



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΗΠΕΥΤΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ**

Διδακτορική Διατριβή

Επίδραση αειφόρων αγρονομικών πρακτικών στη βιολογική αζωτοδέσμευση και την αζωτούχο θρέψη των φυτών, την ανάπτυξη, παραγωγή και ποιότητα των νωπών λοβών σε βιολογική και υδροπονική καλλιέργεια φασολιού

Ιωάννης Ν. Καραβίδας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Σάββας, Καθηγητής ΓΠΑ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Δημήτριος Σάββας, Καθηγητής ΓΠΑ

Αναστασία Ταμπακάκη, Καθηγήτρια ΕΛΜΕΠΑ

Ιωάννης Καραπάνος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

ΑΘΗΝΑ

2023



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΗΠΕΥΤΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ**

Διδακτορική Διατριβή

Επίδραση αειφόρων αγρονομικών πρακτικών στη βιολογική αζωτοδέσμευση και την αζωτούχο θρέψη των φυτών, την ανάπτυξη, παραγωγή και ποιότητα των νωπών λοβών σε βιολογική και υδροπονική καλλιέργεια φασολιού

Impact of sustainable agronomic practices on biological nitrogen fixing activity, nitrogen plant nutrition, growth, yield and yield qualities of common bean under organic and soilless cultivation systems

Ιωάννης Ν. Καραβίδας

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δημήτριος Σάββας, Καθηγητής ΓΠΑ (Επιβλέπων)

Αναστασία Ταμπακάκη, Καθηγήτρια ΕΛΜΕΠΑ

Ιωάννης Καραπάνος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

Γεωργία Ντάτση, Επίκουρη Καθηγήτρια ΓΠΑ

Ιορδάνης Χατζηπαυλίδης, Καθηγητής ΓΠΑ

Αθανάσιος Κουκουνάρας, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΠΘ

Χαράλαμπος Καριπίδης, Καθηγητής Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Επίδραση αειφόρων αγρονομικών πρακτικών στη βιολογική αζωτοδέσμευση και την αζωτούχο θρέψη των φυτών, την ανάπτυξη, παραγωγή και ποιότητα των νωπών λοβών σε βιολογική και υδροπονική καλλιέργεια φασολιού

Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής
Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φασόλι (*Phaseolus vulgaris* L.) αποτελεί το πιο σημαντικό ψυχανθές για τη διατροφή του ανθρώπου και μία πλούσια πηγή φυτικών πρωτεϊνών, θρεπτικών στοιχείων, υδατανθράκων, φυτικών ινών και αντιοξειδωτικών. Ως ψυχανθές, το φασόλι διαθέτει αζωτοδεσμευτική ικανότητα η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τη μείωση των αναγκών του σε εισροές αζώτου (N) μέσω της λίπανσης χωρίς μείωση της απόδοσης και της ποιότητας του συγκομιζόμενου προϊόντος. Η παραγωγή και η ποιότητα νωπών λοβών φασολιού δύνανται να βελτιστοποιηθούν με διάφορες καλλιεργητικές πρακτικές όπως η άρδευση, η εφαρμογή ριζοβίων, η πυκνότητα σποράς, κ.α. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η παρούσα διδακτορική διατριβή σχεδιάστηκε με στόχο να διαπιστωθεί αν και σε ποιο βαθμό είναι εφικτή η αξιοποίηση της βιολογικής αζωτοδέσμευσης ως πηγής αζώτου για τη θρέψη των φυτών σε δύο διαφορετικά αειφορικά συστήματα καλλιέργειας και συγκεκριμένα στις βιολογικές και τις υδροπονικές καλλιέργειες. Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της βιολογικής αζωτοδέσμευσης χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά στελέχη ριζοβίων, το *Rhizobium tropici* το οποίο ήδη είναι εμπορικά διαθέσιμο καθώς και ένα νέο στέλεχος, το *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21, το οποίο απομονώθηκε και ταυτοποιήθηκε πρόσφατα σε ελληνικά εδάφη καλλιεργούμενα με *P. vulgaris*.

Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, σε δύο διαδοχικά πειράματα στον ίδιο υπαίθριο αγρό το φασόλι καλλιεργήθηκε σύμφωνα με βιολογικές και συμβατικές καλλιεργητικές πρακτικές κατά την εαρινή-θερινή καλλιεργητική περίοδο. Και στις δύο καλλιέργειες, η καλλιέργεια του φασολιού εγκαταστάθηκε την άνοιξη σε πειραματικά τεμάχια που κατά τη χειμερινή περίοδο είχαν δεχθεί τις ακόλουθες πειραματικές επεμβάσεις: (α) βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου, (β) συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου, (γ) βιολογική καλλιέργεια κουκιού για χλωρή λίπανση και (δ) αγρανάπαυση. Η καλλιέργεια φασολιού ήταν είτε εμβολιασμένη με το εμπορικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 είτε μη εμβολιασμένη, ενώ τα φυτά της καλλιέργειας χλωρής λίπανσης είτε εμβολιάστηκαν είτε όχι με το στέλεχος *Rhizobium*

laguerreae VFLE1. Ο εμβολιασμός του κουκιού με ριζόβια βελτίωσε την υπέργεια ξηρή βιομάζα και την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού και κατά τις δύο χειμερινές καλλιεργητικές περιόδους. Επιπλέον, κατά το πρώτο πειραματικό έτος οι βιολογικές πρακτικές λίπανσης δεν περιόρισαν την απόδοση του μπρόκολου σε σχέση με τις αντίστοιχες συμβατικές, ενώ αντίθετα κατά το δεύτερο πειραματικό έτος η περιορισμένη διαθεσιμότητα N οδήγησε σε σημαντική μείωση της απόδοσης βιολογικού μπρόκολου. Επιπρόσθετα, η γλωρή λίπανση με κουκί αύξησε σημαντικά την απόδοση νωπών λοβών στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού που επακολούθησε κατά τις εαρινές καλλιεργητικές περιόδους. Η χαμηλότερη παραγωγή καταγράφηκε στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε τη χειμερινή καλλιέργεια μπρόκολου και στα δύο πειραματικά έτη. Ο εμβολιασμός του φασολιού με ριζόβια βελτίωσε ελάχιστα την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φασολιού αλλά μόνο κατά τη πρώτη εαρινή καλλιεργητική περίοδο.

Σχετικά με τα φυσικά και θρεπτικά χαρακτηριστικά ποιότητας, η βιολογική καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου απέδωσε λιγότερους λοβούς ανά φυτό με μειωμένο μέγεθος και νωπό βάρος, με αυξημένη, ωστόσο, βιοχημική δραστηριότητα, επίδραση που σχετίζεται με την περιορισμένη διαθεσιμότητα N στο έδαφος. Παράλληλα, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις στα φυσικά χαρακτηριστικά των λοβών και στη συγκέντρωσή του N μεταξύ συμβατικής και βιολογικής καλλιέργειας φασολιού με την εφαρμογή γλωρής λίπανσης. Η συγκέντρωση σακχάρων και αμύλου στους λοβούς δεν επηρεάστηκε από τις διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές. Συμπερασματικά, η μελέτη αυτή αποδεικνύει πως η εφαρμογή γλωρής λίπανσης μπορεί να θεωρηθεί ως μια αποτελεσματική στρατηγική αζωτούχου λίπανσης για τη βιολογική καλλιέργεια φασολιού, η οποία βελτιώνει τη θρεπτική τους αξία χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση της καλλιέργειας.

Ένας επιπλέον στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να διερευνήσει αν ένα μέρος των συνθετικών ανόργανων λιπασμάτων N που παρέχονται σε μία υδροπονική καλλιέργεια φασολιού μπορεί να υποκατασταθεί μέσω βιολογικής αζωτοδέσμευσης χωρίς μείωση των αποδόσεων σε νωπούς λοβούς. Μέχρι και το στάδιο της ανθοφορίας, τα φυτά παρέχονταν με ένα θρεπτικό διάλυμα που καλύπτει το 100% (13,8 mM), 75% (10,35 mM) και 50% (6,9 mM) των αναγκών των φυτών σε N. Κατά το επόμενο στάδιο της παραγωγής, η παροχή N στις ελλειμματικές μεταχειρίσεις μειώθηκε στο 25% των αναγκών των φυτών. Τα παραπάνω τρία διαφορετικά σχήματα θρέψης (100% N, 75-25% N & 50-25% N) συνδυάστηκαν με εμβολιασμό με δύο διαφορετικά ριζόβια ή

χωρίς εμβολιασμό σε ένα διπαραγοντικό πείραμα [3 x 3]. Τα υπό μελέτη ριζόβια που χρησιμοποιήθηκαν για τον εμβολιασμό του φασολιού ήταν α) το γηγενές στέλεχος *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21 και β) το εμπορικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899. Το σχήμα θρέψης 50-25% N βελτίωσε σημαντικά τον σχηματισμό φυματίων και την αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών σε σχέση με τα σχήματα 75-25% και 100% N. Ειδικά το σχήμα θρέψης 75-25% N περιόρισε σημαντικά την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού κατά την ανθοφορία με αποτέλεσμα τις αυξημένες απώλειες παραγωγής. Και τα δύο στελέχη ευνόησαν τον σχηματισμό φυματίων, ωστόσο η απόδοσή τους στον σχηματισμό φυματίων και στην αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών περιορίστηκε με την αύξηση της παροχής N. Επιπρόσθετα, το στέλεχος PVTN21 αναδείχθηκε πιο αποδοτικό από το εμπορικό CIAT 899, καθώς παρά τον σημαντικό περιορισμό της παροχής συνθετικών λιπασμάτων N, περιόρισε τις απώλειες παραγωγής στο 12% σε σύγκριση με τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε επάρκεια N. Συνεπώς, στις υδροπονικές καλλιέργειες φασολιού, ο εμβολιασμός με το στέλεχος PVTN21 μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μείωση της κατανάλωσης συνθετικών λιπασμάτων αζώτου.

Συμπερασματικά, σε όλα τα πειράματα η αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φασολιού ήταν σχετικά περιορισμένη, με συνέπεια οι δυνατότητες ανεξάρτησης της καλλιέργειας από την παροχή συνθετικών λιπασμάτων αζώτου να είναι περιορισμένες. Στις βιολογικές καλλιέργειες φασολιού όμως, η ανεξάρτηση της καλλιέργειας από τα συνθετικά ανόργανα λιπάσματα μπορεί να επιτευχθεί μέσω καλλιέργειας μετά από χλωρή λίπανση με ένα ψυχανθές με αυξημένη αζωτοδεσμευτική ικανότητα, όπως το κουκί. Όσον αφορά τις εκτός εδάφους καλλιέργειες φασολιού, είναι εφικτή μία μέτρια μείωση της κατανάλωσης συνθετικών ανόργανων λιπασμάτων μέσω του εμβολιασμού με το στέλεχος PVTN21.

Επιστημονική περιοχή: Αειφόρες καλλιεργητικές πρακτικές

Λέξεις κλειδιά: *Phaseolus vulgaris* L., *Vicia faba* sp., *Brassica oleracea* var. *italica* αμειψισπορά, αγρανάπαυση, ριζόβια, αζωτοδεσμευτική ικανότητα (BNF), οργανική λίπανση, συμβατική λίπανση, αζωτούχος λίπανση, χλωρή λίπανση, αντιοξειδωτικά, φαινολικά, φλαβονοειδή, υδατάνθρακες

Impact of sustainable agronomic practices on biological nitrogen fixing activity, nitrogen plant nutrition, growth, yield and yield qualities of common bean under organic and soilless cultivation systems

*Department of Crop Science
Laboratory of Vegetable Production*

ABSTRACT

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is the most important legume for human consumption worldwide and an important source of vegetable protein, minerals, carbohydrates, fiber, antioxidants and bioactive compounds. The N₂-fixation capacity of this crop could serve as a tool that reduces its plant demand for synthetic N fertilizer application to increase yield and quality. Fertilization, yield, and quality of common bean may be optimized by several other agronomic practices such as irrigation, rhizobia application, sowing density, etc. Taking this into consideration, this study explores whether or to what extent N₂-fixing activity can cover the common bean plant N demands under organic and hydroponic cultivation systems. To optimize the biological nitrogen fixing activity (BNF) two different rhizobia strains were used, the commercial strain *Rhizobium tropici* CIAT 899 and the strain *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21 originating from the Greek island Tinos.

For this purpose, common bean was cultivated according to organic or conventional farming practices during spring-summer in two successive years with crop and treatment during the preceding winter as either: (a) organic broccoli, (b) conventional broccoli, (c) organic faba bean used as green manure, or (d) fallow. Common bean was either inoculated with *Rhizobium tropici* CIAT 899 or non-inoculated, while faba bean was inoculated or non-inoculated with *Rhizobium laguerreae* VFLE1. Inoculating faba bean with rhizobia enhanced dry biomass production and biological N-fixing ability in both experimental years. Furthermore, organic farming did not restrict the yield of broccoli compared to conventional practices during the first year, while the reverse was the case in the second year, due to reduced soil N availability. Furthermore, green manure enhanced the fresh pod yield in the following organic crop of common bean in both years. The lowest yield was recorded in organically grown common bean when the preceding winter crop was organically grown broccoli in both years. Rhizobial inoculation of the common bean during the first year slightly increased atmospheric N fixation by common bean.

Concerning the physical and nutritional quality attributes, organic common bean after organic broccoli produced smaller pods of higher dry matter and bioactive compound content, responses that are correlated with limited soil N availability. No significant variations were observed on yield components and N levels of pods cultivated under conventional and organic, with green manure application, cropping systems. Pod sugar and starch content was not influenced by the different fertilization practices. In conclusion, we have demonstrated that the combined application of sheep and green manure can be considered as an efficient N-fertilization strategy for organic crops of common bean, benefiting their nutritional value without compromising yield.

An additional aim of this study is to explore the possibility to reduced application of inorganic N fertilizer on the yield, yield qualities, and biological nitrogen fixation (BNF) in hydroponic common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) without compromising plant performance by utilizing the inherent ability of this plant to symbiotically fix N₂. Until the flowering stage, plants were supplied with a nutrient solution containing N-concentrations of either: a, 100 %, conventional standard practice, 13.8 mM; b, 75 % of standard, 10.35 mM; or c, 50 % of standard, 6.9 mM. During the subsequent reproductive stage inorganic-N treatments b and c were decreased to 25% of standard, while the standard (100 % level) N-application was not altered. The three different inorganic-N supply treatments were combined with two different rhizobia strains, and a control (no-inoculation) treatment, in a [three × three] factorial experimental design. The rhizobia strains applied were either: indigenous strain *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21; or, commercially supplied *Rhizobium tropici* CIAT 899. Results showed that, 50-25% mineral-N application regime led to significant increases in nodulation, BNF, and fresh-pod yield, compared to the other treatment with reduced inorganic N supply. On the other hand, the 75-25% mineral-N regime applied during vegetative stage restricted nodulation and BNF thus incurring significant yield losses. Both rhizobia strains stimulated nodulation and BNF. However, the BNF capacity they facilitated was suppressed as the inorganic-N input increased. Also, strain PVTN21 was superior to CIAT 899 - as 50-25 % N-treated plants inoculated with the former showed a yield loss of 12% compared to the 100 % N treated plants. In conclusion, enhanced N use efficiency and BNF reduce mineral-N input dependency of the crop, and therefore may reduce any negative environmental consequences of mineral-N over-application. Therefore, plant inoculation with the indigenous strain PVTN21 could serve as a sustainable farming practice that decreases

the N dependence of common bean for high yields under hydroponic cultivation systems.

In conclusion, in all experiments, the BNF activity of common bean was relatively low indicating that the possibilities of making the crop independent of external N inputs are limited. However, in organic farming systems the decreased dependence of common bean in external N inputs could be achieved through green manure application using a legume with high BNF activity, such as faba bean. Concerning hydroponic common bean production, considerable high N savings without compromising the yield could be achieved by inoculating common bean plants with the strain PVTN21.

Scientific area: Sustainable agronomic practices

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., *Vicia faba* sp., *Brassica oleracea* var. *italica*, crop rotation, fallow, rhizobia, nitrogen fixing activity (BNF), organic fertilization, conventional fertilization, nitrogen fertilization, green manure, antioxidants, phenolics, flavonoids, carbohydrates

Στους γονείς μου Νικόλαο και Δήμητρα

Αν θες να πας γρήγορα, πήγαινε μόνος σου...

Αν θες να πας μακριά, πήγαινε με παρέα!



*Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή χρηματοδοτήθηκε
από το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα
«TRUE: TRansition paths to sUstainable legume-based systems in
Europe» Horizon 2020 (Grant Agreement No. 727973)*



Ευχαριστίες

Οφείλω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στη διεκπεραίωση αυτής της διδακτορικής διατριβής, καθώς χωρίς την παρουσία και την υποστήριξη τους δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση αυτής της έρευνας.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω την ιδιαίτερη τιμή και ευγνωμοσύνη μου για την αποδοχή μου ως Υποψήφιο Διδάκτορα στο Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών Γ.Π.Α. από τον Καθηγητή Δημήτριο Σάββα, καθώς συγκαταλέγεται στο 2% των κορυφαίων επιστημόνων παγκοσμίως. Χαρακτηριστικά όπως το άρτιο επιστημονικό υπόβαθρο, επιστημονικό και πνευματικό ήθος, καθώς και η εμπιστοσύνη, καθοδήγηση και παρότρυνση του Επιβλέποντα Καθηγητή μου Δημητρίου Σάββα ήταν κομβικά για την εκτέλεση αυτής της μελέτη.

Επιπλέον, αγαπητέ Καθηγητή, σας ευχαριστώ για την ακόμα περαιτέρω στήριξη σας χρηματοδοτώντας την εργασία μου μέσω του Ευρωπαϊκού Προγράμματος TRUE. Σας ευχαριστώ που διασφαλίσατε ένα άρτιο περιβάλλον για την εκπόνηση της Διδακτορικής μου Διατριβής.

Ένα εξίσου μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην Επίκουρη Καθηγήτρια Γεωργία Ντάτση, καθώς η επιστημονική της κρίση ήταν απαραίτητη τόσο για την υλοποίηση αυτής της μελέτης όσο και του προγράμματος που χρηματοδότησε αυτή. Ωστόσο, πέρα από τα σημαντικά ερευνητικά οφέλη που αποκόμισα, η Δρ. Ντάτση με δίδαξε επίσης σημαντικά μαθήματα ζωής. Με δίδαξε πως πρέπει να βάζω στόχους, πως τίποτα δεν μπορεί να σταθεί εμπόδιο για την επιτυχία, την αξία της συνεργασίας, την αξία της προσπάθειας.

Είμαι ευγνώμων για όλα όσα έχετε κάνει για εμένα. Πάντα θα αποτελείτε σπουδαίο πρότυπο για εμένα. Ευχαριστώ που με κάνατε καλό επιστήμονα. Ευχαριστώ που με κάνατε καλύτερο άνθρωπο.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγήτρια Αναστασία Ταμπακάκη. Ως μέλος της τριμελούς επιτροπής και του ερευνητικού έργου TRUE διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην έρευνα αυτή μέσω παροχής γνώσης, πρωτόκολλων και βιολογικού υλικού, χωρίς τα οποία δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί ο στόχος αυτής της μελέτης. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ιωάννη Καραπάνο, για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή, καθώς για την υποστήριξη και την προσφορά του όταν ήταν αναγκαία κατά της διάρκειας της εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Αθανάσιο Κουκουνάρα καθώς και τον Καθηγητή Χαράλαμπο Καριπίδη για την ορθή αξιολόγηση και βελτίωση της παρούσας διατριβής.

Στη συνέχεια θα ήθελα να εκφράσω τη μεγάλη μου ευγνωμοσύνη για όλη τη στήριξη που είχα από τη φίλη μου και συνεργάτιδά μου Υποψήφια Διδάκτορα Θεοδώρα Ντάναση. Η ενεργή συμβολή της σε όλες τις επιμέρους έρευνες αυτή της μελέτης, η επιμονή και η συμπαράσταση της σε δύσκολες και καλές στιγμές κατά τη διάρκεια των τελευταίων 5 χρόνων, αποτέλεσε κινητήριο δύναμη για την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής. Θεοδώρα είναι χαρά μου να δουλεύουμε μαζί.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επίσης φίλη μου και Υποψήφια Διδάκτορα Σοφία Μαρκά για τη σημαντική συμβολή της στον σχεδιασμό πρωτοκόλλων και στην εξαγωγή σημαντικών αναλύσεων της συγκεκριμένης μελέτης. Για τα παραπάνω θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και τους Dr. Leo Sabatino και Dr. Beppe Benedetto Consentino. Μια συνεργάτιδα και πλέον φίλη μου αποτελεί και η Δρ. Μαρίνα Χατζηγιάννη που ήταν πάντα διαθέσιμη να παρέχει οποιαδήποτε βοήθεια. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Dr. Pietro Iannetta, συντονιστή του ερευνητικού προγράμματος που χρηματοδότησε την παρούσα διατριβή, για τη σημαντική συμβολή του στη διάχυση των ευρημάτων αυτής της μελέτης. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στον Αναπληρωτή Καθηγητή Ανέστη Καρκάνη, στον Δρ. Ανδρέα Ροπόκη και στην Υποψήφια Διδάκτωρ Βασιλική Βουγελέκα, για τη συνεισφορά τους στην παρούσα μελέτη και κυρίως για τη σύνταξη της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Υποψήφιο Διδάκτορα Διονύσιο Υφαντόπουλο που κατά πρώτα στάδια της διατριβής παρείχε αβίαστα οποιαδήποτε πληροφορία και βοήθεια χρειαζόμουν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στην Υποψήφια Διδάκτορα Ευδοξία Ευσταθιάδου για την παροχή και προετοιμασία των ριζοβίων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους πρώην φοιτητές που βοήθησαν στη διεκπεραίωση της παρούσας μελέτης, στο πλαίσιο της οποίας εκπόνησαν την πτυχιακή τους διατριβή, και συγκεκριμένα τους: Ιωάννη Βλάχο, Δημήτριο Καραμπέτσο, Ιωάννη Δάρδα, Εμμανουήλ Αγιαννιωτάκη, Ιωάννη Ιωαννίδη, Αριάδνη Γιαννοπούλου και Δήμητρα Πανταζοπούλου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και Υποψήφιους Διδάκτορες Γεώργιο Πρεμέτη, Σοφία Μαρκά και Δήμητρα Παλιμέρη-Θεοδόση για την ψυχολογική υποστήριξη, την ανοχή και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Τίποτα από όλα αυτά, ωστόσο, δεν θα ήταν δυνατά εάν δεν είχα την αμέριστη υποστήριξη από την οικογένειά μου, και συγκεκριμένα τον πατέρα μου Νικόλαο, τη μητέρα μου Δήμητρα και τις αδελφές μου Ελένη και Μαρία. Ελπίζω αυτό το κατόρθωμά μου να επιβραβεύει έστω και λίγο τους κόπους σας. Ευχαριστώ που πιστεύετε σε εμένα και στηρίζετε τα όνειρά μου.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	14
1. Εισαγωγή - Καλλιεργητικές πρακτικές που αυξάνουν την απόδοση και ποιότητα του φασολιού (A Systematic Review).....	24
1.1. Μέθοδοι.....	27
1.1.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	27
1.2. Αποτελέσματα Αναζήτησης.....	28
1.2.1. Δημοσιευμένο ερευνητικό υλικό κατά τη διάρκεια του χρόνου.....	31
1.2.2. Γεωγραφική κατανομή των εργασιών.....	31
1.3. Συζήτηση.....	33
1.3.1. Βελτίωση φυτών.....	33
1.3.2. Πυκνότητα και εποχή σποράς.....	35
1.3.3. Άρδευση.....	37
1.3.4. Λίπανση.....	41
1.3.5. Συγκαλλιέργεια.....	45
1.3.6. Εκτός εδάφους καλλιεργητικά συστήματα.....	46
1.3.7. Άρωση.....	47
1.3.8. Εφαρμογή ριζοβίων.....	47
1.3.9. Εφαρμογή βιοδιεγερτών.....	52
1.3.10. Διαχείριση ασθενειών.....	53
1.3.11. Διαχείριση φυσικών εχθρών.....	54
1.3.12. Διαχείριση ζιζανίων.....	55
1.4. Συμπέρασμα.....	56
2. Στόχος Μελέτης.....	59
3. Υλικά & Μέθοδοι.....	61
3.1. Επίδραση των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στην απόδοση του βιολογικού φασολιού.....	61
3.1.1. Πειραματικός σχεδιασμός.....	61
3.1.2. Εμβολιασμός με ριζόβια.....	68
3.1.3. Χαρακτηρισμός ανάπτυξης και παραγωγής.....	68
3.1.4. Ανάλυση εδάφους.....	68
3.1.5. Προσδιορισμός αζωτοδεσμευτικής ικανότητας και ολικού N.....	69
3.1.6. Στατιστική ανάλυση δεδομένων.....	70
3.2. Επίδραση διαφορετικών προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στα χαρακτηριστικά παραγωγή και στην ποιότητα του φασολιού.....	71
3.2.1. Πειραματικός σχεδιασμός.....	71

3.2.2.	Δειγματοληψίες.....	72
3.2.3.	Περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία και φυσικά χαρακτηριστικά λοβών....	72
3.2.4.	Βιοχημικές ιδιότητες	73
3.2.5.	Άμυλο και σάκχαρα	74
3.2.6.	Στατιστική ανάλυση δεδομένων	75
3.3.	Απόδοση υδροπονικού φασολιού υπό ελλειμματική παροχή αζώτου και εμβολιασμού με ριζόβια.....	75
3.3.1.	Πειραματικός σχεδιασμός.....	75
3.3.2.	Εγκατάσταση καλλιέργειας	76
3.3.3.	Χαρακτηριστικά ανάπτυξης και παραγωγής.....	78
3.3.4.	Ολικό N & C, Δ και αζωτοδεσμευτική ικανότητα	79
3.3.5.	Στατιστική ανάλυση δεδομένων	79
4.	Αποτελέσματα	80
4.1.	Επίδραση των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στην απόδοση του βιολογικού φασολιού.....	80
4.1.1.	Χαρακτηριστικά ανάπτυξης.....	80
4.1.2.	Χαρακτηριστικά παραγωγής	81
4.1.3.	Συγκεντρώσεις θρεπτικών στο έδαφος.....	83
4.1.4.	Οργανική ουσία εδάφους	89
4.1.5.	Ολικό Άζωτο και αζωτοδεσμευτική ικανότητα	91
4.2.	Επίδραση διαφορετικών προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στα χαρακτηριστικά παραγωγής και στην ποιότητα του φασολιού.	96
4.2.1.	Φυσικά χαρακτηριστικά λοβών	96
4.2.2.	Συγκέντρωση θρεπτικών στους λοβούς.....	98
4.2.3.	Βιοχημικές ιδιότητες	100
4.2.4.	Σάκχαρα και Άμυλο	100
4.2.5.	Ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA)	101
4.3.	Απόδοση υδροπονικού φασολιού υπό ελλειμματική παροχή αζώτου και εμβολιασμού με ριζόβια.	103
4.3.1.	Χαρακτηριστικά βιομάζας	103
4.3.2.	Ολικό N & C	105
4.3.3.	Αζωτοδεσμευτική ικανότητα.....	108
4.3.4.	Χαρακτηριστικά παραγωγής	111
5.	Συζήτηση	113
5.1.	Επίδραση των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στην απόδοση του βιολογικού φασολιού.....	113

5.2. Επίδραση διαφορετικών προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στα χαρακτηριστικά παραγωγής και στην ποιότητα του φασολιού.	120
5.3. Απόδοση υδροπονικού φασολιού υπό ελλειμματική παροχή αζώτου και εμβολιασμού με ριζόβια.	126
6. Συμπεράσματα	133
7. Πρωτοτυπία της Διδακτορικής Διατριβής.....	136
8. Βιβλιογραφία	137
9. Βιογραφικό σημείωμα	163

Ευρετήριο Γραφημάτων

- Γράφημα 1:** Διάγραμμα ροής της διαδικασίας διαλογής και επιλογής για την ένταξη των μελετών στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Όπου N υποδηλώνει τον αριθμό των μελετών για κάθε καλλιεργητική πρακτική.....29
- Γράφημα 2:** Το ποσοστό (%) των μελετών των δώδεκα κύριων αγρονομικών πρακτικών που εντοπίστηκαν και συμπεριλήφθηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.30
- Γράφημα 3:** Ετήσια παραγωγή επιστημονικών δημοσιεύσεων που περιλαμβάνονται στη συστηματική ανασκόπηση30
- Γράφημα 4:** Παγκόσμιος χάρτης καταμερισμού των συλλεχθέντων εργασιών ανά ήπειρο. Το χρώμα σε κάθε δισκόγραμμα αντιπροσωπεύει το ποσοστό (%) των δημοσιεύσεων για κάθε κατηγορία καλλιεργητικών πρακτικών. (Βασικός χάρτης: © Copyright Showeet.com, τελευταία πρόσβαση στις 22 Δεκεμβρίου 2021).31
- Γράφημα 5:** Μηνιαία μέγιστη (Tmax), μέση μέγιστη (MTmax), μέση ελάχιστη (MTmin) και ελάχιστη (Tmin) και το ύψος των βροχοπτώσεων (RR) κατά την 1^η πειραματική χρονιά (Σεπτέμβριος 2017 – Αύγουστος 2018) στην Αθήνα.....61
- Γράφημα 6:** Μηνιαία μέγιστη (Tmax), μέση μέγιστη (MTmax), μέση ελάχιστη (MTmin) και ελάχιστη (Tmin) και το ύψος των βροχοπτώσεων (RR) κατά την 2^η πειραματική χρονιά (Σεπτέμβριος 2018 – Αύγουστος 2019) στην Αθήνα.....62
- Γράφημα 7:** Επίδραση του εμβολιασμού των κουκιών με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1 στο νωπό βάρος (g) κατά το στάδιο ανθοφορίας την 1^η και 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Για κάθε καλλιεργητική περίοδο, τα διαφορετικά γράμματα σε κάθε ράβδο υποδεικνύουν στατιστικά σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).80
- Γράφημα 8:** Επίδραση των διαφορετικών συστημάτων καλλιέργειας (βιολογικό-συμβατικό) στην απόδοση του μπρόκολου κατά την 1^η και 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Για κάθε έτος τα διαφορετικά γράμματα των ράβδων υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test. *** υποδηλώνει στατιστικώς σημαντική απόκλιση με $p < 0.001$82
- Γράφημα 9:** Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στα επίπεδα $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος κατά τη διάρκεια του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. *, ** & *** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test με $p < 0.05$, $p < 0.01$, και $p < 0.001$, αντίστοιχα. **A:** Συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2017-2018) στις 50, 90 και 120 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των καλλιεργειών (HMEK). **B:** Συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2018) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, στο στάδιο της ανθοφορίας, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 HMEK). **Γ:** Συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2018-2019), πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά τον σχηματισμό των ανθοκεφαλών, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου, κατά την ανθοφορία των κουκιών και μετά από την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 HMEK). **Δ:** Συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$

στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2019) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειας, πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά την ανθοφορία, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (0, 10, 40, 80 και 100 ΗΜΕΚ).84

Γράφημα 10: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στα επίπεδα $\text{NH}_4\text{-N}$ στο έδαφος κατά τη διάρκεια του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. * υποδηλώνει στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test με $p < 0.05$. Α: Συγκεντρώσεις $\text{NH}_4\text{-N}$ στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2017-2018) στις 50, 90 και 120 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των καλλιεργειών (ΗΜΕΚ). Β: Συγκεντρώσεις $\text{NH}_4\text{-N}$ στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2018) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, στο στάδιο της ανθοφορίας, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 ΗΜΕΚ). Γ: Συγκεντρώσεις $\text{NH}_4\text{-N}$ στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2018-2019), πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά τον σχηματισμό των ανθοκεφαλών, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου, κατά την ανθοφορία των κουκιών και μετά από την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 ΗΜΕΚ). Δ: Συγκεντρώσεις $\text{NH}_4\text{-N}$ στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2019) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειας, πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά την ανθοφορία, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (0, 10, 40, 80 και 100 ΗΜΕΚ).86

Γράφημα 11: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στα επίπεδα Ρ στο έδαφος κατά τη διάρκεια του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. * & ** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test με $p < 0.05$ & $p < 0.01$, αντίστοιχα. Α: Συγκεντρώσεις Ρ στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2017-2018) στις 50, 90 και 120 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των καλλιεργειών (ΗΜΕΚ). Β: Συγκεντρώσεις Ρ στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2018) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, στο στάδιο της ανθοφορίας, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 ΗΜΕΚ). Γ: Συγκεντρώσεις Ρ στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2018-2019), πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά τον σχηματισμό των ανθοκεφαλών, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου, κατά την ανθοφορία των κουκιών και μετά από την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 ΗΜΕΚ). Δ: Συγκεντρώσεις Ρ στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2019) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειας, πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά την ανθοφορία, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (0, 10, 40, 80 και 100 ΗΜΕΚ).88

Γράφημα 12: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στα επίπεδα οργανικής ουσίας κατά τη διάρκεια του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. * & ** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test με $p < 0.05$ & $p < 0.01$, αντίστοιχα. Α: Επίπεδα οργανικής ουσίας των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2017-2018) στις 50, 90 και 120 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των καλλιεργειών (ΗΜΕΚ). Β: Επίπεδα οργανικής ουσίας της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2018) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές

καλλιέργειες, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, στο στάδιο της ανθοφορίας, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 ΗΜΕΚ). Γ: Επίπεδα οργανικής ουσίας των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2018-2019), πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά τον σχηματισμό των ανθοκεφαλών, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου, κατά την ανθοφορία των κουκιών και μετά από την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 ΗΜΕΚ). Δ: Επίπεδα οργανικής ουσίας εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2019) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά την ανθοφορία, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (0, 10, 40, 80 και 100 ΗΜΕΚ).90

Γράφημα 13: Επίδραση των 3 καλλιεργητικών πρακτικών στις συγκεντρώσεις των μακρο- (mg/g) και μικροστοιχείων (μg/g) στην ξηρή ουσία των παραγόμενων λοβών. Διαφορετικά γράμματα σε κάθε ράβδο υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan multiple range test. *, ** & *** υποδηλώνουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση με $p < 0,05$, 0,01 και 0,001, αντίστοιχα. Σ.Μ., Κ, ΒΜ και ΧΛ υποδηλώνουν συμβατικό μπρόκολο, πρόβεια κοπριά, βιολογικό μπρόκολο και χλωρή λίπανση αντίστοιχα99

Γράφημα 14: Σχηματική απεικόνιση της ανάλυσης κύριων συνιστωσών των χαρακτηριστικών παραγωγής (αριθμός λοβών ανά φυτό (N λοβών), αριθμός σπερμάτων ανά λοβό (N σπερμάτων), μέσο νωπό βάρος (Βάρος), μήκος, ύψος, καμπυλότητα (ΜΛ/ΥΛ), πλάτος και ποσοστό ξηράς ουσίας (ΞΟ)) της συγκέντρωσης των λοβών σε θρεπτικά στοιχεία (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu & Zn), των βιοχημικών ιδιοτήτων λοβών (FRAP, TEAC, TPC, TFC) και της συγκέντρωσης του λοβού σε σάκχαρα (γλυκόζη (GLU), φρουκτόζη (FRU), σακχαρόζη (SUC)) και άμυλο των διαφορετικών συστημάτων καλλιέργειας.102

Γράφημα 15: Επίδραση των διαφορετικών εισροών N (Α) και εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια (Β) στην ολική συγκέντρωση N στη υπέργεια βιομάζα φασολιού κατά το στάδιο της βλαστικής ανάπτυξης (25 ημέρες μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας, ΗΜΕΚ), κατά την ανθοφορία (35 ΗΜΕΚ), κατά την έκπτυξη των πρώτων λοβών (42 ΗΜΕΚ) και κατά την παραγωγή (62 ΗΜΕΚ).106

Ευρετήριο Πινάκων

- Πίνακας 1:** Όροι αναζήτησης που εφαρμόστηκαν στις δύο βάσεις δεδομένων ως προς τις διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές. Το σύμβολο «*» χρησιμοποιήθηκε για τη συμπερίληψη των όρων αναζήτησης με διαφορετικές καταλήξεις27
- Πίνακας 2:** Επίδραση διαφορετικών επεμβάσεων υδατικής καταπόνησης στην παραγωγή νωπών λοβών, ξηρών σπερμάτων, συγκέντρωση λοβού σε άζωτο (N(%)), στον αριθμό σπερμάτων ανά λοβό καθώς και στο μέσο βάρος 100 σπερμάτων. Το MA δηλώνει μη αξιολογηθείσα παράμετρος. Τα ↓ και ↑ δηλώνουν αρνητική και θετική επίδραση στην υπό μελέτη παράμετρο ενώ το – δηλώνει καμία επίδραση.....39
- Πίνακας 3:** Επιδράσεις του εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια στην παραγωγή και ποιότητα του φασολιού.....50
- Πίνακας 4:** Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους του πειραματικού αγρού...62
- Πίνακας 5:** Πειραματικός σχεδιασμός του προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών.66
- Πίνακας 6:** Πειραματικός σχεδιασμός των επιμέρους εναλλαγών καλλιεργειών. Τα K, YM, ΧΛ και ΣΜ, υποδηλώνουν την πρόβεια κοπριά, υπολείμματα καλλιέργειας μπρόκολου, γλωρή λίπανση και υπολείμματα συμβατικής καλλιέργειας μπρόκολου, αντίστοιχα.72
- Πίνακας 7:** Χημική σύσταση των διαφορετικών ΘΔ. ΗΜΕΚ υποδηλώνει τον αριθμό την ημερών μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας.....78
- Πίνακας 8:** Επίδραση των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών και του εμβολιασμού των φυτών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 στο νωπό βάρος της υπέργειας βιομάζας φασολιού κατά το στάδιο της ανθοφορίας την 1^η και 2^η καλλιεργητική περίοδο.81
- Πίνακας 9:** Επίδραση των χειμερινών καλλιεργειών και του εμβολιασμού των φυτών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 στη συνολική παραγωγή (t στρέμμα⁻¹) και αριθμό λοβών (No 10⁵ στρέμμα⁻¹) φασολιού κατά τις 2 καλλιεργητικές περιόδους.82
- Πίνακας 10:** Επίδραση του εμβολιασμού του κουκιού με το στέλεχος *Rhizobium leguminosarum* VFLE1 στον λόγο C:N, ολικό N (%), %Ndfa, ξηρή βιομάζα (Ξ.Β., kg στρέμμα⁻¹) και BNF (kg στρέμμα⁻¹) στην υπέργεια βιομάζα κατά τις 2 χειμερινές καλλιεργητικές περιόδους.....91
- Πίνακας 11:** Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών και εμβολιασμού του φασολιού με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 στον λόγο C:N, στη συγκέντρωση N (%), στο ποσοστό του αζώτου που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa), στην ξηρή βιομάζα (Ξ.Β. kg στρέμμα⁻¹) και στα ποσά δεσμευμένου N (BNF, kg στρέμμα⁻¹) κατά την 1^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο.....93
- Πίνακας 12:** Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών και εμβολιασμού του φασολιού με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 στον λόγο C:N, στην συγκέντρωση N (%), στο ποσοστό του αζώτου που προήλθε από την ατμόσφαιρα

(%Ndfa), στην ξηρή βιομάζα (Ξ.Β. kg στρέμμα⁻¹) και στα ποσά δεσμευμένου N (BNF, kg στρέμμα⁻¹) κατά τη 2^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο.95

Πίνακας 13: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης στον αριθμό των λοβών ανά φυτό (Λοβοί, N φυτό⁻¹), μέσο νωπό βάρος λοβού (g λοβο⁻¹), μήκος λοβού (ΜΛ, cm), ύψος λοβού (ΥΛ, cm), καμπυλότητα (ΜΛ/ΥΛ), πλάτος λοβού (cm), αριθμό σπερμάτων ανά λοβό (N λοβό⁻¹) και ποσοστό ξηράς ουσίας (Ξ.Ο., %). Σ.Μ., Κ, ΒΜ και ΧΛ υποδηλώνουν συμβατικό μπρόκολο, πρόβεια κοπριά, βιολογικό μπρόκολο και χλωρή λίπανση αντίστοιχα.....97

Πίνακας 14: Επίδραση των διαφορετικών καλλιεργητικών συστημάτων στην αντιοξειδωτική ικανότητα (FRAP & TEAC) και στην περιεκτικότητα ολικών φαινολικών (TPC) και φλαβονοειδών (TFC) σε ξηρούς λοβούς. Σ.Μ., Κ, ΒΜ και ΧΛ υποδηλώνουν συμβατικό μπρόκολο, πρόβεια κοπριά, βιολογικό μπρόκολο και χλωρή λίπανση αντίστοιχα.100

Πίνακας 15: Επίδραση των διαφορετικών πρακτικών στη συγκέντρωση των λοβών σε σάκχαρα και άμυλο. Σ.Μ., Κ, ΒΜ και ΧΛ υποδηλώνουν συμβατικό μπρόκολο, πρόβεια κοπριά, βιολογικό μπρόκολο και χλωρή λίπανση αντίστοιχα101

Πίνακας 16: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια στη νωπή βιομάζα (g φυτό⁻¹) και των αριθμό των φυματίων ανά ρίζα (Νο φυτό⁻¹) του φασολιού κατά τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης του φυτού.....104

Πίνακας 17: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και του εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια, στον συντελεστή φωτοσύνθεσης Δ, την ολική συγκέντρωση C και στον λόγο C:N στην υπέργεια βιομάζα του φυτού.....107

Πίνακας 18: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και του εμβολιασμού με ριζόβια στην ποσοστό του N που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa), στην ξηρή βιομάζα (Ξ.Β.) της καλλιέργειας (kg στρέμμα⁻¹) και στα συνολικά ποσά N που δέσμευσε η καλλιέργεια BNF (kg στρέμμα⁻¹ N) κατά τα στάδια της έκπτυξης των λοβών και της παραγωγής.....110

Πίνακας 19: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και του εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια, στον αριθμό των λοβών ανά φυτό (Λοβοί, N φυτό⁻¹), μέσο νωπό βάρος λοβού (Βάρος λοβού, g λοβό⁻¹) και συνολική παραγωγή νωπών λοβών (g φυτό⁻¹).....112

1. Εισαγωγή - Καλλιεργητικές πρακτικές που αυξάνουν την απόδοση και ποιότητα του φασολιού (A Systematic Review).

Καταπονήσεις που σχετίζονται είτε με την κλιματική αλλαγή, όπως ξηρασία, υψηλή αλατότητα και συμπίεση του εδάφους, είτε με τη ρύπανση του περιβάλλοντος, δρουν ως οι σημαντικότεροι παράγοντες περιορισμού της απόδοσης και της ποιότητας των καλλιεργούμενων προϊόντων σε παγκόσμιο επίπεδο, φέροντας αρνητικό αντίκτυπο στην κοινωνικοοικονομική και επισιτιστική ασφάλεια (Zandalinas et al., 2021). Λαμβάνοντας υπόψη τον εκτιμώμενο παγκόσμιο πληθυσμό που αναμένεται να φτάσει τα 10,4 δισεκατομμύρια μέχρι το 2067, με την Ασία και την Αφρική να αντιπροσωπεύουν το 81% αυτής της αύξησης (Chojnacka et al., 2020) και τις αντίστοιχες προβλέψεις της παγκόσμιας ζήτησης τροφίμων (van Dijk et al., 2021), η λήψη αποτελεσματικών μέτρων για την ενίσχυση της φυτικής παραγωγής είναι ιδιαίτερα επιτακτική. Μέσω της αποδοτικότερης χρήσης πόρων και βιώσιμων αγρονομικών πρακτικών, σχετικά με τη λίπανση, την άρδευση και τη φυτοπροστασία, είναι δυνατή η επίτευξη της μειωμένης ζήτησης συνθετικών χημικών λιπασμάτων, νερού άρδευσης και χημικών φυτοφαρμάκων χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση των διαφόρων καλλιεργητικών συστημάτων (Young et al., 2021). Οι βιολογικές καλλιεργητικές πρακτικές προσφέρουν θετικό αντίκτυπο στις οικολογικές λειτουργίες και την οικονομική βιωσιμότητα, επομένως θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως εξαιρετικές στρατηγικές για την επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Sustainable Development Goals, UN SDGs), όπως τον περιορισμό του υποσιτισμού και την επίτευξη επισιτιστικής ασφάλειας (Chojnacka et al., 2020). Τέτοιες πρακτικές μπορούν να διατηρήσουν τους φυσικούς πόρους και τις φυσικές λειτουργίες, καθώς και να μειώσουν το κόστος διαχείρισης των καλλιεργειών.

Η συγκαλλιέργεια, η εναλλαγή καλλιεργειών, η βιολογική γεωργία και τα καλλιεργητικά συστήματα μειωμένης άρσης αποτελούν τις πιο βιώσιμες καλλιεργητικές πρακτικές, καθώς η εκτεταμένη χρήση τους οδηγεί στη βελτίωση της εδαφικής βιοποικιλότητας, δομής και γονιμότητας (Morugán-Coronado et al., 2020). Επιπλέον, οι μειωμένες απαιτήσεις άρσης οδηγούν σε ταυτόχρονη μείωση της χρήσης γεωργικού εξοπλισμού και καυσίμων με επακόλουθο περιορισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG's) και λειτουργικών εξόδων (Ghimire, et al., 2016). Επιπρόσθετα, η ορθή διαχείριση της άρδευσης, ιδιαίτερα κατά τα στάδια της

ανθοφορίας και της αναπαραγωγής των φυτών, είναι εξίσου σημαντική για τη διασφάλιση της ποιότητας και απόδοσης των καλλιεργούμενων προϊόντων σε παγκόσμια κλίμακα (El-Noemani et al., 2015; da Conceição et al., 2018; Abebe et al., 2020; Campos et al., 2021). Η ανάδειξη ανθεκτικών ποικιλιών σε βιοτικούς ή μη βιοτικούς παράγοντες καταπόνησης, καθώς και η εφαρμογή ωφέλιμων μικροοργανισμών (βακτήρια, φύκη, μύκητες κ.α.) που βελτιώνουν την αποδοτικότητα χρήσης νερού και θρεπτικών στοιχείων των φυτών με μηδενικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο αποτελούν εξίσου βιώσιμες καλλιεργητικές πρακτικές για την επίτευξη καλλιεργητικών συστημάτων υψηλών αποδόσεων (Alvares et al., 2016; Rai et al., 2020). Παράλληλα, η εφαρμογή ωφέλιμων μικροοργανισμών (π.χ. *Trichoderma*, *Beauveria*, *Bacillus*, *Pseudomonas*) για τη διασφάλιση της προστασίας των φυτών έναντι φυσικών εχθρών, δύναται να περιορίσει την εφαρμογή χημικών εντομοκτόνων καθώς και τις επακόλουθες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται στην εκτεταμένη χρήση τους (Niu et al., 2020; Negi et al., 2021).

Οι εκτός εδάφους καλλιέργειες αποτελούν τα πιο σημαντικά υπό κάλυψη συστήματα καλλιέργειας, τόσο σε σύγχρονες όσο και σε πιο απλές-χαμηλού κόστους θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις. Το γεγονός αυτό έγκειται στην ικανότητα αυτών των συστημάτων να βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση και την ποιότητα των καλλιεργούμενων προϊόντων κυρίως μέσω του πλήρους ελέγχου των συνθηκών της ριζόσφαιρας των φυτών (Savvas & Gruda, 2018). Εξάλλου, οι νομοθετημένοι περιορισμοί στην εφαρμογή εδαφικών σκευασμάτων για την καταπολέμηση ασθενειών που μεταδίδονται στο έδαφος καθιστούν τα εκτός εδάφους καλλιεργητικά συστήματα ακόμη πιο σημαντικά για την επισιτιστική ασφάλεια.

Το φασόλι (*Phaseolus vulgaris* L.), ως ψυχανθές, εμπλουτίζει το έδαφος με άζωτο μέσω της ικανότητας του να αξιοποιεί το ατμοσφαιρικό άζωτο, η οποία αποδίδεται στη συμβίωση του φυτού με βακτήρια, γνωστά ως ριζόβια, τα οποία ανήκουν στο γένος *Rhizobium* (Pastor-Bueis et al., 2021). Η αζωτοδεσμευτική ικανότητα των ψυχανθών επηρεάζεται σημαντικά από το γονότυπο του φυτού ξενιστή και του ριζοβίου, τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και από τη διαθεσιμότητα του αζώτου στο έδαφος (Barros et al., 2018; Massa et al., 2020). Με δεδομένη τη χαμηλή αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φασολιού σε σύγκριση με άλλα καλλιεργούμενα ψυχανθή (σόγια, κουκί, βίγνα κ.α.) (Vasconcelos et al., 2020), η ανάδειξη ποικιλιών φασολιού που επιδεικνύουν υψηλή αζωτοδεσμευτική ικανότητα

είναι υψίστης σημασίας για τη μείωση της εξάρτησης του φασολιού σε εξωτερικές εισροές αζώτου χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση της καλλιέργειας.

Τόσο τα ξηρά σπέρματα όσο και οι νωποί λοβοί του φασολιού αποτελούν πλούσιες πηγές φυτικών πρωτεϊνών (Kocira et al., 2020b). Επιπλέον, τα φασόλι περιέχει σε υψηλή περιεκτικότητα πολλά απαραίτητα για τη διατροφή του ανθρώπου μέταλλα, βιταμίνες, φυτικές ίνες, αντιοξειδωτικά και πολυφαινόλες (Guzmán-Maldonado et al., 2000). Ωστόσο, αντιδιατροφικοί παράγοντες, όπως το φυτικό οξύ, λεκτίνες και σαπωνίνες εντοπίζονται στους νωπούς λοβούς και στα ξηρά σπέρματα του φασολιού (Celmeli et al., 2018).

Για πληρέστερη κατανόηση των αναγκών του φασολιού σε καλλιέργειες για παραγωγή νωπών λοβών, παράλληλα με τη διεξαγωγή των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε και μία συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα μίας βιβλιογραφικής ανασκόπησης η οποία αποσκοπεί στην απάντηση της παρακάτω ερώτησης: Ποιές καλλιεργητικές πρακτικές αυξάνουν την παραγωγή και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος στις καλλιέργειες του φασολιού? Για την απάντηση στο παραπάνω ερώτημα, το πρωτόκολλο βασίστηκε σε 4 στοιχεία, τον πληθυσμό, την παρέμβαση, τη σύγκριση και το αποτέλεσμα (PICO), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανασκόπηση των δημοσιευμένων ερευνών των τελευταίων 50 ετών (1971-2021). Η αξιολόγηση των ερευνών έγινε με βάση τον οδηγό PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis) (Ntatsi et al., 2020).

1.1. Μέθοδοι

1.1.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Κατά την εφαρμογή του πρωτοκόλλου, χρησιμοποιήθηκαν δύο βιβλιογραφικές βάσεις δεδομένων (ISI Web of Science™ και Scopus™) για τον εντοπισμό μελετών που σχετίζονται με τις αγρονομικές πρακτικές που αυξάνουν την απόδοση και την ποιότητα του φασολιού (*Phaseolus vulgaris* L.). Οι μελέτες έχουν δημοσιευθεί στα αγγλικά σε περιοδικά με κριτές κατά την περίοδο μεταξύ 1971 και 2021. Η αναζήτηση ακαδημαϊκών βάσεων δεδομένων πραγματοποιήθηκε στις 20 Νοεμβρίου 2021. Οι όροι αναζήτησης αναφέρονται στον Πίνακα 1.

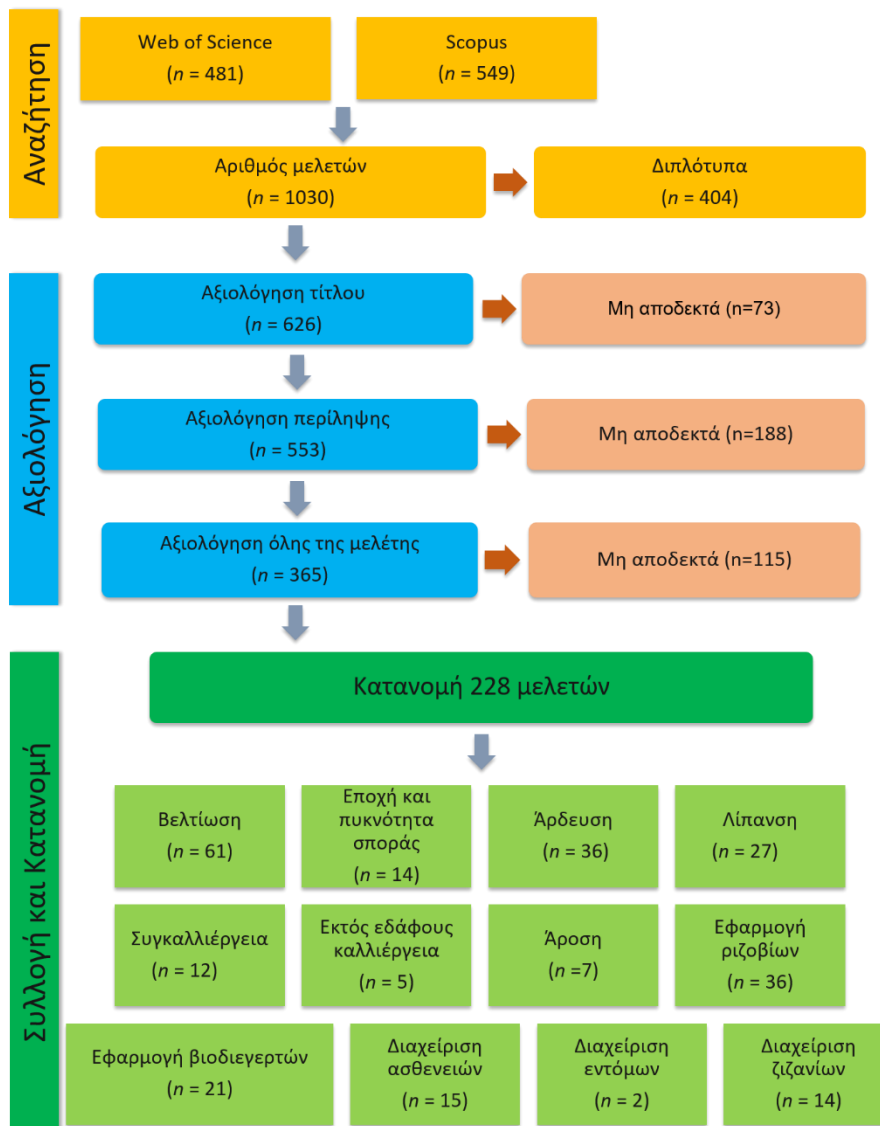
Πίνακας 1. Όροι αναζήτησης που εφαρμόστηκαν στις δύο βάσεις δεδομένων ως προς τις διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές. Το σύμβολο «*» χρησιμοποιήθηκε για τη συμπερίληψη των όρων αναζήτησης με διαφορετικές καταλήξεις

Καλλιεργητική Πρακτική	Όροι Αναζήτησης
Βελτίωση Φυτών	genetic * or genotype * or landrace * or breed *
Πυκνότητα & Εποχή Σποράς	sowing date or plant density or sowing rate or sowing season
Άρδευση	drought or water stress or deficit irrigation or irrigation or salinity or saline or salt stress or irrigation quality or water quality
Λίπανση	organic or conventional or fertilizer or inorganic or nutrition or nitrogen or potassium or phosphorus
Συγκαλλιέργεια	intercrop *
Καλλιέργεια Εκτός Εδάφους	hydroponic * or soilless or floating or nft or nutrient solution or vertical
Άροση	Till *
Εφαρμογή Ριζοβίων	rhizob *or inocul *
Εφαρμογή Βιοδιεγερτών	arbuscular mycorrhizal fungi or PGPR or azospirillum or plant growth-promot * or rhizobacteria or alga * or amino or biostimulant * or fulvi * or humi * or pgpb or bioferti *
Διαχείριση Ασθενειών	Fung * or biotic or virus or pathogen or bacter * or disease
Διαχείριση Φυσικών Εχθρών	Insect *or pest * or acari *
Διαχείριση ζιζανίων	Weed * or herbicide *

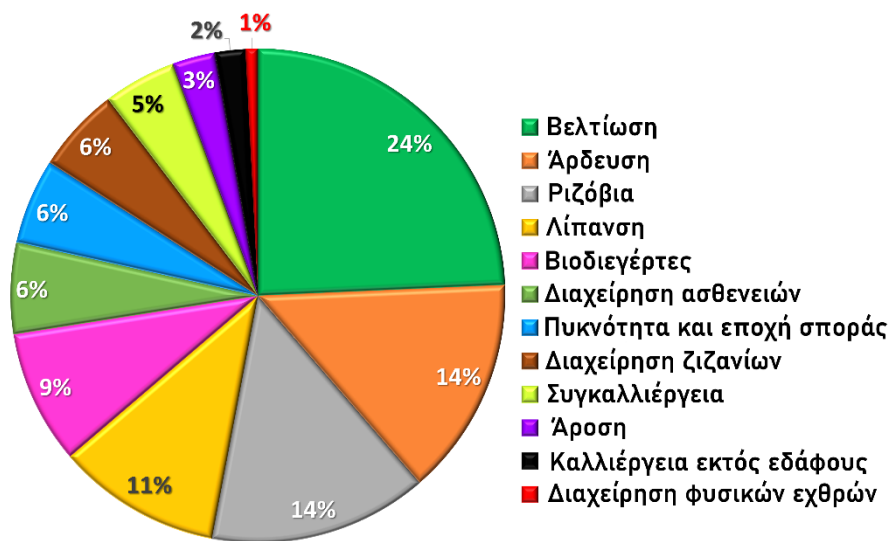
1.2. Αποτελέσματα Αναζήτησης

Η διαδικασία αναζήτησης περιγράφεται στο Γράφημα 1. Εντοπίστηκαν 1030 εργασίες, εκ των οποίων επιλέχθηκαν 250 προς ανάλυση. Επιπλέον, 21 εργασίες παραθέτουν δεδομένα για περισσότερες από μία καλλιεργητικές πρακτικές, επομένως το σύνολο των εργασιών για κάθε υπό μελέτη καλλιεργητική πρακτική (250) είναι μεγαλύτερο από το σύνολο των εργασιών που περιλαμβάνονται σε αυτή τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (228).

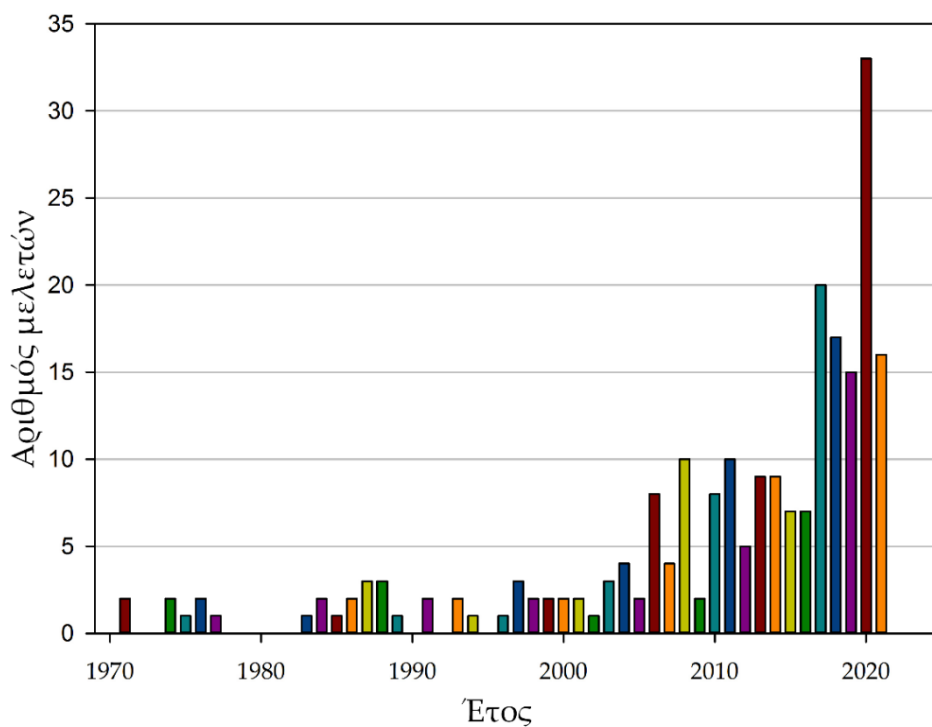
Δώδεκα διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές εντοπίστηκαν στις υπό μελέτη εργασίες: βελτίωση φυτών (61), πυκνότητα και εποχή σποράς (14), άρδευση (36), λίπανση (27), συγκαλλιέργεια (12), εκτός εδάφους καλλιέργεια (5), συστήματα άροσης (7), εφαρμογή ριζοβίων (36), εφαρμογή βιοδιεγερτών (21), διαχείριση ασθενειών (21), διαχείριση φυσικών εχθρών (2) και διαχείριση ζιζανίων (14). Ο αριθμός των επιλεγθέντων εργασιών ανά καλλιεργητική πρακτική παρουσιάζεται στο Γράφημα 1., ενώ τα ποσοστά των διαφορετικών πρακτικών που αναφέρονται στο σύνολο των επιλεγθέντων εργασιών αναφέρονται στο Γράφημα 2. Επιπλέον, 20 εργασίες μελέτησαν τον αντίκτυπο 2 καλλιεργητικών πρακτικών, ενώ 1 εργασία μελέτησε την επίδραση 3 καλλιεργητικών πρακτικών.



Γράφημα 1: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας διαλογής και επιλογής για την ένταξη των μελετών στην βιβλιογραφική ανασκόπηση. Όπου N υποδηλώνει τον αριθμό των μελετών για κάθε καλλιεργητική πρακτική. * Ορισμένες μελέτες ανέφεραν δεδομένα για περισσότερες από μία υπό μελέτη πρακτικές.



Γράφημα 2: Το ποσοστό (%) των μελετών των δώδεκα κύριων αγρονομικών πρακτικών που εντοπίστηκαν και συμπεριλήφθηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

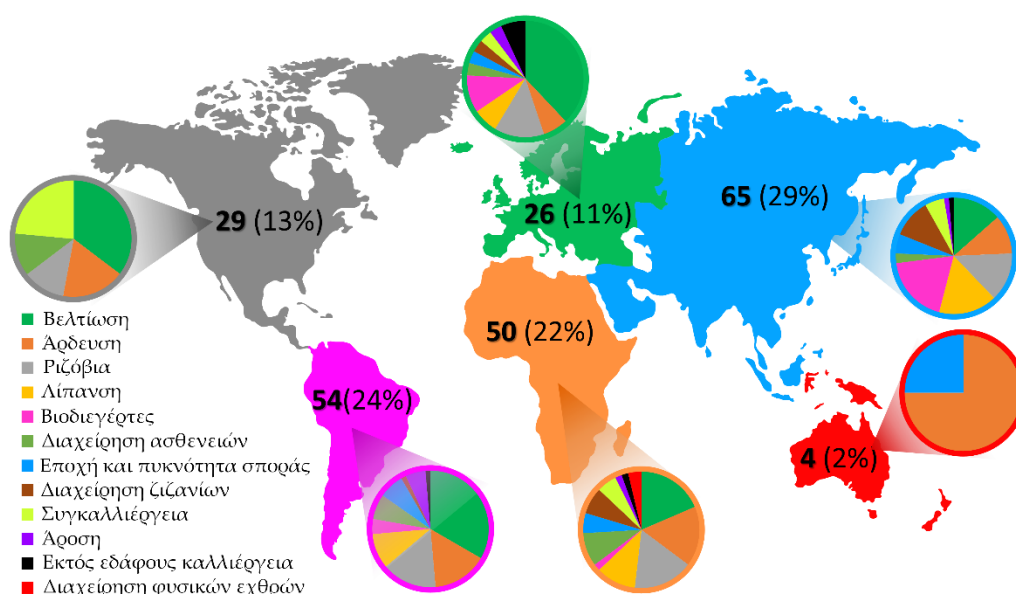


Γράφημα 3: Ετήσια παραγωγή επιστημονικών δημοσιεύσεων που περιλαμβάνονται στη συστηματική ανασκόπηση

1.2.1. Δημοσιευμένο ερευνητικό υλικό κατά τη διάρκεια του χρόνου

Η ετήσια δημοσίευση επιστημονικών εργασιών παρουσιάζεται στο Γράφημα 3, υποδηλώνοντας πως το ερευνητικό ενδιαφέρον για αυτή την καλλιέργεια του φασολιού παρουσιάζει αυξημένη δημοτικότητα κατά την τελευταία δεκαετία. Ειδικότερα, το 65% των ερευνητικών εργασιών που περιλαμβάνονται σε αυτήν την ανασκόπηση δημοσιεύθηκαν μεταξύ 2011 και 2021, φτάνοντας στο μέγιστο των 33 δημοσιεύσεων το 2020. Ωστόσο, η αύξηση των εκδόσεων ανοικτής πρόσβασης, που επιτρέπει την πρόοδο της επιστημονικής γνώσης, καθιστώντας την ελεύθερα προσβάσιμη σε όλους τους ενδιαφερόμενους, ενδεχομένως βοήθησε προς αυτή την κατεύθυνση.

1.2.2. Γεωγραφική κατανομή των εργασιών



Γράφημα 4: Παγκόσμιος χάρτης καταμερισμού των συλλεχθέντων εργασιών ανά ήπειρο. Το χρώμα σε κάθε δισκόγραμμα αντιπροσωπεύει το ποσοστό (%) των δημοσιεύσεων ερευνών για κάθε κατηγορία καλλιεργητικών πρακτικών. (Βασικός χάρτης: © Copyright Showeet.com, τελευταία πρόσβαση στις 22 Δεκεμβρίου 2021).

Περισσότερο δημοσιευμένο ερευνητικό υλικό εντοπίστηκε στην Ασία (65 έρευνες, 28,5%) και ακολουθούν η Νότια Αμερική (54 εργασίες, 23,7%), η Αφρική (50 εργασίες, 21,9%), η Ευρώπη (26 εργασίες, 11,4%) και η Ωκεανία (4 εργασίες, 1,8%) (Γράφημα 4). Η Ωκεανία προσέφερε τις λιγότερες εργασίες, ενώ 3 από τις 4 εργασίες σχετίζονται με τη διαχείριση της άρδευσης. Αντίστοιχα στην Ευρώπη και στη Βόρεια Αμερική η πιο δημοφιλής καλλιεργητική πρακτική προς μελέτη είναι η βελτίωση φυτών. Παράλληλα, συγκρίνοντας τις εργασίες που προέρχονται από διαφορετικές ηπείρους, έρευνες που σχετίζονται με τη λίπανση, την εφαρμογή βιοδιεγερτών και τη

διαχείριση ζιζανίων εντοπίζονται στην Ασία, ενώ οι έρευνες που εντοπίζονται στη Νότια Αμερική μελετούν κυρίως τον αντίκτυπο της βελτίωσης φυτών και της διαχείρισης των ασθενειών και των συστημάτων άρωσης. Αντίθετα με τη Νότια, στη Βόρεια Αμερική αρκετά δημοφιλές αντικείμενο έρευνας αποτελούν και τα συστήματα συγκαλλιέργειας του φασολιού. Τέλος, μελέτες που αφορούν την εκτός εδάφους καλλιέργεια του κοινού φασολιού εντοπίζονται κυρίως στην Ευρώπη.

1.3. Συζήτηση

1.3.1. Βελτίωση φυτών

Το φασόλι θεωρείται ένα αρκετά ποικιλόμορφο φυτό με διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάπτυξης, λοβών, σπόρων κλπ. (Dawo et al., 2007). Έτσι, η γενετική βελτίωση των φυτών μπορεί να εκμεταλλευτεί αυτή την πλούσια δεξαμενή γονιδίων για να αυξήσει την απόδοση αυτής της καλλιέργειας. Η Κεντρική Αμερική και οι Άνδεις αποτελούν δύο ξεχωριστές περιοχές προέλευσης του φασολιού (Okii et al., 2018). Η ανεξάρτητη και παράλληλη εξημέρωση οδήγησε σε χωριστές δεξαμενές γονιδίων (López-Pedrouso et al., 2014). Τα φασόλια με προέλευση από τις Άνδεις είναι λιγότερο παραγωγικά σε σύγκριση με τις μεσοαμερικανικές ποικιλίες όταν καλλιεργούνται σε ζεστά ή τροπικά περιβάλλοντα (Dawo et al., 2007). Ωστόσο, μία σημαντική αύξηση της απόδοσης θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω διασταυρώσεων μεταξύ των δύο γονιδιακών δεξαμενών (Singh et al., 1991). Η απόδοση του φασολιού χαρακτηρίζεται κυρίως από τον αριθμό λοβών ανά φυτό, τον αριθμό σπερμάτων ανά λοβό καθώς και το συνολικό βάρος των ξηρών σπερμάτων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά παραγωγής θα πρέπει να μεγιστοποιηθούν για βέλτιστες αποδόσεις. Για τη βελτίωση των φασολιών, τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά για υψηλή απόδοση είναι ο αριθμός των λοβών ή/και οι σπόροι ανά λοβό, ενώ ακολουθεί η ανοχή των φυτών σε διάφορους παράγοντες καταπόνησης. Επομένως, τα προγράμματα βελτίωσης στοχεύουν στον εντοπισμό γονιδίων που προάγουν την απόδοση και τον συνδυασμό τους με εκείνα που διέπουν την ανοχή σε διαφορετικές περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Επιπλέον, οι Corte et al. (2010) μελέτησαν τις συσχετίσεις των μορφολογικών χαρακτηριστικών των σπερμάτων (μήκος, πλάτος, πάχος) με την απόδοση και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υψηλότερη απόδοση ξηρών σπερμάτων επιτεύχθηκε από την καλλιέργεια μικρόσπερμων ποικιλιών.

Τα προγράμματα βελτίωσης φυτών αρχικώς αξιολογούν τις ήδη υπάρχουσες δεξαμενές για τη δημιουργία μίας βάσης γονιδίων που σχετίζονται με υψηλές αποδόσεις ή/και ανοχή σε διάφορες ασθένειες. Έχει πραγματοποιηθεί εκτενής αξιολόγηση γενετικών πόρων η οποία αποσκοπεί στη συλλογή γενετικού υλικού για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων και ανεκτικότητας του φυτού του φασολιού σε παράγοντες καταπόνησης (Trutmann & Pyndji, 1994; Atuahene-Amankwa & Michaels, 1997; Mekbib 2003; Bezaweletaw et al., 2006; Poletine et al. 2014; Silva et al., 2016; Kargiotidou et al., 2019; Katuuramu et al., 2020; Salegua et al., 2020; Baldin et al.,

2021; Fetahu et al., 2021; Junior et al., 2021). Με βάση τις παραπάνω αξιολογήσεις, παρατηρήθηκε μία αρνητική συσχέτιση μεταξύ του αριθμού των λοβών του κοινού φασολιού και των απαιτούμενων ημερών για ανθοφορία (Okii et al., 2018). Ταυτόχρονα, άλλες έρευνες αναφέρουν πως η συνολική παραγωγή νωπών λοβών ανά φυτό σχετίζεται θετικά με τον αριθμό των λοβών ανά φυτό, καθώς και με τον αριθμό των ανθέων ανά ταξιανθία, το ύψος των φυτών, τον αριθμό των φύλλων ανά φυτό και τη συνολική φυλλική επιφάνεια (Gómez & Frankow, 2005; Lyngdoh et al., 2018). Σύμφωνα με τους Zilio et al. (2013), αύξηση της παραγωγής του φασολιού μπορεί να επιτευχθεί με τη συντόμευση του βιολογικού κύκλου του φυτού. Τα παραπάνω ευρήματα είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τη μελλοντική ανάπτυξη ποικιλιών καθώς και τη συλλογή παραγωγικών σειρών φασολιού. Επιπλέον, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του γονοτύπου και του περιβάλλοντος έχουν εξίσου μελετηθεί εκτενώς για την ανάδειξη ποικιλιών με υψηλή προσαρμοστικότητα και ως εκ τούτου σταθερές αποδόσεις (Hamblin, 1975; Escribano & Santalla, 1997; Nimbalkar et al., 2004; Pereira et al., 2017; Nicoletto et al., 2019; Dias et al., 2021). Επιπρόσθετα, οι Bulyaba et al. (2020) παρατήρησαν πως η παραγωγή ξηρών σπερμάτων επηρεάζεται σημαντικά από την αλληλεπίδραση της περιοχής εγκατάστασης καλλιέργειας και τον καλλιεργούμενο γονότυπο, ενώ οι Nicoletto et al. (2019) διαπίστωσαν μία θετική επίδραση του υψομέτρου στην ποιότητα του φασολιού, η οποία εξαρτάται σημαντικά από την καλλιεργούμενη ποικιλία. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Meena et al. (2017), η καλλιέργεια του φασολιού υπό κάλυψη θα μπορούσε να περιορίσει τις επιπτώσεις των δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών στην παραγωγή και ποιότητα του φασολιού.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε 17 μελέτες από ερευνητικά ινστιτούτα της Βραζιλίας, χώρα που αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή και τον τρίτο μεγαλύτερο παραγωγό φασολιού παγκοσμίως (Silva et al., 2016). Στην Βραζιλία, οι στρατηγικές βελτίωσης φυτών για την ανάδειξη παραγωγικών ποικιλιών οδήγησαν σε σημαντική αύξηση της ετήσιας παραγωγής κατά 0,7% (Alvares et al., 2016) ή μία μέση αύξηση κατά 3,78 κιλά ανά στρέμμα (Ribeiro et al., 2008). Πρόσφατα οι Zeffa et al. (2020) ανέδειξαν στρατηγικές βελτίωσης για την αύξηση της παραγωγής ξηρών σπερμάτων φασολιού με αποδοτικότερη χρήση αζώτου μειώνοντας σημαντικά την εξάρτηση του φυτού σε εξωτερικές εισροές. Πέρα από τη Βραζιλία, αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον για τη βελτίωση του φασολιού εντοπίζεται και στις ΗΠΑ (Nienhuis et al., 1988; Kelly et al., 1998; Bulyaba et al., 2020; Katuuramu et al., 2020), ενώ στην Τουρκία έχει παρατηρηθεί αύξηση της ετήσιας παραγωγής μέσω της

δημιουργίας ανθεκτικών ποικιλιών σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες (Aycicek, 2013a, 2013b; Sozen et al. 2018; Boylu & Girgel, 2021). Επιπλέον, 365 γονότυποι και παραδοσιακές ποικιλίες που προέρχονται από την Αφρική έχουν επίσης αξιολογηθεί, φανερώνοντας μία υψηλή γενετική ποικιλομορφία σχετικά με τα χαρακτηριστικά παραγωγής και διατροφικής αξίας του φασολιού (Blair et al., 2010; Ndlangamandla & Ntuli, 2019). Στην Ελλάδα, οι ποικιλίες Λήδα και Μυρσίνη αναδείχθηκαν ως ανώτεροι γονότυποι λόγω της σταθερά υψηλής απόδοσης και ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος, ενώ η παραπάνω αξιολόγηση ανέδειξε τον αριθμό των λοβών ανά φυτό ως ένα έμμεσο κριτήριο επιλογής γονοτύπων υψηλών αποδόσεων (Kargiotidou et al., 2018). Περαιτέρω κριτήρια συλλογής μπορούν να θεωρηθούν επίσης η συγκέντρωση του υπέργειου τμήματος του φυτού σε άζωτο καθώς και ο αριθμός των φυματίων (Golparvar, 2006, 2008). Αξίζει να σημειωθεί πως χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις προτιμήσεις των καταναλωτών, όπως η ικανότητα ενυδάτωσης, ο χρόνος μαγειρέματος, το σχήμα, το μέγεθος και το ποσοστό του περιβλήματος του σπέρματος είναι απαραίτητο να λαμβάνονται εξίσου υπόψη (de Steckling et al. 2017; De Oliveira Silva et al., 2019). Συνδυασμοί υψηλών αποδόσεων μπορούν επίσης να εντοπιστούν χρησιμοποιώντας είτε πιο παραδοσιακές μεθόδους διασταύρωσης (Nienhuis & Singh, 1988; Ojwang et al., 2011; Di Prado et al., 2019; Nkhata et al., 2021), είτε με μοριακούς δείκτες (Lioi & Piergiovanni, 2013; Poletine et al., 2014; Wu et al., 2020) είτε ακόμα και φασματοσκοπία εγγύς υπερύθρου (NIRS) (Plans et al., 2012). Επιπρόσθετα, μοριακοί δείκτες χρησιμοποιήθηκαν και στη μελέτη των Raatz et al. (2019) όπου χαρακτηρίστηκαν 708 γονότυποι φασολιού μέσω του μονονουκλεοτιδικού πολυμορφισμού. Η ανάπτυξη τέτοιων δεδομένων αποτελεί σημαντικό ερευνητικό οδηγό αναφοράς και μπορεί να επιταχύνει και να αυξήσει την αποδοτικότητα των προγραμμάτων βελτίωσης των φυτών.

1.3.2. Πυκνότητα και εποχή σποράς

Η πυκνότητα σποράς αποτελεί ένα παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και την ποιότητα του φασολιού. Υψηλές πυκνότητες σποράς αυξάνουν την παραγωγή ξηρών σπερμάτων λόγω των κλάδων που αναπτύσσονται στα κατώτερα μέρη του φυτού. Δεδομένου πως η φωτοσύνθεση καθορίζει σημαντικά τον αριθμό των λοβών ανά φυτό, η πυκνότητα σποράς των 28,8 φυτών m⁻² θεωρείται ιδανική κατά τους Immer et al. (1977) για τη μέγιστη αξιοποίηση του φωτός κατά την έναρξη της ανθοφορίας. Ωστόσο, το γενετικό δυναμικό για την έκπτυξη των λοβών μπορεί να

κατασταλεί από τον ανταγωνισμό των φυτών για χώρο και θρεπτικά στοιχεία που οφείλονται σε υψηλές πυκνότητες σποράς (Chung & Goulden, 1971). Στην εργασία των Musana et al. (2020), πυκνότητες σποράς άνω των 30 φυτών m⁻² επέδρασαν αρνητικά στην παραγωγή ξηρών σπερμάτων. Παρόμοια ευρήματα εντοπίστηκαν και στις εργασίες των Babaeian (2012) και Kouam & Tsague-Zanfack (2020), όπου υψηλές πυκνότητες σποράς είχαν αρνητικό αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά παραγωγής και συνεπώς στη συνολική απόδοση της καλλιέργειας σε ξηρά σπέρματα. Ωστόσο, η απόκριση του φασολιού στην πυκνότητα σποράς εξαρτάται από την ποικιλία και σχετίζεται στενά με την κατανομή της ξηράς ουσίας στα διαφορετικά όργανα του φυτού, τον ρυθμό ανάπτυξης, την αποτελεσματικότητα χρήσης φωτός και τον συντελεστή παραγωγής (συνολική ξηρή παραγωγή / ξηρή βιομάζα) (Baez-Gonzalez et al., 2020). Σε αντίθεση με την παραγωγή, η διατροφική αξία των ξηρών σπερμάτων δεν επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα σποράς (Asemanrafat & Honar, 2017; Soratto & Catuchi, 2017). Ωστόσο, η συγκέντρωση των νωπών λοβών σε πρωτεΐνες, άζωτο, φώσφορο και κάλιο αυξάνει με την εφαρμογή μικρότερων πυκνοτήτων σποράς (Abubaker, 2018).

Η πυκνότητα σποράς δύναται να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του φασολιού εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν κατά τα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης του φυτού, όπως αυτό της ανθοφορίας και της παραγωγής. Για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων εαρινής-θερινής καλλιέργειας φασολιού, η κατάλληλη περίοδος σποράς είναι το πρώτο δεκαπενθήμερο του Μαΐου (Scarisbrick et al., 1976; Balkaya & Odabaş, 2007; Catuchi et al., 2019), καθώς η καθυστερημένη εγκατάσταση της καλλιέργειας κατά τους εαρινούς μήνες οδηγεί σε σημαντική μείωση της παραγωγής. Στη μελέτη του Babaeian (2012), σημαντική αύξηση παραγωγής ξηρών σπερμάτων (9,17%) επιτεύχθηκε όταν η καλλιέργεια εγκαταστάθηκε στις 2 Ιουνίου έναντι αυτής στις 14 Ιουνίου. Το εύρημα αυτό μπορεί να αποδίδεται στο γεγονός πως υψηλές θερμοκρασίες κατά τη νύχτα ή/και τη μέρα φέρουν δυσμενή αντίκτυπο στον σχηματισμό τόσο των ανθέων όσο και των λοβών του φασολιού (Catuchi et al., 2019). Για τη φθινοπωρινή-χειμερινή καλλιέργεια φασολιού, η οποία μπορεί να εγκατασταθεί σε τροπικά κλίματα, η ιδανική εποχή σποράς είναι στα μέσα Οκτωβρίου (Ishag & Ayoub, 1974).

1.3.3. Άρδευση

Η ελλειμματική άρδευση φέρει σημαντικό αρνητικό αντίκτυπο τόσο στην απόδοση όσο και στην ποιότητα του φασολιού, είτε αυτό καλλιεργείται για τους νωπούς λοβούς ή για τα ξηρά σπέρματά του (Πίνακας 2). Τα μη αρδευόμενα συστήματα καλλιέργειας, τα οποία απαντώνται κυρίως σε τροπικά κλίματα, είναι υπεύθυνα για την έως και 50% μειωμένη απόδοση της καλλιέργειας (Acosta-Gallegos & Adams, 1991; Assefa et al., 2014; Polania et al., 2016; Smith et al., 2019). Επιπλέον, οι επιπτώσεις της ελλειμματικής άρδευσης έχουν αναφερθεί σε πλήθος εργασιών, όπου η υδατική καταπόνηση της καλλιέργειας περιόρισε σημαντικά τα χαρακτηριστικά καθώς και τη συνολική παραγωγή ξηρών σπερμάτων (Rosales-Serna et al., 2004; Bourgault et al., 2013; Parmar et al., 2016; Asemanrafat & Honar, 2017; Nouralinezhad et al., 2018; do Silva et al., 2020; Rai et al., 2020). Παράλληλα, η υδατική καταπόνηση, η οποία οφείλεται σε απώλειες εδαφικών αποθεμάτων νερού μέσω εξάτμισης ή εξατμισοδιαπνοής, είναι εξίσου επιβλαβής στην παραγωγή τόσο των νωπών λοβών (El-Noemani et al., 2015; Abebe et al., 2020) όσο και των ξηρών σπερμάτων (Ghassemi-Golezani & Mardfar, 2008; da Conceição et al., 2018). Αρνητικές επιδράσεις παρατεταμένης ξηρασίας καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο στην παραγωγή του φασολιού, αναφέρονται και στις εργασίες των Daraah et al. (1999, 2000) and Love et al. (1988). Ωστόσο, εκτεταμένη παροχή νερού, σε αρκετά υψηλότερα επίπεδα από αυτά που απαιτεί η καλλιέργεια, μπορεί επίσης να είναι επιβλαβής για την απόδοση της (Rai et al., 2020), ενώ συνδράμει και στην ανάπτυξη διαφόρων μυκητολογικών ασθενειών που ευνοούνται από τα υψηλά επίπεδα υγρασίας, όπως η τεφρά σήψη (Efetha et al., 2010).

Εκτός από τη συνολική ποσότητα άρδευσης, η συχνότητα άρδευσης παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην απόδοση της καλλιέργειας, καθώς η αύξηση της συχνότητας συνδέεται άμεσα με την αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού και έμμεσα με την αύξηση της παραγωγής (Lizana et al., 2006; Kundu et al., 2008; Ibrahim et al., 2017). Ειδικότερα, η υψηλή συχνότητα και χαμηλή δόση άρδευσης διασφαλίζει τα επιθυμητά εδαφικά επίπεδα υγρασίας (60%) ωφελώντας σημαντικά την απόδοση της καλλιέργειας (Efetha et al., 2010). Επιπλέον, οι Hosseini & Shahrokhnia (2020) πρότειναν την παροχή νερού ανά 8 ημέρες ως ιδανική συχνότητα άρδευσης, καθώς περαιτέρω μείωση της συχνότητας δεν ωφέλησε την παραγωγή, και ως εκ τούτου μείωσε σημαντικά την αποδοτικότητα χρήσης νερού της καλλιέργειας. Παράλληλα, οι

Okasha et al. (2020) παρατήρησαν πως η παροχή νερού κάθε 5 ημέρες είχε αρνητικό αντίκτυπο στον αριθμό των παραγόμενων λοβών ανά φυτό. Ωστόσο, η ιδανική συχνότητα και δόση άρδευσης θα πρέπει να απορρέει και να ειδικεύεται με βάση τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες, τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους, την καλλιεργούμενη ποικιλία και την ποιότητα του νερού προς άρδευση.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω μελέτες, όπου αξιολογήθηκαν διαφορετικές μεταχειρίσεις άρδευσης καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο, ερευνητικό ενδιαφέρον έχει επίσης δοθεί στις αποκρίσεις του φυτού της φασολιάς υπό υδατική καταπόνηση κατά τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης του φυτού. Σύμφωνα με τους Boutraa & Sanders (2001), González de Mejía et al. (2003), Santos et al. (2004) και Mathobo et al. (2017), η υδατική καταπόνηση κατά τα στάδια της ανθοφορίας και παραγωγής είναι πιο επιζήμια στην απόδοση του φυτού σε σχέση με τα αρχικά στάδια βλαστικής ανάπτυξης. Επιπλέον, οι Mouhouche et al. (1998) θεώρησαν το στάδιο της ανθοφορίας ως το πιο ευαίσθητο σε σχέση με αυτά του γεμίσματος και ωρίμανσης των σπερμάτων στην ελλειμματική άρδευση, εφόσον οδήγησε σε σημαντικούς περιορισμούς στην παραγωγή ξηρών σπερμάτων ως αποτέλεσμα του μειωμένου αριθμού των λοβών ανά φυτό όσο και των σπερμάτων ανά λοβό αντίστοιχα. Αντίθετα, στη μελέτη των Acosta Gallegos & Kohashi Shibata (1989), η ελλειμματική άρδευση κατά τα βλαστικά στάδια ανάπτυξης του φυτού μείωσε τον αριθμό των λοβών ανά φυτό, ενώ η περαιτέρω εφαρμογή της καταπόνησης κατά το στάδιο της αναπαραγωγής οδήγησε σε επιπλέον απώλειες παραγωγής μέσω της μείωσης του μεγέθους των παραγόμενων σπερμάτων. Ωστόσο, η μειωμένη παροχή νερού μόνο κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης των φυτών δεν φαίνεται να επηρεάζει την απόδοση της καλλιέργειας του φασολιού για την παραγωγή ξηρών σπερμάτων (Peña-Cabriales & Castellanos, 1993; Simsek et al., 2011).

Πίνακας 2: Επίδραση διαφορετικών επεμβάσεων υδατικής καταπόνησης στην παραγωγή νωπών λοβών, ξηρών σπερμάτων, συγκέντρωση λοβού σε άζωτο (N(%)), στον αριθμό σπερμάτων ανά λοβό καθώς και στο μέσο βάρος 100 σπερμάτων. Το MA δηλώνει μη αξιολογούμενη παράμετρο. Τα ↓ και ↑ δηλώνουν αρνητική και θετική επίδραση στην υπό μελέτη παράμετρο ενώ το – δηλώνει καμία επίδραση.

Επεμβάσεις	Χαρακτηριστικά Παραγωγής					Αναφορές	
	Νωποί Λοβοί	Σπέρματα	Αριθμός Λοβών	Σπέρματα / Λοβό	Βάρος Σπερμάτων		
Μη-αρδευόμενα	MA	↓	MA	MA	MA	Smith et al., 2019	
	MA	↓	MA	MA	MA	Polania et al., 2016	
	MA	↓	↓	↓	↓	Assefa et al., 2014	
	MA	↓	MA	MA	MA	Acosta-Gallegos et al., 1991	
Παροχή άρδευσης	Ελλειμματική	MA	↓	MA	MA	↓	Do Silva et al., 2020
		MA	↓	MA	MA	↓	Nouralinezhad et al., 2018
		MA	↓	MA	MA	MA	Bourgault et al., 2013
		MA	↓	↓	↓	↓	Rai et al., 2020
		MA	↓	↓	↓	↓	Asemanrafat et al., 2017
		MA	↓	MA	MA	MA	Parmar et al., 2016
		MA	↓	MA	MA	MA	Rosales-Serna et al., 2004
		MA	↓	↓	MA	MA	da Conceição et al., 2018
Αυξημένη εξάτμιση	MA	↓	↓	—	—	Ghassemi-Golezani et al., 2004	
	MA	—	—	↓	↓	Campos et al., 2021	

		↓	MA	MA	MA	MA	Abebe et al., 2020
	Μειωμένη εδαφική υγρασία	↓	MA	↓	MA	MA	El-Noemani et al., 2015
	Ανθοφορία	MA	↓	↓	MA	MA	Guida Dos Santos et al., 2004
	Ανθοφορία/ Γέμισμα σπόρου	MA	↓↓	↓↓	—	—	González De Mejía et al., 2003
		MA	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	Mathobo et al., 2017
Καταπόνηση ανά στάδιο ανάπτυξης	Ανάπτυξη λοβού	MA	↓	↓	MA	MA	Mouhouche et al.,
	Παραγωγή	MA	↓	MA	MA	MA	González De Mejía et al., 2003
	Βλαστικό/ Παραγωγή	-/↓	MA	-/↓	-/↓	MA	Simsek et al., 2011
		MA	-/↓	MA	MA	MA	Peña-Cabriales et al., 1993
	Βλαστικό/ Ανθοφορία/ Παραγωγή	MA	↓↓/↓	↓↓/↓	-/↓↓	-/-/↓	Acosta Gallegos et al., 1989
Συχνότητα	5, 7, 9 H	MA	↓ (9H)	↑ (7H)	↓ (9H)	↓ (9d)	Okasha et al., 2020
	6, 12, 18 H	MA	↓ (H > 6)	↓ (H > 6)	↓ (H > 6)	↓ (dH > 6)	Ibrahim et al., 2017
	4, 8, 12 H	MA	↓ (12H)	↓(12H)	↓ (12H)	—	Hosseini et al., 2020
	7, 14 H	MA	↓	↓	↓	—	Lizana et al., 2006

Σε αντίθεση με τις αποδόσεις της καλλιέργειας του φασολιού, η μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών μεταχειρίσεων άρδευσης στην ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος δεν είναι επαρκώς εμπειριστατωμένη. Κατά τους Smith et al. (2019), η περιορισμένη παροχή νερού στα μη αρδευόμενα συστήματα καλλιέργειας συνδέεται με την αύξηση των συγκεντρώσεων του αζώτου, των αμινοξέων και των σακχάρων στα ξηρά σπέρματα. Ωστόσο, στη μελέτη των Silva et al. (2020) η ελλειμματική άρδευση είχε αρνητικό αντίκτυπο στην ποιότητα των ξηρών σπερμάτων αφού παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στη συγκέντρωσή τους σε μικροστοιχεία, λιπίδια και υδατάνθρακες. Επιπλέον, η συγκέντρωση ολικών πρωτεϊνών στα ξηρά σπέρματα φαίνεται να ωφελείται από την υδατική καταπόνηση (González De Mejía et al., 2003; Asemanrafat & Honar, 2017; do Silva et al. 2020). Οι Silva et al. (2020) αποδίδουν την αύξηση είτε του αζώτου είτε μορίων με αυξημένη συγκέντρωση αζώτου (πρωτεΐνες, αμινοξέα κ.α.) στη συσσώρευση του αζώτου στα σπέρματα καθώς η υδατική καταπόνηση δεν επηρεάζει την κατανομή του αζώτου στα διαφορετικά όργανα του φυτού. Παράλληλα, οι González de Mejía et al. (2003) απέδωσαν την αυξημένη περιεκτικότητα πρωτεϊνών στην αυξημένη σύνθεση πρωτεϊνών ανθεκτικών στην ξηρασία. Αντίθετα, οι Parmar et al. (2016) υποστήριξαν πως η καλύτερη αξιοποίηση και πρόσληψη του αζώτου, και επομένως αυξημένη συγκέντρωση πρωτεϊνών, επιτυγχάνεται σε συνθήκες επάρκειας παρά έλλειψης άρδευσης.

Παρόμοιες επιδράσεις με την έλλειψη άρδευσης φέρει και η υψηλή εδαφική αλατότητα καθώς και οι δύο καταπονήσεις επηρεάζουν αρνητικά το ωσμωτικό δυναμικό του φυτού και ως εκ τούτου τις αποδόσεις της καλλιέργειας λόγω της δραστηκής μείωσης των παραγόμενων λοβών (Rady, 2014; Kontopoulou et al., 2015a; Desoky et al., 2019) παρά την αυξημένη συγκέντρωσή τους σε πρωτεΐνες και αντιοξειδωτικά (Desoky et al., 2019).

1.3.4. Λίπανση

Υψηλές εισροές αζώτου διασφαλίζουν τις υψηλές αποδόσεις της καλλιέργειας του φασολιού λόγω της χαμηλής ικανότητας του φυτού να δεσμεύσει ατμοσφαιρικό άζωτο. Η απόδοση της καλλιέργειας φέρεται να επηρεάζεται αρνητικά σε βιολογικά συστήματα θρέψης (Rady, 2014; Kontopoulou et al., 2015a; Santosa et al., 2017), όπου η διαθεσιμότητα του αζώτου στο έδαφος είναι ιδιαίτερα απαιτητική καθώς ο ρυθμός

ανοργανοποίησης της οργανικής ουσίας εξαρτάται σημαντικά από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους. Ωστόσο, στις μελέτες των Magalhaes et al. (1971), Karunji et al. (2006) και Uyanoz (2007) δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις στην απόδοση της καλλιέργειας σε βιολογικά και συμβατικά σχήματα θρέψης. Σύμφωνα με τους Karunji et al. (2006), αποκλίσεις στις αποδόσεις των 2 παραπάνω συστημάτων αναμένονται σε βάθος χρόνου, καθώς το βιολογικό σχήμα θρέψης ήταν υπεύθυνο για την μείωση της παραγωγής κατά το 2^ο και 3^ο έτος διαδοχικής καλλιέργειας φασολιού. Επομένως, οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την ανάδειξη του κατάλληλου σχήματος θρέψης στα βιολογικά συστήματα καλλιέργειας. Τα διαφορετικά σχήματα θρέψης μπορεί να μην έχουν αντίκτυπο στην απόδοση του φασολιού όταν η καλλιέργεια εγκαθίσταται σε αρκετά εύφορο έδαφος (Magalhaes et al., 1971). Επιπλέον, πρακτικές λίπανσης που συνεισφέρουν είτε στην πιο ελεγχόμενη απελευθέρωση του αζώτου είτε στον περιορισμό της έκπλυσής του, θεωρούνται ως πιο βιώσιμες και ταυτόχρονα τονωτικές για την αποδοτικότερη διαχείριση της θρέψης των φυτών. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση του 75% των ολικών ανόργανων εισροών αζώτου με οργανικές, χρησιμοποιώντας ζωική κοπριά, αύξησε σημαντικά την απόδοση της καλλιέργειας λόγω των ευεργετικών επιδράσεων της κοπριάς στην ανάπτυξη των φυτών καθώς και στην ανάπτυξη των ριζών (Prabhakar et al., 2011). Παράλληλα, οι Fernández-Luqueño et al. (2010) υποστήριξαν πως η αντικατάσταση της ουρίας με βιομηχανικά οργανικά υπολείμματα οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής κατά 37,8%, η οποία αποδίδεται στη βελτίωση τόσο των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του εδάφους όσο και της διαθεσιμότητας θρεπτικών στοιχείων. Επιπλέον, πέρα από τις ευεργετικές ιδιότητες των οργανικών λιπασμάτων ως εδαφοβελτιωτικά μέσα, η βιολογική μεταχείριση του εδάφους οδηγεί έμμεσα στην αύξηση της απόδοσης της καλλιέργειας μέσω της παρεμπόδισης της έκπτυξης και περαιτέρω ανάπτυξης των ζιζανίων (Etmiani et al., 2021). Τέλος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον αντίκτυπο των διαφορετικών πρακτικών θρέψης, καθώς στη μελέτη των Kawaka et al. (2018) η καλλιέργεια φασολιού αποκρίθηκε διαφορετικώς, ως προς την απόδοσή της σε βιολογικά και συμβατικά συστήματα καλλιέργειας, υπό συνθήκες βραχέων και παρατεταμένων βροχοπτώσεων.

Σχήματα θρέψης τα οποία αποτελούν συνδυασμούς οργανικών και ανόργανων λιπασμάτων θεωρούνται πλέον πιο κατάλληλα για την επίτευξη καλλιεργητικών συστημάτων υψηλών αποδόσεων με μειωμένο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ειδικότερα,

στη μελέτη των Kumar et al. (2020a), η εφαρμογή ενός οργανικού-ανόργανου (1:3) σχήματος θρέψης, χρησιμοποιώντας ζωική κοπριά, δεν περιόρισε την παραγωγή του φασολιού έναντι αυτού που τροφοδοτήθηκε αποκλειστικά με ανόργανο σχήμα θρέψης, ενώ η επιπρόσθετη εφαρμογή, και όχι αντικατάσταση, ζωικής κοπριάς σε ένα ανόργανο σχήμα θρέψης αύξησε την απόδοση της καλλιέργειας κατά 30%. Παρόμοια, στην εργασία των Sharma et al. (2018), ο συνδυασμός vermicompost (κομποστοποιημένα οργανικά υπολείμματα με τη χρήση γαιοσκωλήκων) και ανόργανων λιπασμάτων οδήγησε σε οικονομία αζώτου κατά 25% χωρίς να επηρεαστεί η απόδοση της καλλιέργειας. Άλλα μίγματα, φιλικά προς το περιβάλλον, τα οποία είτε δεν περιορίζουν, είτε αυξάνουν την απόδοση της καλλιέργειας είναι και τα NPK + vermicompost + φυτικά υπολείμματα (Singh et al., 2011) ή χαμηλές εισροές P + κοπριά + βιοδιεγέρτες (Zafar et al., 2011; Rurangwa et al., 2018). Επιπλέον, οι Saikia et al. (2018) ανέφεραν θετικές επιδράσεις με την προσθήκη μικροοργανισμών του γένους *Rhizobium*, *Azotobacter* και *Azospirillum* σε μίγματα θρέψης που αποδίδονται κυρίως στην αύξηση μικροβιακών και ενζυμικών δραστηριοτήτων στο έδαφος. Επιπρόσθετα, η προσθήκη επεξεργασμένων λιπασμάτων οργανικής προέλευσης μεταλλικών στοιχείων σε συνδυασμό με ανόργανες εισροές αζώτου που καλύπτουν το 50% των αναγκών της καλλιέργειας αύξησε σημαντικά την παραγωγή στην εργασία των Da Silva et al. (2019). Οργανικά βιομηχανικά απόβλητα χημικών αντιδραστήρων (π.χ. αναερόβια λάσπη) προάγουν επίσης την απόδοση της καλλιέργειας υπό συνθήκες ελλειμματικής παροχής ανόργανου αζώτου (Musse et al., 2020). Τέλος, φυτικά υπολείμματα συγκαλλιέργειας αραβοσίτου με αυτοφυή είδη του γένους *Crotalaria* αυξάνουν τόσο την παραγωγή ξηρών σπερμάτων όσο και την περιεκτικότητά τους σε πρωτεΐνες, ωστόσο η απόδοση του συστήματος αυξάνει κάτω από μειωμένη παροχή αζώτου (D'Amico-Damião et al., 2020). Τα παραπάνω σύνθετα σχήματα θρέψης λαμβάνονται υπόψη ως βιώσιμες πρακτικές λίπανσης χαμηλού κόστους που είτε διασφαλίζουν είτε βελτιώνουν την απόδοση της καλλιέργειας του φασολιού.

Σχετικά με τη διαχείριση του αζώτου στα συμβατικά σχήματα θρέψης φυτών, σύμφωνα με τη μελέτη των Patel et al. (2010), η εφαρμογή του 50% της αζωτούχου λίπανσης κατά τη βασική λίπανση και η υπολειπόμενη εφαρμογή της κατά το στάδιο της μέγιστης βλαστικής ανάπτυξης ωφελεί την οικονομική απόδοση της καλλιέργειας. Θετικές επιδράσεις της επιφανειακής λίπανσης στην παραγωγή, έναντι της εξ ολοκλήρου κάλυψης αναγκών των φυτών κατά τη βασική λίπανση, αναφέρονται και στη μελέτη των Garcia et al. (2020). Σύμφωνα με τους Suárez et al. (2021), η απόκριση

του φασολιού στην αζωτούχο λίπανση επηρεάζεται σημαντικά από τον καλλιεργούμενο γονότυπο και συνδέεται άμεσα με τη φωτοσυνθετική αποδοτικότητα χρήσης αζώτου και την ικανότητα του φυτού να κατανέμει τα φωτοσυνθετικά προϊόντα στα παραγόμενα σπέρματά του. Ωστόσο, η εφαρμογή εξωτερικών εισροών αζώτου δύναται να μην ωφελήσουν την παραγωγή, όταν η καλλιέργεια εγκαθίσταται σε έδαφος με επαρκή για τα φυτά επίπεδα διαθέσιμου αζώτου (Nascente et al., 2017). Επιπλέον οι Onacikli et al. (2020) θεώρησαν το αμμωνιακό νιτρικό ασβέστιο ως καλύτερη πηγή ανόργανου αζώτου έναντι του νιτρικού αμμωνίου, καθώς υποβοηθά τη θετική επίδραση των ενδοφυτικών και αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων στην απόδοση της καλλιέργειας, ενώ η εφαρμογή του σε ήδη αλκαλικά εδάφη δεν φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών. Παράλληλα, ο Abebe (2009) πρότεινε τη συνδυασμένη εφαρμογή 67 kg P₂O₅ and 27 kg N στρέμμα⁻¹ ως το αποδοτικότερο σχήμα θρέψης στην παραγωγή του φασολιού υπό επαρκή εδαφική υγρασία.

Πέρα από την αζωτούχο λίπανση, οι Carvalho et al. (2018) συμπέραναν πως ο λόγος P:K στα συστήματα θρέψης του φασολιού απαιτεί σημαντικό αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα. Επιπλέον, ο Bildirici (2020b) παρατήρησε μία θετική συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων λίπανσης φωσφόρου και της συγκέντρωσης των πρωτεϊνών στα ξηρά σπέρματα. Ωστόσο, σύμφωνα με την ίδια μελέτη, αυξημένη εφαρμογή φωσφόρου δύναται να περιορίσει την απορρόφηση του ψευδαργύρου, έχοντας αρνητικό αντίκτυπο στην απόδοση της καλλιέργειας.

Σχετικά με την εφαρμογή θρεπτικών στοιχείων μέσω ψεκασμού των φυτών, οι Da Silva et al. (1993) ανέφεραν ότι η διαφυλλική λίπανση αζώτου, με τη χρήση ουρίας, βελτιώνει την παραγωγή καθώς και τη συσσώρευση αζώτου στα ξηρά σπέρματα συγκριτικά με την πρόσληψη του αζώτου μέσω των ριζών. Θετικές επιδράσεις διαφυλλικής λίπανσης παρατηρήθηκαν επίσης στη μελέτη των Aslani & Sourji (2018), όπου ο ψεκασμός των φυτών με χηλικά οργανικά σκευάσματα αύξησαν την παραγωγή νωπών λοβών καθώς και την περιεκτικότητά τους σε διαλυτά στερεά, βιταμίνες και πρωτεΐνες σε σχέση με τα φυτά που χορηγήθηκε συμβατική NPK λίπανση και επιπρόσθετη διαφυλλική λίπανση με μακρο- και μικροστοιχεία. Τέλος, τα πρώτα ευρήματα σχετικά με την εφαρμογή νανοτεχνολογίας στη θρέψη του φασολιού παρατίθενται στη μελέτη των Khaber & Aboohanah (2020) όπου ο ψεκασμός των φυτών με νανολίπασμα καλίου αύξησε σημαντικά τόσο την παραγωγή όσο και την ποιότητα των νωπών λοβών.

1.3.5. Συγκαλλιέργεια

Οι περισσότερες από τις συλλεχθείσες εργασίες πραγματεύονται γενετικές συσχετίσεις των χαρακτηριστικών παραγωγής ως εργαλεία για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του φασολιού σε συστήματα συγκαλλιέργειας. Ειδικότερα, ο Balcha (2014) πρότεινε τη συνολική παραγωγή ξηρών σπερμάτων και τον αριθμό των λοβών ανά φυτό ως καταλληλότερα κριτήρια συλλογής με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του φυτού είτε όταν αυτό καλλιεργείται σε συστήματα συγκαλλιέργειας είτε όχι, επισημαίνοντας τους γονοτύπους DAB243 και DAB245 ως βάση για τη βελτίωση του φυτού και στα 2 συστήματα. Παρόμοιες αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών γονοτύπων φασολιού και καλλιεργητικών συστημάτων παρατηρήθηκαν και στη μελέτη των Zimmermann et al. (1984a).

Το φασόλι αποδίδει περισσότερο, ανά δεδομένη καλλιεργούμενη επιφάνεια, σε συστήματα μονοκαλλιέργειας παρά συγκαλλιέργειας (Amani Machiani et al., 2019). Σύμφωνα με τους Atuahene-Amankwa & Michaels (1992), τα συστήματα συγκαλλιέργειας μπορούν να μειώσουν έως και 32% τη συνολική απόδοση φασολιού, ενώ οι Zimmermann et al. (1984b) παρατήρησαν μία δραστική μείωση στο μέσο ξηρό βάρος των παραγόμενων σπερμάτων. Επιπλέον, τα συστήματα συγκαλλιέργειας δύναται να επηρεάσουν σημαντικά και τη θρεπτική αξία του παραγόμενου προϊόντος όπως αυτό αποδεικνύεται και στη μελέτη των Santalla et al. (1999), όπου η συγκαλλιέργεια του φασολιού με αραβόσιτο μείωσε σημαντικά τη συγκέντρωση των πρωτεϊνών στα ξηρά σπέρματα του φασολιού. Τα παραπάνω ευρήματα μπορούν να αποδοθούν είτε στον περιορισμένο έλεγχο περιβάλλοντος είτε στον αυξημένο ανταγωνισμό των διαφορετικών ειδών που εντάσσονται στο πρόγραμμα συγκαλλιέργειας. Αντίθετα, η συγκαλλιέργεια του φασολιού με πατάτα (1:1) φαίνεται να έχει θετικές επιδράσεις στην απόδοση του φασολιού σε σχέση με την αντίστοιχη μεμονωμένη καλλιέργειά του, ενώ οι μειωμένες απαιτήσεις θρέψης του παραπάνω σχήματος αυξάνουν τον λόγο οφέλη : κόστος για τον παραγωγό (Dua et al., 2017). Παράλληλα, γεωργικές πρακτικές όπως χρήση του δένδρου της ιτιάς ως φυσικού ανεμοφράκτη (Barbeau et al., 2018), εφαρμογή χουμικών οξέων (Amani et al., 2019) και ριζοβίων Daba et al., (2002) αυξάνουν την απόδοση του φασολιού σε συστήματα συγκαλλιέργειας.

Σχετικά με την πυκνότητα σποράς, οι Abd El-Gai et al. (2014) πρότειναν για τη συγκαλλιέργεια τομάτας-φασολιού την αναλογία [1:3] ως την καταλληλότερη

πυκνότητα, καθώς η αυξημένη πυκνότητα φασολιού αυξάνει την απόδοση του ανά στρέμμα χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του συγκαλλιευγόμενου είδους. Η παραπάνω αναλογία ήταν εξίσου αποδοτική και στην έρευνα των Sadeghi & Sansanfar (2013) όπου το φασόλι συγκαλλιευγήθηκε με το φυτό του ηλίανθου. Συμπερασματικά, από τις παραπάνω εργασίες, η πυκνότητα φύτευσης του φασολιού δεν φαίνεται να επηρεάζει την απόδοση του συγκαλλιευγόμενου είδους. Η διαπίστωση αυτή είναι σύμφωνη και με τους Raey & Ghassemi-Golezani (2009), όπου η απόδοση της πατάτας όταν αυτή συγκαλλιευγήθηκε με φασόλι, επηρεάστηκε αρνητικά από την αύξηση της πυκνότητας φυτών του ίδιου είδους παρά από το δευτερευόντως συγκαλλιευγόμενο φασόλι.

1.3.6. Εκτός εδάφους καλλιεργητικά συστήματα

Η εξάρτηση του φασολιού από εξωτερικές εισροές αζώτου επιβεβαιώθηκε και σε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας από τους Kontropoulou et al. (2015, 2017), όπου είτε η απουσία ή η ελλειμματική αζωτούχος λίπανση, περιόρισε δραστικά την απόδοση της καλλιέργειας. Σύμφωνα με τις ίδιες μελέτες, ο εμβολιασμός των φυτών με αζωτοδεσμευτικά στελέχη περιόρισε τις απώλειες παραγωγής, ωστόσο δεν οδήγησε σε ικανοποιητικά αποδεκτές αποδόσεις. Ενδεχομένως, η επάρκεια σε άζωτο μόνο κατά τα αρχικά βλαστικά στάδια ανάπτυξης θα μπορούσαν να αυξήσουν την αποδοτικότητα του εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια για μέγιστη οικονομία εξωτερικών εισροών αζώτου χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση της καλλιέργειας (Kontropoulou et al., 2015b).

Εκτός από το άζωτο, ο Bildirici (2020a) συμπέρανε πως η ταυτόχρονη παρά η μεμονωμένη διαχείριση της θρέψης του φυτού σε ψευδάργυρο και χαλκό μεγιστοποιεί τις αποδόσεις της υδροπονικής καλλιέργειας φασολιού. Επιπλέον, οι Da Silva et al. (2021) ανέδειξαν 12 διαφορετικούς γονοτύπους φασολιού που αποδίδουν υψηλές παραγωγές με τη χορήγηση θρεπτικού διαλύματος χαμηλής συγκέντρωσης σε φώσφορο. Τέλος, οι Azariz et al. (2021) παρατήρησαν πως η παρουσία μολύβδου σε οργανικά υποστρώματα δεν επηρεάζει αρνητικά την απόδοση και την ποιότητα του φασολιού λόγω της ακινητοποίησης του στις ρίζες των φυτών.

Ωστόσο, οι σχετικά ελάχιστες έρευνες που έχουν έως σήμερα διεξαχθεί δεν είναι αρκετές για την ανάδειξη υδροπονικών καλλιεργητικών πρακτικών που αυξάνουν την απόδοση και την ποιότητα του φασολιού. Γεγονός που ίσως οφείλεται πως στα σημαντικότερα παγκοσμίως κέντρα παραγωγής, όπως Βραζιλία, Ινδία και Αφρική, τα

συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα κυρίως λόγω πολιτικοοικονομικών παραγόντων.

1.3.7. Άροση

Σύμφωνα με τον Sangakkara (2004), η συμπίεση του εδάφους θέτει σημαντικούς περιορισμούς στην απόδοση του φασολιού, ενώ το όργωμα του εδάφους βοηθά στην εξάπλωση της ρίζας του φυτού με έμμεσο θετικό αντίκτυπο στην παραγωγή. Παρόμοια, στη μελέτη των Costa-Coelho et al. (2016), οι συμβατικές πρακτικές άροσης του εδάφους οδήγησαν σε πολλαπλάσιες αποδόσεις από τα φυτά που εγκαταστάθηκαν σε είτε σε ελάχιστα είτε σε καθόλου οργωμένο έδαφος. Ωστόσο, οι ίδιοι συγγραφείς παρατήρησαν μειωμένη προσβολή του φασολιού από το παθογόνο *Thanatephorus cucumeris*, υπεύθυνο για την ασθένεια της ριζοκτονίασης, στα φυτά που εγκαταστάθηκαν σε μη οργωμένο έδαφος. Η αυξημένη προσβολή στα οργωμένα πειραματικά τεμάχια ίσως οφείλεται στη διασπορά των βασιδιοσπορίων του μύκητα κατά την άροση του εδάφους. Αντίθετα, οι de Toledo-Souza et al. (2012) ανέφεραν αυξημένες προσβολές από το παθογόνο *Fusarium oxysporum f. sp. phaseoli* οι οποίες ήταν υπεύθυνες για σημαντική μείωση της παραγωγής ξηρών σπερμάτων υπό την απουσία άροσης εδάφους. Επιπλέον, οι Mulas et al. (2015) παρατήρησαν ότι ο εμβολιασμός των φυτών με το *Rhizobium leguminosarum* (strain LCS0306) ωφελεί περισσότερο την απόδοση του φασολιού σε καλλιεργητικά συστήματα συμβατικής άροσης. Άλλες έρευνες αναφέρουν θετικές επιδράσεις στην απόδοση του φασολιού σε με αρόσιμα συστήματα καλλιέργειας, οφέλη που σχετίζονται είτε με τον αυξημένο αποικισμό της ρίζας από μυκόρριζες (Alguacil et al., 2021) είτε σε καλύτερη αποδοτικότητα χρήσης νερού (Fatumah et al., 2021). Τέλος, σύμφωνα με τους Soratto et al. (2014), τα οφέλη των καλλιεργητικών συστημάτων απουσίας άροσης αυξάνουν συναρτήσει του χρόνου εφαρμογής τους.

1.3.8. Εφαρμογή ριζοβίων

Ο αποδοτικός εμβολιασμός των φυτών που ανήκουν στην οικογένεια των ψυχανθών με ριζόβια και επομένως η ικανότητα της έκπτυξης φυματίων και της αζωτοδέσμευσης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την αλληλεπίδραση του βακτηριακού στελέχους και του φυτού ξενιστή (Πίνακας 3) (Mulas et al., 2015; Massa et al., 2020). Σύμφωνα με τους Da Silva et al. (1993), ο εμβολιασμός του φυτού με τα στελέχη CM-05 και UMR-1899, αύξησαν την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού (στα 7 kg N

στρέμμα⁻¹) κατά 55% σε σχέση με φυτά που παρέμειναν χωρίς εμβολιασμό. Παράλληλα, οι Koskey et al. (2017) συμπέραναν πως η απομόνωση και χρήση γηγενών ριζοβίων ως προς μια τοπική καλλιεργούμενη ποικιλία φασολιού, αποτελεί μία υποσχόμενη πρακτική για την αύξηση της απόδοσης του φασολιού. Πάραυτα, κυρίως τα στελέχη του είδους *Rhizobium tropici* και *Rhizobium leguminosarum* εφαρμόζονται ευρέως λόγω της θετικής τους επίδρασης στην παραγωγή ξηρών σπερμάτων φασολιού (Berton et al., 2008; Rurangwa et al., 2018; Pastor-Bueis et al., 2021). Αντίθετα, πλήθος ερευνών (Buttery & Park, 1987; Crespo et al., 1987; Lucrecia et al., 1987; Karasu et al., 2011) δεν παρατήρησαν καμία θετική επίδραση από τον εμβολιασμό των φυτών με βακτήρια του γένους *Rhizobium* στην απόδοση του φασολιού. Παρόμοια, στη μελέτη των Massa et al. (2020), όπου ταυτοποιήθηκαν 50 διαφορετικά στελέχη του γένους *Rhizobium*, κανένα από αυτά δεν ωφέλησε την απόδοση του φυτού. Τα παραπάνω ευρήματα μπορεί να αιτιολογούνται από τη χαμηλή συνεισφορά των παραπάνω στελεχών στην ήδη πενιχρή αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φασολιού, είτε στις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διεκπεραίωση των πειραμάτων. Ωστόσο, σύμφωνα με τις ίδιες μελέτες ο εμβολιασμός των φυτών με το στέλεχος *R. leguminosarum* PhVyNOD3 αύξησε τα επίπεδα των πρωτεϊνών στα ξηρά σπέρματα κατά 9%. Επομένως, η συλλογή αποδοτικών και ανταγωνιστικών στελεχών με υψηλή προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές εδαφοκλιματικές ζώνες (Efstathiadou et al., 2021), καθώς και η βελτίωση του φασολιού χρησιμοποιώντας ως βάση γονοτύπους με αυξημένη αζωτοδεσμευτική ικανότητα (Rodríguez et al., 2011) αποτελούν στρατηγικές που αυξάνουν την αλληλεπίδραση του εμβολίου και του φυτού ξενιστή αποσκοπώντας στη μείωση της εξάρτησης της καλλιέργειας σε άζωτο για υψηλές αποδόσεις.

Ο εμβολιασμός των σπερμάτων με αζωτοδεσμευτικά στελέχη δύναται να έχει μία σωρευτική επίδραση με την αζωτούχο λίπανση στην απόδοση της καλλιέργειας. Σύμφωνα με τους Barros et al. (2018), ο εμβολιασμός με το στέλεχος *R. tropici* SEMIA 4080 και το σχήμα θρέψης 2 κιλά N στρέμμα⁻¹ κατά τη βασική λίπανση και συμπληρωματική προσθήκη 4 κιλών N στρέμμα⁻¹ μετά από 25 ημέρες από την εγκατάσταση της καλλιέργειας οδήγησε σε αύξηση της παραγωγή έναντι της συμπληρωματικής λίπανσης ακριβώς στις 25 ημέρες χωρίς τα φυτά να εμβολιαστούν με κάποιο στέλεχος. Επιπλέον, οι Argaw & Muleta (2017) παρατήρησαν θετική επίδραση του αυξημένου πληθυσμού των ριζοβίων στο έδαφος στις αποδόσεις της καλλιέργειας του φασολιού, υπό συνθήκες ελλειμματικής παροχής αζώτου.

Ο ταυτόχρονος εμβολιασμός των σπερμάτων με ριζόβια και ενδοφυτικά βακτήρια που προάγουν την ανάπτυξη των φυτών (PGPRs) αποτελούν επίσης μία ωφέλιμη καλλιεργητική πρακτική για την αύξηση των αποδόσεων του φασολιού. Ειδικότερα, στη μελέτη των Pastor-Bueis et al. (2021), ο εμβολιασμός των σπερμάτων με ριζόβια και με το στέλεχος *Pseudomonas brassicacearum* subsp. *neoaurantiaca* RVPB2-2 ή *Azotobacter chroococcum* Beijerinck 1901 (ATCC 9043T), αύξησε την παραγωγή ξηρών σπερμάτων κατά 37 και 28%, αντίστοιχα. Τέλος, αποδοτικά μίγματα εμβολίων στην παραγωγή του φασολιού αποτελεί και ο συνδυασμός στελεχών του γένους *Rhizobium* με τα ενδοφυτικά στελέχη που ανήκουν στο είδος *Azospirillum brasilense* sp. (Remans et al., 2008; Steiner et al., 2018; Phillipini et al., 2021).

Πίνακας 3: Επιδράσεις του εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια στην παραγωγή και ποιότητα του φασολιού.

Είδος	Στέλεχος	Αύξηση παραγωγής (%)	Αύξηση πρωτεϊνών (%)	Αναφορές
<i>Rhizobium leguminosarum</i> bv. <i>phaseoli</i>	LCS0306	26,56	-	Pastor-Bueis et al., 2021
	L-125	6,04–66,12	-	Pirbalouti et al., 2006a
	L-125, L-78	34,55–42,49	-	Pirbalouti et al., 2006b
		6,35	20,32	Elkoca et al., 2010
	CO5	no impact	-	Lucrecia et al., 1987
	HB-429 or GT-9	30,56–33,59	-	Samago et al., 2018
<i>Rhizobium leguminosarum</i>	PhVyNOD3	-	9	Massa et al. 2020
	vicea	-10,90 (yield reduction)	9,75	Uyanoz et al., 2007
<i>Rhizobium leguminosarum</i> bv. <i>phaseoli</i> + <i>Bacillus subtilis</i> (OSU-142) + <i>Bacillus megaterium</i> (M-3)	OSU-142: <i>B. subtilis</i> M-3: <i>B. megaterium</i>	6,18	23,13	Elkoca et al., 2010
<i>Rhizobium phaseoli</i>	HAMBI3570	15,26–78,12	-	Aserse et al., 2020
	3644 and 3622	30,86–68,94	-	Taylor et al., 1987
	-	21,56	-	Ndlovu et al., 2017
	-	no impact	-	Karasu et al., 2011
	-	no impact	-	Crespo et al., 1987
<i>Rhizobium phaseoli</i> + <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Rb-133 + P-93	13,90–54,20	-	Yadegari et al., 2008. 2010
<i>Rhizobium etli</i>	HAMBI3556	12,50–79,50	-	Aserse et al., 2020
<i>Rhizobium phaseoli</i> , <i>Azotobacter vinelandii</i> ,	-	9,08	0,87	Rezaei-Chiyaneh, et al., 2020

<i>Pseudomonas putida, Pantoea agglomerans, Pseudomonas koreensis, P. vancouverensis</i>				
		no impact	-	da Silveira Cardillo et al., 2019
	CIAT 899	9.06	-	Barros et al., 2017
<i>Rhizobium tropici</i>		37,57–43,77	-	Ndakidemi et al., 2006
	SEMIA 4077, SEMIA 4080, and SEMIA 4088	11,05–16,62	-	Steiner et al., 2019
	SEMIA 4080	7,36–20,70	-	Jalal et al., 2021
<i>Rhizobium pisi</i>	R40982	41–59% (common bean genotype BAT-477)	-	Sánchez et al., 2014
<i>Pseudomonas monteilii</i>	CIAT isolates 384, 274, and 632	61,11–70,12	-	Daba & Haile 2000
<i>Rhizobium</i> sp.	B1	26.55	-	Negi et al., 2014
	Rb-133	9,38–23,50	8,97–21,93	Yadegari et al., 2010
<i>Rhizobium</i> sp.	CIAT isolates 384, 274, and 632	19,94–70,18 (common bean intercropping with <i>Sorghum bicolor</i>)		Daba & Haile, 2002

1.3.9. Εφαρμογή βιοδιεγερτών

Οι βιοδιεγέρτες είναι προϊόντα τα οποία περιέχουν μικροοργανισμούς ή χημικές ενώσεις (βακτήρια, μύκητες, φύκη, πρωτεΐνες, αμινοξέα ή χουμικά οξέα) που προάγουν την πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων, την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων καθώς και την ανοχή των φυτών σε βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες καταπόνησης (EU, Council Regulation, 2019). Ειδικότερα, τόσο η μεμονωμένη εφαρμογή χουμικών οξέων (Amani Machiani et al., 2019), όσο και μίγματα αυτών είτε με μικροοργανισμούς που βοηθούν την πρόσληψη φωσφόρου (Ozaktan et al., 2020) είτε εμπλουτισμένα με ψευδάργυρο και χιτοζάνη (Ibrahim & Ramadam et al., 2015) αυξάνουν σημαντικά τις αποδόσεις της καλλιέργειας φασολιού για την παραγωγή ξηρών σπερμάτων. Τα σκευάσματα βιοδιεγερτών συχνά περιέχουν και μυκόρριζες (Neeraj & Singh, 2011), με το πιο κοινό είδος το *Glomeromycota phylum*, το οποίο δρα ως ενεργοποιητής φωτοσύνθεσης (Bağdatlı, & Erdoğan, 2019), ενώ μπορεί να αυξάνει σημαντικά την ανοχή του φυτού στην υδατική καταπόνηση (Petropoulos et al., 2020).

Εκχυλίσματα καφέ φυκών, όπως αυτά των ειδών *Ascophyllum nodosum* και *Ecklonia maxima*, αυξάνουν τόσο την απόδοση του φασολιού όσο και τη συγκέντρωση των ξηρών σπερμάτων του σε πρωτεΐνες, πολυφαινόλες, φλαβονοειδή και φυτικές ίνες (Kocira et al., 2020a), μέσω του εφοδιασμού του φυτού με πρωτεΐνες, ένζυμα, φυτορμόνες, βιταμίνες, μακρο- και μικροστοιχεία και πολυσακχαρίτες. Ωστόσο τα παραπάνω σκευάσματα εφαρμόζονται σε δύο δόσεις κατά τον βιολογικό κύκλο του φυτού, ενώ η κάθε δόση απαιτεί υψηλή συγκέντρωση εκχυλίσματος στο ψεκαστικό διάλυμα. Η εφαρμογή αμινοξέων κατά την ανθοφορία επίσης ευνοεί την απόδοση του φασολιού κατά τους Moreira & Moraes (2017). Ωστόσο, στη μελέτη των Tabesh et al. (2020), η εφαρμογή αμινοξέων εμπλουτισμένα με ψευδάργυρο ήταν αποδοτικότερη όταν τα σκευάσματα εφαρμόστηκαν στα σπέρματα πριν τη σπορά, παρά μέσω ψεκασμού σε μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης του φυτού.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Rezaei-Chiyaneha et al. (2020), η εφαρμογή των PGPRs μπορεί να οδηγήσει σε 25% αύξηση παραγωγής, ενώ ο συνδυασμός τους με πυρίτιο μεγιστοποιεί την απόδοση της καλλιέργειας σε εδάφη με υψηλή αλατότητα (Kumar et al., 2020b). Αν και οι παραπάνω επιδράσεις έχουν αναφερθεί σε αρκετές μελέτες (Yadegari & Rahmani, 2008, 2010a, 2010b), ο μηχανισμός δράσης αυτών των βακτηρίων δεν είναι επαρκώς τεκμηριωμένος. Ωστόσο, η δράση τους συνδέεται με τα αυξημένα επίπεδα της φυτορμόνης IAA, φυτοαλεξινών και φλαβονοειδών (Negi et al.,

2021) και παραγόντων καταστολής παθογόνων (Neeraj & Singh, 2011), καθώς συνεισφέρουν και στην αξιοποίηση αδιάλυτων θρεπτικών στοιχείων (Kumar et al., 2020b).

1.3.10. Διαχείριση ασθενειών

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε αρκετά παθογόνα τα οποία δύναται να περιορίσουν σημαντικά την ανάπτυξη και την απόδοση της καλλιέργειας φασολιού. Ειδικότερα, οι Bruno et al. (2017) παρατήρησαν μία αρνητική συσχέτιση μεταξύ των προσβολών του φασολιού από τα παθογόνα *Pseudocercospora griseola* (γωνιώδης κηλίδωση), *Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli* (βακτηριακή κηλίδωση) και *Colletotrichum linemuthianum* (ανθράκωση), και της απόδοσης της καλλιέργειας σε ξηρά σπέρματα. Παρόμοια ευρήματα αναφέρονται και στη μελέτη των Mongi et al. (2018), όπου η γωνιώδης κηλίδωση οδήγησε σε μείωση της παραγωγής από 6 έως 61%, ωστόσο η εφαρμογή του μυκητοκτόνου azoxystrobin + difenoconazole μετρίασε την αρνητική επίδραση της προσβολής στην απόδοση της καλλιέργειας. Επιπλέον, οι Gutiérrez-Moreno et al. (2021) παρατήρησαν πως ο εμβολιασμός των φυτών με μικροοργανισμούς του γένους *Trichoderma* περιορίζει την ένταση της προσβολής τους από την ασθένεια της ανθράκωσης. Παράλληλα, η ανάδειξη ανθεκτικών ποικιλιών έναντι σε ασθένειες, όπως ο γονότυπος BRS Notável που παρουσιάζει ανοχή στην ασθένεια της ανθράκωσης (Pereira et al., 2012), αποτελεί μία στρατηγική για τη διασφάλιση των αποδόσεων του φασολιού αποφεύγοντας την εκτεταμένη χρήση τοξικών για το περιβάλλον φυτοπροστατευτικών προϊόντων.

Παθογόνα υπεύθυνα για τις ανδρομυκώσεις της φασολιάς (*Fusarium solani*, *Rhizoctonia solani* και *Fusarium oxysporum*) είναι αρκετά επιζήμια στην απόδοση του φυτού, καθώς μειώνουν τόσο τον αριθμό των λοβών (3,3-67%) όσο και των σπερμάτων (3,8-76%) ανά φυτό (Naseni, 2008). Στη μελέτη των El-Mohamedy et al. (2017), η εφαρμογή χουμικών οξέων, χιτοζάνης και σαλικυλικού οξέος αύξησε ελάχιστα την ανοχή των φυτών έναντι των *F. solani* και *R. solani* ωφελώντας την απόδοση του φυτού κατά 8-13%, ενώ η μεταχείριση των σπερμάτων με ωφέλιμους μικροοργανισμούς (*Trichoderma viride*, PGPR-1, και *Rhizobium* B1) περιορίζει την ένταση της προσβολής από το *R. solani*, οδηγώντας σε αύξηση παραγωγής κατά 10-29% (Negi et al., 2021).

Ο πιο συμβατικός τρόπος καταπολέμησης των μυκητολογικών ασθενειών αποτελεί ο ψεκασμός των φυτών με σκευάσματα μυκητοκτόνων. Ειδικότερα, τα

μυκητοκτόνα benomyl, mancozeb, oxycarboxin και chlorathalonil περιορίζουν την ένταση προσβολής των φυτοπαθογόνων μυκήτων, οδηγώντας σε αύξηση της απόδοσης του φασολιού κατά 22-58% (Ellis et al., 1976; Rodríguez & Meléndez, 1986). Επιπλέον, σύμφωνα με τους da Silveira Cardillo et al. (2019), η μεταχείριση των σπερμάτων με τα μυκητοκτόνα difenoconazole, fludioxonyl + metalaxyl-M και captan δεν επηρεάζουν αρνητικά την έκπτυξη των φυματίων στη ρίζα του φυτού καθώς και την απόδοσή του σε ξηρά σπέρματα.

Η βακτηριακή κηλίδωση (common bacteria blight, CBB) αποτελεί την πιο διαδεδομένη βακτηριακή προσβολή του φασολιού και οφείλεται στο στέλεχος *Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli*. Σύμφωνα με τους Boersma et al. (2015), η παραπάνω προσβολή μπορεί να μειώσει το μέσο βάρος σπερμάτων κατά 2-5%, ενώ ο Tefera (2016) παρατήρησε μία σημαντικά αρνητική συσχέτιση της έντασης της προσβολής με την απόδοση του φυτού. Επιπρόσθετα, η ψευδομονάδα *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* είναι επίσης υπεύθυνη για τη βακτηριακή κηλίδωση του φασολιού (bacterial brown spot, BBS) και επομένως για σημαντικές απώλειες παραγωγής. Κατά τους Salequa et al. (2020), ο γονότυπος G08 παρουσιάζει αυξημένη ανοχή έναντι της BBS επιτυγχάνοντας αύξηση της παραγωγής κατά 19% σε σχέση με άλλες ευαίσθητες ποικιλίες.

Σχετικά με τις ιολογικές ασθένειες της φασολιάς, οι Sarrafi & Ecochard (1986) παρατήρησαν πως ο ιός του μωσαϊκού της φασολιάς (BCMV) περιορίζει την απόδοση και το μέσο ξηρό βάρος σπερμάτων κατά 15-41% και 4-11%, αντίστοιχα. Αρνητικό επίσης αντίκτυπο στην απόδοση του φυτού έχει και ο ιός του χρυσού μωσαϊκού της φασολιάς (BGMV). Σύμφωνα, με τους Souza et al. (2018), ο γονότυπος CNFCT 16205 παρουσιάζει αυξημένη ανοχή έναντι του BGMV καταγράφοντας αύξηση της παραγωγής κατά 18% σε σχέση με ευαίσθητες ποικιλίες (Pérola).

1.3.11. Διαχείριση φυσικών εχθρών

Κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση μόνο 2 εργασίες εντοπίστηκαν σχετικές με τη διαχείριση των εντόμων στην καλλιέργεια της φασολιάς. Σύμφωνα με τους Karel & Mghogho (1985), η συχνότητα εμφάνισης των εντόμων *Ootheca bennigseni* Weise και *Taeniothrips sjostedti* Trybom αυξήθηκε σε πειραματικά τεμάχια στα οποία δεν εφαρμόστηκε εντομοκτόνο σκεύασμα, ενώ η επιζήμια δράση των εντόμων *Maruca testulalis* Geyer και *Heliothis armigera* Hübner στα άνθη και τους λοβούς ήταν επίσης υψηλότερη στα τεμάχια απουσίας ψεκασμού. Επιπλέον, τα οργανικά σχήματα θρέψης

αυξάνουν τις προσβολές από το *Aphis fabae* κατά 17-50%, ωστόσο οι αυξημένες αυτές προσβολές δεν σχετίζονται με περαιτέρω απώλειες στην απόδοση της καλλιέργειας (Karungi et al., 2006).

1.3.12. Διαχείριση ζιζανίων

Για την επίτευξη καλλιεργητικών συστημάτων υψηλών αποδόσεων, η καταπολέμηση των ζιζανίων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ο αυξημένος ανταγωνισμός των ζιζανίων με το καλλιεργούμενο φυτό της φασολιάς οδηγεί σε μείωση της παραγωγής κατά 12-80% (da Costa et al., 2013; Strivastava et al., 2013; Esmailzadeh & Aminpanah, 2018; Mekonnen, 2020) και της ποιότητας (Rashifi et al., 2021). Τα ζιζάνια που απαντώνται συχνότερα σε περιοχές που η καλλιέργεια του φασολιού είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι τα *Amaranthus retroflexus* L. (βλήτο), *Chenopodium album* L. (κλουβίδα), *Portulaca oleracea* L. (αντράκλα), *Datura stramonium* L. (στραμόνιο), *Convolvulus arvensis* L. (περικοκλάδα), *Cyperus esculentus* L. (κίτρινη κύπερη), *Cyperus rotundus* L. (κύπειρος ο στρογγυλός), *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (αγριάδα), *Sorghum halepense* (L.) Pers. (βέλιουρας), *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. (μουχρίτσα), *Eleusine indica* (L.) Gaertn. (συρματόχορτο), *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. (πράσινη σετάρια), *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop. (Poaceae) (καβουρόχορτο) (Sadeghi & Sasanfar, 2013; da Costa et al., 2013; Esmailzadeh & Aminpanah, 2015; Feizollah & Aminpanah, 2016; Ngadze et al., 2018; Singh et al., 2018). Η χημική καταπολέμηση των ζιζανίων αποτελεί τον πιο διαδομένο τρόπο αντιμετώπισης των ζιζανίων στην καλλιέργεια φασολιού, με τα πιο ευρέως εφαρμοσμένα ζιζανιοκτόνα τα trifluralin, bentazon, pendimethalin, fomesafen, fluazifop-P-butyl, και quizalofop-p-ethyl (Ayonoadu et al., 1974; da Costa et al., 2013; Glowacka, 2013; Singh et al., 2018).

Σύμφωνα με τους Singh et al. (2018), οι δραστικές pendimethalin και quizalofop-p-ethyl μειώνουν σημαντικά τη βιομάζα και την πυκνότητα των ζιζανίων, ενώ το pendimethalin παρουσιάζει αυξημένη δραστικότητα κατά του *C. album* L, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της παραγωγής του φασολιού κατά 72% (Strivastava et al., 2013). Πέρα από τη χημική καταπολέμηση, στη μελέτη των Dusabumuremyi et al. (2014) η μείωση των αποστάσεων φύτευσης (45 εκ. x 20 εκ. ή 30 εκ. x 30 εκ. έναντι 60 εκ. x 15 εκ.) οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής του φασολιού (7-27%) λόγω της μειωμένης βιομάζας των ζιζανίων κατά 12-68%. Παρόμοια, στη μελέτη των Feizollah & Aminpanah (2016) οι αποστάσεις φύτευσης 40 εκ. x 20 εκ. και η χειρωνακτική

εξαγωγή των ζιζανίων στις 20 και 45 μέρες μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας οδήγησε σε αυξημένη παραγωγή νωπών λοβών. Παράλληλα, η περίοδος εγκατάστασης καλλιέργειας παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στον περιορισμό ανάπτυξης των ζιζανίων, καθώς σύμφωνα με τους Byiringiro et al. (2017) η καθυστερημένη εγκατάσταση της καλλιέργειας οδήγησε σε αύξηση της πυκνότητας των ζιζανίων.

Η χειρωνακτική καταπολέμηση των ζιζανίων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος για τον έλεγχο των ζιζανίων (Srivastava et al., 2013; Esmaeilzadeh & Aminpanah, 2015), ωστόσο είναι ιδιαίτερα απαιτητική σε κόπο και εργατικό δυναμικό. Στη μελέτη των Srivastana et al. (2013), η εξαγωγή των ζιζανίων στις 30 και 60 ημέρες από την εγκατάσταση της καλλιέργειας ωφέλησε την παραγωγή ξηρών σπερμάτων κατά 71%, ενώ σύμφωνα με τους da Costa et al. (2013), ο χειρωνακτικός έλεγχος των ζιζανίων κατά πρώτα βλαστικά στάδια ανάπτυξη του φυτού φέρει σημαντικότερο αντίκτυπο στην απόδοση της καλλιέργειας.

Η μηχανική εξαγωγή των ζιζανίων μεταξύ των γραμμών φύτευσης αποτελεί επίσης έναν φυσικό τρόπο ελέγχου των ζιζανίων, υστερεί ωστόσο ως προς την αποτελεσματικότητά του έναντι του αντίστοιχου χημικού (Glowacka, 2013). Επιπρόσθετα, τα συστήματα συγκαλλιέργειας δύναται είτε να βελτιώσουν την ανταγωνιστική ικανότητα του φασολιού αυξάνοντας την ανοχή του στις πιέσεις των ζιζανίων είτε να περιορίσουν την πυκνότητα των ζιζανίων (Sadeghi & Sasanfar, 2013). Τέλος, η ηλιοαπολύμανση του εδάφους (Ngadze et al., 2018) και η εδαφοκάλυψη είτε με πλαστικά φύλλα (νάιλον) είτε με φυτικά υπολείμματα περιορίζει δραστικά την πυκνότητα και άρα την πίεση των ζιζανίων (Rahman et al., 2008)

1.4. Συμπέρασμα

Αυτή η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε 12 καλλιεργητικές πρακτικές οι οποίες επιδρούν στην απόδοση και την ποιότητα του φασολιού μέσω της ανάλυσης του δημοσιευμένου ερευνητικού υλικού τα τελευταία 50 χρόνια. Η αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος για τη δεδομένη καλλιέργεια μετά το 2010 μπορεί να οφείλεται στην αυξημένη χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων που πραγματεύονται βιώσιμες καλλιεργητικές πρακτικές, επισιτιστική ασφάλεια και ασφάλεια τροφίμων, και προάγουν υγιεινές διατροφικές συνήθειες μέσω της ένταξης των φυτικών πρωτεϊνών στη διατροφή του ανθρώπου.

Η βιβλιογραφική ανάλυση ανέδειξε αρκετές αναφορές σχετικά με τη σημαντικότητα της συσχέτισης αγρονομικών χαρακτηριστικών, όπως της παραγωγής

είτε ξηρών σπερμάτων είτε νωπών λοβών με τις απαιτούμενες ημέρες προς άνθηση ή/και το ύψος του φυτού, στα προγράμματα βελτίωσης του φασολιού. Ωστόσο, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των γονοτύπων και του περιβάλλοντος πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη για τον εντοπισμό γονιδίων που ωφελούν την ανοχή του φυτού σε βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες καταπόνησης και των ικανότητα του φυτού να αξιοποιεί το ατμοσφαιρικό άζωτο.

Η επιλογή της περιόδου και πυκνότητας σποράς επηρεάζεται σημαντικά από την καλλιεργούμενη ποικιλία. Επομένως, η επιλογή γονοτύπων με υψηλή προσαρμοστικότητα σε συνδυασμό με την κατάλληλη πυκνότητα σποράς θα πρέπει να τίθενται σε υψηλή προτεραιότητα από τους παραγωγούς. Τα πιο αποδοτικά σχήματα θρέψης αποτελούν τα μίγματα οργανικής και ανόργανης λίπανσης, καθώς η εφαρμογή κοπριάς κατά τη βασική λίπανση ευνοεί την έκπτυξη των φυματίων και την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φασολιού και βελτιώνει τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Παράλληλα, η ορθή εφαρμογή ανόργανων λιπασμάτων συναρτήσεως των απαιτήσεων των φυτών κατά τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης καθώς και της διαθεσιμότητας των θρεπτικών στο έδαφος διασφαλίζει τις υψηλές αποδόσεις της καλλιέργειας περιορίζοντας σημαντικά το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα. Σχετικά με τη θρέψη των φυτών σε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας, είναι αναγκαία περισσότερη έρευνα για την ανάδειξη πρακτικών που μεγιστοποιούν τις αποδόσεις καθώς και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος.

Δεδομένης της υψηλής ευαισθησίας του φασολιού τόσο στην καταπόνηση ύδατος και αλατότητας, υψηλές αποδόσεις επιτυγχάνονται μόνο με επαρκή παροχή υψηλής ποιότητας νερού άρδευσης. Ωστόσο, σε συνθήκες περιορισμένων αποθεμάτων νερού, η επάρκεια άρδευσης τουλάχιστον κατά το στάδιο της ανθοφορίας και δευτερευόντως κατά της παραγωγής, θα μπορούσε να ληφθεί ως μέτρο για τον περιορισμό των απωλειών παραγωγής.

Για τη βελτίωση της απόδοσης του φασολιού σε συστήματα συγκαλλιέργειας, είναι αρκετά σημαντική η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας φύτευσης του συγκαλλιεργούμενου είδους. Επιπρόσθετα, βιώσιμες και αποδοτικές στρατηγικές λίπανσης που προτείνονται στα συστήματα μονοκαλλιέργειας φασολιού, ευνοούν εξίσου την απόδοσή του σε συστήματα συγκαλλιέργειας. Επιπλέον, τα συστήματα μειωμένης ή μηδαμινής άρωσης φαίνεται να ευνοούν μακροπρόθεσμα την απόδοση του φασολιού μέσω των ευεργετικών ιδιοτήτων που έχουν στη μείωση της πυκνότητας των

ζιζανίων και στην εξάπλωση των φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών καθώς και στη βελτίωση των εδαφικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων.

Ο εμβολιασμός των φυτών με ριζόβια αποτελεί μία στρατηγική είτε για την αύξηση των αποδόσεων υπό ελλειμματική παροχή αζώτου είτε για τη διασφάλιση υψηλών αποδόσεων με σημαντική οικονομία αζώτου. Προς αυτήν την κατεύθυνση συνεισφέρει επίσης και ο επιπρόσθετος εμβολιασμός των φυτών με PGPRs λόγω της συνεργιστικής τους δράσης με τα ριζόβια στη μέγιστη αξιοποίηση του ατμοσφαιρικού αζώτου από τα ψυχανθή. Πέρα από τα PGPRs, βιοδιεγέρτες όπως χουμικά οξέα, εκχυλίσματα φυκών, AMF και αμινοξέα βελτιώνουν την αποδοτικότητα χρήσης νερού και θρεπτικών καθώς και την ανοχή του φυτού σε βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες καταπόνησης. Ωστόσο, παράμετροι όπως συχνότητα και δόση εφαρμογής καθώς και διαφορετικοί συνδυασμοί βιοδιεγερτών αποτελούν αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα.

Η ένταση προσβολής μυκητολογικών ασθενειών μπορεί να ελεγχθεί επιτυχώς μέσω της χημικής αντιμετώπισης με την εφαρμογή μυκητοκτόνων. Ωστόσο, ωφέλιμοι μικροοργανισμοί (*Trichoderma* και *Rhizobium*) καθώς και παράγοντες που επάγουν την ανοχή των φυτών έναντι σε παθογόνα (χιτοζάνη, χουμικά οξέα, σαλικυλικό οξύ) αποτελούν μία συμπληρωματική πρακτική μείωση της έντασης των προσβολών. Παράλληλα, για την αντιμετώπιση βακτηριολογικών και ιολογικών ασθενειών, όπου η χημική καταπολέμηση δεν είναι εφικτή, η βελτίωση του φασολιού με βάση ανθεκτικούς γονοτύπους αποτελεί την κύρια στρατηγική αντιμετώπισης. Σχετικά με τη διαχείριση των ζιζανίων, η χημική καταπολέμηση, η μείωση των γραμμών φύτευσης, τα συστήματα συγκαλλιέργειας, η ηλιοαπολύμανση και η εδαφοκάλυψη αποτελούν γεωργικές πρακτικές που μειώνουν την πίεση των ζιζανίων και επιτρέπουν σημαντικά περιθώρια αύξηση της απόδοσης του φασολιού κατά 4 έως 80%. Τέλος, οι ελάχιστες εργασίες σχετικά με την καταπολέμηση φυσικών εχθρών φασολιού δεν επιτρέπουν την ανάδειξη αποδοτικών καλλιεργητικών πρακτικών για την καταπολέμησή τους.

2. Στόχος Μελέτης

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε διάφορες βιώσιμες καλλιεργητικές πρακτικές οι οποίες βελτιώνουν την απόδοση και την ποιότητα του φασολιού σε συστήματα μονοκαλλιέργειας και συγκαλλιέργειας. Ωστόσο, υπάρχει ένα κενό έρευνας σχετικά με την απόδοση του φασολιού σε προγράμματα εναλλαγής καλλιεργειών. Ειδικότερα, το φασόλι αποτελεί ένα φυτό θερμής εποχής καθώς καλλιεργείται κατά κύριο λόγο κατά τις εαρινές-θερινές καλλιεργητικές περιόδους. Ωστόσο, σε χώρες με ήπιο κλίμα, όπως αυτές τις Μεσογείου, μία επιπλέον καλλιέργεια ενός ψυχροανθεκτικού κηπευτικού κατά τη φθινοπωρινή-χειμερινή καλλιεργητική περίοδο είναι αρκετά συχνή σε αγρούς στους οποίους πραγματοποιείται η εαρινή καλλιέργεια φασολιού. Επομένως, ιδιαίτερα για τη βιολογική καλλιέργεια φασολιού, η χειμερινή καλλιεργητική περίοδος θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την εγκατάσταση μιας καλλιέργειας χλωρής λίπανσης στοχεύοντας στην αύξηση της γονιμότητας του εδάφους για την επακόλουθη καλλιέργεια φασολιού.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα έρευνα στοχεύει τη μελέτη του αντίκτυπου διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στην απόδοση και ποιότητα νωπών λοβών βιολογικής καλλιέργειας φασολιού κατά την επακόλουθη εαρινή καλλιεργητική περίοδο. Οι κοινές καλλιεργητικές πρακτικές σε εδάφη που καλλιεργούνται με βιολογικό φασόλι περιλαμβάνουν είτε την αγρανάπαυση ή την καλλιέργεια ενός ψυχροανθεκτικού ψυχανθούς για χλωρή λίπανση. Επιπρόσθετα στις παραπάνω πρακτικές, στην παρούσα μελέτη αξιολογήθηκε επίσης η δυνατότητα εγκατάστασης μιας χειμερινής καλλιέργειας ενός μη-ψυχανθούς φυτού. Το πρόγραμμα εναλλαγής χειμερινού μη-ψυχανθούς – εαρινού φασολιού αξιολογήθηκε κάτω από βιολογικό και συμβατικό σύστημα καλλιέργειας. Επιπλέον, σε όλα τα υπό μελέτη προγράμματα εναλλαγής, υπήρξαν πειραματικά τεμάχια όπου τα φυτά φασολιού εμβολιάστηκαν με το εμπορικό αζωτοδεσμευτικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 ώστε να διερευνηθεί εάν ο εμβολιασμός των φυτών με ριζόβια ωφελεί την απόδοση του συστήματος. Για την εξαγωγή αξιόπιστων ευρημάτων, τα διαφορετικά προγράμματα εναλλαγής εγκαταστάθηκαν για δύο συνεχόμενες χρονιές στον ίδιο πειραματικό αγρό όπου και αξιολογήθηκαν οι επιδράσεις τους στην απόδοση και την ποιότητα του παραγόμενου φασολιού.

Πέρα από τα διαφορετικά προγράμματα εναλλαγής καλλιεργειών, περιορισμένη έρευνα έχει επίσης διεξαχθεί και στην απόδοση του φασολιού σε

υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας, ιδιαίτερα ως προς τις κατάλληλες πρακτικές θρέψης του φυτού σε άζωτο. Ειδικότερα, ο αντίκτυπος των διαφορετικών επιπέδων παροχής των φυτών σε άζωτο σε συνδυασμό με τον εμβολιασμό του φυτού με ριζόβια μελετήθηκε από τους Kontopoulou et al. (2017) και Arcas-Pilz et al. (2021), ωστόσο η ιδιαίτερα περιορισμένη παροχή αζώτου που εφαρμόστηκε στις παραπάνω έρευνες δεν κάλυψε τις ανάγκες του φυτού για ικανοποιητικές αποδόσεις. Επιπλέον, το φασόλι έχει επίσης αναπτυχθεί σε σύστημα υδροκαλλιέργειας στις μελέτες των Kouki et al. (2021), Jiang et al. (2020), Pradham et al. (2017) και Perez-Giménez & Lodeiro (2013), ωστόσο, οι παραπάνω έρευνες αφορούν μικρής διάρκειας πειραματικές μελέτες που αξιολογούν τους παραπάνω παράγοντες ως προς την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού κατά τα βλαστικά στάδια ανάπτυξης του φυτού.

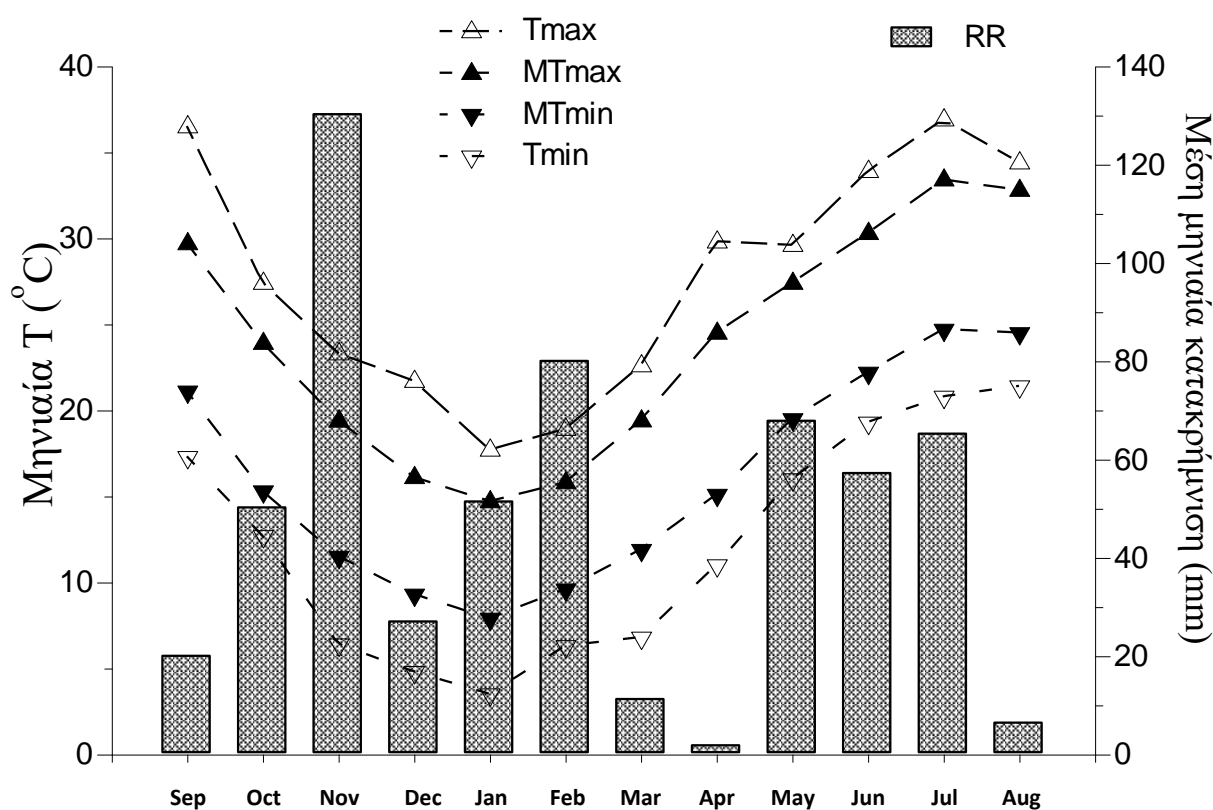
Επιπλέον, στόχος αυτής της μελέτης είναι η μείωση της εξάρτησης του φασολιού σε εξωτερικές εισροές αζώτου χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση της καλλιέργειας. Για τον σκοπό αυτό, το φασόλι καλλιεργήθηκε υδροπονικά υπό διαφορετικά επίπεδα παροχής αζώτου κατά τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξής του. Λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις του αζώτου στην έκπτυξη των φυματίων και την ανάπτυξη του φυτού καθώς και της σημαντικότητας της αυξημένης αζωτοδεσμευτικής ικανότητας κατά την ανθοφορία για το επακόλουθο στάδιο της παραγωγής, ήπια καταπόνηση σε άζωτο, η οποία καλύπτει το 75 και 50% των αναγκών των φυτών, εφαρμόστηκε μέχρι και το στάδιο της ανθοφορίας, ενώ στη συνέχεια η ένταση της καταπόνησης αυξήθηκε καλύπτοντας το 25% των φυτών κατά το επακόλουθο στάδιο της παραγωγής. Παράλληλα, φυτά στα οποία χορηγήθηκε θρεπτικό διάλυμα που καλύπτει το 100% των αναγκών των φυτών σε άζωτο προσφέρθηκαν σαν μάρτυρες. Επιπρόσθετα στα διαφορετικά σχήματα θρέψης, η απόδοση του στελέχους *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21 έναντι του εμπορικού στελέχους *Rhizobium tropici* CIAT 899 επίσης αξιολογήθηκε.

3. Υλικά & Μέθοδοι

3.1. Επίδραση των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στην απόδοση του βιολογικού φασολιού.

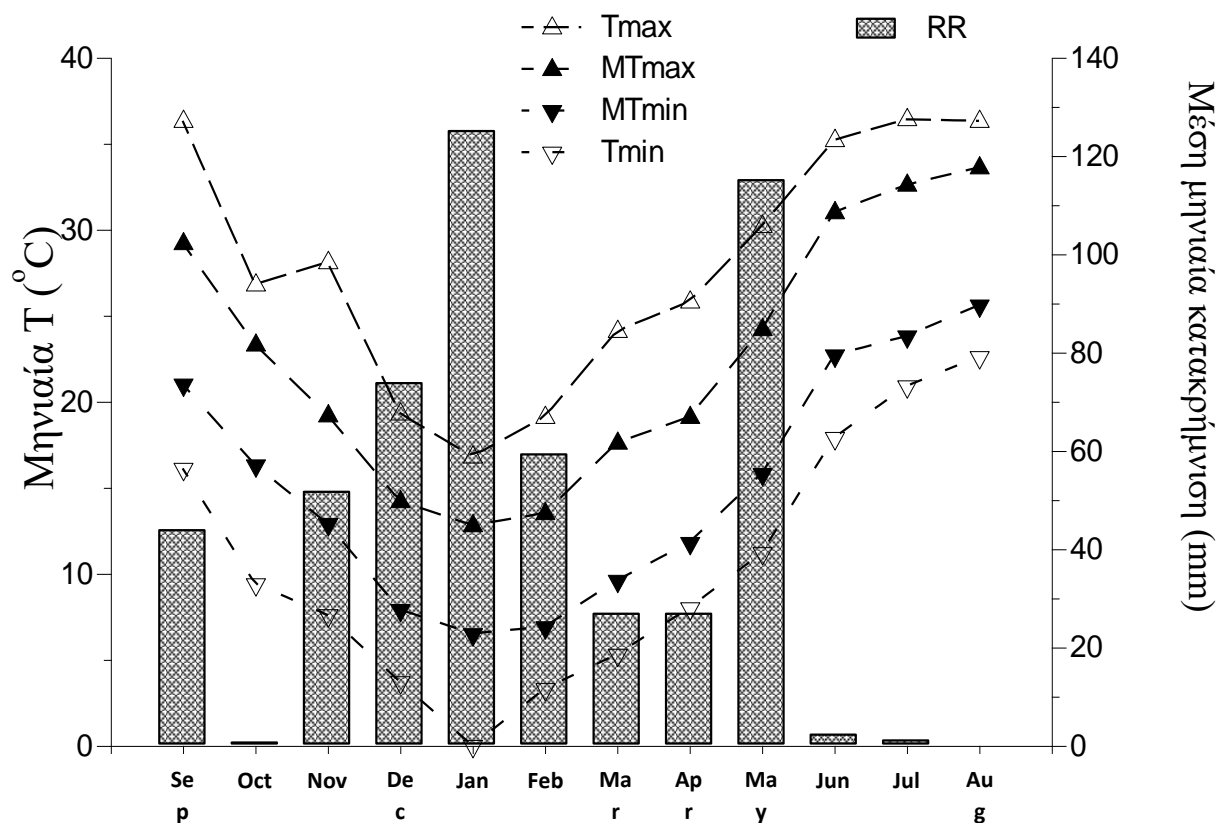
3.1.1. Πειραματικός σχεδιασμός

Η πειραματική εργασία με υπαίθριες καλλιέργειες πραγματοποιήθηκε κατά το φθινόπωρο 2017 έως το καλοκαίρι 2018 και επαναλήφθηκε το επόμενο έτος (φθινόπωρο 2018 έως καλοκαίρι 2019) στις πειραματικές εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Κηπευτικών Καλλιεργειών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (37°58'56.4" N 23°42'15.7" E). Η συνολική έκταση του πειραματικού αγρού, η οποία ανέρχεται στα 375 m², διαιρέθηκε σε 32 πειραματικά τεμάχια των 5 m². Οι καλλιέργειες εγκαταστάθηκαν σε αμμοπηλώδες έδαφος σύμφωνα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους που αναφέρονται στον Πίνακα 4. Ο πειραματικός αγρός παρέμεινε ακαλλιέργητος τα τελευταία 5 χρόνια πριν από την εγκατάσταση των καλλιεργειών, και επομένως δεν πραγματοποιήθηκε ο μικροβιακός χαρακτηρισμός του



Γράφημα 5: Μηνιαία μέγιστη (Tmax), μέση μέγιστη (MTmax), μέση ελάχιστη (MTmin) και ελάχιστη (Tmin) και το ύψος των βροχοπτώσεων (RR) κατά την 1^η πειραματική χρονιά (Σεπτέμβριος 2017 – Αύγουστος 2018) στην Αθήνα.

εδάφους. Επιπρόσθετα, τα κλιματικά δεδομένα και συγκεκριμένα η μηνιαία θερμοκρασία (μέγιστη, μέση μέγιστη, ελάχιστη, μέση ελάχιστη) και το μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης για το 1^ο και το 2^ο πειραματικό έτος παριστάνονται στα Γραφήματα 5 & 6, αντίστοιχα.



Γράφημα 6: Μηνιαία μέγιστη (Tmax), μέση μέγιστη (MTmax), μέση ελάχιστη (MTmin) και ελάχιστη (Tmin) και το ύψος των βροχοπτώσεων (RR) κατά την 2^η πειραματική χρονιά (Σεπτέμβριος 2018 – Αύγουστος 2019) στην Αθήνα.

Πίνακας 4: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους του πειραματικού αγρού

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Άργιλος	20%	Ολικό N	0,2%
Ιλύς	14%	Διαθέσιμο P	153,5 mg kg ⁻¹
Άμμος	66%	Ανταλλάξιμο K	478 mg kg ⁻¹
pH	7,7	Οργανική ουσία	5%
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	710 μS cm ⁻¹	Ολικό CaCO ₃	15,98%

Χειμερινή καλλιεργητική περίοδος

Κατά τη διάρκεια των χειμερινών καλλιεργητικών περιόδων 2017-2018 & 2018-2019, οι εξής 4 διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές εφαρμόστηκαν στο πειραματικό αγρό: (1) βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου, (2) συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου, (3) βιολογική καλλιέργεια κουκιού, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως χλωρή λίπανση και (4) αγρανάπαυση. Επιπλέον, η καλλιέργεια του κουκιού υποδιαιρέθηκε σε 2 μεταχειρίσεις εμβολιασμού, ειδικότερα τα φυτά είτε εμβολιάστηκαν με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1, είτε παρέμειναν μη εμβολιασμένα.

Για την εγκατάσταση της καλλιέργειας του μπρόκολου (*Brassica oleracea* var. *italica*) επιλέχθηκε το μονοκέφαλο υβρίδιο 'Monrello' με πυκνότητα φύτευσης 6 φυτών m⁻². Σχετικά με την καλλιέργεια του κουκιού (*Vicia faba* L.), επιλέχθηκε παραδοσιακή ποικιλία με προέλευση από τη Λευκάδα, ενώ για την εγκατάσταση της καλλιέργειας ακολούθησε απευθείας σπορά στον αγρό με πυκνότητα 30 σπερμάτων m⁻². Η κάθε μεταχείριση (1, 2 και 4) επαναλήφθηκε 8 φορές, ενώ η εμβολιασμένη και η μη εμβολιασμένη καλλιέργεια κουκιού επαναλήφθηκε 4 φορές αντίστοιχα. Στο τέλος της χειμερινής καλλιεργητικής περιόδου τα υπολείμματα της καλλιέργειας μπρόκολου καθώς και η βιομάζα της καλλιέργειας του κουκιού και της αγρανάπαυσης ενσωματώθηκαν στο έδαφος σε βάθος 20 cm.

Κατά τη διάρκεια της πρώτης χειμερινής καλλιεργητικής περιόδου, τα σπορόφυτα μπρόκολου μεταφυτεύθηκαν στον πειραματικό αγρό στις 15 Οκτωβρίου 2017 και στα δύο καλλιεργητικά συστήματα. Την ίδια ημερομηνία, εμβολιασμένα και μη εμβολιασμένα σπέρματα κουκιού σπάρθηκαν στα αντίστοιχα πειραματικά τεμάχια. Στα τεμάχια της αγρανάπαυσης δεν εφαρμόστηκε καμία καλλιεργητική πρακτική και επιτράπη η ελεύθερη ανάπτυξη των γηγενών αυτοφυών ειδών καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο. Η συγκομιδή του βιολογικού και του συμβατικού μπρόκολου πραγματοποιήθηκε κατά το πρώτο δεκαπενθήμερο του Ιανουαρίου 2018, όταν οι ανθοκεφαλές λάμβαναν το εμπορικό τους στάδιο ωρίμανσης. Επιπλέον, η καλλιέργεια του κουκιού τερματίστηκε κατά το στάδιο της ανθοφορίας του φυτού και ενσωματώθηκε στο έδαφος στις 15 Φεβρουαρίου 2018. Παράλληλα την ίδια ημερομηνία, τα φυτικά υπολείμματα της καλλιέργειας μπρόκολου καθώς και η βιομάζα των τεμαχίων της αγρανάπαυσης ενσωματώθηκαν επίσης στο έδαφος. Τέλος, στις 5 Μαρτίου 2018, ο πειραματικός αγρός ήταν έτοιμος για την επακόλουθη εαρινή καλλιεργητική περίοδο.

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου, οι καλλιέργειες του μπρόκολου και του κουκιού εγκαταστάθηκαν στο πειραματικό αγρό στις 30 Οκτωβρίου 2018. Η συγκομιδή του μπρόκολου πραγματοποιήθηκε το δεύτερο δεκαπενθήμερο του Ιανουαρίου 2019, ενώ τα φυτά του κουκιού έφτασαν το στάδιο της ανθοφορίας στις 28 Φεβρουαρίου 2019. Η βιομάζα και τα φυτικά υπολείμματα των καλλιεργειών της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου ενσωματώθηκαν στις 5 Μαρτίου 2019. Η διαδικασία της ενσωμάτωσης περιλάμβανε τον τεμαχισμό της φυτικής βιομάζας και την αναμόχλευση του εδάφους εις διπλούν για την καλύτερη κατανομή της βιομάζας κατά την επιφάνεια και το βάθος του εδάφους. Τέλος, στις 30 Μαρτίου 2019, ο πειραματικός αγρός ήταν έτοιμος για την εγκατάσταση της επακόλουθης εαρινής καλλιεργητικής περιόδου.

Τα σχήματα θρέψης στο κάθε σύστημα καλλιέργειας εφαρμόστηκαν σύμφωνα με τις κοινές καλλιεργητικές πρακτικές. Στη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου, η βασική λίπανση κατά την πρώτη καλλιεργητική περίοδο περιλάμβανε πρόβεια κοπριά, η οποία παρείχε $9 \text{ kg N στρέμμα}^{-1}$, και Patentkali (30% K_2O , 10% MgO and 42,5% SO_3 , K+S AG) $40 \text{ kg στρέμμα}^{-1}$. Η σύσταση της ξηρής κοπριάς, η οποία προήλθε από πιστοποιημένο αγρόκτημα σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό (EC) No 834/2007, ως προς τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για τα φυτά είναι η εξής: 0,84% ολικό-N, 0,3% P_2O_5 , 0,7% K_2O , 0,38% CaO , and 0,24% MgO . Πέρα από τη βασική λίπανση, εφαρμόστηκε επιπλέον επιφανειακή λίπανση με οργανικό λίπασμα (7-4-7 + 2MgO + 0,2B), το οποίο παρείχε στη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου $4 \text{ kg N στρέμμα}^{-1}$. Στη συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου, η βασική λίπανση περιλάμβανε ένα κοκκώδες λίπασμα (11-15-15), το οποίο παρείχε $13,2 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$, $18 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ P}$ and $18 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ K}$. Επιπλέον, στη συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου πραγματοποιήθηκε υδρολίπανση με θρεπτικό διάλυμα (Θ.Δ. $9,6 \text{ mmol L}^{-1} \text{ N}$, $5 \text{ mmol L}^{-1} \text{ K}$), το οποίο παρείχε συνολικά $5,64 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$ καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο.

Κατά τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, η βασική λίπανση στη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου περιλάμβανε πρόβεια κοπριά η οποία παρείχε $12 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$ και $40 \text{ kg στρέμμα}^{-1}$ Patentkali, ενώ δεν ακολούθησε επιφανειακή λίπανση όπως στην αντίστοιχη καλλιέργεια κατά την πρώτη καλλιεργητική περίοδο. Στη συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου η βασική λίπανση (11-15-15) παρείχε $7,9 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$, $10,8 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ P}$ and $10,8 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ K}$, ενώ η υδρολίπανση παρείχε συνολικά $16 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$.

Επομένως, κατά την πρώτη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο στη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου εφαρμόστηκε λίπανση $13 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$ ενώ στην συμβατική $18,84 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$. Κατά τη δεύτερη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, η συνολική εισροή N στο βιολογικό μπρόκολο ανήλθε στα $12 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$, ενώ στο συμβατικό $23,92 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$, αντίστοιχα. Η αυξημένη αζωτούχος λίπανση στα συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου κατά τη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο οφείλεται στη σημαντικά μειωμένη κατακρήμιση. Δεδομένου πως η περιορισμένη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος κατά τα πρώτα βλαστικά στάδια ανάπτυξης του φυτού δύναται να περιορίσουν την έκπτυξη φυματίων στα ψυχανθή, στην καλλιέργεια του κουκιού εφαρμόστηκε χαμηλών εισροών ($4 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$) βασική λίπανση που περιλάμβανε πρόβεια κοπριά. Τέλος, στάγδην άρδευση εφαρμόστηκε επίσης στις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, όταν η κατακρήμιση δεν κάλυπτε τις ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό.



Εικόνα 1: Πειραματικός αγρός κατά τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο.

Εαρινή καλλιεργητική περίοδος

Κατά την επακόλουθη εαρινή καλλιεργητική περίοδο, για την καλλιέργεια του φασολιού επιλέχθηκε η αναρριχώμενη ποικιλία Borlotto. Στα πειραματικά τεμάχια των μεταχειρίσεων 1, 3 και 4 εγκαταστάθηκε βιολογική καλλιέργεια φασολιού, ενώ στα πειραματικά τεμάχια της μεταχείρισης 2 εγκαταστάθηκε συμβατική καλλιέργεια φασολιού αντίστοιχα. Παράλληλα, στις μεταχειρίσεις 1, 2 και 4 η επακόλουθη καλλιέργεια φασολιού είτε εμβολιάστηκε με το εμπορικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 είτε όχι. Επιπλέον, την εμβολιασμένη και μη εμβολιασμένη καλλιέργεια κουκιάς κατά την χειμερινή καλλιεργητική περίοδο ακολούθησε η εμβολιασμένη και η μη εμβολιασμένη καλλιέργεια φασολιού, αντίστοιχα. Η πυκνότητα φύτευσης του φασολιού ήταν 6 φυτά m⁻². Η επισκόπηση του πειραματικού σχεδιασμού του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών παρέχεται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Πειραματικός σχεδιασμός του προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών.

Χειμερινή περίοδος			Εαρινή περίοδος	
Μεταχειρίσεις	Επαναλήψεις		Μεταχειρίσεις	Επαναλήψεις
Βιολογικό μπρόκολο (1)	8	→ Εμβολ.	Βιολογικό φασόλι	4
		→ Μη εμβολ.		4
Συμβατικό μπρόκολο (2)	8	→ Εμβολ.	Συμβατικό φασόλι	4
		→ Μη εμβολ.		4
Εμβολιασμένο κουκί (3α)	4	→ Εμβολ.	Βιολογικό φασόλι	4
Μη εμβολιασμένο κουκί (3β)	4	→ Με εμβολ.		4
Αγρανάπαυση (4)	8	→ Εμβολ.	Βιολογικό φασόλι	4
		→ Μη εμβολ.		4

Κατά την διάρκεια την πρώτης καλλιεργητικής περιόδου, η βιολογική και η συμβατική καλλιέργεια φασολιού εγκαταστάθηκαν στις 20 Μαρτίου 2018. Επιπλέον, τα φυτά έφτασαν στο στάδιο της ανθοφορίας στις 30 Απριλίου 2018, ενώ η περίοδος συγκομιδής διήρκεσε από 10 Μαΐου 2018 έως 30 Ιουνίου 2018. Κατά την δεύτερη καλλιεργητική περίοδο οι καλλιέργειες εγκαταστάθηκαν στις 25 Απριλίου 2019. Εν

συνεχία, τα φυτά έφτασαν το στάδιο της ανθοφορίας στις 5 Ιουνίου 2019, ενώ η συγκομιδή της καλλιέργειας διήρκησε από 15 Ιουνίου 2019 έως και 5 Αυγούστου 2019. Για την στάγδην άρδευση των φυτών, εγκαταστάθηκε ένα ανεξάρτητα αρδευτικό σύστημα για το κάθε σύστημα καλλιέργειας (συμβατικό-βιολογικό).

Στην βιολογική καλλιέργεια φασολιού, η βασική λίπανση περιλάμβανε πρόβεια κοπριά, η οποία παρείχε $4 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$, και $75 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ Patentkali}$, ενώ δεν πραγματοποιήθηκε περαιτέρω επιφανειακή λίπανση. Αντίθετα, στη συμβατική καλλιέργεια φασολιού, η βασική λίπανση (11-15-15) παρείχε $5,5 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$, ενώ η επιφανειακή λίπανση (ΘΔ: $3 \text{ mmol L}^{-1} \text{ N}$ και $5.1 \text{ mmol L}^{-1} \text{ K}$) εφαρμόστηκε κατά τα στάδια ανθοφορίας και παραγωγής και παρείχε συνολικά $2 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$. Επομένως, οι συνολικές εξωτερικές εισροές N στη συμβατική και βιολογική καλλιέργεια φασολιού ανήλθαν σε $7,5$ και $4 \text{ kg στρέμμα}^{-1} \text{ N}$, αντίστοιχα. Τέλος, κατά την διάρκεια του διετούς προγράμματος εφαρμόστηκαν μόνο βιολογικές φυτοπροστατευτικές πρακτικές, ενώ ο έλεγχος των ζιζανίων πραγματοποιήθηκε με χειρωνακτική εξαγωγή όταν ήταν απαραίτητη.



Εικόνα 2: Πειραματικός αγρός κατά την εαρινή καλλιεργητική περίοδο

3.1.2. Εμβολιασμός με ριζόβια

Για τον εμβολιασμό των κουκιών, χρησιμοποιήθηκε το αζωτοδεσμευτικό στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1, το οποίο απομονώθηκε από το Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Μικροβιολογίας από φυμάτια της παραδοσιακής ποικιλίας που καλλιεργήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη (Efstathiadou et al., 2020). Η διαδικασία του εμβολιασμού περιλάμβανε την κάλυψη των σπερμάτων σε αραβικό κόμμι (προσκολλητικό υλικό), ενώ ακολούθησε η εμβάπτιση των σπερμάτων σε υγρή καλλιέργεια του παραπάνω στελέχους (10^9 cfu/ml). Τέλος, τα εμβολιασμένα σπέρματα σπάρθηκαν σε καλά ποτισμένο έδαφος.

Για τον εμβολιασμό του φασολιού, επιλέχθηκε το εμπορικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899, με προέλευση από τη Βραζιλία. Πριν από τον εμβολιασμό, τα σπέρματα του φασολιού τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) για ριζοβολία. Στη συνέχεια, τα ριζοβολημένα σπέρματα εμβαπτίστηκαν σε υγρή καλλιέργεια του παραπάνω στελέχους (10^9 cfu/ml) και έπειτα μεταφυτεύθηκαν σε δίσκους σποράς, όπου και παρέμειναν έως την τελική τους μεταφύτευση στο πειραματικό αγρό.

3.1.3. Χαρακτηρισμός ανάπτυξης και παραγωγής

Κατά το στάδιο της ανθοφορίας, καταγράφηκε το νωπό βάρος των φυτών των (g φυτό^{-1}) των κουκιών (5 φυτά/επανάληψη) και των φασολιών (3 φυτά/επανάληψη). Το ξηρό βάρος των φυτών (g φυτό^{-1}) υπολογίστηκε μέσω της ξήρανσης των δειγμάτων στους $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ για 5 ημέρες.

Για την αξιολόγηση της παραγωγής του μπρόκολου, καταγράφηκε το νωπό βάρος (g φυτό^{-1}) και το ποσοστό ξηράς ουσίας των συγκομιζόμενων ανθοκεφαλών. Σχετικά με την καλλιέργεια του φασολιού, πραγματοποιούνταν μία συγκομιδή ανά εβδομάδα κατά την οποία συλλέγονταν μόνο οι λοβοί που είχαν αποκτήσει το εμπορικό τους μέγεθος. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 9 και 8 συγκομιδές κατά την πρώτη και δεύτερη εαρινή καλλιεργητική περίοδο, αντίστοιχα. Για τον χαρακτηρισμό της παραγωγής φασολιού προσδιορίστηκε το νωπό βάρος των λοβών (g φυτό^{-1}).

3.1.4. Ανάλυση εδάφους

Εδαφικά δείγματα από όλα τα πειραματικά τεμάχια συλλέχθηκαν σε βάθος 0-15 cm. κατά τα κρίσιμα αναπτυξιακά στάδια των καλλιεργειών. Ειδικότερα, κατά τη

διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου, τα δείγματα συλλέχθηκαν κατά τα στάδια έκπτυξης των ανθοκεφαλών, κατά τον τερματισμό της καλλιέργειας μπρόκολου και κατά το στάδιο της ανθοφορίας των φυτών των κουκιών (50, 90 και 120 ημέρες μετά την εγκατάσταση των χειμερινών καλλιεργειών). Κατά τη δεύτερη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, η συλλογή των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε (α) πριν από την εγκατάσταση των καλλιεργειών, (β) μετά από την εγκατάσταση της βασικής λίπανσης, (γ) κατά την έκπτυξη των ανθοκεφαλών, κατά τον τερματισμό της καλλιέργειας μπρόκολου, (δ) κατά την ανθοφορία των κουκιών καθώς και (ε) μετά την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των χειμερινών καλλιεργειών). Κατά την πρώτη εαρινή καλλιεργητική περίοδο, εδαφικά δείγματα συλλέχθηκαν μετά από την εγκατάσταση της βασικής λίπανσης, κατά το στάδιο ανθοφορίας του φασολιού, κατά το στάδιο παραγωγής και κατά το πέρας της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 ημέρες μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας). Τέλος, η δειγματοληψία εδάφους κατά τη δεύτερη εαρινή καλλιεργητική περίοδο πραγματοποιήθηκε πριν από την εγκατάσταση βασικής λίπανσης, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά το στάδιο ανθοφορίας του φασολιού, κατά το στάδιο παραγωγής και κατά το πέρας της καλλιέργειας (0, 10, 40, 80 και 100 ημέρες μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας).

Τα εδαφικά δείγματα ξηράθηκαν στους 40 °C για τουλάχιστον 3 ημέρες, μέχρι τη σταθεροποίηση του ξηρού του βάρους, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε φιλτράρισμα των δειγμάτων (σίτα 2 mm). Για τον προσδιορισμό του διαθέσιμου N ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$), τα δείγματα εκχυλίστηκαν με διάλυμα KCl 1M (Keeney & Nelson, 1982). Ο προσδιορισμός των $\text{NO}_3\text{-N}$ και $\text{NH}_4\text{-N}$ στα εκχυλίσματα εδάφους πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου Στηλών Επιχαλκωμένου Καδμίου και της Μπλε Ινδοφαινόλης, αντίστοιχα (Keeney & Nelson, 1982). Επιπλέον, τα εδαφικά δείγματα εκχυλίστηκαν μέσω της μεθόδου Mehlich III (Mehlich, 1984) για τον προσδιορισμό του P (Murphy & Riley, 1962) και K (φλογοφωτομετρία). Ο προσδιορισμός της οργανικής ουσίας προσδιορίστηκε μέσω της μεθόδου υγρής καύσης (Walkey & Black, 1934).

3.1.5. Προσδιορισμός αζωτοδεσμευτικής ικανότητας και ολικού N

Δείγματα φυτικών ιστών από τα φυτά του κουκιού και του φασολιού συλλέχθηκαν κατά το στάδιο της ανθοφορίας για τον προσδιορισμό της αζωτοδεσμευτικής τους ικανότητας και συγκέντρωσής τους σε ολικό N. Τα ποσά του

N που προήλθαν από την ατμόσφαιρα εκτιμήθηκαν μέσω της μεθόδου της φυσικής αφθονίας του ισοτόπου ^{15}N . Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ^{15}N στους φυτικούς ιστούς πραγματοποιήθηκε στο Stable Isotope Facility of UC-Davis, CA, USA, μέσω ενός στοιχειακού αναλυτή (EA) συνδεδεμένο με φασματοφωτόμετρο μάζας αναλογίας ισοτόπων συνεχούς ροής (EA-IRMS, Europa Scientific, Crewe, UK). Οι εκτιμώμενες συγκεντρώσεις χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της απόκλισης ($\delta^{15}\text{N}$) μεταξύ της αφθονίας του ισοτόπου ^{15}N στους φυτικούς ιστούς και στην ατμόσφαιρα (0.3663% ^{15}N) (Junk & Svec, 1958). Ειδικότερα, οι τιμές $\delta^{15}\text{N}$ υπολογίστηκαν μέσω της παρακάτω εξίσωσης (Bedard-Haughn et al., 2003):

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \frac{\text{atom}\%^{15}\text{N sample} - 0.03663}{0.3663} * 100$$

Ο προσδιορισμός του N που προήλθε από την ατμόσφαιρα ($\text{Ndfa}(\%)$) στα ψυχανθή υπολογίστηκε μέσω των τιμών $\delta^{15}\text{N}$ των υπό μελέτη ψυχανθών και ενός φυτού μη ψυχανθές (φυτό μάρτυρας) ίδιας ηλικίας που αναπτύσσεται στο ίδιο έδαφος με το υπό μελέτη ψυχανθές (Unkovich et al., 2008):

$$\text{Ndfa}(\%) = \frac{\delta^{15}\text{N μάρτυρα} - \delta^{15}\text{N ψυχανθούς}}{\delta^{15}\text{N μάρτυρα} - B} * 100$$

όπου B οι τιμές $\delta^{15}\text{N}$ του αντίστοιχου ψυχανθούς όταν αυτό αναπτύσσεται κάτω από μηδενικές εισροές αζώτου. Σε αυτήν τη μελέτη η τιμή που χρησιμοποιήθηκε για το φασόλι ήταν (-2,16) και για το κουκί (-0,5), οι οποίες προσδιορίστηκαν βιβλιογραφικά (Unkovich et al., 2008). Ως φυτό μάρτυρας χρησιμοποιήθηκε το φυτό του είδους *Ailanthus altissima* sp. το οποίο συλλέχθηκε από τα πειραματικά τεμάχια των διαφορετικών μεταχειρίσεων της καλλιέργειας κουκιού και φασολιού, αντίστοιχα.

Τα συνολικά ποσά N που δέσμευσε η εκάστοτε καλλιέργεια από την ατμόσφαιρα (BNF , kg N στρέμμα $^{-1}$) υπολογίστηκαν από την παρακάτω εξίσωση (Collino et al., 2015):

$$\text{BNF (kg/στρέμμα)} = N(\%) * \text{Ndfa}(\%) * (\text{EB}(\text{tn/στρέμμα}))/100$$

όπου EB η ξηρή βιομάζα της καλλιέργειας του υπό μελέτη ψυχανθούς.

3.1.6. Στατιστική ανάλυση δεδομένων

Κατά τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, εφαρμόστηκε one-way (μονοπαραγοντική) ANOVA ανάλυση για την μελέτη των κύριων επιδράσεων των 4

διαφορετικών καλλιεργειών στη γονιμότητα του εδάφους καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Παράλληλα, one-way ANOVA ανάλυση διεξήχθη επίσης για τη μελέτη της επίδρασης των δύο διαφορετικών συστημάτων καλλιέργειας στην απόδοση του μπρόκολου καθώς και της επίδρασης του εμβολιασμού με ριζόβια στην ανάπτυξη και αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού του κουκιού. Για την εαρινή καλλιεργητική περίοδο εφαρμόστηκε μία two-factorial (διπαραγοντική) ANOVA ανάλυση για την αξιολόγηση της επίδρασης των διαφορετικών συστημάτων καλλιέργειας (παράγοντας A) και του εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια (παράγοντας B) στην ανάπτυξη, απόδοση και αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φασολιού. Οι μέσες τιμές των διαφορετικών μεταχειρίσεων διαχωρίστηκαν μέσω του Duncan's Multiple Range Test όταν η ANOVA ανάλυση οδήγησε σε στατιστικώς σημαντικές αποκλίσεις ($p < 0,05$). Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού STATISTICA 12.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

3.2. Επίδραση διαφορετικών προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στα χαρακτηριστικά παραγωγής και στην ποιότητα του φασολιού.

3.2.1. Πειραματικός σχεδιασμός

Ο πειραματικός σχεδιασμός καθώς και οι εφαρμοσμένες καλλιεργητικές πρακτικές περιγράφονται στην ενότητα 2.1.1. Ωστόσο, στη παρούσα μελέτη περίπτωσης αξιολογήθηκε ο αντίκτυπος της καλλιέργειας κουκιού ως χλωρή λίπανση, της βιολογικής και της συμβατικής καλλιέργειας μπρόκολου στα χαρακτηριστικά παραγωγής καθώς και την ποιότητα των παραγόμενων νωπών λοβών της επακόλουθης καλλιέργειας φασολιού. Επομένως, η συνεισφορά της αγρανάπαυσης και του εμβολιασμού των ψυχανθών του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών στα παραπάνω μεγέθη δεν αποτελούν αντικείμενο αυτής της έρευνας. Επιπλέον, δεδομένου πως οι ευεργετικές επιδράσεις των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών εμφανίζονται μακροπρόθεσμα, ο χαρακτηρισμός της ποιότητας των παραγόμενων λοβών πραγματοποιήθηκε μόνο κατά το δεύτερο έτος του προγράμματος. Η σύνοψη των υπό μελέτη μεταχειρίσεων παρατίθεται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Πειραματικός σχεδιασμός των επιμέρους εναλλαγών καλλιεργειών. Τα Κ, ΥΜ, ΧΛ και ΣΜ, υποδηλώνουν την πρόβεια κοπριά, υπολείμματα καλλιέργεια μπρόκολου, χλωρή λίπανση και υπολείμματα συμβατικής καλλιέργειας μπρόκολου, αντίστοιχα.

Χειμερινή καλλιεργητική περίοδος		Εαρινή καλλιεργητική περίοδος	
Βιολογικό Μπρόκολο	(α) →	(Κ+ΒΜ)	Βιολογικό φασόλι
Χλωρή λίπανση	(β) →	(Κ+ΧΛ)	
Συμβατικό μπρόκολο	(γ) →	(ΣΜ)	Συμβατικό φασόλι

3.2.2. Δειγματοληψίες

Κατά το μέγιστο ρυθμό απόδοσης παραγωγής, νωποί λοβοί συγκομίσθηκαν αφού είχαν λάβει το εμπορικό τους μέγεθος. Αμέσως μετά τη συγκομιδή τους, τυχαία συλλεχθέντες λοβοί αποθηκεύθηκαν σε βαθιά κατάψυξη (-80 °C) για την προσδιορισμό της περιεκτικότητας τους σε βιοχημικές ενώσεις και υδατάνθρακες, ενώ οι υπόλοιποι λοβοί χαρακτηρίστηκαν για τις μορφολογικές τους ιδιότητες και την θρεπτική τους σύσταση.

3.2.3. Περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία και φυσικά χαρακτηριστικά λοβών

Κατά τη συγκομιδή, καταγράφηκε ο αριθμός των λοβών (N φυτό⁻¹) και το συνολικό νωπό τους βάρος και έπειτα, με βάση τα παραπάνω δεδομένα, εκτιμήθηκε και το μέσο νωπό βάρος του λοβού (g λοβό⁻¹). Επιπλέον, δεδομένα από 10 τυχαίους λοβούς ανά πειραματικό τεμάχιο επίσης καταγράφηκαν και υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές για τις παρακάτω παραμέτρους, όπως αυτές προτείνονται από τους Escríbano et al. (1997): μήκος λοβού (ΜΛ, μήκος τόξου λοβού) (cm), ύψος λοβού (ΥΛ, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των 2 άκρων του λοβού) (cm), καμπυλότητα (ΜΛ/ΥΛ), πάχος (cm) και αριθμός σπερμάτων ανά λοβό. Στη συνέχεια, οι νωποί λοβοί ξηράθηκαν στους 65 °C για 5 ημέρες για τον προσδιορισμό του ποσοστού της ξηράς ουσίας (Ξ.Ο.) (%). Οι ξηροί λοβοί κονιορτοποιήθηκαν και στη συνέχεια αποτεφρώθηκαν στους 550 °C για 8 ώρες· έπειτα η τέφρα εκχυλίστηκε με διάλυμα 0,5 N HCl. Στα παραπάνω εκχυλίσματα προσδιορίστηκε ο P (Murphy & Riley, 1962) και το Κ (φλογοφωτομετρία Sherwood Model 410, Cambridge, UK), ενώ τα μακρο- και μικροστοιχεία Ca, Mg, Zn, Fe, Cu και Mn προσδιορίστηκαν μέσω ατομικής απορρόφησης (AA-7000, Shimadzu Co., Tokyo,

Japan). Τέλος, ο προσδιορισμός του ολικού N στη λειοτριβημένη ξηρή βιομάζα των λοβών πραγματοποιήθηκε κατά τη μέθοδο Kjeldhal (Bremmer, 1965) (Kjeltec™ 8200 Auto Distillation unit).

3.2.4. Βιοχημικές ιδιότητες

Μέθοδος εκχύλισης

Δέκα νωποί λοβοί ανά επανάληψη μεταχείρισης ξηράθηκαν μέσω χαμηλής θερμοκρασίας και κονιοροποιήθηκαν. Στη συνέχεια, 50 μg από κάθε δείγμα διαλύθηκαν σε 1 ml καθαρής μεθανόλης. Έπειτα τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε λουτρό υπέρυθρων στους 5 °C σε συνθήκες σκότους για 40 λεπτά. Επιπλέον, τα δείγματα φυγοκεντρήθηκαν για 10 λεπτά (11.000 rpm) και συλλέχθηκε το υπερκείμενο υγρό. Η παραπάνω διαδικασία εκχύλισης επαναλήφθηκε εις διπλούν και τα υπερκείμενα συγχωνεύθηκαν και αποθηκεύτηκαν στους -20 °C. Τέλος, τα υπερκείμενα εξατμίστηκαν και τα ιζήματα επαναδιαλύθηκαν σε κατάλληλο όγκο μεθανόλης για τη συμπίκνωση των δειγμάτων σε 1 mg βιομάζας ml⁻¹.

Προσδιορισμός Αντιοξειδωτικών αναλύσεων

Η αντιοξειδωτική ικανότητα των παραπάνω εκχυλισμάτων προσδιορίστηκε μέσω των μεθόδων Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) (Benzie & Strain, 1999) και Trolox-Equivalent Antioxidant Capacity (TEAC) (Re et al., 1999). Κατά την FRAP, 10 μl εκχυλίσματος διαλύθηκαν σε 190 μl αντιδραστηρίου FRAP (10 mM TPTZ, 300 mM acetate buffer pH 3,6 and 20 mM FeCl₃ (1:10:1)) και η απορρόφηση μετρήθηκε στα 593 nm. Για την καμπύλη αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ασκορβικό οξύ και τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε mg ισοδύναμου ασκορβικού οξέος g⁻¹ ξηρής βιομάζας. Σχετικά με τη μέθοδο TEAC, παρασκευάστηκε αντιδραστήριο ABTS+ (7 mM ABTS, 2,45 mM potassium persulfate και 4 mM ammonium molybdate) το οποίο παρέμεινε σε θερμοκρασία δωματίου για 16 ώρες μέχρι να αναπτυχθεί ένα βαθύ μπλε χρώμα. Στη συνέχεια, το αντιδραστήριο αραιώθηκε με απεσταγμένο νερό έως ότου η απορρόφηση του στα 734 nm να ισούται με 0,7±0,02. Έπειτα, 10 μl του εκχυλίσματος αναμείχθηκε με 200 μl του παραπάνω αντιδραστηρίου και ακολούθησε επώαση για 10 λεπτά στους 30 °C. Η απορρόφηση διαβάστηκε στα 734 nm έναντι ενός διαλύματος μεθανόλης : νερού. Για την καμπύλη αναφοράς το trolox διαλύθηκε σε μεθανόλη σε διάφορες συγκεντρώσεις και τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε mg ισοδύναμου trolox g⁻¹ ξηρής βιομάζας.

Ολικά φαινολικά (TPC)

Ο προσδιορισμός των ολικών φαινολικών πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου Folin-Ciocalteu (Jan et al., 2008). Ειδικότερα, 10 μl εκχυλίσματος αναμίχθηκαν με 95 μl of 10 % Folin-Ciocalteu και 95 μL 0,5 M Na₂CO₃. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν για 2 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου και συνθήκες σκότους και η απορρόφηση διαβάστηκε στα 765 nm. Διαφορετικές ποσότητες gallic acid διαλύθηκαν σε μεθανόλη για την καμπύλη αναφοράς και τα αποτελέσματα εκφράστηκαν ως mg ισοδύναμου gallic acid g⁻¹ ξηρής βιομάζας.

Ολικά φλαβονοειδή

Ο προσδιορισμός των ολικών φλαβονοειδών πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου Aluminum Chloride (Safafar et al., 2015). Ειδικότερα, 20 μl εκχυλίσματος διαλύθηκαν σε 160 μl οξυνισμένης μεθανόλης (5% v/v acetic acid). Έπειτα προστέθηκαν 20 μl 2% AlCl₃ και τα δείγματα επωάστηκαν για 30 λεπτά σε συνθήκες σκότους. Η απορρόφηση διαβάστηκε στα 415 nm. Για την καμπύλη αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν μεθανολικά διαλύματα με διαφορετική συγκέντρωση σε quercetin, ενώ τα αποτελέσματα αποδόθηκαν σε mg ισοδύναμου quercetin g⁻¹ ξηρής βιομάζας.

3.2.5. Άμυλο και σάκχαρα

Για τη μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών καλλιεργητικών συστημάτων στα επίπεδα σακχάρων των λοβών, πραγματοποιήθηκε ενζυμικός προσδιορισμός της γλυκόζης, φρουκτόζης και σακχαρόζης (Spackman & Cobb, 2002). Κατά την εκχύλιση, 20 μg ξηρού δείγματος διαλύθηκαν σε 0,75 ml αιθανόλης (80% v/v), ενώ στη συνέχεια τα διαλύματα τοποθετήθηκαν σε λουτρό υπερήχων στους 25 °C για 40 λεπτά. Στη συνέχεια, τα δείγματα φυγοκεντρήθηκαν και τα υποκείμενα αποθηκεύτηκαν στους -20 °C. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε εις διπλούν και τα υπερκείμενα συγχωνεύτηκαν. Το εναπομένον ίζημα ξηράθηκε και αποθηκεύτηκε στους -20 °C για τον προσδιορισμό του αμύλου. Ο ενζυμικός προσδιορισμός των σακχάρων βασίζεται στην αναγωγή του NAD σε NADH, του οποίου η απορρόφηση μετρήθηκε στα 340 nm.

Για τον προσδιορισμό της γλυκόζης, στα 20 μl εκχυλίσματος προστέθηκαν σε 200 μl διαλύματος (master mix: 50 mM HEPES, 1.2 U G6PDH, 2 μmol ATP, 15 μmol Mg²⁺ and 1.2 μmol NADP) και 2 μl hexokinase (250 U/ml). Η απορρόφηση διαβάστηκε στα 340 nm μετά 60 λεπτά, έως ότου να σταθεροποιηθεί (Anthos Zenyth 200; Biochrom, Cambridge, United Kingdom). Για τον προσδιορισμό, της φρουκτόζης, 2 μl PGI

(584 U/ml) προστέθηκε στο παραπάνω μίγμα, το οποίο μετατρέπει τη φρουκτόζη σε γλυκόζη και συνεπώς ακολουθεί η ίδια διαδικασία για τον προσδιορισμό της γλυκόζης. Ομοια, στα δείγματα προστίθενται 2 μl Invertase (2500 U/ml) για τη μετατροπή της σακχαρόζης σε γλυκόζη. Για την ποσοτικοποίηση των επιμέρους σακχάρων, χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα με διαφορετική συγκέντρωση σε γλυκόζη.

Ο προσδιορισμός του αμύλου πραγματοποιήθηκε επίσης ενζυμικά όπως αυτός περιγράφεται από τους Smith & Zeeman (Smith & Zeeman, 2006). Τα αποξηραμένα ιζήματα επαναδιαλύθηκαν σε 0,3 ml απεσταγμένου νερού και επώαστηκαν για 3 ώρες στους 120 °C. Στη συνέχεια, για την υδρόλυση του αμύλου στα δείγματα προστέθηκαν 0,5 ml μίγματος 200 mM Na acetate, 12 U ml⁻¹ Amyloglucosidase and 2 U ml⁻¹ α-amylase και τα δείγματα επώαστηκαν στους 37 °C για 16 ώρες. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε και τα συλλεχθέντα υπερκείμενα συγχωνεύτηκαν. Για τον προσδιορισμό της γλυκόζης στα διαλύματα εφαρμόστηκε η ενζυμική μέθοδος που περιγράφεται παραπάνω και τα αποτελέσματα εκφράστηκαν ως mg ισοδύναμου ανυδρογλυκόζης g⁻¹ ξηρής βιομάζας.

3.2.6. Στατιστική ανάλυση δεδομένων

Στην παρούσα μελέτη, για τον προσδιορισμό της επίδρασης των 3 διαφορετικών καλλιεργητικών συστημάτων στα χαρακτηριστικά παραγωγής και ποιότητας των νωπών λοβών φασολιού εφαρμόστηκε one-way (μονοπαραγοντική) ANOVA ανάλυση. Οι μέσες τιμές ανά μεταχείριση διαχωρίστηκαν μέσω του Duncan's Multiple Range Test όταν η ANOVA ανάλυση οδήγησε σε στατιστικώς σημαντικές αποκλίσεις ($p < 0,05$). Η ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA) εφαρμόστηκε σε όλες τις υπό μελέτη παραμέτρους. Τέλος, για την ANOVA και PCA ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό IBM® SPSS® Statistics.

3.3. Απόδοση υδροπονικού φασολιού υπό ελλειμματική παροχή αζώτου και εμβολιασμού με ριζόβια.

3.3.1. Πειραματικός σχεδιασμός

Σε αυτήν τη μελέτη περίπτωσης το φασόλι (*Phaseolus vulgaris* sp.) καλλιεργήθηκε υδροπονικά κάτω από διαφορετικά σχήματα θρέψης σε άζωτο. Η υδροπονική καλλιέργεια πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο Οκτώβρη-Δεκέμβρη 2020 στις πειραματικές εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Κηπευτικών Καλλιεργειών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ειδικότερα, κατά τα βλαστικά στάδια

ανάπτυξης (μεταφύτευση-ανθοφορία) στα φυτά χορηγήθηκε θρεπτικό διάλυμα (ΘΔ) που κάλυπτε το 100% (α), 75% (β) και 50% (γ) των αναγκών των φυτών σε άζωτο. Ωστόσο, κατά το στάδιο της παραγωγής η παροχή αζώτου στις μεταχειρίσεις (β) και (γ) μειώθηκε στο 25% των αναγκών των φυτών. Τα διαφορετικά σχήματα θρέψης υποδιαιρέθηκαν σε 3 διαφορετικές μεταχειρίσεις εμβολιασμού των φυτών με αζωτοδεσμευτικά στελέχη. Πιο συγκεκριμένα, τα φυτά εμβολιάστηκαν είτε με το εμπορικό στέλεχος *Rhizonium tropici* CIAT 899, είτε με το στέλεχος *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21, ένα γηγενές ριζόβιο που προέρχεται από το νησί της Τήνου (Efstathiadou et al., 2021) είτε δεν εμβολιάστηκαν με κάποιο αζωτοδεσμευτικό στέλεχος. Ο συνδυασμός των παραπάνω παραγόντων οδήγησε σε 9 μεταχειρίσεις, όπου η κάθε μεταχείριση αποτελείται από 6 επαναλήψεις.

Για την καλλιέργεια του φασολιού επιλέχθηκε η αναρριχώμενη ποικιλία Borlotto. Τα φυτά καλλιεργήθηκαν υπό ανοικτό υδροπονικό σύστημα σε υαλόφρακτο θερμοκήπιο, το οποίο περιλάμβανε 9 διαφορετικά υδροπονικά κανάλια. Η κάθε διαφορετική μεταχείριση αζώτου αντιστοιχούσε σε 3 κανάλια, ενώ κάθε κανάλι φιλοξενούσε όλες τις μεταχειρίσεις εμβολιασμού. Σάκοι υδροπονικού περλίτη (33 L) χρησιμοποιήθηκαν ως υπόστρωμα, ενώ σε κάθε κανάλι τοποθετήθηκαν 6 σάκοι (2 σάκοι ανά μεταχείριση εμβολιασμού).

3.3.2. Εγκατάσταση καλλιέργειας

Σπέρματα φασολιού τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας (23-26°C) για ριζοβολία. Μετά από 4 ημέρες, τα σπέρματα είτε εμβολιάστηκαν με ένα από τα 2 υπό μελέτη ριζόβια είτε δεν εμβολιάστηκαν. Έπειτα, τα σπέρματα μεταφυτεύθηκαν σε εμποτισμένους με ΘΔ σάκους περλίτη. Για τις 2 πρώτες ημέρες, δεν εκτελέστηκε άρδευση των σπερμάτων για την αποφυγή έκπλυσης των εμβολίων και επομένως της αποτυχίας του εμβολιασμού. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν εγκοπές στη βάση των σάκων για να επιτραπεί η ελεύθερη διέλευση του πλεονάζοντος ΘΔ (Savvas et al., 2013). Η παροχή ΘΔ πραγματοποιήθηκε μέσω στάγδην άρδευσης με ρυθμό 2 L ανά ώρα. Η συχνότητα άρδευσης καθοριζόταν μέσω ενός ηλιομέτρου συναρτήσεως του αναπτυξιακού σταδίου των φυτών για την επίτευξη ενός κλάσματος απορροής ΘΔ 30%. Το κλάσμα απορροής, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH καταγράφοντας σε καθημερινή με βάση τα οποία πραγματοποιήθηκαν τυχόν αναπροσαρμογές στο ΘΔ.

Για τον εμβολιασμό των φυτών, χρησιμοποιήθηκαν το εμπορικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899, με προέλευση από τη Βραζιλία, και το στέλεχος *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21, με προέλευση από το νησί της Τήνου, το οποίο απομονώθηκε από το Εργαστήριο Γενικής και Γεωργική Φαρμακολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (Efstathiadou et al., 2021). Κατά τον εμβολιασμό, τα σπέρματα εμβαιπίστηκαν σε υγρή καλλιέργεια (10^9 cfu ml⁻¹) του κάθε στελέχους αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, για την εξασφάλιση ενός επιτυχημένου εμβολιασμού, 7 ημέρες μετά τη μεταφύτευση, πραγματοποιήθηκε ριζοπότισμα των σποροφύτων (10 ml φυτό⁻¹) με την αντίστοιχη υγρή καλλιέργεια βακτηρίων (10^8 cfu ml⁻¹).

Το ΘΔ που χορηγείται στα φυτά κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης περιείχε 13,8 mM N (12,6 mM NO₃-N + 1,2 mM NH₄-N), 10,35 mM N (9,15 mM NO₃-N + 1,2 mM NH₄-N) ή 6,9 mM N (5,7 mM NO₃-N + 1,2 mM NH₄-N), το οποίο κάλυπτε το 100%, το 75% και 50% των αναγκών των φυτών σε N. Η μειωμένη παροχή ανιόντων (NO₃-N) στα ΘΔ των ελλειμματικών μεταχειρίσεων σε N αντισταθμίστηκε με την ισοδύναμη αύξηση της συγκέντρωσης των SO₄⁻ and Cl⁻. Κατά την παραγωγή, όπου η παροχή του N των ελλειμματικών μεταχειρίσεων μειώθηκε στο 25% (3.135 mM NO₃-N + 0,315 mM NH₄-N), η περαιτέρω μείωση παροχής ανιόντων αντισταθμίστηκε με την ισοδύναμη μείωση της συγκέντρωσης Ca²⁺. Η παραπάνω προσαρμογή αποδίδεται στην ευαισθησία του φασολιού σε υψηλά επίπεδα Cl⁻ (Le et al., 2021) και στις ευεργετικές επιδράσεις της μειωμένης παροχής Ca²⁺ στην αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού (Vassileva et al., 2008). Εξάλλου, σε καλλιέργειας εδάφους, η μειωμένη παροχή N συχνά συνδέεται και με τη μειωμένη παροχή Ca²⁺, δεδομένου πως το αμμωνιακό νιτρικό ασβέστιο αποτελεί το πιο ευρέως εφαρμοζόμενο αζωτούχο λίπασμα (Ovacikli & Tolay, 2020). Επιπλέον, λόγω της ανεπιθύμητης αύξησης του pH στην απορροή σε όλες τις διαφορετικές μεταχειρίσεις N κατά τη διάρκεια της παραγωγής η χημική σύσταση του ΘΔ αναπροσδιορίστηκε (100 % N: 12 mM NO₃-N + 1,8 mM NH₄-N, 25 % N: 2,3mM NO₃-N, 1,15 mM NH₄-N), μέσω της αλλαγής του λόγου NO₃-N : NH₄-N που αποτελεί μια κοινή πρακτική ελέγχου του pH στη ριζόσφαιρα των υδροπονικά καλλιεργούμενων φυτών (Savvas et al., 2015; Dickson et al., 2016). Λαμβάνοντας υπόψη, την ποσοστιαία μείωση του N των διαφορετικών μεταχειρίσεων καθώς και τη διάρκεια εφαρμογής των διαφορετικών ΘΔ, στα σχήματα θρέψης 75-25% και 50-25% N εξοικονομήθηκαν συνολικά εξωτερικές εισροές N κατά 53% και 64% αντίστοιχα. Η χημική σύσταση καθώς και η διάρκεια παροχής των εφαρμοσμένων ΘΔ παρέχεται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Χημική σύσταση των διαφορετικών ΘΔ. ΗΜΕΚ υποδηλώνει τον αριθμό την ημερών μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας.

NS		100% N	75% N	50% N	25% N	100% N	25% N
ΗΜΕΚ		0-50	0-35	0-35	35-50	50-80	50-80
pH		5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
EC (dS/m)		1,93	1,93	1,93	1,69	1,90	1,78
K	mM	5,3	5,3	5,3	5,3	5	5,3
Ca	mM	3,75	3,75	3,75	3,01	3,55	3,01
Mg	mM	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,6
NO ₃	mM	12,6	9,15	5,7	3,135	12	2,3
NH ₄	mM	1,2	1,2	1,2	0,315	1,8	1,15
H ₂ PO ₄	mM	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
SO ₄	mM	3,07	5,02	8,47	8,27	3,37	9,3
Cl	mM	0,3	1,8	1,8	2,2	0,3	2,84
Fe	μM	15	15	15	15	15	15
Mn	μM	7	7	7	7	7	7
Zn	μM	5	5	5	5	5	5
Cu	μM	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
B	μM	20	20	20	20	20	20
Mo	μM	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

3.3.3. Χαρακτηριστικά ανάπτυξης και παραγωγής

Τρία φυτά φασολιού ανά μεταχείριση συλλέχθηκαν: (Α) κατά το στάδια βλαστικής ανάπτυξης (25 ημέρες μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, ΗΜΕΚ), (Β) κατά το στάδιο της ανθοφορίας (35 ΗΜΕΚ), (Γ) κατά το στάδιο της έκπτυξης των πρώτων λοβών (42 ΗΜΕΚ) και κατά το στάδιο της παραγωγής (62 ΗΜΕΚ).

Οι ρίζες των φυτών που συλλέχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν μόνο για τον προσδιορισμό του αριθμού των φυματίων ανά ρίζα. Επιπλέον, η υπέργεια βιομάζα που συλλέχθηκε κατά τη δειγματοληψία (Γ) περιλάμβανε και τους μη αναπτυγμένους νωπούς λοβούς. Παράλληλα κατά τη δειγματοληψία (Δ), η βιομάζα του υπέργειου τμήματος των φυτών συγχωνεύθηκε με τους νωπούς λοβούς των αντίστοιχων φυτών που είχαν ήδη συγκομισθεί. Μετά τη συλλογή των φυτικών ιστών τα δείγματα ξηράθηκαν στους 65 °C για 5 ημέρες και στη συνέχεια κονιορτοποιήθηκαν σε κόκκους διαμέτρου < 5 mm.

Η συγκομιδή του νωπών λοβών, πραγματοποιούταν ανά εβδομάδα όπου και συλλέγονταν μόνο λοβοί που είχαν αποκτήσει το εμπορικό τους μέγεθος. Για τον αξιολόγηση της απόδοσης της υδροπονικής καλλιέργειας φασολιού προσδιορίστηκαν το νωπό βάρος των λοβών ανά φυτό (g φυτό⁻¹), τον αριθμό των λοβών ανά φυτό (N φυτό⁻¹) καθώς και το μέσο βάρος του λοβού (g λοβό⁻¹).

3.3.4. Ολικό N & C, Δ και αζωτοδεσμευτική ικανότητα.

Ο προσδιορισμός του ολικού αζώτου των φυτών προσδιορίστηκε στην ξηρή βιομάζα των φυτικών ιστών μέσω της μεθόδου Kjeldhal (Bremmer, 1965) (Kjeltec™ 8200 Auto Distillation unit). Έπειτα η εκτίμηση των ποσοτήτων του N, κατά το αναπτυξιακό στάδιο (Γ) και (Δ), που δέσμευσε η καλλιέργεια από την ατμόσφαιρα πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου φυσικής αφθονίας του ισοτόπου $\delta^{15}\text{N}$, όπως αυτή περιγράφεται στην ενότητα 2.1.5. Σε αυτήν την μελέτη ως φυτά αναφοράς για κάθε διαφορετική μεταχείριση αζώτου επιλέχθηκαν τα φυτά του είδους *Citrullus lanatus* sp. τα οποία αναπτύσσονταν στις ίδιες συνθήκες, όσον αφορά το υπόστρωμα και τη σύσταση του ΘΔ, με τα υπό μελέτη ψυχανθή. Παράλληλα με τον προσδιορισμό των $\delta^{15}\text{N}$, εκτιμήθηκαν και οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$ σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) για τα C & N (Sharp, 2017). Οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$ χρησιμοποιήθηκαν στην παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό του συντελεστή ρυθμού φωτοσύνθεσης Δ (Farquhar & Richards, 1984; Fu et al., 1993):

$$\Delta = \frac{\delta\alpha - \delta\rho}{1 + \delta\rho}$$

όπου $\delta\rho$ ισούται με το $\delta^{13}\text{C}$ του φυτού $\delta\alpha$ ισούται με το $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ του ατμοσφαιρικού CO_2 (-8‰).

3.3.5. Στατιστική ανάλυση δεδομένων

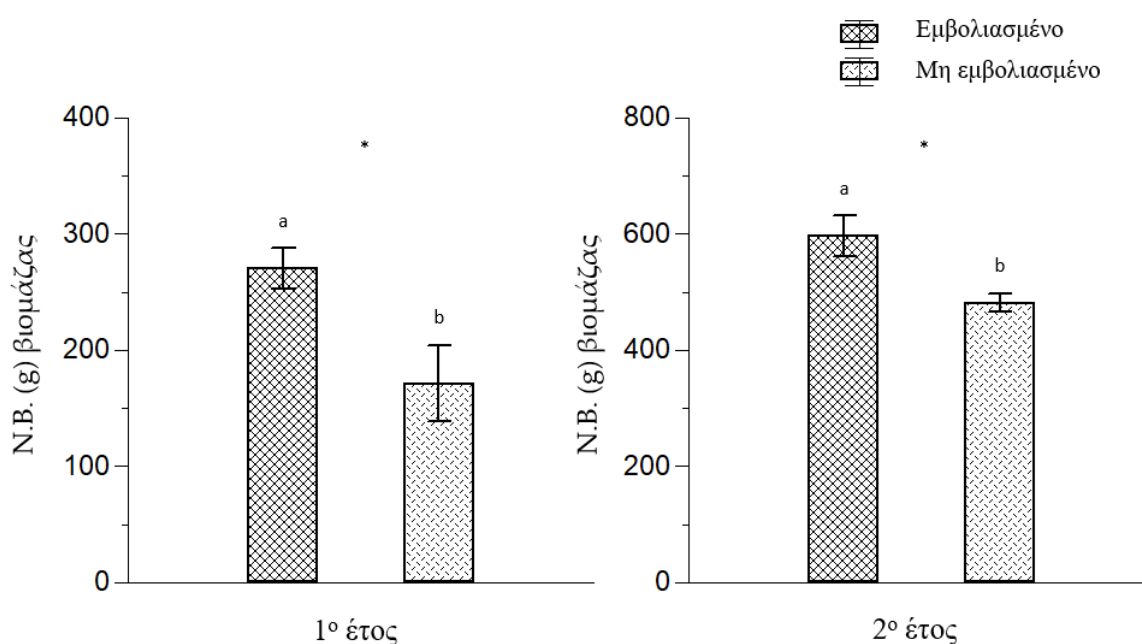
Για τη μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών σχημάτων θρέψης σε N (Παράγοντας A) και του εμβολιασμού του φυτού με ριζόβια (Παράγοντας B) εφαρμόστηκε μία two-way (διπαραγοντική) ANOVA ανάλυση. Οι μέσες τιμές διαχωρίστηκαν μέσω Duncan's Multiple Range Test όταν η ανάλυση ANOVA ήταν στατιστικώς σημαντική ($p < 0,05$). Για τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό STATISTICA 12.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

4. Αποτελέσματα

4.1. Επίδραση των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στην απόδοση του βιολογικού φασολιού.

4.1.1. Χαρακτηριστικά ανάπτυξης

Ο εμβολιασμός των φυτών των κουκιών με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1 αύξησε σημαντικά το νωπό βάρος της υπέργειας βιομάζας του φυτού κατά 58% και 24% κατά την 1^η και 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, αντίστοιχα, σε σχέση με τα φυτά της μεταχείρισης απουσίας εμβολιασμού (Γράφημα 7).



Γράφημα 7: Επίδραση του εμβολιασμού των κουκιών με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1 στο νωπό βάρος (g) κατά το στάδιο ανθοφορίας την 1^η και 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Για κάθε καλλιεργητική περίοδο, τα διαφορετικά γράμματα σε κάθε ράβδο υποδεικνύουν στατιστικά σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

Κατά την 1^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο, το νωπό βάρος της υπέργειας βιομάζας του φασολιού ήταν μεγαλύτερο όταν η προηγούμενη καλλιέργεια κατά την χειμερινή περίοδο ήταν η συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου (Πίνακας 8). Επιπλέον, ο εμβολιασμός των φυτών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899, ωφέλησε σημαντικά την βλαστική ανάπτυξη των φυτών. Κατά την 2^η καλλιεργητική περίοδο, η εφαρμογή της χλωρής λίπανσης αύξησε σημαντικά την υπέργεια βιομάζα του βιολογικού φασολιού, η οποία κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα με αυτήν της συμβατικής καλλιέργειας φασολιού. Ωστόσο, κατά την 2^η καλλιεργητική περίοδο ο εμβολιασμός των φυτών με ριζόβια δεν επηρέασε την ανάπτυξη του φυτού του φασολιού.

Συγκρίνοντας τις 2 πειραματικές χρονιές, η βλαστική ανάπτυξη των φυτών περιορίστηκε δραστικά (κατά 50%) κατά την 2^η καλλιεργητική περίοδο. Τέλος, δεν παρατηρήθηκαν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφορετικών προγραμμάτων εναλλαγής και του εμβολιασμού της καλλιέργειας με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899, επομένως τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται.

Πίνακας 8: Επίδραση των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών και του εμβολιασμού των φυτών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 στο νωπό βάρος της υπέργειας βιομάζας φασολιού κατά το στάδιο της ανθοφορίας την 1^η και 2^η καλλιεργητική περίοδο.

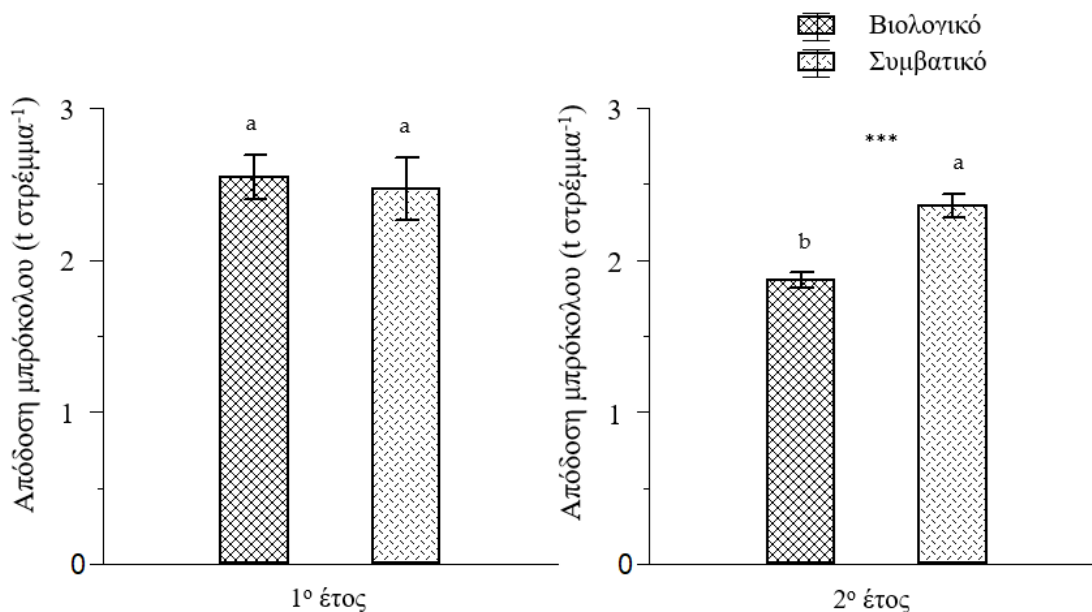
	1 ^ο έτος	2 ^ο έτος
Χειμερινή Καλλιέργεια	g φυτό ⁻¹	g φυτό ⁻¹
Βιολογικό μπρόκολο	268 b	142 bc
Συμβατικό μπρόκολο	408 a	167 ab
Αγρανάπαυση	224 b	117 c
Χλωρή λίπανση	296 b	185 a
Εμβολιασμός με ριζόβια		
Εμβολιασμένα	344	151
Μη εμβολιασμένα	253	154
Στατιστική σημαντικότητα		
Χειμερινή Καλλιέργεια	***	**
Εμβολιασμός	**	ΜΣ
Χειμ. Καλ.* Εμβολιασμός	ΜΣ	ΜΣ

Μέσες τιμές των χειμερινών καλλιεργειών (n=8) και του εμβολιασμού με ριζόβια (n=16) με διαφορετικό γράμμα στην ίδια στήλη υποδεικνύει στατιστικώς σημαντικές αποκλίσεις κατά Duncan's multiple range test. ** & *** υποδηλώνει στατιστική σημαντικότητα με $p < 0,01$ και $p < 0,001$. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση.

4.1.2. Χαρακτηριστικά παραγωγής

Κατά την πρώτη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, τα διαφορετικά συστήματα καλλιέργειας (βιολογικό-συμβατικό) δεν έφεραν κάποιο σημαντικό αντίκτυπο στην παραγωγή του μπρόκολου. Δεδομένου ότι ούτε εντομολογικές ούτε μυκητολογικές προσβολές δεν παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, η μόνη διαφορά στα 2 συστήματα ήταν το είδος (οργανικό-ανόργανο) και η συνολική ποσότητα παροχής N (Γράφημα 8).

Κατά την επακόλουθη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, οι σημαντικά υψηλότερες εισροές N στο συμβατικό σύστημα καλλιέργειας, καθώς και οι διαφορετικές πρακτικές λίπανσης που εφαρμόστηκαν στα 2 συστήματα οδήγησαν σε σημαντική μείωση της απόδοσης μπρόκολου κατά 20% κάτω από το βιολογικό σύστημα καλλιέργειας (Γράφημα 8).



Γράφημα 8: Επίδραση των διαφορετικών συστημάτων καλλιέργειας (βιολογικό-συμβατικό) στην απόδοση του μπρόκολου κατά την 1^η και 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Για κάθε έτος τα διαφορετικά γράμματα των ράβδων υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test. *** υποδηλώνει στατιστικώς σημαντική απόκλιση με $p < 0,001$.

Πίνακας 9: Επίδραση των χειμερινών καλλιεργειών και του εμβολιασμού των φυτών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 στην συνολική παραγωγή (t στρέμμα⁻¹) και αριθμό λοβών (N^ο 10⁵ στρέμμα⁻¹) φασολιού κατά τις 2 καλλιεργητικές περιόδους.

Χαρακτηριστικά παραγωγής φασολιού				
	Κύριες επιδράσεις			
	1 ^ο έτος		2 ^ο έτος	
	Παραγωγή (t στρέμμα ⁻¹)	Λοβοί (N ^ο 10 ⁵ στρέμμα ⁻¹)	Παραγωγή (t στρέμμα ⁻¹)	Pods (N ^ο 10 ⁵ στρέμμα ⁻¹)
Χειμερινές καλλιέργειες				
Βιολογικό μπρόκολο	4,24 b	4,60	2,67 b	2,77 b
Συμβατικό μπρόκολο	5,28 a	5,20	3,37 a	3,41 a
Αγρανάπαυση	4,74 ab	4,72	2,97 ab	3,04 ab
Χλωρή λίπανση	4,97 a	5,06	3,21 a	3,23 a
Εμβολιασμός με ριζόβια				
Εμβολιασμένα	4,81	4,87	3,16	3,22
Μη-εμβολιασμένα	4,80	4,91	2,95	3,01
Στατιστική σημαντικότητα				
Χειμ. Καλλιέργεια	**	ΜΣ	*	*
Εμβολιασμός	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ
Χειμ. Καλ.*Εμβολ.	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ

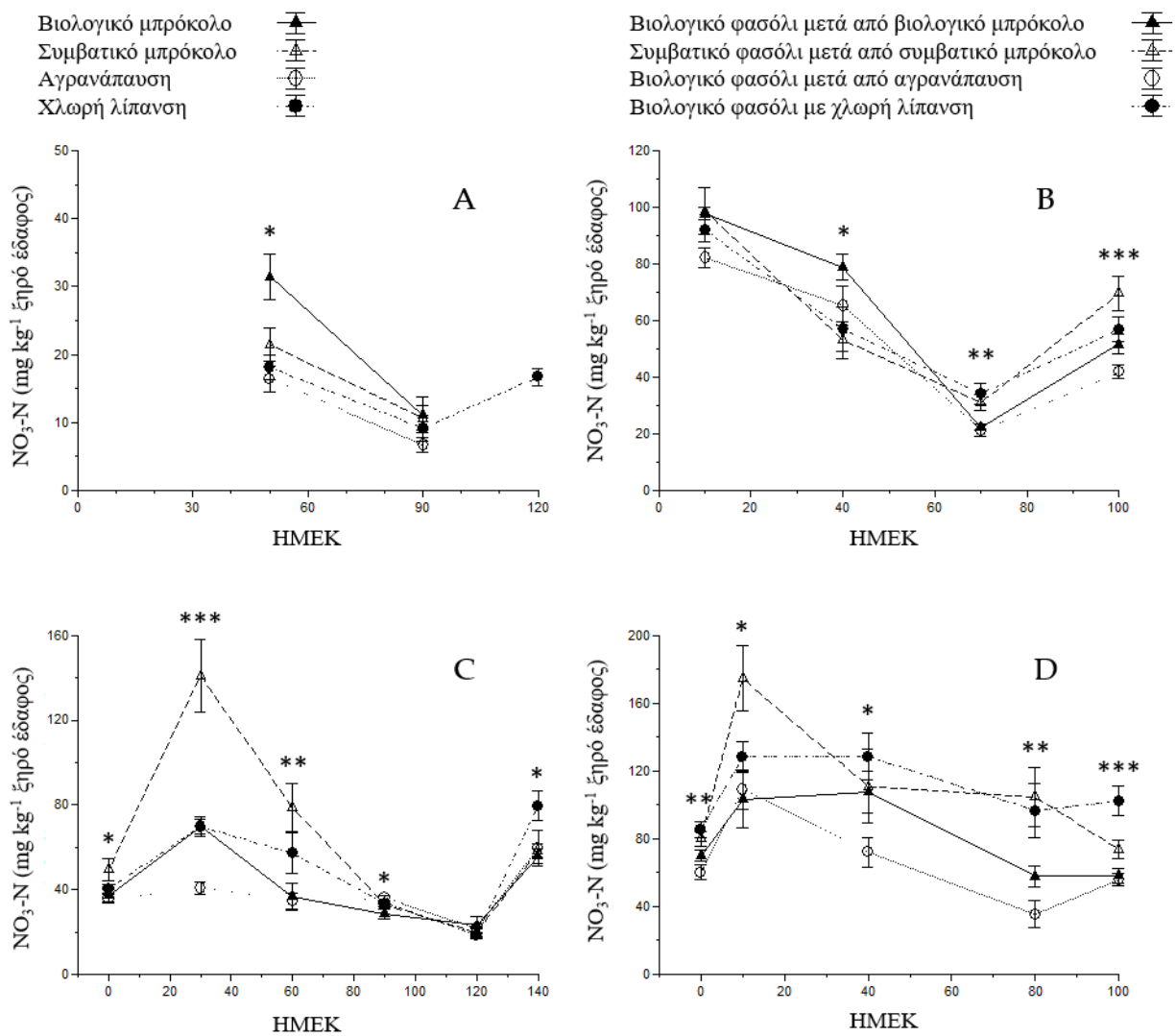
Μέσες τιμές των χειμερινών καλλιεργειών (n=8) και του εμβολιασμού με ριζόβια (n=16) που ακολουθούνται με διαφορετικό γράμμα στην ίδια στήλη υποδεικνύουν στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test. * & ** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα με $p < 0,05$ & $p < 0,01$, αντίστοιχα. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση

Η καλλιέργεια του κουκιού ως χλωρή λίπανση αύξησε σημαντικά την απόδοση του βιολογικού φασολιού σε σχέση με την βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου κατά την προηγούμενη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Ωστόσο, η παραγωγή που επετεύχθη με την εφαρμογή χλωρής λίπανσης δεν διέφερε από αυτήν είτε της βιολογικής καλλιέργειας φασολιού μετά από αγρανάπαυση είτε της συμβατικής, αντίστοιχα, και στα 2 καλλιεργητικά έτη. Παράλληλα, πέρα από την απόδοση της καλλιέργειας σε βάρος, η βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου περιόρισε ακόμα και τον αριθμό των παραγόμενων λοβών της επακόλουθης βιολογικής καλλιέργειας φασολιού κατά την δεύτερη καλλιεργητική περίοδο. Αντίθετα με την ανάπτυξη, η απόδοση του φασολιού δεν επωφελήθηκε από τον εμβολιασμό των φυτών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899. Συγκρίνοντας τα 2 καλλιεργητικά έτη, καταγράφηκε μείωση παραγωγής κατά 36% κατά την 2^η καλλιεργητική περίοδο ανεξάρτητα των διαφορετικών καλλιεργητικών πρακτικών. Τέλος, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικώς σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των 2 υπό μελέτη παραγόντων, επομένως τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται.

4.1.3. Συγκεντρώσεις θρεπτικών στο έδαφος

Κατά την χειμερινή καλλιεργητική περίοδο του πρώτου πειραματικού έτους, υψηλότερα επίπεδα NO₃-N εντοπίστηκαν στην βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου κατά το στάδιο έκπτυξης των ανθοκεφαλών (50 ημέρες μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, ΗΜΕΚ), σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Ωστόσο, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου (90 ΗΜΕΚ), δεν παρατηρήθηκε κάποια στατιστικώς σημαντική απόκλιση στα επίπεδα των νιτρικών στο έδαφος μεταξύ των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών. Παράλληλα, στο ίδιο στάδιο καταγράφηκε η χαμηλότερη συγκέντρωση νιτρικών στο έδαφος καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο. Σχετικά με την καλλιέργεια του κουκιού, δεν παρατηρήθηκε κάποια στατιστικώς σημαντική απόκλιση μεταξύ εμβολιασμένων και μη φυτών, επομένως τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται. Ανεξάρτητα του εμβολιασμού, η συγκέντρωση των νιτρικών στα πειραματικά τεμάχια της καλλιέργειας κουκιού μειώθηκε σημαντικά στις 90 ημέρες μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας, ωστόσο, κατά τη διάρκεια της ανθοφορίας (120 ΗΜΕΚ) η συγκέντρωση των νιτρικών αυξήθηκε σημαντικά και κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα με αυτά που καταγράφηκαν στις 50 ΗΜΕΚ (Γράφημα 9Α).

Κατά την επακόλουθη εαρινή καλλιεργητική περίοδο, υψηλότερα επίπεδα νιτρικού αζώτου (80 - 100 mg kg⁻¹) καταγράφηκαν αμέσως μετά την εγκατάσταση



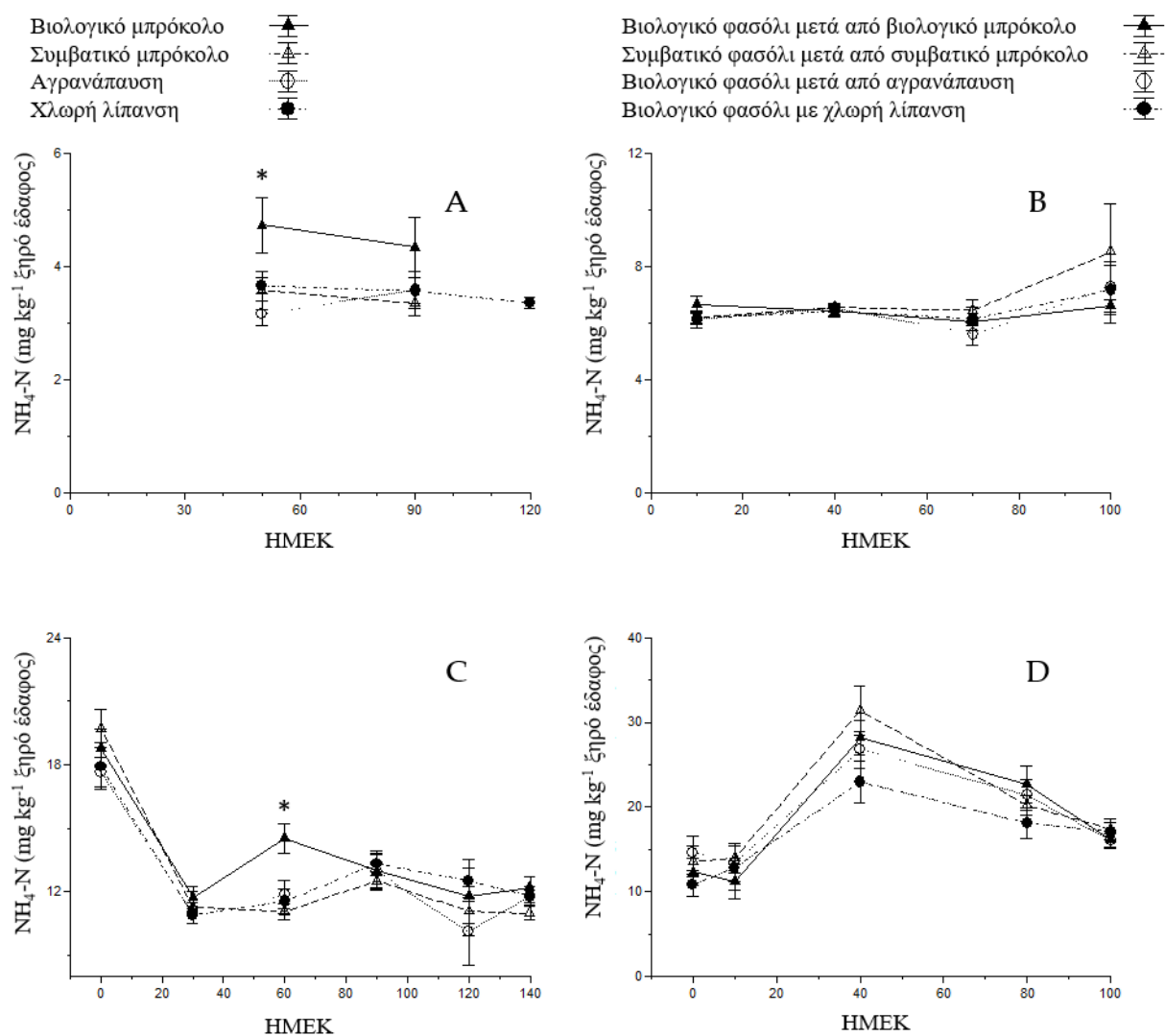
Γράφημα 9: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στα επίπεδα $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος κατά τη διάρκεια του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. *, ** &*** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test με $p < 0.05$, $p < 0.01$, και $p < 0.001$, αντίστοιχα. **A:** Συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2017-2018) στις 50, 90 και 120 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των καλλιεργειών (HMEK). **B:** Συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2018) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιεργείες, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, στο στάδιο της ανθοφορίας, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 HMEK). **C:** Συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2018-2019), πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά το σχηματισμό των ανθοκεφαλών, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου, κατά την ανθοφορία των κουκιών και μετά από την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 HMEK). **D:** Συγκεντρώσεις $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2019) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιεργείες, πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά την ανθοφορία, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (0, 10, 40, 80 και 100 HMEK).

των καλλιεργειών (10 ΗΜΕΚ), χωρίς όμως να παρατηρηθεί κάποια διαφοροποίηση υπό τις διαφορετικές μεταχειρίσεις. Ύστερα, τα επίπεδα του $\text{NO}_3\text{-N}$ μειώθηκαν σημαντικά με την πρόοδο των καλλιεργειών, μέχρι και το στάδιο της συγκομιδής (70 ΗΜΕΚ), όπου η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου κυμάνθηκε κάτω από 40 mg kg^{-1} . Επιπλέον, η αγρανάπαυση και η βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου κατά το στάδιο της ανθοφορίας (40 ΗΜΕΚ) αύξησαν τα επίπεδα των νιτρικών στο έδαφος, ενώ κατά το επακόλουθο στάδιο της παραγωγής σημείωσαν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε $\text{NO}_3\text{-N}$. Κατά το τέλος της πρώτης εαρινής καλλιεργητικής περιόδου, τα επίπεδα των νιτρικών αυξήθηκαν σε όλες τις μεταχειρίσεις, ωστόσο υψηλότερες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν στη συμβατική καλλιέργεια φασολιού (Γράφημα 9B).

Κατά τη 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, οι συμβατικές καλλιεργητικές πρακτικές αύξησαν σημαντικά τα επίπεδα $\text{NO}_3\text{-N}$ στο έδαφος 30 ημέρες μετά την εγκατάσταση των καλλιεργειών και κατά την έκπτυξη των ανθοκεφαλών (60 ΗΜΕΚ), ενώ κατά τα ίδια στάδια οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου καταγράφηκαν στα τεμάχια της αγρανάπαυσης. Μετά από τη συγκομιδή του μπρόκολου, τα επίπεδα των νιτρικών στο έδαφος ήταν παρόμοια σε όλες τις μεταχειρίσεις. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της βιομάζας των κουκιών στο έδαφος αύξησε σημαντικά τις συγκεντρώσεις των νιτρικών (140 ΗΜΕΚ). Ανεξάρτητα των διαφορετικών μεταχειρίσεων, η ενσωμάτωση είτε της βιομάζας κουκιών είτε των φυτικών υπολειμμάτων των καλλιεργειών αύξησε σημαντικά τη διαθεσιμότητα του αζώτου στο έδαφος ($\text{NO}_3\text{-N}$) του πειραματικού αγρού (Γράφημα 9C).

Δέκα ημέρες μετά από την εγκατάσταση της 2^{ης} εαρινής καλλιεργητικής περιόδου, οι συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου στο έδαφος ήταν υψηλότερη στη συμβατική καλλιέργεια φασολιού (Γράφημα 9D). Κατά το στάδιο ανθοφορίας (40 ΗΜΕΚ), στα πειραματικά τεμάχια βιολογικής καλλιέργειας φασολιού μετά από αγρανάπαυση σημειώθηκαν τα χαμηλότερα επίπεδα $\text{NO}_3\text{-N}$. Με το πέρας της ανθοφορίας (80-100 ΗΜΕΚ), σταθερά υψηλότερες συγκεντρώσεις νιτρικού αζώτου καταγράφηκαν στη συμβατική καθώς και στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού με την εφαρμογή γλωρής λίπανσης.

Κατά την 1^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, υψηλότερα επίπεδα $\text{NH}_4\text{-N}$ σημειώθηκαν κατά την έκπτυξη των ανθοκεφαλών (50 ΗΜΕΚ) στη συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου (Γράφημα 10Α). Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις του αμμωνιακού αζώτου κατά την περαιτέρω πρόοδο έως και το τέλος της χειμερινής καλλιεργητικής περιόδου. Κατά την επακόλουθη εαρινή καλλιεργητική



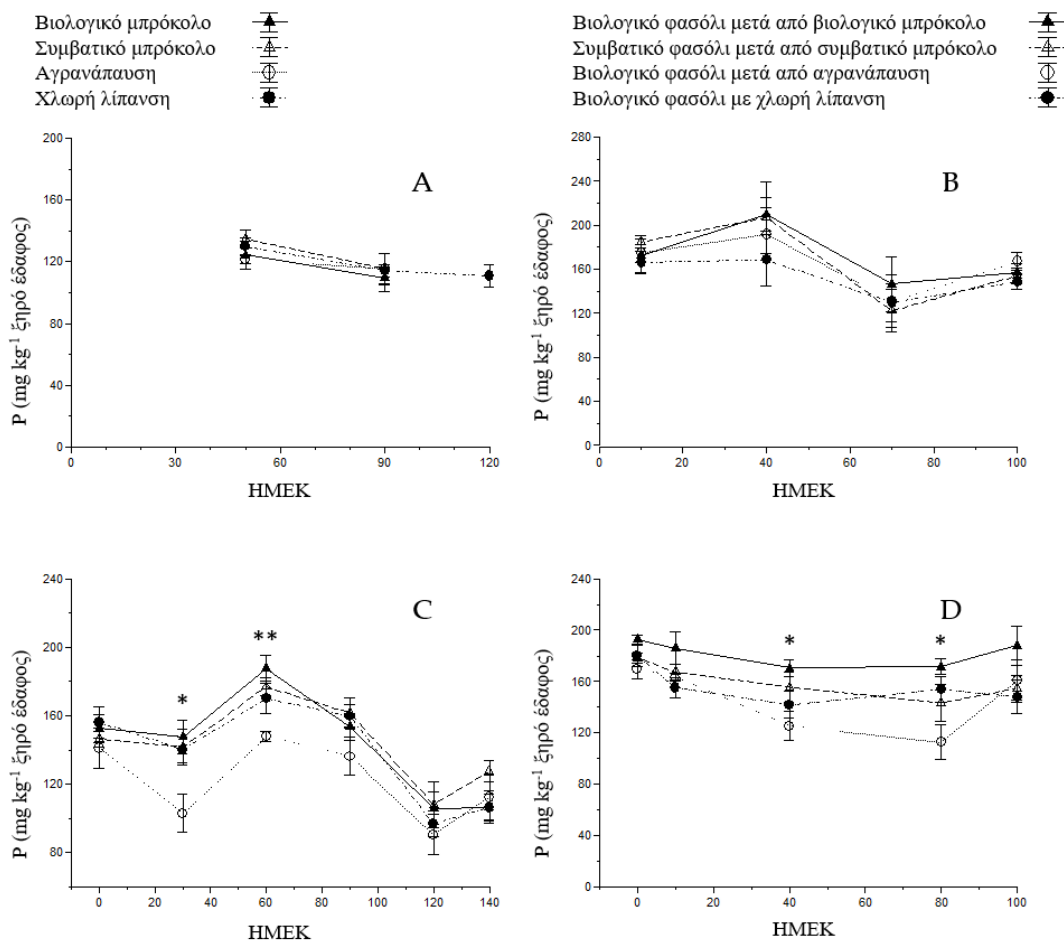
Γράφημα 10: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στα επίπεδα NH₄-N στο έδαφος κατά τη διάρκεια του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. * υποδηλώνει στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test με $p < 0.05$. **A:** Συγκεντρώσεις NH₄-N στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2017-2018) στις 50, 90 και 120 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των καλλιεργειών (HMEK). **B:** Συγκεντρώσεις NH₄-N στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2018) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, στο στάδιο της ανθοφορίας, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 HMEK). **C:** Συγκεντρώσεις NH₄-N στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2018-2019), πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά τον σχηματισμό των ανθοκεφαλών, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου, κατά την ανθοφορία των κουκιών και μετά από την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 HMEK). **D:** Συγκεντρώσεις NH₄-N στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2019) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά την ανθοφορία, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (0, 10, 40, 80 και 100 HMEK).

περίοδο (Γράφημα 10B) δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική απόκλιση μεταξύ των διαφορετικών προγραμμάτων εναλλαγής σχετικά με τη συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στο έδαφος, η οποία κυμάνθηκε στα 6 - 9 mg kg⁻¹.

Κατά τη 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, τα επίπεδα του αμμωνιακού αζώτου στο έδαφος μειώθηκαν από 18–20 mg kg⁻¹ πριν από την εγκατάσταση των καλλιεργειών σε 11–12 mg kg⁻¹ μετά από 30 ημέρες (Γράφημα 10C). Κατά την έκπτυξη των ανθοκεφαλών (60 ΗΜΕΚ), μεγαλύτερα επίπεδα NH₄-N εντοπίστηκαν στη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου, σημαντική απόκλιση η οποία δεν παρατηρήθηκε κατά τα επόμενα στάδια των καλλιεργειών. Κατά την εαρινή καλλιεργητική περίοδο του ίδιου πειραματικού έτος, ανεξάρτητα από τα διαφορετικά συστήματα τα επίπεδα του αμμωνιακού αζώτου στο έδαφος κατά την ανθοφορία σχεδόν διπλασιάστηκαν από αυτά που καταγράφηκαν μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας. Ωστόσο, μετά από το στάδιο της ανθοφορίας τα επίπεδα του αμμωνιακού αζώτου μειώθηκαν σταδιακά μέχρι και το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (Γράφημα 10D).

Ο εμβολιασμός των κουκιών με ριζόβια δεν επηρέασε τη διαθεσιμότητα του Ν στο έδαφος κατά την 1^η και 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Όμοια, η ενσωμάτωση των εμβολιασμένων και μη εμβολιασμένων κουκιών στο έδαφος δεν συνείσφερε στη διαθεσιμότητα του Ν για τις επακόλουθες βιολογικές καλλιέργειες φασολιού. Επιπρόσθετα, η διαθεσιμότητα του Ν στο έδαφος κατά τις εαρινές καλλιεργητικές περιόδους δεν επηρεάστηκε ούτε από τον εμβολιασμό των φασολιών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899. Επομένως, εφόσον ο εμβολιασμός των ψυχανθών του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών δεν επηρέασε σημαντικά τη διαθεσιμότητα του Ν στο έδαφος κατά τη διάρκεια του προγράμματος, τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται.

Οι συγκεντρώσεις Ρ του εδάφους κατά την πρώτη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο παρέμειναν σχετικά σταθερές χωρίς να παρατηρηθεί κάποια σημαντική απόκλιση μεταξύ των μεταχειρίσεων (Γράφημα 11Α). Παρόμοιο μοτίβο σχετικά με τη συγκέντρωση του Ρ στο έδαφος παρατηρήθηκε και κατά την επακόλουθη εαρινή καλλιεργητική περίοδο (11Β). Ωστόσο, κατά τη 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα Ρ καταγράφηκαν στα τεμάχια της αγρανάπαυσης μετά από τη βασική λίπανση έως και το στάδιο της έκπτυξης των ανθοκεφαλών μπρόκολου (30 και 60 ΗΜΕΚ, αντίστοιχα) σε σχέση με τις υπόλοιπες χειμερινές καλλιέργειες (Γράφημα 11C). Έπειτα τα επίπεδα του Ρ στο έδαφος μειώθηκαν σημαντικά μέχρι και



Γράφημα 11: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στα επίπεδα P στο έδαφος κατά τη διάρκεια του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. * & ** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test με $p < 0,05$ & $p < 0,01$, αντίστοιχα. **A:** Συγκεντρώσεις P στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2017-2018) στις 50, 90 και 120 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των καλλιεργειών (HMEK). **B:** Συγκεντρώσεις P στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2018) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, στο στάδιο της ανθοφορίας, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 HMEK). **C:** Συγκεντρώσεις P στο έδαφος των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2018-2019), πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά τον σχηματισμό των ανθοκεφαλών, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου, κατά την ανθοφορία των κουκιών και μετά από την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 HMEK). **D:** Συγκεντρώσεις P στο έδαφος της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2019) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά την ανθοφορία, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (0, 10, 40, 80 και 100 HMEK).

το τέλος της χειμερινής περιόδου χωρίς να προκύψει κάποια σημαντική απόκλιση μεταξύ των μεταχειρίσεων. Κατά την επακόλουθη εαρινή καλλιεργητική περίοδο, σημαντικές αποκλίσεις σημειώθηκαν μόνο κατά το στάδιο της ανθοφορίας και παραγωγής (40 και 80 ΗΜΕΚ, αντίστοιχα). Στα παραπάνω στάδια, μεγαλύτερες και μικρότερες συγκεντρώσεις Ρ στο έδαφος εντοπίστηκαν στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου και την αγρανάπαυση αντίστοιχα (Γράφημα 11D).

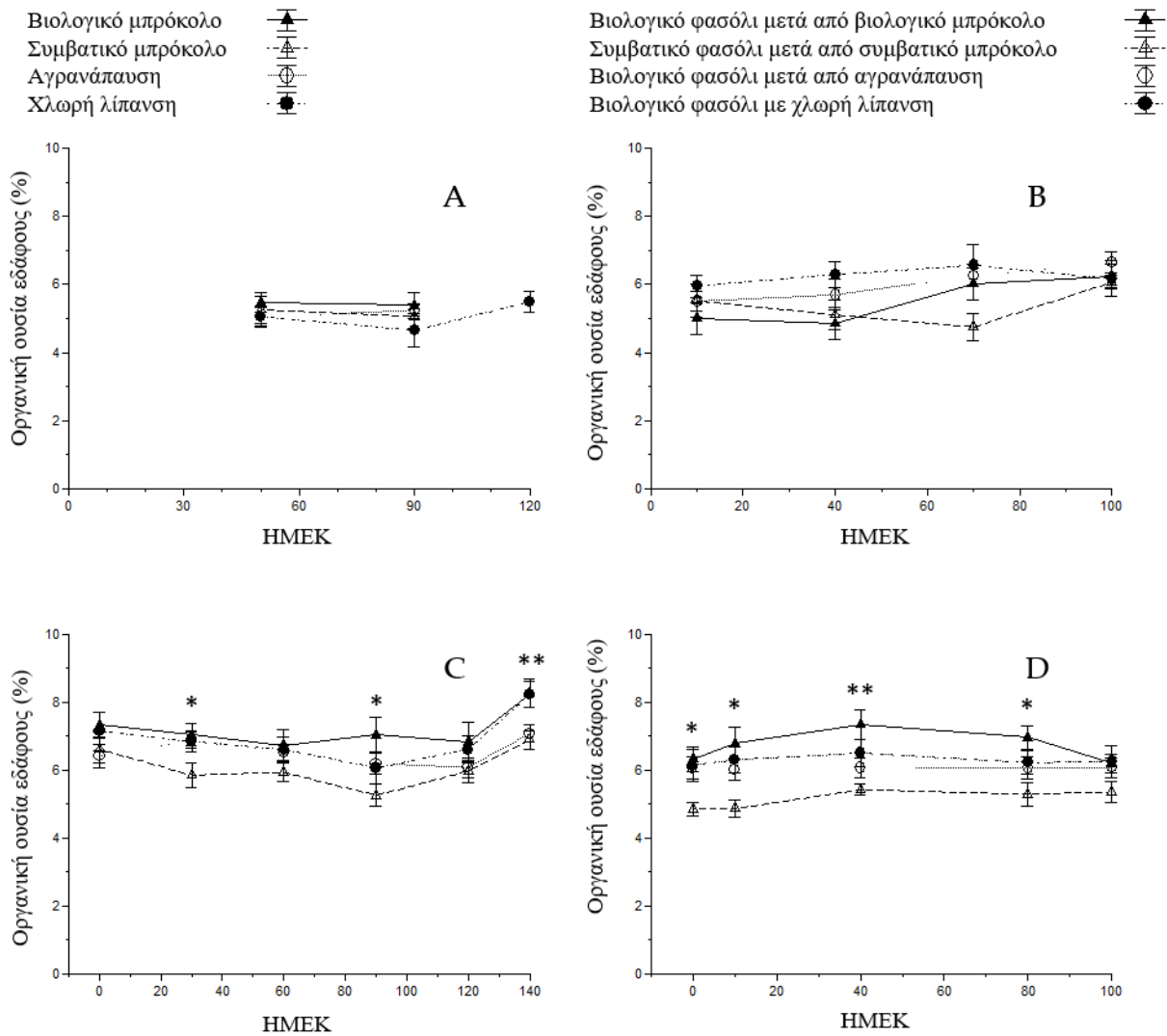
Παρόμοια με τη διαθεσιμότητα του Ν, οι συγκεντρώσεις Ρ δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από τον εμβολιασμό των ψυχανθών κατά το διετές πρόγραμμα εναλλαγής καλλιεργειών. Επιπρόσθετα, οι συγκεντρώσεις του Κ στο έδαφος δεν επηρεάστηκαν ούτε από τα διαφορετικά προγράμματα εναλλαγής καλλιεργειών ούτε από τον εμβολιασμό των ψυχανθών με ριζόβια. Επομένως, τα παραπάνω δεδομένα δεν παρουσιάζονται.

4.1.4. Οργανική ουσία εδάφους

Σύμφωνα με τον πίνακα 4, τα επίπεδα της οργανικής ουσίας στο έδαφος ήταν ήδη σχετικά υψηλά (5%) πριν από την εγκατάσταση του πειράματος. Κατά την 1^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, οι διάφορες καλλιεργητικές πρακτικές δεν επηρέασαν τα επίπεδα της οργανικής ουσίας, η οποία παρέμεινε σταθερή κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Γράφημα 12Α). Κατά την επακόλουθη καλλιεργητική περίοδο το συμβατικό σχήμα θρέψης έτεινε να περιορίσει τα επίπεδα της οργανικής ουσίας, ωστόσο αυτή η τάση δεν παρατηρήθηκε στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (Γράφημα 12Β).

Κατά τη 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας (30 ΗΜΕΚ) χαμηλότερες συγκεντρώσεις οργανικής ουσίας εντοπίστηκαν στη συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου. Χαμηλά επίπεδα στη συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου καταγράφηκαν επίσης κατά το στάδιο της συγκομιδής (90 ΗΜΕΚ), ενώ κατά το ίδιο στάδιο υψηλότερα επίπεδα εδαφικής οργανικής ουσίας σημειώθηκαν στα τεμάχια της βιολογικής καλλιέργειας μπρόκολου. Επιπλέον, μετά από την ενσωμάτωση της βιομάζας των χειμερινών καλλιεργειών (140 ΗΜΕΚ) υψηλότερα επίπεδα οργανικής ουσίας εντοπίστηκαν στα τεμάχια της βιολογικής καλλιέργειας μπρόκολου και της χλωρής λίπανσης (Γράφημα 12C). Κατά τη 2^η εαρινή καλλιέργεια φασολιού, σχεδόν καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο υψηλότερα και χαμηλότερα επίπεδα οργανικής ουσίας εντοπίστηκαν στη βιολογική

καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου και στη συμβατική καλλιέργεια φασολιού αντίστοιχα (Γράφημα 12D).



Γράφημα 12: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών στα επίπεδα οργανικής ουσίας κατά την διάρκεια του διετούς προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. * & ** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα κατά Duncan's multiple range test με $p < 0,05$ & $p < 0,01$, αντίστοιχα. **A:** Επίπεδα οργανικής ουσίας των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2017-2018) στις 50, 90 και 120 ημέρες μετά από την εγκατάσταση των καλλιεργειών (HMEK). **B:** Επίπεδα οργανικής ουσίας της εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2018) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, στο στάδιο της ανθοφορίας, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιέργειας (10, 40, 70 και 100 HMEK). **C:** Επίπεδα οργανικής ουσίας των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών (2018-2019), πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά τον σχηματισμό των ανθοκεφαλών, κατά το τέλος της καλλιέργειας μπρόκολου, κατά την ανθοφορία των κουκιών και μετά από την ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων (0, 30, 60, 90, 120 και 140 HMEK). **D:** Επίπεδα οργανικής ουσίας εαρινής καλλιέργειας φασολιού (2019) ως προς τις διαφορετικές χειμερινές καλλιέργειες, πριν και μετά από την εγκατάσταση της καλλιέργειας, κατά την ανθοφορία, κατά την παραγωγή και στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου (0, 10, 40, 80 και 100 HMEK).

4.1.5. Ολικό Άζωτο και Αζωτοδεσμευτική Ικανότητα

Κατά τη διάρκεια και των 2 χειμερινών καλλιεργητικών περιόδων, ο εμβολιασμός των κουκιών με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1 δεν επηρέασε τη συγκέντρωση του ολικού N καθώς και τον λόγο C:N στους φυτικού ιστούς. Αντίθετα, ο εμβολιασμός των φυτών αύξησε σημαντικά το ποσοστό του N που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa) και στις δύο καλλιεργητικές περιόδους κατά 13% και 9%, αντίστοιχα (Πίνακας 10). Το αυξημένο %Ndfa στα εμβολιασμένα φυτά σε συνδυασμό με την αυξημένη ξηρή βιομάζα τους οδήγησε σε σημαντική αύξηση στα ποσά N που δέσμευσε η καλλιέργεια από την ατμόσφαιρα (BNF) κατά 68% στην 1^η και 52% στην 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Επιπλέον, η συγκέντρωση σε ολικό N, η βιομάζα και το BNF ήταν υψηλότερα κατά την 2^η σε σχέση με την 1^η καλλιεργητική περίοδο.

Πίνακας 10: Επίδραση του εμβολιασμού του κουκιού με το στέλεχος *Rhizobium leguminosarum* VFLE1 στον λόγο C:N, ολικό N (%), %Ndfa, ξηρή βιομάζα (Ξ.Β., kg στρέμμα⁻¹) και BNF (kg στρέμμα⁻¹) στην υπέργεια βιομάζα κατά τις 2 χειμερινές καλλιεργητικές περιόδους.

Μεταχείριση	C:N	N (%)	Ndfa (%)	Ξ.Β. (kg στρέμμα ⁻¹)	BNF (kg στρέμμα ⁻¹)
1 ^ο έτος					
Εμβολιασμένα	11,43	3,66	86,0	808	25,5
Μη εμβολιασμένα	10,36	3,93	75,9	509	15,2
Στατιστική σημαντικότητα	ΜΣ	ΜΣ	**	*	*
2 ^ο έτος					
Εμβολιασμένα	9,58	4,7	76,3	2.179	78,0
Μη εμβολιασμένα	8,65	4,2	69,7	1.751	51,4
Στατιστική σημαντικότητα	ΜΣ	ΜΣ	**	*	**

* & ** υποδηλώνει στατιστική σημαντική απόκλιση με $p < 0,05$ και $p < 0,01$, αντίστοιχα. ΜΣ = μη σημαντικές αποκλίσεις.

Κατά την 1^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο, ο λόγος C:N και η συγκέντρωση του N στην υπέργεια βιομάζα του φασολιού δεν επηρεάστηκαν ούτε από τις διαφορετικές καλλιέργειες από τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο ούτε από τον εμβολιασμό των φυτών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 (Πίνακας 11). Επιπλέον, μεγαλύτερα ποσοστά N που προήλθαν από την ατμόσφαιρα (%Ndfa) εντοπίστηκαν στη συμβατική και βιολογική καλλιέργεια με την εφαρμογή χλωρής λίπανσης, ενώ το χαμηλότερο (%Ndfa) καταγράφηκε στα φυτά βιολογικής

καλλιέργειας φασολιού που ακολούθησε την αγρανάπαυση. Επιπλέον, ο εμβολιασμός των φυτών αύξησε σημαντικά το (%Ndfa) ανεξάρτητα από τα διαφορετικά καλλιεργητικά συστήματα. Παράλληλα, η συμβατική λίπανση αύξησε σημαντικά την υπέργεια ξηρή βιομάζα των φυτών έναντι της βιολογικής. Επιπρόσθετα, υψηλότερα ποσά N (BNF) δέσμευσαν οι καλλιέργειες φασολιού που ακολούθησαν τη συμβατική καλλιέργεια μπρόκολου και καλλιέργεια του κουκιού ως χλωρή λίπανση (Πίνακας 11). Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφορετικών καλλιεργητικών συστημάτων και του εμβολιασμού του φασολιού με ριζόβια.

Πίνακας 11: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών και εμβολιασμού του φασολιού με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 στον λόγο C:N, στη συγκέντρωση N (%), στο ποσοστό του αζώτου που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa), στην ξηρή βιομάζα (Ξ.Β. kg στρέμμα⁻¹) και στα ποσά δεσμευμένου N (BNF, kg στρέμμα⁻¹) κατά την 1^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο.

Μεταχειρίσεις	C/N	N (%)	% Ndfa	Ξ.Β. (kg στρέμμα ⁻¹)	BNF (kg στρέμμα ⁻¹)
Χειμερινή καλλιέργεια					
Βιολογικό μπρόκολο	10,99	3,62	12,61 ab	249 b	1,15 bc
Συμβατικό μπρόκολο	10,61	3,77	18,53 a	346 a	2,41 a
Αγρανάπαυση	11,86	3,37	9,61 b	208 b	7,18 c
Χλωρή λίπανση	10,63	3,77	18,47 a	240 b	1,79 ab
Εμβολιασμός με ριζόβια					
Εμβολιασμένο	10,64	3,73	16,99	280	1,85
Μη εμβολιασμένο	11,41	3,54	12,62	242	1,18
Στατιστική σημαντικότητα					
Χειμερινή Καλλ.	ΜΣ	ΜΣ	*	**	***
Εμβολιασμός	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	*
Χειμ. Καλλ.*Εμβολ.	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ

Μέσες τιμές των χειμερινών καλλιεργειών (n=8) και του εμβολιασμού με ριζόβια (n=16) με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test. *, ** & *** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα με p<0.05, p < 0,01 και p < 0,001. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση.

Κατά τη 2^η καλλιεργητική περίοδο, ο λόγος C:N και η συγκέντρωση ολικού N στην υπέργεια βιομάζα του φασολιού επίσης δεν επηρεάστηκε από τα διαφορετικά καλλιεργητικά συστήματα και τον εμβολιασμό του φυτού με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 (Πίνακας 12). Επιπλέον, η εφαρμογή της χλωρής λίπανσης στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού περιόρισε σημαντικά την ποσοστό του N στους ιστούς του φασολιού που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa), ενώ υψηλότερο %Ndfa εντοπίστηκε στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου και την αγρανάπαυση. Επιπρόσθετα, η αυξημένη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος ωφέλησε την ξηρή βιομάζα της βιολογικής καλλιέργειας φασολιού, ενώ η περιορισμένη διαθεσιμότητα N στο έδαφος στα πειραματικά τεμάχια του βιολογικού φασολιού μετά από αγρανάπαυση και βιολογικό μπρόκολο έδρασε αρνητικά στην παραγόμενη ξηρή βιομάζα της καλλιέργειας. Επομένως, αυτή η αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ του %Ndfa και της ξηρής βιομάζας της καλλιέργειας, που αποδίδεται κυρίως στις αποκλίσεις της διαθεσιμότητας εδαφικού N, οδήγησε σε παρόμοια ποσά δεσμευμένου N (BNF) της καλλιέργειας του φασολιού κάτω από τα διαφορετικά συστήματα καλλιέργειας. Παράλληλα ο εμβολιασμός του φασολιού με ριζόβια δεν επηρέασε τις υπό μελέτη παραμέτρους της αζωτοδεσμευτικής ικανότητας, ενώ δεν εντοπίστηκαν στατιστικώς σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των 2 πειραματικών παραγόντων.

Πίνακας 12: Επίδραση των διαφορετικών χειμερινών καλλιεργειών και εμβολιασμού του φασολιού με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 στον λόγο C:N, στη συγκέντρωση N (%), στο ποσοστό του αζώτου που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa), στην ξηρή βιομάζα (Ξ.Β. kg στρέμμα⁻¹) και στα ποσά δεσμευμένου N (BNF, kg στρέμμα⁻¹) κατά την 2^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο.

Μεταχείριση	C/N	N (%)	%Ndfa	Ξ.Β. (kg στρέμμα ⁻¹)	BNF (kg στρέμμα ⁻¹)
Χειμερινή καλλιέργεια					
Βιολογικό μπρόκολο	14,41	2,78	34,94 a	141 bc	1,26
Συμβατικό μπρόκολο	13,99	2,90	28,63 ab	165 ab	1,39
Αγρανάπαυση	14,36	2,81	40,69 a	120 c	1,38
Χλωρή λίπανση	13,83	2,90	21,18 b	182 a	1,12
Εμβολιασμός με ριζόβια					
Εμβολιασμένο	14,25	2,82	32,28	156	1,40
Μη εμβολιασμένο	14,05	2,87	30,44	148	1,18
Στατιστική σημαντικότητα					
Χειμερινή Καλλ.	ΜΣ	ΜΣ	**	**	ΜΣ
Εμβολιασμός	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ
Χειμ. Καλλ. & Εμβολ.	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ

Μέσες τιμές των χειμερινών καλλιεργειών (n=8) και εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια (n=16) με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test. ** υποδηλώνει στατιστική σημαντικότητα με $p < 0,01$. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση.

4.2. Επίδραση διαφορετικών προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στα χαρακτηριστικά παραγωγής και στην ποιότητα του φασολιού

4.2.1. Φυσικά χαρακτηριστικά λοβών

Η ποιότητα του φασολιού επηρεάστηκε σημαντικά από τα διαφορετικά συστήματα καλλιέργειας καθώς στατιστικές σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν σε όλα τα υπό μελέτη φυσικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 13). Η εφαρμογή χλωρής λίπανσης στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού αύξησε τον αριθμό των λοβών ανά φυτό, το ύψος και το πλάτος λοβού καθώς και τον αριθμό σπερμάτων ανά λοβό κατά 16,3, 3,2, 9,8, 5,2, 3,6 και 10,8%, αντίστοιχα. Στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου οι παραγόμενοι νωποί λοβοί έφεραν σημαντικά υψηλότερο ποσοστό ξηράς ουσίας κατά 12% σε σχέση με τους λοβούς της συμβατικής και βιολογικής καλλιέργειας με την εφαρμογή χλωρής λίπανσης. Η συμβατική καλλιέργεια φασολιού απέδωσε λοβούς των οποίων τα φυσικά χαρακτηριστικά (ΜΛ, ΥΛ, πάχος, βάρος, ΞΟ και σπέρματα) δεν διέφεραν με αυτά των λοβών βιολογικής καλλιέργειας με εφαρμογή χλωρής λίπανσης. Τέλος, η καμπυλότητα των λοβών (ΜΛ/ΥΛ) δεν επηρεάστηκε σε κανένα από τα υπό μελέτη καλλιεργητικά συστήματα (Πίνακας 13).

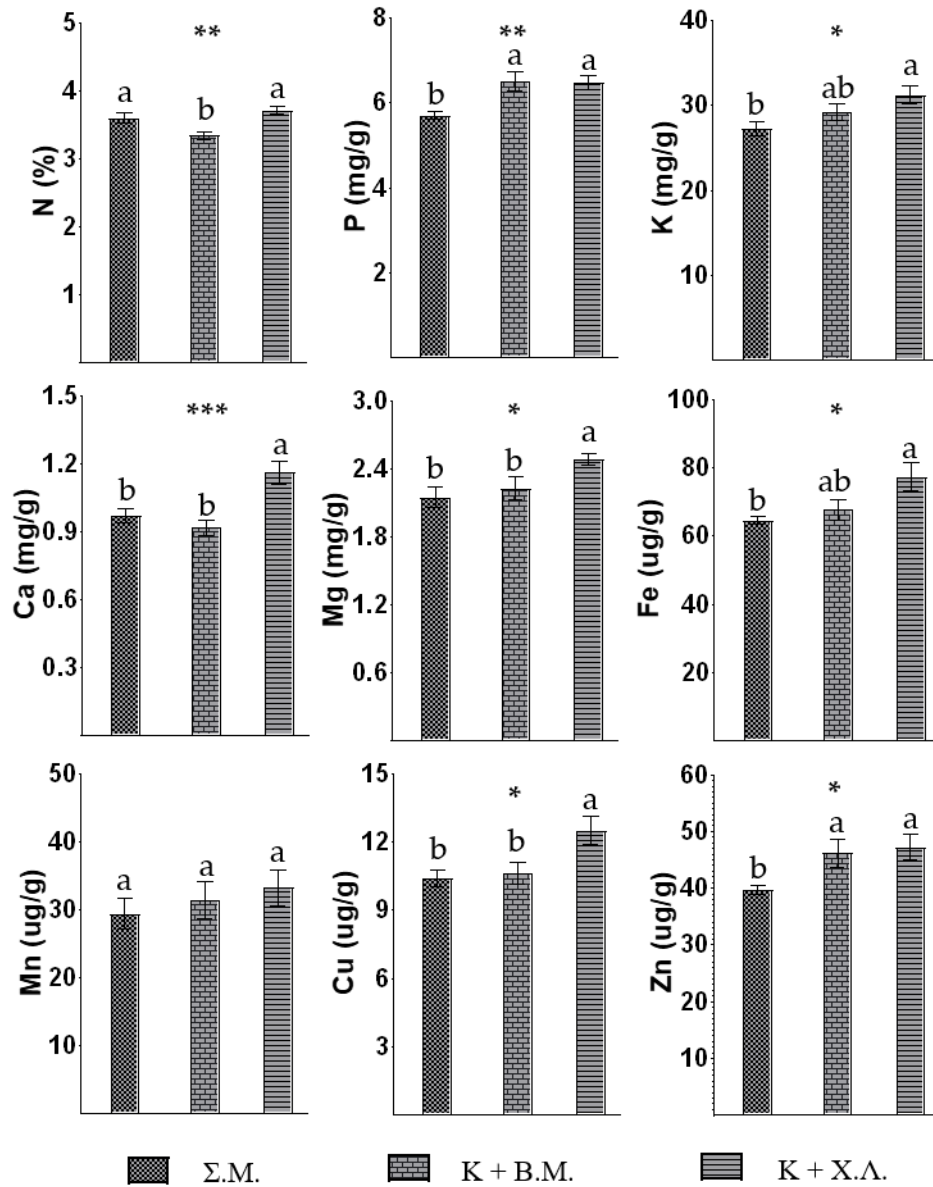
Πίνακας 13: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης στον αριθμό των λοβών ανά φυτό (Λοβοί, N φυτό⁻¹), μέσο νωπό βάρος λοβού (g λοβο⁻¹), μήκος λοβού (ΜΛ, cm), ύψος λοβού (ΥΛ, cm), καμπυλότητα (ΜΛ/ΥΛ), πλάτος λοβού (cm), αριθμό σπερμάτων ανά λοβό (N λοβό⁻¹) και ποσοστό ξηράς ουσίας (Ξ.Ο., %). Σ.Μ., Κ, ΒΜ και ΧΛ υποδηλώνουν συμβατικό μπρόκολο, πρόβεια κοπριά, βιολογικό μπρόκολο και χλωρή λίπανση αντίστοιχα.

Μεταχείριση	Λοβοί (N/φυτό ⁻¹)	Βάρος (g)	ΜΛ (cm)	ΥΛ (cm)	Καμπυλ. (ΜΛ/ΥΛ)	Πλάτος (cm)	Σπέρματα (N λοβό ⁻¹)	Ξ.Ο. (%)
Σ.Μ.	56,76 a	9,90 a	14,87 ab	18,59 a	1,25	1,37 b	6,73 a	9,86 b
(Κ+ΒΜ)	46,24 b	9,63 b	14,09 b	17,93b	1,28	1,37 b	6,21 b	10,83 a
(Κ+ΧΛ)	53,79 a	9,94 a	15,47 a	18,87 a	1,22	1,42 a	6,88 a	9,67 b
Στατιστική σημαντικότητα	*	*	*	*	ΜΣ	*	*	***

Μέσες τιμές διαφορετικών καλλιεργητικών πρακτικών (n=8) με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan multiple range test. * & *** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα με $p < 0,05$ και $p < 0,001$, αντίστοιχα. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση.

4.2.2. Συγκέντρωση θρεπτικών στους λοβούς

Η βιολογική παραγωγή λοβών που περιλάμβανε την προσθήκη της χλωρής λίπανσης, οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης του N στους ξηραμένους λοβούς, η οποία κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα με αυτή των συμβατικά παραγόμενων λοβών (Γράφημα 13). Επομένως, λοβοί με τη χαμηλότερη συγκέντρωση N προήλθαν από τη βιολογική καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου κατά τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Παράλληλα, η εφαρμογή της χλωρής λίπανσης στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού αύξησε τις συγκεντρώσεις των λοβών σε Ca, Mg και Cu σε σχέση τόσο με τη βιολογική που δεν περιλάμβανε την εφαρμογή χλωρής λίπανσης όσο και με το συμβατικό σύστημα καλλιέργειας. Επιπλέον, υψηλότερες συγκεντρώσεις των λοβών σε P και Cu καταγράφηκαν στα βιολογικά συστήματα καλλιέργειας, ανεξάρτητα από τις διαφορετικές πρακτικές θρέψης φυτών. Υψηλότερες συγκεντρώσεις στους βιολογικούς λοβούς έναντι των συμβατικά παραγόμενων σημειώθηκαν και στα στοιχεία K και Fe, ωστόσο η απόκλιση ήταν σημαντική μόνο την εφαρμογή της χλωρής λίπανσης. Τέλος, η περιεκτικότητα των ξηρών λοβών σε Mn δεν επηρεάστηκε στατιστικώς σημαντικά από τις διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές



Γράφημα 13: Επίδραση των 3 καλλιεργητικών πρακτικών στις συγκεντρώσεις των μακρο- (mg/g) και μικροστοιχείων (μg/g) στην ξηρή ουσία των παραγόμενων λοβών. Διαφορετικά γράμματα σε κάθε ράβδο υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan multiple range test. *, ** & *** υποδηλώνουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση με $p < 0,05$, $0,01$ και $0,001$, αντίστοιχα. Σ.Μ., Κ, ΒΜ και ΧΛ υποδηλώνουν συμβατικό μπρόκολο, πρόβεια κοπριά, βιολογικό μπρόκολο και χλωρή λίπανση αντίστοιχα

4.2.3. Βιοχημικές ιδιότητες

Πίνακας 14: Επίδραση των διαφορετικών καλλιεργητικών συστημάτων στην αντιοξειδωτική ικανότητα (FRAP & TEAC) και στην περιεκτικότητα ολικών φαινολικών (TPC) και φλαβονοειδών (TFC) σε ξηρούς λοβούς. Σ.Μ., Κ, ΒΜ και ΧΛ υποδηλώνουν συμβατικό μπρόκολο, πρόβεια κοπριά, βιολογικό μπρόκολο και χλωρή λίπανση αντίστοιχα.

Μεταχείριση	FRAP (asc mg/g)	TEAC (trolox mg/g)	TPC (gallic mg/g)	TFC (querc. mg/g)
ΣΜ	1,68 b	2,67 b	7,14 b	9,68 b
Κ + ΒΜ	2,05 a	3,17 a	8,25 a	13,94 a
Κ + ΧΛ	1,90 ab	3,03 ab	6,84 b	8,89 b
Στατιστική σημαντικότητα	*	**	*	**

Μέσες τιμές διαφορετικών καλλιεργητικών πρακτικών (n=8) με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan multiple range test. * & ** υποδηλώνουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση με $p < 0,05$ και $p < 0,01$, αντίστοιχα.

Στην παρούσα μελέτη, ο προσδιορισμός της αντιοξειδωτικής ικανότητας των λοβών πραγματοποιήθηκε από την αντιοξειδωτική ισχύ αναγωγής τρισθενούς σιδήρου (FRAP) και από την ισοδύναμη αντιοξειδωτική ικανότητα Trolox (TEAC). Και οι 2 μέθοδοι κατέγραψαν υψηλότερο αντιοξειδωτικό δυναμικό στους λοβούς που προήλθαν από το βιολογικό σύστημα καλλιέργειας χωρίς την προσθήκη χλωρής λίπανσης έναντι αυτών του συμβατικού. Ωστόσο, η εφαρμογή της χλωρής λίπανσης δεν οδήγησε σε σημαντική απόκλιση στο παραπάνω μέγεθος μεταξύ των καλλιεργητικών πρακτικών (Πίνακας 14). Αντίθετα, η εφαρμογή της χλωρής λίπανσης μείωσε τα επίπεδα των ολικών φλαβονοειδών και φαινολικών των βιολογικών λοβών στα επίπεδα των συμβατικών.

4.2.4. Σάκχαρα και Άμυλο

Η συμβατική και οι 2 διαφορετικές βιολογικές πρακτικές δεν επηρέασαν τα επίπεδα των σακχάρων στους λοβούς φασολιού (Πίνακας 15). Ειδικότερα, η εφαρμοσμένη ενζυμική μέθοδος τόσο για τον προσδιορισμό των 3 σακχάρων (γλυκόζη, φρουκτόζη και σακχαρόζη) όσο και για τον προσδιορισμό του αμύλου δεν οδήγησε σε σημαντικές αποκλίσεις.

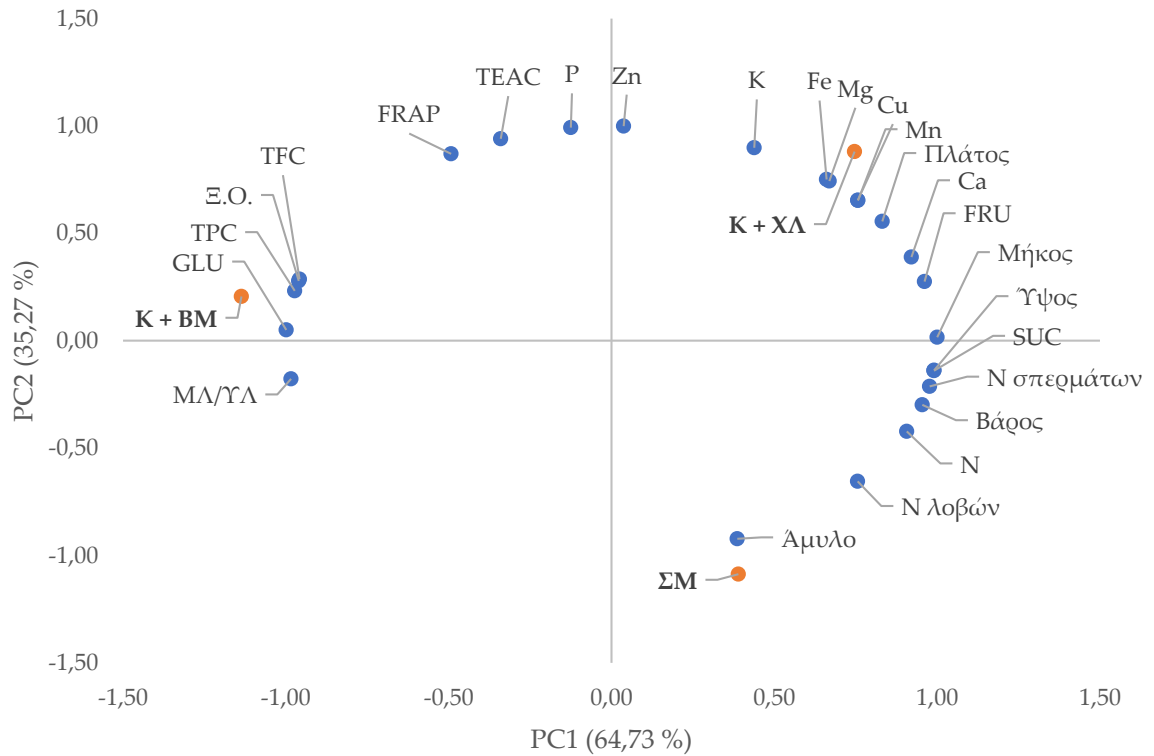
Πίνακας 15: Επίδραση των διαφορετικών πρακτικών στη συγκέντρωση των λοβών σε σάκχαρα και άμυλο. Σ.Μ., Κ, ΒΜ και ΧΛ υποδηλώνουν συμβατικό μπρόκολο, πρόβεια κοπριά, βιολογικό μπρόκολο και χλωρή λίπανση αντίστοιχα

Μεταχείριση	Σάκχαρα (mg/g)			Άμυλο (mg/g eq. to anhydro glucose)
	Γλυκόζη	Φρουκτόζη	Σακχαρόζη	
ΣΜ	22,48	11,73	1,73	81,99
Κ + ΒΜ	23,20	11,31	1,52	79,02
Κ + ΧΛ	22,04	12,56	1,82	79,94
Στατιστική σημαντικότητα	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ

Μέσες τιμές (n=8) των διαφορετικών καλλιεργητικών πρακτικών. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση.

4.2.5. Ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA)

Η ανάλυση κύριων συνιστωσών των φυσικών και χημικών παραμέτρων ποιότητας του νωπών λοβών φασολιού που προήλθαν από διαφορετικά συστήματα καλλιέργειας ανέδειξε πως οι 2 πρώτες συνιστώσες (PCs) διευκρινίζουν το 100% της συνολικής απόκλισης με το PC1 και PC2 να αναλογούν σε 64,73% και 35,27%, αντίστοιχα. Το PC1 σχετίστηκε θετικά με τη συγκέντρωση σακχάρων, αμύλου και θρεπτικών στους λοβούς (εκτός του P), τα χαρακτηριστικά των λοβών (εκτός από την καμπυλότητα και ποσοστό ξηράς ουσίας), ενώ το PC2 σχετίστηκε αρνητικά με τα χαρακτηριστικά παραγωγής (εκτός από το πλάτος, μήκος και ποσοστό ξηράς ουσίας), καθώς και με τα επίπεδα αμύλου και σακχαρόζη των λοβών. Σύμφωνα με τη γραφική αναπαράσταση των PC1/2 (Γράφημα 14), η βιολογική καλλιέργεια φασολιού με την εφαρμογή χλωρής λίπανσης (Κ + ΧΛ) στο πάνω δεξιά τεταρτημόριο, ενώ το πάνω αριστερά σχετίζεται με τη βιολογική καλλιέργεια φασολιού με τα υπολείμματα καλλιέργειας μπρόκολου (Κ + ΒΜ). Τέλος, το κάτω δεξιά τεταρτημόριο περιέχει τη συμβατική καλλιέργεια φασολιού (ΣΜ).



Γράφημα 14: Σχηματική απεικόνιση της ανάλυσης κύριων συνιστωσών των χαρακτηριστικών παραγωγής (αριθμός λοβών ανά φυτό (N λοβών), αριθμός σπερμάτων ανά λοβό (N σπερμάτων), μέσο νωπό βάρος (Βάρος), μήκος, ύψος, καμπυλότητα (ΜΛ/ΥΛ), πλάτος και ποσοστό ξηράς ουσίας (ΞΟ)) της συγκέντρωσης των λοβών σε θρεπτικά στοιχεία (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu & Zn), των βιοχημικών ιδιοτήτων λοβών (FRAP, TEAC, TPC, TFC) και της συγκέντρωσης του λοβού σε σάκχαρα (γλυκόζη (GLU), φρουκτόζη (FRU), σακχαρόζη (SUC)) και άμυλο των διαφορετικών συστημάτων καλλιέργειας.

4.3. Απόδοση υδροπονικού φασολιού υπό ελλειμματική παροχή αζώτου και εμβολιασμού με ριζόβια

4.3.1. Χαρακτηριστικά βιομάζας

Όπως παριστάνεται στον Πίνακα 15, τα διαφορετικά σχήματα θρέψης N δεν επηρέασαν τη νωπή υπέργεια βιομάζα του φυτού σημαντικά κατά τα πρώτα βλαστικά στάδια ανάπτυξης έως και την ανθοφορία. Ωστόσο, μετά από το στάδιο της ανθοφορίας και κατά το στάδιο της έκπτυξης των πρώτων λοβών η βιομάζα του φυτού περιορίστηκε κατά 9% στα φυτά του σχήματος 50-25% N σε σχέση με τα φυτά με επάρκεια παροχής N (100% N). Επιπλέον, ο εμβολιασμός του φασολιού με ριζόβια δεν επηρέασε την ανάπτυξη του φυτού σε κανένα από τα υπό μελέτη αναπτυξιακά στάδια.

Σε αντίθεση με τη βιομάζα, η έκπτυξη των φυματίων επηρεάστηκε σημαντικά και από τα διαφορετικά επίπεδα N αλλά και από τον εμβολιασμό των φυτών με διαφορετικά αζωτοδεσμευτικά στελέχη. Ειδικότερα η ελλειμματική παροχή αζώτου στο 75% και 50% των αναγκών των φυτών κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης, αύξησε τον αριθμό των φυματίων ανά ρίζα, σε σχέση με την επαρκή παροχή N, όταν τα φυτά εμβολιάστηκαν με τα υπό μελέτη ριζόβια. Ωστόσο, ο αριθμός των φυματίων κατά το στάδιο της ανθοφορίας και της έκπτυξης των λοβών ήταν υψηλότερος στα φυτά όπου η αρχική παροχή N ήταν 50% N σε σχέση με τα φυτά που παρέχοντας με 75% N κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης. Η ικανότητα έκπτυξης φυματίων ευνοήθηκε επίσης σημαντικά από τον εμβολιασμό των φυτών με το στέλεχος PVTN21, ανεξάρτητα από την παροχή N, ενώ κατά το στάδιο της έκπτυξης των λοβών η θετική επίδραση του παραπάνω στελέχους στον αριθμό των φυματίων στη ρίζα καταγράφηκε μόνο στις μεταχειρίσεις ελλειμματικής παροχής N. Αντίθετα, το εμπορικό στέλεχος CIAT 899 ωφέλησε τον αριθμό των φυματίων ανά ρίζα μόνο κάτω από ελλειμματική παροχή N, επίδραση που καταγράφηκε μέχρι και το στάδιο της ανθοφορίας.

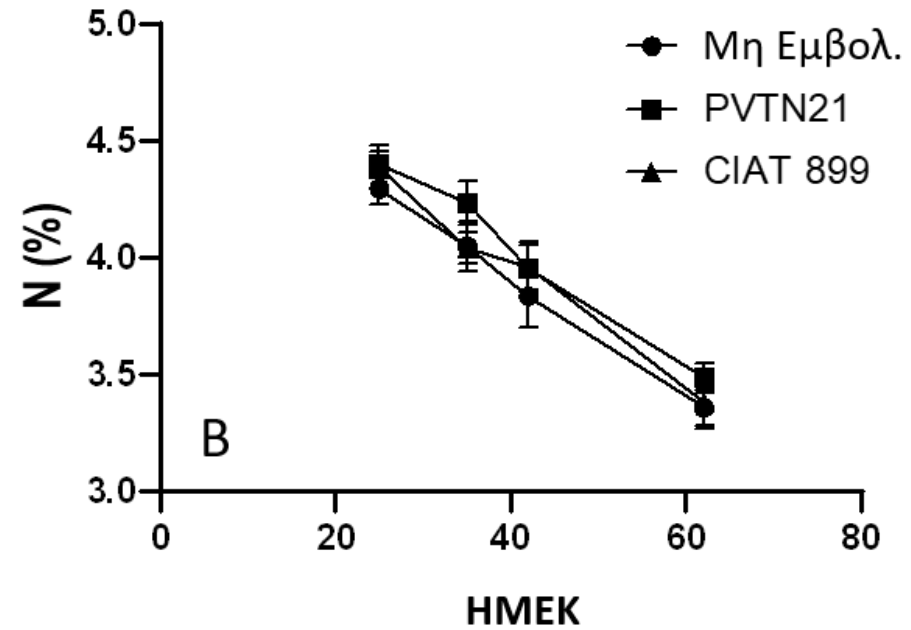
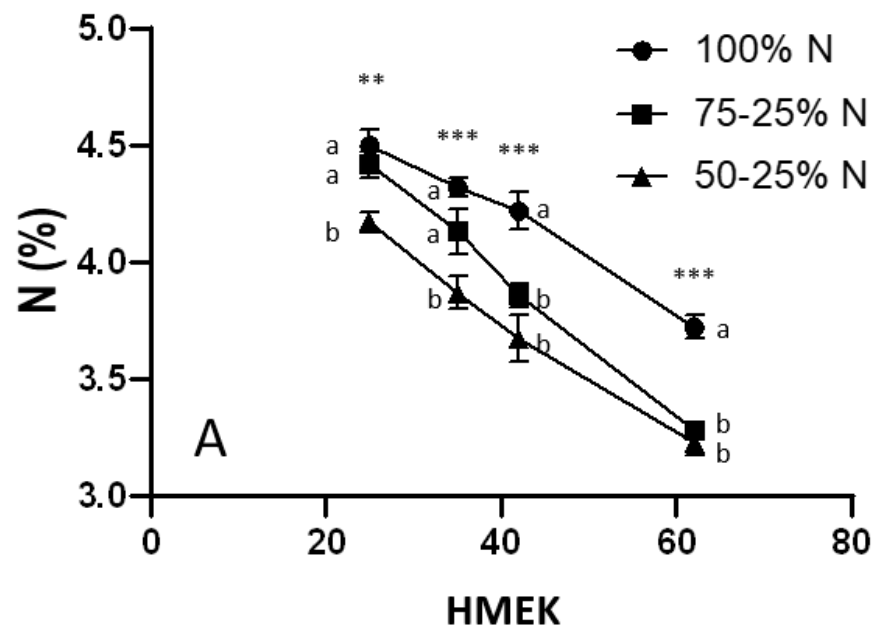
Πίνακας 16: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια στη νωπή βιομάζα (g φυτό⁻¹) και των αριθμών των φυματίων ανά ρίζα (N^ο φυτό⁻¹) του φασολιού κατά τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης του φυτού.

Μεταχειρίσεις		Βλαστικό		Ανθοφορία		Έκπτυξη λοβών	
N	Ριζόβια	Βιομάζα (g φυτό ⁻¹)	Φυμάτια (N ^ο φυτό ⁻¹)	Βιομάζα (g φυτό ⁻¹)	Φυμάτια (N ^ο φυτό ⁻¹)	Βιομάζα (g φυτό ⁻¹)	Φυμάτια (N ^ο φυτό ⁻¹)
Κύριες Επιδράσεις							
100%		65,1	18,4	103	30,7	149 a	23,4
75-25%		59,5	30,6	96	55,2	141 ab	62,7
50-25%		68,1	73,6	104	89,6	135 b	97,9
	Μη εμβ.	63,4	4,9	94	11,2	137	22,8
	PVTN21	64,8	87,4	110	105,1	147	107,7
	CIAT 899	64,5	30,2	99	59,1	142	47,9
Αλληλεπιδράσεις							
100%	Μη εμβ.	69,4	0 d	108	8 c	146	13 d
	PVTN21	64,2	46 bc	111	64.3 b	150	40 d
	CIAT 899	61,6	9,3 cd	89	26 c	151	17,3 d
75-25%	Μη εμβ.	55,2	0 d	87	12,7 c	134	22,3 d
	PVTN21	59,3	71,7 b	99	91,7 b	142	115,7 b
	CIAT 900	64,1	20 cd	103	61,3 b	148	50 cd
50-25%	Μη εμβ..	65,8	14,7 cd	88	19,3 c	130	39,7 cd
	PVTN21	70,9	144,7 a	120	159,3 a	148	167,3 a
	CIAT 901	67,6	61,3 b	105	90 b	128	86,7 bc
Στατιστική σημαντικότητα							
N		ΜΣ	***	ΜΣ	***	*	***
Ριζόβια		ΜΣ	***	ΜΣ	***	ΜΣ	***
N*Ριζόβια		ΜΣ	*	ΜΣ	*	ΜΣ	*

Μέσες τιμές των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N (n=3) και του εμβολιασμού με ριζόβια (n=3) με διαφορετικό γράμμα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test. ***, ** & * στατιστικώς σημαντικές αποκλίσεις με $p < 0,001$, $p < 0,01$ & $p < 0,05$, αντίστοιχα. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση.

4.3.2. Ολικό N & C

Σύμφωνα με το Γράφημα 15Α, η ελλειμματική παροχή N στα φυτά των φασολιών περιόρισε την ολική συγκέντρωση N στη ξηρή βιομάζα του φυτού καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο. Ειδικότερα, τα φυτά που παρέχονταν με 50% N κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης κατέγραψαν σημαντικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις N στους φυτικούς τους ιστούς έναντι των φυτών με επαρκή παροχή N. Έπειτα, η συγκέντρωση του N στα φυτά του σχήματος θρέψης 75-25% N μειώθηκε σημαντικά σε σχέση με αυτή των φυτών μάρτυρα (100% N) μετά από το στάδιο της άνθησης, όπου η παροχή των φυτών σε N μειώθηκε από 75% σε 25% N. Γενικότερα, η συγκέντρωση N στα φυτά μειωνόταν σταδιακά με την πρόοδο της καλλιέργειας, ενώ κατά το στάδιο της μέγιστης απόδοσης παραγωγής η συγκέντρωση του N στην υπέργεια βιομάζα των φυτών (βλαστός + λοβοί) κυμάνθηκε κάτω από 4% και 3,5% σε συνθήκες επάρκειας και ελλειμματικής παροχής N, αντίστοιχα.



Γράφημα 15: Επίδραση των διαφορετικών εισροών N (A) και εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια (B) στην ολική συγκέντρωση N στη υπέργεια βιομάζα φασολιού κατά το στάδιο της βλαστικής ανάπτυξης (25 ημέρες μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας, HMEK), κατά την ανθοφορία (35 HMEK), κατά την έκπτυξη των πρώτων λοβών (42 HMEK) και κατά την παραγωγή (62 HMEK).

Πίνακας 17: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και του εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια, στον συντελεστή φωτοσύνθεσης Δ, την ολική συγκέντρωση C και στον λόγο C:N στην υπέργεια βιομάζα του φυτού.

Μεταχειρίσεις		Έκπτυξης λοβών			Παραγωγής		
N	Ριζόβια	Δ	Total-C	C:N	Δ	Total-C	C:N
Κύριες Επιδράσεις							
100%		22,01	39,38	9,36	21,45 a	39,38	10,60
75-25%		21,72	39,88	10,35	20,82 b	39,63	12,09
50-25%		21,58	39,54	10,84	20,72 b	39,84	12,38
	Μη εμβ.	21,86	39,65	10,45	20,88	39,67	11,87
	PVTN21	21,61	39,41	10,01	21,00	39,59	11,39
	CIAT 899	21,84	39,74	10,09	21,10	39,59	11,82
Αλληλεπιδράσεις							
100%	Μη εμβ.	22,30	39,25	9,31 d	21,35	39,52	10,94 de
	PVTN21	21,74	39,38	9,42 cd	21,38	39,47	10,60 e
	CIAT 899	21,97	39,52	9,35 d	21,61	39,14	10,26 e
75-25%	Μη εμβ.	21,88	39,69	10,18 bcd	20,70	39,41	11,97 bc
	PVTN21	21,49	39,84	10,65 bc	20,86	39,69	11,94 bc
	CIAT 899	21,79	40,13	10,23 bcd	20,90	39,80	12,37 abc
50-25%	Μη εμβ.	21,40	40,02	11,85 a	20,60	40,08	12,69 ab
	PVTN21	21,58	39,03	9,98 bcd	20,76	39,60	11,64 cd
	CIAT 899	21,77	39,57	10,68 b	20,80	39,82	12,83 a
Στατιστική σημαντικότητα							
N		ΜΣ	ΜΣ	***	***	ΜΣ	***
	Ριζόβια	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*
	N*Ριζόβια	ΜΣ	ΜΣ	*	ΜΣ	ΜΣ	*

Μέσες τιμές διαφορετικών εισροών N (n=3) και εμβολιασμού με ριζόβια (n=3) με διαφορετικά γράμματα στην ίδια στήλη υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test. ***, ** & * δηλώνουν στατιστική σημαντικότητα με $p < 0,001$, $p < 0,01$ & $p < 0,05$. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση.

Σύμφωνα με τον πίνακα 17, ούτε ο συντελεστής φωτοσύνθεσης (Δ) ούτε η συγκέντρωση του C στην υπέργεια βιομάζα των φυτών επηρεάστηκαν σημαντικά από τα διαφορετικά σχήματα θρέψης του φυτού καθώς και ο εμβολιασμός των φυτών με ριζόβια μέχρι και το στάδιο του σχηματισμού των πρώτων λοβών. Ωστόσο, κατά το ίδιο στάδιο ανάπτυξης η ελλειμματική παροχή N (75-25% & 50-25% N), αύξησαν σημαντικά τον λόγο C:N, απόκλιση που παρατηρήθηκε εξίσου κατά το επακόλουθο στάδιο της παραγωγής. Παράλληλα, στο στάδιο παραγωγής ο εμβολιασμός του φυτού με το στέλεχος PVTN21 μείωσε το λόγο C:N, ανεξάρτητα από τα διαφορετικά σχήματα θρέψης N. Επιπλέον, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των 2 υπό μελέτη παραγόντων έδειξαν πως ο εμβολιασμός με το στέλεχος PVTN21 αύξησε τον λόγο C:N των φυτών με τις χαμηλότερες εισροές N (50-25%) κατά το στάδιο της καταβολής των πρώτων λοβών και της παραγωγής. Τέλος, και τα 2 σχήματα ελλειμματικής παροχής N (75-25% & 50-25% N) μείωσαν τον συντελεστή Δ στην υπέργεια βιομάζα του φυτού και στα 2 υπό μελέτη στάδια.

4.3.3. Αζωτοδεσμευτική ικανότητα

Κατά το στάδιο της εμφάνισης των πρώτων λοβών, το ποσοστό του N που προήλθε από την ατμόσφαιρα αυξήθηκε αναλογικά με τη μείωση της παροχής των φυτών σε N κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης (75% & 50% N) (Πίνακας 18). Ωστόσο, η παραπάνω διαφοροποίηση δεν παρατηρήθηκε στα συνολικά ποσά δεσμευμένου N, όπου τα διαφορετικά σχήματα ελλειμματικής παροχής N αύξησαν ομοίως το παραπάνω μέγεθος. Κατά το στάδιο της παραγωγής, τα διαφορετικά σχήματα θρέψης αζώτου είχαν παρόμοια επίδραση στο %Ndfa με αυτή που καταγράφηκε κατά το στάδιο έκπτυξης λοβών. Αντίθετα, το σχήμα θρέψης 75-25% N περιόρισε σημαντικά την υπέργεια βιομάζα των φυτών (βλαστοί + λοβοί) με αποτέλεσμα τα σημαντικά μειωμένα δεσμευμένα ποσά N, τα οποία κυμάνθηκαν σε χαμηλότερα επίπεδα από αυτά των φυτών με επάρκεια N. Παράλληλα, υψηλότερα ποσά N δέσμευσε η καλλιέργεια με την εφαρμογή του σχήματος 50-25% N. Ο εμβολιασμός των φυτών με το στέλεχος PVTN21 αύξησε τη συνολική αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών (%Ndfa & BNF) ανεξάρτητα από τις διαφορετικές εξωτερικές εισροές N. Ωστόσο, η απόδοση του εμβολιασμού αυξήθηκε με την ανάλογη μείωση παροχής N. Αντίθετα, το εμπορικό στέλεχος CIAT 899, ωφέλησε την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού μόνο κατά τις συνολικά

χαμηλότερες N εισροές (50-25% N), ενώ οι επιδόσεις του στο %Ndfa και BNF ήταν χαμηλότερες από αυτές του στελέχους PVTN21.

Πίνακας 18: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και του εμβολιασμού με ριζόβια στο ποσοστό του N που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa), στην ξηρή βιομάζα (Ξ.Β.) της καλλιέργειας (kg στρέμμα⁻¹) και στα συνολικά ποσά N που δέσμευσε η καλλιέργεια BNF (kg στρέμμα⁻¹ N) κατά τα στάδια της έκπτυξης των λοβών και της παραγωγής.

Μεταχείριση		Έκπτυξης λοβών				Παραγωγής	
N	Ριζόβια	%Ndfa	Ξ.Β. (kg στρέμμα ⁻¹)	BNF (kg στρέμμα ⁻¹)	%Ndfa	Ξ.Β. (kg στρέμμα ⁻¹)	BNF (kg στρέμμα ⁻¹)
Κύριες επιδράσεις							
100%		10,36 c	75,9	0,34 b	24,43	227	2,06
75-25%		15,01 b	78,2	0,45 a	28,16	160	1,47
50-25%		18,23 a	75,5	0,52 a	38,60	185	2,35
	Μη εμβ.	13,21 b	73,7	0,37 b	28,21	183	1,68
	PVTN21	16,79 a	79,0	0,53 a	33,31	200	2,33
	CIAT 899	13,59 b	76,8	0,40 b	29,67	189	1,871
Αλληλεπιδράσεις							
100%	Μη εμβ.	10,60	73,7	0,34	22,66 e	244 a	2,00 bc
	PVTN21	11,49	75,6	0,36	27,37 de	222 ab	2,26 b
	CIAT 899	8,99	78,6	0,30	23,27 de	214 bc	1,91 bcd
75-25%	Μη εμβ.	14,94	73,2	0,42	28,77 cd	146 e	1,39 d
	PVTN21	15,98	81,9	0,50	27,12 de	172 de	1,55 cd
	CIAT 899	14,10	79,3	0,44	28,59 cd	161 e	1,48 cd
50-25%	Μη εμβ.	14,11	74,4	0,35	33,18 bc	158 e	1,65 cd
	PVTN21	22,88	79,6	0,72	45,44 a	205 bc	3,17 a
	CIAT 899	17,69	72,5	0,48	37,16 b	193 cd	2,22 b
Στατιστική σημαντικότητα							
	N	***	ΜΣ	**	***	***	***
	Ριζόβια	*	ΜΣ	*	**	*	***
	N*Ριζόβια	ΜΣ	ΜΣ	ΜΣ	*	**	**

Μέσες τιμές (n=3) διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και εμβολιασμού με ριζόβια με διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test. ***, ** & * υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα με $p < 0,001$, $p < 0,01$, $p < 0,05$. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση

4.3.4. Χαρακτηριστικά παραγωγής

Σχετικά με την απόδοση της καλλιέργειας, η ελλειμματική παροχή N περιόρισε σημαντικά την παραγωγή των νωπών λοβών (Πίνακας 19). Ειδικότερα, τα σχήματα θρέψης 75-25% και 50-25% N μείωσαν τον αριθμό των παραγόμενων λοβών ανά φυτό κατά 39,3% και 19,7%, ενώ το μέσο νωπό βάρος του λοβού μειώθηκε κατά 7,4% και 3,4%, αντίστοιχα. Επομένως, οι δυσμενείς επιπτώσεις της ελλειμματικής παροχής N στα παραπάνω χαρακτηριστικά οδήγησαν σε σημαντική απώλεια παραγωγής (συνολικό βάρος νωπών λοβών ανά φυτό) κατά 43,8% και 22,5% στα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό 75-25% και 50-25% N.

Ανεξάρτητα από την καταπόνηση σε N, ο εμβολιασμός των φυτών με ριζόβια ωφέλησε τόσο τον αριθμό όσο και το μέγεθος των παραγόμενων λοβών, με αποτέλεσμα την αύξηση παραγωγής κατά 19,5% και 9,2% στα φυτά που εμβολιάστηκαν με τα στελέχη PVTN21 και CIAT 899, αντίστοιχα. Ωστόσο, οι ευεργετικές επιδράσεις του εμβολιασμού των φυτών με αζωτοδεσμευτικά στελέχη εξαρτήθηκαν σημαντικά από την παροχή των φυτών με διαφορετικά επίπεδα N. Ειδικότερα, κάτω από επάρκεια N ο εμβολιασμός με ριζόβια δεν ωφέλησε την απόδοση του φυτού. Αντίθετα, κάτω από το σχήμα θρέψης 50-25% N, ο εμβολιασμός του φυτού με τα στελέχη PVTN21 και CIAT899 αύξησε τις αποδόσεις του υδροπονικού φασολιού κατά 36,1% και 20,6%, αντίστοιχα.

Πίνακας 19: Επίδραση των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και του εμβολιασμού των φυτών με ριζόβια, στον αριθμό των λοβών ανά φυτό (Λοβοί, N φυτό⁻¹), μέσο νωπό βάρος λοβού (Βάρος λοβού, g λοβό⁻¹) και συνολική παραγωγή νωπών λοβών (g φυτό⁻¹).

Μεταχείριση		Χαρακτηριστικά Παραγωγής		
N	Ριζόβια	Παραγωγή (g φυτό ⁻¹)	Λοβοί (N ^ο . φυτό ⁻¹)	Βάρος λοβού (g λοβό ⁻¹)
Κύριες Επιδράσεις				
100%		276	17,3	15,95
75-25%		155	10,5	14,78
50-25%		214	13,9	15,41
	Μη εμβολ.	195	13,0	14,86
	PVTN21	233	14,7	15,75
	CIAT 899	217	13,9	15,55
Αλληλεπιδράσεις				
100%	Μη εμβολ.	273 a	17,2 a	15,87 ab
	PVTN21	282 a	17,4 a	16,20 a
	CIAT 899	275 a	17,4 a	15,78 ab
75-25%	Μη εμβολ.	133 e	9,4 f	14,12 e
	PVTN21	172 d	11,2 de	15,35 bc
	CIAT 899	161 d	10,8 e	14,88 cd
50-25%	Μη εμβολ.	180 d	12,4 cd	14,58 de
	PVTN21	245 b	15,6 b	15,68 ab
	CIAT 899	217 c	13,6 c	15,97 ab
Στατιστική σημαντικότητα				
N		***	***	***
Ριζόβια		***	***	***
N*Ριζόβια		*	*	*

Μέσες τιμές (n=3) των διαφορετικών σχημάτων θρέψης N και του εμβολιασμού με ριζόβια με διαφορετικούς χαρακτήρες υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντική απόκλιση κατά Duncan's multiple range test. *** & ** υποδηλώνουν στατιστική σημαντικότητα με $p < 0,001$ και $p < 0,01$, αντίστοιχα. ΜΣ = μη σημαντική απόκλιση

5. Συζήτηση

5.1. Επίδραση των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στην απόδοση του βιολογικού φασολιού

Σύμφωνα με τους Berry et al. (2006), το χάσμα των αποδόσεων μεταξύ των βιολογικών και συμβατικών συστημάτων καλλιέργειας επηρεάζεται κυρίως από τον συγχρονισμό της υψηλής διαθεσιμότητας N στο έδαφος με τα απαιτητικά σε N αναπτυξιακά στάδια των φυτών παρά από τις συνολικές εισροές N στο κάθε σύστημα. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση αυτών των συστημάτων είναι και οι επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και η ποικιλομορφία των βιολογικών καλλιεργητικών πρακτικών σε παγκόσμιο επίπεδο (De Ponti et al., 2012). Δεδομένου πως η εφαρμογή ανόργανων N λιπασμάτων και των συμβατικών μυκητοκτόνων, ζιζανιοκτόνων και εντομοκτόνων απαγορεύεται στα βιολογικά συστήματα καλλιέργειας, η εναλλαγή καλλιεργειών θεωρείται ως μία εναλλακτική προσέγγιση για τη βελτίωση της παροχής N και για περαιτέρω αύξηση της γονιμότητας και δομής του εδάφους καθώς και για τον περιορισμό της πίεσης από ζιζάνια και φυσικούς εχθρούς (Bullock, 1992). Σύμφωνα με τον Bullock (1992), οι ευεργετικές ιδιότητες των προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών εμφανίζονται κυρίως μακροπρόθεσμα κάτω από πιο ποικίλες αλληλουχίες καλλιεργειών. Επομένως, τα σωρευτικά οφέλη των παραπάνω πρακτικών απαιτούν χρόνο για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων στα βιολογικά καλλιεργητικά συστήματα. Επιπλέον, το χάσμα της απόδοσης μεταξύ των δύο συστημάτων είναι μεγαλύτερο κατά τα πρώτα στάδια μετάβασης από συμβατική σε βιολογική καλλιέργεια, το οποίο, ωστόσο, περιορίζεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου (Trewavas, 2001). Αντίθετα, οι Martini et al. (2004) συμπέραναν πως υψηλές αποδόσεις κατά τα πρώτα χρόνια μετάβασης από συμβατικά σε βιολογικά συστήματα καλλιέργειας είναι δυνατές κάτω από επιδέξιες βιολογικές πρακτικές.

Στην παρούσα μελέτη, οι εφαρμοσμένες βιολογικές πρακτικές δεν περιόρισαν την απόδοση της καλλιέργειας μπρόκολου κατά την 1^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Το εύρημα αυτό μπορεί να οφείλεται στα αυξημένα αποθέματα του πειραματικού αγρού σε θρεπτικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένου και των υψηλών επιπέδων της οργανικής ουσίας. Ειδικότερα, τα υψηλά επίπεδα εδαφικής οργανικής ουσίας (5%) έγκειται στο γεγονός πως ο πειραματικός αγρός παρέμεινε ακαλλιέργητος τα τελευταία 5 χρόνια πριν από τη διεξαγωγή αυτής της μελέτης, ενώ τα ελευθέρως

ανεπτυγμένα ζιζάνια κατά την περίοδο αυτή ενσωματώθηκαν στο έδαφος πριν την εγκατάσταση του πειράματος αγρού. Ωστόσο, κατά την επακόλουθη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο (2018-2019), το βιολογικό σχήμα θρέψης περιόρισε την απόδοση της καλλιέργειας μπρόκολου κατά 20%. Παρόμοια μείωση στην απόδοση του μπρόκολου υπό βιολογικές καλλιεργητικές πρακτικές παρατηρήθηκε και στη μελέτη των Yildirim et al. (2011), όπου η απόδοση του βιολογικού μπρόκολου ήταν 23% λιγότερη από αυτή του συμβατικού συστήματος. Επιπλέον, σύμφωνα με την έρευνα των Øvsthus et al. (2015), όπου το μπρόκολο καλλιεργήθηκε είτε βιολογικά, χρησιμοποιώντας πρόβεια κοπριά για την αζωτούχο λίπανση των φυτών, είτε συμβατικά για 2 διαδοχικές χρονιές, η απόδοση του μπρόκολου περιορίστηκε σημαντικά και τις 2 χρονιές από τις βιολογικές πρακτικές ακόμα και αν οι συνολικές εισροές N ήταν ίδιες και στα 2 συστήματα. Ωστόσο, στην παραπάνω μελέτη, οι εισροές του N στο βιολογικό σύστημα καλλιέργειας πραγματοποιήθηκαν μόνο μέσω της βασικής λίπανσης, πρακτική που ίσως περιόρισε τη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος κατά τα κρίσιμα αναπτυξιακά στάδια του φυτού.

Στην παρούσα μελέτη, η μειωμένη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος φαίνεται να ήταν ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στην απόδοση του βιολογικού φασολιού που ακολούθησε τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου. Το εύρημα αυτό είναι σε συμφωνία με την μελέτη των Kontoroulou et al. (2015a), στην οποία η παραγωγή νωπών λοβών του φασολιού μειώθηκε κατά 33% κάτω από βιολογικό σύστημα καλλιέργειας εξαιτίας της περιορισμένης διαθεσιμότητας του N στο έδαφος. Αντίθετα, οι βιολογικές πρακτικές δεν επηρέασαν αρνητικά την απόδοση του φασολιού όταν το σχήμα θρέψης περιλάμβανε την εφαρμογή χλωρής λίπανσης. Τα οφέλη της εφαρμογής της χλωρής λίπανσης στην απόδοση των βιολογικών καλλιεργητικών συστημάτων έχουν εκτενώς αναφερθεί και σε άλλες μελέτες (Chalk, 1999; Rochester et al., 2001; Peoples et al., 2009; Jensen et al., 2010). Επιπλέον, η καλλιέργεια του κουκιού ως χλωρή λίπανση δεν συνεισφέρει μόνο στη μείωση του χάσματος της απόδοσης μεταξύ των συμβατικών και βιολογικών καλλιεργειών, αλλά σύμφωνα με τους Wani et al. (1994), δύναται να μεγιστοποιήσει την απόδοση των καλλιεργειών ανεξαρτήτως των διαφορετικών συστημάτων (βιολογικό-συμβατικό).

Η ωφέλιμη επίδραση του εμβολιασμού των κουκιών με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1 στην ανάπτυξη του φυτού στην παρούσα έρευνα είναι σύμφωνη με προηγούμενες αναφορές (Badr El-Din & Moawad, 1988). Ωστόσο, η θετική επίδραση του εμβολιασμού του φασολιού με το εμπορικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899

στην ανάπτυξη του φυτού καταγράφηκε μόνο κατά την 1^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στην εξάπλωση του παραπάνω στελέχους στην επιφάνεια του πειραματικού αγρού με την εφαρμογή κατά την 1^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο. Παρόμοιο εύρημα παρατηρήθηκε επίσης στην εργασία των Gatsios et al. (2019), όπου το φυτό της βίγνας (*Vigna unguiculata*.) καλλιεργήθηκε ως χλωρή λίπανση για την εφαρμογή της σε βιολογική καλλιέργεια τομάτας. Ειδικότερα στην παραπάνω έρευνα ο επανεμβολιασμός του φυτού της βίγνας κατά την ακόλουθη καλλιεργητική περίοδο δεν ωφέλησε την ανάπτυξη και την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού, σε αντίθεση με τον αρχικό εμβολιασμό το φυτού κατά την πρώτη καλλιεργητική περίοδο.

Σε αντίθεση με το φασόλι, το κουκί επωφελήθηκε από τον εμβολιασμό του με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1, όσον αφορά την αζωτοδεσμευτική του ικανότητα, και κατά τις 2 χειμερινές καλλιεργητικές περιόδους. Το εύρημα αυτό είναι σύμφωνο και με τη μελέτη των Hungria et al., (2006), οι οποίοι υποστήριξαν πως ο επανεμβολιασμός της σόγιας κάθε χρόνο, ωφελούσε την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού παρότι υπήρχε πλέον ικανοποιητικός πληθυσμός του παραπάνω στελέχους στο έδαφος. Εξάλλου, σύμφωνα με τους Herridge et al. (2005), ο χαμηλός πληθυσμός ριζοβίων στο έδαφος δύναται να περιορίσει σημαντικά την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού ξενιστή, ακόμα και εάν τα στελέχη αυτά θεωρούνται αποδοτικά. Ο διαφορετικός αντίκτυπος του επανεμβολιασμού του κουκιού και της σόγιας σε σχέση με αυτόν του φασολιού και της βίγνας, υποδεικνύει πως τα οφέλη του επανεμβολιασμού των ψυχανθών στην αζωτοδεσμευτική τους ικανότητα δεν θα πρέπει να θεωρούνται αναμενόμενα καθώς η αποτελεσματικότητα αυτής της πρακτικής δύναται να επηρεαστεί από παράγοντες όπως οι ιδιότητες του εδάφους, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, το είδος του φυτού ξενιστή και της αλληλεπίδρασής του με τα δεδομένα στελέχη. Επιπλέον, στην παρούσα μελέτη, σε αντίθεση με αυτές των Bard El-in & Moawad (1988) και Denton et al. (2012), ο εμβολιασμός του κουκιού δεν βελτίωσε τη συγκέντρωση του ολικού N (%) στην υπέργεια ξηρή βιομάζα του φυτού. Ωστόσο, η αυξημένη ξηρή βιομάζα των φυτών που αποδίδεται στον εμβολιασμό των κουκιών με ριζόβια οδήγησε σε σημαντικά αυξημένα ποσά N που δέσμευσε η καλλιέργεια από την ατμόσφαιρα. Παράλληλα, το ποσοστό του N στην βιομάζα του κουκιού που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%N_{dfa}), ανεξάρτητα από τον εμβολιασμό των φυτών με αζωτοδεσμευτικά στελέχη, είναι σύμφωνο με τη μελέτη των Jensen et al. (2010), όπου το (%N_{dfa}) των κουκιών κυμάνθηκε από 58% έως 88% όταν

εφαρμόστηκε στην καλλιέργεια βασική λίπανση χαμηλών εισροών N (3-5 kg στρέμμα⁻¹ N).

Η καλλιέργεια του κουκιού ως χλωρή λίπανση αύξησε τη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος στην επακόλουθη βιολογική καλλιέργεια φασολιού και στα 2 πειραματικά έτη, όφελος το οποίο επιβεβαιώνεται και από άλλες σχετικές μελέτες (Rochester et al., 2001; Peoples et al., 2009; Jensen et al., 2010). Ωστόσο, κατά τη 2^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο, η καλλιέργεια του κουκιού παρείχε υψηλότερα ποσά διαθέσιμου N στο έδαφος για την ακόλουθη καλλιέργεια σε σχέση με το πρώτο έτος εναλλαγής καλλιεργειών σύμφωνα με το Γράφημα 13 Γ & Δ. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να οφείλεται μερικώς στην υψηλότερη συγκέντρωση ολικού N (%) και του χαμηλότερου λόγου C:N στην υπέργεια βιομάζα του κουκιού κατά τη δεύτερη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Ωστόσο, αυτό μπορεί επίσης να οφείλεται και στη σημαντικά αυξημένη συνολική βιομάζα της καλλιέργειας κατά την ίδια περίοδο. Υψηλές συγκεντρώσεις N και χαμηλός λόγος C:N στα φυτικά υπολείμματα που ενσωματώνονται στο έδαφος ευνοούν τη μικροβιακή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα τον αυξημένο ρυθμό της αποσύνθεσης των υπολειμμάτων και συνεπώς τον υψηλότερο ρυθμό ανοργανοποίησης του N στο έδαφος (Parr et al., 1994; Kumar & Goh, 1999). Επιπλέον, η χαμηλότερη συνεισφορά της χλωρής λίπανσης στη διαθεσιμότητα του N κατά το 1^ο έτος πειραματισμού μπορεί να αποδίδεται στην ακινητοποίηση του N το οποίο προέρχεται από την ανοργανοποίηση της κοπριάς και της χλωρής λίπανσης στη μικροβιακή βιομάζα του εδάφους, φαινόμενο που παρατηρείται συχνά εάν η διαθεσιμότητα του N στο έδαφος είναι σχετικά χαμηλή πριν την ενσωμάτωση οργανικών υπολειμμάτων (Peoples et al., 2009). Ένας επιπρόσθετος λόγος που δικαιολογεί τη βελτιωμένη διαθεσιμότητα του N κατά τη 2^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο είναι πως τα αυξημένα επίπεδα ανόργανου N ίσως προέρχονται από την καλλιέργεια των κουκιών όχι μόνο από την 2^η αλλά και από την 1^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο καθώς τα οφέλη των καλλιεργειών χλωρής λίπανσης εμφανίζονται μακροπρόθεσμα (Bremmer & Kessel, 1992).

Στην παρούσα μελέτη, η εμβολιασμένη καλλιέργεια κουκιών με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1 δέσμευσε 10,3 και 26,6 kg στρέμμα⁻¹ N περισσότερο από τη μη εμβολιασμένη κατά την πρώτη και δεύτερη καλλιεργητική περίοδο αντίστοιχα. Ωστόσο, τα υψηλότερα ποσά δεσμευμένου N δεν ωφέλησαν την περαιτέρω αύξηση της διαθεσιμότητας του N στο έδαφος κατά την επακόλουθη εαρινή καλλιεργητική περίοδο με την ενσωμάτωση της εμβολιασμένης καλλιέργειας κουκιού.

Σύμφωνα με τους Peoples et al. (2009), μόνο ένα μικρό ποσοστό (11-17%) του ποσοστού του N στη βιομάζα του κουκιού που εφαρμόζεται ως χλωρή λίπανση μπορεί να αξιοποιηθεί από την επακόλουθη καλλιέργεια. Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, μπορούμε να υποθέσουμε πως στην παρούσα μελέτη τα αυξημένα ποσά δεσμευμένου N που αποδίδονται στον εμβολιασμό των κουκιών με ριζόβια, ίσως δεν ήταν αρκετά ώστε να καταγραφεί μία ουσιαστικά αυξημένη διαθεσιμότητα N που θα οδηγούσε σε ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις στην ακόλουθη βιολογική καλλιέργεια φασολιού. Αντίθετα, ο εμβολιασμός του κουκιών δεν επηρέασε ούτε την συγκέντρωση N ούτε τον λόγο C:N στη βιομάζα του φυτού, επομένως δεν θα έπρεπε να αναμένουμε ένα διαφορετικό ρυθμό ορυκτοποίησης της βιομάζας του κουκιού στο έδαφος. Επομένως, δεδομένου πως ο ρυθμός αποσύνθεσης δεν διέφερε μεταξύ των πειραματικών ετών, τα αυξημένα ποσά δεσμευμένου N δεν είναι άμεσα διαθέσιμα για την επόμενη καλλιεργητική περίοδο.

Η εφαρμογή χλωρής λίπανσης αύξησε την παραγωγή της επακόλουθης βιολογικής καλλιέργειας κατά 17% και 20% κατά το 1^ο και 2^ο έτος εναλλαγής καλλιεργειών αντίστοιχα, σε σχέση με τη βιολογική καλλιέργεια φασολιού με φυτικά υπολείμματα καλλιέργειας βιολογικού μπρόκολου. Ωστόσο, βραχυπρόθεσμα, τα παραπάνω οφέλη στην παραγωγή βιολογικού φασολιού δεν αντισταθμίζουν τα οφέλη παραγωγής μιας μη-ψυχανθούς καλλιέργειας κατά τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Αντίθετα, μακροπρόθεσμα, η εναλλαγή του κοινού φασολιού κατά την εαρινή καλλιεργητική περίοδο με ένα χειμερινό ψυχανθές που προορίζεται για χλωρή λίπανση την ίδια χρονιά είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους στα συστήματα βιολογικής καλλιέργειας. Μία εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί η καλλιέργεια των κουκιών για την παραγωγή νωπών λοβών ή ξηρών σπερμάτων, αντί της χλωρής λίπανσης, και η ενσωμάτωση μόνο των φυτικών υπολειμμάτων της καλλιέργειας στο έδαφος, η οποία θα μπορούσε συνεισφέρει σημαντικά ποσά N για την επόμενη καλλιέργεια (Rochester et al., 2001). Ωστόσο, σύμφωνα με τους Patriquin et al. (1986), κατά την ωρίμανση των σπερμάτων η καλλιέργεια κουκιού απαιτεί ποσά N τα οποία δεν μπορούν να καλυφθούν από την αζωτοδεσμευτική της ικανότητα, και επομένως τα συμπληρωματικά ποσά N που απορροφά η καλλιέργεια από το έδαφος απομακρύνονται μέσω της συγκομιδής των σπερμάτων.

Ο εμβολιασμός του φασολιού με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 κατά την 1^η εαρινή περίοδο αύξησε ελαφρώς την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού, ωστόσο η παραπάνω επίδραση δεν εντοπίστηκε κατά την εαρινή καλλιεργητική

περίοδο του επόμενου έτους, όπου η καλλιέργεια του φασολιού επανεμβολιάστηκε με το παραπάνω στέλεχος. Το παραπάνω εύρημα δεν συνάδει με τα οφέλη του επανεμβολιασμού των κουκιών κατά τη 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Σύμφωνα με τους Hungria et al. (2003), ο επανεμβολιασμός του φασολιού με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 αύξησε σημαντικά τον σχηματισμό φυματίων στη ρίζα των φυτών, ακόμα και αν ο πληθυσμός του ίδιου στελέχους στο έδαφος ήταν ήδη υψηλός από τον αρχικό εμβολιασμό του φυτών κατά την προηγούμενη καλλιεργητική περίοδο. Ωστόσο, σύμφωνα με την ίδια έρευνα, ο επανεμβολιασμός της καλλιέργειας δεν επηρέασε την έκπτυξη των φυματίων στη ρίζα του φυτού όταν η καλλιέργεια πραγματοποιήθηκε σε ξηρό περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες. Το παραπάνω εύρημα είναι σε πλήρη συμφωνία με την παρούσα μελέτη, καθώς ο επανεμβολιασμός της καλλιέργειας φασολιού με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 δεν ωφέλησε την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού κατά τη 2^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο, όπου τα φυτά εκτέθηκαν σε σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες (mean T_{max} > 30°C) σε σχέση με τα φυτά της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου (mean T_{max} < 30°C).

Η αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φασολιών επηρεάστηκε σημαντικά από τη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος κατά τη διάρκεια της ανθοφορίας. Ειδικότερα, και στις 2 καλλιεργητικές περιόδους οι διαφορετικές καλλιέργειες φασολιού με την υψηλότερη συγκέντρωση NO₃-N κατέγραψαν χαμηλότερα ποσά (%Ndfa) στην υπέργεια βιομάζα τους. Αυτή η απόκριση της αζωτοδεσμευτικής ικανότητας στη διαθεσιμότητα N στο έδαφος επιβεβαιώνονται από αρκετές μελέτες (Patriquin 1986; Streeter & Wong, 1988; Leidi & Rodriguez-Navaro, 2000; Rochester et al., 2001; Peoples et al., 2009; Jensen et al., 2010; Denton et al., 2012), όπου αυξημένα ποσά διαθέσιμου N στο έδαφος περιορίζουν σημαντικά την ποσότητα του N που μπορούν οι καλλιέργειες ψυχανθών να δεσμεύσουν από την ατμόσφαιρα.

Κατά τη 2^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο, η ανάπτυξη και η παραγωγή του φασολιού ήταν χαμηλότερη, ενώ η αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φασολιού ήταν αξιοσημείωτα υψηλότερη, σε σχέση με την πρώτη εαρινή καλλιεργητική περίοδο, ακόμα και αν διαθεσιμότητα του N ήταν ιδιαίτερα αυξημένη. Παράλληλα η διαθεσιμότητα του P στο έδαφος ήταν ίδια μεταξύ των δύο παραπάνω περιόδων. Επομένως, η διαθεσιμότητα του N δεν θα πρέπει να θεωρείται ως αποκλειστικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση των καλλιεργητικών συστημάτων. Ειδικότερα, η μεγαλύτερη διάρκεια της χειμερινής καλλιεργητικής περιόδου κατά το 2^ο έτος πειραματισμού καθυστέρησε την εγκατάσταση της επακόλουθης εαρινής

καλλιέργειας του φασολιού, με αποτέλεσμα κρίσιμα αναπτυξιακά στάδια της καλλιέργειας, όπως αυτό της ανθοφορίας και της παραγωγής, να μετατοπιστούν στα μέσα του καλοκαιριού, και επομένως να εκτεθούν σε σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες και ξηρές συνθήκες περιβάλλοντος. Σύμφωνα με τους Agtunong et al. (1992), υψηλές θερμοκρασίες κατά το στάδιο της ανθοφορίας μειώνουν δραστικά την παραγωγή τόσο των λοβών όσο και των σπερμάτων της καλλιέργειας φασολιού. Επιπλέον, οι DiPaola & Beard (1992) ανέφεραν πως υψηλή διαθεσιμότητα του εδάφους σε N μειώνει την ανοχή των φυτών σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ οι Bassirirad et al. (1993) παρατήρησαν πως η αυξημένη θερμοκρασία εδάφους σε συνδυασμό με την αυξημένη αζωτούχο λίπανση περιορίζουν την απορρόφηση του N στα φυτά του φασολιού.

Δεδομένου πως τα φυτικά υπολείμματα τόσο των βιολογικών όσο και των συμβατικών καλλιεργειών του προγράμματος ενσωματώνονταν στο έδαφος, η αυξημένη οργανική ουσία στα τεμάχια που εφαρμόστηκαν βιολογικές πρακτικές λίπανσης φαίνεται να οφείλεται κυρίως στην προσθήκη της πρόβειας κοπριάς. Σύμφωνα με τον Bullock (1992), η ενσωμάτωση των φυτικών υπολειμμάτων των καλλιεργειών δεν δύναται να αυξήσει τα επίπεδα της οργανικής ουσίας στο έδαφος σε σύντομο χρονικό διάστημα στον ίδιο βαθμό με την εφαρμογή κοπριάς. Παράλληλα, στα βιολογικά συστήματα καλλιέργειας που χρησιμοποιείται η κοπριά ως πηγή λίπανσης, η συνολική ποσότητα κοπριάς για την κάλυψη των αναγκών των φυτών σε N συνήθως παρέχει υψηλό πλεόνασμα παροχής σε P (Sims et al., 2000). Επομένως, ομοίως με την οργανική ουσία, η αυξημένη διαθεσιμότητα του P στη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου κατά τη 2^η χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, θα μπορούσε να αποδοθεί στις αυξημένες εισροές πρόβειας κοπριάς.

5.2. Επίδραση διαφορετικών προγραμμάτων εναλλαγής καλλιεργειών στα χαρακτηριστικά παραγωγής και στην ποιότητα του φασολιού

Δεδομένου πως η διαθεσιμότητα του N είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας που περιορίζει τις αποδόσεις των κηπευτικών σε βιολογικά συστήματα καλλιέργειας, οι Schmeer et al. (2014) υποστήριξαν πως οι καλλιέργειες ψυχανθών, εξαιτίας της ικανότητάς τους να αξιοποιούν το ατμοσφαιρικό N, μπορούν να ξεπεράσουν τον παραπάνω περιορισμό και να αποδώσουν εξίσου ικανοποιητικά με την αντίστοιχη καλλιέργεια κάτω από ανόργανα σχήματα θρέψης N. Ωστόσο, ο παραπάνω ισχυρισμός δεν επιβεβαιώθηκε από την παρούσα μελέτη, αφού η βιολογική καλλιέργεια φασολιού χωρίς την εφαρμογή χλωρής λίπανσης, επηρέασε αρνητικά τον αριθμό και τα φυσικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων λοβών, και ως εκ τούτου τη συνολική απόδοση της καλλιέργειας. Το παραπάνω εύρημα οφείλεται στο γεγονός πως η απόδοση της καλλιέργειας φασολιού εξαρτάται σημαντικά από τις εξωτερικές εισροές N, εξαιτίας της γενικά χαμηλής αζωτοδεσμευτικής ικανότητας του φυτού (Martínez-Romero, 2003). Εξάλλου, η ανεπαρκής διαθεσιμότητα του N στο έδαφος στα τεμάχια βιολογικής καλλιέργειας φασολιού χωρίς χλωρή λίπανση επιβεβαιώνεται έμμεσα και από τη μειωμένη συγκέντρωση ολικού N στους ιστούς των παραγόμενων λοβών. Η απόκριση των χαρακτηριστικών παραγωγής στην περιορισμένη διαθεσιμότητα του N αυτής της μελέτης, έχει επίσης παρατηρηθεί και στις μελέτες των Chekanai et al. (2018), Elkhabit (2009), Karasu et al. (2011) και Da Silva et al. (2004), όπου το φασόλι καλλιεργήθηκε είτε για τους νωπούς λοβούς ή για τα ξηρά σπέρματά του. Οι ωφέλιμες επιδράσεις της εφαρμογής της χλωρής λίπανσης στην απόδοση του βιολογικού φασολιού που καταγράφηκαν στην παρούσα μελέτη, είναι σύμφωνες με τη μελέτη των Gatsios et al. (2021), όπου η εφαρμογή χλωρής λίπανσης, χρησιμοποιώντας το φυτό του κουκιού, σε συνδυασμό με ζωική κοπριά αύξησαν σημαντικά την παραγωγή τομάτας σε βιολογικό σύστημα καλλιέργειας. Αντίθετα, στη μελέτη των Kontopoulou et al. (2015a), η καλλιέργεια του βίκου ως χλωρή λίπανση, δεν περιόρισε το χάσμα της απόδοσης νωπών λοβών φασολιού μεταξύ συμβατικού και βιολογικού συστήματος καλλιέργειας. Ωστόσο, στην ίδια έρευνα η εφαρμογή της χλωρής λίπανσης έγινε και στα 2 υπό μελέτη διαφορετικά συστήματα (βιολογικό-συμβατικό).

Σύμφωνα με τον Lairon (2010), οι βιολογικές πρακτικές καλλιέργειας ωφελούν κυρίως τη θρεπτική σύσταση των κηπευτικών προϊόντων παρά των φρούτων και σιτηρών. Αυτά τα οφέλη αποδίδονται κυρίως τόσο στην αυξημένη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στο έδαφος αλλά και στην ικανότητα πρόσληψης θρεπτικών από τα φυτά.

Ειδικότερα, η αυξημένη διαθεσιμότητα οργανικών ενώσεων στο έδαφος, ως αποτέλεσμα της υψηλής μικροβιακής δραστηριότητας στα εδάφη όπου εφαρμόζονται βιολογικές πρακτικές, ευνοούν την πρόσληψη των P, Fe και Mg από τα φυτά (Rembialkowska, 2007). Επιπρόσθετα, η οξίνιση του εδάφους, η οποία οφείλεται στα υψηλά επίπεδα εδαφικής οργανικής ουσίας, βελτιώνει σημαντικά τη διαλυτότητα των απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων στο εδαφικό διάλυμα (Adediran et al., 2007). Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη η ποιότητα των νωπών λοβών, ως προς τη σύστασή τους σε ανόργανα θρεπτικά στοιχεία, που προήλθαν από τη βιολογική καλλιέργεια φασολιού χωρίς την εφαρμογή χλωρής λίπανσης δεν διέφερε σημαντικά από αυτή των λοβών που παράχθηκαν υπό συμβατικές καλλιεργητικές πρακτικές, αφού οι παραπάνω βιολογικοί λοβοί υπερτερούσαν μόνο ως προς τη συγκέντρωση τους σε P και Zn. Το παραπάνω μοτίβο της μειωμένης N και αυξημένης P συγκέντρωσης στα βιολογικά κηπευτικά προϊόντα έχεις επίσης αναφερθεί και από τους Dangour et al. (2009).

Αντίθετα, οι βιολογικές πρακτικές που περιλάμβαναν την εφαρμογή της χλωρής λίπανσης απέδωσαν λοβούς υψηλότερης ανόργανης θρεπτικής σύστασης σε σχέση με τις βιολογικές που περιλάμβαναν υπολείμματα καλλιέργειας μπρόκολου και τις συμβατικές. Επομένως, οι ευεργετικές ιδιότητες των βιολογικών πρακτικών στην παρούσα μελέτη εμφανίστηκαν μόνο στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού με την εφαρμογή χλωρής λίπανσης. Το παραπάνω εύρημα επιβεβαιώνει τη θεωρία πως οι περιορισμοί στις αποδόσεις των βιολογικών καλλιεργειών αποδίδονται κυρίως στην ανεπαρκή διαθεσιμότητα του N στο έδαφος κατά τα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης του φυτού, οι οποίοι μπορούν να αρθούν με πρακτικές οι οποίες βελτιώνουν τη διαθεσιμότητα του N κατά τα παραπάνω στάδια. Στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού κάτω από ήπιες κλιματικές συνθήκες, ο συνδυασμός χλωρής λίπανσης και πρόβειας κοπριάς καλύπτει τις ανάγκες του φυτού σε άζωτο έτσι ώστε οι αποδόσεις του παραπάνω συστήματος να είναι το ίδιο υψηλές με αυτά των συμβατικών. Ειδικότερα, η εφαρμογή της κοπριάς μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της καλλιέργειας κατά τα πρώτα βλαστικά στάδια λόγω του σχετικά γρήγορου ρυθμού αποδόμησής της (Azeez & Van Averbek, 2010), ενώ η χλωρή λίπανση εξασφαλίζει επαρκή ποσά N για την κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας σε μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης, όπως αυτό της παραγωγής, εξαιτίας του πιο χαμηλού αλλά σταθερού συντελεστή αποδόμησης (Brust, 2019).

Στην παρούσα μελέτη, η βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου κατά τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο είχε αρνητικό αντίκτυπο στη γονιμότητα του εδάφους για την επακόλουθη εαρινή καλλιέργεια βιολογικού φασολιού. Αντίθετα, η καλλιέργεια του κουκιού ως χλωρή λίπανση, μέσω της υψηλής αζωτοδεσμευτικής του ικανότητας, συνεισέφερε σημαντικές ποσότητες N για την επακόλουθη καλλιέργεια. Ωστόσο, η απόδοση και η ποιότητα του συμβατικού φασολιού ήταν ίδια με αυτή που καταγράφηκε στο βιολογικό φασόλι με την εφαρμογή χλωρής λίπανσης. Επομένως, η εφαρμογή της χλωρής λίπανσης αντιστάθμισε τις απώλειες στη γονιμότητα του εδάφους από τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου. Με βάση το παραπάνω εύρημα, η καταλληλότερη γεωργική πρακτική στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού, είναι η χειμερινή καλλιέργεια ενός ψυχανθούς φυτού ως χλωρή λίπανση αντί της καλλιέργειας ενός μη-ψυχανθούς φυτού. Η βιολογική καλλιέργεια κηπευτικών κατά τη χειμερινή και εαρινή καλλιεργητική περίοδο αποτελεί ένα σχήμα με υψηλές απαιτήσεις N, οι οποίες δεν μπορούν να καλυφθούν με την εφαρμογή κοπριάς με βάση το επιτρεπόμενο όριο 17 kg στρέμμα⁻¹ N.

Υψηλότερες συγκεντρώσεις P σε βιολογικούς νωπούς λοβούς εντοπίστηκαν και στη μελέτη των Brown et al. (1993). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις P στους παραγόμενους νωπούς λοβούς, μπορεί να οφείλονται στην αυξημένη διαθεσιμότητα του P στο έδαφος, καθώς τα επίπεδα εφαρμογής κοπριάς για την κάλυψη των απαιτήσεων της καλλιέργειας σε N, παρέχουν ταυτόχρονα σημαντικό πλεόνασμα P (Sims et al., 2000). Επιπρόσθετα, οι αυξημένες συγκεντρώσεις P μπορούν επίσης να οφείλονται και στην πιο αποδοτική πρόσληψη του P που αποδίδεται στην αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα ωφέλιμων μικροοργανισμών, όπως οι μυκόρριζες (Oberson & Frossard, 2015).

Στην παρούσα μελέτη, το φασόλι καλλιεργήθηκε για την παραγωγή των νωπών λοβών του. Ωστόσο, ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων πραγματοποιήθηκε στην ξηρή ουσία του λοβού. Επομένως, το αυξημένο ποσοστό ξηράς ουσίας στους λοβούς στο βιολογικό σύστημα καλλιέργειας χωρίς την εφαρμογή χλωρής λίπανσης επιδεικνύει υψηλότερη συγκέντρωση θρεπτικών σε σχέση με τους συμβατικά παραγόμενους λοβούς, ακόμα και αν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στην ξηρή ουσία των λοβών των 2 μεταχειρίσεων είναι η ίδια. Το ποσοστό της ξηράς ουσίας των κηπευτικών θεωρείται ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό το οποίο σχετίζεται με την οργανοληπτική αξία (Pieper & Barrett, 2009) και τη μετασυλλεκτική ζωή του προϊόντος (Rembiałkowska, 2007) και βελτιώνεται σημαντικά από τις βιολογικές

καλλιεργητικές πρακτικές (Woese et al., 1997; Lairon, 2010). Σύμφωνα με τους Herencia et al., (2011), τα αυξημένα ποσοστά ξηράς ουσίας στα βιολογικά φυτικά προϊόντα οφείλονται στην περιορισμένη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος, καθώς κάτω από ελλειμματική παροχή N το φυτό προάγει την παραγωγή υποκατάστατων μορίων χαμηλής περιεκτικότητας N. Στο ίδιο πλαίσιο, οι Bourn και Prescott (2010) υποστήριξαν πως η επάρκεια N στα συμβατικά συστήματα καλλιέργειας αυξάνει τα επίπεδα της υγρασίας στα παραγόμενα κηπευτικά, ενώ οι Guo et al., (2007) παρατήρησαν θετική συσχέτιση μεταξύ της απορρόφησης του νερού και N από φασολι. Στην παρούσα μελέτη, υψηλότερα ποσοστά ξηράς ουσίας καταγράφηκαν στους βιολογικά παραγόμενους λοβούς χωρίς την εφαρμογή χλωρής λίπανσης, στους οποίους παρατηρήθηκαν και μειωμένα επίπεδα ολικού N. Επομένως, αυτό το εύρημα είναι σύμφωνο με τις παραπάνω μελέτες και επιβεβαιώνει τη θεωρία πως το ποσοστό της ξηράς ουσίας επηρεάζεται άμεσα από την παροχή N και έμμεσα από τις διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές που δύναται να επηρεάσουν τη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος. Παράλληλα, αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ των επιπέδων παροχής N και του ποσοστού ξηράς ουσίας σε νωπούς λοβούς έχει επίσης παρατηρηθεί σε βιολογική (Kontoroulou et al., 2015a) και υδροπονική καλλιέργεια φασολιού (Kontoroulou et al., 2017).

Τα αντιοξειδωτικά, φαινολικά και φλαβονοειδή αντιπροσωπεύουν σηματικούς δευτερογενείς μεταβολίτες στα φυτά που φαίνεται επίσης να επηρεάζονται θετικά από τα βιολογικά συστήματα καλλιέργειας (Lairon, 2010; Maggio et al., 2013; De Souza Araújo et al., 2014; Meekem & Quaim, 2018; Tal, 2018; Popa et al., 2019). Σύμφωνα με τις μελέτες των Faller & Fialho (2009) και Magkos et al. (2009), η περιορισμένη διαθεσιμότητα τόσο του N όσο και άλλων θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος των βιολογικών καλλιεργειών περιορίζει τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών με αποτέλεσμα την προαγωγή της σύνθεσης αντιοξειδωτικών και φαινολικών ενώσεων. Επιπλέον, καταπονήσεις που σχετίζονται με τη μειωμένη ικανότητα των βιολογικών πρακτικών να αντιμετωπίσουν βιοτικούς παράγοντες καταπόνησης, όπως η πίεση από ζιζάνια, φυσικούς εχθρούς και μυκητολογικές προσβολές, συνεισφέρουν επίσης στην αυξημένη σύνθεση αυτών των μορίων (Faller & Fialho, 2009; Magkos et al., 2009; Rahman et al., 2021). Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη, σκοπεύοντας να διερευνηθεί συγκεκριμένα ο αντίκτυπος των διαφορετικών σχημάτων θρέψης, οι καλλιεργητικές πρακτικές, σχετικά με τη φυτοπροστασία των φυτών, δεν διέφεραν μεταξύ του βιολογικού και συμβατικού συστήματος καλλιέργειας. Παράλληλα, η μειωμένη ένταση προσβολών

από φυσικούς εχθρούς, η οποία αντιμετωπίστηκε επιτυχώς με βιολογικά προϊόντα φυτοπροστασίας, και η απουσία μυκητολογικών ασθενειών βοήθησαν προς αυτήν την κατεύθυνση. Επομένως, οι παραπάνω μελέτες είναι σε πλήρη συμφωνία με τα παρόντα ευρήματα, κατά τα οποία υψηλότερα επίπεδα βιοδραστικών ενώσεων καταγράφηκαν στους βιολογικά παραγόμενους λοβούς χωρίς την εφαρμογή χλωρής λίπανσης, οι οποίοι σημείωσαν ταυτόχρονα τα χαμηλότερα επίπεδα N στη ξηρή τους ουσία. Επιπρόσθετα, οι ευεργετικές ιδιότητες των βιολογικών συστημάτων καλλιέργειας στις βιοχημικές ιδιότητες της υπό μελέτη ποικιλίας φασολιού (Borlotta), παρατηρήθηκαν και στη μελέτη των Mastura et al. (2017), όπου τα βιολογικά φασόλια εμφάνισαν υψηλότερο αντιοξειδωτικό δυναμικό και αυξημένα επίπεδα φαινολικών.

Όπως αναφέρεται από τον Lairon (2010), δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για την έκβαση της επίδρασης βιολογικών συστημάτων καλλιέργειας στη συγκέντρωση των φυτικών προϊόντων σε σάκχαρα και άμυλο. Σύμφωνα με τη Rembiałkowska (2007), το βιολογικά προϊόντα αναμένεται να περιέχουν περισσότερο άμυλο, ένα μόριο που συντίθεται χωρίς να απαιτεί N, ως απόκριση του φυτού στα περιορισμένη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος. Επιπλέον, οι Conti et al. (2014) κατέγραψαν μία αύξηση στα επίπεδα της γλυκόζης και φρουκτόζης σε βιολογική φράουλα έναντι της συμβατικής, ενώ οι Maggio et al. (2008) παρατήρησαν μία αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ της παροχής N και της συγκέντρωσης σακχάρων και αμύλου στην πατάτα. Ωστόσο, αρκετοί ερευνητές θεωρούν πως οι συγκεντρώσεις των σακχάρων των βιολογικών κηπευτικών και φρούτων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον καλλιεργούμενο γονότυπο και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Karoulas et al., 2011; Hallmann, 2012; Ponder & Hallmann, 2020). Συσσώρευση σακχάρων και αμύλου σε συνθήκες ελλειμματικής παροχής N εντοπίστηκαν και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση των. Παράλληλα, σύμφωνα με τους Chen & Cheng et al. (2003) και Braun et al. (2016) η ελλειμματική παροχή N μειώνει την ικανότητα χρήσης και αποθήκευσης των φωτοσυνθετικών προϊόντων στα φυτά, με αποτέλεσμα την αυξημένη συσσώρευση αμύλου και σακχάρων στους φυτικούς ιστούς. Αντίθετα, στη μελέτη των Jifon & Wolf (2002) η ελλειμματική παροχή N στο φασόλι μείωσε δραματικά τη συγκέντρωση της γλυκόζης και του αμύλου στα φύλλα. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη τα διαφορετικά σχήματα θρέψης δεν έφεραν κάποιο σημαντικό αντίκτυπο στη συγκέντρωση των υπό μελέτη σακχάρων και του αμύλου. Αυτό ίσως οφείλεται στις σημαντικά χαμηλότερες απαιτήσεις N της καλλιέργειας φασολιού σε σχέση με τα μη-ψυχανθή φυτά που αξιολογήθηκαν στις παραπάνω μελέτες. Επομένως, μπορούμε να υποθέσουμε πως είτε

η έλλειψη N στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού με την εφαρμογή μόνο της κοπριάς δεν ήταν αρκετά έντονη ώστε να διαφοροποιηθεί η σύσταση του φυτού στα συγκεκριμένα διαλυτά σάκχαρα και σε άμυλο είτε ο καλλιεργούμενος γονότυπος δεν επιδέχεται κάποια επίδραση ως προς τη συγκέντρωση του σε σάκχαρα και άμυλο.

5.3. Απόδοση υδροπονικού φασολιού υπό ελλειμματική παροχή αζώτου και εμβολιασμού με ριζόβια

Κατά τα πρώτα βλαστικά στάδια ανάπτυξης, 15-20 ημέρες μετά τη βλάστηση, η ανάπτυξη του φυτού του φασολιού βασίζεται κυρίως στις εξωτερικές εισροές N εξαιτίας της έλλειψης συγχρονισμού μεταξύ της έναρξης της αζωτοδεσμευτικής ικανότητας του φυτού και της εξάντλησης του N στις κοτυληδόνες (Hungria & Thomas, 1987). Επομένως, η κατάλληλη στρατηγική θρέψης σε N για τη μεγιστοποίηση του ρυθμού ανάπτυξης και της απόδοσης φαίνεται αμφιλεγόμενη, αφού η επαρκής παροχή N που προάγει την ανάπτυξη του φυτού περιορίζει την ικανότητα έκπτυξης φυματίων και την αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού (Franco & Munns, 1982; Hungria & Barradas, 1991). Σε αντίθεση με την ευρέως τεκμηριωμένη αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ της διαθεσιμότητας του N και της ικανότητας έκπτυξης φυματίων (Muller et al., 1993; Soares et al., 2016; Jiang et al., 2020; Reinprecht et al., 2020), οι Kontopoulou et al. (2017) παρατήρησαν πως η υψηλής έντασης καταπόνηση σε N κατά τα πρώτα βλαστικά στάδια του φασολιού, επιβραδύνει παρά ωφελεί την έκπτυξη των φυματίων καθώς η έλλειψη N περιορίζει τη φωτοσυνθετική ικανότητα και ως εκ τούτου την παροχή των φυματίων σε φωτοσυνθετικά προϊόντα. Παράλληλα, στην ίδια μελέτη η παροχή N που κάλυπτε το 33% των αναγκών του φυτού σε N επέδρασε θετικά στον σχηματισμό των φυματίων στη ρίζα του φυτού αλλά μείωσε σημαντικά την ανάπτυξη και την απόδοση της καλλιέργειας. Στην παρούσα μελέτη, η εφαρμογή ενός ΘΔ που κάλυπτε το 50% των αναγκών των φυτών σε N κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης του φυτού και 25% κατά το στάδιο της παραγωγής, αντίστοιχα, προώθησε τον σχηματισμό φυματίων χωρίς να επηρεάσει σημαντικά την ανάπτυξη του φυτού μέχρι και το στάδιο της ανθοφορίας. Σύμφωνα με τους Zoffoli et al. (2021), η παροχή N σε συνδυασμό με τον εμβολιασμό των φυτών με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 κατά τα πρώτα βλαστικά στάδια ανάπτυξης του φυτού, όπου δεν έχει αναπτυχθεί η ικανότητα αζωτοδέσμευσης, ωφέλησε την ανάπτυξη του φυτού χωρίς να καταστείλλει τον σχηματισμό των φυματίων. Ωστόσο, περαιτέρω εφαρμογή N σε προχωρημένο στάδιο βλαστικής ανάπτυξης δεν ωφέλησε την παραγωγή αλλά περιορίσε σημαντικά τον αριθμό φυματίων στη ρίζα του φασολιού. Ο παραπάνω αντίκτυπος παρατηρήθηκε και σε αυτήν τη μελέτη όπου η επαρκής παροχή N μέχρι και το στάδιο της ανθοφορίας δεν επηρέασε τον ρυθμό ανάπτυξης του φυτού αλλά κατέστειλε σημαντικά τον σχηματισμό φυματίων. Επιπλέον, τα στελέχη CIAT 899 and PVTN21 βελτίωσαν τον σχηματισμό

των φυματίων μόνο κάτω από συνθήκες ελλειμματικής παροχής N. Η καταστολή των ευεργετικών επιδράσεων του εμβολιασμού των ψυχανθών στην έκπτυξη των φυματίων έχει εμπειριστωμένως παρατηρηθεί και σε άλλες μελέτες (Rebeschini et al., 2014; Glodowska et al., 2019; dos Santos Sousa et al., 2022). Ανεξάρτητα από τα διαφορετικά σχήματα θρέψης N, το γηγενές στέλεχος PVTN21 ωφέλησε το σχηματισμό φυματίων σε μεγαλύτερο βαθμό από το εμπορικό στέλεχος CIAT 899, η απόδοση του οποίου μειωνόταν με την πρόοδο της καλλιέργειας. Αποδοτικότερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ γηγενών στελεχών και του φυτού ξενιστή έναντι του εμπορικού στελέχους CIAT 899 καταγράφηκαν και στη μελέτη των Tajini et al. (2008), τονίζοντας τη σημαντικότητα της εξειδίκευσης των στελεχών ως προς τα φυτά ξενιστές.

Η εφαρμογή ενός ΘΔ που καλύπτει το 75% των αναγκών των φυτών σε N κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης του φυτού δεν περιόρισε την περιεκτικότητα της υπέργειας βιομάζας του φυτού σε ολικό N, σε σχέση με την αντίστοιχη συγκέντρωση στα φυτά με επάρκεια N (100% N). Ωστόσο κατά το στάδιο της παραγωγής, όπου η παροχή του N μειώθηκε από 75% σε 25%N, τα επίπεδα του ολικού N μειώθηκαν σημαντικά. Το παραπάνω εύρημα υποδηλώνει πως τα ποσά που δέσμευσαν τα φυτά υπό του σχήματος θρέψης 75-25% N δεν μπόρεσαν να καλύψουν την ποσοστιαία μειωμένη παροχή N (75%) κατά το στάδιο της παραγωγής. Εξάλλου, ο αυξημένος αριθμός φυματίων στη ρίζα των φυτών 75-25% N υποδηλώνει πως η παροχή 10,35 mmol L⁻¹ μέσω του ΘΔ κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης ήταν ανεπαρκής. Επιπρόσθετα, η συγκέντρωση του N στη βιομάζα των φυτών κάτω από επάρκεια N μειωνόταν με την πρόοδο της καλλιέργειας. Σύμφωνα με τις μελέτες των of Westermann et al. (1982), Araujo & Teixeira (2008), George & Sigleton (1992) και Soratto et al. (2013), το στάδιο της ανθοφορίας και κυρίως το στάδιο της παραγωγής θεωρούνται ως τα πιο απαιτητικά σε N στάδια ανάπτυξης του φασολιού. Ωστόσο, δεδομένου πως η συνολική παροχή N στα φυτά είναι το άθροισμα των εξωτερικών εισροών N όσο και το ποσοτήτων N που δεσμεύει το φυτό από την ατμόσφαιρα, οι οποίες αλληλεξαρτώνται, ο προσδιορισμός των απαραίτητων εισροών N που καλύπτει τις ανάγκες του φυτού κατά τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης είναι ιδιαίτερα απαιτητικός, καθώς επίσης εξαρτάται από τον καλλιεργούμενο γονότυπο, το στέλεχος προς εμβολιασμό και τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες (Karavidas et al., 2022).

Η σύσταση των ισοτόπων άνθρακα ($\delta^{13}\text{C}$) χρησιμοποιείται είτε ως μακροπρόθεσμος ρυθμός διαπνοής των φυτών είτε ως συντελεστής απόδοσης χρήσης

νερού ή/και N (Farquhar & Richards, 1984; Farquhar et al., 1989; Iqbal et al., 2005; Cabrera-Bosquet et al., 2007). Σύμφωνα με τους Fu et al. (1993), το φασόλι κατέγραψε χαμηλότερες τιμές Δ κάτω από επάρκεια νερού σε συνδυασμό με μειωμένη παροχή N, το οποίο αποδίδεται στην περιορισμένη φωτοσυνθετική ικανότητα του φυτού. Ωστόσο, οι Knight et al. (1993) παρατήρησαν μία θετική συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή Δ και της αζωτοδεσμευτικής ικανότητας των φυτών. Παράλληλα, οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$ του φασολιού δεν επηρεάστηκαν από τα διαφορετικά σχήματα θρέψης N στη μελέτη των Smith et al. (2022). Αντίθετα, στη μελέτη των Jiang et al. (2020), όπου το φασόλι αναπτύχθηκε εξ ολοκλήρου σε ΘΔ με διαφορετικές συγκεντρώσεις N, όσο τα επίπεδα παροχής του N μειώνονταν τόσο οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$ γίνονταν λιγότερα αρνητικές, και επομένως οι τιμές Δ μειώνονταν, ενώ καταγράφηκε μία θετική συσχέτιση μεταξύ των τιμών $\delta^{13}\text{C}$ και των ποσοστών N που προήλθαν από την ατμόσφαιρα (%Ndfa). Τα παραπάνω ευρήματα είναι εν μέρει σε συμφωνία με την παρούσα μελέτη, στην οποία οι τιμές Δ επηρεάστηκαν κυρίως από τις εξωτερικές εισροές N παρά από την αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών.

Εκτός από τις τιμές Δ , ο λόγος C:N θεωρείται επίσης ως ένας δείκτης αποδοτικότητας χρήσης N (Wang et al., 2014), ο οποίος επηρεάζεται σημαντικά από τις καλλιεργητικές πρακτικές. Ειδικότερα, αυξημένος λόγος C:N στη βιομάζα των φυτών υποδεικνύει υψηλή αποδοτικότητα χρήσης N (Ågren, 2004). Επιπρόσθετα, οι Sun et al. (2020) υποστήριξαν πως η αυξημένη παροχή N αυξάνει αντίστοιχα τη συγκέντρωση των C και N στη βιομάζα των φυτών αλλά μειώνει τον λόγο C:N. Στην παρούσα μελέτη, τα διαφορετικά σχήματα θρέψης N δεν επηρέασαν τη συγκέντρωση του C στην υπέργεια βιομάζα των φυτών και ως εκ τούτου οι αποκλίσεις στον λόγο C:N μεταξύ των μεταχειρίσεων οφείλονται κυρίως στις αποκλίσεις στη συγκέντρωση ολικού N. Ειδικότερα, και οι 2 μεταχειρίσεις ελλειμματικής παροχής N αύξησαν το λόγο C:N στην υπέργεια βιομάζα του φασολιού κατά το στάδιο σχηματισμού των πρώτων λοβών και κατά το στάδιο της παραγωγής. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω μελέτες, τα φυτά που αναπτύχθηκαν με ελλειμματική παροχή N παρουσίασαν αυξημένη αποδοτικότητα χρήσης N. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν περισσότερο την αντίληψη πως η μειωμένη παροχή N δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από τις ευεργετικές της επιδράσεις στην έκπτυξη φυματίων και αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού και επομένως τα συνολικά ποσά N που δεσμεύει το φυτό από την ατμόσφαιρα.

Παρόμοια ευρήματα σχετικά με τη σχέση των εισροών N και του λόγου C:N καταγράφηκαν και στη μελέτη των Kontopoulou et al. (2015a), όπου η περιορισμένη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού αύξησαν τον λόγο C:N σε σχέση με τα φυτά που αναπτύχθηκαν συμβατικά. Αντίθετα, σύμφωνα με τα πειράματα εδάφους αυτής της μελέτης, αν και οι βιολογικές καλλιεργητικές πρακτικές που δεν περιλάμβαναν την εφαρμογή της χλωρής λίπανσης περιόρισαν σημαντικά τη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος, σε τέτοιο βαθμό ώστε να επηρεαστεί αρνητικά η απόδοση της καλλιέργειας, ο λόγος C:N στην υπέργεια βιομάζα των φυτών δεν επηρεάστηκε. Η ασυμφωνία των ευρημάτων, μπορεί να οφείλεται στην ένταση της καταπόνησης σε N, καθώς στην παραπάνω μελέτη η μειωμένη διαθεσιμότητα του αζώτου οδήγησε σε δραστική μείωση της απόδοσης της καλλιέργειας κατά 33%. Επιπλέον, τα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από 50-25% N και εμβολιάστηκαν με το στέλεχος PVTN21 κατέγραψαν χαμηλότερο λόγο C:N σε σχέση με τα φυτά που είτε εμβολιάστηκαν με το στέλεχος CIAT 899 είτε παρέμειναν μη εμβολιασμένα. Η επίδραση αυτή ίσως οφείλεται στην υψηλή αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών με το παραπάνω στέλεχος, υποδηλώνοντας πως οι αυξημένες εισροές N από την ατμόσφαιρα στην παραπάνω μεταχείριση οδήγησαν στην αυξημένη πρόσληψη N με αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου C:N στην υπέργεια βιομάζα των φασολιών.

Η ανασταλτική επίδραση της επάρκειας N στην αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φασολιού που καταγράφηκε σε αυτήν τη μελέτη, έχει επίσης αναφερθεί σε αρκετές μελέτες (Jiang et al., 2020; Reinprecht et al., 2020; Habinshuti et al., 2021). Επιπλέον, οι τιμές %Ndfa των φασολιών στη συγκεκριμένη μελέτη κάτω από ελλειμματική και επαρκή παροχή N κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα με αυτά της μελέτη των Reinprecht et al. (2020), όπου διαφορετικοί γονότυποι αναρριχώμενου φασολιού καλλιεργήθηκαν κάτω από παρόμοιες μεταχειρίσεις N. Ειδικότερα, κατά το στάδιο του σχηματισμού των πρώτων λοβών καθώς η παροχή N μειωνόταν η αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού αυξανόταν. Ωστόσο, η παραπάνω αντιστρόφως ανάλογη σχέση δεν παρατηρήθηκε κατά το ακόλουθο στάδιο της παραγωγής. Συγκεκριμένα, ακόμα και αν τα φυτά στις 2 ελλειμματικές μεταχειρίσεις N (75%-25% N & 50%-25% N) τροφοδοτούνταν με ένα ΘΔ που κάλυπτε το 25% των αναγκών των φυτών σε N κατά το στάδιο της ανθοφορίας, τα φυτά με παροχή 50% N κατά το βλαστικό στάδιο ανάπτυξης κατέγραψαν υψηλότερο %Ndfa κατά 37% σε σχέση με τα φυτά που παρέχονταν με 75% N κατά το ίδιο στάδιο. Επομένως, η αυξημένη αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών του σχήματος θρέψης 50-25% N κατά την ανθοφορία, ωφέλησε

την περαιτέρω δέσμευση μεγαλύτερων ποσοτήτων ατμοσφαιρικού N₂ κατά το ακόλουθο απαιτητικό σε N στάδιο παραγωγής. Εξάλλου, οι Pena-Gabriales et al. (1993), πρότειναν πως για τη μεγιστοποίηση της αζωτοδεσμευτική ικανότητας του φυτού κατά το στάδιο της παραγωγής, πρέπει να υιοθετηθούν πρακτικές που ευνοούν την παραπάνω ικανότητα κατά το στάδιο της ανθοφορίας. Σύμφωνα με τους Muller et al. (1993), η αυξημένη παροχή N κατά την ανθοφορία καταστέλλει τον σχηματισμό φυματίων και την ικανότητα του φυτού να αξιοποιήσει το ατμοσφαιρικό N₂. Επιπλέον, οι Mastrodomenico et al. (2013) συμπέραναν πως η αρνητική επίδραση της καταπόνησης στον σχηματισμό φυματίων και στην αζωτοδεσμευτική ικανότητα κατά την ανθοφορία της σόγιας δύναται να ανασταλεί εάν ευνοϊκές συνθήκες επικρατήσουν κατά το ακόλουθο στάδιο παραγωγής. Ωστόσο, στην τρέχουσα μελέτη, η μείωση της παροχής ανόργανου N από 75% σε 25 % κατά το στάδιο παραγωγής δεν ενίσχυσε την αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών στον ίδιο βαθμό όπως στα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό 50-25% N. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στον αυξημένο ανταγωνισμό μεταξύ των φυματίων και των παραγόμενων λοβών για φωτοσυνθετικά προϊόντα κατά το στάδιο της παραγωγής (Andraus et al., 2016). Ωστόσο, ο παραπάνω ανταγωνισμός φαίνεται να ήταν ήπιος για τα φυτά με επάρκεια παροχής N (100% N), με αποτέλεσμα να δεσμεύσουν υψηλότερα ποσά ατμοσφαιρικού N₂, σε σχέση με τα φυτά της μεταχείρισης 75-25% N, παρά το λιγότερο αριθμό φυματίων που κατέγραψαν στις ρίζες τους.

Παρόμοια με την ικανότητα έκπτυξης φυματίων, η επαρκής παροχή N είναι επίσης επιζήμια στην αποδοτικότητα των ριζοβίων στην αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού ξενιστή. Οι Aouani et al. (1997) τόνισαν τη σημαντικότητα της κατάλληλης παροχής N στην αλληλεπίδραση ριζοβίου και φυτού, συμπεραίνοντας πως σχήματα θρέψης χαμηλών εισροών N πρέπει να υιοθετηθούν για την κατοχύρωση μίας αποδοτικής συμβίωσης. Στην παρούσα μελέτη, τα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό το σχήμα θρέψης χαμηλότερων εισροών N (50-25% N) και εμβολιάστηκαν με το στέλεχος PVTN21 δέσμευσαν σχεδόν διπλάσια ποσά N σε σχέση με τα φυτά που δεν εμβολιάστηκαν με κάποιο στέλεχος. Αυξημένα ποσά δεσμευμένου N, σε σχέση με τα φυτά μάρτυρα, κατέγραψαν και τα φυτά που εμβολιάστηκαν με το στέλεχος CIAT 899, ωστόσο η απόκλιση αυτή οφείλεται στην αυξημένη υπέργεια βιομάζα των φυτών παρά στα συγκέντρωση του N που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa). Αρκετές μελέτες (Mostasso et al., 2002; Hungria et al., 2003; del Cerro et al., 2015; Gunnabo et al., 2019) αναφέρουν πως το στέλεχος ευρέος φάσματος ξενιστών CIAT 899 θεωρείται

κατάλληλο για τον εμβολιασμό του *Phaseolus vulgaris* sp., ενώ άλλες μελέτες (Kawaka et al., 2014; Ouma et al., 2016; Kawaka et al., 2018) τόνισαν τη σημαντικότητα των γηγενών ριζοβίων στη βελτίωση της χαμηλής αζωτοδεσμευτικής ικανότητας του φασολιού. Στην παρούσα μελέτη, το φασόλι καλλιεργήθηκε υδροπονικά σε ένα χημικά αδρανές υπόστρωμα (περλίτη) και ως εκ τούτου οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους και η παρουσία υψηλών πληθυσμών ριζοβίων δεν παρεμβαίνουν στη μελέτη της μεμονωμένης επίδρασης των παραπάνω στελεχών στην αζωτοδεσμευτική ικανότητα του φυτού. Επομένως, το μειωμένο %Ndfa και τα ποσά δεσμευμένου N των φυτών που εμβολιάστηκαν με το στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899 υποδεικνύουν πως το στέλεχος αυτό είναι ένα μη αποδοτικό εμβόλιο, ενώ το *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21 θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα αποδοτικό στέλεχος για την αύξηση της ικανότητας του φασολιού να αξιοποιήσει το ατμοσφαιρικό N₂, τουλάχιστον για το γονότυπο φασολιού που καλλιεργήθηκε σε αυτή τη μελέτη.

Μολονότι τα φυτά της ελλειμματικής παροχής N (75-25% & 50-25% N) υπέδειξαν παρόμοια αποδοτικότητα χρήσης N, τα φυτά του σχήματος 50-25% N κατέγραψαν υψηλότερη παραγωγή νωπών λοβών κατά 38% σε σχέση με τα φυτά της μεταχείρισης 75-25% N, απόκλιση που λογικά οφείλεται στον αυξημένο %Ndfa των φυτών κάτω από την ελάχιστη παροχή N κατά 60%. Παράλληλα, η αυξημένη αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών 50-25% N μείωσε το κενό της παραγωγής κατά 25% μεταξύ των φυτών 75-25% και 100% N. Το εύρημα αυτό τονίζει τη σημαντικότητα της αζωτοδεσμευτικής ικανότητας ως ένα καθοριστικό παράγοντα διασφάλισης υψηλών αποδόσεων φασολιού κάτω από συνθήκες ανεπαρκούς παροχής N. Η δυνατότητα της αζωτοδεσμευτικής δραστηριότητας να καλύψει τις ανάγκες του φυτού ώστε να μην διακυβεύεται η απόδοση της καλλιέργειας, έχει επίσης αναφερθεί και στη μελέτη των Pacheco et al. (2020). Στην παρούσα μελέτη, οι απώλειες της παραγωγής κάτω από ελλειμματική παροχή N οφείλονται στη μείωση τόσο του αριθμού των λοβών ανά φυτό όσο και το μέσο νωπό βάρος λοβού. Ωστόσο, η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των μεταχειρίσεων καταγράφηκε στον αριθμό των λοβών ανά φυτό. Σύμφωνα με τους Fageria & Santos (2008), ο αριθμός των λοβών ανά φυτό αποτελεί το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό παραγωγής που καθορίζει τη συνολική απόδοση της καλλιέργειας, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει την υψηλότερη ευαισθησία όταν το φασόλι καλλιεργείται κάτω από μη ευνοϊκές συνθήκες (Mouhouche et al., 1998).

Επιπλέον, τα φυτά που εμβολιάστηκαν με το στέλεχος PVTN21 εμφάνισαν την υψηλότερη αζωτοδεσμευτική ικανότητα και βελτιωμένη αποδοτικότητα χρήσης N. Η

συνεργιστική δράση των παραπάνω παραμέτρων ωφέλησε σημαντικά την απόδοση του φασολιού σημειώνοντας απώλειες παραγωγής μόνο κατά 11,2% σε σχέση με τα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από επάρκεια N. Το εύρημα αυτό είναι αρκετά βαρυσήμαντο δεδομένου πως στο σχήμα θρέψης 50-25% N εξοικονομήθηκε συνολικά 64% N κατά τη διάρκεια ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου. Παράλληλα, το εμπορικό στέλεχος CIAT 899 αύξησε την παραγωγή κατά 21% στη μεταχείριση 50-25% N σε σχέση με τα φυτά που παρέμειναν μη εμβολιασμένα, ωστόσο λόγω της χαμηλής του συνεισφοράς στα ποσά του δεσμευμένου N δεν κατάφερε τις ίδιες επιδόσεις με το στέλεχος PVTN21. Ωφέλιμες επιδράσεις του στελέχους *Rhizobium tropici* CIAT 899 στην παραγωγή φασολιού κάτω από μειωμένη διαθεσιμότητα N έχουν επίσης αναφερθεί και από τους Barros et al. (2018) και Ndakidemi et al. (2006), ενώ οι Cardillo et al. (2019) παρατήρησαν πως ο εμβολιασμός του φασολιού με το παραπάνω στέλεχος δεν επηρέασε την απόδοσή του λόγω της παρουσίας επαρκούς πληθυσμού γηγενών ριζοβίων στο έδαφος.

6. Συμπεράσματα

Η απόδοση του φασολιού σε υπαίθριο βιολογικό σύστημα κατά την εαρινή-θερινή καλλιεργητική περίοδο, που ακολούθησε τη βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου κατά την προηγούμενη φθινοπωρινή-χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, μειώθηκε σημαντικά. Η μείωση οφείλεται στην περιορισμένη διαθεσιμότητα του αζώτου στο έδαφος σε σύγκριση με τη συμβατική καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε τη συμβατική χειμερινή καλλιέργεια μπρόκολου αντίστοιχα. Ωστόσο, η βιολογική καλλιέργεια φασολιού που ακολούθησε μία καλλιέργεια ψυχανθούς ως χλωρή λίπανση κατά την προηγούμενη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, οδήγησε σε παρόμοια επίπεδα διαθέσιμου εδαφικού N και παρόμοιες αποδόσεις καλλιεργείας στην παραγωγή νωπών λοβών με αυτές της συμβατικής καλλιεργείας φασολιού. Η χαμηλότερη διαθεσιμότητα N κατά το 2^ο πειραματικό έτος εντοπίστηκε στα πειραματικά τεμάχια της αγρανάπαυσης, ωστόσο η απόδοση της ακόλουθης βιολογικής καλλιεργείας φασολιού δεν διέφερε σημαντικά από την παραγωγή της συμβατικής και της βιολογικής καλλιεργείας φασολιού. Σε αντίθεση με το φασόλι, το οποίο δεν επωφελήθηκε ουσιαστικά από τον εμβολιασμό του με το εμπορικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899, το κουκί υπέδειξε μία σημαντική αύξηση στην ανάπτυξη του καθώς και στην αζωτοδεσμευτική του ικανότητα όταν εμβολιάστηκε με το στέλεχος *Rhizobium laguerreae* VFLE1, ενώ αυτές οι ευεργετικές επιδράσεις του εμβολιασμού καταγράφηκαν και στα δύο έτη του προγράμματος εναλλαγής καλλιεργειών. Η παραγωγή του φασολιού ανεξάρτητα από τα διαφορετικά σχήματα καλλιεργειών ήταν χαμηλότερη στο 2^ο πειραματικό έτος σε σχέση με το 1^ο, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στις πιο ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της 1^{ης} καλλιεργητικής περιόδου. Ως αποτέλεσμα, το στάδιο της παραγωγής, το οποίο διήρκησε 50 ημέρες και στις 2 εαρινές καλλιεργητικές περιόδους, ξεκίνησε νωρίτερα κατά την 1^η εαρινή καλλιεργητική περίοδο, γεγονός που οδήγησε σε μειωμένη καταπόνηση υψηλής θερμοκρασίας, η οποία τελικά ωφέλησε την ανάπτυξη και καρπόδεση του φασολιού.

Η βιολογική καλλιέργεια μπρόκολου κατά τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο είχε εν μέρει θετικό αντίκτυπο στην ποιότητα των νωπών λοβών της ακόλουθης βιολογικής καλλιεργείας φασολιού. Ειδικότερα, το αυξημένο ποσοστό ξηράς ουσίας και η βελτιωμένη βιοχημική δραστηριότητα (αντιοξειδωτικά, φαινολικά & φλαβονοειδή) συνοδεύτηκε με σημαντικές μειώσεις στο μέγεθος και βάρος του λοβού

καθώς και στον συνολικό αριθμό λοβών ανά φυτό. Παράλληλα, οι επιδράσεις αυτές σχετίζονται κυρίως με την περιορισμένη διαθεσιμότητα του N στο έδαφος όπου εγκαταστάθηκε το παραπάνω πρόγραμμα εναλλαγής. Ωστόσο, η παραπάνω τάση δεν παρατηρήθηκε στη βιολογική καλλιέργεια φασολιού όταν το πρόγραμμα λίπανσης περιλάμβανε την εφαρμογή της χλωρής λίπανσης. Ειδικότερα, η καλλιέργεια του κουκιού ως χλωρή λίπανση κατά την προηγούμενη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο βελτίωσε τα χαρακτηριστικά της παραγωγής στα επίπεδα της συμβατικής καλλιέργειας. Επιπρόσθετα, οι παραγόμενοι νωποί λοβοί υπέδειξαν υψηλές συγκεντρώσεις σε θρεπτικά στοιχεία σε σύγκριση τόσο με του βιολογικούς λοβούς χωρίς την εφαρμογή χλωρής λίπανσης αλλά και με τους συμβατικούς, αντίστοιχα. Επομένως, η καλλιέργεια κατά τη χειμερινή περίοδο ενός ψυχροανθεκτικού ψυχανθούς με υψηλή αζωτοδεσμευτική ικανότητα αποτελεί μία βιώσιμη καλλιεργητική πρακτική για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων βιολογικών καλλιεργητικών συστημάτων φασολιού που παράγουν ταυτόχρονα νωπούς λοβούς υψηλής θρεπτικής αξίας.

Όσον αφορά την εκτός εδάφους καλλιέργεια φασολιού, η παρούσα μελέτη αποδεικνύει πως ο εμβολιασμός των φυτών με αποδοτικά ριζόβια, όπως το στέλεχος *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21, επιτρέπει την ουσιαστική εξοικονόμηση εξωτερικών εισροών αζώτου στο θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας των φυτών, χωρίς να περιορίζεται δραστικά η απόδοση της καλλιέργειας. Με βάση τα ευρήματα αυτής της μελέτης, η συνολική μείωση της παροχής ανόργανου N κατά 64% στο σύνολο της καλλιέργειας μέσω του σχήματος 50-25% N οδήγησε σε μείωση της παραγωγής νωπών λοβών κατά 11,2%, συγκριτικά με την απόδοση των φυτών υπό επάρκεια N, όταν τα φυτά εμβολιάστηκαν με το αζωτοδεσμευτικό στέλεχος PVTN21. Ωστόσο, τα φυτά που δεν εμβολιάστηκαν με το παραπάνω στέλεχος και αναπτύχθηκαν κάτω από το ίδιο σχήμα θρέψης σε άζωτο κατέγραψαν απώλειες παραγωγής κατά 35% σε σχέση με τα φυτά μάρτυρα (100% N). Παράλληλα, η αποδοτικότητα χρήσης αζώτου και το ποσοστό του αζώτου που προήλθε από την ατμόσφαιρα (%Ndfa) αυξήθηκαν κατά 9,8% και 86% αντίστοιχα στα φυτά του σχήματος 50-25% N που εμβολιάστηκαν με το στέλεχος PVTN21. Επομένως, η θετικές επιδράσεις του εμβολιασμού με το στέλεχος PVTN21 των φυτών υπό ελλειμματική παροχή αζώτου (50-25% N) οφείλεται στη συνεργιστική δράση των παραπάνω μεγεθών. Επιπλέον, η καλύτερη απόδοση του σχήματος 50-25% N (64% εξοικονόμηση αζώτου) έναντι του 75-25% N (53% εξοικονόμηση αζώτου) οφείλεται στην αυξημένη αζωτοδεσμευτική ικανότητα των φυτών 50-25% N κατά το στάδιο της έκπτυξης των πρώτων λοβών. Τέλος, δεδομένου

της έντασης της αζωτοδεσμευτικής ικανότητας και τον αντίκτυπο αυτής στην απόδοση της καλλιέργειας το στέλεχος *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21 θεωρείται αποδοτικότερο από το εμπορικό στέλεχος *Rhizobium tropici* CIAT 899, τουλάχιστον για τον γονότυπο που καλλιεργήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη.

7. Πρωτοτυπία της Διδακτορικής Διατριβής

- Για πρώτη φορά πραγματοποιήθηκε μελέτη της επίδρασης διαφορετικών πρακτικών βιολογικής καλλιέργειας φασολιού έναντι της συμβατικής στην απόδοση και ποιότητα του φασολιού που καλλιεργήθηκε για τους νωπούς του λοβούς.
- Για πρώτη φορά μελετήθηκε μακροπρόθεσμα η απόδοση και η ποιότητα βιολογικού και συμβατικού φασολιού κάτω από διαφορετικά προγράμματα εναλλαγής καλλιεργειών, όπου το φασόλι τέθηκε ως κύρια καλλιέργεια.
- Για πρώτη φορά αξιολογήθηκε η επίδραση διαφορετικών καλλιεργητικών πρακτικών σχετιζόμενων με τη διαθεσιμότητα αζώτου στο έδαφος στα επίπεδα σακχάρων και αμύλου σε νωπούς λοβούς φασολιού.
- Για πρώτη φορά πραγματοποιήθηκε υδροπονική καλλιέργεια φασολιού υπό διαφορετικά σχήματα θρέψης αζώτου, από την οποία αναδείχθηκαν βιώσιμες πρακτικές αζωτούχου λίπανσης χωρίς να διακυβεύεται δραστικά η απόδοση της καλλιέργειας σε νωπούς λοβούς.
- Για πρώτη φορά αξιολογήθηκε η απόδοση του στελέχους *Rhizobium sophoriradicis* PVTN21, το οποίο αποτελεί ένα στέλεχος ελληνικής προέλευσης που απομονώθηκε και χαρακτηρίστηκε από το Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Μικροβιολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, στην αζωτοδεσμευτική ικανότητα και απόδοση του φασολιού. Το στέλεχος αυτό επιλέχθηκε ανάμεσα από μία μεγάλη συλλογή ελληνικών αζωτοδεσμευτικών στελεχών που εμβολιάζουν το φασόλι και αναπτύχθηκε από το παραπάνω εργαστήριο στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος «TRUE: Transition paths to sustainable legume-based systems in Europe» Horizon 2020.
- Για πρώτη φορά σε μία μελέτη αξιολογήθηκε η απόδοση του φασολιού κάτω από διαφορετικά συστήματα καλλιέργειας (συμβατικό, βιολογικό και υδροπονικό) από την οποία αναδείχθηκαν βιώσιμες καλλιεργητικές πρακτικές που διασφαλίζουν την υψηλή παραγωγή νωπών λοβών φασολιού.

8. Βιβλιογραφία

1. Abd El-Gai, M.A.; Al-Dokeshy, M.H.; Nasse, D.M.T. Effects of intercropping system of tomato and common bean on growth, yield components and land equivalent ratio in new valley governorate. *Asian J. Crop Sci.* **2014**, *6*, 254–261.
2. Abebe, A.; Tsige, A.; Work, M.; Enyew, A. Optimizing irrigation frequency and amount on yield and water productivity of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in NW Amhara, Ethiopia: A case study in Koga and Ribb irrigation scheme. *Cogent Food Agric.* **2020**, *6*, 1773690.
3. Abebe, G. Effect of np fertilizer and moisture conservation on the yield and yield components of haricot bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the semi arid zones of the central rift valley in Ethiopia. *Adv. Environ. Biol.* **2009**, *3*, 302–307.
4. Abubaker, S. Effect of Plant density on flowering date, yield and quality attribute of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under center pivot irrigation system. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* **2008**, *3*, 666–668.
5. Acosta Gallegos, J.A.; Kohashi Shibata, J. Effect of water stress on growth and yield of indeterminate dry—bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crop. Res.* **1989**, *20*, 81–93.]
6. Acosta-Gallegos, J.A.; Adams, M.W. Plant traits and yield stability of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars under drought stress. *J. Agric. Sci.* **1991**, *117*, 213–219.
7. Adediran, J.A.; Taiwo, L.B.; Akande, M.O.; Sobulo, R.A.; Idowu, O.J. Application of organic and inorganic fertilizer for sustainable maize and cowpea yields in Nigeria. *J. Plant Nutr.* **2007**, *27*, 1163–1181.
8. Ågren, G.I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs – theory and observations. *Ecol. Lett.* **2004**, *7*, 185–191.
9. Agtunong, T.; Redden, R.; Mangge-Nang, M.; Searle, C.; Fukai, S. Genotypic variation in response to high temperature at flowering in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Aust. J. Exp. Agric.* **1992**, *32*, 1135–1140.
10. Alguacil, M.d.M.; Roldán, A.; Salinas-García, J.R.; Querejeta, J.I. No tillage affects the phosphorus status, isotopic composition and crop yield of *Phaseolus vulgaris* in a rain-fed farming system. *J. Sci. Food Agric.* **2011**, *91*, 268–272.
11. Alvares, R.C.; Silva, F.C.; Melo, L.C.; Melo, P.G.S.; Pereira, H.S. Estimation of genetic parameters and selection of high-yielding, upright common bean lines with slow seed-coat darkening. *Genet. Mol. Res.* **2016**, *15*, gmr15049081.
12. Amani Machiani, M.; Rezaei-Chiyaneh, E.; Javanmard, A.; Maggi, F.; Morshedloo, M.R. Evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed yield and qualitative production of the essential oils from fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) and dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) in intercropping system under humic acid application. *J. Clean. Prod.* **2019**, *235*, 112–122.
13. Andraus, M.P.; Cardoso, A.A.; Ferreira, E.P.B. Differences in nodulation and grain yield on common bean cultivars with different growth cycles. *Commun. Soil Sci Plant Anal.* **2016**, *47*, 1148–1161.

14. Aouani, M.E.; Mhamdi, R.; Mars, M.; Elayeb, M.; Ghrir, R. Potential for inoculation of common bean by effective rhizobia in tunisian soils. *Agronomie* **1997**, *17*, 445–454.
15. Araujo, A.P.; Teixeira, M.G. Relationships between grain yield and accumulation of biomass, nitrogen and phosphorus in common bean cultivars. *Rev. Bras. Cienc. Solo* **2008**, *32*, 1977–1986.
16. Arcas-Pilz, V.; Parada, F.; Villalba, G.; Rufi-Salis, M.; Rosell-Melé, A.; Gabarrell Durany, X. Improving the fertigation of soilless urban vertical agriculture through the combination of struvite and rhizobia inoculation in *Phaseolus vulgaris*. *Front. Plant Sci.* **2021**, *12*, 952.
17. Argaw, A.; Muleta, D. Inorganic nitrogen application improves the yield and yield traits of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) irrespective of the indigenous rhizobial population. *S. Afr. J. Plant Soil* **2017**, *34*, 97–104.
18. Asemanrafat, M.; Honar, T. Effect of water stress and plant density on canopy temperature, yield components and protein concentration of red bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. akhtar). *Int. J. Plant Prod.* **2017**, *11*, 241–258.
19. Aserse, A.A.; Markos, D.; Getachew, G.; Yli-Halla, M.; Lindström, K. Rhizobial inoculation improves drought tolerance, biomass and grain yields of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and soybean (*Glycine max* L.) at Halaba and Boricha in Southern Ethiopia. *Arch. Agron. Soil Sci.* **2020**, *66*, 488–501.
20. Aslani, M.; Souri, M.K. Growth and quality of green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under foliar application of organic-chelate fertilizers. *Open Agric.* **2018**, *3*, 146–154.
21. Assefa, T.; Wu, J.; Beebe, S.E.; Rao, I.M.; Marcomin, D.; Claude, R.J. Improving adaptation to drought stress in small red common bean: Phenotypic differences and predicted genotypic effects on grain yield, yield components and harvest index. *Euphytica* **2014**, *203*, 477–489.
22. Atuahene-Amankwa, G.; Michaels, T.E. Genetic variances, heritabilities and genetic correlations of grain yield, harvest index and yield components for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in sole crop and in maize/bean intercrop. *Can. J. Plant Sci.* **1997**, *77*, 533–538.
23. Aycıcek, M. Path analysis of yield and yield components of some common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes under Bingol ecological conditions in Eastern Anatolia. *J. Food Agric. Environ.* **2013a**, *11*, 750–753.
24. Aycıcek, M. Yield and yield components of some common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) local landraces and commercial varieties under Eastern Anatolia conditions. *J. Food Agric. Environ.* **2013b**, *11*, 754–756.
25. Ayonoadu, U.W.U.; Norrington-Davies, J.; Edje, O.T.; Mughogho, L.K. Weed control and its effects on yield of *Phaseolus vulgaris* beans in Malawi. *J. Agric. Sci.* **1974**, *82*, 283–286.
26. Azariz, L.; Elblidi, S.; Fekhaoui, M.; Yahyaoui, A. Uptake and accumulation of lead in *Lycopersicon esculentum* and *Phaseolus vulgaris* L. planted on organic hydroponics. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* **2021**, *101*, 2242–2254.
27. Azeez, J.O.; Van Averbeke, W. Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil. *bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 5645–5651.

28. Babaeian, M. Effect of row spacing and sowing date on yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Afr. J. Microbiol. Res.* **2012**, *6*, 4340–4343.
29. Badr El-Din, S.M.S.; Moawad, H. Enhancement of nitrogen fixation in lentil, faba bean, and soybean by dual inoculation with Rhizobia and mycorrhizae. *Plant Soil* **1988**, *108*, 117–123.
30. Baez-Gonzalez, A.D.; Fajardo-Diaz, R.; Padilla-Ramirez, J.S.; Osuna-Ceja, E.S.; Kiniry, J.R.; Meki, M.N.; Acosta-Díaz, E. Yield performance and response to high plant densities of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars under semi-arid conditions. *Agronomy* **2020**, *10*, 1684.
31. Bağdatlı, M.C.; Erdoğan, O. Effects of Different irrigation levels and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), photosynthesis activator, traditional fertilizer on yield and growth parameters of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in arid climatic conditions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **2019**, *50*, 527–537.
32. Balcha, A. Genetic variation for grain yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in sole and maize/bean intercropping systems. *Asian J. Crop Sci.* **2014**, *6*, 158–164.
33. Baldin, R.C.; Kavalco, S.A.F.; Woyann, L.G.; Junior, A.A.R.; Gobatto, D.R.; da Silva, G.R.; Beninand, G.; Finatto, T. Yield stability of common bean genotypes in the state of Santa Catarina, Brazil. *Pesqui. Agropecu. Bras.* **2021**, *56*, 1–9.
34. Balkaya, A.; Odabaş, M.S. The effects of sowing dates on seed yield and quality of red podded bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Acta Hort.* **2007**, *729*, 151–155.
35. Barbeau, C.D.; Wilton, M.J.; Oelbermann, M.; Karagatzides, J.D.; Tsuji, L.J.S. Local food production in a subarctic Indigenous community: The use of willow (*Salix* spp.) windbreaks to increase the yield of intercropped potatoes (*Solanum tuberosum*) and bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Int. J. Agric. Sustain.* **2018**, *16*, 29–39.
36. Barros, R.L.N.; De Oliveira, L.B.; De Magalhães, W.B.; Pimentel, C. Growth and yield of common bean as affected by seed inoculation with rhizobium and nitrogen fertilization. *Exp. Agric.* **2018**, *54*, 16–30.
37. Bassirirad, H.; Caldwell, M.M.; Bilbrough, C. Effects of soil temperature and nitrogen status on kinetics of $^{15}\text{NO}_3^-$ uptake by roots of field-grown *Agropyron desertorum* (Fisch. ex Link) Schult. *New Phytol.* **1993**, *123*, 485–489.
38. Bedard-Haughn, A.; van Groenigen, J.W.; van Kessel, C. Tracing ^{15}N through landscapes: Potential uses and precautions. *J. Hydrol.* **2003**, *272*, 175–190.
39. Benzie, I.F.F.; Strain, J.J. [2] Ferric Reducing/Antioxidant Power Assay: Direct measure of total antioxidant activity of biological fluids and modified version for simultaneous measurement of total antioxidant power and ascorbic acid concentration. *Methods Enzymol.* **1999**, *299*, 15–27.
40. Berry, P.M.; Sylvester-Bradley, R.; Philipps, L.; Hatch, D.J.; Cuttle, S.P.; Rayns, F.W.; Gosling, P. Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? *Soil Use Manag.* **2006**, *18*, 248–255
41. Berton, J.F.; Santos, J.C.P.; Coelho, C.M.M.; Klauberg Filho, O. Effect of inoculation associated to leaf sprayed Co+Mo on the yield and grain nutrients in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Brazilian Arch. Biol. Technol.* **2008**, *51*, 1089–1096.

42. Bezawelelaw, K.; Belete, K.; Sripichitt, P. Genetic gain in grain yield potential and associated agronomic traits in haricot bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Kasetsart J.-Nat. Sci.* **2006**, *40*, 835–847.
43. Bildirici, N. The effects of copper-zinc interactions on yield and yield components in soilless grown beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2020a**, *18*, 2581–2598.
44. Bildirici, N.; Oral, E. The effect of phosphorus and zinc doses on yield and yield components of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in Van-Gevaş, Turkey. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2020b**, *18*, 2539–2553.
45. Blair, M.W.; González, L.F.; Kimani, P.M.; Butare, L. Genetic diversity, inter-gene pool introgression and nutritional quality of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from Central Africa. *Theor. Appl. Genet.* **2010**, *121*, 237–248.
46. Boersma, J.G.; Hou, A.; Gillard, C.L.; McRae, K.B.; Conner, R.L. Impact of common bacterial blight on the yield, seed weight and seed discoloration of different market classes of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Can. J. Plant Sci.* **2015**, *95*, 703–710.
47. Bourgault, M.; Madramootoo, C.A.; Webber, H.A.; Dutilleul, P.; Stulina, G.; Horst, M.G.; Smith, D.L. Legume production and irrigation strategies in the aral sea basin: Yield, yield components, water relations and crop development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek). *J. Agron. Crop Sci.* **2013**, *199*, 241–252.
48. Bourn, D.; Prescott, J. A Comparison of the nutritional value, sensory qualities, and food safety of organically and conventionally produced foods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2010**, *42*, 1–34.
49. Boutraa, T.; Sanders, F.E. Influence of water stress on grain yield and vegetative growth of two cultivars of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Agron. Crop Sci.* **2001**, *187*, 251–257.
50. Boylu, O.A.; Girgel, U. Molecular characterization and yield levels of local bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes growing in eastern mediterranean region. *Fresenius Environ. Bull.* **2021**, *30*, 4928–4934.
51. Braun, H.; Fontes, P. C. R.; Silva, T. P.; da Finger, F. L.; Cecon, P. R.; Ferreira, A. P. S. Carbohydrates Concentration in leaves of potato plants affected by nitrogen fertilization rates. *Rev. Ceres* **2016**, *63*, 241–248.
52. Bremer, E.; van Kessel, C. Seasonal microbial biomass dynamics after addition of lentil and wheat residues. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1992**, *56*, 1141–1146.
53. Bremner, J.M. Total Nitrogen. In *Methods of Soil Analysis*; Norman, A.G., Ed.; Agronomy Monographs American Society of Agronomy: Madison, WI, USA, **1965**, 1149–1178.
54. Brown, J. E.; Gilliam, C. H.; Shumack, R. L.; Porch, D. W. Commercial snap bean response to fertilization with broiler litter. *HortScience* **1993**, *28*, 29–31.
55. Bruno, A.; Clare, M.M.; Stanley, N.T.; Paul, G.; Maxwell, M.G.; Patrick, R.; Richard, E. Variety × environment × management interaction of diseases and yield in selected common bean varieties. *Agron. J.* **2017**, *109*, 2450–2462.
56. Brust, G.E. Management strategies for organic vegetable fertility. In *Safety and Practice for Organic Food*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, **2019**, 193–212.

57. Bullock, D.G. Crop rotation. *Crit. Rev. Plant Sci.* **1992**, *11*, 309–326
58. Bulyaba, R.; Winham, D.M.; Lenssen, A.W.; Moore, K.J.; Kelly, J.D.; Brick, M.A.; Wright, E.M.; Ogg, J.B. Genotype by location effects on yield and seed nutrient composition of common bean. *Agronomy* **2020**, *10*, 347.
59. Buttery, B.R.; Park, S.J.; Findlay, W. Growth and yield of white bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in response to nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer and to inoculation with *Rhizobium*. *Can. J. Plant Sci.* **1987**, *67*, 425–432.
60. Byiringiro, B.; Birungi, S.; Musoni, A.; Mashingaidze, A.B. The effect of planting date on weed density, biomass and seed yield in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the semi-arid region of Nyagatare, Rwanda. *Trop. Agric.* **2017**, *94*, 335–345.
61. Cabrera-Bosquet, L.; Molero, G.; Bort, J.; Nogués, S.; Araus, J.L. The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and $\Delta^{13}\text{C}$ in durum wheat potted plants. *Ann. Appl. Biol.* **2007**, *151*, 277–289.
62. Campos, K.; Schwember, A.R.; Machado, D.; Ozores-Hampton, M.; Gil, P.M. Physiological and yield responses of green-shelled beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under restricted irrigation. *Agronomy* **2021**, *11*, 562.
63. Cardillo, B.E.d.S.; Oliveira, D.P.; Soares, B.L.; Martins, F.A.D.; Rufini, M.; da Silva, J.S.; Neto, G.G.F.; de Andrade, M.J.B.; de Souza Moreira, F.M. Nodulation and yields of common bean are not affected either by fungicides or by the method of inoculation. *Agron. J.* **2019**, *111*, 694–701.
64. Catuchi, T.A.; Guidorizzi, F.V.C.; Peres, V.J.S.; Dias, E.S.; Parmezan, G.C.; Galdi, L.V. Development and grain yield of common bean cultivars according to sowing season. *Científica* **2019**, *47*, 296–303.
65. Celmeli, T.; Sari, H.; Canci, H.; Sari, D.; Adak, A.; Eker, T.; Toker, C. The nutritional content of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces in comparison to modern varieties. *Agronomy* **2018**, *8*, 166.
66. Chalk, P.M. Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotations: A review. *Aust. J. Agric. Res.* **1998**, *49*, 303–316.
67. Chekanai, V.; Chikowo, R.; Vanlauwe, B. Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to nitrogen, phosphorus and rhizobia inoculation across variable soils in Zimbabwe. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2018**, *266*, 167–173.
68. Chen, L.-S., & Cheng, L. Carbon assimilation and carbohydrate metabolism of 'concord' grape (*Vitis labrusca* L.) leaves in response to nitrogen supply. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **2003**, *128*, 754–760.
69. Chojnacka, K.; Moustakas, K.; Witek-Krowiak, A. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. *Bioresour. Technol.* **2020**, *295*, 122223.
70. Chung, J.H.; Goulden, D.S. Yield components of haricot beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown at different plant densities. *N Z. J. Agric. Res.* **1971**, *14*, 227–234.
71. Collino, D.J.; Salvagiotti, F.; Peticari, A.; Piccinetti, C.; Ovando, G.; Urquiaga, S.; Racca, R.W. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: Relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* **2015**, *392*, 239–252.
72. Conti, S.; Villari, G.; Faugno, S.; Melchionna, G.; Somma, S.; Caruso, G. Effects of Organic vs. Conventional Farming System on Yield and Quality of Strawberry Grown as an Annual or Biennial Crop in Southern Italy. *Sci. Hortic.* **2014**, *180*, 63–71.

73. Corte, A.D.; Moda-Cirino, V.; Arias, C.A.A.; de Toledo, J.F.F.; Destro, D. Genetic analysis of seed morphological traits and its correlations with grain yield in common bean. *Braz. Arch. Biol. Technol.* **2010**, *53*, 27–34.
74. Costa-Coelho, G.R.; de Toledo-Souza, E.D.; Café-Filho, A.C.; Lobo, M. Dynamics of common bean web blight epidemics and grain yields in different tillage systems. *Trop. Plant Pathol.* **2016**, *41*, 306–311.
75. Crespo, G.M.; Kluson, R.; Schroder, E. Nitrogen levels and rhizobium inoculation and yields of native white bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Agric. Univ. P. R.* **1987**, *71*, 1–6.
76. D’Amico-Damião, V.; Nunes, H.D.; Couto, P.A.; Lemos, L.B. Straw type and nitrogen fertilization influence winter common bean yield and quality. *Int. J. Plant Prod.* **2020**, *14*, 703–712.
77. da Carvalho, M.C.S.; Nascente, A.S.; Ferreira, G.B.; Mutadiua, C.A.P.; Denardin, J.E. Phosphorus and potassium fertilization increase common bean grain yield in Mozambique Maria. *Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambient.* **2018**, *22*, 308–314.
78. da Conceição, C.G.; Robaina, A.D.; Peiter, M.X.; Parizi, A.R.C.; da Conceição, J.A.; Bruning, J. Economically optimal water depth and grain yield of common bean subjected to different irrigation depths. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* **2018**, *22*, 482–487.
79. da Costa, D.S.; Barbosa, R.M.; de Sá, M.E. Weed management and its relation to yield and seed physiological potential in common bean cultivars. *Pesqui. Agropecuária Trop.* **2013**, *43*, 147–154.
80. da Silva, D.A.; Gonçalves, J.G.R.; Ribeiro, T.; Chiorato, A.F.; Carbonell, S.A.M. Morphophysiological and agronomic performance of 42 common bean genotypes grown hydroponically under phosphorus deficiency. *Genet. Mol. Res.* **2021**, *20*, gmr18753.
81. da Silva, H.C.; de Lima, L.C.; de Camargo, R.; Lana, R.M.Q.; Lemes, E.M.; Cardoso, A.F. Effects of organomineral fertilizers formulated with biosolids and filter cake on common bean yield crop (*Phaseolus vulgaris* L.). *Aust. J. Crop Sci.* **2019**, *13*, 1566–1571.
82. Da Silva, M.G.; Arf, O.; De Sá, M.E.; Rodrigues, R.A.F.; Buzetti, S. Nitrogen fertilization and soil management of winter common bean crop. *Sci. Agrícola.* **2004**, *61*, 307–312
83. Da Silva, P.M.; Tsai, S.M.; Bonetti, R. Response to inoculation and N fertilization for increased yield and biological nitrogen fixation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Soil* **1993**, *152*, 123–130.
84. da Silveira Cardillo, B.E.; Oliveira, D.P.; Soares, B.L.; Martins, F.A.D.; Rufini, M.; da Silva, J.S.; Neto, G.G.F.; de Andrade, M.J.B.; de Souza Moreira, F.M. Nodulation and yields of common bean are not affected either by fungicides or by the method of inoculation. *Agron. J.* **2019**, *111*, 694–701.
85. Daba, S.; Haile, M. Effects of rhizobial inoculant and nitrogen fertilizer on yield and nodulation of common bean under intercropped conditions. *J. Plant Nutr.* **2002**, *25*, 1443–1455.

86. Dangour, A.D.; Dodhia, S.K.; Hayter, A.; Allen, E.; Lock, K.; Uauy, R. Nutritional quality of organic foods: A systematic review. *Am. J. Clin. Nutr.* **2009**, *90*, 680–685.
87. Dapaah, H.K.; McKenzie, B.A.; Hill, G.D. Effects of irrigation and sowing date on phenology and yield of pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in Canterbury, New Zealand. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* **1999**, *27*, 297–305.
88. Dapaah, H.K.; McKenzie, B.A.; Hill, G.D. Influence of sowing date and irrigation on the growth and yield of pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in a sub-humid temperate environment. *J. Agric. Sci.* **2000**, *134*, 33–43.
89. Dawo, M.I.; Sanders, F.E.; Pilbeam, D.J. Yield, yield components and plant architecture in the F3 generation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) derived from a cross between the determinate cultivar “Prelude” and an indeterminate landrace. *Euphytica* **2007**, *156*, 77–87.
90. De Oliveira Silva, M.B.; De Carvalho, A.J.; De Souza David, A.M.S.; Aspiazú, I.; Alves, É.E.; De Souza Carneiro, J.E.; Brito, O.G.; De Souza, A.A. Technological quality of grain of common bean genotypes of the black commercial class. *Rev. Bras. Ciências Agrar.* **2019**, *14*, 1–8.
91. De Ponti, T.; Rijk, B.; van Ittersum, M.K. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agric. Syst.* **2012**, *108*, 1–9.
92. De Souza Araújo, D.F.; Da Silva, A.M.R.B.; De Andrade Lima, L.L.; Da Silva Vasconcelos, M.A.; Andrade, S.A.C.; Asfora Sarubbo, L. The concentration of minerals and physicochemical contaminants in conventional and organic vegetables. *Food Control* **2014**, *44*, 242–248.
93. de Steckling, S.M.; Ribeiro, N.D.; Arns, F.D.; Mezzomo, H.C.; Possobom, M.T.D.F. Genetic diversity and selection of common bean lines based on technological quality and biofortification. *Genet. Mol. Res.* **2017**, *16*.
94. de Toledo-Souza, E.D.; da Silveira, P.M.; Café-Filho, A.C.; Lobo Junior, M. *Fusarium* wilt incidence and common bean yield according to the preceding crop and the soil tillage system. *Pesqui. Agropecu. Bras.* **2012**, *47*, 1031–1037.
95. del Cerro, P.; Rolla-Santos, A.A.P.; Gomes, D.F.; Marks, B.B.; Pérez-Montaña, F.; Rodríguez-Carvajal, M.Á.; Nakatani, A.S.; Gil-Serrano, A.; Megías, M.; Ollero, F.J.; Hugria, M. Regulatory NodD1 and NodD2 genes of *Rhizobium tropici* strain CIAT 899 and their roles in the early stages of molecular signaling and host-legume nodulation. *BMC Genom.* **2015**, *16*, 1–13.
96. Denton, M.D.; Pearce, D.J.; Peoples, M.B. Nitrogen contributions from faba bean (*Vicia faba* L.) reliant on soil rhizobia or inoculation. *Plant Soil* **2012**, *365*, 363–374
97. Desoky, E.S.M.; Ibrahim, S.A.; Merwad, A.R.M. Mitigation of salinity stress effects on growth, physio-chemical parameters and yield of snapbean (*Phaseolus vulgaris* l.) by exogenous application of glycine betaine. *Int. Lett. Nat. Sci.* **2019**, *76*, 60–71.
98. Di Prado, P.R.C.; Faria, L.C.; Souza, T.L.P.O.; Melo, L.C.; Melo, P.G.S.; Pereira, H.S. Genetic control and selection of common bean parents and superior segregant populations based on high iron and zinc contents, seed yield and 100-seed weight. *Genet. Mol. Res.* **2019**, *18*, gmr18146.
99. Dias, P.A.S.; Almeida, D.V.; Melo, P.G.S.; Pereira, H.S.; Melo, L.C. Effectiveness of breeding selection for grain quality in common bean. *Crop Sci.* **2021**, *61*, 1127–1140.

100. Dickson, R.W.; Fisher, P.R.; Argo, W.R.; Jacques, D.J.; Sartain, J.B.; Trenholm, L.E.; Yeager, T.H. Solution ammonium: nitrate ratio and cation/anion uptake affect acidity or basicity with floriculture species in hydroponics. *Sci. Hortic.* **2016**, *200*, 36–44.
101. DiPaola, J.M.; Beard, J.B. Physiological effects of temperature stress. *Am. Soc. Agron.* **1992**, *32*, 231–267.
102. do Silva, A.N.; Ramos, M.L.G.; Ribeiro, W.Q.; de Alencar, E.R.; da Silva, P.C.; de Lima, C.A.; Vinson, C.C.; Silva, M.A.V. Water stress alters physical and chemical quality in grains of common bean, triticale and wheat. *Agric. Water Manag.* **2020**, *231*, 106023.
103. dos Santos Sousa, W.; Soratto, R.P.; Peixoto, D.S.; Campos, T.S.; da Silva, M.B.; Souza, A.G.V.; Teixeira, I.R.; Gitari, H.I. Effects of rhizobium inoculum compared with mineral nitrogen fertilizer on nodulation and seed yield of common bean. A meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* **2022**, *42*, 1–19.
104. Dua, V.K.; Kumar, S.; Jatav, M.K. Effect of nitrogen application to intercrops on yield, competition, nutrient use efficiency and economics in potato (*Solanum tuberosum* L.) + french bean (*Phaseolus vulgaris* L.) system in north-western Hills of India. *Legum. Res.* **2017**, *40*, 698–703.
105. Dusabumuremyi, P.; Niyibigira, C.; Mashingaidze, A.B. Narrow row planting increases yield and suppresses weeds in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in a semi-arid agro-ecology of Nyagatare, Rwanda. *Crop Prot.* **2014**, *64*, 13–18.
106. Efetha, A.; Harms, T.; Bandara, M. Irrigation management practices for maximizing seed yield and water use efficiency of Othello dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in southern Alberta, Canada. *Irrig. Sci.* **2010**, *29*, 103–113.
107. Efstathiadou, E., Savvas, D., & Tampakaki, A. P. Genetic diversity and phylogeny of indigenous rhizobia nodulating faba bean (*Vicia faba* L.) in Greece. *Syst. Appl. Microbiol.* **2020**, *43*, 126149.
108. Efstathiadou, E.; Ntatsi, G.; Savvas, D.; Tampakaki, A.P. Genetic characterization at the species and symbiovar level of indigenous rhizobial isolates nodulating *Phaseolus vulgaris* in Greece. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 8674.
109. Elkhabit, H.A. Growth and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in response to rhizobium inoculation, nitrogen and molybdenum fertilization. *Alex. Sci. Exch.* **2009**, *30*, 319–332
110. Elkoca, E.; Turan, M.; Donmez, M.F. Effects of single, dual and triple inoculations with *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium* and *Rhizobium leguminosarum* bv. *phaseoli* on nodulation, nutrient uptake, yield and yield parameters of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.cv. 'Elkoca-05'). *J. Plant Nutr.* **2010**, *33*, 2104–2119.
111. Ellis, M.A.; Galvez, G.E.; Sinclair, J. Effect of foliar applications of systemic fungicides and late harvest on seed quality of dry bean (*Phaseolus vulgaris*). *Plant Dis. Rep.* **1976**, *60*, 1073–1076.
112. El-Mohamedy, R.S.R.; Shafeek, M.R.; El-Samad, E.E.D.H.A.; Salama, D.M.; Rizk, F.A. Field application of plant resistance inducers (PRIs) to control important root rot diseases and improvement growth and yield of green bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Aust. J. Crop Sci.* **2017**, *11*, 496–505.

113. El-Noemani, A.A.; Aboellil, A.A.A.; Dewedar, O.M. Influence of irrigation systems and water treatments on growth, yield, quality and water use efficiency of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. *Int. J. ChemTech Res.* **2015**, *8*, 248–258.
114. Escribano, M.R.; Santalla, M.; De Ron, A.M. Genetic diversity in pod and seed quality traits of common bean populations from northwestern Spain. *Euphytica* **1997**, *93*, 71–81.
115. Esmaeilzadeh, S.; Aminpanah, H. Effects of planting date and spatial arrangement on common bean (*Phaseolus vulgaris*) yield under weed-free and weedy conditions. *Planta Daninha* **2015**, *33*, 425–432.
116. Etminani, A.; Mohammadi, K.; Saberli, S.F. Effect of organic and inorganic amendments on growth indices and seed yield of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in competition with *Amaranthus retroflexus*. *J. Plant Nutr.* **2021**, *44*, 421–437.
117. EU. Regulation of the European parliament and of the Council laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003. *Off. J. Eur. Union* **2019**, *L170*, 1–114.
118. Fageria, N.K.; Santos, A.B. Yield physiology of dry bean. *J. Plant Nutr.* **2008**, *31*, 983–1004.
119. Faller, A.L.K.; Fialho, E. The antioxidant capacity and polyphenol content of organic and conventional retail vegetables after domestic cooking. *Food Res. Int.* **2009**, *42*, 210–215.
120. Farquhar, G.; Ehleringer, J.R.; Hubick, K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **1989**, *40*, 503–537.
121. Farquhar, G.D.; Richards, R.A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Funct. Plant Biol.* **1984**, *11*, 539–552.
122. Fatumah, N.; Tilahun, S.A.; Mohammed, S. Water use efficiency, grain yield, and economic benefits of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under four soil tillage systems in Mukono District, Uganda. *Heliyon* **2021**, *7*, e06308.
123. Feizollah, J.; Aminpanah, H. Effects of planting distance and weeding regime on green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth and yield. *Rev. Fac. Agron.* **2016**, *33*, 325–345.
124. Fernández-Luqueño, F.; Reyes-Varela, V.; Martínez-Suárez, C.; Salomón-Hernández, G.; Yáñez-Meneses, J.; Ceballos-Ramírez, J.M.; Dendooven, L. Effect of different nitrogen sources on plant characteristics and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 396–403.
125. Fetahu, S.; Rusinovci, I.; Aliu, S.; Zeka, D.; Beluli, A. Genetic diversity of common bean landraces on seed imbibition and some quality traits. *Acta Hort.* **2021**, *1320*, 71–78.
126. Filipini, L.D.; Pilatti, F.K.; Meyer, E.; Ventura, B.S.; Lourenzi, C.R.; Lovato, P.E. Application of *Azospirillum* on seeds and leaves, associated with *Rhizobium* inoculation, increases growth and yield of common bean. *Arch. Microbiol.* **2021**, *203*, 1033–1038.
127. Franco, A.A.; Munns, D.N. Nodulation and growth of *Phaseolus vulgaris* in solution culture. *Plant Soil* **1982**, *66*, 149–160.

128. Fu, Q.A.; Boutton, T.W.; Ehleringer, J.R.; Flagler, R.B. Environmental and developmental effects on carbon isotope discrimination by two species of *Phaseolus*. *Stable Isot. Plant Carbon-water Relations* **1993**, 297–309.
129. Garcia, P.L.; Sermarini, R.A.; Trivelin, P.C.O. Nitrogen fertilization management with blends of controlled-release and conventional urea affects common bean growth and yield during mild winters in Brazil. *Agronomy* **2020**, *10*, 1935.
130. Gatsios, A.; Ntatsi, G.; Celi, L.; Said-Pullicino, D.; Tampakaki, A.; Giannakou, I.; Savvas, D. Nitrogen nutrition optimization in organic greenhouse tomato through the use of legume plants as green manure or intercrops. *Agronomy* **2019**, *9*, 766.
131. Gatsios, A.; Ntatsi, G.; Celi, L.; Said-Pullicino, D.; Tampakaki, A.; Savvas, D. Impact of legumes as a pre-crop on nitrogen nutrition and yield in organic greenhouse tomato. *Plants* **2021**, *10*, 468.
132. George, T.; Singleton, P.W. Nitrogen assimilation traits and dinitrogen fixation in soybean and common bean. *Agron. J.* **1992**, *84*, 1020–1028.
133. Ghassemi-Golezani, K.; Mardfar, R.A. Effects of limited irrigation on growth and grain yield of common bean. *J. Plant Sci.* **2008**, *3*, 230–235.
134. Ghimire, R.; Norton, U.; Bista, P.; Obour, A.K.; Norton, J.B. Soil organic matter, greenhouse gases and net global warming potential of irrigated conventional, reduced-tillage and organic cropping systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2017**, *107*, 49–62.
135. Głodowska, M.; Wozniak, M.; Głodowska, M.; Wozniak, M. Changes in soil microbial activity and community composition as a result of selected agricultural practices. *Agric. Sci.* **2019**, *10*, 330–351.
136. Głowacka, A. The effects of strip cropping and weed control methods on yield and yield components of dent maize, common bean and spring barley. *Polish J. Nat. Sci.* **2013**, *28*, 389–408.
137. Golparvar, A.R. Multivariate analysis and determination of the best indirect selection criteria to genetic improvement the biological nitrogen fixation ability in common bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.). *Genetika* **2008**, *44*, 279–284.
138. Golparvar, A.R.; Ghasemi, P.A. Indirect selection for genetic improvement of seed yield and biological nitrogen fixation in Iranian common bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.). *Pakistan J. Biol. Sci.* **2006**, *9*, 2097–2101.
139. Gómez, O.J.; Frankow-Lindberg, B.E. Yield formation in Nicaraguan landraces of common bean compared to bred cultivars. *J. Agric. Sci.* **2005**, *143*, 369–375.
140. González De Mejía, E.; Martínez-Resendiz, V.; Castaño-Tostado, E.; Loarca-Piña, G. Effect of drought on polyamine metabolism, yield, protein content and in vitro protein digestibility in tepary (*Phaseolus acutifolius*) and common (*Phaseolus vulgaris*) bean seeds. *J. Sci. Food Agric.* **2003**, *83*, 1022–1030.
141. Guida Dos Santos, M.; Ribeiro, R.V.; Ferraz De Oliveira, R.; Pimentel, C. Gas exchange and yield response to foliar phosphorus application in *Phaseolus vulgaris* L. under drought. *Braz. J. Plant Physiol.* **2004**, *16*, 171–179.
142. Gunnabo, A.H.; Geurts, R.; Wolde-meskel, E.; Degefu, T.; Giller, K.E.; van Heerwaarden, J. Genetic interaction studies re-veal superior performance of *Rhizobium tropici* CIAT899 on a range of diverse East African common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Appl. Environ. Microbiol.* **2019**, 85.

143. Guo, S., Shen, Q., & Brueck, H. (2007). Effects of local nitrogen supply on water uptake of bean plants in a split root system. *J. Integr. Plant Biol.* **2007**, *49*, 472-480.
144. Gutiérrez-Moreno, K.; Ruocco, M.; Monti, M.M.; de la Vega, O.M.; Heil, M. Context-dependent effects of trichoderma seed inoculation on anthracnose disease and seed yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.): Ambient conditions override cultivar-specific differences. *Plants* **2021**, *10*, 1739.
145. Guzmán-Maldonado, S.H.; Acosta-Gallegos, J.; Paredes-López, O. Protein and mineral content of a novel collection of wild and weedy common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Sci. Food Agric.* **2000**, *80*, 1874–1881.
146. Habinshuti, S.J.; Maseko, S.T.; Dakora, F.D. Inhibition of n₂ fixation by n fertilization of common bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) plants grown on fields of farmers in the eastern cape of South Africa, measured using ¹⁵N natural abundance and tissue ureide analysis. *Front. Agron.* **2021**, *3*, 52.
147. Hallmann, E. The Influence of organic and conventional cultivation systems on the nutritional value and content of bioactive compounds in selected tomato types. *J. Food Compos. Anal.* **2012**, *92*, 2840–2848.
148. Hamblin, J. Effect of environment, seed size and competitive ability on yield and survival of *Phaseolus vulgaris* (L.) genotypes in mixtures. *Euphytica* **1975**, *24*, 435–445.
149. Herencia, J.F.; García-Galavís, P.A.; Dorado, J.A.R.; Maqueda, C. Comparison of nutritional quality of the crops grown in an organic and conventional fertilized soil. *Sci. Hortic.* **2011**, *129*, 882–888.
150. Herridge, D.F.; Robertson, M.J.; Cocks, B.; Peoples, M.B.; Holland, J.F.; Heuke, L. Low nodulation and nitrogen fixation of mungbean reduce biomass and grain yields. *Aust. J. Exp. Agric.* **2005**, *45*, 269.
151. Hosseini, S.M.; Shahrokhnia, M.A. The effect of irrigation interval on yield, yield components and water productivity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars in a semi-arid area. *Ann. Biol.* **2020**, *36*, 56–61. [[Google Scholar](#)]
152. Hungria, M.; Barradas, C.A.A.; Wallsgrove, R.M. Nitrogen fixation, assimilation and transport during the initial growth stage of *Phaseolus vulgaris* L. *J. Exp. Bot.* **1991**, *42*, 839–844.
153. Hungria, M.; Campo, R.J.; Mendes, I.C. Benefits of inoculation of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) crop with efficient and competitive *Rhizobium tropici* strains. *Biol. Fertil. Soils* **2003**, *39*, 88–93.
154. Hungria, M.; Franchini, J.C.; Campo, R.J.; Crispino, C.C.; Moraes, J.Z.; Sibaldelli, R.N.R.; Mendes, I.C.; Arihara, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. *Can. J. Plant Sci.* **2006**, *86*, 927–939.
155. Hungria, M.; Thomas, R.J. Effects of cotyledons and nitrate on the nitrogen assimilation of *Phaseolus vulgaris*. *MIRCEN J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* **1987**, *3*, 411–419.
156. Ibrahim, E.A.; Ramadan, W.A. Effect of zinc foliar spray alone and combined with humic acid or/and chitosan on growth, nutrient elements content and yield of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants sown at different dates. *Sci. Hortic.* **2015**, *184*, 101–105.

157. Ibrahim, S.; Desoky, E.; Elrys, A. Influencing of water stress and micronutrients on physio-chemical attributes, yield and anatomical features of common bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *Egypt. J. Agron.* **2017**, *39*, 251–264.
158. Immer, A.M.; Fischer, R.A.; Joshue, K.S. Effects of plant density and thinning on high-yielding dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in Mexico. *Exp. Agric.* **1977**, *13*, 325–335.
159. Iqbal, M.M.; Akhter, J.; Mohammad, W.; Shah, S.M.; Nawaz, H.; Mahmood, K. Effect of tillage and fertilizer levels on wheat yield, nitrogen uptake and their correlation with carbon isotope discrimination under rainfed conditions in North-West Pakistan. *Soil Till. Res.* **2005**, *80*, 47–57.
160. Ishag, H.M.; Ayoub, A.T. Effect of sowing date and soil type on yield, yield components and survival of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Agric. Sci.* **1974**, *82*, 343–347.
161. Jalal, A.; Galindo, F.S.; Boleta, E.H.M.; da Silva Oliveira, C.E.; Dos Reis, A.R.; Nogueira, T.A.R.; Moretti Neto, M.J.; Mortinho, E.S.; Fernandes, G.C.; Teixeira Filho, M.C.M. Common bean yield and zinc use efficiency in association with diazotrophic bacteria co-inoculations. *Agronomy* **2021**, *11*, 959.
162. Jan, S.; Khan, M.R.; Rashid, U.; Bokhari, J. Assessment of antioxidant potential, total phenolics and flavonoids of different solvent fractions of *monotheca buxifolia* fruit. *osong public heal. Res. Perspect.* **2013**, *4*, 246–254.
163. Jensen, E.S.; Peoples, M.B.; Hauggaard-Nielsen, H. Faba bean in cropping systems. *Field Crops Res.* **2010**, *115*, 203–216.
164. Jiang, Y.; MacLean, D.E.; Perry, G.E.; Marsolais, F.; Hill, B.; Pauls, K.P. Evaluation of beneficial and inhibitory effects of ni-trate on nodulation and nitrogen fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Legum. Sci.* **2020**, *2*, e45.
165. Jifon, J. L., & Wolfe, D. W. Photosynthetic acclimation to elevated CO₂ in *Phaseolus vulgaris* L. is altered by growth response to nitrogen supply. *Glob. Change Biol.* **2002**, *8*, 1018-1027.
166. Junior, C.F.D.S.; Correoso, C.C.; Copacheski, M.; Boff, P.; Boff, M.I.C. High dynamic dilutions and genetic variability to phytosanitary management and yield of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Aust. J. Crop Sci.* **2021**, *15*, 821–826.
167. Junk, G.; Svec, H.J. The absolute abundance of the nitrogen isotopes in the atmosphere and compressed gas from various sources. *Geochim. Cosmochim. Acta* **1958**, *14*, 234–243.
168. Kapoulas, N.; Ilić, Z.S.; Durovka, M.; Trajković, R.; Milenković, L. Effect of organic and conventional production practices on nutritional value and antioxidant activity of tomatoes. *Afr. J. Biotechnol.* **2011**, *10*, 15938–15945.
169. Karasu, A.; Oz, M.; Dogan, R. The effect of bacterial inoculation and different nitrogen doses on yield and yield components of some dwarf dry bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.). *Bulg. J. Agric. Sci.* **2011**, *17*, 296–305.
170. Karavidas, I.; Ntatsi, G.; Vougeleka, V.; Karkanis, A.; Ntanasi, T.; Saitanis, C.; Agathokleous, E.; Ropokis, A.; Sabatino, L.; Tran, F.; Iannetta, P.P.M.; Savvas, D. Agronomic practices to increase the yield and quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A systematic review. *Agronomy* **2022**, *12*, 271.

171. Karel, A.K.; Mghogho, R.M.K. Effects of insecticide and plant populations on the insect pests and yield of common bean *Phaseolus vulgaris* (L.). *J. Econ. Entomol.* **1985**, *78*, 917–921.
172. Kargiotidou, A.; Papathanasiou, F.; Baxevanos, D.; Vlachostergios, D.N.; Stefanou, S.; Papadopoulos, I. Yield and stability for agronomic and seed quality traits of common bean genotypes under Mediterranean conditions. *Legum. Res.* **2019**, *42*, 308–313.
173. Karungi, J.; Ekbom, B.; Kyamanywa, S. Effects of organic versus conventional fertilizers on insect pests, natural enemies and yield of *Phaseolus vulgaris* L. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2006**, *115*, 51–55.
174. Katuuramu, D.N.; Luyima, G.B.; Nkalubo, S.T.; Wiesinger, J.A.; Kelly, J.D.; Cichy, K.A. On-farm multi-location evaluation of genotype by environment interactions for seed yield and cooking time in common bean. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 3628.
175. Kawaka, F.; Dida, M.; Opala, P.; Ombori, O.; Maingi, J.; Amoding, A.; Muoma, J. Effect of nitrogen sources on the yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in western Kenya. *J. Plant Nutr.* **2018**, *41*, 1652–1661.
176. Kawaka, F.; Dida, M.M.; Opala, P.A.; Ombori, O.; Maingi, J.; Osoro, N.; Muthini, M.; Amoding, A.; Mukaminega, D.; Muoma, J. Symbiotic efficiency of native rhizobia nodulating common bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) in soils of Western Kenya . *Int. Sch. Res. Not.* **2014**, *2014*, 1–8.
177. Kawaka, F.; Makonde, H.; Dida, M.; Opala, P.; Ombori, O.; Maingi, J.; Muoma, J. Genetic diversity of symbiotic bacteria nodulating common bean (*Phaseolus vulgaris*) in Western Kenya. *PLoS One* **2018**, *13*, e0207403.
178. Keeney, D.R.; Nelson, D.W. Nitrogen-inorganic farms. In *Methods of Soil Analysis*; Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., Eds.; American Society of Agronomy: Madison, WI, USA, **1982**, 643–698.
179. Kelly, J.D.; Kolkman, J.M.; Schneider, K. Breeding for yield in dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Euphytica* **1998**, *102*, 343–356.
180. Khaber, M.S.; Aboohanah, M.A. Response of bean plant *Phaseolus vulgaris* L. to spray with hornwort extract and nano potassium on growth and yield parameters. *Plant Arch.* **2020**, *20*, 946–950.
181. Knight, J.D.; Verhees, F.; Van Kessel, C.; Slinkard, A.E. Does carbon isotope discrimination correlate with biological nitrogen fixation? *Plant Soil* **1993**, *153*, 151–153.
182. Kocira, A.; Lamorska, J.; Kornas, R.; Nowosad, N.; Tomaszewska, M.; Leszczyńska, D.; Kozłowicz, K.; Tabor, S. Changes in biochemistry and yield in response to biostimulants applied in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomy* **2020b**, *10*, 189.
183. Kocira, S.; Szparaga, A.; Findura, P.; Treder, K. Modification of yield and fiber fractions biosynthesis in *Phaseolus vulgaris* by treatment with biostimulants containing amino acids and seaweed extract. *Agronomy* **2020a**, *10*, 1338.
184. Kontopoulou, C.K.; Bilalis, D.; Pappa, V.A.; Rees, R.M.; Savvas, D. Effects of organic farming practices and salinity on yield and greenhouse gas emissions from a common bean crop. *Sci. Hortic.* **2015a**, *183*, 48–57.

185. Kontopoulou, C.K.; Giagkou, S.; Stathi, E.; Savvas, D.; Iannetta, P.P.M. Responses of hydroponically grown common bean fed with nitrogen-free nutrient solution to root inoculation with N₂-fixing bacteria. *HortScience* **2015b**, *50*, 597–602.
186. Kontopoulou, C.-K.; Liasis, E.; Iannetta, P.P.; Tampakaki, A.; Savvas, D. Impact of rhizobial inoculation and reduced N supply on biomass production and biological N₂ fixation in common bean grown hydroponically. *J. Sci. Food Agric.* **2017**, *97*, 4353–4361.
187. Koskey, G.; Mburu, S.W.; Njeru, E.M.; Kimiti, J.M.; Ombori, O.; Maingi, J.M. Potential of native rhizobia in enhancing nitrogen fixation and yields of climbing beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in contrasting environments of eastern Kenya. *Front. Plant Sci.* **2017**, *8*, 443.
188. Kouam, E.B.; Tsague-Zanfack, A.B. Effect of plant density on growth and yield attributes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Not. Sci. Biol.* **2020**, *12*, 399–408.
189. Kouki, S.; L'taief, B.; Al-Qthanin, R.N.; Sifi, B. Impacts of *Rhizobium* strain Ar02 on the nodulation, growth, nitrogen (N₂) fixation rate and ion accumulation in *Phaseolus vulgaris* L. under salt stress. *Legum. Res.* **2021**, *44*, 1521–1528.
190. Kumar, K.; Goh, K.M. Crop Residues and Management Practices: Effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. *Adv. Agron.* **1999**, *68*, 197–319.
191. Kumar, R.; Deka, B.C.; Kumawat, N.; Thirugnanavel, A. Effect of integrated nutrition on productivity, profitability and quality of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Indian J. Agric. Sci.* **2020a**, *90*, 431–435.
192. Kumar, V.; Kumar, P.; Khan, A. Optimization of PGPR and silicon fertilization using response surface methodology for enhanced growth, yield and biochemical parameters of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under saline stress. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* **2020**, *23*, 101463.
193. Kundu, M.; Chakraborty, P.K.; Mukherjee, A.; Sarkar, S. Influence of irrigation frequencies and phosphate fertilization on actual evapotranspiration rate, yield and water use pattern of rajmash (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agric. Water Manag.* **2008**, *95*, 383–390.
194. Lairon, D. Nutritional quality and safety of organic food. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2010**, *30*, 33–41.
195. Le, L.T.T.; Kotula, L.; Siddique, K.H.M.; Colmer, T.D. Na⁺ and/or Cl⁻ toxicities determine salt sensitivity in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), mungbean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek), cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, *22*, 1909.
196. Leidi, E.O.; Rodriguez-Navaro, D.N. Nitrogen and phosphorus availability limit N₂ fixation in bean. *New Phytol.* **2000**, *147*, 337–346
197. Lioi, L.; Piergiovanni, A.R. Genetic diversity and seed quality of the Badda common Bean from sicily (Italy). *Diversity* **2013**, *5*, 843–855.
198. Lizana, C.; Wentworth, M.; Martinez, J.P.; Villegas, D.; Meneses, R.; Murchie, E.H.; Pastenes, C.; Lercari, B.; Vernieri, P.; Horton, P.; et al. Differential adaptation of two

- varieties of common bean to abiotic stress I. Effects of drought on yield and photosynthesis. *J. Exp. Bot.* **2006**, *57*, 685–697.
199. López-Pedrouso, M.; Bernal, J.; Franco, D.; Zapata, C. Evaluating two-dimensional electrophoresis profiles of the protein phaseolin as markers of genetic differentiation and seed protein quality in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Agric. Food Chem.* **2014**, *62*, 7200–7208.
 200. Love, B.G.; Askin, D.C.; McKenzie, B.A. Effect of shelter, irrigation, and plant population on yield and yield components of navy beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *N. Z. J. Exp. Agric.* **1988**, *16*, 231–237.
 201. Lucrecia, M.; Ramos, G.; Boddey, R.M. Yield and nodulation of *Phaseolus vulgaris* and the competitiveness of an introduced *Rhizobium* strain: Effects of lime, mulch and repeated cropping. *Soil Biol. Biochem.* **1987**, *19*, 171–177.
 202. Lyngdoh, Y.A.; Thapa, U.; Shadap, A.; Singh, J.; Tomar, B.S. Studies on genetic variability and character association for yield and yield related traits in french bean *Phaseolus vulgaris* L.). *Legum. Res.* **2018**, *41*, 810–815.
 203. Magalhaes, A.C.; Montojos, J.C.; Miyasaka, S. Effect of dry organic matter on growth and yield of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Exp. Agric.* **1971**, *7*, 137–143.
 204. Maggio, A.; Carillo, P.; Bulmetti, G.S.; Fuggi, A.; Barbieri, G.; De Pascale, S. Potato yield and metabolic profiling under conventional and organic farming. *Eur. J. Agron.* **2008**, *28*, 343–350.
 205. Maggio, A.; De Pascale, S.; Paradiso, R.; Barbieri, G. Quality and nutritional value of vegetables from organic and conventional farming. *Sci. Hortic.* **2013**, *164*, 532–539.
 206. Magkos, F.; Arvaniti, F.; Zampelas, A. Organic food: nutritious food or food for thought? a review of the evidence. *Int. J. Food Sci Nutr.* **2009**, *54*, 357–371.
 207. Martínez-Romero, E. Diversity of *Rhizobium-Phaseolus vulgaris* symbiosis: Overview and perspectives. *Plant Soil* **2003**, *252*, 11–23.
 208. Martini, E.A.; Buyer, J.S.; Bryant, D.C.; Hartz, T.K.; Denison, R.F. Yield increases during the organic transition: Improving soil quality or increasing experience? *Field Crops Res.* **2004**, *86*, 255–266.
 209. Massa, N.; Cesaro, P.; Todeschini, V.; Capraro, J.; Scarafoni, A.; Cantamessa, S.; Copetta, A.; Anastasia, F.; Gamalero, E.; Lingua, G.; et al. Selected autochthonous rhizobia, applied in combination with AM fungi, improve seed quality of common bean cultivated in reduced fertilization condition. *Appl. Soil Ecol.* **2020**, *148*, 103507.
 210. Mastrodomenico, A.T.; Purcell, L.C.; Andy King, C. The response and recovery of nitrogen fixation activity in soybean to water deficit at different reproductive developmental stages. *Environ. Exp. Bot.* **2013**, *85*, 16–21.
 211. Mastura, H.; Hasnah, Y.; Dang, H. Total phenolic content and antioxidant capacity of beans: organic vs inorganic. *Int. Food Res. J.* **2017**, *24*, 510–517.
 212. Mathobo, R.; Marais, D.; Steyn, J.M. The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agric. Water Manag.* **2017**, *180*, 118–125.
 213. Meemken, E.M.; Qaim, M. Organic agriculture, food security, and the environment. *Annu. Rev. Resour. Econ.* **2018**, *10*, 39–63.

214. Meena, J.; Dhillon, T.S.; Meena, A.; Singh, K.K. Studies on performance of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for yield and quality traits under protected conditions. *Plant Arch.* **2017**, *17*, 615–619.
215. Mehlich, A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **1984**, *15*, 1409–1416.
216. Mekbib, F. Yield stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Euphytica* **2003**, *130*, 147–153.
217. Mekonnen, G. Effect of pre emergence herbicides and their combinations on weeds infestation, yield components and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) at Guraferda and Menitshashaworeda, South West Ethiopia. *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* **2020**, *21*, 12–23.
218. Mongi, R.; Tongoona, P.; Shimelis, H.; Sibiya, J. Agronomic performance and economics of yield loss associated with angular leaf spot disease of common bean in the southern highlands of Tanzania. *Plant Dis.* **2018**, *102*, 85–90.
219. Moreira, A.; Moraes, L.A.C. Yield, nutritional status and soil fertility cultivated with common bean in response to amino-acids foliar application. *J. Plant Nutr.* **2017**, *40*, 344–351.
220. Morugán-Coronado, A.; Linares, C.; Gómez-López, M.D.; Faz, Á.; Zornoza, R. The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. *Agric. Syst.* **2020**, *178*, 102736.
221. Mostasso, L.; Mostasso, F.L.; Dias, B.G.; Vargas, M.A.T.; Hungria, M. selection of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobial strains for the Brazilian Cerrados. *F. Crop. Res.* **2002**, *73*, 121–132.
222. Mouhouche, B.; Ruget, F.; Delécolle, R. Effects of water stress applied at different phenological phases on yield components of dwarf bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomie* **1998**, *18*, 197–205.
223. Mulas, D.; Seco, V.; Casquero, P.A.; Velázquez, E.; González-Andrés, F. Inoculation with indigenous rhizobium strains increases yields of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in northern Spain, although its efficiency is affected by the tillage system. *Symbiosis* **2015**, *67*, 113–124.
224. Müller, S.; Pereira, P.A.A.; Martin, P. Effect of different levels of mineral nitrogen on nodulation and N₂ fixation of two cultivars of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Soil* **1993**, *152*, 139–143.
225. Murphy, J.; Riley, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* **1962**, *27*, 31–36.
226. Musana, F.; Rucamumihigo, F.; Nirere, D.; Mbaraka, S. Growth and yield performance of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as influenced by plant density at Nyagatare, East Rwanda. *J. Ayurveda Integr. Med.* **2020**, *20*, 16249–16261.
227. Musse, Z.A.; Yoseph Samago, T.; Bisher, H.M. Effect of liquid bioslurry and nitrogen rates on soil physico-chemical properties and quality of green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) at Hawassa Southern Ethiopia. *J. Plant Interact.* **2020**, *15*, 207–212.

228. Nascente, A.S.; Carvalho, M.d.C.S.; Melo, L.C.; Rosa, P.H. Nitrogen management effects on soil mineral nitrogen, plant nutrition and yield of super early cycle common bean genotype. *Acta Sci.-Agron.* **2017**, *39*, 369–378.
229. Naseri, B. Root rot of common bean in Zanjan, Iran: Major pathogens and yield loss estimates. *Australas. Plant Pathol.* **2008**, *37*, 546–551.
230. Ndakidemi, P.A.; Dakora, F.D.; Nkonya, E.M.; Ringo, D.; Mansoor, H. Yield and economic benefits of common bean (*Phaseolus vulgaris*) and soybean (*Glycine max*) inoculation in northern Tanzania. *Aust. J. Exp. Agric.* **2006**, *46*, 571–577.
231. Ndlangamandla, V.V.; Ntuli, N.R. Variation on growth and yield traits among selected *Phaseolus vulgaris* landraces in kwazulu-natal, South Africa. *Biodiversitas* **2019**, *20*, 1597–1605.
232. Ndlovu, T.J.; Mariga, I.K.; Mafeo, T.P. Influence of *Rhizobium phaseoli* inoculation and phosphorus application on nodulation and yield of two dry bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars. *Int. J. Agric. Biol.* **2017**, *19*, 1332–1338.
233. Neeraj; Singh, K. Organic amendments to soil inoculated arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas fluorescens* treatments reduce the development of root-rot disease and enhance the yield of *Phaseolus vulgaris* L. *Eur. J. Soil Biol.* **2011**, *47*, 288–295.
234. Negi, S.; Bharat, N.K.; Kumar, M. Effect of seed bioprimering with indigenous pgpr, rhizobia and trichoderma sp. On growth, seed yield and incidence of diseases in french bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Legum. Res.* **2021**, *44*, 593–601.
235. Ngadze, E.; Mashingaidze, A.B.; Sibiya, J. Weed density and biomass are reduced and plant growth and seed yield increased in common bean after solarisation with clear and black plastic. *S. Afr. J. Plant Soil* **2018**, *35*, 223–230.
236. Nicoletto, C.; Zanin, G.; Sambo, P.; Dalla Costa, L. Quality assessment of typical common bean genotypes cultivated in temperate climate conditions and different growth locations. *Sci. Hortic.* **2019**, *256*, 108599.
237. Nienhuis, J.; Singh, S.P. Genetics of seed yield and its components in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) of Middle-American origin: II. Genetic variance, heritability and expected response from selection. *Plant Breed.* **1988**, *101*, 155–163.
238. Nimbalkar, C.A.; Baviskar, A.P.; Navale, P.A. Genotype x environment interaction effect on seed yield of french bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Indian J. Agric. Sci.* **2004**, *74*, 366–369.
239. Niu, B.; Wang, W.; Yuan, Z.; Sederoff, R.R.; Sederoff, H.; Chiang, V.L.; Borriss, R. Microbial interactions within multiple-strain biological control agents impact soil-borne plant disease. *Front. Microbiol.* **2020**, *11*, 2452. [
240. Nkhata, W.; Shimelis, H.; Melis, R.; Chirwa, R.; Mzengeza, T.; Mathew, I.; Shayanowako, A. Combining ability analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for resistance to bean fly (*Ophiomyia* spp.), and grain yield and component traits. *Euphytica* **2021**, *217*, 93.
241. Nouralinezhad, A.; Babazadeh, H.; Amiri, E.; Sedghi, H. Effects of irrigation and nitrogen on yield and water productivity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L.) in north of Iran. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2018**, *16*, 3113–3129.

242. Ntatsi, G.; Karkanis, A.; Tran, F.; Savvas, D.; Iannetta, P.P.M. Which agronomic practices increase the yield and quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)? A systematic review protocol. *Agronomy* **2020**, *10*, 1008.
243. Oberson, A.; Frossard, E. Phosphorus management for organic agriculture. *Phosphorus Agric. Environ.* **2015**, 761–779.
244. Ojwang, P.P.O.; Melis, R.; Githiri, M.S.; Songa, J.M. Genetic analysis for resistance to bean fly (*Ophiomyia phaseoli*) and seed yield among common bean genotypes in a semi-arid environment. *Field Crop. Res.* **2011**, *120*, 223–229.
245. Okasha, E.M.; El-Metwally, I.M.; Taha, N.M.; Darwesh, R.K. Impact of drip and gated pipe irrigation systems, irrigation intervals on yield, productivity of irrigation water and quality of two common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars in heavy clay soil. *Egypt. J. Chem.* **2020**, *63*, 5103–5116.
246. Okii, D.; Mukankusi, C.; Sebuliba, S.; Tukamuhabwa, P.; Tusiime, G.; Talwana, H.; Odong, T.; Namayanja, A.; Paparu, P.; Nkalubo, S.; et al. Genetic variation, heritability estimates and GXE effects on yield traits of Mesoamerican common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) germplasm in Uganda. *Plant Genet. Resour. Charact. Util.* **2018**, *16*, 237–248.
247. Ouma, E.W.; Asango, A.M.; Maingi, J.; Njeru, E.M. Elucidating the potential of native rhizobial isolates to improve biological nitrogen fixation and growth of common bean and soybean in smallholder farming systems of Kenya. *Int. J. Agron.* **2016**, 2016.
248. Ovacikli, E.; Tolay, I. Morpho-agronomic and cooking quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different nitrogen sources and nitrogen levels. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2020**, *18*, 8343–8354.
249. Øvsthus, I.; Breland, T.A.; Hagen, S.F.; Brandt, K.; Wold, A.-B.; Bengtsson, G.B.; Seljåsen, R. Effects of organic and waste-derived fertilizers on yield, nitrogen and glucosinolate contents, and sensory quality of broccoli (*Brassica oleracea* L. var.italica). *J. Agric. Food Chem.* **2015**, *63*, 10757–10767.
250. Ozaktan, H.; Ciftci, C.Y.; Uzun, S.; Uzrni, O.; Kaya, M. Effects of humic acid, microbiological fertilizer and phosphate rock on yield and yield components of field bean (*Phaseolus vulgaris*). *Fresenius Environ. Bull.* **2020**, *29*, 856–863.
251. Pacheco, R.S.; Boddey, R.M.; Alves, B.J.R.; de Brito Ferreira, E.P.; Straliootto, R.; Araújo, A.P. Differences in contribution of biological nitrogen fixation to yield performance of common bean cultivars as assessed by the ¹⁵N natural abundance technique. *Plant Soil* **2020**, *454*, 327–341.
252. Parmar, S.K.; Patel, R.A.; Patel, H.K. Role of irrigation and nitrogen levels on yield, nutrient content, uptake and economics of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under middle Gujarat condition. *J. Pure Appl. Microbiol.* **2016**, *10*, 657–662.
253. Parr, J.F.; Hornick, S.B.; Papendick, R.I. Soil quality: The foundation of a sustainable agriculture; U.S. Department of Agriculture: Washington, DC, USA, **1994**, 73–79.
254. Pastor-Bueis, R.; Jiménez-Gómez, A.; Barquero, M.; Mateos, P.F.; González-Andrés, F. Yield response of common bean to co-inoculation with *Rhizobium* and *Pseudomonas* endophytes and microscopic evidence of different colonised spaces inside the nodule. *Eur. J. Agron.* **2021**, *122*, 126187.

255. Patel, A.G.; Patel, B.S.; Patel, P.H. Effect of irrigation levels based on IW: CPE ratios and time of nitrogen application on yield and monetary return of frenchbean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Legum. Res.* **2010**, *33*, 42–45.
256. Patriquin, D.G. Biological husbandry and thenitrogen problem. *Biol. Agric. Horticulture* **1986**, *3*, 167–189.
257. Peña-Cabriales, J.J.; Castellanos, J.Z. Effects of water stress on N₂ fixation and grain yield of *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Soil* **1993**, *152*, 151–155.
258. Peña-Cabriales, J.J.; Grageda-Cabrera, O.A.; Kola, V.; Hardarson, G. Time course of N₂ fixation in common bean (*Phaseolus Vulgaris* L.). *Plant Soil* **1993**, *152*, 115–121.
259. Peoples, M.B.; Brockwell, J.; Herridge, D.F.; Rochester, I.J.; Alves, B.J.R.; Urquiaga, S.; Boddey, R.M.; Dakora, F.D.; Bhattarai, S.; Maskey, S.L.; et al. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* **2009**, *48*, 1–17.
260. Pereira, H.S.; Alvares, R.C.; De Cássia Silva, F.; De Faria, L.C.; Melo, L.C. Genetic, environmental and genotype x environment interaction effects on the common bean grain yield and commercial quality. *Semin. Agrar.* **2017**, *38*, 1241–1250.
261. Pereira, H.S.; Wendland, A.; Melo, L.C.; Del Peloso, M.J.; de Faria, L.C.; da Costa, J.G.C.; Nascente, A.S.; Díaz, J.L.C.; de Carvalho, H.W.L.; de Almeida, V.M.; et al. BRS notável: A medium-early-maturing, disease-resistant carioca common bean cultivar with high yield potential. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* **2012**, *12*, 220–223.
262. Pérez-Giménez, J.; Lodeiro, A.R. Two effects of combined nitrogen on the adhesion of rhizobium etli to bean roots. *Sym-biosis* **2013**, *59*, 157–163.
263. Petropoulos, S.A.; Fernandes, Â.; Plexida, S.; Chrysargyris, A.; Tzortzakis, N.; Barreira, J.C.M.; Barros, L.; Ferreira, I.C.F.R. Biostimulants application alleviates water stress effects on yield and chemical composition of greenhouse green bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomy* **2020**, *10*, 181.
264. Pieper, J.R.; Barrett, D.M. Effects of Organic and Conventional Production Systems on Quality and Nutritional Parameters of Processing Tomatoes. *J. Sci. Food Agric.* **2009**, *89*, 177–194.
265. Pirbalouti, A.G.; Allahdadi, I.; Akbari, G.A.; Golparvar, A.R.; Rostampoor, S.A. Effects of different strains of *Rhizobium leguminosarum* biovar phaseoli on yield and N₂ fixation rate of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Iranian cultivars. *Pak. J. Biol. Sci.* **2006a**, *9*, 1738–1743.
266. Pirbalouti, A.G.; Golparvar, A.R.; Rostampoor, S.A. Evaluation of seed yield and yield components of common bean Iranian cultivars for inoculation with four strains of *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*. *J. Agron.* **2006b**, *5*, 382–386.
267. Plans, M.; Simó, J.; Casañas, F.; Sabaté, J. Near-infrared spectroscopy analysis of seed coats of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): A potential tool for breeding and quality evaluation. *J. Agric. Food Chem.* **2012**, *60*, 706–712.
268. Polania, J.A.; Poschenrieder, C.; Beebe, S.; Rao, I.M. Effective use of water and increased dry matter partitioned to grain contribute to yield of common bean improved for drought resistance. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 660.
269. Poletine, J.P.; Gonçalves-Vidigal, M.C.; Coimbra, G.K.; Moiana, L.; Vidigal Filho, P.S.; Lacanallo, G.F.; de Lima Castro, S.A. Promising genotypes of common bean in

- relation to grain yield and resistance to anthracnose in Maringa and Umuarama counties. *J. Food Agric. Environ.* **2014**, *12*, 614–619.
270. Ponder, A.; Hallmann, E. The nutritional value and vitamin c content of different raspberry cultivars from organic and conventional production. *J. Food Compos. Anal.* **2020**, *87*, 103429.
 271. Popa, M.E.; Mitelut, A.C.; Popa, E.E.; Stan, A.; Popa, V.I. Organic Foods Contribution to Nutritional Quality and Value. *Trends Food Sci. Technol.* **2019**, *84*, 15–18.
 272. Prabhakar, M.; Hebbar, S.S.; Nair, A.K. Growth and yield of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under organic farming. *J. Appl. Hortic.* **2011**, *13*, 71–73.
 273. Pradhan, D.; Sinclair, T.R.; Alijani, K. Nitrogen Fixation Establishment during Initial Growth of Grain Legume Species. *J. Crop Improv.* 2017, *32*, 50–58.
 274. Raatz, B.; Mukankusi, C.; Lobaton, J.D.; Male, A.; Chisale, V.; Amsalu, B.; Fourie, D.; Mukamuhirwa, F.; Muimui, K.; Mutari, B.; et al. Analyses of African common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) germplasm using a SNP fingerprinting platform: Diversity, quality control and molecular breeding. *Genet. Resour. Crop Evol.* **2019**, *66*, 707–722.
 275. Rady, M.M. Effect of 24-epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress. *Sci. Hortic.* **2011**, *129*, 232–237.
 276. Raey, Y.; Ghassemi-Golezani, K. Yield-density relationship for potato (*Solanum tuberosum*) and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in intercropping. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* **2009**, *37*, 141–147.
 277. Rahman, M.A.; Yahata, H.; Miah, M.G.; Ahamed, T.; Begum, M.N. Effectiveness of tree leaf mulch comparing with conventional mulches on common bean at different irrigation levels: Growth, yield, water use efficiency and weed infestation. *Arch. Agron. Soil Sci.* **2008**, *54*, 331–342.
 278. Rahman, S.M.E.; Mele, M.A.; Lee, Y.T.; Islam, M.Z. Consumer preference, quality, and safety of organic and conventional fresh fruits, vegetables, and cereals. *Foods* **2021**, *10*, 105.
 279. Rai, A.; Sharma, V.; Heitholt, J. Dry bean [*Phaseolus vulgaris* L.] growth and yield response to variable irrigation in the arid to semi-arid climate. *Sustainability* **2020**, *12*, 3851.
 280. Rai, P.K.; Singh, M.; Anand, K.; Saurabh, S.; Kaur, T.; Kour, D.; Yadav, A.N.; Kumar, M. *Role and potential applications of plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agriculture*; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, **2020**; ISBN 9780128205266.
 281. Rashidi, S.; Yousefi, A.R.; Pouryousef, M.; Goicoechea, N. Mycorrhizal impact on competitive relationships and yield parameters in *Phaseolus vulgaris* L.—Weed mixtures. *Mycorrhiza* **2021**, *31*, 599–612.
 282. Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant activity applying an improved abts radical cation decolorization assay. *Free Radic. Biol. Med.* **1999**, *26*, 1231–1237.
 283. Rebeschini, A.C.; Mazzuchelli, R. de C.L.; Araujo, A.S.F. de; Araujo, F.F. de Nitrogen application and inoculation with *Rhizobium tropici* on common bean in the fall/winter. *African J. Agric. Res.* **2014**, *9*, 3156–3163.

284. Reinprecht, Y.; Schram, L.; Marsolais, F.; Smith, T.H.; Hill, B.; Pauls, K.P. Effects of nitrogen application on nitrogen fixation in common bean production. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 1172.
285. Remans, R.; Ramaekers, L.; Schelkens, S.; Hernandez, G.; Garcia, A.; Reyes, J.L.; Mendez, N.; Toscano, V.; Mulling, M.; Galvez, L.; et al. Effect of *Rhizobium-Azospirillum* coinoculation on nitrogen fixation and yield of two contrasting *Phaseolus vulgaris* L. genotypes cultivated across different environments in Cuba. *Plant Soil* **2008**, *312*, 25–37.
286. Rembiałkowska, E. Quality of plant products from organic agriculture. *J. Sci. Food Agric.* **2007**, *87*, 2757–2762.
287. Rezaei-Chiyaneh, E.; Amirnia, R.; Amani Machiani, M.; Javanmard, A.; Maggi, F.; Morshedloo, M.R. 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. *Sci. Hortic.* **2020**, *261*, 108951.
288. Ribeiro, N.D.; Cargnelutti Filho, A.; Poersch, N.L.; Jost, E.; Rosa, S.S. Genetic progress in traits of yield, phenology and morphology of common bean. *Crop. Breed. Appl. Biotechnol.* **2008**, *8*, 232–238.
289. Rochester, I.J.; Peoples, M.B.; Hulugalle, N.R.; Gault, R.R.; Constable, G.A. Using legumes to enhance nitrogen fertility and improve soil condition in cotton cropping systems. *Field Crops Res.* **2001**, *70*, 27–41
290. Rodiño, A.P.; De La Fuente, M.; De Ron, A.M.; Lema, M.J.; Drevon, J.J.; Santalla, M. Variation for nodulation and plant yield of common bean genotypes and environmental effects on the genotype expression. *Plant Soil* **2011**, *346*, 349–361.
291. Rodríguez, R.; Meléndez, P.L. Effect of fungicide on disease incidence and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) infected with *Isariopsis griseola* Sacc. and *Ascochyta phaseolorum* Sacc. *J. Agric. Univ. Puerto Rico* **1986**, *2*, 127–134.
292. Rosales-Serna, R.; Kohashi-Shibata, J.; Acosta-Gallegos, J.A.; Trejo-López, C.; Ortiz-Cereceres, J.; Kelly, J.D. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed common bean cultivars. *Field Crop. Res.* **2004**, *85*, 203–211.
293. Rurangwa, E.; Vanlauwe, B.; Giller, K.E. Benefits of inoculation, P fertilizer and manure on yields of common bean and soybean also increase yield of subsequent maize. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2018**, *261*, 219–229.
294. Sadeghi, H.; Sasanfar, I. Effect of different safflower (*Carthamus tinctorius* L.)-bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropping patterns on growth and yield under weedy and weed-free conditions. *Arch. Agron. Soil Sci.* **2013**, *59*, 765–777.
295. Safafar, H.; Van Wagenen, J.; Møller, P.; Jacobsen, C. Carotenoids, phenolic compounds and tocopherols contribute to the antioxidative properties of some microalgae species grown on industrial wastewater. *Mar. Drugs* **2015**, *13*, 7339–7356.
296. Saikia, J.; Saikia, L.; Phookan, D.B.; Nath, D.J. Effect of biofertilizer consortium on yield, quality and soil health of french bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Legum. Res.* **2018**, *41*, 755–758.
297. Salegua, V.; Melis, R.; Fourie, D.; Sibiya, J.; Musvosvi, C. Grain yield, stability and bacterial brown spot disease of dark red kidney dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.)

- genotypes across six environments in South Africa. *Aust. J. Crop Sci.* **2020**, *14*, 1433–1442.
298. Samago, T.Y.; Anniye, E.W.; Dakora, F.D. Grain yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties is markedly increased by rhizobial inoculation and phosphorus application in Ethiopia. *Symbiosis* **2018**, *75*, 245–255. [
 299. Sánchez, A.C.; Gutiérrez, R.T.; Santana, R.C.; Urrutia, A.R.; Fauvart, M.; Michiels, J.; Vanderleyden, J. Effects of co-inoculation of native *Rhizobium* and *Pseudomonas* strains on growth parameters and yield of two contrasting *Phaseolus vulgaris* L. genotypes under Cuban soil conditions. *Eur. J. Soil Biol.* **2014**, *62*, 105–112.
 300. Sangakkara, U.R. Effect of tillage and moisture levels on growth, yield and nodulation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and mungbean (*Phaseolus radiatus*) in the dry season. *Indian J. Agron.* **2004**, *49*, 60–63.
 301. Santalla, M.; Fueyo, M.A.; Paula Rodino, A.; Montero, I.; de Ron, A.M. Breeding for culinary and nutritional quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in intercropping systems with maize (*Zea mays* L.). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **1999**, *3*, 225–229.
 302. Santosa, M.; Maghfoer, M.D.; Tarno, H. The influence of organic and inorganic fertilizers on the growth and yield of green bean, *Phaseolus vulgaris* L. Grown in dry and rainy season. *Agrivita* **2017**, *39*, 296–302.
 303. Sarrafi, A.; Ecochard, R. Modification of heterosis for protein and yield components by bean common mosaic virus in *Phaseolus vulgaris*. *Plant Breed.* **1986**, *97*, 279–282.
 304. Savvas, D.; Gianquinto, G.P.; Tüzel, Y.; Gruda, N. Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for medi-terranean climate areas. 217th ed.; Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italy, **2013**, 303-354.
 305. Savvas, D.; Gruda, N. Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry—A review. *Eur. J. Hortic. Sci.* **2018**, *83*, 280–293.
 306. Savvas, D.; Leneti, H.; Mantzos, N.; Kakarantza, L.; Barouchas, P. Effects of enhanced NH_4^+ -N supply and concomitant changes in the concentrations of other nutrients needed for ion balance on the growth, yield, and nutrient status of eggplants grown on rockwool. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2015**, *85*, 355–361.
 307. Scarisbrick, D.H.; Carr, M.K.V.; Wilkes, J.M. The effect of sowing date and season on the development and yield of Navy beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in south-east England. *J. Agric. Sci.* **1976**, *86*, 65–76.
 308. Schmeer, M.; Loges, R.; Dittert, K.; Senbayram, M.; Horn, R.; Taube, F. Legume-based forage production systems reduce nitrous oxide emissions. *Soil Tillage Res.* **2014**, *143*, 17–25.
 309. Sharma, A.; Sharma, R.P.; Katoch, V.; Sharma, G.D. Influence of vermicompost and split applied nitrogen on growth, yield, nutrient uptake and soil fertility in pole type french bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in an acid alfisol. *Legum. Res.* **2018**, *41*, 126–131.
 310. Sharp, Z. Principles of Stable Isotope Geochemistry, 2nd Edition. Open Textb. 2017.
 311. Silva, M.B.D.O.; De Carvalho, A.J.; Carneiro, J.E.D.S.; Aspiazú, I.; Alves, É.E.; David, A.M.S.D.S.; Brito, O.G.; Alves, P.F.S. Technological quality of grains of common beans selected genotypes from the carioca group. *Semin. Agrar.* **2016**, *37*, 1721–1732.

312. Sims, J.T.; Edwards, A.C.; Schoumans, O.F.; Simard, R.R. Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. *J. Environ. Qual.* **2000**, *29*, 60–71.
313. Simsek, M.; Comlekcioglu, N.; Ozturk, I. The effects of the regulated deficit irrigation on yield and some yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under semi-arid conditions. *Afr. J. Biotechnol.* **2011**, *10*, 4057–4064.
314. Singh, B.; Pathak, K.; Verma, A.; Verma, V.; Deka, B. Effects of vermicompost, fertilizer and mulch on plant growth, nodulation and pod yield of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Veg. Crop. Res. Bull.* **2011**, *74*, 153–165.
315. Singh, S.; Singh, R.P.; Shukla, U.N.; Singh, J.K.; Singh, O.N. Efficacy of herbicides and nutrient management on weed dynamics and yield of French bean (*Phaseolus vulgaris*). *Indian J. Agric. Sci.* **2018**, *88*, 1794–1800.
316. Singh, S.P.; Teran, H.; Molina, A. Genetics of seed yield and its components in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) of andean origin. *Orig. Plant Breed.* **1991**, *107*, 254–257.
317. Smith, A.M.; Zeeman, S.C. Quantification of starch in plant tissues. *Nat. Protoc.* **2006**, *1*, 1342–1345.
318. Smith, M.R.; Reis Hodecker, B.E.; Fuentes, D.; Merchant, A. Investigating nutrient supply effects on plant growth and seed nutrient content in common bean. *Plants* **2022**, *11*, 737.
319. Smith, M.R.; Veneklaas, E.; Polania, J.; Rao, I.M.; Beebe, S.E.; Merchant, A. Field drought conditions impact yield but not nutritional quality of the seed in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *PLoS ONE* **2019**, *14*, e0217099.
320. Soares, B.L.; Ferreira, P.A.A.; Rufini, M.; Martins, F.A.D.; Oliveira, D.P.; Reis, R.P.; de Andrade, M.J.B.; Moreira, F.M. de S. Agronomic and economic efficiency of common-bean inoculation with rhizobia and mineral nitrogen fertilization. *Rev. Bras. Cienc. Solo* **2016**, *40*.
321. Soratto, R.P.; Catuchi, T.A.; De Souza, E.D.F.C.; Garcia, J.L.N. Plant density and nitrogen fertilization on common bean nutrition and yield. *Rev. Caatinga* **2017**, *30*, 670–678.
322. Soratto, R.P.; Fernandes, A.M.; dos Santos, L.A.; Job, A.L.G. Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: I - Macronutrients. *Rev. Bras. Cienc. Solo* **2013**, *37*, 1027–1042.
323. Soratto, R.P.; Perez, A.A.G.; Fernandes, A.M. Age of no-till system and nitrogen management on common bean nutrition and yield. *Agron. J.* **2014**, *106*, 809–820.
324. Souza, T.L.P.O.; Faria, J.C.; Aragão, F.J.L.; Del Peloso, M.J.; Faria, L.C.; Wendland, A.; Aguiar, M.S.; Quintela, E.D.; Melo, C.L.P.; Hungria, M.; et al. Agronomic performance and yield stability of the RNA interference-based Bean golden mosaic virus-resistant common bean. *Crop Sci.* **2018**, *58*, 579–591.
325. Sozen, O.; Karadavuf, U.; Akcura, M. A study on the determination of the performance of some yield components in dry bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.) in different environments. *Fresenius Environ. Bull.* **2018**, *27*, 8677–8686.

326. Spackman, V.M.T.; Cobb, A.H. An enzyme-based method for the rapid determination of sucrose, glucose and fructose in sugar beet roots and the effects of impact damage and postharvest storage in clamps. *J. Sci. Food Agric.* **2002**, *82*, 80–86
327. Srivastava, A.K.; Kumar, A.; Yadav, D.D.; Singh, V. Influence of weed management practices on weeds, crop yield and economics of Rajmash (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Arch.* **2013**, *13*, 235–238.
328. Steiner, F.; Ferreira, H.C.P.; Zuffo, A.M. Can co-inoculation of *Rhizobium tropici* and *Azospirillum brasilense* increase common bean nodulation and grain yield? *Semin. Agrar.* **2019**, *40*, 81–98.
329. Streeter, J.; Wong, P.P. Inhibition of legume nodule formation and N₂ fixation by nitrate. *Crit. Rev. Plant Sci.* **1988**, *7*, 1–23.
330. Suárez, J.C.; Polanía, J.A.; Anzola, J.A.; Contreras, A.T.; Méndez, D.L.; Vanegas, J.I.; Noriega, J.E.; Rodríguez, L.; Urban, M.O.; Beebe, S.; et al. Influence of nitrogen supply on gas exchange, chlorophyll fluorescence and grain yield of breeding lines of common bean evaluated in the Amazon region of Colombia. *Acta Physiol. Plant.* **2021**, *43*, 66.
331. Sun, Y.; Wang, C.; Chen, H.Y.H.; Ruan, H. Responses of C:N stoichiometry in plants, soil, and microorganisms to nitrogen addition. *Plant Soil* **2020**, *456*, 277–287.
332. Tabesh, M.; Kiani, S.; Khoshgoftarmansh, A.H. The effectiveness of seed priming and foliar application of zinc- amino acid chelates in comparison with zinc sulfate on yield and grain nutritional quality of common bean. *J. Plant Nutr.* **2020**, *43*, 2106–2116.
333. Tajini, F.; Drevon, J.J.; Lamouchi, L.; Aouani, M.E.; Trabelsi, M. Response of Common Bean Lines to Inoculation: Comparison between the *Rhizobium tropici* CIAT899 and the native *Rhizobium Etli* 12a3 and their persistence in Tunisian soils. *World J. Microbiol. Biotechnol.* **2008**, *24*, 407–417.
334. Tal, A. Making Conventional Agriculture Environmentally Friendly: Moving beyond the glorification of organic agriculture and the demonization of conventional agriculture. *Sustainability* **2018**, *10*, 1078.
335. Taylor, J.D.; Day, J.M.; Dudley, C.L. The effect of *Rhizobium* inoculation and nitrogen fertiliser on nitrogen fixation and seed yield of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *Ann. Appl. Biol.* **1983**, *103*, 419–429.
336. Tefera, T. Effect of common bacterial blight severity on common bean yield. *Trop. Sci.* **2006**, *46*, 41–44.
337. Trewavas, A. Urban myths of organic farming. *Nature* **2001**, *410*, 409–410.
338. Trutmann, P.; Pyndji, M.M. Partial replacement of local common bean mixtures by high yielding angular leaf spot resistant varieties to conserve local genetic diversity while increasing yield. *Ann. Appl. Biol.* **1994**, *125*, 45–52.
339. Unkovich, M.J.; Herridge, D.F.; Peoples, M.B.; Cadish, G.; Boddey, R.; Giller, K.; Alves, B.J.R.; Chalk, P.M. Measuring plant associated nitrogen fixation in agricultural systems. *ACIAR* **2008**, *136*, 258.
340. Uyanoz, R. The Effects of different bio-organic, chemical fertilizers and their combination on yield, macro and micro nutrition content of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Int. J. Agric. Res.* **2007**, *2*, 115–125.

341. Uyanöz, R.; Akbulut, M.; Çetin, Ü.; Gültepe, N. Effects of microbial inoculation, organic and chemical fertilizer on yield and physicochemical and cookability properties of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds. *Philipp. Agric. Sci.* **2007**, *90*, 168–172.
342. van Dijk, M.; Morley, T.; Rau, M.L.; Saghai, Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nat. Food* **2021**, *2*, 494–501.
343. Vasconcelos, M.W.; Grusak, M.A.; Pinto, E.; Gomes, A.; Ferreira, H.; Balázs, B.; Centofanti, T.; Ntatsi, G.; Savvas, D.; Karkanis; et al. The biology of legumes and their agronomic, economic, and social impact. In *The Plant Family Fabaceae: Biology and Physiological Responses to Environmental Stresses*; Hasanuzzaman, M., Araújo, S., Gill, S.S., Eds.; Springer Nature: Singapore, **2020**, 3–25.
344. Vassileva, V.; Milanov, G.; Ignatov, G.; Nikolov, B. Effect of low pH on nitrogen fixation of common bean grown at various calcium and nitrate levels. *J. Plant Nutr.* **2008**, *20*, 279–294.
345. Walkley, A.; Black, I.A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* **1934**, *37*, 29–38.
346. Wang, M.; Murphy, M.T.; Moore, T.R. Nutrient resorption of two evergreen shrubs in response to long-term fertilization in a bog. *Oecologia* **2014**, *174*, 365–377.
347. Wani, S.P.; McGill, W.B.; Haugen-Kozyra, K.L.; Robertson, J.A.; Thurston, J.J. Improved soil quality and barley yields with fababeans, manure, forages and crop rotation on a Gray Luvisol. *Can. J. Soil Sci.* **1994**, *74*, 75–84.
348. Westermann, D.T.; Porter, L.K.; O'Deen, W.A. Nitrogen partitioning and mobilization patterns in bean plants¹. *Crop Sci.* **1985**, *25*, 225–229.
349. Woese, K.; Lange, D.; Boess, C.; Bo, K.W. A Comparison of organically and conventionally grown foods-results of a review of the relevant literature. *J. Sci. Food Agric.* **1997**, *74*, 281–293.
350. Wu, J.; Wang, L.; Fu, J.; Chen, J.; Wei, S.; Zhang, S.; Zhang, J.; Tang, Y.; Chen, M.; Zhu, J.; et al. Resequencing of 683 common bean genotypes identifies yield component trait associations across a north–south cline. *Nat. Genet.* **2020**, *52*, 118–125.
351. Yadegari, M.; Asadi Rahmani, H.; Noormohammadi, G.; Ayneband, A. Plant growth promoting rhizobacteria increase growth, yield and nitrogen fixation in *Phaseolus vulgaris*. *J. Plant Nutr.* **2010**, *33*, 1733–1743.
352. Yadegari, M.; Rahmani, H.A. Evaluation of bean (*Phaseolus vulgaris*) seeds' inoculation with *Rhizobium phaseoli* and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield and yield components. *Afr. J. Agric. Res.* **2010**, *5*, 792–799.
353. Yadegari, M.; Rahmani, H.A.; Noormohammadi, G.; Ayneband, A. Evaluation of bean (*Phaseolus vulgaris*) seeds inoculation with *Rhizobium phaseoli* and plant growth promoting rhizobacteria on yield and yield components. *Pak. J. Biol. Sci.* **2008**, *11*, 1935–1939.
354. Yildirim, E.; Karlidag, H.; Turan, M.; Dursun, A.; Goktepe, F. Growth, Nutrient uptake, and yield promotion of broccoli by plant growth promoting rhizobacteria with manure. *HortScience* **2011**, *46*, 932–936.

355. Young, M.D.; Ros, G.H.; de Vries, W. Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2021**, *319*, 107551.
356. Zafar, M.; Abbasi, M.K.; Rahim, N.; Khaliq, A.; Shaheen, A.; Jamil, M.; Shahid, M. Influence of integrated phosphorus supply and plant growth promoting rhizobacteria on growth, nodulation, yield and nutrient uptake in *Phaseolus vulgaris*. *Afr. J. Biotechnol.* **2011**, *10*, 16793–16807.
357. Zandalinas, S.I.; Fritschi, F.B.; Mittler, R. Global warming, climate change, and environmental pollution: recipe for a multifactorial stress combination disaster. *Trends Plant Sci.* **2021**, *26*, 588–599.
358. Zeffa, D.M.; Moda-Cirino, V.; Medeiros, I.A.; Freiria, G.H.; Neto, J.d.S.; Ivamoto-Suzuki, S.T.; Delfini, J.; Scapim, C.A.; Gonçalves, L.S.A. Genetic progress of seed yield and nitrogen use efficiency of brazilian carioca common bean cultivars using bayesian approaches. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 1168.
359. Zilio, M.; Souza, C.A.; Medeiros Coelho, C.M.; Miquelluti, D.J.; Michels, A.F. Ciclo, arquitetura de parte aérea e produtividade de genótipos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), no Estado de Santa Catarina. *Acta Sci.-Agron.* **2013**, *35*, 21–30.
360. Zimmermann, M.J.O.; Rosielle, A.A.; Waines, J.G. Heritabilities of grain yield of common bean in sole crop and in intercrop with maize 1. *Crop Sci.* **1984a**, *24*, 641–644.
361. Zimmermann, M.J.O.; Rosielle, A.A.; Waines, J.G.; Foster, K.W. A heritability and correlation study of grain yield, yield components, and harvest index of common bean in sole crop and intercrop. *Field Crop. Res.* **1984b**, *9*, 109–118.
362. Zoffoli, B.C.; Brito, L.F.; Straliootto, R.; de Araújo, A.P. Early nitrogen supplementation stimulates the nodulation and growth of common bean plants inoculated with *Rhizobium*. *Acta Sci. Agron.* **2021**, *43*, e55105.

9. Βιογραφικό σημείωμα

Προσωπικά στοιχεία

Όνοματεπώνυμο: Ιωάννης Καραβίδας
Ημερομηνία γέννησης: 28 Ιουνίου 1994
Τόπος γέννησης: Πάτρα
Εθνικότητα: Ελληνική
Διεύθυνση κατοικίας: Γεωργίου Σισίνη 103, 27300 Γαστούνη
Τηλέφωνο: 6948385280
Ηλεκτρονική διεύθυνση: karavidas@aua.gr

Εκπαίδευση

Πανεπιστημιακές Σπουδές

- 10/2012 – 11/2017 Πτυχίο Γεωπονίας. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Βιοτεχνολογίας (Βαθμός 7,28). Θέμα πτυχιακής μελέτης: «Επίδραση εμβολιασμού αμπελοφάσουλου με ριζόβια στην ανοχή του σε υδατικές συνθήκες καταπόνησης». Επιβλέπων Καθηγητής κ. Δημήτριος Σάββας
- 4/2018 – Σήμερα Εκπόνηση διδακτορικής διατριβής με θέμα: «Επίδραση εμβολιασμού με ριζόβια και συστήματος αμεινισποράς στην βιολογική αζωτοδέσμευση, τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και την παραγωγή σε βιολογική καλλιέργεια φασολιού για παραγωγή νωπών» Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών Επιβλέπων Καθηγητής Δρ. Σάββας Δημήτριος

Ξένες γλώσσες

- 2021 Αγγλική C2, ECPE Michigan Language Assessment
2011 Γερμανική B1, Goethe Zertifikat Deutsch

Συμμετοχή σε ερευνητικά προγράμματα

- 1/2018 - 3/2021 «TRUE: Transition paths to sustainable legume-based systems in Europe (Κωδικός EU: 727973) και επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθηγητή Δημήτριο Σάββα.
- 9/2020 – 12/2021 Nutrisense: Ανάπτυξη προηγμένης τεχνολογίας με χρήση εκλεκτικών ιοντικών ηλεκτροδίων και κατάλληλο λογισμικό για υδροπονικές καλλιέργειες κηπευτικών με έμφαση στην ανακύκλωση των απορροών σε κλειστά συστήματα», το οποίο εκπονείται από το Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών. Συγχρηματοδοτούμενο/ ΕΛΙΔΕΚ επιστημονικός υπεύθυνος Καθηγητής Δημήτριος Σάββας.

- 9/2020 – 12/2021 Συμμετοχή στο ερευνητικό πρόγραμμα «Ανάπτυξη πρωτοκόλλων ορθών γεωργικών πρακτικών αναφερομένων στη θρέψη και στη φυτοπροστασία για την υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού και σταμναγκαθιού σε σύστημα NFT (Nutrient Film Technique) με χρήση τεχνολογίας MGS (Moving Gutters System) εγκατεστημένο σε υπερσύγχρονο θερμοκήπιο (IGC-GARDEN)», το οποίο εκπονείται από το Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών. Χρηματοδότηση από Ελληνικούς Ιδιωτικούς Φορείς με επιστημονικό υπεύθυνο τον Καθηγητή Δημήτριο Σάββα.
- 10/2021 – Σήμερα Συμμετοχή στο ερευνητικό πρόγραμμα Horizon 2020 (H2020) «RADIANT: Realising Dynamic Value Chains for Underutilised Crops (RADIANT)» το οποίο εκπονείται από το Εργαστήριο Κηπευτικών Καλλιεργειών. Επιστημονική υπεύθυνη την Επίκουρη Καθηγήτρια Γεωργία Ντάτση.

Δημοσιευμένο ερευνητικό έργο σε παγκόσμια περιοδικά με κριτές

1. **Karavidas, I.**, Ntatsi, G., Ntanasi, T., Vlachos, I., Tampakaki, A., Iannetta, P. P. M., & Savvas, D. (2020). Comparative Assessment of Different Crop Rotation Schemes for Organic Common Bean Production. In *Agronomy* (Vol. 10, Issue 9, p. 1269). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091269>
2. **Karavidas, I.**, Ntatsi, G., Vougeleka, V., Karkanis, A., Ntanasi, T., Saitanis, C., Agathokleous, E., Ropokis, A., Sabatino, L., Tran, F., Iannetta, P. P. M., & Savvas, D. (2022). Agronomic Practices to Increase the Yield and Quality of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A Systematic Review. In *Agronomy* (Vol. 12, Issue 2, p. 271). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020271>
3. **Karavidas, I.**, Ntatsi, G., Marka, S., Ntanasi, T., Consentino, B. B., Sabatino, L., Iannetta, P. P. M., & Savvas, D. (2022). Fresh Pod Yield, Physical and Nutritional Quality Attributes of Common Bean as Influenced by Conventional or Organic Farming Practices. In *Plants* (Vol. 12, Issue 1, p. 32). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants12010032>
4. Voutsinos-Frantzis, O., Ntatsi, G., **Karavidas, I.**, Neofytou, I., Deriziotis, K., Ropokis, A., Consentino, B. B., Sabatino, L., & Savvas, D. (2022). Exploring the Simultaneous Effect of Total Ion Concentration and K:Ca:Mg Ratio of the Nutrient Solution on the Growth and Nutritional Value of Hydroponically Grown *Cichorium spinosum* L. In *Agronomy* (Vol. 12, Issue 9, p. 2214). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092214>
5. **Karavidas, I.**, Ntatsi, G., Ntanasi, T., Tampakaki, A., Giannopoulou, A., Pantazopoulou, D., Sabatino, L., Iannetta, P.M.M., Savvas, D. (2023). Hydroponic Common Bean Performance under Reduced N-supply Level and Rhizobia Application. In *Plants* 2023, 12(3), 646 <https://doi.org/10.3390/plants12030646>

6. Voutsinos-Frantzis, O., **Karavidas, I.**, Petropoulos, D., Zioviris, G., Fortis, D., Ntanasi, T., Ropokis, A., Karkanis, A., Sabatino, L., Savvas, D., Ntatsi, G. (2023). Effects of NaCl and CaCl₂ as Eustress Factors on Growth, Yield, and Mineral Composition of Hydroponically Grown Valerianella locusta. In *Plants* 2023, 12(7), 1454. <https://doi.org/10.3390/plants12071454>
7. Lykogianni, M., Bempelou, E., **Karavidas, I.**, Anagnostopoulos, C., Aliferis, K. A., & Savvas, D. (2023). Impact of Sodium Hypochlorite Applied as Nutrient Solution Disinfectant on Growth, Nutritional Status, Yield, and Consumer Safety of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Fruit Produced in a Soilless Cultivation. In *Horticulturae* (Vol. 9, Issue 3, p. 352). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030352>

Δημοσιευμένο έργο σε παγκόσμια συνέδρια με κριτές – πλήρεις εργασίες

1. **Karavidas, I.**, Yfantopoulos, D., Ntatsi, G., Ntanasi, T., Dardas, I., Tampakaki, A., & Savvas, D. (2019). Comparison of soil-N availability in a field cultivated with legume or non-legume plants during the winter in a Mediterranean environment. In *Acta Horticulturae* (Issue 1253, pp. 191–198). International Society for Horticultural Science (ISHS). <https://doi.org/10.17660/actahortic.2019.1253.26>
2. Ntatsi, G., **Karavidas, I.**, Giannikos, G., Tampakaki, A., & Savvas, D. (2020). Effect of inoculation with rhizobia and reduced water supply in yield and biological nitrogen fixing activity of cowpea. In *Acta Horticulturae* (Issue 1296, pp. 775–782). International Society for Horticultural Science (ISHS). <https://doi.org/10.17660/actahortic.2020.1296.98>
3. Ntanasi, T., Ntatsi, G., **Karavidas, I.**, Vamvakouris, N., Oikonomou, C., Ropokis, A., & Savvas, D. (2021). Impact of drought stress on the fruit quality of different Greek tomato landraces. In *Acta Horticulturae* (Issue 1320, pp. 49–56). International Society for Horticultural Science (ISHS). <https://doi.org/10.17660/actahortic.2021.1320.6>
4. Lykogianni, M., Bempelou, E., Ntatsi, G., **Karavidas, I.**, Ropokis, A., Aliferis, K. A., & Savvas, D. (2021). Spinosad residues in hydroponically grown tomato fruits. In *Acta Horticulturae* (Issue 1320, pp. 197–204). International Society for Horticultural Science (ISHS). <https://doi.org/10.17660/actahortic.2021.1320.25>
5. **Karavidas, I.**, Ntatsi, G., Ntanasi, T., Vlachos, I., Tampakaki, A., Iannetta, P., & Savvas, D. (2021). Evaluation of different crop rotation schemes for organic common bean production under mild-winter climatic conditions. In *Acta Horticulturae* (Issue 1320, pp. 109–116). International Society for Horticultural Science (ISHS). <https://doi.org/10.17660/actahortic.2021.1320.14>

Δημοσιευμένο έργο σε εθνικά συνέδρια με κριτές – πλήρεις εργασίες

1. Ντάτση, Γ., Βροντάνη, Χ., Βλάχου, Μ, **Καραβίδας, Ι.**, Ροπόκης, Α., Ταμπακάκη, Α., Σάββας, Δ., 2019. Επίδραση διαφορετικών στελεχών αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων και μειωμένης παροχής αζώτου στην ανάπτυξη και τη βιολογική αζωτοδέσμευση υδροπονικής καλλιέργειας μαυρομάτικου

- φασολιού. 28ο Συνέδριο της Ελληνικής Εταιρείας της Επιστήμης των Οπωροκηπευτικών (ΕΕΕΟ), Θεσσαλονίκη, 16-20 Οκτωβρίου 2017
2. Ντάτση, Γ., **Καραβίδας, Ι.**, Γιαννίκος, Γ., Ροπόκης, Α., Ταμπακάκη, Α., Σάββας, Δ., 2019. Επίδραση διαφορετικών στελεχών αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων και μειωμένης παροχής νερού στην ανάπτυξη και τη βιολογική αζωτοδέσμευση αμπελοφάσουλου. 28ο Συνέδριο της Ελληνικής Εταιρείας της Επιστήμης των Οπωροκηπευτικών (ΕΕΕΟ), Θεσσαλονίκη, 16-20 Οκτωβρίου 2017

Επίδραση αειφόρων αγρονομικών πρακτικών

ORIGINALITY REPORT

5%

SIMILARITY INDEX

5%

INTERNET SOURCES

4%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

www.mdpi.com

Internet Source

3%

2

dspace.aua.gr

Internet Source

1%

3

discovery.dundee.ac.uk

Internet Source

1%

Exclude quotes On

Exclude bibliography On

Exclude matches < 1%