισαν επιτυχώς το φυτοπαθογόνο *Sclerotinia sclerotiorum* (Guerrieri et al., 2020), ενώ παράλληλα η εδαφική χορήγηση ριζοβακτηρίων με ιδιότητες ενίσχυσης φυτικής ανάπτυξης κατάφεραν να βελτιώσουν σημαντικά τα μορφολογικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών τομάτας (Katsenios et al., 2021). Σύμφωνα με την A. Stoll et al., το χρονικό διάστημα κατά το οποίο θα λάβει χώρα η προσθήκη των PGPR θεωρείται μείζονος σημασίας. Αναλυτικότερα, η χορήγηση του ριζοβακτηρίου *Bacillus velezensis* στα αρχικά φαινολογικά στάδια τομάτας (*Solanum lycopersicum*) και πιπεριάς (*Capsicum annuum*) βελτίωσε τις αποδόσεις των δυο φυτών, ενώ δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές κατά την προσθήκη

στα τελευταία φαινολογικά στάδια των φυτών (Stoll et al., 2021). Ύστερα από την απομόνωση και την αναγνώριση ενδογενών ριζοβακτηρίων από τη ριζόσφαιρα σιταριού, υπεύθυνα για την αύξηση του μήκους των βλαστών, των ριζών αλλά και της βιομάζας ήταν ριζοβακτήρια των γενών *Stenotrophomonas* και *Acetobacter*. (Abbasi et al., 2011)

1.9 PGPR Σκευάσματα

Μεγάλη είναι η ποικιλία των σκευασμάτων με βασικό συστατικό τα PGPR, τα οποία προωθούνται στην αγορά λόγω των ευεργετικών τους ιδιοτήτων και επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες τις εκάστοτε καλλιέργειας (Tabassum et al., 2017). Ωστόσο, τα σκευάσματα αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν φερέγγυα, γεγονός που οφείλεται στη μεγάλη διακύμανση των αποτελεσμάτων και την έλλειψη σταθερότητας, λόγω της εξάρτησης από πολλούς παράγοντες, όπως το κλίμα και τα χαρακτηριστικά της αντίστοιχης καλλιέργειας (Vassilev et al., 2015). Η εφαρμογή υγρού διαλύματος βιοδιεγερτών, ως εναλλακτική δράση της αειφορικής γεωργίας, προσδίδει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η υψηλή κυτταρική συγκέντρωση, σχεδόν μηδενικά ποσοστά ρύπανσης, μακροβιότερο κύκλο ζωής, περισσότερη ανθεκτικότητα ενάντια στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις και μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα (Gopi et al., 2020). Τα σκευάσματα που περιέχουν τα PGPR σε υγρή μορφή απαιτούν λιγότερο χρόνο προετοιμασίας αλλά και εφαρμογής, συγκριτικά με τα στερεά. Ακόμα, το κόστος παραγωγής των υδάτινων σκευασμάτων είναι σημαντικά μικρότερο σε αντίθεση με τα στερεής μορφής σκευάσματα, γεγονός που προκύπτει από τις διαδικασίες ξήρανσης που απαιτούνται (Lobo et al., 2019). Πολλά από τα σκευάσματα που είναι διαθέσιμα στην αγορά περιλαμβάνουν ριζοβακτήρια συνδυαστικά με κάποιον στερεό μεταφορέα, όπως π.χ. ο βερμικουλίτης και η τύρφη. Όμως οι επιδόσεις τους περιορίζονται αρκετά λόγω του βραχύβιου κύκλου ζωής των οργανισμών και τον υψηλό ρυθμό εφαρμογής τους. Στα μειονεκτήματα αυτά προστίθεται και η απόφραξη του ακροφυσίου του ψεκαστήρα εξ αιτίας του μεγάλου μεγέθους των σωματιδίων (Gopi et al., 2020). Παρά τα μειονεκτήματα των στερεής μορφής σκευασμάτων, θετικές επιδράσεις σημειώθηκαν κατά τη συνδυαστική παρουσία τύρφης και του ριζοβακτηρίου *B. thurigiensis* στην απόδοση καλλιέργειας φασολιού, ενώ παράλληλα υπογραμμίστηκε η δυσκολία κατά τη συντήρηση του υγρού διαλύματος βιοδιεγερτών σε φυσικές συνθήκες (Adoko et al., 2021)

1.10 Μεταφορείς-Carriers

Η ραγδαία εξάπλωση του ανθρώπινου πληθυσμού έχει επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τον τομέα της γεωργίας, οι επισιτιστικές ανάγκες έχουν αυξηθεί ανάλογα και επομένως η επιστημονική κοινότητα καλείται να βρει λύσεις για την κάλυψη αυτών των αναγκών. Οι προσπάθειες για την εύρεση λύσεων στο επισιτιστικό πρόβλημα, έχουν οδηγήσει στην εντατικοποίηση της γεωργίας και την αλόγιστη χρήση χημικών λιπασμάτων, προκαλώντας υποβάθμιση στη γονιμότητα των εδαφών. Η αλυσίδα των προβλημάτων αυτών έχει ως τελικό αποδέκτη τον άνθρωπο, θέτοντας σε κίνδυνο την ποιότητα της ζωής του. Η βιολογική γεωργία αποτελεί μία από τις λύσεις που έχει προταθεί από την επιστημονική κοινότητα. Συγκεκριμένα, η χρήση βακτηρίων που προωθούν τη φυτική ανάπτυξη εφαρμόζεται εδώ και χρόνια. Όμως η βιωσιμότητα και η αξιοποίησή τους από τα φυτά παραμένει μια πρόκληση για τους επιστήμονες. Υπεύθυνοι για όλα αυτά είναι και οι μεταφορείς, οι οποίοι αποσκοπούν στην αποτελεσματική μεταφορά των βακτηρίων στο έδαφος (Ajeng et al., 2020). Για να χαρακτηριστεί ένας μεταφορέας αποτελεσματικός, θα πρέπει να μπορεί να εξασφαλίσει τις απαραίτητες, για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, συνθήκες διαβίωσης, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που καθορίζεται από τα μεμονωμένα στάδια ανάπτυξης του βιολογικού κύκλου του εκάστοτε μικροοργανισμού. Παράλληλα, θα πρέπει να μεταφέρει δίχως απώλειες έναν ικανοποιητικό αριθμό μικροοργανισμών, για την επιτυχή ανταπόκριση των φυτών, κατά τη χορήγησή τους (Bashan et al., 2014).

1.10.1 Υδατικό διάλυμα

Σε πολλές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί ανά τα χρόνια, τα carriers συναντώνται με τη μορφή υδατικού διαλύματος. Σε καλλιέργεια ινδικής μουστάρδας (*Brassica campestris*) χορηγήθηκαν τα στελέχη KRP1 και KRB1 των *Pseudomonas aeruginosa* και *Bacillus licheniformis* αντίστοιχα μαζί με υδατικό διάλυμα από υπολείμματα βιομηχανίας καλλυντικών ως carrier, προωθώντας θετικά την ανάπτυξη των μορφολογικών τους χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αύξηση του νεπού βάρους των φυτών κατά 122 και 120% στις επεμβάσεις που χορηγήθηκε το *P. aeruginosa* και *B. licheniformis* αντίστοιχα. Βελτίωση και στις μετρήσεις του ξηρού βάρους της τάξεως του 95 και 90% οδήγησε η παρουσία του *P. aeruginosa* και *B. licheniformis* αντίστοιχα, συγκριτικά με το μάρτυρα. Τέλος, αύξηση σημειώθηκε και κατά την απόδοση σπόρου κατά 45 και 34% όταν προστέθηκε το *P. aeruginosa* και το *B. licheniformis* αντίστοιχα (Maheshwari et al., 2015). Σύμφωνα με τους Ngan &

Riddech, αύξηση στην περιεχόμενη χλωροφύλλη των φυτών καλλιέργειας ιβίσκου (*Hibiscus sabdariffa* L.) της τάξεως του 31 και 29% 20 και 40 ημέρες μετά τη σπορά, όταν χορηγήθηκε το PGPB *Bacillus amyloliquefaciens* σε μορφή υδατικού διαλύματος. (Ngan & Riddech, 2021).

1.10.2 Ζεόλιθος

Η περιγραφή του ζεόλιθου πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1756, όταν ο Σουηδός χημικός Fredrich Cronstedt, κατά τη συλλογή ορισμένων κρυστάλλων από ορυχείο της Σουηδίας, παρατήρησε πως εκείνοι άφριζαν μόλις θερμαίνονταν στους 200 °C. Στη χαρακτηριστική αυτή ιδιότητα οφείλει και την ετυμολογία της ο ζεόλιθος, από τις ελληνικές λέξεις “ζέω” και “λίθος”, δηλαδή πέτρες βρασμού. Αργότερα, προέκυψε και το συμπέρασμα πως ο ζεόλιθος είναι ορυκτό που συμμετέχει στη σύσταση των ηφαιστειακών πετρωμάτων (Polat et al., 2004; Weckhuysen & Yu, 2015). Μεταξύ των πολλών εφαρμογών που βρίσκει χρήση ο ζεόλιθος, ανήκει και η ικανότητά του να βελτιώνει το έδαφος.

Η συνδυαστική παρουσία ζεόλιθου και βακτηρίων φυτικής ανάπτυξης σε καλλιέργεια θυμαριού (*Thymus vulgaris*), συνέβαλε σημαντικά στην αύξηση αγρονομικών χαρακτηριστικών των φυτών, όπως το ύψος, το νωπό και το ξηρό βάρος των φυτών για 2 διαδοχικές χρονιές. Ακριβέστερα, χρησιμοποιήθηκαν στελέχη του είδους *Bacillus* και *Azotobacter*, για τη μελέτη των ευεργετικών τους ιδιοτήτων. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν πως η συγκεκριμένη επέμβαση είχε τη θετικότερη επίδραση στα αγρονομικά χαρακτηριστικά των φυτών, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Αρχικά, το ύψος των φυτών που μετρήθηκε, εφαρμόζοντας τη μισή ποσότητα ζεόλιθου τις 2 χρονιές ήταν 35,6 και 32,2 αντίστοιχα, δίνοντας τιμές υψηλότερες σχετικά με τις άλλες επεμβάσεις. Επιπροσθέτως, το νωπό βάρος των φυτών για την 1^η και τη 2^η χρονιά της καλλιέργειας θυμαριού μετρήθηκαν στα 102,9 g και 106,9 g αντίστοιχα. Ευεργετική επίδραση σημειώθηκε και στο ξηρό βάρος, κατά το οποίο, με παρουσία ζεόλιθου, καταγράφηκαν την 1^η και τη 2^η χρονιά 41 g και 47,9 g αντίστοιχα (Zaghloul et al., 2016).

Σε καλλιέργεια γερμανικού χαμομηλιού (*Matricaria Chamomilla* L.), στις επεμβάσεις που χρησιμοποιήθηκε ζεόλιθος μαζί με Plant Growth Promoting βακτήρια, απελευθερώθηκαν φυτο-ορμόνες, όπως το γιββερελικό οξύ και διασπάστηκαν αδιάλυτες ενώσεις φωσφατάσης. Ως αποτέλεσμα, αυξήσεις σημειώθηκαν στο ρυθμό φωτοσύνθεσης, στο ξηρό βάρος και την προσρόφηση θρεπτικών, με πιο αξιοσημείωτα το άζωτο και το φώσφορο (Salehi et al., 2011).

Η παρουσία ζεόλιθου σε καλλιέργεια τομάτας, επαλήθευσε την ευεργετική συμβολή του ως μεταφορέας των PGPR. Σαφέστερα, η ταυτόχρονη παρουσία στελέχους γένους *Priestia megaterium*, στελέχους γένους *Azotobacter chroococcum* και ζεόλιθου, οδήγησε σε βελτίωση των αγρονομικών χαρακτηριστικών της καλλιέργειας. Η 1^η μέτρηση που έλαβε χώρα στις 60 μέρες μετά τη σπορά, το ξηρό βάρος των φυτών (334 g) ήταν από τις υψηλότερες και στατιστικά σημαντικότερες τιμές που σημειώθηκαν. Κατά τη 2^η μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 80 μέρες μετά τη σπορά, το ξηρό βάρος των φυτών που χορηγήθηκε το παραπάνω μίγμα έδωσαν τις δεύτερες υψηλότερες τιμές (436 g), σε σχέση με τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Ακόμα, ως προς την απόδοση οι τιμές που λήφθηκαν, ήταν στατιστικά σημαντικά διαφορετικές σε σύγκριση με το μάρτυρα. Στις τελικές τομάτες στις οποίες χορηγήθηκε το προαναφερμένο μίγμα, παρατηρήθηκε η υψηλότερη δραστηριότητα πολυγαλακτουρονάσης (71,2%). Τέλος οι τελικές τομάτες που συλλέχθηκαν διαπιστώθηκε πως είχαν υψηλές συγκεντρώσεις λυκοπενίου, καροτενοειδών και διαλυτών στερεών (^oBrix) (Katsenios et al., 2021).

1.11 Σκοπός του πειράματος

Η χρήση βιοδιεγερτών για την προαγωγή της φυτικής ανάπτυξης, της φυσιολογίας και της απόδοσης των καλλιεργειών, αποτελεί μία εκ των βασικών καλλιεργητικών μεθόδων της σύγχρονης γεωργίας. Η σύγχρονη γεωργία επικεντρώνεται στην αναζήτηση καινοτόμων καλλιεργητικών μεθόδων, με φιλικό προς το περιβάλλον αντίκτυπο και κατ' επέκταση τη μείωση των χημικών. Στο παρελθόν, προκειμένου να επιτευχθεί βελτίωση των συνολικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε καλλιέργειας, ο παραγωγός πραγματοποιούσε εντατική χρήση χημικών, δίχως να υπολογίζει τις συνέπειες. Τα τελευταία χρόνια όμως, οι συνέπειες αυτές έχουν επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό, τόσο την περιβαλλοντική ισορροπία (π.χ. ρυπάνσεις, ερημοποιήσεις κλπ.), όσο και την ανθρώπινη υγεία (τρόφιμα χαμηλής ποιότητας κλπ.). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος της τεχνολογίας και της επιστήμης έχει αποτελέσει έναυσμα για τη διεξαγωγή πληθώρας μελετών με απώτερο στόχο την εύρεση νέων καλλιεργητικών πρακτικών που θα οδηγήσουν στη βελτίωση της περιβαλλοντικής αλλά και της ανθρώπινης υγείας.

Η παρούσα διατριβή στοχεύει στη διερεύνηση της επίδρασης εκείνων των βακτηρίων που δρουν ως βιοδιεγέρτες, γνωστά και ως Plant Growth Promoting Bacteria, από τα οποία

χρησιμοποιήθηκαν στελέχη των *Bacillus subtilis*, *Bacillus mojavenis*, *Bacillus amyloliquefaciens* και *Bacillus thuringiensis*, συνδυαστικά με τη χρήση δυο διαφορετικών carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στη βελτίωση των μορφολογικών και φυσιολογικών χαρακτηριστικών αλλά και στην τελική απόδοση των φυτών καλλιέργειας αραβοσίτου. Παράλληλα, βασική πρόθεση της παρούσας μελέτης είναι να συμβάλλει στη συνολική προσπάθεια που πραγματοποιείται από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα, παρέχοντας όλο και περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα των βιοδιεγερτών. Οι μηχανισμοί δράσης των βακτηρίων εκείνων που προάγουν τη φυτική ανάπτυξη δεν έχουν εξακριβωθεί αξιόπιστα, μέχρι και σήμερα, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για όλο και περισσότερες μεταγενέστερες μελέτες, ώστε να προκύψει κάποιο πιο σαφή συμπέρασμα.

2 Υλικά και μέθοδοι

2.1 Περιοχή διεξαγωγής πειράματος και πειραματικός σχεδιασμός

Το πείραμα έλαβε χώρα σε πειραματικό αγρό που βρίσκεται βορειοανατολικά του νομού Αττικής, στην περιοχή του Ωρωπού (38°180' N, 23°450' E, Υψόμετρο: 45 m). Για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε υβρίδιο αραβοσίτου (*Zea mays L.*), το DKC 6980 (K&N EFTHYMIADIS SINGLE MEMBER S.A., Athens, Greece).



Εικόνα 7 Σπόροι αραβοσίτου (υβρίδιο DKC 6980) (Προσωπικό αρχείο)

Η σπορά πραγματοποιήθηκε στις 26 Απριλίου στον πειραματικό αγρό του Ωρωπού. Η χορήγηση των carriers και των PGPR πραγματοποιήθηκε στις 31 Μαΐου (34 Ημέρες Μετά τη Σπορά). Η συγκομιδή των φυτών αραβοσίτου πραγματοποιήθηκε στις 15 Σεπτεμβρίου. Το πειραματικό σχέδιο στο οποίο βασίστηκε το πείραμα ήταν εντελώς τυχαίο. Οι επεμβάσεις ήταν συνολικά 14 και οι επαναλήψεις ήταν συνολικά 3. Ως παράγοντες

διαχωρισμού, περιλαμβάνονται οι μεταφορείς (2 επίπεδα: 1 ο ζεόλιθος και 1 το υδατικό διάλυμα) και τα PGPR (7 επίπεδα: 3 στελέχη του *Bacillus subtilis*, 1 στέλεχος του *Bacillus thuringiensis*, 1 στέλεχος του *Bacillus mojavensis*, 1 στέλεχος του *Bacillus amyloliquefaciens* και 1 ο μάρτυρας). Κάθε στέλεχος του *B. subtilis* συνδυάστηκε με το καθένα από τα δυο carriers, με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης τους στον αραβόσιτο. Σε κάθε αγροτεμάχιο, τοποθετήθηκαν 4 σταλακτηφόροι σωλήνες, με σταλάκτες ανά 20 εκατοστά. Η απόσταση μεταξύ των αρδευτικών σωλήνων ήταν 75-80 εκατοστά. Η απομάκρυνση των ζιζανίων πραγματοποιήθηκε με χειρωνακτικό τρόπο ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η χρήση χημικών σκευασμάτων (εντομοκτόνα, ζιζανιοκτόνα κλπ.) αποφεύχθηκαν καθ' όλη την πορεία του πειράματος.



Εικόνα 8 Χορήγηση ζεόλιθου στα φυτά αραβοσίτου (Προσωπικό αρχείο)

Πριν τη σπορά, συλλέχθηκαν δειγματοληπτικά 4 αντιπροσωπευτικά δείγματα εδάφους από 4 διαφορετικά σημεία των επιφανειακών στρωμάτων του αγρού (0-30 εκατοστά) και αναλύθηκαν στο εργαστήριο, με σκοπό την διερεύνηση της σύστασης του εδάφους. Αρχικά, τα κατιόντα Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^{+} υπολογίστηκαν μέσω της φασματοφωτομετρικής ατομικής απορρόφησης (ISO 11260:1994) Επίσης, τα Zn^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{+} , και Fe^{3+} προσδιορίστηκαν μέσω της φασματοφωτομετρικής ατομικής απορρόφησης με τη χρήση DTPA (ISO 14870:2001). Ακόμα, το διαθέσιμο Βόριο υπολογίστηκε με τη βοήθεια του φασματοφωτομέτρου, με χρήση αζωμεθίνης-Η, ως αντιδραστήριο ανάπτυξης χρώματος, κίτρινου στην προκειμένη περίπτωση. Παράλληλα, το ολικό N, υπολογίστηκε με βάση το ISO 1995 (11261). Ο οργανικός C σύμφωνα με το ISO 1998 (14235) και ο διαθέσιμος P με βάση το ISO, 1994 (11263). Η κοκκομετρική σύσταση εδάφους εκτιμήθηκε με βάση τη μέθοδο του Βουγιούκου. Η υγρασία του περιεχόμενου δείγματος προσδιορίστηκε σε φούρνο για 24 ώρες και σε θερμοκρασία 105 °C . Με τη βοήθεια πεχαμέτρου, το οποίο ήταν εξοπλισμένο με γυάλινο ηλεκτρόδιο σε κορεσμένο εκχύλισμα πάστας, μετρήθηκε η τιμή του pH. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα υπολογίστηκε σε ένα υδατικό εκχύλισμα, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που αναγράφεται στο ISO 11265:1994. Για τον υπολογισμό των συνολικών αλάτων, πραγματοποιήθηκε χρήση των αποτελεσμάτων, τόσο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, όσο και του ποσοστού κορεσμού των εδαφικών δειγμάτων. Τα τελικά αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, ως εξής:

Παράμετροι	Βάθος 0-30 εκ.	Βάθος 30-60 εκ.
Άμμος (%)	46	
Ιλύς (%)	34	
Άργιλος (%)	20	
Κοκκομετρική Σύσταση	L	
pH	7.7	7.9
Ολικό CaCO_3 (%)	20	19
Ενεργό CaCO_3 (%)	12	11
Κορεσμός (%)	55	
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (mmhos/cm)	1.41	1.1
Συνολικά Άλατα (%)	0.05	0.04
Οργανική Ουσία (%)	4.2	2.2
Συνολικό Άζωτο (mg/g)	1.1	0.87
Διαθέσιμο K (meq/100g)	1.5	0.84
Διαθέσιμο Ca (meq/100g)	17	16
Διαθέσιμο Mg (meq/100g)	14	11

Διαθέσιμο P (mg/kg)	43	15
Fe-DTPA (mg/kg)	13	15
Cu-DTPA (mg/kg)	5.9	2.8
Zn-DTPA (mg/kg)	2.4	0.86
Mn-DTPA (mg/kg)	17	13
Διαθέσιμο B (mg/kg)	0.57	0.46

Πίνακας 4 Φυσικοχημικές ιδιότητες πειραματικού αγρού

2.2 Απομόνωση και καλλιέργεια των PGP βακτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν

Τα βακτηριακά στελέχη των PGP βακτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή του πειράματος, αρχικά απομονώθηκαν από πειραματικό αγρό, στον οποίο καλλιεργούταν αραβόσιτος, με τη μέθοδο streaking. Αρχικά, απομονώθηκαν από πειραματικό αγρό, στον οποίο καλλιεργούταν αραβόσιτος, με τη μέθοδο streaking. Η ταυτοποίηση των βακτηρίων έγινε με την αλληλούχιση των περιοχών 16 rDNA με τη διαδικασία η οποία περιγράφεται αναλυτικά από τους Katsenios et al. (Katsenios et al., 2022). Η μέθοδος καλλιέργειας των παραπάνω βακτηρίων ακολούθησε τα βήματα που περιγράφονται με σαφή τρόπο από τους ερευνητές Efthimiadou et al. (Efthimiadou et al., 2020). Κατά το τέλος του σταδίου της ζύμωσης, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ιδανικής ανάπτυξης, του pH και της παραγωγής της φυτομόνης αυξίνης, των βακτηριακών στελεχών μέσω της χρωματομετρικής ανάλυσης. Όλες οι προαναφερόμενες διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν από την εταιρεία Agrunik, που έχει έδρα στη Σερβία.

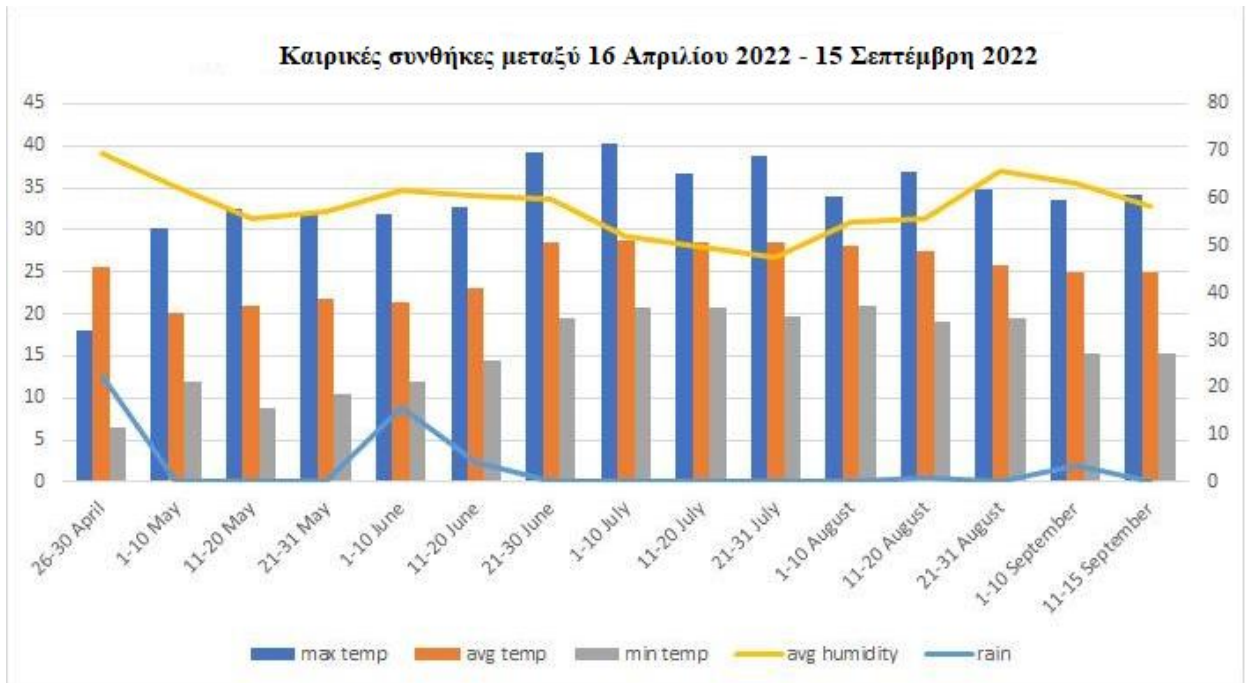
	Στέλεχος	pH	Αυξίνη (ppm)	Υγρό Διάλυμα (CFU/ml)	Ζεόλιθος (CFU/g)
1	548	5.7	11.5	6.4*10 ⁹	1.86*10 ⁷
2	5B2	5.79	16.38	2.46*10 ⁹	1.7*10 ⁷
3	557	5.96	25	2.1*10 ⁹	1.01*10 ⁷
4	Z3	6.09	30.52	3.03*10 ⁹	2.18*10 ⁷
5	RS-3	6.97	23.62	1.78*10 ⁹	2.9*10 ⁷
6	109/18 1	5.84	22.93	3.21*10 ⁹	1.6*10 ⁷

Πίνακας 5 Συγκεντρώσεις των PGPB και των carriers που χορηγήθηκαν, η βέλτιστη οξύτητα και η παραγωγή αυξίνης

Ο ρυθμός εφαρμογής των PGPB ήταν 7 λίτρα/εκτάριο για τις επεμβάσεις όπου χρησιμοποιήθηκε υγρό διάλυμα, ως carrier. Το διάλυμα των βιοδιεγερτών αραιώθηκε με νερό βρύσης (1/100) και χορηγήθηκε στο έδαφος, κοντά στις ρίζες των φυτών αραβοσίτου. Η έκταση κάθε επέμβασης ήταν 6 m², δηλαδή εφαρμόστηκαν 4.2 ml διαλύματος βιοδιεγερτών. Επομένως, εφόσον προηγήθηκε αραιώση 1/100, το αραιωμένο διάλυμα που χορηγήθηκε σε κάθε επέμβαση τελικά, ήταν 420 ml. Η ίδια συγκέντρωση μικροοργανισμών χρησιμοποιήθηκε και για τα δυο carriers. Οπότε, για τη χορήγηση του ζεόλιθου πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι υπολογισμοί, ώστε να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες συγκεντρώσεις ανά επέμβαση. Ως αραιωτικό χρησιμοποιήθηκε ο ζεόλιθος του μάρτυρα σε αναλογία 1/10.

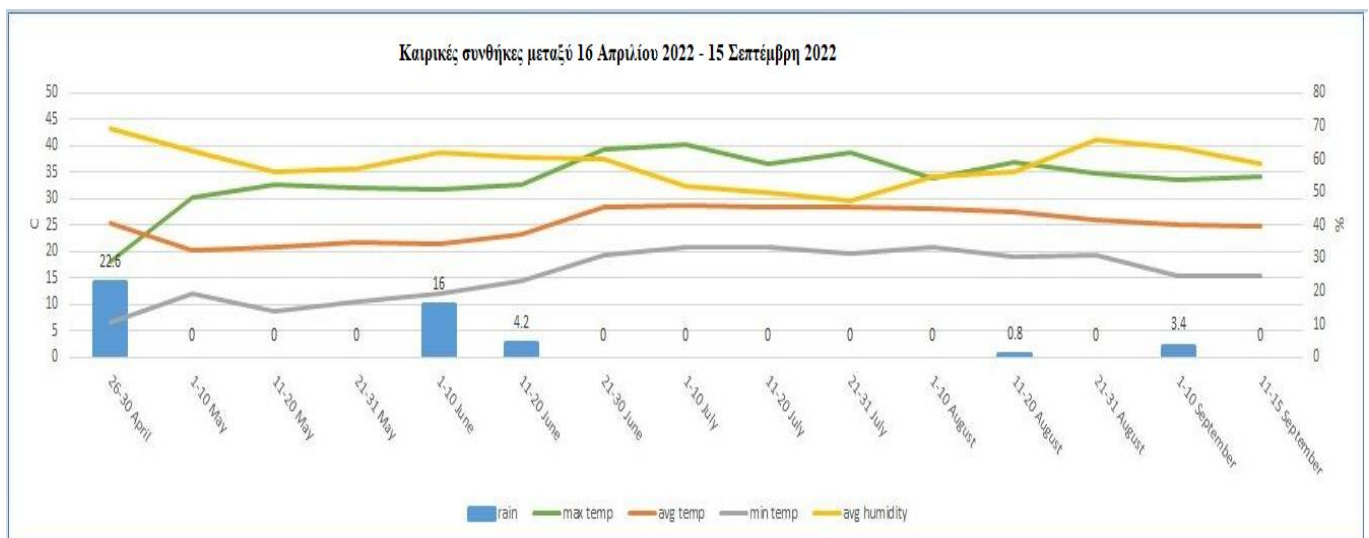
2.3 Μετρήσεις

Οι μορφολογικές και φυσιολογικές μετρήσεις (νωπό και ξηρό βάρος, χλωροφύλλη, ρυθμός φωτοσύνθεσης κλπ.) έλαβαν χώρα σε 6 διαφορετικά χρονικά διαστήματα, μετά τη σπορά. Το ξηρό βάρος των φυτών λήφθηκε με τη μέθοδο της καταστροφικής. Αναλυτικότερα, 2 αντιπροσωπευτικά φυτά ανά επέμβαση συλλέχθηκαν, υπολογίστηκε το νωπό τους βάρος και ύστερα πραγματοποιήθηκε φυσική ξήρανση για 3 βδομάδες. Για την εκτίμηση της χλωροφύλλης (μg/cm²), χρησιμοποιήθηκε ένας φορητός μετρητής SPAD (SPAD Values). Ο προσδιορισμός των φυσιολογικών παραμέτρων (φωτοσύνθεση, στοματική αγωγιμότητα κλπ.) πραγματοποιήθηκε μέρες με πλήρη ηλιοφάνεια, δίχως σύννεφα και κατά τις μεσημεριανές ώρες, κατά τις οποίες τα φύλλα βρισκόταν σε πλήρη έκταση. Οι παραπάνω μετρήσεις λήφθηκαν με τη βοήθεια ενός LCi Leaf Chamber Analysis System (ADC, Bioscientific, Hoddesdon, UK). Για τη μέτρηση της χλωροφύλλης, του ρυθμού φωτοσύνθεσης, και της στοματικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν 2 μετρήσεις ανά επέμβαση. Η τελική μέτρηση της απόδοσης πραγματοποιήθηκε στις 15 Σεπτεμβρίου. Ακριβέστερα, 10 φυτά ανά επέμβαση συγκομίστηκαν, μετρήθηκε η περιεχόμενη υγρασία τους με τη βοήθεια ενός φορητού υγρασιόμετρου και τα αποτελέσματα της απόδοσης προσαρμόστηκαν σε επίπεδα υγρασίας 15%.



Διάγραμμα 1 Καιρικές συνθήκες αγρού (1) από τις 16 Απριλίου 2022 - 15 Σεπτεμβρίου 2022, όπου Max Temp: Μέγιστη Θερμοκρασία, Avg Temp: Μέση Θερμοκρασία, Min Temp: Ελάχιστη Θερμοκρασία, Avg Humidity: Μέση Υγρασία και Rain: Βροχόπτωση

Η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και τα δεδομένα βροχοπτώσεων από έναν μετεωρολογικό σταθμό Weatherhub (TFA, Wertheim-Reicholzheim, Germany), ο οποίος τοποθετήθηκε στον πειραματικό αγρό.



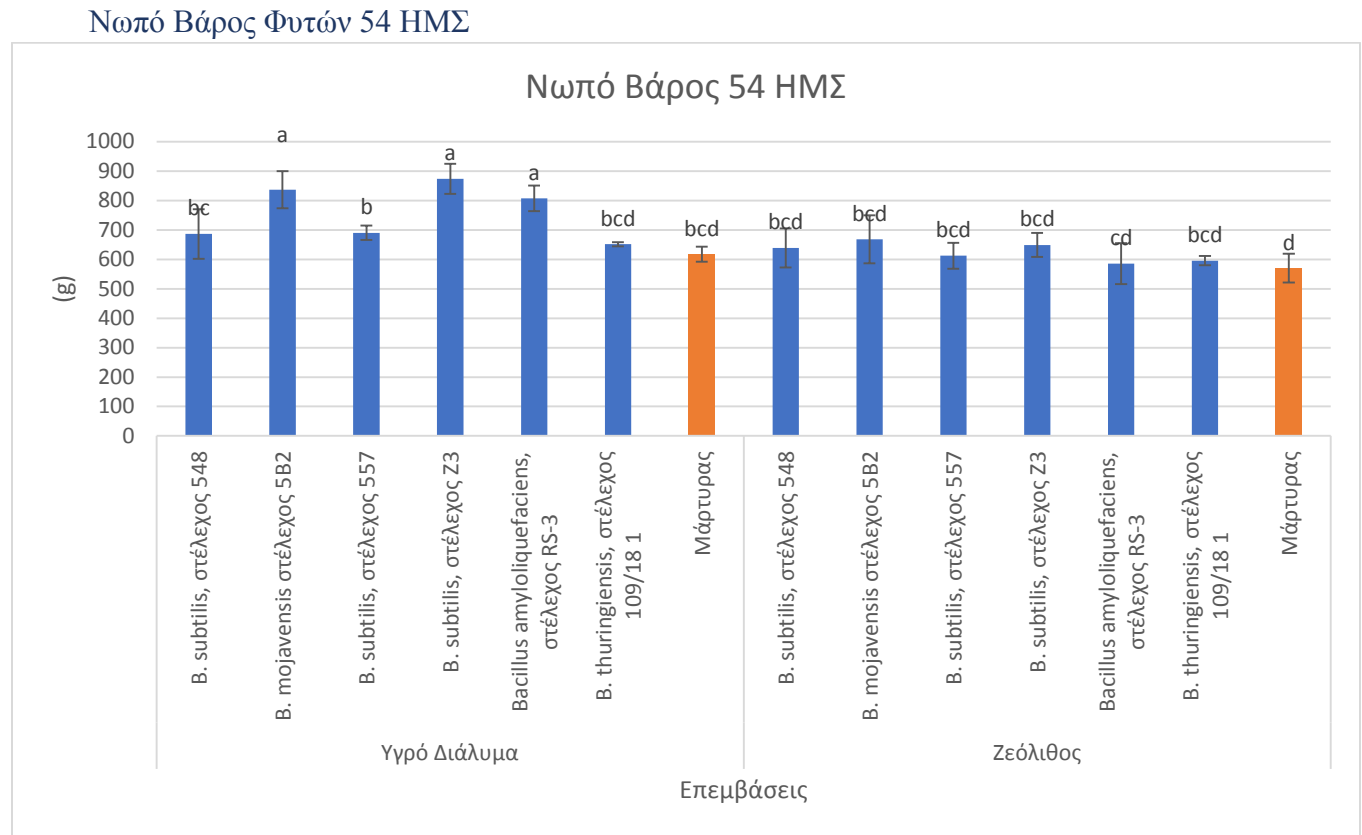
Διάγραμμα 2 Καιρικές συνθήκες αγρού (2) από τις 16 Απριλίου 2022 - 15 Σεπτεμβρίου 2022, όπου Max Temp: Μέγιστη Θερμοκρασία, Avg Temp: Μέση Θερμοκρασία, Min Temp: Ελάχιστη Θερμοκρασία, Avg Humidity: Μέση Υγρασία και Rain: Βροχόπτωση

2.4 Στατιστική Ανάλυση

Μία αμφίδρομη ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την αξιολόγηση των κύριων επιδράσεων μεταξύ των διαφορετικών ριζοβακτηρίων φυτικής ανάπτυξης PGPB (1^{ος} παράγοντας) και των διαφορετικών carriers (2^{ος} παράγοντας), αλλά και της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στους δυο παράγοντες. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του IBMSPSS software ver. 24 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA). Οι συγκρίσεις μέσω υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας Duncan test με 5% επίπεδο σημαντικότητας ($p \leq 0,05$).

3 Αποτελέσματα

3.1 Μορφολογικές Μετρήσεις

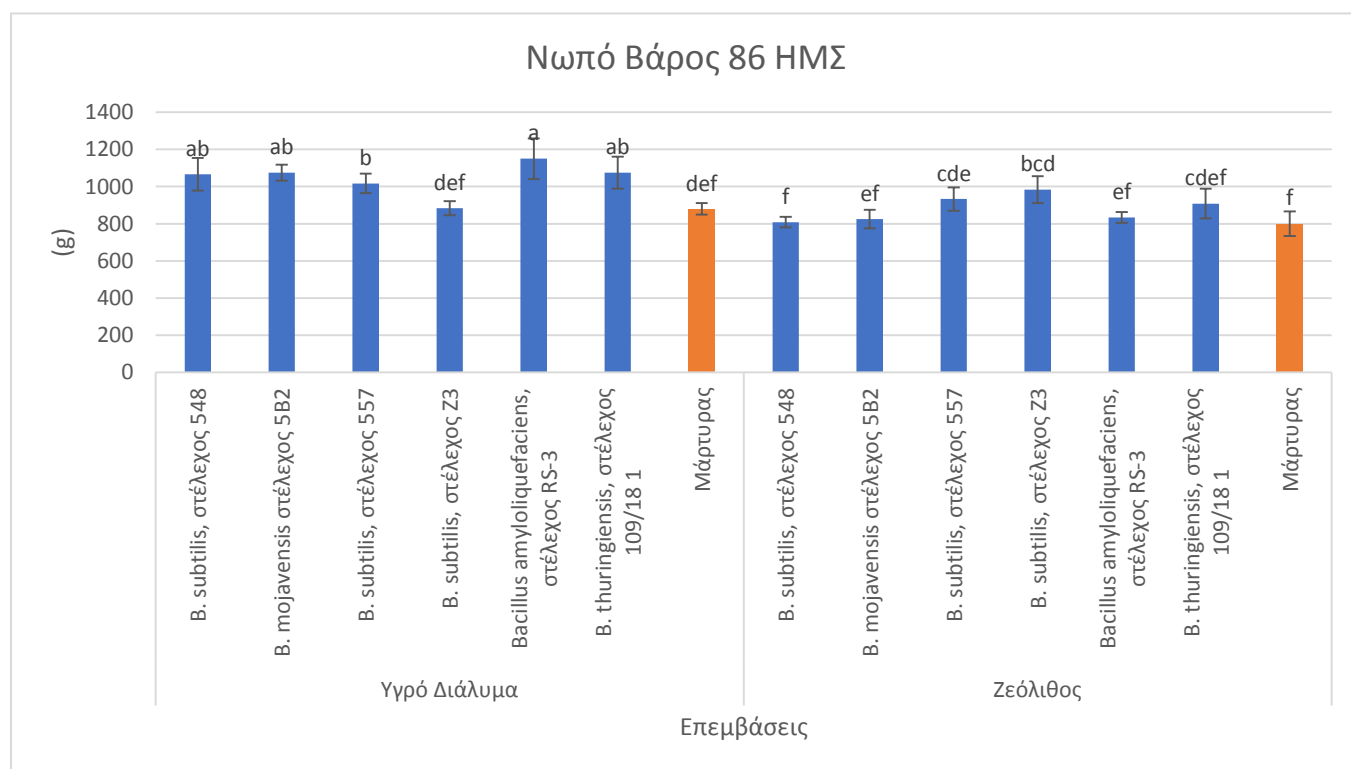


Διάγραμμα 3. Αλληλεπίδραση των 7 επεμβάσεων PGPB (*B. subtilis* στέλεχος 548, *B. mojavensis* στέλεχος 5B2, *B. subtilis* στέλεχος 557, *B. subtilis* στέλεχος Z3, *B. amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B. thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) και των 2 carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στο νωπό βάρος των φυτών αραβοσίτου 54 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p < 0,0001$) και στον παράγοντα carrier ($p < 0,0001$). Επιπλέον, παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων με στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p = 0,009$). Εφόσον παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση, ακολούθησαν ορθογώνιες συγκρίσεις μεταξύ όλων των συνδυασμών των επεμβάσεων (carrier-PGPB). Οι υψηλότερες τιμές με στατιστικά σημαντικές διαφορές καταγράφηκαν από τα PGPB 5B2 (837 g), Z3 (874 g) αλλά και RS-3 (807 g), με carrier το υγρό διάλυμα. Στη συνέχεια ακολουθεί η επέμβαση με το PGPB 557 (691 g), η οποία δεν είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τις υπόλοιπες

επεμβάσεις των PGPB με carrier το υγρό διάλυμα. Όσον αφορά το ζεόλιθο ως carrier, η υψηλότερη τιμή παρατηρήθηκε κατά την επέμβαση με το PGPB 5B2 (668 g), η οποία όμως δεν είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις υπόλοιπες επεμβάσεις, όπου χρησιμοποιήθηκε ζεόλιθος ως carrier.

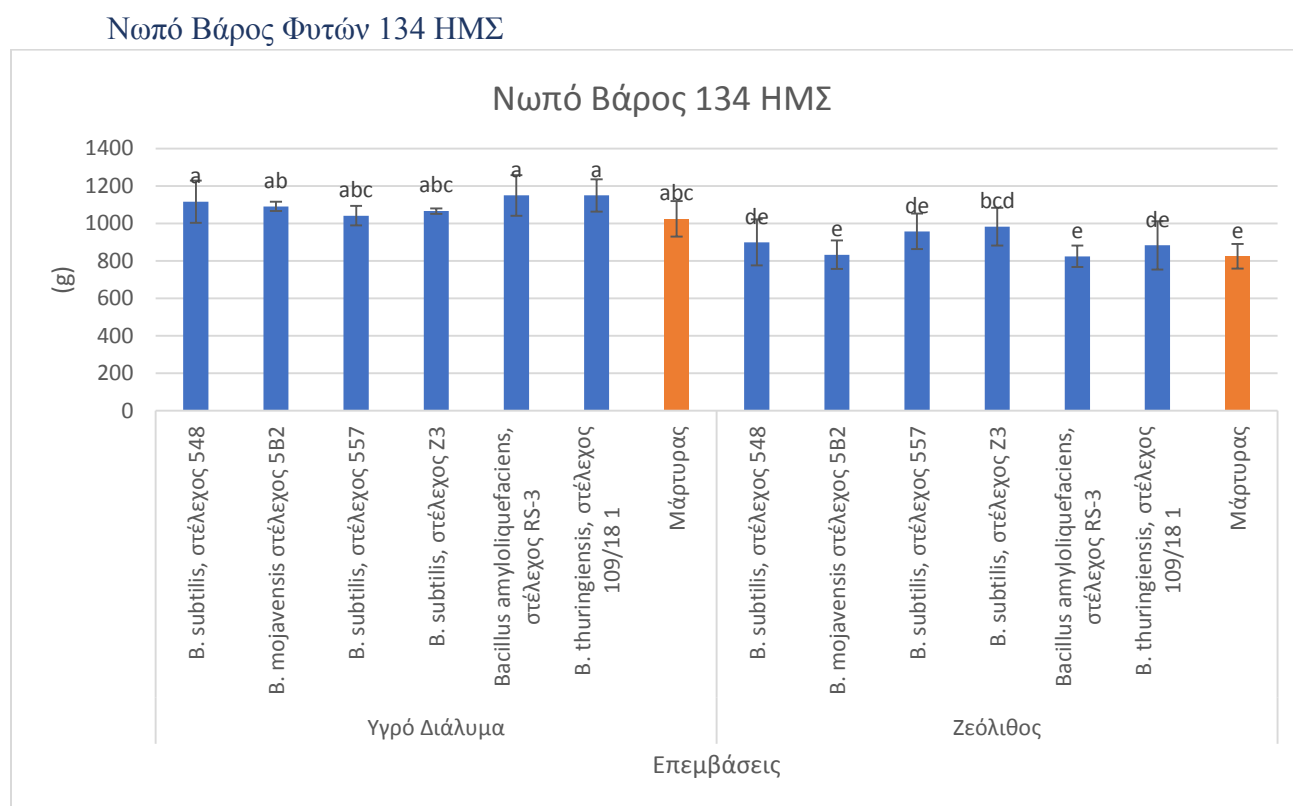
Νωπό Βάρος Φυτών 86 ΗΜΣ



Διάγραμμα 4. Αλληλεπίδραση των 7 επεμβάσεων PGPB (*B.subtilis* στέλεχος 548, *B.mojavensis* στέλεχος 5B2, *B.subtilis* στέλεχος 557, *B.subtilis* στέλεχος Z3, *B.amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B.thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) και των 2 carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στο νωπό βάρος των φυτών αραβοσίτου 86 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p < 0,0001$) και στον παράγοντα carrier ($p < 0,0001$). Επιπλέον, παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων με στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0,0001$). Εφόσον παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση, ακολούθησαν ορθογώνιες συγκρίσεις μεταξύ όλων των επεμβάσεων (Carrier-PGPB). Η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε κατά τη χρήση υγρού διαλύματος, ως carrier, σε συνδυασμό με το PGPB RS-3 (1150 g), η οποία υπερέχει με στατιστικά σημαντικές διαφορές από όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις, με εξαίρεση τις επεμβάσεις

548 (1067 g), 5B2 (1075 g) και 109/18 1 (1075 g) με carrier υγρό διάλυμα. Η επέμβαση 557 (1017 g) δεν είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις επεμβάσεις 548, 5B2 και 109/18 1, αλλά υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από την επέμβαση Z3 και το μάρτυρα. Όσον αφορά τις επεμβάσεις με carrier το ζεόλιθο, η επέμβαση Z3 έδωσε το υψηλότερο αποτέλεσμα (983 g) η οποία υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, εκτός από την επέμβαση 557 (933 g) και την 109/18 1 (908 g). Αξίζει να αναφερθεί πως η επέμβαση Z3 έδωσε καλύτερο αποτέλεσμα, όταν συνοδεύτηκε με ζεόλιθο, ως carrier (983 g), σε αντίθεση με το υγρό διάλυμα.



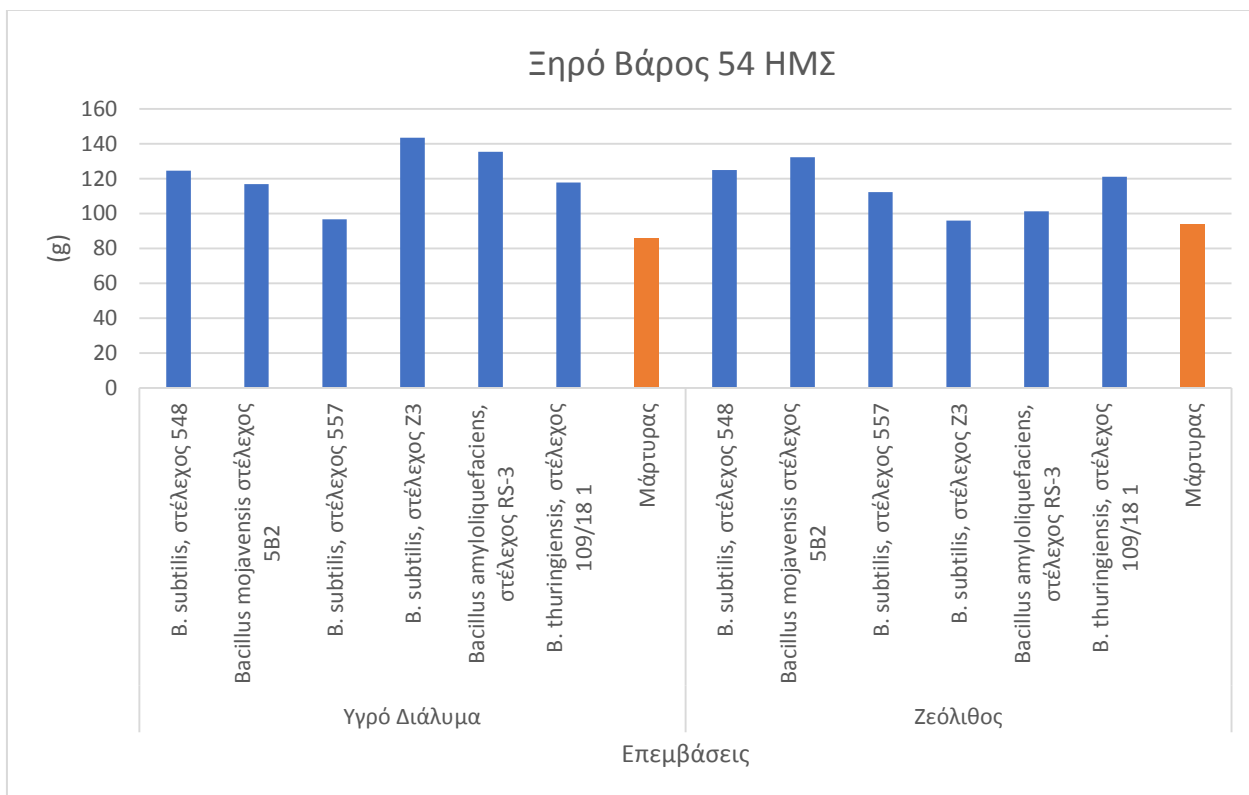
Διάγραμμα 5 Επίδραση των 7 επεμβάσεων PGPB (*B.subtilis* στέλεχος 548, *B.mojavensis* στέλεχος 5B2, *B.subtilis* στέλεχος 557, *B.subtilis* στέλεχος Z3, *B.amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B.thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) και των 2 carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στο νωπό βάρος των φυτών αραβοσίτου 134 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p=0,165$) και στον παράγοντα carrier ($p<0,0001$). Επιπλέον, παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p= 0,026$). Εφόσον παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση, ακολούθησαν ορθογώνιες

συγκρίσεις μεταξύ όλων των συνδυασμών των επεμβάσεων (Carrier-PGPB). Οι υψηλότερες τιμές καταγράφηκαν κατά τη χρήση υγρού διαλύματος σε συνδυασμό με το PGPB 548 (1117 g), RS-3 (1150 g) και 109/18 1 (1150 g), ενώ ακολούθησε η επέμβαση 5B2 (1092 g), η οποία όμως δεν είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Όσον αφορά το ζεόλιθο ως carrier, η επέμβαση Z3 έδωσε την υψηλότερη τιμή (983 g), δίχως να έχει στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις επεμβάσεις 548 (900 g), 557 (958 g) και 109/18 1 (883 g). Ωστόσο, υπερέιχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις επεμβάσεις 5B2 (833 g), RS-3 (825 g) και το μάρτυρα (825 g). Άξια αναφοράς θεωρείται η αλληλεπίδραση του PGPB RS-3 με το υγρό διάλυμα ως carrier (1150 g) και την αλληλεπίδραση του ίδιου PGPB με το ζεόλιθο ως carrier (825 g).

Ξηρό Βάρος Φυτών 54 ΗΜΣ

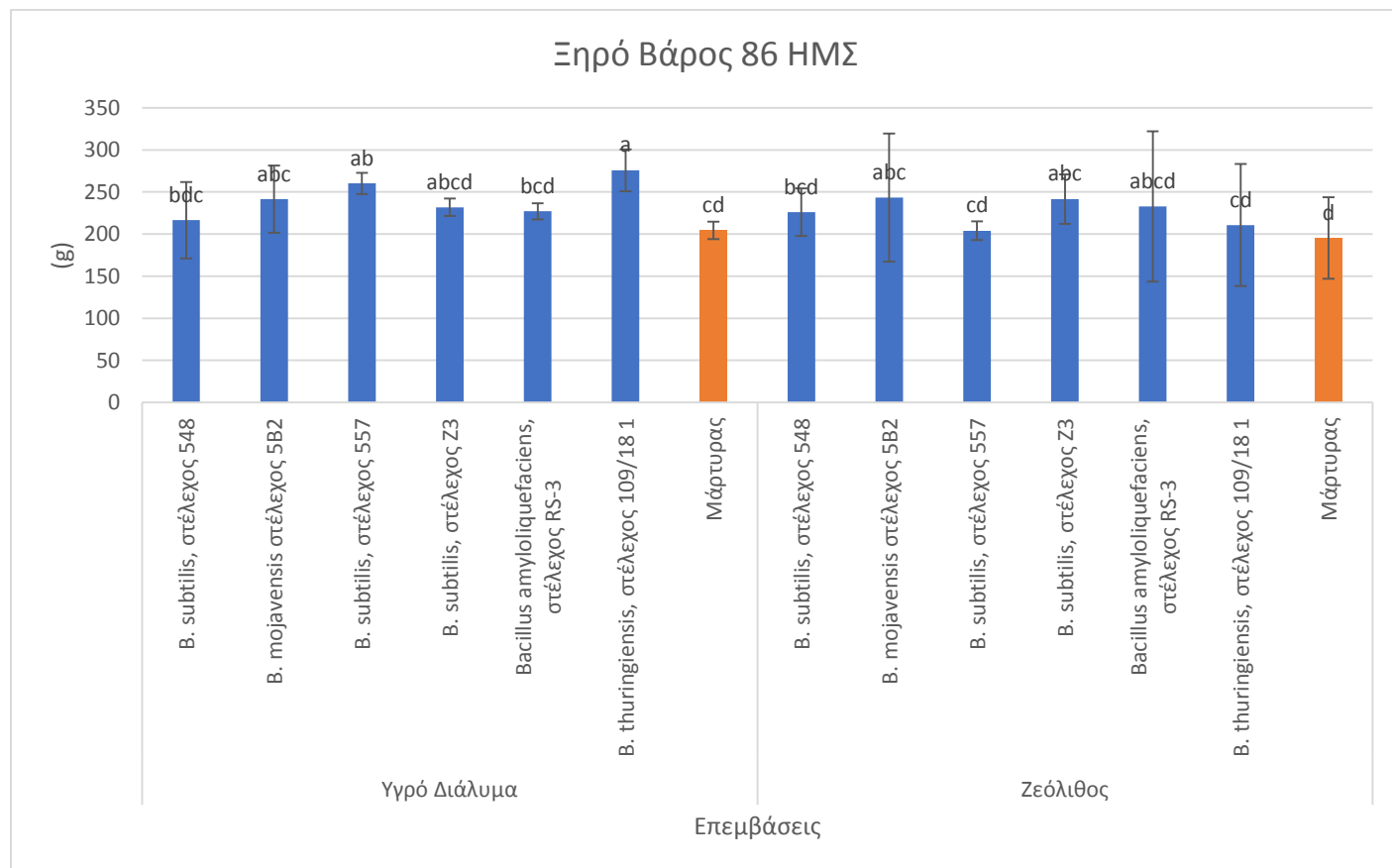
Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p=0.078$) και στον παράγοντα carrier ($p=0.409$). Επίσης, δεν παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων ($p= 0.091$).



Διάγραμμα 6 Επίδραση των 7 επεμβάσεων PGPB (*B.subtilis* στέλεχος 548, *B.mojavensis* στέλεχος 5B2, *B.subtilis* στέλεχος 557, *B.subtilis* στέλεχος Z3, *B.amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B.thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) και των 2 carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στο ξηρό βάρος των

φυτών αραβοσίτου 54 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Ξηρό Βάρος Φυτών 86 ΗΜΣ



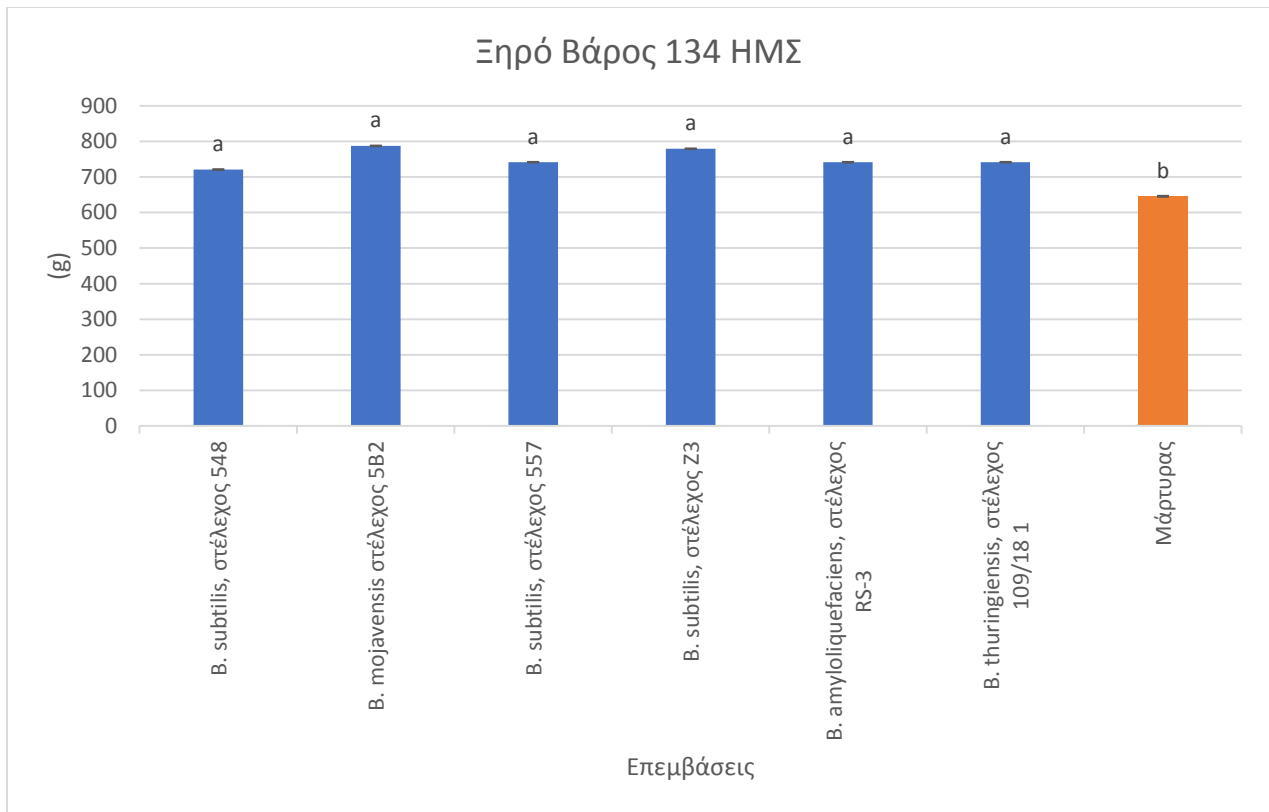
Διάγραμμα 7 Αλληλεπίδραση των 7 επεμβάσεων PGPB (*B.subtilis* στέλεχος 548, *B.mojavensis* στέλεχος 5B2, *B.subtilis* στέλεχος 557, *B.subtilis* στέλεχος Z3, *B.amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B.thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) και των 2 carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στο ξηρό βάρος των φυτών αραβοσίτου 86 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p=0.045$) και στον παράγοντα carrier ($p=0.049$). Επιπλέον, παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων με στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p=0.027$). Εφόσον παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση, ακολούθησαν ορθογώνιες συγκρίσεις μεταξύ όλων των συνδυασμών των επεμβάσεων (Carrier-PGPB). Η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε κατά την επέμβαση 109/18 1 (276 g) η οποία δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις επεμβάσεις 5B2 (241 g), 557 (260 g) και Z3 (232 g). Ωστόσο, υπερείχε με στατιστικά

σημαντικές διαφορές από τις επεμβάσεις 548 (216 g), RS-3 (227 g) και το μάρτυρα (204 g). Όσον αφορά το ζεόλιθο ως carrier, οι επεμβάσεις 5B2 (243 g) και Z3 (241 g) έδωσαν τις υψηλότερες τιμές ξηρού βάρους και υπερείχαν με στατιστικά σημαντικές διαφορές συγκριτικά με το μάρτυρα (195 g). Εν συνεχεία, ακολούθησε η επέμβαση RS-3 (233 g), χωρίς όμως να έχει στατιστικά σημαντικές διαφορές συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Άξια αναφοράς θεωρείται η αλληλεπίδραση του PGPB 109/18 1 με το υγρό διάλυμα ως carrier (276 g), συγκριτικά με την αλληλεπίδραση του ίδιου PGPB με το ζεόλιθο ως carrier (211 g).

Ξηρό Βάρος Φυτών 134 ΗΜΣ

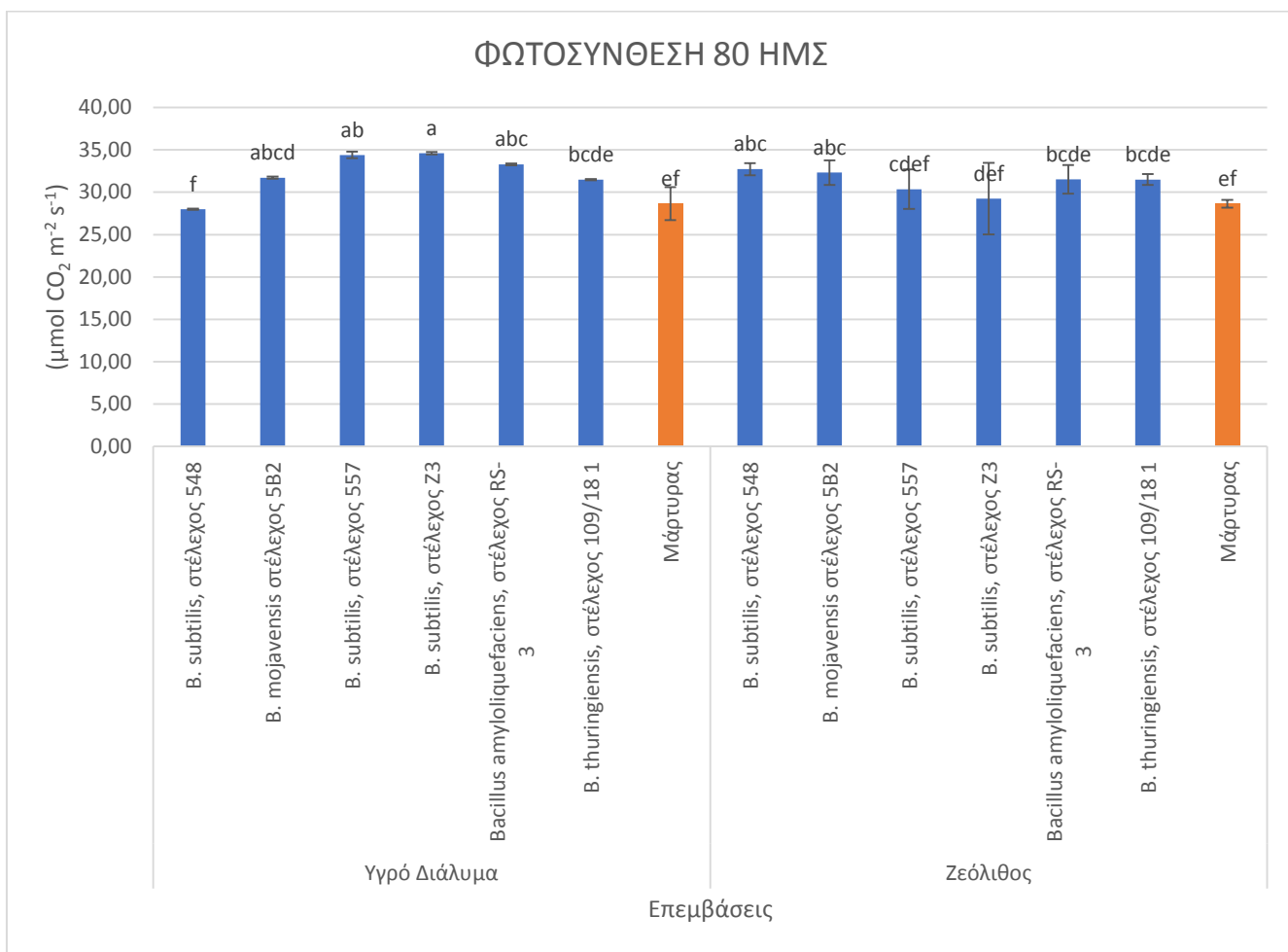
Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p=0.09$), ενώ δεν παρατηρήθηκαν στον παράγοντα carrier ($p=0.258$). Επιπλέον η αλληλεπίδραση των δυο αυτών παραγόντων δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p=0.125$). Υψηλότερη τιμή ξηρού βάρους σημειώθηκε κατά την επέμβαση, όπου χρησιμοποιήθηκε το PGPB 5B2 (788 g), δίχως να παρουσιάσει στατιστικά σημαντικές με τις υπόλοιπες επεμβάσεις, εκτός από το μάρτυρα (646 g). Στη συνέχεια, ακολούθησε η επέμβαση Z3 (779 g), η οποία εξίσου δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις υπόλοιπες επεμβάσεις, με εξαίρεση το μάρτυρα. Αξίζει να αναφερθεί πως καμία από τις έξι επεμβάσεις, κατά τις οποίες χορηγήθηκε στέλεχος PGPB, δεν είχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, ωστόσο, όλες υπερείχαν με στατιστικά σημαντικές διαφορές, συγκριτικά με το μάρτυρα.



Διάγραμμα 8 Επίδραση των επτά επεμβάσεων (*B. subtilis* - στέλεχος 548, *B. mojavensis* - στέλεχος 5B2, *B. subtilis* - στέλεχος 557, *B. subtilis* - στέλεχος Z3, *B. amyloliquefaciens* - στέλεχος RS-3, *B. thuringiensis* - στέλεχος 109/18 1 και ο Μάρτυρας) PGPB στο ξηρό βάρος των φυτών αραβοσίτου 134 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

3.2 Φυσιολογικές Μετρήσεις

Ρυθμός φωτοσύνθεσης

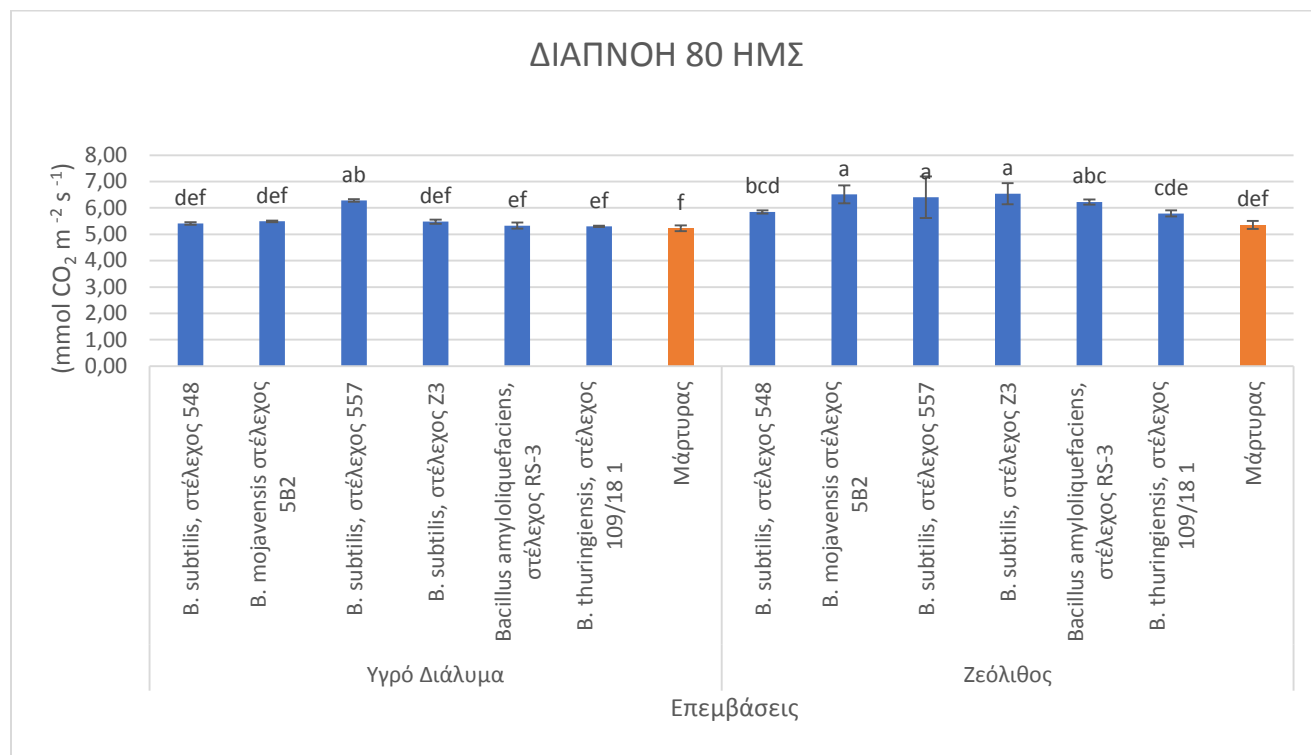


Διάγραμμα 9 Αλληλεπίδραση των 7 επεμβάσεων PGPB (*B.subtilis* στέλεχος 548, *B.mojavensis* στέλεχος 5B2, *B.subtilis* στέλεχος 557, *B.subtilis* στέλεχος Z3, *B.amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B.thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) και των 2 carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στο ρυθμό φωτοσύνθεσης των φυτών αραβοσίτου 80 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p=0.002$), αλλά όχι στον παράγοντα carrier ($p=0.09$). Επιπλέον, παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων με στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p<0,0001$). Εφόσον παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση, ακολούθησαν ορθογώνιες συγκρίσεις μεταξύ όλων των συνδυασμών των επεμβάσεων (Carrier-PGPB). Η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε κατά τη χρήση υγρού διαλύματος σε συνδυασμό με το PGPB Z3 (34.61 μmol

CO₂ m⁻² s⁻¹) ρυθμού φωτοσύνθεσης, χωρίς να παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις επεμβάσεις 5B2 (31.72 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), 557 (34.4 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) και RS-3 (33.29 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹). Ωστόσο, υπερέχει με στατιστικά σημαντικές διαφορές από επεμβάσεις 548 (27.99 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), 109/18 1 (31.48 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) και το μάρτυρα (28.64 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹). Όσον αφορά το ζεόλιθο ως carrier, οι επεμβάσεις που παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές ήταν η 548 (32.71 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) και η 5B2 (32.32 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) οι οποίες δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις επεμβάσεις 557 (30.35 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), RS-3 (31.53 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) και 109/18 1 (31.5 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), όμως υπερέχαν με στατιστικά σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τη Z3 (29.23 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) και το μάρτυρα (28.63 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) Αξίζει να αναφερθεί πως η επέμβαση 548 είχε καλύτερα αποτελέσματα, όταν συνδυάστηκε με ζεόλιθο, σε αντίθεση με το υγρό διάλυμα, ως carrier.

Ρυθμός διαπνοής

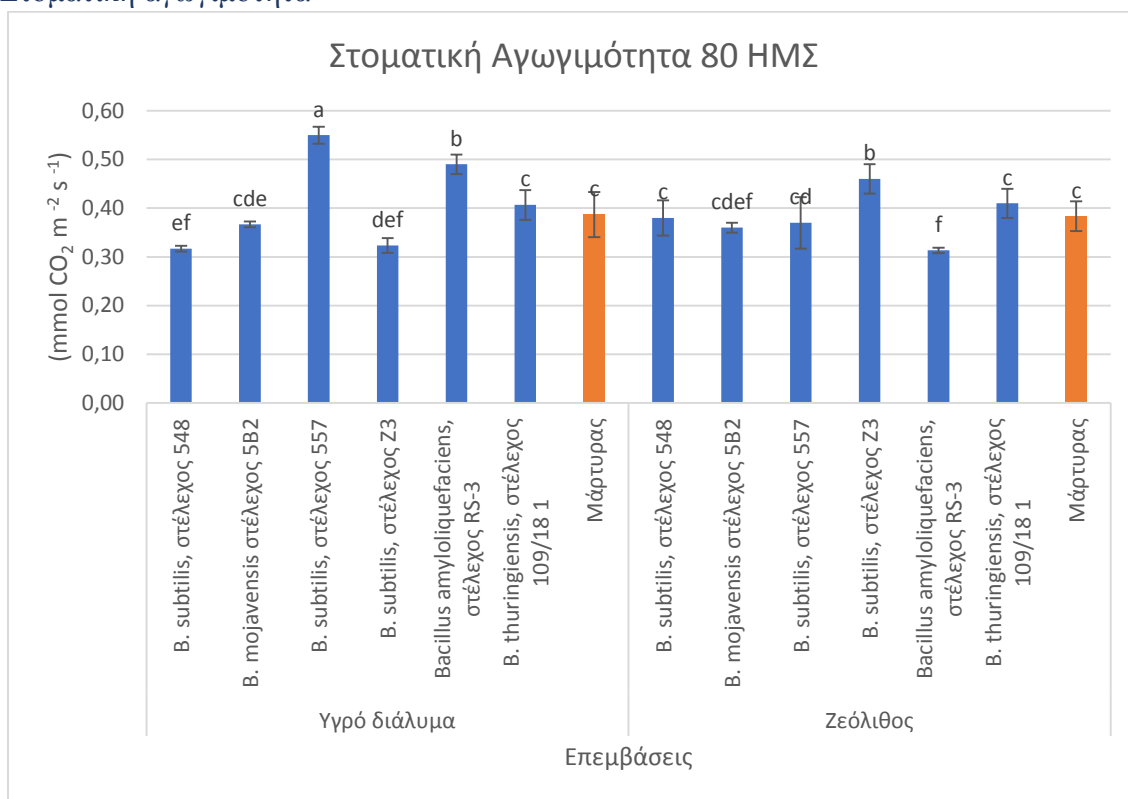


Διάγραμμα 10 Επίδραση των 7 επεμβάσεων PGPB (*B.subtilis* στέλεχος 548, *B.mojavensis* στέλεχος 5B2, *B.subtilis* στέλεχος 557, *B.subtilis* στέλεχος Z3, *B.amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B.thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) και των 2 carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στο ρυθμό διαπνοής των φυτών αραβοσίτου 80 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p < 0,0001$) και στον παράγοντα carrier ($p < 0,0001$). Η αλληλεπίδραση

που παρατηρήθηκε μεταξύ των δυο παραγόντων είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p=0.011$). Εφόσον παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση, ακολούθησαν ορθογώνιες συγκρίσεις μεταξύ όλων των επεμβάσεων. Η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε κατά τη χρήση ζεόλιθου σε συνδυασμό με τα PGPB 5B2 ($6.51 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 557 ($6.4 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και Z3 ($6.54 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), οι οποίες δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές με την επέμβαση RS-3 ($6.22 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Ωστόσο, υπερείχαν με στατιστικά σημαντικές διαφορές από την επέμβαση 548 ($5.85 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 109/18 1 ($5.79 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και το μάρτυρα ($5.35 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Όσον αφορά το υγρό διάλυμα ως carrier, η επέμβαση 557 ($6.28 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) έδωσε την υψηλότερη τιμή, με στατιστικά σημαντικές διαφορές συγκριτικά με κάθε άλλη επέμβαση. Στη συνέχεια, οι επεμβάσεις 548 ($5.41 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 5B2 ($5.49 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και Z3 ($5.48 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) δεν κατέγραψαν στατιστικά σημαντικές διαφορές από την RS-3 ($5.33 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), την 109/18 1 ($5.3 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και το μάρτυρα ($5.23 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Αξίζει να αναφερθεί πως η επέμβαση Z3 παρουσίασε υψηλές τιμές κατά τη χρήση του υγρού διαλύματος και του ζεόλιθου, ως carriers.

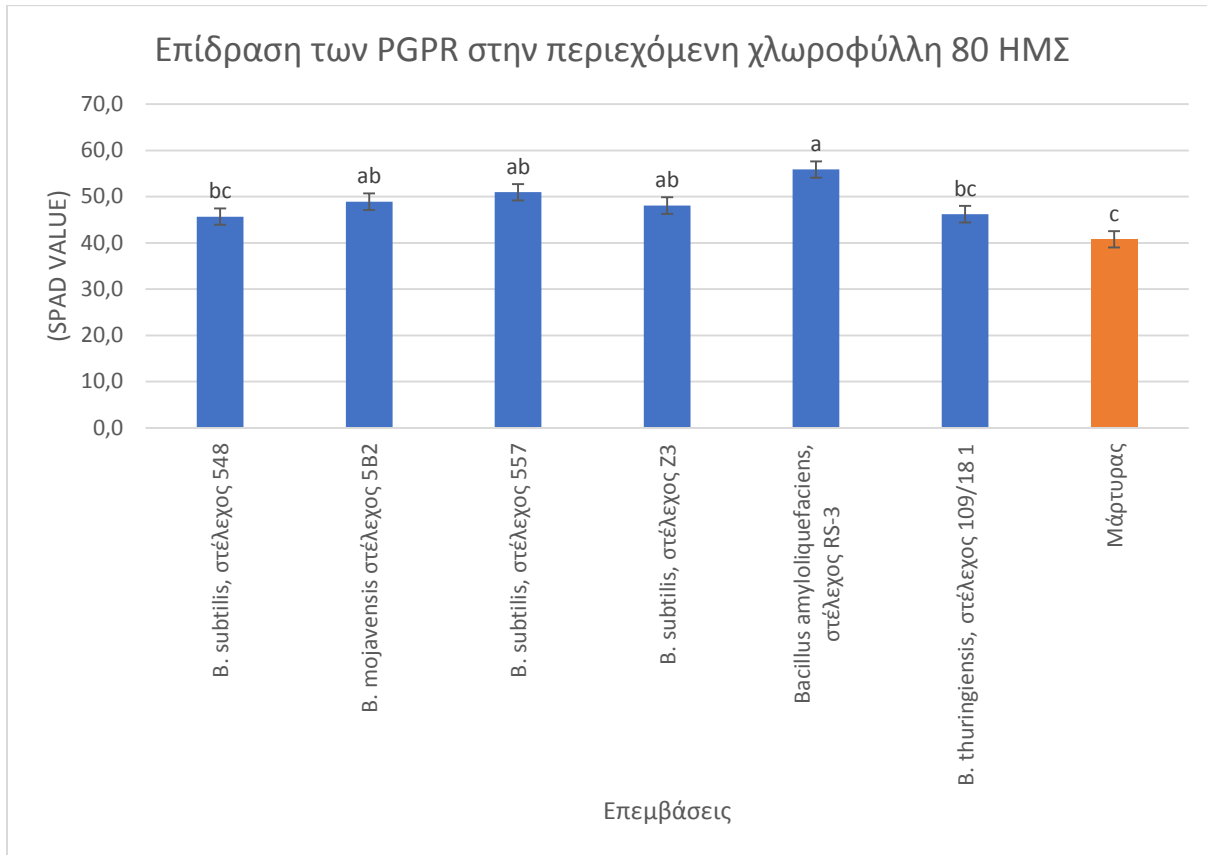
Στοματική αγωγιμότητα



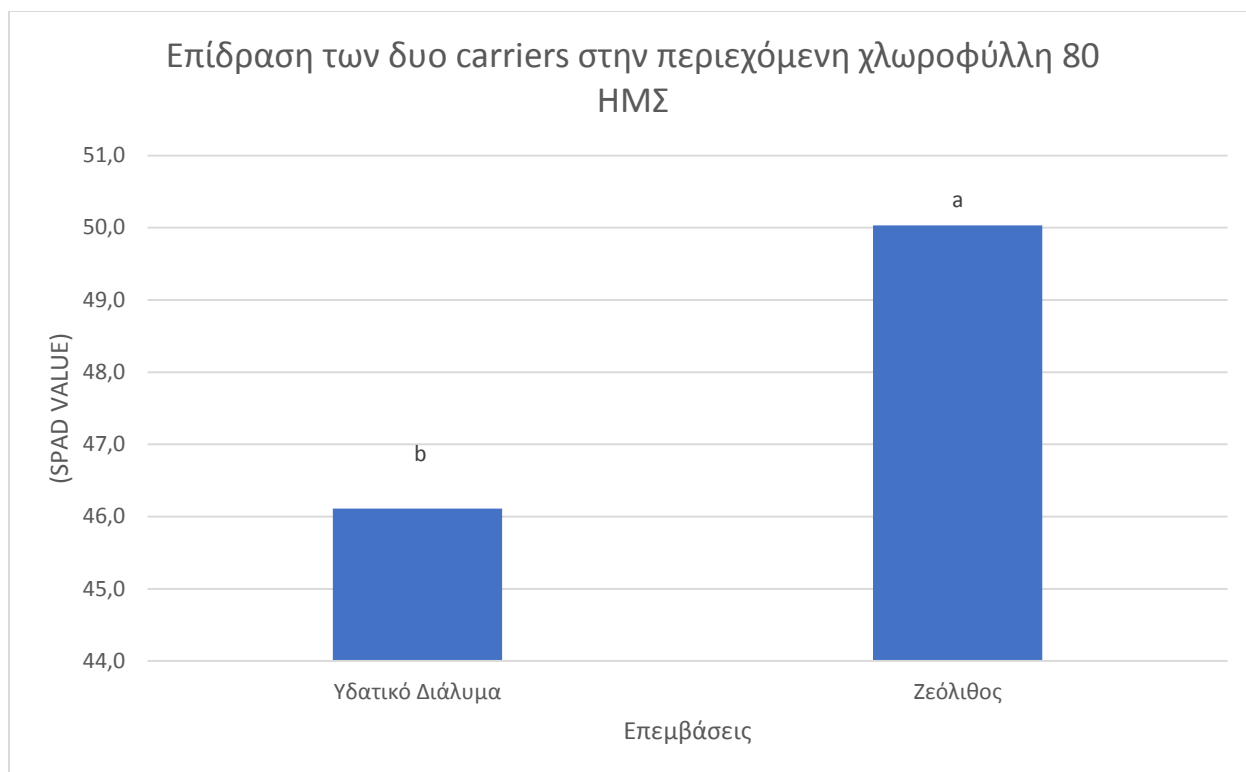
Διάγραμμα 11 Επίδραση των 7 επεμβάσεων PGPB (*B.subtilis* στέλεχος 548, *B.mojavensis* στέλεχος 5B2, *B.subtilis* στέλεχος 557, *B.subtilis* στέλεχος Z3, *B.amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B.thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) και των 2 carriers (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στη στοματική αγωγιμότητα των φυτών αραβοσίτου 80 Ημέρες Μετά τη Σπορά. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p < 0,0001$) και στον παράγοντα carrier ($p = 0,012$). Η αλληλεπίδραση που παρατηρήθηκε μεταξύ των δυο παραγόντων είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0,0001$). Εφόσον παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση, ακολούθησαν ορθογώνιες συγκρίσεις μεταξύ όλων των επεμβάσεων. Η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε κατά τη χρήση υγρού διαλύματος σε συνδυασμό με το PGPB 557 ($0,55 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), η οποία υπερέιχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από κάθε άλλη επέμβαση. Ακολούθως, η επέμβαση 109/18 1 ($0,41 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και ο μάρτυρας ($0,39 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές με την επέμβαση 5B2 ($0,37 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), όμως παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις επεμβάσεις 548 ($0,32 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Z3 ($0,32 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και την RS-3 ($0,49 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Όσον αφορά το ζεόλιθο, ως carrier, η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε από την επέμβαση Z3 ($0,46 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), η οποία υπερέιχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Παράλληλα, οι επεμβάσεις 548 ($0,38 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 109/18 1 ($0,41 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και ο μάρτυρας ($0,38 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις επεμβάσεις 5B2 ($0,36 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και 557 ($0,37 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), αλλά υπερέιχαν με στατιστικά σημαντικές διαφορές από την επέμβαση RS-3 ($0,31 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Αξίζει να αναφερθεί ότι η επέμβαση RS-3 είχε θετικότερη επίδραση στη στοματική αγωγιμότητα των φυτών αραβοσίτου συνδυαστικά με το υγρό διάλυμα ως carrier, σε αντίθεση με το ζεόλιθο.

Συγκέντρωση χλωροφύλλης



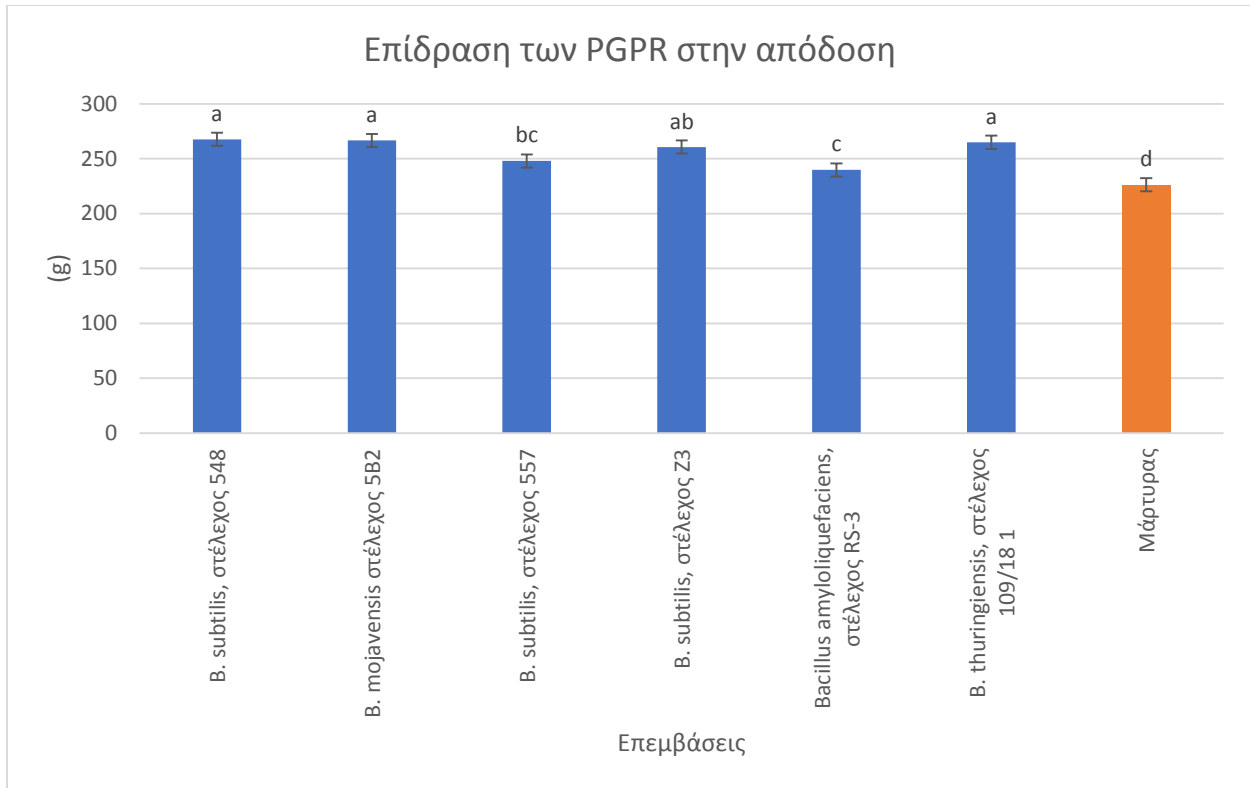
Διάγραμμα 12 Επίδραση του παράγοντα PGPB (*B. subtilis* στέλεχος 548, *B. mojavensis* στέλεχος 5B2, *B. subtilis* στέλεχος 557, *B. subtilis* στέλεχος Z3, *B. amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B. thuringiensis* στέλεχος 109/18 I και Μάρτυρας) στην περιεχόμενη χλωροφύλλη των φυτών αραβοσίτου 80 Ημέρες Μετά τη Σπορά (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).



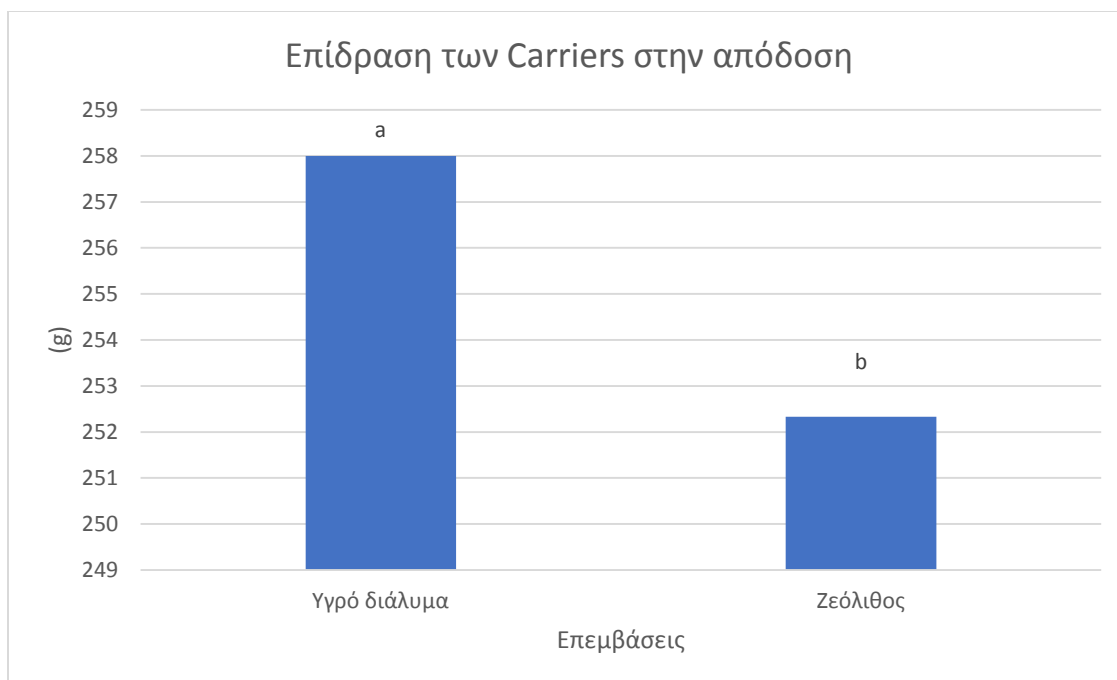
Διάγραμμα 13 Επίδραση του του παράγοντα Carrier (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στην περιεχόμενη χλωροφύλλη των φυτών αραβοσίτου 80 Ημέρες Μετά τη Σπορά . (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p=0.002$) και στον παράγοντα carrier ($p=0.022$). Επιπλέον η αλληλεπίδραση των δυο αυτών παραγόντων δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p=0.102$). Η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε κατά την επέμβαση RS-3 ($55.9 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), η οποία υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις επεμβάσεις 548 ($45.7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 109/18 1 ($46.2 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) και το μάρτυρα ($40.8 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Στη συνέχεια, ακολούθησε η επέμβαση 557 ($51 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), η οποία δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, εκτός από το μάρτυρα. Μεταξύ των δυο Carriers, ο ζεόλιθος ($50 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από το υδατικό διάλυμα ($46.1 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

3.3 Μετρήσεις Απόδοσης



Διάγραμμα 14 Επίδραση του παράγοντα PGPB (*B. subtilis* στέλεχος 548, *B. mojavensis* στέλεχος 5B2, *B. subtilis* στέλεχος 557, *B. subtilis* στέλεχος Z3, *B. amyloliquefaciens* στέλεχος RS-3, *B. thuringiensis* στέλεχος 109/18 1 και Μάρτυρας) στην απόδοση των φυτών αραβοσίτου. (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).



Διάγραμμα 15 Επίδραση του παράγοντα Carrier (υγρό διάλυμα και ζεόλιθος) στην απόδοση των φυτών αραβοσίτου (Στήλες με το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά για επίπεδο σημαντικότητας 5%).

Σύμφωνα με την ανάλυση ANOVA παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB ($p=0.001$) και στον παράγοντα carrier ($p<0.0001$). Επιπλέον η αλληλεπίδραση των δυο αυτών παραγόντων δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p=0.420$). Η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε κατά την επέμβαση 548 (267.7 g), η οποία δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές με τις επεμβάσεις 5B2 (266.6 g), Z3 (260.7 g) και 109/18 1 (265 g), όμως υπερέιχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις επεμβάσεις 557 (248 g), RS-3 (239.85 g) και το μάρτυρα (226.3 g). Αξίζει να αναφερθεί πως όλες οι επεμβάσεις, στις οποίες χορηγήθηκε στέλεχος PGPB, σημείωσαν υψηλότερη απόδοση συγκριτικά με το μάρτυρα. Τέλος, μεταξύ των δυο Carriers, το υγρό διάλυμα (258 g) υπερέιχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από το ζεόλιθο (252 g).

4 Συζήτηση

Μετά από τη συγκέντρωση και τη σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης μπορεί να αποδειχθεί η θετική επίδραση των βακτηρίων φυτικής ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκαν, συνδυαστικά με μεταφορείς, στα μορφολογικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά αλλά και την τελική απόδοση των φυτών αραβοσίτου. Οι επεμβάσεις, κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκε χορήγηση στελεχών PGPB, σε συνδυασμό με δυο carriers, παρουσίασαν καλύτερα αποτελέσματα, στην πλειοψηφία τους, συγκριτικά με τους μάρτυρες. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κατά τη μέτρηση της στοματικής αγωγιμότητας των φυτών αραβοσίτου 80 ημέρες μετά τη σπορά, ο συνδυασμός του PGPB *Bacillus amyloliquefaciens* - στέλεχος RS-3, μαζί με το ζεόλιθο ως μεταφορέα, παρουσίασε μικρή αρνητική επίδραση, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες επεμβάσεις, αλλά και το μάρτυρα.

Ως προς το νωπό βάρος των φυτών αραβοσίτου, παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση και στις τρεις μετρήσεις που έλαβαν χώρα σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, με στατιστικά σημαντικές διαφορές (Ριζοβακτήρια Φυτικής Ανάπτυξης * Μεταφορέα). Κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του νωπού βάρους των φυτών αραβοσίτου 54 ημέρες μετά τη σπορά, υπογραμμίστηκε η επέμβαση Z3 (*Bacillus subtilis*, στέλεχος Z3), ως η επέμβαση με την υψηλότερη τιμή και παράλληλα υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από το μάρτυρες. Επίσης, 86 ημέρες μετά τη σπορά, η επέμβαση RS-3 (*Bacillus amyloliquefaciens*, στέλεχος RS-3) έδωσε την υψηλότερη τιμή νωπού βάρους και με στατιστικά σημαντικές διαφορές από το μάρτυρα. Ακολούθως, η επέμβαση 5B2 (*Bacillus mojavensis* - στέλεχος 5B2) έδωσε την επόμενη υψηλότερη τιμή και υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από το μάρτυρα. Τέλος, 134 ημέρες μετά τη σπορά, οι υψηλότερες τιμές νωπού βάρους σημειώθηκαν κατά τις επεμβάσεις RS-3 (*Bacillus amyloliquefaciens*, στέλεχος RS-3) και 109/18 1 (*Bacillus thuringiensis*, στέλεχος 109/18 1), δίχως να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές, είτε μεταξύ τους, είτε με τις υπόλοιπες επεμβάσεις με carrier το υγρό διάλυμα. Ωστόσο, υπερείχαν με στατιστικά σημαντικές διαφορές από όλες τις επεμβάσεις με carrier το ζεόλιθο.

Πληθώρα ερευνητών ανά τον κόσμο έχουν επαληθεύσει τις ευεργετικές ιδιότητες των PGPB ως προς το νωπό βάρος των φυτών. Αρχικά, η χορήγηση ριζοβακτηρίων φυτικής ανάπτυξης σε εκτεθειμένα φυτά αραβοσίτου σε ρύπανση χρωμίου (Cr), οδήγησε σε σημαντική

αύξηση του νωπού βάρους των φυτών, της τάξεως 14% , σε σύγκριση με το μάρτυρα (Islam et al., 2016), ενώ αντίθετα, μεγάλη συγκέντρωση κατιόντων νατρίου (Na^+) οδήγησε σε χαμηλότερες τιμές νωπού βάρους φυτών αραβοσίτου (Rojas-Tapias et al., 2012). Παράλληλα, η χορήγηση στελεχών του γένους *Bacillus* σε καλλιέργεια σόγιας, σημείωσε θετική επίδραση καθώς κατάφερε να αυξήσει τα νωπά βάρη των φυτών κατά 53.1 %, συγκριτικά με το μάρτυρα (Bai et al., 2003). Τέλος, σε ανάλογη αύξηση, της τάξεως του 53% με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τους μάρτυρες, είχε ως αποτέλεσμα η προσθήκη στελέχους του γένους *Bacillus*, στα νωπά βάρη φυτών *Brassica juncea* (Zaidi et al., 2006).

Ως προς το ξηρό βάρος των φυτών αραβοσίτου, κατά την πρώτη μέτρηση (54 Ημέρες Μετά τη Σπορά), δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα Ριζοβακτήρια Φυτικής Ανάπτυξης, ούτε στον παράγοντα Μεταφορέας, ενώ δεν παρατηρήθηκε επίσης αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων. Κατά τη δεύτερη μέτρηση (86 Ημέρες Μετά τη Σπορά), διαπιστώθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων (Ριζοβακτήρια Φυτικής Ανάπτυξης * Μεταφορέας). Αναλυτικότερα, η υψηλότερη τιμή εμφανίστηκε κατά την επέμβαση 109/18 1 (*B. thuringiensis*, στέλεχος 109/18 1), η οποία είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές από την επέμβαση 548 (*B. subtilis*, στέλεχος 548), την RS-3 (*B. amyloliquefaciens*, στέλεχος RS-3), και το μάρτυρα. Ακολούθως, η επέμβαση 557 (*B. subtilis*, στέλεχος 557) σημείωσε την επόμενη υψηλότερη τιμή, δίχως να έχει στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, εκτός από το μάρτυρα. Τέλος, κατά την τρίτη μέτρηση (134 Ημέρες Μετά τη Σπορά), στατιστικά σημαντικές διαφορές υπήρχαν μόνο κατά τον παράγοντα Ριζοβακτήριο Φυτικής Ανάπτυξης, όπου η υψηλότερη τιμή σημειώθηκε κατά την επέμβαση 5B2 (*B. mojavensis* -στέλεχος 5B2) δίχως να υπερέρχει με στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των άλλων επεμβάσεων, εκτός από το μάρτυρα.

Η παρουσία του *Bacillus subtilis* παρατηρήθηκε πως είχε θετική επίδραση στα φυτά αραβοσίτου, καθώς κατά τη μέτρηση των ξηρών τους βαρών 52 και 72 ημέρες μετά τη σπορά, σημείωσαν τις δεύτερες υψηλότερες τιμές, με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις υπόλοιπες επεμβάσεις, ενώ 88 ημέρες μετά τη σπορά, το ξηρό βάρος των φυτών αυξήθηκε κατά 5.1 – 18.9% περισσότερο από το μάρτυρα (Efthimiadou et al., 2020). Παράλληλα, ξανά σε καλλιέργεια αραβοσίτου, στα οποία χορηγήθηκαν στελέχη των *Bacillus subtilis* και *Bacillus thuringiensis*, διαπιστώθηκε αύξηση των ξηρών βαρών κατά 20 και 22% αντίστοιχα,

υπερέχοντας με στατιστικά σημαντικές διαφορές συγκριτικά με το μάρτυρα (de Sousa et al., 2021), ενώ η συνδυαστική προσθήκη *Bacillus thuringiensis* με *Azospirillum brasilense* οδήγησε σε ποσοστιαία αύξηση του ξηρού βάρους των ριζών και των βλαστών κατά 50 και 80% περισσότερο από το μάρτυρα (de Almeida et al., 2021). Σε καλλιέργεια του είδους *Withania somnifera* L., γνωστό και ως χειμερινό κεράσι που συναντάται στην Ινδία, σε χώρες της Μέσης Ανατολής και κάποιες χώρες της Αφρικής, η ταυτόχρονη παρουσία στελέχους του είδους *Bacillus mojavensis* και 25 mg/kg νανοσωματίδια σιδήρου οδήγησαν σε αύξηση της ξηρής βιομάζας κατά 37% παραπάνω από εκείνη του μάρτυρα (Danish et al., 2022). Τέλος, ο N. Katsenios και οι συνεργάτες του παρατήρησαν τη θετική επίδραση που είχε η προσθήκη ριζοβακτηρίων φυτικής ανάπτυξης που ανήκουν στο γένος *Bacillus*, στα ξηρά βάρη τοματών. Πιο αξιοσημείωτη ήταν η επέμβαση κατά την οποία προστέθηκε το PGPR *Bacillus licheniformis*, αυξάνοντας το ξηρό βάρος των φυτών κατά 39%, συγκριτικά με το μάρτυρα (Katsenios et al., 2021).

Ως προς το ρυθμό φωτοσύνθεσης παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων, με στατιστικά σημαντικές διαφορές (Ριζοβακτήρια Φυτικής Ανάπτυξης * Μεταφορέα). Συγκεκριμένα, 80 ημέρες μετά τη σπορά, υπογραμμίστηκε η επέμβαση Z3 (*B. subtilis*, στέλεχος Z3) η οποία υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις επεμβάσεις 548 (*B. subtilis*, στέλεχος 548), 109/18 1 (*B. thuringiensis*, στέλεχος 109/18 1) και το μάρτυρα με υγρό διάλυμα ως carrier, ενώ υπερείχε επίσης με στατιστικά σημαντικές διαφορές από όλες τις επεμβάσεις, με carrier το ζεόλιθο, εκτός από τις 548 (*B. subtilis*, στέλεχος 548) και 5B2 (*B. mojavensis*, στέλεχος 5B2). Στη συνέχεια, ακολούθησε η επέμβαση 557 (*B. subtilis*, στέλεχος 557), με υγρό διάλυμα ως carrier, η οποία είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές από τους μάρτυρες.

Ως προς το ρυθμό διαπνοής παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων, με στατιστικά σημαντικές διαφορές (Ριζοβακτήρια Φυτικής Ανάπτυξης * Μεταφορέα). Ακριβέστερα, οι επεμβάσεις 5B2 (*B. mojavensis* στέλεχος 5B2), 557 (*B. subtilis*, στέλεχος 557) και Z3 (*B. subtilis*, στέλεχος Z3), με ζεόλιθο ως carrier, έδωσαν τις υψηλότερες τιμές χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικές διαφορές μεταξύ τους, ενώ παράλληλα υπερείχαν με στατιστικά σημαντικές διαφορές από όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις, εκτός από την RS-3 (*B.*

amyloliquefaciens, στέλεχος RS-3) με ζεόλιθο και την 557 (*B. subtilis*, στέλεχος 557) με υγρό διάλυμα.

Ως προς τη στοματική αγωγιμότητα παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων, με στατιστικά σημαντικές διαφορές (Ριζοβακτήρια Φυτικής Ανάπτυξης * Μεταφορέα). Αναλυτικότερα, 80 ημέρες μετά τη σπορά, η επέμβαση 557 (*B. subtilis*, στέλεχος 557) με υγρό διάλυμα ως carrier, έδωσε την υψηλότερη τιμή και υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από όλες τις υπόλοιπες επεμβάσεις. Ακολούθως, οι επεμβάσεις RS-3 (*B. amyloliquefaciens*, στέλεχος RS-3) με υγρό διάλυμα ως carrier και Z3 (*B. subtilis*, στέλεχος Z3) με ζεόλιθο ως carrier, έδωσαν τις αμέσως επόμενες υψηλότερες τιμές, δίχως να έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, αλλά έχοντας στατιστικά σημαντικές διαφορές από τις υπόλοιπες επεμβάσεις.

Ως προς την περιεχόμενη χλωροφύλλη, δεν παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, τόσο κατά τον παράγοντα Ριζοβακτήριο Φυτικής Ανάπτυξης, όσο και κατά τον παράγοντα Μεταφορέας. Αναλυτικότερα, η επέμβαση RS-3 (*B. amyloliquefaciens* – στέλεχος RS-3) έδωσε την υψηλότερη τιμή, με στατιστικά σημαντικές διαφορές από το μάρτυρα αλλά και από τις επεμβάσεις 548 και 109/18 1. Επίσης, ο ζεόλιθος ως μεταφορέας υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από το υγρό διάλυμα.

Έχει παρατηρηθεί πως, ύστερα από χορήγηση PGPB σε φυτά διαφόρων καλλιεργειών, τα φυσιολογικά τους χαρακτηριστικά βελτιώθηκαν συγκριτικά με τα φυτά που δεν τους χορηγήθηκε κάποιο ριζοβακτήριο φυτικής ανάπτυξης. Αρχικά, θετική επίδραση των PGPB στο ρυθμό φωτοσύνθεσης των φυτών επαλήθευσε η G. Kordatzaki και οι συνεργάτες της, όπου παρατήρησαν πως η διαφυλλική εφαρμογή του ριζοβακτηρίου *Bacillus subtilis* έδωσε την υψηλότερη τιμή ($3,31 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) με στατιστικά σημαντικές διαφορές από τους δυο μάρτυρες που χρησιμοποιήθηκαν ($1,81 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ και $1,7 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Kordatzaki et al., 2022). Ακόμα, αναφορά στις ευεργετικές ιδιότητες των PGPB έγινε από τους N. Katsenios et al., όπου σε καλλιέργεια γλυκού αραβοσίτου η χορήγηση στελέχους του ριζοβακτηρίου *Bacillus subtilis*, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση κατά 17% συγκριτικά με το μάρτυρα, δίνοντας τη δεύτερη υψηλότερη τιμή από όλες τις συνολικές επεμβάσεις (Katsenios et al., 2022). Επίσης, Στο Ουζμπεκιστάν, σε καλλιέργεια τζίντζερ (*Zingiber officinale Roscoe*) υπό

συνθήκες θερμοκηπίου, χορηγήθηκε στέλεχος του είδους *Bacillus subtilis* με αποτέλεσμα την αύξηση της περιεχόμενης χλωροφύλλης των φυτών κατά 10,5 , 15,5 και 18,4% στις 4, 8 και 12 εβδομάδες μετά τη σπορά αντίστοιχα, σε σύγκριση με το μάρτυρα (Jaborova et al., 2021). Επιπροσθέτως, ένα εκ των πλεονεκτημάτων της χορήγησης στελεχών του είδους *Bacillus subtilis*, *Bacillus mojavensis* και *Bacillus amyloliquefaciens* ήταν η στατιστικά σημαντική αύξηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης των φυτών τομάτας κατά 25, 12 και 20% σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που σημειώθηκαν από το μάρτυρα, ενώ σημαντική διαπιστώθηκε και η αύξηση του ρυθμού διαπνοής κατά 51, 36 και 37% συγκριτικά με το μάρτυρα, 66 ημέρες μετά τη σπορά (Katsenios et al., 2021). Τέλος, αύξηση της περιεχόμενης χλωροφύλλης κατά 26% σημειώθηκε κατά τη χορήγηση του PGPB *Bacillus mojavensis*, μαζί με νανοσωματίδια αργύρου σε καλλιέργεια *Withania Somnifera L.* (Danish et al., 2022).

Ως προς την απόδοση, δεν παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές, τόσο κατά τον παράγοντα Ριζοβακτήριο Φυτικής Ανάπτυξης, όσο και κατά τον παράγοντα Μεταφορέας. Ακριβέστερα, η επέμβαση 548 (*B. subtilis* – στέλεχος 548) έδωσε την υψηλότερη τιμή απόδοση και υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές από το μάρτυρα, αλλά και από τις επεμβάσεις 557 και RS-3. Ακόμα, το υγρό διάλυμα ως μεταφορέας, υπερείχε με στατιστικά σημαντικές διαφορές έναντι του ζεόλιθου.

Την επίδραση των ριζοβακτηρίων φυτικής ανάπτυξης έχουν μελετήσει αρκετοί επιστήμονες, στην προσπάθειά τους να βρουν καινοτόμες και πιο φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις στον τομέα της αειφορίας. Ξεκινώντας, στελέχη των ειδών *B. mojavensis* και *B. subtilis* κατάφεραν να αυξήσουν την απόδοση των φυτών γλυκού αραβοσίτου κατά 16 και 13.8% περισσότερο από το μάρτυρα (Katsenios et al., 2022), ενώ παρόμοια έρευνα, ξανά σε καλλιέργεια αραβοσίτου έδειξε ότι στελέχη του γένους *Bacillus* οδήγησαν στην αύξηση της απόδοσης από 5.5 – 13.4% σε σύγκριση με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες (Efthimiadou et al., 2020). Ακόμα, σύμφωνα με τους επιστήμονες Esitken et al., σε καλλιέργεια φράουλας χορηγήθηκαν PGPB, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης μέχρι και 18% , σε σύγκριση με το μάρτυρα (Esitken et al., 2010). Επίσης, άλλη μια μελέτη επαλήθευσε τη θετική επίδραση των PGPB με την απόδοση των καλλιεργειών και συγκεκριμένα η χορήγηση του ριζοβακτηρίου *Azospirillum brasilense* είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης των φυτών

αραβοσίτου 34 και 53% το 2018 και το 2019 αντίστοιχα (Scott et al., 2020). Κατά τη συγκαλλιέργεια φασολιού (*Phaseolus vulgaris L.*) και αμάραθου (*Foeniculum vulgare L.*), διαπιστώθηκε πως στις επεμβάσεις που χορηγήθηκαν PGPB, ενισχύθηκε η απόδοση κατά 20 και 24% αντίστοιχα για κάθε καλλιέργεια ενώ παρόμοιες βελτιώσεις παρατηρήθηκαν και στα στην απόδοση του αιθέριου ελαίου του μάραθου (Rezaei-Chiyaneh et al., 2020). Τέλος, η εδαφική χορήγηση ριζοβακτηρίων που προωθούν τη φυτική ανάπτυξη, των ειδών *Azotobacter* και *Bacillus*, είχαν ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της απόδοσης των φυτών αραβοσίτου από 5.5 μέχρι και 13.4 % σε σύγκριση με τις επεμβάσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες (Efthimiadou et al., 2020).

5 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, οι μεταφορείς (υγρό διάλυμα, ζεόλιθος) και το είδος των μικροοργανισμών (στελέχη των *Bacillus subtilis*, *Bacillus mojavensis*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus amyloliquefaciens*) είχαν σημαντική επιρροή προάγοντας τα μορφολογικά (νωπό και ξηρό βάρος) και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά (ρυθμό φωτοσύνθεσης, ρυθμό διαπνοής, στοματική αγωγιμότητα και συγκέντρωση χλωροφύλλης) αλλά και την απόδοση των φυτών αραβοσίτου. Θετική επίδραση στο νωπό βάρος είχαν σχεδόν όλοι οι βιοδιεγέρτες, συγκριτικά με τους μάρτυρες. Αναλυτικότερα, η θετική επίδραση του βακτηρίου *Bacillus amyloliquefaciens* με υγρό διάλυμα ως carrier, ξεχώρισε σε κάθε μία από τις μετρήσεις που έλαβαν χώρα αυξάνοντας το νωπό βάρος των φυτών αραβοσίτου μέχρι και 41% συγκριτικά με το μάρτυρα, 54 ημέρες μετά τη σπορά. Αύξηση της τάξεως του 12% σημειώθηκε κατά την τελευταία μέτρηση και από το ριζοβακτήριο *Bacillus thuringiensis* (109/18 1) με υγρό διάλυμα ως carrier. Σε αντίθεση με τη θετική επίδραση του *Bacillus amyloliquefaciens* με υγρό διάλυμα, το ίδιο δε συνέβη κατά τη χρήση ζεόλιθου ως carrier, καθώς δε σημειώθηκαν σημαντικές διαφορές σε σχέση με το μάρτυρα. Το ξηρό βάρος των φυτών αραβοσίτου δεν επηρεάστηκε από την προσθήκη βιοδιεγερτών σύμφωνα με την πρώτη μέτρηση, 54 ημέρες μετά τη σπορά, καθώς δεν παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον παράγοντα PGPB, ούτε στον παράγοντα carrier, αλλά και ούτε στην αλληλεπίδρασή τους. Όμως, κατά τη δεύτερη μέτρηση σημειώθηκε η μεγαλύτερη αύξηση του ξηρού βάρους των φυτών αραβοσίτου, διότι η προσθήκη του *Bacillus thuringiensis* (109/18 1) με υγρό διάλυμα ως carrier, είχε ως αποτέλεσμα αύξηση κατά 35% σε σύγκριση με το μάρτυρα. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των φυτών δέχτηκε θετική επιρροή από σχεδόν κάθε βιοδιεγέρτη που χορηγήθηκε. Δυο εκ των τριών στελεχών του *Bacillus subtilis* ξεχώρισαν μεταξύ των υπολοίπων επεμβάσεων με τα αποτελέσματά τους. Πιο συγκεκριμένα, στην επέμβαση κατά την οποία συνυπήρχε στέλεχος του ριζοβακτηρίου *Bacillus subtilis* (Z3) με υγρό διάλυμα, καταγράφηκε αύξηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης της τάξεως του 21% σε σύγκριση με το μάρτυρα, ενώ το στέλεχος 557 του *Bacillus subtilis*, οδήγησε σε αύξηση της τάξεως του 20%. Χαρακτηριστική όμως θεωρείται και η αρνητική επίδραση που είχε η προσθήκη στελέχους του ριζοβακτηρίου *Bacillus subtilis* (548) με υγρό διάλυμα ως μεταφορέα και κατά συνέπεια, σημείωσε επίδοση χαμηλότερη από εκείνη του αντίστοιχου μάρτυρα. Οι ευεργετικές ιδιότητες των ριζοβακτηρίων φυτικής ανάπτυξης επαληθεύτηκαν και κατά τις

μετρήσεις του ρυθμού διαπνοής των φυτών. Σχεδόν κάθε επέμβαση, στην οποία έλαβε χώρα η προσθήκη μικροοργανισμού, παρουσίασε βελτιωμένα αποτελέσματα. Μεταξύ των επεμβάσεων και τα τρία στελέχη του *Bacillus subtilis* ξεχώρισαν και συγκεκριμένα η ταυτόχρονη παρουσία στελέχους του PGPB *Bacillus subtilis* (Z3) με ζεόλιθο, οδήγησε στην αύξηση του ρυθμού διαπνοής κατά 22% σε σχέση με το μάρτυρα. Παράλληλα, το στέλεχος του PGPB *Bacillus subtilis* (557), ξεχώρισε μεταξύ των υπολοίπων επεμβάσεων, με υγρό διάλυμα ως μεταφορέα, αυξάνοντας το ρυθμό διαπνοής κατά 20% από ότι ο μάρτυρας. Όσον αφορά την επίδραση των PGPB στη στοματική αγωγιμότητα των φυτών αραβοσίτου, η χορήγηση του στελέχους 557 του *Bacillus subtilis* είχε ως αποτέλεσμα αύξηση κατά 42% συγκριτικά με το μάρτυρα. Όμως δεν παρατηρήθηκε θετική επίδραση κατά τις επεμβάσεις όπου χορηγήθηκε το στέλεχος 548 του *Bacillus subtilis* με υγρό διάλυμα αλλά και κατά την προσθήκη του *Bacillus amyloliquefaciens* με ζεόλιθο. Επιπροσθέτως, η περιεχόμενη χλωροφύλλη των φυτών αραβοσίτου δέχτηκε θετική επίδραση, όπου η χορήγηση του βιοδιεγέρτη *Bacillus amyloliquefaciens* οδήγησε στην υψηλότερη αύξηση καθώς η συγκέντρωση της περιεχόμενης χλωροφύλλης ήταν κατά 37% περισσότερη, σε σύγκριση με το μάρτυρα, ενώ ο ζεόλιθος ως carrier οδήγησε σε καλύτερα αποτελέσματα από το υγρό διάλυμα. Τέλος, θετική επιρροή δέχτηκε και η παράμετρος της απόδοσης από την προσθήκη όλων των βιοδιεγερτών. Ακριβέστερα, τόσο η προσθήκη των στελεχών 548 και 5B2 του *Bacillus subtilis*, όσο και η προσθήκη του *Bacillus thuringiensis* οδήγησαν σε αύξηση της απόδοσης κατά 18, 18 και 15% αντίστοιχα συγκριτικά με το μάρτυρα. Συνοψίζοντας όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα συμπεράσματα που προκύπτουν αφορούν τη θετική επίδραση των βιοδιεγερτών στην πλειοψηφία των μετρήσεων που έγιναν. Από τη μία πλευρά, το στέλεχος Z3 του *Bacillus subtilis* ξεχώρισε μεταξύ των PGPR, με βάση τα αποτελέσματα που έδωσε. Από την άλλη πλευρά, όσον αφορά τα δυο carrier, το υγρό διάλυμα υπερίσχυσε δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα σε όλες σχεδόν τις μετρήσεις, συγκριτικά με το ζεόλιθο. Αυτό οφείλεται πιθανά στην αλληλεπίδραση της οξύτητας του εκάστοτε carrier με τα στελέχη των PGPR. Είναι γνωστό πως το pH του ζεόλιθου είναι μεγαλύτερο του 7, δηλαδή βασικό, αποτελώντας ανασταλτικό παράγοντα στη δράση των ριζοβακτηρίων, τα οποία χρειάζονται ελαφρά όξινο περιβάλλον, ώστε να δράσουν ομαλά.

Ανακεφαλαιώνοντας, πρόθεση της παρούσας διατριβής είναι η προαγωγή της αειφορικής γεωργίας διερευνώντας μία εκ των πολλών και διαφορετικών καλλιεργητικών πρακτικών, των οποίων το αντίκτυπο είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν

παραπάνω αποδεικνύουν την ευεργετική δράση των βιοδιεγερτών, με τη συμβολή των δυο carriers στα μορφολογικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά αλλά και την τελική απόδοση των φυτών καλλιέργειας αραβοσίτου. Όμως, κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη των παραπάνω στελεχών των PGPR σε ένα μεγάλο φάσμα καλλιεργειών, ώστε να ερευνηθούν αναλυτικότερα οι μηχανισμοί δράσης τους και να διαπιστωθούν πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των PGPR και της εκάστοτε καλλιέργειας με απώτερο σκοπό την επιλογή του ιδανικότερου συνδυασμού PGPR-καλλιέργειας, ο οποίος θα δώσει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Η διεξαγωγή πειραμάτων για τη διερεύνηση ιδανικότερων συνδυασμών καλλιέργειας-PGPR θα πρέπει να συνυπολογίζει και μια πληθώρα παραμέτρων που θεωρούνται μείζονος σημασίας, όπως η μέθοδος χορήγησης των ριζοβακτηρίων φυτικής ανάπτυξης, ο χρόνος χορήγησής τους, η συγκέντρωσή τους και πολλοί ακόμη.

6. Βιβλιογραφία

- Abbasi, M. K., Sharif, S., Kazmi, M., Sultan, T., & Aslam, M. (2011). Isolation of plant growth promoting rhizobacteria from wheat rhizosphere and their effect on improving growth, yield and nutrient uptake of plants. *Plant Biosystems*, *145*(1), 159–168.
- Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., & Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology*, *58*(4), 921–929.
- Adoko, M. Y., Sina, H., Amogou, O., Agbodjato, N. A., Noumavo, P. A., Aguégué, R. M., Assogba, S. A., Adjovi, N. A., Dagbénonbakin, G., & Adjanohoun, A. (2021). Potential of Biostimulants Based on PGPR Rhizobacteria Native to Benin's Soils on the Growth and Yield of Maize (*Zea mays* L.) under Greenhouse Conditions. *Open Journal of Soil Science*, *11*(03), 177.
- Ahmad, I., Akhtar, M. J., Asghar, H. N., Ghafoor, U., & Shahid, M. (2016). Differential effects of plant growth-promoting rhizobacteria on maize growth and cadmium uptake. *Journal of Plant Growth Regulation*, *35*(2), 303–315.
- Ajeng, A. A., Abdullah, R., Ling, T. C., Ismail, S., Lau, B. F., Ong, H. C., Chew, K. W., Show, P. L., & Chang, J.-S. (2020). Bioformulation of biochar as a potential inoculant carrier for sustainable agriculture. *Environmental Technology & Innovation*, *20*, 101168.
- Ali, S., Hameed, S., Shahid, M., Iqbal, M., Lazarovits, G., & Imran, A. (2020). Functional characterization of potential PGPR exhibiting broad-spectrum antifungal activity. *Microbiological Research*, *232*, 126389. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126389>
- Annapurna, K., Kumar, A., Kumar, L. V., Govindasamy, V., Bose, P., & Ramadoss, D. (2013). PGPR-induced systemic resistance (ISR) in plant disease management. In *Bacteria in agrobiolgy: Disease management* (pp. 405–425). Springer.
- Bai, Y., Zhou, X., & Smith, D. L. (2003). Enhanced soybean plant growth resulting from coinoculation of Bacillus strains with Bradyrhizobium japonicum. *Crop Science*, *43*(5), 1774–1781.
- Bashan, Y. (1998). Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. *Biotechnology Advances*, *16*(4), 729–770.
- Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J.-P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil*, *378*(1), 1–33.
- Berg, G., Rybakova, D., Grube, M., & Köberl, M. (2016). The plant microbiome explored: Implications for experimental botany. *Journal of Experimental Botany*, *67*(4), 995–1002.
- Biessy, A., & Fillion, M. (2021). Phloroglucinol derivatives in plant-beneficial *Pseudomonas* spp.: Biosynthesis, regulation, and functions. *Metabolites*, *11*(3), 182.
- Birringer, M., Pfluger, P., Kluth, D., Landes, N., & Brigelius-Flohé, R. (2002). Identities and Differences in the Metabolism of Tocotrienols and Tocopherols in HepG2 Cells. *The Journal of Nutrition*, *132*(10), 3113–3118. <https://doi.org/10.1093/jn/131.10.3113>
- Cairns, J. E., Chamberlin, J., Rutsaert, P., Voss, R. C., Ndhlela, T., & Magorokosho, C. (2021). Challenges for sustainable maize production of smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *Journal of Cereal Science*, *101*, 103274. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103274>

- Çakmakçı, R., Erat, M., Erdoğan, Ü., & Dönmez, M. F. (2007). The influence of plant growth-promoting rhizobacteria on growth and enzyme activities in wheat and spinach plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *170*(2), 288–295. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625105>
- Chaudhary, D. P. (2013). *Maize: Nutrition dynamics and novel uses*. Springer.
- Crabb, A. R. (1947). The hybrid-corn makers. Prophets of plenty. *The hybrid-corn makers. Prophets of plenty*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19481602989>
- Dado, R. G. (1999). Nutritional benefits of speciality corn grain hybrids in dairy diets. *Journal of Animal Science*, *77*(suppl_2), 197. https://doi.org/10.2527/1999.77suppl_2197x
- Danish, M., Shahid, M., Zeyad, M. T., Bukhari, N. A., Al-Khattaf, F. S., Hatamleh, A. A., & Ali, S. (2022). *Bacillus mojavensis*, a Metal-Tolerant Plant Growth-Promoting Bacterium, Improves Growth, Photosynthetic Attributes, Gas Exchange Parameters, and Alkalo-Polyphenol Contents in Silver Nanoparticle (Ag-NP)-Treated *Withania somnifera* L.(Ashwagandha). *ACS Omega*, *7*(16), 13878–13893.
- de Almeida, J. R., Bonatelli, M. L., Batista, B. D., Teixeira-Silva, N. S., Mondin, M., Dos Santos, R. C., Bento, J. M. S., de Almeida Hayashibara, C. A., Azevedo, J. L., & Quecine, M. C. (2021). *Bacillus thuringiensis* RZ2MS9, a tropical plant growth-promoting rhizobacterium, colonizes maize endophytically and alters the plant's production of volatile organic compounds during co-inoculation with *Azospirillum brasilense* Ab-V5. *Environmental Microbiology Reports*, *13*(6), 812–821.
- de Sousa, S. M., de Oliveira, C. A., Andrade, D. L., de Carvalho, C. G., Ribeiro, V. P., Pastina, M. M., Marriel, I. E., de Paula Lana, U. G., & Gomes, E. A. (2021). Tropical *Bacillus* strains inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. *Journal of Plant Growth Regulation*, *40*(2), 867–877.
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, *196*, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Dupont, J., White, P. J., Carpenter, M. P., Schaefer, E. J., Meydani, S. N., Elson, C. E., Woods, M., & Gorbach, S. L. (1990). Food uses and health effects of corn oil. *Journal of the American College of Nutrition*, *9*(5), 438–470. <https://doi.org/10.1080/07315724.1990.10720403>
- Efthimiadou, A., Katsenios, N., Chanioti, S., Giannoglou, M., Djordjevic, N., & Katsaros, G. (2020). Effect of foliar and soil application of plant growth promoting bacteria on growth, physiology, yield and seed quality of maize under Mediterranean conditions. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–11.
- El Sabagh, A., Hossain, A., barutçular, C., Abdelaal, K., Fahad, S., Anjorin, F., Islam, M. S., Ratnasekera, D., KIZILGEÇİ, F., Yadav, G., Yildirim, M., Konuskan, O., & Saneoka, H. (2018). *SUSTAINABLE MAIZE (Zea mays L.) PRODUCTION UNDER DROUGHT STRESS BY UNDERSTANDING ITS ADVERSE EFFECT, SURVIVAL MECHANISM AND DROUGHT TOLERANCE INDICES*. [https://doi.org/10.18006/2018.6\(2\).xxx.xxx](https://doi.org/10.18006/2018.6(2).xxx.xxx)
- El Zemrany, H., Czarnes, S., Hallett, P. D., Alamercery, S., Bally, R., & Jocteur Monrozier, L. (2007). Early changes in root characteristics of maize (*Zea mays*) following seed inoculation with the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1. *Plant and Soil*, *291*(1), 109–118.

- ELSTAT. (n.d.). *Greek National Statistical organization, 2019, Monthly Statistical Bulletin, Athens. Infographic-agricultural-survey-2019 (ELSTAT, 2019) <https://www.statistics.gr/infographic-agricultural-survey-2019>*. Retrieved September 24, 2022, from <https://www.statistics.gr/infographic-agricultural-survey-2019>
- Esitken, A., Yildiz, H. E., Ercisli, S., Donmez, M. F., Turan, M., & Gunes, A. (2010). Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) on yield, growth and nutrient contents of organically grown strawberry. *Scientia Horticulturae*, *124*(1), 62–66.
- Estrada, B., Aroca, R., Barea, J. M., & Ruiz-Lozano, J. M. (2013). Native arbuscular mycorrhizal fungi isolated from a saline habitat improved maize antioxidant systems and plant tolerance to salinity. *Plant Science*, *201–202*, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.11.009>
- Fageria, N. K. (2016). *The use of nutrients in crop plants*. CRC press.
- Figueiredo, M. do V. B., Seldin, L., Araujo, F. F. de, & Mariano, R. de L. R. (2010). Plant growth promoting rhizobacteria: Fundamentals and applications. In *Plant growth and health promoting bacteria* (pp. 21–43). Springer.
- Florio, A., Bréfort, C., Gervais, J., Bérard, A., & Le Roux, X. (2019). The responses of NO₂– and N₂O–reducing bacteria to maize inoculation by the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 depend on carbon availability and determine soil gross and net N₂O production. *Soil Biology and Biochemistry*, *136*, 107524.
- Gopi, G. K., Meenakumari, K. S., Anith, K. N., Nysanth, N. S., & Subha, P. (2020). Application of liquid formulation of a mixture of plant growth promoting rhizobacteria helps reduce the use of chemical fertilizers in *Amaranthus* (*Amaranthus tricolor* L.). *Rhizosphere*, *15*, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100212>
- Gore, M. A., Chia, J.-M., Elshire, R. J., Sun, Q., Ersoz, E. S., Hurwitz, B. L., Peiffer, J. A., McMullen, M. D., Grills, G. S., & Ross-Ibarra, J. (2009). A first-generation haplotype map of maize. *Science*, *326*(5956), 1115–1117.
- Granada, C. E., Passaglia, L. M. P., de Souza, E. M., & Sperotto, R. A. (2018). Is Phosphate Solubilization the Forgotten Child of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria? *Frontiers in Microbiology*, *9*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.02054>
- Guerrieri, M. C., Fanfoni, E., Fiorini, A., Trevisan, M., & Puglisi, E. (2020). Isolation and screening of extracellular PGPR from the rhizosphere of tomato plants after long-term reduced tillage and cover crops. *Plants*, *9*(5), 668.
- Hallauer, A. R., & Carena, M. J. (2009). Maize. In M. J. Carena (Ed.), *Cereals* (pp. 3–98). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-72297-9_1
- 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*(4), 579–598. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0117-1>
- Hochholdinger, F. (2009). The Maize Root System: Morphology, Anatomy, and Genetics. In J. L. Bennetzen & S. C. Hake (Eds.), *Handbook of Maize: Its Biology* (pp. 145–160). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-79418-1_8

- Idriss, E. E., Makarewicz, O., Farouk, A., Rosner, K., Greiner, R., Bochow, H., Richter, T., & Borriss, R. (2002). Extracellular phytase activity of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB45 contributes to its plant-growth-promoting effect. The GenBank accession numbers for the sequences determined in this work are AY055219 to AY055226. *Microbiology*, *148*(7), 2097–2109.
- Irfan, M., Zahir, Z. A., Asghar, H. N., Khan, M. Y., Ahmad, H. T., & Ali, Q. (2019). Effect of multi-strain bacterial inoculation with different carriers on growth and yield of maize under saline conditions. *Int. J. Agric. Biol*, *22*, 1407–1414.
- Islam, F., Yasmeen, T., Arif, M. S., Riaz, M., Shahzad, S. M., Imran, Q., & Ali, I. (2016). Combined ability of chromium (Cr) tolerant plant growth promoting bacteria (PGPB) and salicylic acid (SA) in attenuation of chromium stress in maize plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *108*, 456–467.
- Jabborova, D., Enakiev, Y., Sulaymanov, K., Kadirova, D., Ali, A., & Annapurna, K. (2021). Plant growth promoting bacteria *Bacillus subtilis* promote growth and physiological parameters of *Zingiber officinale* Roscoe. *Plant Science Today*, *8*(1), 66–71.
- Jabran, K., & Farooq, M. (2007). *Maize: Cereal with a variety of uses*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3899.4725>
- Katsenios, N., Andreou, V., Sparangis, P., Djordjevic, N., Giannoglou, M., Chanioti, S., Kasimatis, C.-N., Kakabouki, I., Leonidakis, D., Danalatos, N., Katsaros, G., & Efthimiadou, A. (2022). Assessment of plant growth promoting bacteria strains on growth, yield and quality of sweet corn. *Scientific Reports*, *12*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16044-2>
- Katsenios, N., Andreou, V., Sparangis, P., Djordjevic, N., Giannoglou, M., Chanioti, S., Stergiou, P., Xanthou, M.-Z., Kakabouki, I., Vlachakis, D., Djordjevic, S., Katsaros, G., & Efthimiadou, A. (2021). Evaluation of Plant Growth Promoting Bacteria Strains on Growth, Yield and Quality of Industrial Tomato. *Microorganisms*, *9*(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9102099>
- Kaur, R., Pahwa, A. A., & Bhise, S. H. (2021). Maize: A Potential Grain for Functional and Nutritional Properties. In *Cereals and Cereal-Based Foods* (pp. 65–80). Apple Academic Press.
- Kloepper, J. W. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. *Proc. of the 4th Internat. Conf. on Plant Pathogenic Bacter, Station de Pathologie Vegetale et Phytobacteriologie, INRA, Angers, France, 1978*, *2*, 879–882.
- Kordatzaki, G., Katsenios, N., Giannoglou, M., Andreou, V., Chanioti, S., Katsaros, G., Savvas, D., & Efthimiadou, A. (2022). Effect of foliar and soil application of plant growth promoting bacteria on kale production and quality characteristics. *Scientia Horticulturae*, *301*, 111094. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111094>
- Kumar, D., & Jhariya, A. N. (n.d.). *Nutritional, Medicinal and Economical importance of Corn: A Mini Review*. 2.
- Lacava, P. T., & Azevedo, J. L. (2013). Endophytic bacteria: A biotechnological potential in agrobiological system. In *Bacteria in agrobiological: Crop productivity* (pp. 1–44). Springer.
- Lemcke-Norojärvi, M., Kamal-Eldin, A., Appelqvist, L.-Å., Dimberg, L. H., Öhrvall, M., & Vessby, B. (2001). Corn and Sesame Oils Increase Serum γ -Tocopherol Concentrations in Healthy Swedish Women. *The Journal of Nutrition*, *131*(4), 1195–1201. <https://doi.org/10.1093/jn/131.4.1195>

- Lobo, C. B., Juárez Tomás, M. S., Viruel, E., Ferrero, M. A., & Lucca, M. E. (2019). Development of low-cost formulations of plant growth-promoting bacteria to be used as inoculants in beneficial agricultural technologies. *Microbiological Research*, *219*, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.10.012>
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, *63*(1), 541–556.
- Maheshwari, D. K., Dheeman, S., & Agarwal, M. (2015). Phytohormone-producing PGPR for sustainable agriculture. In *Bacterial metabolites in sustainable agroecosystem* (pp. 159–182). Springer.
- Maheshwari, D. K., Dubey, R. C., Agarwal, M., Dheeman, S., Aeron, A., & Bajpai, V. K. (2015). Carrier based formulations of biocoenotic consortia of disease suppressive *Pseudomonas aeruginosa* KRP1 and *Bacillus licheniformis* KRB1. *Ecological Engineering*, *81*, 272–277.
- Mashabela, M. D., Piater, L. A., Dubery, I. A., Tugizimana, F., & Mhlongo, M. I. (2022). Rhizosphere Tripartite Interactions and PGPR-Mediated Metabolic Reprogramming towards ISR and Plant Priming: A Metabolomics Review. *Biology*, *11*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/biology11030346>
- Michelmore, R., Coaker, G., Bart, R., Beattie, G., Bent, A., Bruce, T., Cameron, D., Dangl, J., Dinesh-Kumar, S., Edwards, R., Eves-van den Akker, S., Gassmann, W., Greenberg, J. T., Hanley-Bowdoin, L., Harrison, R. J., Harvey, J., He, P., Huffaker, A., Hulbert, S., ... Walsh, J. (2017). Foundational and Translational Research Opportunities to Improve Plant Health. *Molecular Plant-Microbe Interactions*[®], *30*(7), 515–516. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-17-0010-CR>
- Mouazen, A. M., & Kuang, B. (2016). On-line visible and near infrared spectroscopy for in-field phosphorous management. *Soil and Tillage Research*, *155*, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.003>
- Nayana, A. R., Joseph, B. J., Jose, A., & Radhakrishnan, E. K. (2020). Nanotechnological advances with PGPR applications. In *Sustainable Agriculture Reviews 41* (pp. 163–180). Springer.
- Ngan, N. M., & Riddech, N. (2021). Use of Spent Mushroom Substrate as an Inoculant Carrier and an Organic Fertilizer and Their Impacts on Roselle Growth (*Hibiscus sabdariffa* L.) and Soil Quality. *Waste and Biomass Valorization*, *12*(7), 3801–3811. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01278-w>
- Noumavo, P. A., Kochoni, E., Didagbé, Y. O., Adjanohoun, A., Allagbé, M., Sikirou, R., Gachomo, E. W., Kotchoni, S. O., & Baba-Moussa, L. (2013). Effect of different plant growth promoting rhizobacteria on maize seed germination and seedling development. *American Journal of Plant Sciences*, *4*(5), 1013.
- Orhun, G. (2013). *Maize for Life*. 2013, 13–16. <https://doi.org/10.5923/j.food.20130302.01>
- Papastylianou Papatotiriou, P. T., Bilalis, D., Travlos, I., Papatheochari, A.-G., Παπαστυλιανού Παπασωτηρίου, Π. Θ., Μπιλάλης, Δ., Τραυλός, Η., & Παπαθεοχάρη, Α.-Γ. (2016). *Ειδική γεωργία II*. <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/5153>
- Park, C. H., Xu, H., Yeo, H. J., Park, Y. E., Hwang, G.-S., Park, N. I., & Park, S. U. (2021). Enhancement of the flavone contents of *Scutellaria baicalensis* hairy roots via metabolic engineering using maize Lc and *Arabidopsis* PAP1 transcription factors. *Metabolic Engineering*, *64*, 64–73.

- Pereira, S. I. A., Abreu, D., Moreira, H., Vega, A., & Castro, P. M. L. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improve the growth and nutrient use efficiency in maize (*Zea mays* L.) under water deficit conditions. *Heliyon*, *6*(10), e05106.
- Podile, A. R., & Kishore, G. K. (2006). Plant growth-promoting rhizobacteria. In S. S. Gnanamanickam (Ed.), *Plant-Associated Bacteria* (pp. 195–230). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4538-7_6
- Polat, E., Karaca, M., Demir, H., & Onus, A. N. (2004). Use of natural zeolite (clinoptilolite) in agriculture. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, *12*(1), 183–189.
- Qi, G.-H., Diao, Q., Tu, Y., Wu, S.-G., & Zhang, S.-H. (2022). *Protein Sources for the Animal Feed Industry Nutritional evaluation and utilization of quality protein maize (QPM) in animal feed. 2002.*
- Rahimi, S., Talebi, M., Baninasab, B., Gholami, M., Zarei, M., & Shariatmadari, H. (2020). The role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in improving iron acquisition by altering physiological and molecular responses in quince seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, *155*, 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.045>
- Rezaei-Chiyaneh, E., Amirnia, R., Amani Machiani, M., Javanmard, A., Maggi, F., & Morshedloo, M. R. (2020). Intercropping fennel (*Foeniculum vulgare* L.) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by PGPR inoculation: A strategy for improving yield, essential oil and fatty acid composition. *Scientia Horticulturae*, *261*, 108951. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108951>
- Ricciarelli, R., Zingg, J.-M., & Azzi, A. (2001). Vitamin E: Protective role of a Janus molecule. *The FASEB Journal*, *15*(13), 2314–2325. <https://doi.org/10.1096/fj.01-0258rev>
- Rojas-Tapias, D., Moreno-Galván, A., Pardo-Díaz, S., Obando, M., Rivera, D., & Bonilla, R. (2012). Effect of inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) on amelioration of saline stress in maize (*Zea mays*). *Applied Soil Ecology*, *61*, 264–272.
- Rotili, D. H., Sadras, V. O., Abeledo, L. G., Ferreyra, J. M., Micheloud, J. R., Duarte, G., Girón, P., Ermácora, M., & Maddonni, G. Á. (2021). Impacts of vegetative and reproductive plasticity associated with tillering in maize crops in low-yielding environments: A physiological framework. *Field Crops Research*, *265*, 108107. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108107>
- Salehi, A., Ghalavand, A., Sefidkon, F., & Asgharzade, A. (2011). *The effect of zeolite, PGPR and vermicompost application on N, P, K concentration, essential oil content and yield in organic cultivation of German Chamomile (Matricaria chamomilla L.).*
- Santner, A., & Estelle, M. (2009). Recent advances and emerging trends in plant hormone signalling. *Nature*, *459*(7250), 1071–1078.
- Santoyo, G., Urtis-Flores, C. A., Loeza-Lara, P. D., Orozco-Mosqueda, M. del C., & Glick, B. R. (2021). Rhizosphere colonization determinants by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). *Biology*, *10*(6), 475.
- Scott, S., Housh, A., Powell, G., Anstaett, A., Gerheart, A., Benoit, M., Wilder, S., Schueller, M., & Ferrieri, R. (2020). Crop yield, ferritin and Fe (II) boosted by azospirillum brasilense (HM053) in corn. *Agronomy*, *10*(3), 394.
- Sen, C. K., Khanna, S., & Roy, S. (2006). Tocotrienols: Vitamin E beyond tocopherols. *Life Sciences*, *78*(18), 2088–2098. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2005.12.001>

- Springer, N. M., Ying, K., Fu, Y., Ji, T., Yeh, C.-T., Jia, Y., Wu, W., Richmond, T., Kitzman, J., Rosenbaum, H., Iniguez, A. L., Barbazuk, W. B., Jeddeloh, J. A., Nettleton, D., & Schnable, P. S. (2009). Maize Inbreds Exhibit High Levels of Copy Number Variation (CNV) and Presence/Absence Variation (PAV) in Genome Content. *PLoS Genetics*, *5*(11), e1000734. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1000734>
- Stoll, A., Salvatierra-Martínez, R., González, M., Cisternas, J., Rodríguez, Á., Vega-Gálvez, A., & Bravo, J. (2021). Importance of crop phenological stages for the efficient use of PGPR inoculants. *Scientific Reports*, *11*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98914-9>
- Stolze, M., & Lampkin, N. (2009). Policy for organic farming: Rationale and concepts. *Food Policy*, *34*(3), 237–244.
- Suryadi, Y., Susilowati, D. N., & Fauziah, F. (2019). Management of plant diseases by PGPR-mediated induced resistance with special reference to tea and rice crops. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Sustainable Stress Management*, 65–110.
- Syakila, A., & Kroeze, C. (2011). The global nitrous oxide budget revisited. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, *1*(1), 17–26. <https://doi.org/10.3763/ghgmm.2010.0007>
- Tabassum, B., Khan, A., Tariq, M., Ramzan, M., Iqbal Khan, M. S., Shahid, N., & Aaliya, K. (2017). Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. *Applied Soil Ecology*, *121*, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.030>
- Tang, A., Haruna, A. O., Majid, N. M. A., & Jalloh, M. B. (2020). Potential PGPR properties of cellulolytic, nitrogen-fixing, phosphate-solubilizing bacteria in rehabilitated tropical forest soil. *Microorganisms*, *8*(3), 442.
- Tenaillon, M. I., & Charcosset, A. (2011). A European perspective on maize history. *Comptes Rendus Biologies*, *334*(3), 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.12.015>
- Vassilev, N., Vassileva, M., Lopez, A., Martos, V., Reyes, A., Maksimovic, I., Eichler-Löbermann, B., & Malusa, E. (2015). Unexploited potential of some biotechnological techniques for biofertilizer production and formulation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *99*(12), 4983–4996.
- Walker, T. S., Bais, H. P., Grotewold, E., & Vivanco, J. M. (2003). Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiology*, *132*(1), 44–51.
- Wang, Y., Brown, H. N., Crowley, D. E., & Szaniszló, P. J. (1993). Evidence for direct utilization of a siderophore, ferrioxamine B, in axenically grown cucumber. *Plant, Cell & Environment*, *16*(5), 579–585.
- Watson, S. A., & Ramstad, P. E. (Eds.). (1987). *Corn: Chemistry and technology*. American Association of Cereal Chemists.
- Weckhuysen, B. M., & Yu, J. (2015). Recent advances in zeolite chemistry and catalysis. *Chemical Society Reviews*, *44*(20), 7022–7024.
- Wuana, R., & Okieimen, F. (2010). Phytoremediation Potential of Maize (*Zea mays* L.). A Review. *African Journal of General Agriculture*, *6*.
- Zaghloul, R. A., Mohamed, Y. F. Y., & El-Meihy, R. M. (2016). Influential cooperation between zeolite and PGPR on yield and antimicrobial activity of thyme essential oil. *International Journal of Plant & Soil Science*, *13*(1), 1–18.

- Zaidi, S., Usmani, S., Singh, B. R., & Musarrat, J. (2006). Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. *Chemosphere*, 64(6), 991–997.
- Zeri, M., Anderson-Teixeira, K., Hickman, G., Masters, M., DeLucia, E., & Bernacchi, C. J. (2011). Carbon exchange by establishing biofuel crops in Central Illinois. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.09.006>
- Zhuang, Q., Qin, Z., & Chen, M. (2013). Biofuel, land and water: Maize, switchgrass or *Miscanthus*? *Environmental Research Letters*, 8(1), 015020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015020>
- Δαλιάνης, Κ. (1983). Δαλιάνης, Κ. (1983). Εαρινά Σιτηρά. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα. *Δαλιάνης, Κ. (1983). Εαρινά Σιτηρά. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.*
- Καραμάνος, Α. (1992). Τα σιτηρά των εύκρατων κλιμάτων. Ανωτάτη Γεωπονική Σχολή Αθηνών, Αθήνα. *Καραμάνος, Α. (1992). Τα Σιτηρά Των Εύκρατων Κλιμάτων. Ανωτάτη Γεωπονική Σχολή Αθηνών, Αθήνα.*
- Καραμάνος Α., Α. (1999). Τα σιτηρά των θερμών κλιμάτων Αραβόσιτος–Σόργο–Ρύζι–Κεχρί. Εκδόσεις Παπαζήσης, Αθήνα. *Καραμάνος, Α. (1999). Τα Σιτηρά Των Θερμών Κλιμάτων Αραβόσιτος–Σόργο–Ρύζι–Κεχρί. Εκδόσεις Παπαζήσης, Αθήνα.*
- Παπακώστα – Τασοπούλου Δ., Δ. (2008). Παπακώστα – Τασοπούλου Δ. (2008) Ειδική Γεωργία Ι – Τεύχος Α Σιτηρά Χειμερινά-Εαρινά. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, σελ. 183-274. *Παπακώστα – Τασοπούλου Δ. (2008) Ειδική Γεωργία Ι – Τεύχος Α Σιτηρά Χειμερινά-Εαρινά. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Σελ. 183-274.*