



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ-ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Αξιολόγηση *in vitro* της μυκητοκτόνου δράσης
στελεχών *Trichoderma* εναντίον
φυτοπαθογόνων μυκήτων**

ΓΕΩΡΓΙΑ ΖΗΣΟΠΟΥΛΟΥ

ΛΑΡΙΣΑ, 2026



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ-ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Αξιολόγηση *in vitro* της μυκητοκτόνου δράσης
στελεχών *Trichoderma* εναντίον
φυτοπαθογόνων μυκήτων**

ΓΕΩΡΓΙΑ ΖΗΣΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής : Παναγιώτης Ηλιόπουλος

ΛΑΡΙΣΑ, 2026

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους επιβλέποντες καθηγητές μου, Ηλιόπουλος Παναγιώτης και Νατσιόπουλος Δημήτριος, για την καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του/της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή του/της ήταν καθοριστική τόσο στην επιστημονική όσο και στην ερευνητική μου πορεία.

Οφείλω επίσης ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου και στους ανθρώπους που με στηρίζουν καθημερινά, για την αμέριστη συμπαράσταση, την υπομονή και την πίστη τους στις προσπάθειές μου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΘΟΓΟΝΟΙ ΜΥΚΗΤΕΣ	10
1.1 Γενικά χαρακτηριστικά των παθογόνων μυκήτων	10
1.2 Είδη παθογόνων μυκήτων (Fusarium, Verticillium, Botrytis) και οι επιπτώσεις τους σε διαφορετικούς τομείς (γεωργία, υγεία κ.λπ.)	11
1.3 Ανάλυση των μηχανισμών δράσης και εξάπλωσης των παθογόνων μυκήτων.....	13
1.4 Βιολογικός κύκλος, ταξινόμηση, συμπτώματα και χαρακτηριστικά των παθογόνων μυκήτων.....	14
1.4.1 Ταξινόμηση	15
1.4.2 Συμπτώματα	15
1.4.3 Χαρακτηριστικά	16
1.5 Μέθοδοι καταπολέμησης: χημικοί και βιολογικοί τρόποι, με έμφαση στο τριχόδερμα ως βιολογικό μέσο καταπολέμησης	16
1.5.1 Χημικές μέθοδοι καταπολέμησης	16
1.5.2 Βιολογικές μέθοδοι καταπολέμησης	17
1.5.3 Σημαντικότητα της βιολογικής καταπολέμησης με τριχόδερμα	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΓΕΝΟΣ ΤΡΙΧΟΔΕΡΜΑ (TRICHODERMA)	19
2.1 Περιγραφή του γένους Trichoderma και των βασικών ειδών του	19
2.2 Βιολογικές ιδιότητες και μηχανισμοί δράσης του τριχοδέρματος.....	21
2.2.1 Βιολογικές ιδιότητες του Trichoderma	21
2.2.2 Μηχανισμοί δράσης του Trichoderma	22
2.2.3 Ενίσχυση της άμυνας των φυτών.....	23
2.3 Οικολογικός ρόλος και συμβίωση με φυτά	23
2.3.1 Οικολογικός ρόλος του Trichoderma	23
2.3.2 Συμβίωση του Trichoderma με τα φυτά	24
2.3.3 Αλληλεπίδραση του Trichoderma με τα ριζικά συστήματα	24
2.4 Σκοπός του τριχοδέρματος στη βιολογική καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων: τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του	25
2.4.1 Πλεονεκτήματα του Trichoderma στη βιολογική καταπολέμηση.....	25
2.4.2 Μειονεκτήματα του Trichoderma στη βιολογική καταπολέμηση	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΥΚΗΤΟΚΤΟΝΟΥ ΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΡΙΧΟΔΕΡΜΑΤΟΣ	27
3.1 Ανταγωνισμός για θρεπτικά συστατικά και χώρο μεταξύ του τριχοδέρματος και των παθογόνων μυκήτων	27

3.2 Παραγωγή ενζύμων και δευτερογενών μεταβολιτών που επηρεάζουν την ανάπτυξη των παθογόνων μυκήτων	29
3.2.1 Παραγωγή ενζύμων	29
3.2.2 Παραγωγή δευτερογενών μεταβολιτών	30
3.3 Επίκληση φυτοάμυνας και άλλοι βιολογικοί μηχανισμοί δράσης του τριχοδέρματος	31
3.3.1 Επίκληση φυτοάμυνας	31
3.3.2 Άλλοι βιολογικοί μηχανισμοί δράσης	32
3.4 Ανάλυση των μηχανισμών δράσης του Trichoderma	33
3.4.1 Ανταγωνισμός και αντιβιοτική δράση	33
3.4.2 Κυτταρινάσες και λυτικά ένζυμα (πρωτεάσες, 1,3 γλυκανάσες)	33
3.4.3 Χιτινάσες και μυκοπαρασιτισμός (δημιουργία νεκρών ζωνών μεταξύ των μυκήτων)	34
3.4.4 Υπερπαρασιτισμός και "καβάλημα" του παθογόνου μύκητα	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Εφαρμογές του Τριχοδέρματος στη Βιολογική Καταπολέμηση	35
4.1 Χρήσεις του τριχοδέρματος στη γεωργία για την προστασία καλλιεργειών από παθογόνους μύκητες	35
4.1.1 Προστασία από εδαφικούς παθογόνους μύκητες	35
4.1.2 Προστασία από μυκητιακές ασθένειες στις καλλιέργειες	36
4.1.3 Εφαρμογές σε φυτώρια και καλλιέργειες	37
4.1.4 Οφέλη για τη βιώσιμη γεωργία	37
4.2 Πλεονεκτήματα του Τριχοδέρματος έναντι των Χημικών Μυκητοκτόνων: Περιβαλλοντικές, Οικονομικές και Υγειονομικές Επιπτώσεις	37
4.2.1 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	38
4.2.2 Οικονομικές Επιπτώσεις	38
4.2.3 Υγειονομικές Επιπτώσεις	39
4.3 Περιορισμοί και προκλήσεις στην εφαρμογή του Trichoderma σε γεωργικές καλλιέργειες	40
4.3.1 Επιτυχία σε διαφορετικές γεωργικές συνθήκες	40
4.3.2 Επιλογή κατάλληλων στελεχών Trichoderma	40
4.3.3 Μειωμένη αποτελεσματικότητα σε πολύ μολυσμένα εδάφη	41
4.3.4 Υψηλό κόστος παραγωγής και εφαρμογής	41
4.3.5 Αλληλεπιδράσεις με άλλους μικροοργανισμούς	41
4.4 Συζήτηση για τη νομοθεσία και τις πολιτικές προώθησης της βιολογικής γεωργίας στην Ε.Ε.	42
4.4.1. Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για τη Βιολογική Γεωργία	42
4.4.2 Χρηματοδότηση και Επιδοτήσεις για Βιολογικές Καλλιέργειες	43
4.4.3 Ανάπτυξη και προώθηση της βιολογικής γεωργίας μέσω δημόσιας πολιτικής	43

4.4.4 Προκλήσεις και περιορισμοί της εφαρμογής των πολιτικών βιολογικής γεωργίας	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΩΝ IN VITRO ΜΕΛΕΤΩΝ ΤΟΥ TRICHODERMA ΕΝΑΝΤΙ ΠΑΘΟΓΟΝΩΝ ΜΥΚΗΤΩΝ	45
5.1 Σκοπός και Επιστημονικό Πλαίσιο της Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης.....	45
5.2 Αναλυτική Παρουσίαση Αντιπροσωπευτικής In Vitro Μελέτης Ανταγωνισμού Trichoderma–Fusarium.....	46
5.2.1 Στόχοι και Ερευνητική Προσέγγιση της Μελέτης.....	47
5.2.2 Περιγραφή Μεθοδολογίας και Πειραματικού Πρωτοκόλλου (Dual Culture Assay)	47
5.2.3 Κύρια Πειραματικά Ευρήματα και Ποσοτική Αξιολόγηση	48
5.2.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων και Συσχέτιση με Γνωστούς Μηχανισμούς Δράσης του Trichoderma.....	49
5.3 Συγκριτική Παρουσίαση Πρόσφατων In Vitro Μελετών για Fusarium, Verticillium και Botrytis	49
5.3.1 Πειραματικές Προσεγγίσεις κατά Ειδών Fusarium	50
5.3.2 In Vitro Μελέτες έναντι Verticillium spp.	50
5.3.3 Βιολογικός Έλεγχος του Botrytis cinerea μέσω Trichoderma spp.	51
5.4 Σύνθεση και Συγκριτική Αξιολόγηση των Βιβλιογραφικών Ευρημάτων	52
5.4.1 Ομοιότητες και Διαφορές στα Πειραματικά Πρωτόκολλα.....	52
5.4.2 Κύριοι Μηχανισμοί Αντιμυκητιακής Δράσης που Αναδεικνύονται από τη Βιβλιογραφία.....	53
5.4.3 Περιορισμοί των In Vitro Δεδομένων και Προοπτικές Μελλοντικής Έρευνας.....	53
5.5 Συνοπτικά Συμπεράσματα του Κεφαλαίου	54
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	58

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη μυκητοκτόνο δράση του *Trichoderma* έναντι βασικών φυτοπαθογόνων μυκήτων και αναλύει τον ρόλο του ως βιολογικού παράγοντα καταπολέμησης σε συστήματα φυτοπροστασίας. Το *Trichoderma* αποτελεί ένα από τα πιο μελετημένα και ευρέως χρησιμοποιούμενα γένη μυκήτων στη βιολογική γεωργία, καθώς διαθέτει ποικίλους μηχανισμούς αντιμυκητιακής δράσης, όπως ανταγωνισμό για θρεπτικά συστατικά, παραγωγή λυτικών ενζύμων, έκκριση αντιβιοτικών ουσιών και ενεργοποίηση της φυτικής άμυνας. Παθογόνοι μύκητες όπως τα *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis* προκαλούν σημαντικές ζημιές στις καλλιέργειες, μειώνοντας την παραγωγή και την ποιότητα των προϊόντων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη αποτελεσματικών, βιώσιμων και οικολογικών μεθόδων αντιμετώπισής τους.

Η εργασία παρουσιάζει μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση των μηχανισμών δράσης του *Trichoderma*, της οικολογίας του και της εφαρμογής του στη βιολογική καταπολέμηση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε πρόσφατες *in vitro* μελέτες που εξετάζουν τον ανταγωνισμό του *Trichoderma* έναντι των παθογόνων μυκήτων, αναδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά του σε εργαστηριακές συνθήκες και τους παράγοντες που επηρεάζουν τη δράση του. Παρουσιάζονται επίσης σύγχρονες επιστημονικές προσεγγίσεις και προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση του *Trichoderma* στο φυσικό περιβάλλον, καθώς και προοπτικές μελλοντικών εφαρμογών στη γεωργική βιοτεχνολογία.

Συνολικά, η εργασία αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο του *Trichoderma* ως ασφαλούς και αποτελεσματικού βιολογικού παράγοντα ελέγχου των φυτοπαθογόνων μυκήτων, υπογραμμίζοντας τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με τα χημικά μυκητοκτόνα και τη συμβολή του στη βιώσιμη και οικολογική φυτοπροστασία.

Λέξεις-κλειδιά: *Trichoderma*, βιολογική καταπολέμηση, *Fusarium*, *Verticillium*, *Botrytis*, μυκοπαρασιτισμός, μυκητοκτόνος δράση

ABSTRACT

This thesis examines the antifungal activity of *Trichoderma* against major phytopathogenic fungi and analyzes its role as a biological control agent within plant protection systems. *Trichoderma* is one of the most widely studied and applied fungal genera in biological agriculture, due to its diverse mechanisms of action, including competition for nutrients, production of lytic enzymes, secretion of antibiotic compounds, and induction of plant defense responses. Pathogenic fungi such as *Fusarium*, *Verticillium*, and *Botrytis* cause severe damage to crops, reducing yield and product quality, which highlights the need for effective, sustainable, and environmentally friendly control strategies.

The study presents an extensive literature review of the mechanisms of action of *Trichoderma*, its ecology, and its applications in biological control. Particular emphasis is placed on recent in vitro studies investigating *Trichoderma*'s antagonistic activity against pathogenic fungi, demonstrating its effectiveness under laboratory conditions and the factors that influence its performance. In addition, the work discusses current scientific approaches and challenges related to the use of *Trichoderma* in natural environments, as well as future prospects in agricultural biotechnology.

Overall, the thesis highlights the crucial role of *Trichoderma* as a safe and effective biological control agent against phytopathogenic fungi, emphasizing its advantages over chemical fungicides and its contribution to sustainable and ecologically responsible plant protection.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη μυκητοκτόνο δράση του *Trichoderma* και τον ρόλο του ως βιολογικού παράγοντα ελέγχου απέναντι σε σημαντικούς φυτοπαθογόνους μύκητες που απειλούν την αγροτική παραγωγή. Το *Trichoderma* αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα γένη ωφέλιμων μυκήτων, με εκτεταμένη παρουσία στο έδαφος και στις ριζόσφαιρες των φυτών, ενώ είναι ευρέως γνωστό για τις ισχυρές αντιμυκητιακές του ιδιότητες και τη συμβολή του στη βελτίωση της υγείας και ανάπτυξης των φυτών. Η χρήση του στη γεωργία έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, καθώς αποτελεί μια αξιόπιστη και οικολογικά ασφαλή εναλλακτική λύση στα χημικά μυκητοκτόνα, των οποίων η υπερβολική χρήση συνδέεται με αρνητικές περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις.

Οι παθογόνοι μύκητες *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis* συγκαταλέγονται στους συχνότερους και πιο επιβλαβείς παράγοντες φυτικών ασθενειών, προκαλώντας σημαντικές απώλειες στην παραγωγή και υποβάθμιση της ποιότητας των καλλιεργειών. Οι ασθένειες που προκαλούν επηρεάζουν πλήθος καλλιεργειών, από λαχανικά και αροτραίες καλλιέργειες μέχρι δενδρώδη φυτά, δημιουργώντας αυξανόμενη ανάγκη για ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης. Η αναζήτηση βιώσιμων και καινοτόμων λύσεων καθίσταται ιδιαίτερα κρίσιμη σε ένα γεωργικό σύστημα που μεταβαίνει προς πιο φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές.

Το *Trichoderma* έχει προσελκύσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω των πολλαπλών μηχανισμών με τους οποίους ασκεί αντιμυκητιακή δράση, όπως ο ανταγωνισμός για χώρο και θρεπτικά συστατικά, η παραγωγή αντιμικροβιακών δευτερογενών μεταβολιτών, η έκκριση λυτικών ενζύμων, ο μυκοπαρασιτισμός και η ενεργοποίηση της φυτικής άμυνας. Αυτοί οι μηχανισμοί το καθιστούν έναν από τους πιο αποτελεσματικούς και πολυδιάστατους παράγοντες βιολογικού ελέγχου.

Η εργασία αυτή αποτελεί μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία συγκεντρώνει και αναλύει τα σημαντικότερα ερευνητικά δεδομένα σχετικά με τη δράση του *Trichoderma* έναντι των παθογόνων μυκήτων *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis*. Παρουσιάζονται οι βασικές βιολογικές και οικολογικές ιδιότητές του, οι μηχανισμοί αντιμυκητιακής δράσης του, οι εφαρμογές του στη γεωργία, καθώς και

πρόσφατες in vitro μελέτες που τεκμηριώνουν την αποτελεσματικότητά του. Στόχος της εργασίας είναι να αναδείξει τη σημασία του Trichoderma ως καινοτόμου και βιώσιμου εργαλείου φυτοπροστασίας, συμβάλλοντας στη μετάβαση προς πιο οικολογικές και αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης των φυτοπαθογόνων μυκήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΘΟΓΟΝΟΙ ΜΥΚΗΤΕΣ

1.1 Γενικά χαρακτηριστικά των παθογόνων μυκήτων

Οι παθογόνοι μύκητες αποτελούν μια ποικιλία οργανισμών που έχουν την ικανότητα να προκαλούν ασθένειες σε φυτά, ζώα και ανθρώπους. Αυτοί οι μύκητες προκαλούν μια σειρά από ασθένειες που επηρεάζουν τη γεωργία, την παραγωγή τροφίμων και την οικολογία. Η ικανότητά τους να προκαλούν νόσους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ευχέρεια να αναπτύσσονται σε διαφορετικά περιβάλλοντα και η παραγωγή τοξινών που βλάπτουν τους ξενιστές τους.

Οι παθογόνοι μύκητες του εδάφους, για παράδειγμα, όπως το *Fusarium* και το *Verticillium*, προκαλούν σήψη των ριζών και επιδρούν αρνητικά στην ανάπτυξη των φυτών. Αυτοί οι μύκητες είναι συχνά υπεύθυνοι για την υποβάθμιση της ποιότητας των καλλιεργειών και μπορούν να επιβιώσουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο έδαφος, επηρεάζοντας τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών για αρκετές σεζόν (Nelson et al., 2013). Επιπλέον, οι παθογόνοι μύκητες όπως το *Botrytis cinerea*, γνωστός και ως «γλοιοσπόριος», προσβάλλει τα φυτά μέσω της παραγωγής κονιδίων που μεταφέρονται με τον αέρα ή με την επαφή με μολυσμένα φυτά, προκαλώντας τον χαρακτηριστικό «σκασμένο καρπό» ή σήψη σε διάφορες καλλιέργειες (Elad et al., 2016).

Ο μηχανισμός προσβολής των φυτών από παθογόνους μύκητες είναι αρκετά σύνθετος και περιλαμβάνει την εισβολή στα κύτταρα των φυτών μέσω της παραγωγής ενζύμων που καταστρέφουν τα κυτταρικά τοιχώματα. Μερικοί μύκητες, όπως το *Fusarium*, παράγουν τοξίνες που εισέρχονται στον οργανισμό του φυτού και προκαλούν κυτταρική βλάβη, ενώ άλλοι, όπως το *Verticillium*, αναπτύσσονται μέσα στους αγωγούς του φυτού, μπλοκάροντας τη ροή των θρεπτικών συστατικών και νερού (Larkin & Fravel, 2002). Τα συμπτώματα που προκαλούν περιλαμβάνουν κιτρίνισμα, μααρασμό, σήψη των ριζών, και μειωμένη ανάπτυξη.

Οι παθογόνοι μύκητες διακρίνονται σε εξωτερικούς και ενδοφυτικούς μύκητες. Οι εξωτερικοί μύκητες, όπως το *Botrytis cinerea*, προσβάλλουν τα εξωτερικά μέρη των φυτών, όπως τα φύλλα και οι καρποί, ενώ οι ενδοφυτικοί μύκητες εισέρχονται μέσα

στον ιστό του φυτού και μπορούν να προκαλέσουν χρόνιες λοιμώξεις (Rodriguez et al., 2009).

Η εξάπλωση των μυκήτων είναι συχνά ασταθής και εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία. Παράγουν ειδικά σπόρια, που μπορούν να επιβιώσουν σε ξηρές και δυσμενείς συνθήκες για μεγάλες χρονικές περιόδους. Αυτή η ικανότητα επιβίωσης καθιστά τους παθογόνους μύκητες πολύ δύσκολους στο να καταπολεμηθούν, καθιστώντας την ανάγκη για βιολογικούς παράγοντες ελέγχου όπως το *Trichoderma* ακόμα πιο επιτακτική.

1.2 Είδη παθογόνων μυκήτων (*Fusarium*, *Verticillium*, *Botrytis*) και οι επιπτώσεις τους σε διαφορετικούς τομείς (γεωργία, υγεία κ.λπ.)

Οι παθογόνοι μύκητες *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis* προκαλούν σοβαρές ασθένειες σε φυτά, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, ενδέχεται να επηρεάζουν και την ανθρώπινη υγεία μέσω των τοξινών που παράγουν. Αυτοί οι μύκητες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη γεωργία, καθιστώντας την ανάγκη για εναλλακτικούς τρόπους καταπολέμησής τους, όπως το τριχόδερμα, πιο επιτακτική.

Το *Fusarium* είναι ένα από τα πιο κοινά γένη μυκήτων που προκαλούν ασθένειες σε καλλιέργειες, ιδιαίτερα σε σιτάρι, καλαμπόκι, κριθάρι και άλλα δημητριακά. Ο μύκητας αυτός προκαλεί *Fusarium wilt*, μια ασθένεια που επηρεάζει τη λειτουργία του αγγειακού συστήματος του φυτού, εμποδίζοντας τη μεταφορά νερού και θρεπτικών συστατικών. Οι μολύνσεις από *Fusarium* μπορούν να προκαλέσουν μααρασμό, κιτρίνισμα των φύλλων, και τελικά να οδηγήσουν στην αποτυχία της καλλιέργειας. Επιπλέον, ο *Fusarium* παράγει μυκοτοξίνες, όπως την *fumonisin*, οι οποίες είναι τοξικές για τα ζώα και τους ανθρώπους, προκαλώντας σοβαρές ασθένειες σε περιπτώσεις κατανάλωσης μολυσμένων προϊόντων (Gong et al., 2004). Στη γεωργία, το *Fusarium* προκαλεί επίσης βλάβες στο ριζικό σύστημα, μειώνοντας την ικανότητα των φυτών να απορροφούν θρεπτικά συστατικά, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα και την ποσότητα της σοδειάς.

Το *Verticillium* είναι γνωστό για την πρόκληση του *Verticillium wilt*, που προσβάλλει φυτά όπως η ελιά, το βαμβάκι, οι ντομάτες και τα πεπόνια. Ο μύκητας αυτός εισβάλλει στο αγγειακό σύστημα του φυτού, προκαλώντας μπλοκάρισμα στη ροή του νερού και των θρεπτικών συστατικών. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν κιτρίνισμα και μαρασμό των φύλλων, ενώ σε πολλές περιπτώσεις, η ασθένεια καταλήγει σε θάνατο των φυτών. Το *Verticillium* είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό και μπορεί να επιβιώσει στο έδαφος για αρκετά χρόνια, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διαχείριση του (Klosterman et al., 2009). Η επιβάρυνση των καλλιεργειών από τον *Verticillium* οδηγεί σε σημαντική μείωση της παραγωγής, ενώ η καταπολέμηση του μύκητα απαιτεί τη χρήση ειδικών τεχνικών, όπως η αλλαγή καλλιεργειών ή η χρήση ανθεκτικών ποικιλιών.

Ο *Botrytis cinerea*, γνωστός και ως «γλοιοσπόριος», είναι υπεύθυνος για πολλές ασθένειες, κυρίως στους καρπούς και τα άνθη των φυτών. Ο *Botrytis* προκαλεί *botrytis blight*, μια ασθένεια που πλήττει καλλιέργειες όπως φράουλες, σταφίδες και ντομάτες. Το χαρακτηριστικό σύμπτωμα είναι η σήψη των καρπών και η εμφάνιση γκρίζων μούχλων, που καταστρέφουν την ποιότητα των προϊόντων και μειώνουν την εμπορική τους αξία. Ο μύκητας αυτός ευνοείται από υγρές και ψυχρές συνθήκες, γεγονός που καθιστά τις μολύνσεις ιδιαίτερα επικίνδυνες σε ορισμένες κλιματολογικές περιοχές (Williamson et al., 2007). Η *botrytis blight* έχει επιπτώσεις όχι μόνο στη γεωργία αλλά και στην υγεία, αφού τα μολυσμένα προϊόντα μπορεί να προκαλέσουν αλλεργικές αντιδράσεις σε ευαίσθητα άτομα, ιδιαίτερα σε εκείνα που ασχολούνται με τη συγκομιδή και την επεξεργασία των καλλιεργειών.

Εκτός από τις γεωργικές επιπτώσεις, οι μύκητες όπως το *Fusarium* και το *Botrytis* ενδέχεται να αποτελούν απειλή για την ανθρώπινη υγεία, μέσω των τοξινών που παράγουν. Για παράδειγμα, το *Fusarium* προκαλεί τη μόλυνση των τροφίμων μέσω της παραγωγής μύκητων και τοξινών, ενώ το *Botrytis* μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη μυκητιακών αλλεργιών. Ο έλεγχος αυτών των μυκήτων μέσω φυσικών μεθόδων, όπως η χρήση του *Trichoderma*, θεωρείται μια υποσχόμενη λύση για την προστασία των καλλιεργειών και τη μείωση των κινδύνων για την υγεία.

1.3 Ανάλυση των μηχανισμών δράσης και εξάπλωσης των παθογόνων μυκήτων

Οι παθογόνοι μύκητες, όπως το *Fusarium*, το *Verticillium* και το *Botrytis*, επιτυγχάνουν την προσβολή των φυτών μέσω εξειδικευμένων μηχανισμών δράσης και εξάπλωσης, οι οποίοι περιλαμβάνουν την παραγωγή ενζύμων και τοξινών, την είσοδο στον οργανισμό του φυτού και την εξάπλωση μέσω των κονιδίων ή των σπορίων τους. Αυτοί οι μηχανισμοί καθιστούν τους παθογόνους μύκητες πολύ επικίνδυνους για τις καλλιέργειες και απαιτούν στρατηγικές για την αποτροπή τους.

Ο μηχανισμός δράσης των παθογόνων μυκήτων ξεκινά με την εισβολή στον ξενιστή τους. Οι μύκητες εισέρχονται στο φυτό μέσω της επιδερμίδας ή μέσω των ριζών, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα ένζυμα και τοξίνες για να διασπάσουν τα κυτταρικά τοιχώματα και να εισχωρήσουν στον ιστό του φυτού. Το *Fusarium* και το *Verticillium*, για παράδειγμα, παράγουν ένζυμα όπως τις κυτταρινάσες, τις γλυκανάσες και τις χιτινάσες, τα οποία διασπούν τις κυτταρικές δομές του φυτού και επιτρέπουν στους μύκητες να αναπτυχθούν μέσα στους αγωγούς του φυτού (Miller & Lumsden, 2014).

Ο *Fusarium* και το *Verticillium* χρησιμοποιούν επίσης την παραγωγή τοξινών για να επιτύχουν τη νέα μόλυνση. Οι τοξίνες αυτές, όπως η fumonisin (που παράγεται από το *Fusarium*) και η verticillamide (από το *Verticillium*), εμποδίζουν τις φυσικές άμυνες του φυτού και προκαλούν κυτταρική βλάβη, διαταράσσοντας τη λειτουργία του αγγειακού συστήματος του φυτού (Gong et al., 2004). Αυτές οι τοξίνες έχουν επίσης σοβαρές συνέπειες για τα ζώα και τους ανθρώπους, καθώς είναι τοξικές και μπορούν να προκαλέσουν ασθένειες σε περιπτώσεις κατανάλωσης μολυσμένων προϊόντων.

Από την άλλη πλευρά, το *Botrytis cinerea* χρησιμοποιεί μια διαφορετική στρατηγική εξάπλωσης. Ο μύκητας αυτός παράγει κονίδια (μικρά σπόρια), τα οποία διασπείρονται μέσω του αέρα ή με την επαφή με μολυσμένα φυτά. Αυτά τα κονίδια εισέρχονται εύκολα σε νέα φυτά όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές (υγρασία και χαμηλές θερμοκρασίες). Ο *Botrytis* αναπτύσσεται κυρίως στα εξωτερικά μέρη των φυτών, προκαλώντας σήψη και την χαρακτηριστική γκρίζα μούχλα στα φύλλα, τους καρπούς και τα άνθη (Williamson et al., 2007). Η εξάπλωση του *Botrytis* είναι γρήγορη και

μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες ζημιές στις καλλιέργειες, ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλής υγρασίας.

Η εξάπλωση των παθογόνων μυκήτων επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η παρουσία άλλων οργανισμών. Η διάδοση των μυκήτων γίνεται κυρίως μέσω των σπορίων τους, τα οποία μεταφέρονται μέσω του αέρα, του νερού ή μέσω της επαφής με μολυσμένα φυτά ή εργαλεία (Higgins & Hoh, 2015). Ορισμένοι μύκητες, όπως το *Fusarium*, έχουν τη δυνατότητα να επιβιώνουν στο έδαφος για πολλά χρόνια σε μορφή σπορίων, διατηρώντας τη δυνατότητα μόλυνσης και καθιστώντας τη διαχείριση της μόλυνσης ιδιαίτερα δύσκολη.

Οι στρατηγικές εξάπλωσης των μυκήτων και η ικανότητά τους να επιβιώνουν σε δυσμενείς συνθήκες καθιστούν την πρόληψη και την έγκαιρη διάγνωση της μόλυνσης εξαιρετικά δύσκολες. Η χρήση βιολογικών παραγόντων ελέγχου, όπως το *Trichoderma*, που μπορεί να ανταγωνιστεί τους παθογόνους μύκητες για πόρους και να παράγει τοξικές ουσίες για την καταπολέμησή τους, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη μείωση της εξάπλωσης των μυκητιακών ασθενειών (Larkin & Fravel, 2002).

1.4 Βιολογικός κύκλος, ταξινόμηση, συμπτώματα και χαρακτηριστικά των παθογόνων μυκήτων

Ο βιολογικός κύκλος των παθογόνων μυκήτων είναι καθοριστικός για την κατανόηση της ανάπτυξης και εξάπλωσής τους. Κάθε μύκητας ακολουθεί ένα διαφορετικό κύκλο ζωής, αλλά όλοι οι παθογόνοι μύκητες αναπτύσσονται μέσω παραγωγής σπορίων που εξασφαλίζουν την επιβίωσή τους σε διάφορες συνθήκες και τη δυνατότητα εξάπλωσης σε νέες περιοχές. Οι μύκητες *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis* έχουν διαφορετικούς βιολογικούς κύκλους, αν και όλοι περιλαμβάνουν τη δημιουργία σπορίων που διαδίδονται μέσω του αέρα ή του νερού, καθώς και την ικανότητα των μυκήτων να επιβιώνουν σε διάφορα περιβάλλοντα.

Το *Fusarium* έχει έναν εξαιρετικά προσαρμοστικό βιολογικό κύκλο. Τα κονίδια του *Fusarium* σχηματίζονται στις επιφάνειες των φυτών ή στα έδαφος και, όταν βρουν κατάλληλες συνθήκες, βλασταίνουν και εισβάλλουν στο φυτό. Ο μύκητας μπορεί να

παραμένει στο έδαφος για πολλά χρόνια, σε μορφή σπόρων ή χλαμυδοσπορίων, περιμένοντας τις κατάλληλες συνθήκες για να αναπτυχθεί και να προκαλέσει νέες μολύνσεις (Miller & Lumsden, 2014).

Ο *Verticillium* έχει παρόμοιο κύκλο ζωής, αλλά είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό και μπορεί να επιβιώσει για πολλά χρόνια στο έδαφος ως μυκήλιο ή σπόρια, χωρίς να χρειάζεται νέο ξενιστή για να αναπτυχθεί. Οι μύκητες εισβάλλουν στους αγωγούς του φυτού και εμποδίζουν τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών και νερού, προκαλώντας τα χαρακτηριστικά συμπτώματα της ασθένειας (Klosterman et al., 2009).

Το *Botrytis cinerea* έχει έναν πιο σύντομο βιολογικό κύκλο και είναι ικανό να αναπτύσσεται γρήγορα σε υγρές συνθήκες. Τα κονίδια του *Botrytis* μεταφέρονται μέσω του αέρα ή της επαφής με μολυσμένα φυτά και αναπτύσσονται στις επιφάνειες των φυτών, προκαλώντας τη σήψη τους. Ο κύκλος ζωής του *Botrytis* ολοκληρώνεται με την παραγωγή νέων κονιδίων, τα οποία εξάγονται και διαδίδονται για να μολύνουν νέα φυτά (Williamson et al., 2007).

1.4.1 Ταξινόμηση

Οι παθογόνοι μύκητες *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis* ανήκουν σε διαφορετικές οικογένειες και τάξεις του φυλογενετικού δέντρου των μυκήτων. Το *Fusarium* ανήκει στην οικογένεια *Nectriaceae* και είναι μέλος της τάξης *Hypocreales*, ενώ το *Verticillium* ανήκει στην οικογένεια *Plectosphaerellaceae* και στην τάξη *Eurotiales*. Ο *Botrytis cinerea*, από την άλλη πλευρά, ανήκει στην οικογένεια *Sclerotiniaceae* και στην τάξη *Leotiomycetes* (Sutton, 1980; Cole et al., 2003).

1.4.2 Συμπτώματα

Τα συμπτώματα που προκαλούν οι παθογόνοι μύκητες διαφέρουν ανάλογα με τον μύκητα, αλλά γενικά περιλαμβάνουν μαρασμό, κιτρίνισμα των φύλλων και σήψη των καρπών ή των ριζών. Στο *Fusarium*, τα συμπτώματα περιλαμβάνουν μαρασμό και κιτρίνισμα των φύλλων, με τη σταδιακή απόπτωση της καλλιέργειας. Ειδικότερα, το *Fusarium* προκαλεί καταστροφή του αγγειακού συστήματος του φυτού, προκαλώντας παρακώλυση της θρέψης και του νερού (Gong et al., 2004). Στο *Verticillium*, τα συμπτώματα είναι παρόμοια, με μαρασμό και κιτρίνισμα των φύλλων, καθώς και

διαταραχή στην αγωγή του νερού και των θρεπτικών συστατικών (Klosterman et al., 2009). Το *Botrytis cinerea* προκαλεί γκρίζα μούχλα στους καρπούς και τα άνθη, με αποτέλεσμα τη σήψη τους και την αποσύνθεσή τους, ειδικά σε συνθήκες υψηλής υγρασίας (Williamson et al., 2007).

1.4.3 Χαρακτηριστικά

Οι μύκητες *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis* έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που τους καθιστούν επικίνδυνους για τις καλλιέργειες. Το *Fusarium* παράγει τοξίνες, όπως την fumonisin, οι οποίες είναι τοξικές για τα ζώα και τους ανθρώπους (Gong et al., 2004). Ο *Verticillium* είναι εξαιρετικά ανθεκτικός και μπορεί να παραμείνει στο έδαφος για πολλά χρόνια, κάνοντάς τον δύσκολο στον έλεγχο (Klosterman et al., 2009). Ο *Botrytis* παράγει μεγάλο αριθμό σπορίων, που διασπείρονται γρήγορα μέσω του αέρα και μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες μολύνσεις (Williamson et al., 2007).

1.5 Μέθοδοι καταπολέμησης: χημικοί και βιολογικοί τρόποι, με έμφαση στο τριχόδερμα ως βιολογικό μέσο καταπολέμησης

Η καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων που προσβάλλουν τις καλλιέργειες είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της παραγωγής και της ποιότητας των γεωργικών προϊόντων. Οι παραδοσιακές μέθοδοι καταπολέμησης περιλαμβάνουν τη χρήση χημικών μυκητοκτόνων, ωστόσο η συνεχής χρήση αυτών των χημικών ουσιών έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα εστιάζει περισσότερο στους βιολογικούς παράγοντες ελέγχου, όπως το τριχόδερμα, που προσφέρουν μια πιο βιώσιμη και οικολογική λύση για τη διαχείριση των φυτικών ασθενειών.

1.5.1 Χημικές μέθοδοι καταπολέμησης

Οι χημικές μέθοδοι καταπολέμησης των παθογόνων μυκήτων περιλαμβάνουν τη χρήση μυκητοκτόνων που καταστέλλουν ή καταστρέφουν τους μύκητες. Τα μυκητοκτόνα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, όπως τα εκλεκτικά και τα ευρέως

φάσματος μυκητοκτόνα. Τα εκλεκτικά μυκητοκτόνα στοχεύουν σε συγκεκριμένους παθογόνους μύκητες, ενώ τα ευρέως φάσματος καταστρέφουν μια ευρύτερη γκάμα μυκήτων (Chardon, 2018). Οι χημικοί έλεγχοι μπορεί να είναι αποτελεσματικοί για την καταπολέμηση των μυκητιακών ασθενειών, αλλά η υπερβολική και αλόγιστη χρήση αυτών των ουσιών έχει προκαλέσει ανθεκτικότητα στους μύκητες και μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση του εδάφους και των υδάτων (Jørgensen et al., 2019).

Επιπλέον, τα χημικά μυκητοκτόνα μπορούν να έχουν τοξικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία και τα ωφέλιμα οργανισμικά, μειώνοντας τη βιοποικιλότητα και προκαλώντας διαταραχές στο οικοσύστημα. Για αυτούς τους λόγους, η ανάγκη για εναλλακτικές μεθόδους καταπολέμησης, όπως οι βιολογικοί παράγοντες ελέγχου, είναι πιο επιτακτική από ποτέ.

1.5.2 Βιολογικές μέθοδοι καταπολέμησης

Οι βιολογικές μέθοδοι καταπολέμησης των παθογόνων μυκήτων χρησιμοποιούν οργανισμούς ή φυσικές ουσίες για την καταπολέμηση των μυκητιακών ασθενειών. Ορισμένοι από αυτούς τους παράγοντες περιλαμβάνουν άλλα είδη μυκήτων, όπως το τριχόδερμα, καθώς και βακτήρια και έντομα. Το πλεονέκτημα των βιολογικών μεθόδων είναι ότι προσφέρουν μια πιο οικολογική και βιώσιμη λύση, χωρίς να προκαλούν βλάβη στο περιβάλλον ή στους ανθρώπους.

Το τριχόδερμα είναι ένας από τους πιο γνωστούς βιολογικούς παράγοντες ελέγχου, που χρησιμοποιείται ευρέως για την καταπολέμηση παθογόνων μυκήτων σε καλλιέργειες. Το τριχόδερμα είναι ικανό να αναπτύσσεται ταχέως στο έδαφος και να ανταγωνίζεται τα παθογόνα μυκητία, καταναλώνοντας τους θρεπτικούς πόρους και παράγοντας ουσίες που αναστέλλουν την ανάπτυξή τους (Harman, 2006). Ο μηχανισμός δράσης του τριχοδέρματος περιλαμβάνει την ανταγωνιστικότητα, την αντιβιοτική δράση και τη μυκοπαρασιτική δράση. Το τριχόδερμα παράγει μια σειρά από ενζύμια, όπως κυτταρινάσες και χιτινάσες, τα οποία διασπούν τα κυτταρικά τοιχώματα των παθογόνων μυκήτων και τα καταστρέφουν (Harman et al., 2004). Επιπλέον, ορισμένα στελέχη του τριχοδέρματος έχουν την ικανότητα να παράγουν δευτερογενείς μεταβολίτες με αντιμυκητιακή δράση, που συμβάλλουν στην καταπολέμηση των φυτικών ασθενειών.

Η βιολογική καταπολέμηση μέσω τριχοδέρματος προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα. Είναι ασφαλής για το περιβάλλον και τους ανθρώπους, δεν προκαλεί ανθεκτικότητα στους μύκητες, και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα στάδια ανάπτυξης των φυτών, τόσο στο έδαφος όσο και στις καλλιέργειες (Larkin & Fravel, 2002). Επίσης, το τριχόδερμα ενισχύει την άμυνα των φυτών, αυξάνοντας τη φυσική τους αντίσταση στις μολύνσεις, κάτι που δεν επιτυγχάνεται με τη χρήση χημικών μυκητοκτόνων.

Το τριχόδερμα έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορες καλλιέργειες, όπως το καλαμπόκι, το σιτάρι, οι ντομάτες και τα κηπευτικά, όπου έχει μειώσει την ανάπτυξη των παθογόνων μυκήτων και έχει βελτιώσει την απόδοση των φυτών (Vinale et al., 2013). Το τριχόδερμα μπορεί να εφαρμοστεί είτε ως σπόριο, είτε ως ενέσιμη μορφή στο έδαφος ή σε μορφή σκευασμάτων που περιέχουν ζωντανά κύτταρα του οργανισμού.

1.5.3 Σημαντικότητα της βιολογικής καταπολέμησης με τριχόδερμα

Η χρήση του τριχοδέρματος ως βιολογικό μέσο καταπολέμησης των παθογόνων μυκήτων παρέχει μια οικολογική λύση στα προβλήματα που προκαλούν οι χημικοί έλεγχοι. Καθώς οι κλιματικές συνθήκες και οι περιορισμοί στη χρήση χημικών παραγόντων ενισχύουν την ανάγκη για βιολογικές λύσεις, το τριχόδερμα αναδεικνύεται ως μια αξιόπιστη και βιώσιμη επιλογή για τη γεωργία του μέλλοντος (Vinale et al., 2014). Ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι χημικές ουσίες αποδεικνύονται αναποτελεσματικές λόγω της ανθεκτικότητας των παθογόνων, το τριχόδερμα προσφέρει ένα ισχυρό εργαλείο ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΓΕΝΟΣ ΤΡΙΧΟΔΕΡΜΑ (TRICHODERMA)

2.1 Περιγραφή του γένους *Trichoderma* και των βασικών ειδών του

Το γένος *Trichoderma* περιλαμβάνει μια ομάδα μυκήτων που είναι ευρέως γνωστοί για τις αντιμυκητιακές τους ιδιότητες και χρησιμοποιούνται εκτενώς ως βιολογικοί παράγοντες ελέγχου. Το *Trichoderma* είναι γνωστό για την ικανότητά του να καταπολεμά διάφορους παθογόνους μύκητες, προστατεύοντας έτσι τις καλλιέργειες από μυκητιακές ασθένειες. Εκτός από τις αντιμυκητιακές του δράσεις, το *Trichoderma* παράγει επίσης ενζυμικές ουσίες που επιτρέπουν την αποδόμηση οργανικών υλικών, καθιστώντας το χρήσιμο και στη βιοαποδόμηση και στην ανακύκλωση οργανικών υπολειμμάτων.

Το γένος *Trichoderma* ανήκει στην οικογένεια *Hypocreaceae* της τάξης *Hypocreales*, και τα μέλη του είναι σαπροφυτικοί μύκητες, ικανή να αναπτύσσονται σε ποικιλία υποστρωμάτων, τόσο οργανικών όσο και ανόργανων. Τα χαρακτηριστικά του *Trichoderma* περιλαμβάνουν την ικανότητα να αναπτύσσεται γρήγορα, την παραγωγή κονιδίων και τη δυνατότητα να αναπτύσσεται σε διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος (Harman et al., 2004).

Το γένος περιλαμβάνει αρκετά είδη που διαφέρουν σε χαρακτηριστικά όπως η ικανότητα για παραγωγή ενζύμων, η θερμοκρασία ανάπτυξης και οι στρατηγικές ανταγωνισμού για θρεπτικά συστατικά. Εδώ αναφέρονται ορισμένα από τα πιο σημαντικά και μελετημένα είδη του γένους *Trichoderma*:

1. *Trichoderma scalesiae*: Το είδος αυτό είναι γνωστό για τη δράση του κατά διαφόρων παθογόνων μυκήτων, ιδιαίτερα σε καλλιέργειες όπως το ρύζι και τα λαχανικά. Παράγει ισχυρές αντιμυκητιακές ουσίες και ένζυμα που αποδομούν κυτταρίνες, κάνοντάς το ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την καταπολέμηση του *Fusarium* και άλλων εδαφικών μυκήτων (Sivasithamparam et al., 2013).
2. *Trichoderma inhamatum*: Το *Trichoderma inhamatum* έχει δείξει σημαντική αποτελεσματικότητα στη βιολογική καταπολέμηση του *Rhizoctonia solani*, ενός μύκητα που προσβάλλει ρίζες φυτών. Είναι γνωστό για την παραγωγή αντιβιοτικών ουσιών και για την ταχεία ανάπτυξή του σε διάφορα υποστρώματα, γεγονός που του επιτρέπει να ανταγωνίζεται αποτελεσματικά τα παθογόνα (Baker & Cook, 1974).
3. *Trichoderma simonsii*: Αυτό το είδος έχει αναγνωριστεί για τη δυνατότητά του να καταπολεμά μυκητιακές ασθένειες σε φυτά καλλιέργειας, όπως το καλαμπόκι και το σιτάρι. Το *Trichoderma simonsii* χρησιμοποιεί μια ποικιλία στρατηγικών για να αναστέλλει την ανάπτυξη των παθογόνων μυκήτων, περιλαμβανομένης της εκπομπής αντιβιοτικών ουσιών και της άμεσης ανταγωνιστικότητας για θρεπτικά συστατικά (Harman, 2006).
4. *Trichoderma atrobrunneum*: Το *Trichoderma atrobrunneum* είναι γνωστό για την ικανότητά του να παράγει λυτικά ένζυμα που διασπούν τα κυτταρικά τοιχώματα των παθογόνων μυκήτων, καθιστώντας το αποτελεσματικό στην καταπολέμηση διαφόρων μυκητιακών ασθενειών σε φυτά. Αυτό το είδος έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην αγροτική βιοτεχνολογία, με εφαρμογές στη βελτίωση της ανθεκτικότητας των φυτών και τη μείωση της εξάρτησης από χημικά μυκητοκτόνα (Vinale et al., 2014).

Οι στρατηγικές του *Trichoderma* για την καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων περιλαμβάνουν τον ανταγωνισμό για θρεπτικά συστατικά, την αντιβιοτική δράση, την παραγωγή λυτικών ενζύμων, και τον υπερπαρασιτισμό, δηλαδή την άμεση προσκόλληση και καταστροφή των μυκητιακών κυττάρων των παθογόνων. Επιπλέον,

το *Trichoderma* ενισχύει τις φυσικές άμυνες των φυτών μέσω της παραγωγής πρωτεϊνών και άλλων δευτερογενών μεταβολιτών που ενισχύουν την αντίσταση των φυτών στις μολύνσεις (Harman et al., 2004).

Τα διαφορετικά είδη του *Trichoderma* προσφέρουν ποικιλία επιλογών για τη βιολογική καταπολέμηση, ανάλογα με τις ανάγκες και τις συνθήκες της κάθε καλλιέργειας. Η επιλογή του κατάλληλου στελέχους μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και την ανθεκτικότητα των φυτών, ενώ παράλληλα μειώνει την ανάγκη για χημικά μυκητοκτόνα.

2.2 Βιολογικές ιδιότητες και μηχανισμοί δράσης του τριχοδέρματος

Το *Trichoderma* είναι ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό βιολογικό εργαλείο για την καταπολέμηση φυτικών ασθενειών, λόγω των μοναδικών βιολογικών του ιδιοτήτων και των πολυάριθμων μηχανισμών δράσης που χρησιμοποιεί. Αυτές οι ιδιότητες του επιτρέπουν να ανταγωνίζεται και να καταστρέφει παθογόνους μύκητες, να ενισχύει τις φυσικές άμυνες των φυτών και να συμβάλλει στην ενίσχυση της βιοποικιλότητας του εδάφους.

2.2.1 Βιολογικές ιδιότητες του *Trichoderma*

Το *Trichoderma* είναι γνωστό για την ικανότητά του να αναπτύσσεται γρήγορα, γεγονός που του επιτρέπει να καταλαμβάνει τους διαθέσιμους πόρους στο έδαφος ή στην επιφάνεια των φυτών πριν από τα παθογόνα. Επιπλέον, το *Trichoderma* είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε ποικιλία περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως οι υψηλές θερμοκρασίες και η ξηρασία, που το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές σε διαφορετικά γεωργικά περιβάλλοντα (Harman et al., 2004). Όσον αφορά τη μοριακή του σύνθεση, παράγει ένζυμα, όπως κυτταρινάσες, χιτινάσες και λιπολυτικά ένζυμα, που του επιτρέπουν να αποδομεί οργανικά υλικά και να αφομοιώνει θρεπτικά συστατικά (Harman et al., 2004).

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του *Trichoderma* είναι η αντιμυκητιακή του δράση. Παράγει διάφορες δευτερογενείς μεταβολίτες, όπως οι

αντιβιοτικοί και αντιμυκητιακοί μεταβολίτες που καταστέλλουν την ανάπτυξη άλλων μυκήτων. Αυτοί οι μεταβολίτες περιλαμβάνουν ουσίες όπως η trichodermin, η οποία είναι γνωστή για την τοξικότητά της στους παθογόνους μύκητες (Harman et al., 2004). Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν ένα ισχυρό εργαλείο στην καταπολέμηση φυτικών ασθενειών, ιδίως εκείνων που προκαλούνται από μυκητιακούς παράγοντες.

2.2.2 Μηχανισμοί δράσης του Trichoderma

Οι μηχανισμοί δράσης του Trichoderma για την καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων είναι ποικίλοι και περιλαμβάνουν την ανταγωνιστικότητα, την αντιβιοτική δράση, την παραγωγή λυτικών ενζύμων, και τον υπερπαρασιτισμό των παθογόνων μυκήτων.

1. **Ανταγωνιστικότητα:** Το Trichoderma ανταγωνίζεται τα παθογόνα μυκητιακά είδη για τους διαθέσιμους πόρους (θρεπτικά συστατικά, νερό και χώρο) στην καλλιέργεια ή στο έδαφος. Χάρη στην ταχύτητα ανάπτυξής του, το Trichoderma καταλαμβάνει γρήγορα το περιβάλλον και αποτρέπει την ανάπτυξη των παθογόνων μυκήτων, προλαμβάνοντας τη μόλυνση των φυτών (Larkin & Fravel, 2002).
2. **Αντιβιοτική δράση:** Το Trichoderma παράγει μια ποικιλία αντιβιοτικών και άλλων δευτερογενών μεταβολιτών που αναστέλλουν την ανάπτυξη των παθογόνων μυκήτων. Ορισμένα στελέχη του Trichoderma παράγουν την trichodermin, μια ουσία που είναι τοξική για μυκητιακούς οργανισμούς, ενώ άλλοι παράγουν ουσίες όπως η gliotoxin που μπλοκάρουν την ανάπτυξη των παθογόνων (Vinale et al., 2013).
3. **Παραγωγή λυτικών ενζύμων:** Το Trichoderma παράγει λυτικά ένζυμα όπως κυτταρινάσες, χιτινάσες και γλυκανάσες που διασπούν τα κυτταρικά τοιχώματα των μυκήτων και τους καταστρέφουν. Αυτά τα ένζυμα διασπούν τους πολυσακχαρίτες που βρίσκονται στα κυτταρικά τοιχώματα των παθογόνων, εμποδίζοντας την ανάπτυξή τους και οδηγώντας τους στην αποσύνθεση (Harman et al., 2004).
4. **Υπερπαρασιτισμός:** Μία από τις πιο εντυπωσιακές στρατηγικές του Trichoderma είναι ο υπερπαρασιτισμός, δηλαδή η ικανότητά του να "καβαλάει"

τα παθογόνα μυκήτια και να τα καταστρέφει από μέσα. Το *Trichoderma* προσκολλάται στην επιφάνεια των παθογόνων μυκήτων και αναπτύσσεται επάνω τους, καταναλώνοντάς τους για θρεπτικά συστατικά και προκαλώντας τους νέκρωση (Vinale et al., 2013).

2.2.3 Ενίσχυση της άμυνας των φυτών

Εκτός από τους μηχανισμούς άμεσης δράσης κατά των παθογόνων, το *Trichoderma* ενισχύει τις φυσικές άμυνες των φυτών. Όταν τα φυτά εκτίθενται στο *Trichoderma*, ενεργοποιούνται μηχανισμοί άμυνας που αυξάνουν την παραγωγή φυτικών πρωτεϊνών, όπως η βήτα-1,3-γλυκάνη και η πρωτεΐνη PR-5, οι οποίες ενισχύουν την αντίσταση των φυτών στις μολύνσεις. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως έμμεσος βιολογικός έλεγχος και βοηθά τα φυτά να αναπτύξουν μια πιο ισχυρή άμυνα κατά των μυκητιακών ασθενειών (Larkin & Fravel, 2002).

2.3 Οικολογικός ρόλος και συμβίωση με φυτά

Το *Trichoderma* παίζει ένα σημαντικό οικολογικό ρόλο στο έδαφος και στους φυτικούς οργανισμούς, λειτουργώντας ως φυσικός παράγοντας ελέγχου των μυκητιακών ασθενειών. Εκτός από τις αντιμυκητιακές του ιδιότητες, το *Trichoderma* έχει αναγνωριστεί για την ικανότητά του να ενισχύει την υγεία των φυτών μέσω διαφόρων οικολογικών και συμβιωτικών αλληλεπιδράσεων.

2.3.1 Οικολογικός ρόλος του *Trichoderma*

Το *Trichoderma* είναι σαπροφυτικός μύκητας που ζει κυρίως σε αποσυντεθειμένα οργανικά υλικά και έχει ρόλο στην αποικοδόμηση των πολυσακχαριτών, των λιπών και των πρωτεϊνών στο έδαφος. Καθώς αποικοδομεί την οργανική ύλη, βοηθά στην ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών, βελτιώνοντας τη θρεπτική κατάσταση του εδάφους και τη δομή του (Harman, 2006). Αυτή η ικανότητα το καθιστά πολύτιμο για την αναγέννηση του εδάφους και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας.

Το *Trichoderma* ανταγωνίζεται άλλους μικροοργανισμούς για τους πόρους του εδάφους, αναπτύσσοντας γρήγορα και καταλαμβάνοντας τον χώρο των παθογόνων.

Επίσης, παράγει αντιβιοτικές και αντιμυκητιακές ουσίες, οι οποίες καταστέλλουν την ανάπτυξη άλλων ανεπιθύμητων μυκήτων και βακτηρίων στο έδαφος (Harman et al., 2004). Αυτή η ικανότητα για ανταγωνιστική επιβολή είναι ένας από τους βασικούς μηχανισμούς μέσω των οποίων το *Trichoderma* διατηρεί την οικολογική του θέση και ενισχύει τη φυσική του δράση κατά των φυτικών ασθενειών.

2.3.2 Συμβίωση του *Trichoderma* με τα φυτά

Το *Trichoderma* αναπτύσσει συμβιωτική σχέση με τα φυτά, ενισχύοντας την αντίστασή τους σε φυτικές ασθένειες και επιδρώντας θετικά στην ανάπτυξή τους. Όταν τα φυτά εκτίθενται στο *Trichoderma*, ενεργοποιούνται διάφοροι μηχανισμοί άμυνας που αυξάνουν την ικανότητα των φυτών να ανταποκριθούν στις μυκητιακές προσβολές. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως έμμεσος βιολογικός έλεγχος (Larkin & Fravel, 2002).

Η συμβίωση μεταξύ του *Trichoderma* και των φυτών προάγεται μέσω της προστασίας και της ενίσχυσης της ανάπτυξης. Το *Trichoderma* ανταγωνίζεται τους παθογόνους μικροοργανισμούς στο έδαφος, μειώνοντας την πιθανότητα μόλυνσης του φυτού από επιβλαβείς μύκητες. Επίσης, το *Trichoderma* έχει την ικανότητα να επηρεάζει θετικά τις φυτοανοσολογικές αντιδράσεις, ενισχύοντας την παραγωγή πρωτεϊνών άμυνας, όπως οι PR πρωτεΐνες (pathogenesis-related proteins), οι οποίες συμβάλλουν στην καταπολέμηση των ασθενειών (Harman et al., 2004).

Αναφορικά με την ανάπτυξη των φυτών, το *Trichoderma* μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα των φυτών να απορροφούν θρεπτικά συστατικά από το έδαφος. Η παρουσία του *Trichoderma* στο ριζικό σύστημα μπορεί να αυξήσει την απορρόφηση θρεπτικών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερη ανάπτυξη και αυξημένη ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές πιέσεις (Vinale et al., 2014).

2.3.3 Αλληλεπίδραση του *Trichoderma* με τα ριζικά συστήματα

Η αλληλεπίδραση του *Trichoderma* με τα ριζικά συστήματα των φυτών είναι μια από τις πιο μελετημένες όψεις της συμβίωσης. Το *Trichoderma* μπορεί να εγκαθίσταται στις ρίζες των φυτών, όπου αναπτύσσεται και προστατεύει το φυτό από επιβλαβείς μικροοργανισμούς. Επιπλέον, το *Trichoderma* μπορεί να ενισχύσει την

αντοχή των ριζών στις προσβολές από παθογόνους μύκητες, αποτρέποντας την εξάπλωση ασθενειών όπως το *Rhizoctonia solani* και το *Pythium* spp. (Harman et al., 2004).

Η αποικιστική δράση του *Trichoderma* στην επιφάνεια των ριζών δημιουργεί μια φυσική ασπίδα προστασίας γύρω από το φυτό, αποτρέποντας τα παθογόνα από το να προσβάλουν το ριζικό σύστημα. Ταυτόχρονα, η παραγωγή λυτικών ενζύμων που διασπούν τα κυτταρικά τοιχώματα των μυκήτων συμβάλλει στη μείωση των βλαβών που προκαλούνται από τους μύκητες του εδάφους (Vinale et al., 2014).

2.4 Σκοπός του τριχοδέρματος στη βιολογική καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων: τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του

Το *Trichoderma* αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς οργανισμούς για τη βιολογική καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων, λόγω των εξαιρετικών αντιμυκητιακών του ιδιοτήτων και της ικανότητάς του να ενισχύει την υγεία των φυτών. Η εφαρμογή του τριχοδέρματος ως βιολογικό μέσο ελέγχου αποτελεί μια υποσχόμενη εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές χημικές μεθόδους, οι οποίες συχνά προκαλούν ανθεκτικότητα στους μύκητες και έχουν αρνητικές περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις. Ο σκοπός του τριχοδέρματος είναι να περιορίσει την εξάπλωση των μυκητιακών ασθενειών μέσω φυσικών διαδικασιών, προσφέροντας έναν ασφαλή και βιώσιμο τρόπο προστασίας των καλλιεργειών.

2.4.1 Πλεονεκτήματα του *Trichoderma* στη βιολογική καταπολέμηση

1. Αντιμυκητιακή δράση και ανταγωνιστικότητα: Το *Trichoderma* ανταγωνίζεται με άλλους παθογόνους μύκητες για θρεπτικά συστατικά και χώρο, αποτρέποντας έτσι την ανάπτυξή τους. Χάρη στην ταχεία ανάπτυξή του, το *Trichoderma* έχει την ικανότητα να κυριαρχεί στο περιβάλλον και να μειώνει τις ευκαιρίες των παθογόνων να προσβάλουν τα φυτά (Harman, 2006). Η ανταγωνιστική του επιβολή, σε συνδυασμό με την παραγωγή λυτικών ενζύμων,

του επιτρέπει να καταστρέφει τα κυτταρικά τοιχώματα των μυκήτων και να αναστέλλει την ανάπτυξή τους (Larkin & Fravel, 2002).

2. Μείωση της εξάρτησης από χημικά μυκητοκτόνα: Η χρήση του *Trichoderma* ως βιολογικό μέσο ελέγχου μειώνει την ανάγκη για χημικά μυκητοκτόνα, τα οποία έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Ειδικότερα, η χρήση βιολογικών μεθόδων μειώνει την ένταση της ρύπανσης στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, ενώ συμβάλλει στην ενίσχυση της βιοποικιλότητας των οικοσυστημάτων (Vinale et al., 2014).
3. Αύξηση της αντίστασης των φυτών: Εκτός από την καταπολέμηση των παθογόνων, το *Trichoderma* ενισχύει τις φυσικές άμυνες των φυτών. Όταν τα φυτά εκτίθενται σε *Trichoderma*, παράγουν υψηλότερα επίπεδα φυτοάμυνας, όπως PR πρωτεΐνες και άλλες χημικές ενώσεις που ενισχύουν τη φυσική αντίσταση στις μολύνσεις (Harman et al., 2004).
4. Προστασία από μυκητιακές ασθένειες και βελτίωση της ανάπτυξης: Εκτός από την αντιμυκητιακή δράση του, το *Trichoderma* έχει την ικανότητα να βελτιώνει την ανάπτυξη των φυτών, ενισχύοντας τη ρίζα τους και τη συνολική τους υγεία. Αυτή η βελτίωση της φυτικής ανάπτυξης οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις και βελτίωση της ποιότητας των καλλιεργειών (Larkin & Fravel, 2002).

2.4.2 Μειονεκτήματα του *Trichoderma* στη βιολογική καταπολέμηση

1. Εξάρτηση από περιβαλλοντικές συνθήκες: Η αποτελεσματικότητα του *Trichoderma* εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και η pH του εδάφους. Σε περιοχές με πολύ ξηρές ή ακραίες θερμοκρασίες, η ανάπτυξη του *Trichoderma* μπορεί να μειωθεί, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητά του (Harman et al., 2004). Επομένως, η εφαρμογή του απαιτεί κατάλληλες συνθήκες για να είναι αποδοτική.
2. Συγκεκριμένα στελέχη για συγκεκριμένες ασθένειες: Ενώ το *Trichoderma* είναι γενικά αποτελεσματικό κατά πολλών παθογόνων μυκήτων, η δράση του μπορεί να περιορίζεται σε ορισμένα είδη μυκήτων και δεν είναι πάντα εξίσου αποτελεσματικό κατά όλων των μυκητιακών ασθενειών. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από το στέλεχος του *Trichoderma* που

χρησιμοποιείται και τις ιδιότητές του, όπως η ικανότητα παραγωγής αντιβιοτικών (Harman et al., 2004).

3. Αλληλεπίδραση με άλλους οργανισμούς: Σε μερικές περιπτώσεις, το *Trichoderma* μπορεί να αλληλεπιδράσει με άλλους μικροοργανισμούς στο έδαφος, όπως τα βακτήρια ή άλλα ωφέλιμα μύκητα, με αποτέλεσμα την ανατροπή των φυσικών οικολογικών ισορροπιών. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορεί να περιορίσουν την ικανότητά του να ανταγωνίζεται τους παθογόνους ή να βελτιώσει την ανάπτυξη των φυτών (Vinale et al., 2013).

Το *Trichoderma* είναι ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό και οικολογικό εργαλείο για τη βιολογική καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων. Παρά τα πλεονεκτήματά του, η εφαρμογή του απαιτεί προσεκτική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και της επιλογής των σωστών στελεχών για κάθε περίπτωση. Με τη σωστή χρήση, το *Trichoderma* μπορεί να προσφέρει μια βιώσιμη και ασφαλή λύση για την προστασία των καλλιεργειών, μειώνοντας την εξάρτηση από χημικά μυκητοκτόνα και συμβάλλοντας στη βιώσιμη γεωργία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΥΚΗΤΟΚΤΟΝΟΥ ΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΡΙΧΟΔΕΡΜΑΤΟΣ

3.1 Ανταγωνισμός για θρεπτικά συστατικά και χώρο μεταξύ του τριχοδέρματος και των παθογόνων μυκήτων

Ο ανταγωνισμός για θρεπτικά συστατικά και χώρο είναι ένας από τους κύριους μηχανισμούς μέσω των οποίων το *Trichoderma* καταπολεμά τους παθογόνους μύκητες. Όταν το *Trichoderma* εγκαθίσταται σε έναν περιβάλλον, όπως το έδαφος ή η επιφάνεια των φυτών, έρχεται σε άμεσο ανταγωνισμό με άλλους μικροοργανισμούς για τους διαθέσιμους πόρους, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και άλλες οργανικές ουσίες. Το *Trichoderma* έχει την ικανότητα να αναπτύσσεται γρήγορα και να καταλαμβάνει τον

διαθέσιμο χώρο, αποτρέποντας τα παθογόνα μυκήτια από το να αναπτυχθούν και να μολύνουν το φυτό (Harman et al., 2004).

Αυτή η ικανότητα του *Trichoderma* να κυριαρχεί στον χώρο και να αποκλείει τα παθογόνα μυκήτια από τους θρεπτικούς πόρους είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη βιολογική καταπολέμηση. Ο μύκητας *Fusarium*, για παράδειγμα, είναι ένας από τους βασικούς παθογόνους μύκητες που προσβάλλουν πολλές καλλιέργειες. Όταν το *Trichoderma* εισέρχεται στο ίδιο περιβάλλον, αναπτύσσεται ταχύτερα, καταναλώνοντας τους διαθέσιμους πόρους και μειώνοντας τις πιθανότητες ανάπτυξης του *Fusarium* (Larkin & Fravel, 2002).

Η ταχεία ανάπτυξη του *Trichoderma* του επιτρέπει να καταλαμβάνει την επιφάνεια των φυτών και του εδάφους πριν από τους παθογόνους μύκητες, αποτρέποντας τη μόλυνση των φυτών. Οι μύκητες του γένους *Trichoderma* παράγουν συστήματα γρήγορης ανάπτυξης και ευέλικτες βιοχημικές αντιδράσεις που τους επιτρέπουν να ανταγωνίζονται αποτελεσματικά για την απόκτηση υδατανθράκων, λιπών και αζώτου, τα οποία είναι βασικά θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την ανάπτυξή τους (Vinale et al., 2014).

Επιπλέον, το *Trichoderma* παράγει ένζυμα όπως κυτταρινάσες, γλυκανάσες και χιτινάσες, τα οποία του επιτρέπουν να αποδομεί οργανικά υλικά, όπως η κυτταρίνη και η χιτίνη, και να τα χρησιμοποιεί ως θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξή του. Αυτή η δράση καθιστά το *Trichoderma* πιο ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλους μύκητες, οι οποίοι δεν έχουν την ικανότητα να αξιοποιούν αυτούς τους πόρους τόσο αποτελεσματικά (Harman et al., 2004).

Ο ανταγωνισμός για χώρο είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας στην καταπολέμηση των παθογόνων. Όταν το *Trichoderma* εγκαθίσταται και αναπτύσσεται γρήγορα, «καταλαμβάνει» τις περιοχές που διαφορετικά θα ήταν διαθέσιμες για τα παθογόνα μυκήτια, περιορίζοντας την ικανότητά τους να αναπτυχθούν και να μολύνουν τα φυτά. Η ανάπτυξή του είναι ταχύτερη και πιο επιθετική σε σχέση με πολλά παθογόνα, επιτρέποντας του να ανταγωνίζεται αποτελεσματικά και να αποτρέπει τη μόλυνση (Harman et al., 2004).

Εν κατακλείδι, ο μηχανισμός του ανταγωνισμού για θρεπτικά συστατικά και χώρο αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς λόγους για τους οποίους το *Trichoderma* χρησιμοποιείται ως βιολογικό μέσο ελέγχου των μυκητιακών ασθενειών. Ο μύκητας

είναι σε θέση να καταστρέψει τα κυτταρικά τοιχώματα των παθογόνων, να καταναλώνει θρεπτικά συστατικά ταχύτερα και να κυριαρχεί στους χώρους όπου αναπτύσσονται άλλοι μύκητες. Αυτή η ικανότητα τον καθιστά έναν αποτελεσματικό αντίπαλο για τα παθογόνα και έναν αξιόπιστο συνεργάτη στη βιολογική γεωργία.

3.2 Παραγωγή ενζύμων και δευτερογενών μεταβολιτών που επηρεάζουν την ανάπτυξη των παθογόνων μυκήτων

Το *Trichoderma* διαθέτει εξαιρετική ικανότητα να παράγει ένζυμα και δευτερογενείς μεταβολίτες, οι οποίοι είναι ζωτικής σημασίας για την καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων. Αυτές οι βιοχημικές ενώσεις παίζουν κρίσιμο ρόλο στην εξάλειψη των ανταγωνιστών και στη διασφάλιση της ανταγωνιστικής υπεροχής του *Trichoderma* έναντι των παθογόνων οργανισμών.

3.2.1 Παραγωγή ενζύμων

Το *Trichoderma* παράγει μια σειρά από λυτικά ένζυμα που διασπούν τα κυτταρικά τοιχώματα των παθογόνων μυκήτων, καθιστώντας το ισχυρό εργαλείο στη βιολογική καταπολέμηση των μυκητιακών ασθενειών. Αυτά τα ένζυμα περιλαμβάνουν κυτταρινάσες, χιτινάσες και γλυκανάσες, τα οποία καταστρέφουν τις πολυσακχαριδικές δομές που αποτελούν τα κυτταρικά τοιχώματα των μυκήτων. Αυτή η δράση καθιστά το *Trichoderma* ικανό να προσβάλει και να διασπάσει τους παθογόνους μύκητες, όπως το *Fusarium* και το *Botrytis*, ακόμη και σε πολύ πρώιμα στάδια της μόλυνσης (Baron et al., 2015).

1. **Κυτταρινάσες:** Αυτά τα ένζυμα καταλύουν την υδρόλυση της κυτταρίνης, ενός βασικού συστατικού των κυτταρικών τοιχωμάτων πολλών φυτικών παθογόνων μυκήτων. Οι κυτταρινάσες του *Trichoderma* αποδομούν τα κυτταρικά τοιχώματα των παθογόνων και εμποδίζουν την ανάπτυξή τους μέσα στο φυτικό κύτταρο (Benitez et al., 2004).
2. **Χιτινάσες:** Παράγονται από το *Trichoderma* και διασπούν τη χιτίνη, έναν άλλο βασικό συστατικό των κυτταρικών τοιχωμάτων μυκήτων όπως το *Fusarium*. Η δράση των χιτινασών αποδυναμώνει τη δομή των παθογόνων μυκήτων,

καθιστώντας τους πιο ευάλωτους στις φυσικές άμυνες των φυτών και στους βιολογικούς παράγοντες ελέγχου (Harman et al., 2004).

3. Γλυκανάσες: Αυτά τα ένζυμα διασπούν τις β-1,3-γλυκάνες, που βρίσκονται σε ορισμένα παθογόνα μυκητιακά είδη. Με τη διασπαστική τους δράση, οι γλυκανάσες περιορίζουν την ικανότητα των μυκήτων να αναπτύσσονται και να επιβιώνουν μέσα στο φυτό (Vinale et al., 2013).

3.2.2 Παραγωγή δευτερογενών μεταβολιτών

Εκτός από τα ένζυμα, το *Trichoderma* παράγει δευτερογενείς μεταβολίτες που παίζουν κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση των μικροοργανισμών του εδάφους και στην καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων. Αυτοί οι μεταβολίτες περιλαμβάνουν αντιβιοτικά και αντιμυκητιακές ουσίες που καταστέλλουν την ανάπτυξη των παθογόνων και εμποδίζουν την εξάπλωσή τους στις καλλιέργειες.

1. Gliotoxin: Ο γλοιτοξίνης είναι ένας ισχυρός δευτερογενής μεταβολίτης που παράγεται από το *Trichoderma* και έχει αντιμυκητιακή δράση. Έχει βρεθεί ότι αναστέλλει την ανάπτυξη μυκήτων όπως το *Fusarium* και το *Botrytis*, με την εξασθένηση των κυτταρικών τοιχωμάτων τους και την καταστολή των ζωτικών τους λειτουργιών (Ghisalberti et al., 2005).
2. Trichodermin: Ένα άλλο σημαντικό δευτερογενές μεταβολίτης είναι το trichodermin, το οποίο έχει ισχυρή τοξική δράση για τα μυκητιακά παθογόνα. Η τοξικότητά του είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην καταπολέμηση των μυκητιακών ασθενειών, εμποδίζοντας την ανάπτυξη των παθογόνων και περιορίζοντας τη διάδοσή τους στα φυτά (Aparna et al., 2012).

Η παραγωγή αυτών των δευτερογενών μεταβολιτών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη βελτίωση της αντιμυκητιακής ικανότητας του *Trichoderma*, καθιστώντας το ιδιαίτερα αποτελεσματικό ως βιολογικό μέσο ελέγχου στις γεωργικές εφαρμογές.

Η παραγωγή ενζύμων και δευτερογενών μεταβολιτών από το *Trichoderma* είναι ζωτικής σημασίας για τη δράση του κατά των παθογόνων μυκήτων. Αυτές οι βιοχημικές ενώσεις του επιτρέπουν να καταστρέφει τους ανταγωνιστές του στο έδαφος και να μειώνει τις πιθανότητες μόλυνσης των φυτών, ενισχύοντας ταυτόχρονα τις

φυσικές άμυνες των φυτών. Ο μηχανισμός δράσης μέσω αυτών των ενζύμων και μεταβολιτών καθιστά το *Trichoderma* ένα ισχυρό εργαλείο στην βιολογική γεωργία.

3.3 Επίκληση φυτοάμυνας και άλλοι βιολογικοί μηχανισμοί δράσης του τριχοδέρματος

Το *Trichoderma* ενισχύει την αντίσταση των φυτών στις μυκητιακές και άλλες φυτικές ασθένειες μέσω μιας σειράς βιολογικών μηχανισμών που περιλαμβάνουν την επίκληση φυτοάμυνας και την ενίσχυση των φυσικών αμυνών των φυτών. Οι μηχανισμοί αυτοί συμβάλλουν στην ενεργοποίηση των φυτικών αντιδράσεων κατά των μολύνσεων και στη βελτίωση της αντοχής τους σε διάφορους τύπους βλαβερών οργανισμών.

3.3.1 Επίκληση φυτοάμυνας

Η επίκληση φυτοάμυνας (ή induced systemic resistance - ISR) είναι ένας από τους βασικούς μηχανισμούς μέσω των οποίων το *Trichoderma* ενισχύει την αντίσταση των φυτών. Όταν το *Trichoderma* έρχεται σε επαφή με τα φυτά, ενεργοποιεί μια σειρά από αντιδράσεις που ενισχύουν τη φυσική άμυνα των φυτών. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν την παραγωγή φυτικών πρωτεϊνών άμυνας και την αύξηση των επιπέδων ουσιών όπως οι PR πρωτεΐνες (pathogenesis-related proteins), οι οποίες συμβάλλουν στην προστασία από παθογόνους οργανισμούς (Van Loon et al., 1998).

Η απόκριση του φυτού ενεργοποιείται όταν το *Trichoderma* παράγει μοριακά σήματα που αντιλαμβάνονται τα φυτικά κύτταρα, οδηγώντας στην ενεργοποίηση του συστήματος άμυνας του φυτού, ακόμη και αν το ίδιο το *Trichoderma* δεν προκαλεί μόλυνση. Αυτή η διαδικασία ενισχύει τις ικανότητες του φυτού να αντιμετωπίσει μελλοντικές μολύνσεις από διάφορους μύκητες ή βακτήρια. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν την αυξημένη παραγωγή β-1,3-γλυκάνης, φυτοαμυνικών πρωτεϊνών και φυτοαμυντικών μεταβολιτών (Sivan et al., 1987).

3.3.2 Άλλοι βιολογικοί μηχανισμοί δράσης

1. Υπερπαρασιτισμός: Ένας από τους πιο χαρακτηριστικούς μηχανισμούς δράσης του *Trichoderma* είναι ο υπερπαρασιτισμός. Το *Trichoderma* αναπτύσσεται πάνω στους παθογόνους μύκητες και τους καταναλώνει, προκαλώντας την καταστροφή τους από μέσα. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει όταν το *Trichoderma* προσκολλάται στην επιφάνεια των κυττάρων του παθογόνου και χρησιμοποιεί τους οργανικούς πόρους του για να αναπτυχθεί, τελικά καταστρέφοντας τον παθογόνο μύκητα (Harman et al., 2004).
2. Παραγωγή λυτικών ενζύμων: Το *Trichoderma* παράγει ένζυμα όπως κυτταρινάσες, χιτινάσες και γλυκανάσες, τα οποία διασπούν τα κυτταρικά τοιχώματα των μυκήτων. Αυτά τα ένζυμα διασπούν τα πολυσακχαρίδια των κυτταρικών τοιχωμάτων των παθογόνων μυκήτων, καταστρέφοντας τη δομή τους και περιορίζοντας την ανάπτυξή τους. Αυτή η δράση είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία του φυτού από μυκητιακές μολύνσεις (Vinale et al., 2013).
3. Ανταγωνιστικότητα για θρεπτικά συστατικά και χώρο: Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το *Trichoderma* ανταγωνίζεται με τα παθογόνα για τους διαθέσιμους πόρους, όπως το άζωτο και το φώσφορο, και καταλαμβάνει το χώρο στις καλλιέργειες. Χάρη στην ταχύτητά του στην ανάπτυξη, το *Trichoderma* μπορεί να αποτρέψει την ανάπτυξη των παθογόνων και να μειώσει τις ευκαιρίες μόλυνσης (Harman et al., 2004).
4. Παραγωγή δευτερογενών μεταβολιτών: Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες, το *Trichoderma* παράγει δευτερογενείς μεταβολίτες, όπως trichodermin, gliotoxin και άλλες αντιμυκητιακές ενώσεις που καταστέλλουν την ανάπτυξη των παθογόνων μυκήτων. Αυτές οι ουσίες είναι ιδιαίτερα ισχυρές και ενισχύουν την αποτελεσματικότητα του *Trichoderma* στη βιολογική καταπολέμηση των φυτικών ασθενειών (Ghisalberti et al., 2005).
5. Αύξηση της αντίστασης των φυτών μέσω μοριακών σημάτων: Το *Trichoderma* μπορεί να προκαλέσει την παραγωγή φυτοαμυντικών πρωτεϊνών στα φυτά, ενισχύοντας την αντίστασή τους σε μελλοντικές μολύνσεις. Αυτές οι πρωτεΐνες περιλαμβάνουν τις PR-2, PR-3 και PR-5, οι οποίες εμπλέκονται στη βιολογική

άμυνα των φυτών και στη σύνθεση αντιμυκητιακών ενώσεων (Van Loon et al., 1998).

Η επίκληση φυτοάμυνας και οι άλλοι βιολογικοί μηχανισμοί δράσης του *Trichoderma* είναι θεμελιώδεις για την επιτυχία του στη βιολογική καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων. Το *Trichoderma* δεν προστατεύει μόνο τα φυτά μέσω άμεσων αντιμυκητιακών δράσεων, αλλά ενισχύει και την άμυνα τους, επιτρέποντάς τους να ανταποκριθούν πιο αποτελεσματικά σε μελλοντικές επιθέσεις. Αυτοί οι μηχανισμοί το καθιστούν ένα ισχυρό εργαλείο στη βιώσιμη γεωργία και στη μείωση της εξάρτησης από χημικά μυκητοκτόνα.

3.4 Ανάλυση των μηχανισμών δράσης του *Trichoderma*

3.4.1 Ανταγωνισμός και αντιβιοτική δράση

Ο ανταγωνισμός και η αντιβιοτική δράση είναι δύο από τους πιο βασικούς μηχανισμούς μέσω των οποίων το *Trichoderma* ελέγχει την ανάπτυξη των παθογόνων μυκήτων. Ο ανταγωνισμός για θρεπτικά συστατικά και χώρο είναι καθοριστικός για την αποτροπή της ανάπτυξης των παθογόνων οργανισμών. Το *Trichoderma* αναπτύσσεται γρήγορα και καταλαμβάνει το διαθέσιμο χώρο, αποτρέποντας τα παθογόνα από το να εκμεταλλευτούν τους ίδιους πόρους (Larkin & Fravel, 2002).

Η αντιβιοτική δράση του *Trichoderma* περιλαμβάνει την παραγωγή διαφόρων αντιβιοτικών ουσιών, οι οποίες δρουν ανασταλτικά κατά των παθογόνων μυκήτων. Ορισμένα στελέχη του *Trichoderma* παράγουν τη gliotoxin και την trichodermin, που είναι ισχυρές αντιμυκητιακές ουσίες. Αυτές οι ουσίες εμποδίζουν την ανάπτυξη των παθογόνων, καταστρέφοντας τα κυτταρικά τοιχώματα και αναστέλλοντας την ανάπτυξή τους (Aparna et al., 2012). Οι ουσίες αυτές επιτυγχάνουν την καταστολή των μυκητιακών οργανισμών χωρίς να βλάπτουν τα φυτά, καθιστώντας το *Trichoderma* ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό εργαλείο για τη βιολογική καταπολέμηση.

3.4.2 Κυτταρινάσες και λυτικά ένζυμα (πρωτεάσες, 1,3 γλυκανάσες)

Το *Trichoderma* παράγει μια ποικιλία λυτικών ενζύμων, τα οποία είναι κρίσιμα για την καταπολέμηση των παθογόνων μυκήτων. Τα κυτταρινάσα είναι ένζυμα που

καταλύουν την αποδόμηση της κυτταρίνης, ενός βασικού συστατικού του κυτταρικού τοιχώματος πολλών παθογόνων μυκήτων. Με την αποδόμηση της κυτταρίνης, το *Trichoderma* καθιστά τα παθογόνα πιο ευάλωτα στις φυσικές άμυνες των φυτών και μειώνει την ανάπτυξή τους (Harman et al., 2004).

Επιπλέον, το *Trichoderma* παράγει πρωτεάσες και 1,3 γλυκανάσες, τα οποία είναι υπεύθυνα για την αποδόμηση άλλων βασικών συστατικών των κυτταρικών τοιχωμάτων των μυκήτων. Οι πρωτεάσες διασπούν τις πρωτεΐνες που αποτελούν μέρος του κυτταρικού τοιχώματος και άλλων δομών, ενώ οι 1,3 γλυκανάσες αποδομούν τις β-1,3-γλυκάνες, που βρίσκονται σε πολλούς μυκητιακούς οργανισμούς. Αυτά τα ένζυμα βοηθούν το *Trichoderma* να διασπάσει τη δομή των παθογόνων μυκήτων και να καταστείλει την ανάπτυξή τους (Vinale et al., 2013).

3.4.3 Χιτινάσες και μυκοπαρασιτισμός (δημιουργία νεκρών ζωνών μεταξύ των μυκήτων)

Οι χιτινάσες είναι ένζυμα που καταλύουν την αποδόμηση της χιτίνης, ενός άλλου βασικού συστατικού των κυτταρικών τοιχωμάτων των μυκήτων. Το *Trichoderma* παράγει χιτινάσες που διασπούν την χιτίνη, καταστρέφοντας την ακεραιότητα των κυτταρικών τοιχωμάτων των παθογόνων και περιορίζοντας την ανάπτυξή τους. Αυτό το ένζυμο είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην καταπολέμηση των μυκήτων που περιέχουν χιτίνη στα κυτταρικά τους τοιχώματα, όπως το *Fusarium* και το *Verticillium* (Ghisalberti et al., 2005).

Ο μυκοπαρασιτισμός είναι άλλη μια στρατηγική του *Trichoderma* για την καταπολέμηση των παθογόνων. Το *Trichoderma* αναπτύσσεται πάνω στους παθογόνους μύκητες, σχηματίζοντας νεκρές ζώνες ανάμεσα στους οργανισμούς. Σε αυτές τις περιοχές, το *Trichoderma* παρασιτεί πάνω στους παθογόνους μύκητες, καταναλώνοντάς τους για θρεπτικά συστατικά και αποτρέποντας την ανάπτυξή τους. Ο παρασιτισμός οδηγεί στην καταστροφή των παθογόνων μυκήτων, προκαλώντας τις νεκρές ζώνες (Harman et al., 2004).

3.4.4 Υπερπαρασιτισμός και "καβάλημα" του παθογόνου μύκητα

Ο υπερπαρασιτισμός είναι ένας από τους πιο εντυπωσιακούς μηχανισμούς δράσης του *Trichoderma*. Ο μύκητας αναπτύσσεται πάνω σε άλλα μυκητιακά είδη,

δημιουργώντας μια επιθετική προσκόλληση στην επιφάνειά τους και καταναλώνοντάς τους. Το Trichoderma προσκολλάται στην επιφάνεια του παθογόνου και καταναλώνει τα θρεπτικά του συστατικά, τελικά καταστρέφοντας τον μύκητα από μέσα. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως "καβάλημα" του παθογόνου μύκητα και είναι μια στρατηγική που επιτρέπει στο Trichoderma να παρασιτεί και να εξουδετερώνει το παθογόνο χωρίς να επηρεάζει το φυτό (Vinale et al., 2013).

Αυτή η μέθοδος του Trichoderma αποτελεί βασική στρατηγική βιολογικής καταπολέμησης, διότι αποτρέπει τη μόλυνση των φυτών και μειώνει την ανάγκη για χημικές επεμβάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Εφαρμογές του Τριχοδέρματος στη Βιολογική Καταπολέμηση

4.1 Χρήσεις του τριχοδέρματος στη γεωργία για την προστασία καλλιεργειών από παθογόνους μύκητες

Η χρήση του Trichoderma στη γεωργία για την προστασία των καλλιεργειών από παθογόνους μύκητες έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική και αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική στις χημικές μεθόδους καταπολέμησης. Το Trichoderma μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα στάδια ανάπτυξης των φυτών, είτε στο έδαφος είτε σε επιφανειακές εφαρμογές, παρέχοντας προστασία από ένα ευρύ φάσμα μυκητιακών ασθενειών. Η εφαρμογή του επιτρέπει την προστασία των φυτών χωρίς να προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον ή τη δημόσια υγεία, κάτι που καθιστά το Trichoderma ιδιαίτερα ελκυστικό για τη βιώσιμη γεωργία.

4.1.1 Προστασία από εδαφικούς παθογόνους μύκητες

Το Trichoderma χρησιμοποιείται κυρίως για την καταπολέμηση εδαφικών παθογόνων μυκήτων που προκαλούν σοβαρές ασθένειες στις ρίζες των φυτών, όπως το Fusarium, το Rhizoctonia και το Pythium. Αυτοί οι μύκητες προσβάλλουν τα φυτά

κατά την ανάπτυξή τους, κυρίως μέσω των ριζών, και μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές απώλειες παραγωγής.

Το *Trichoderma* προσφέρει προστασία από αυτούς τους μύκητες με πολλούς τρόπους. Όταν εφαρμόζεται στο έδαφος, το *Trichoderma* ανταγωνίζεται τα παθογόνα για τους θρεπτικούς πόρους και τον χώρο, αποτρέποντας την ανάπτυξή τους. Επίσης, το *Trichoderma* αναπτύσσεται γρήγορα στο έδαφος, αναστέλλοντας την ανάπτυξη άλλων μικροοργανισμών και δημιουργώντας ένα περιβάλλον που είναι λιγότερο φιλόξενο για τα παθογόνα μυκήτια (Harman et al., 2004).

Επιπλέον, το *Trichoderma* παράγει λυτικά ένζυμα όπως κυτταρινάσες και χιτινάσες, που διασπούν τα κυτταρικά τοιχώματα των παθογόνων μυκήτων, καταστρέφοντας τους και αποτρέποντας τη μόλυνση (Vinale et al., 2013). Αυτός ο μηχανισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την προστασία των φυτών από ασθένειες που προκαλούνται από μύκητες του εδάφους, όπως η σήψη των ριζών και το μαρασμό.

4.1.2 Προστασία από μυκητιακές ασθένειες στις καλλιέργειες

Το *Trichoderma* χρησιμοποιείται επίσης για την προστασία των φυτών από μυκητιακές ασθένειες στις καλλιέργειες, όπως η γλασσόμυκωση και η *botrytis blight*, που πλήττουν καλλιέργειες όπως φράουλες, ντομάτες και άλλα φρούτα. Το *Trichoderma* παρέχει προστασία σε όλα τα στάδια ανάπτυξης των φυτών, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί σε προληπτική βάση, πριν την εμφάνιση των πρώτων συμπτωμάτων μόλυνσης, ή όταν τα φυτά έχουν ήδη προσβληθεί από τα παθογόνα.

Για παράδειγμα, η *Botrytis cinerea* προκαλεί σήψη σε πολλά καλλιεργούμενα φυτά, ενώ το *Trichoderma* έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό στην πρόληψη αυτών των μολύνσεων, δημιουργώντας ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον που περιορίζει την ανάπτυξη του μύκητα (Williamson et al., 2007). Το *Trichoderma* επίσης ενισχύει τις φυσικές άμυνες των φυτών, βοηθώντας τα να αντισταθούν στις μυκητιακές μολύνσεις μέσω της παραγωγής φυτοαμυντικών πρωτεϊνών και άλλων χημικών ενώσεων (Sivasithamparam et al., 2013).

4.1.3 Εφαρμογές σε φυτώρια και καλλιέργειες

Σε φυτώρια, το *Trichoderma* χρησιμοποιείται για την προστασία των νεαρών φυτών, τα οποία είναι πιο ευάλωτα στις μυκητιακές ασθένειες. Η εφαρμογή του σε σπορόφυτα και φυτά κατά τη διάρκεια της φύτευσης ή της ανάπτυξης μπορεί να μειώσει σημαντικά τις ζημιές από παθογόνους μύκητες, όπως το *Pythium* και το *Rhizoctonia*, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την αποτυχία της ανάπτυξης και της ανθοφορίας (Harman et al., 2004).

Στην καλλιέργεια λαχανικών, το *Trichoderma* εφαρμόζεται συχνά στο έδαφος ή ως υγρή εφαρμογή μέσω ψεκασμού για την προστασία από διάφορους μυκητιακούς μολυσματικούς παράγοντες. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλους βιολογικούς παράγοντες ελέγχου για να ενισχυθεί η δράση του και να προσφέρει ακόμη πιο ολοκληρωμένη προστασία στις καλλιέργειες (Vinale et al., 2014).

4.1.4 Οφέλη για τη βιώσιμη γεωργία

Η χρήση του *Trichoderma* στη γεωργία δεν περιορίζεται μόνο στην καταπολέμηση των παθογόνων. Εκτός από τις αντιμυκητιακές του δράσεις, το *Trichoderma* συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους και της θρεπτικής κατάστασης των φυτών, ενισχύοντας τη φυσική ανθεκτικότητά τους και την αποδοτικότητά τους. Με την εφαρμογή του, μειώνεται η εξάρτηση από χημικά μυκητοκτόνα, κάτι που καθιστά τη γεωργία πιο βιώσιμη και πιο φιλική προς το περιβάλλον.

4.2 Πλεονεκτήματα του Τριχοδέρματος έναντι των Χημικών Μυκητοκτόνων: Περιβαλλοντικές, Οικονομικές και Υγειονομικές Επιπτώσεις

Η χρήση του *Trichoderma* ως βιολογικό μέσο καταπολέμησης των φυτικών ασθενειών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά χημικά μυκητοκτόνα. Αυτά τα πλεονεκτήματα αφορούν τις περιβαλλοντικές,

οικονομικές και υγειονομικές επιπτώσεις, οι οποίες είναι κρίσιμες για τη βιώσιμη γεωργία και την προστασία της δημόσιας υγείας. Ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή αυτών των πλεονεκτημάτων.

4.2.1 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Τα χημικά μυκητοκτόνα, ενώ είναι αποτελεσματικά στην καταπολέμηση των φυτικών ασθενειών, έχουν σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η υπερβολική χρήση χημικών μυκητοκτόνων μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση του εδάφους και των υδάτων, καθώς και σε ρύπανση των υπόγειων υδάτων, με αρνητικές συνέπειες για τα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Τα χημικά μυκητοκτόνα μπορούν να καταστρέψουν όχι μόνο τους παθογόνους μύκητες, αλλά και τα ωφέλιμα μικρόβια του εδάφους, όπως βακτήρια και άλλους μύκητες που βοηθούν στη διαδικασία αποδόμησης οργανικών υλικών και στην ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών.

Αντίθετα, το *Trichoderma* είναι φιλικό προς το περιβάλλον και δεν προκαλεί ρύπανση. Η εφαρμογή του δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του εδάφους ή των υδάτων. Αντίθετα, το *Trichoderma* ενισχύει τη βιοποικιλότητα του εδάφους και βελτιώνει τη δομή του εδάφους, προάγοντας την υγεία των φυτών και τη φυσική γονιμότητα του εδάφους (Harman et al., 2004). Επιπλέον, σε αντίθεση με τα χημικά μυκητοκτόνα, το *Trichoderma* δεν προκαλεί το φαινόμενο της ανθεκτικότητας στους μύκητες, καθώς είναι πιο δύσκολο για τα παθογόνα να αναπτύξουν ανθεκτικότητα σε φυσικούς βιολογικούς παράγοντες.

4.2.2 Οικονομικές Επιπτώσεις

Από οικονομικής άποψης, η χρήση του *Trichoderma* μπορεί να μειώσει το κόστος των γεωργικών εισροών. Ενώ τα χημικά μυκητοκτόνα απαιτούν συχνές εφαρμογές και μπορεί να είναι ακριβότερα με το χρόνο, το *Trichoderma* απαιτεί λιγότερες εφαρμογές και προσφέρει μακροχρόνια προστασία από τις μυκητιακές ασθένειες, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους των χημικών προϊόντων και την εξοικονόμηση χρημάτων για τους αγρότες (Sharma et al., 2015).

Επιπλέον, το *Trichoderma* ενισχύει την ανάπτυξη των φυτών, οδηγώντας σε καλύτερες αποδόσεις καλλιεργειών και υψηλότερη ποιότητα προϊόντων. Αυτό έχει θετικό αντίκτυπο στην οικονομία των γεωργικών εκμεταλλεύσεων, καθώς οι αγρότες μπορούν να αυξήσουν την παραγωγή τους χωρίς να εξαρτώνται από ακριβές χημικές θεραπείες (Vinale et al., 2014).

4.2.3 Υγειονομικές Επιπτώσεις

Τα χημικά μυκητοκτόνα έχουν αρνητικές υγειονομικές επιπτώσεις για τους ανθρώπους και τα ζώα. Οι τοξικές ουσίες που περιέχουν μπορούν να προκαλέσουν αλλεργικές αντιδράσεις, δηλητηριάσεις, και καρκινογενέσεις σε ανθρώπους και ζώα, αν εκτεθούν σε αυτές μέσω του αέρα, του νερού ή των τροφίμων (Tsiropoulos et al., 2017). Τα υπολείμματα των χημικών μυκητοκτόνων στα γεωργικά προϊόντα μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, οδηγώντας σε σοβαρές διατροφικές ασθένειες.

Αντιθέτως, το *Trichoderma* είναι απολύτως ασφαλές για τους ανθρώπους και τα ζώα. Επειδή πρόκειται για φυσικό βιολογικό παράγοντα, δεν προκαλεί τοξικότητα ή κινδύνους για τη δημόσια υγεία, καθιστώντας το ιδανικό για τη χρήση σε βιολογική γεωργία και οργανικές καλλιέργειες (Vinale et al., 2013). Η χρήση του *Trichoderma* συμβάλλει επίσης στην ασφάλεια των τροφίμων, μειώνοντας την ανάγκη για χημικά υπολείμματα στα γεωργικά προϊόντα.

Η χρήση του *Trichoderma* στη βιολογική καταπολέμηση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα χημικά μυκητοκτόνα. Από περιβαλλοντική άποψη, το *Trichoderma* είναι ασφαλές για το οικοσύστημα, ενώ από οικονομική και υγειονομική άποψη, μειώνει τα κόστη για τους αγρότες και προστατεύει τη δημόσια υγεία. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν το *Trichoderma* μια βιώσιμη και αποτελεσματική λύση για τη γεωργία του μέλλοντος, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη και την προστασία του περιβάλλοντος.

4.3 Περιορισμοί και προκλήσεις στην εφαρμογή του Trichoderma σε γεωργικές καλλιέργειες

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει το Trichoderma ως βιολογικό μέσο καταπολέμησης των μυκητιακών ασθενειών, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιτυχημένη εφαρμογή του στις γεωργικές καλλιέργειες.

4.3.1 Επιτυχία σε διαφορετικές γεωργικές συνθήκες

Η αποτελεσματικότητα του Trichoderma μπορεί να επηρεαστεί από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η pH του εδάφους. Ορισμένα στελέχη του Trichoderma μπορεί να είναι πιο ευαίσθητα σε ακραίες θερμοκρασίες ή σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας. Αν και το Trichoderma είναι γενικά ανθεκτικό σε ποικίλες συνθήκες, οι τοπικές συνθήκες του εδάφους και του κλίματος ενδέχεται να επηρεάσουν την ανάπτυξή του και τη δράση του (Sharma et al., 2015).

Για παράδειγμα, οι υψηλές θερμοκρασίες και η έλλειψη υγρασίας μπορεί να μειώσουν τη δυνατότητα του Trichoderma να αναπτυχθεί και να ανταγωνιστεί με τους παθογόνους μύκητες στο έδαφος. Επομένως, οι γεωργοί πρέπει να λάβουν υπόψη τους τις τοπικές κλιματικές συνθήκες πριν την εφαρμογή του Trichoderma.

4.3.2 Επιλογή κατάλληλων στελεχών Trichoderma

Η αποτελεσματικότητα του Trichoderma εξαρτάται από την επιλογή του σωστού στελέχους για την εκάστοτε ασθένεια και καλλιέργεια. Ορισμένα στελέχη του Trichoderma είναι πιο αποτελεσματικά κατά συγκεκριμένων παθογόνων μυκήτων από άλλα. Επομένως, η επιλογή του κατάλληλου στελέχους για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι κρίσιμη.

Ορισμένα στελέχη Trichoderma μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματικά κατά ορισμένων παθογόνων ή να χρειάζονται μεγαλύτερο χρόνο για να εκδηλώσουν τα πλήρη αποτελέσματά τους. Επομένως, η έρευνα και η ανάπτυξη νέων, πιο αποτελεσματικών στελεχών είναι συνεχώς αναγκαία για να βελτιωθεί η χρήση του Trichoderma στην γεωργία (Vinale et al., 2013).

4.3.3 Μειωμένη αποτελεσματικότητα σε πολύ μολυσμένα εδάφη

Η εφαρμογή του *Trichoderma* σε πολύ μολυσμένα εδάφη μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματική. Όταν το έδαφος είναι ήδη μολυσμένο σε υψηλό βαθμό με παθογόνους μύκητες, το *Trichoderma* μπορεί να δυσκολευτεί να ανταγωνιστεί και να καταστείλει την ανάπτυξή τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι πυκνές πληθυσμιακές ομάδες των παθογόνων μπορεί να περιορίσουν την ανάπτυξη και τη δράση του *Trichoderma*. Επίσης, η παρουσία άλλων μυκήτων ή μικροοργανισμών μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα του *Trichoderma* ως αποτέλεσμα του ανταγωνισμού για πόρους και θρεπτικά συστατικά (Larkin & Fravel, 2002).

Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, μπορεί να απαιτείται συνδυασμός εφαρμογών του *Trichoderma* με άλλες στρατηγικές ελέγχου, όπως η χρήση καλλιεργητικών πρακτικών ή η εφαρμογή *Trichoderma* σε κατάλληλους χρόνους και με τις κατάλληλες δόσεις, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποδοτικότητά του.

4.3.4 Υψηλό κόστος παραγωγής και εφαρμογής

Αν και το *Trichoderma* μπορεί να μειώσει τη χρήση χημικών μυκητοκτόνων, το κόστος της παραγωγής και της εφαρμογής του εξακολουθεί να είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για πολλούς γεωργούς. Ορισμένα προϊόντα *Trichoderma* μπορεί να είναι ακριβά για παραγωγή, ιδιαίτερα αν απαιτείται σε μεγάλες ποσότητες ή σε συχνές εφαρμογές. Ειδικά σε περιοχές όπου οι αγρότες δεν έχουν πρόσβαση σε φτηνές ή εύκολα διαθέσιμες πηγές *Trichoderma*, το κόστος εφαρμογής μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για την ευρεία υιοθέτησή του.

Αυτό το ζήτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με έρευνες για τη βελτίωση της παραγωγής και την ανάπτυξη πιο οικονομικών τεχνολογιών εφαρμογής, έτσι ώστε το *Trichoderma* να γίνει προσιτό και οικονομικότερο για τους αγρότες (Aparna et al., 2012).

4.3.5 Αλληλεπιδράσεις με άλλους μικροοργανισμούς

Η εφαρμογή του *Trichoderma* σε περιβάλλοντα που περιέχουν άλλους μικροοργανισμούς, όπως βακτήρια ή άλλους μύκητες, μπορεί να δημιουργήσει

ανταγωνιστικές αλληλεπιδράσεις οι οποίες να μειώσουν την αποτελεσματικότητα του *Trichoderma*. Ορισμένα στελέχη του *Trichoderma* ενδέχεται να αλληλεπιδρούν αρνητικά με άλλα ωφέλιμα βακτήρια ή μύκητες στο έδαφος, κάτι που μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητά του στη καταπολέμηση των παθογόνων (Larkin et al., 2006). Αυτές οι αλληλεπιδράσεις απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό και διαχείριση της εφαρμογής του *Trichoderma*, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του εδάφους και τις άλλες οργανικές δραστηριότητες μέσα στο οικοσύστημα.

Η εφαρμογή του *Trichoderma* στη γεωργία προσφέρει εξαιρετικά πλεονεκτήματα, ωστόσο υπάρχουν περιορισμοί και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Αυτές περιλαμβάνουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την επιλογή του σωστού στελέχους, την ανταγωνιστικότητα με άλλους οργανισμούς και τα οικονομικά κόστη. Η περαιτέρω έρευνα για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της προσβασιμότητας του *Trichoderma* μπορεί να βοηθήσει στην υπέρβαση αυτών των εμποδίων και να το καταστήσει ακόμα πιο αποδοτικό και προσβάσιμο για τους γεωργούς παγκοσμίως.

4.4 Συζήτηση για τη νομοθεσία και τις πολιτικές προώθησης της βιολογικής γεωργίας στην Ε.Ε.

4.4.1. Ευρωπαϊκή Νομοθεσία για τη Βιολογική Γεωργία

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναπτύξει μια σειρά από νομοθετικά μέτρα και πολιτικές πρωτοβουλίες για την ενίσχυση της βιολογικής γεωργίας, αναγνωρίζοντας τη σημασία της για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την προστασία του περιβάλλοντος και τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας.

Η Κανονιστική Πολιτική της Ε.Ε. για τη Βιολογική Γεωργία έχει εξελιχθεί με την πάροδο των ετών, και το πιο πρόσφατο Κανονιστικό Πλαίσιο (ΕΚ 834/2007) αποτελεί την κύρια νομοθετική βάση για τις βιολογικές καλλιέργειες στην Ε.Ε. Αυτό το κανονιστικό πλαίσιο καθορίζει τις απαιτήσεις και τα κριτήρια που πρέπει να πληρούν οι βιολογικές καλλιέργειες και τα προϊόντα, για να πιστοποιηθούν ως βιολογικά. Η εφαρμογή του κανονισμού διασφαλίζει ότι τα προϊόντα που φέρουν το λογότυπο της βιολογικής γεωργίας πληρούν τα πρότυπα που έχουν τεθεί για τη μη

χρήση χημικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων και την προώθηση των βιώσιμων γεωργικών πρακτικών.

Η Στρατηγική της Ε.Ε. για τη Βιολογική Γεωργία αναγνωρίζει τη σημασία των βιολογικών γεωργικών πρακτικών για την ενίσχυση της βιωσιμότητας, την προστασία της βιοποικιλότητας και την ενίσχυση των τοπικών οικονομιών. Μάλιστα, η Ευρωπαϊκή Στρατηγική για το "Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο" (Farm to Fork Strategy), η οποία εντάχθηκε στο Ευρωπαϊκό Πράσινο Σύμφωνο (Green Deal), στοχεύει να αυξήσει την παραγωγή και την κατανάλωση βιολογικών προϊόντων, προωθώντας ταυτόχρονα τη βιώσιμη γεωργία και την κλιματική ουδετερότητα έως το 2030 (European Commission, 2020).

4.4.2 Χρηματοδότηση και Επιδοτήσεις για Βιολογικές Καλλιέργειες

Η Ε.Ε. παρέχει επίσης χρηματοδοτικά εργαλεία και επιδόματα για τη στήριξη της βιολογικής γεωργίας μέσω του Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ). Η ΚΑΠ περιλαμβάνει ειδικά μέτρα στήριξης για τους γεωργούς που ασχολούνται με τη βιολογική γεωργία, μέσω επιδοτήσεων για την εφαρμογή βιολογικών πρακτικών και την κάλυψη του κόστους πιστοποίησης.

Τα μέτρα της ΚΑΠ περιλαμβάνουν τη χρηματοδότηση των γεωργών που επιθυμούν να μετατραπούν σε βιολογικούς, καθώς και τη συνεχιζόμενη στήριξη των γεωργών που ήδη εφαρμόζουν βιολογικές πρακτικές. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει διαμορφώσει στρατηγικές προγράμματα για την υποστήριξη της μετάβασης στην βιολογική γεωργία, συμπεριλαμβανομένων κινήτρων για τη χρήση οργανικών λιπασμάτων, τη βελτίωση της διαχείρισης του εδάφους και την ενίσχυση της φυτοπροστασίας με φυσικά μέσα (European Commission, 2020).

4.4.3 Ανάπτυξη και προώθηση της βιολογικής γεωργίας μέσω δημόσιας πολιτικής

Σημαντική είναι η συνεισφορά της Ε.Ε. στην προώθηση της βιολογικής γεωργίας μέσω της ανάπτυξης στρατηγικών επικοινωνίας και εκπαιδευτικών πρωτοβουλιών. Η Ε.Ε. εργάζεται για την ενημέρωση των καταναλωτών και των παραγωγών σχετικά με τα οφέλη της βιολογικής γεωργίας μέσω εθνικών και ευρωπαϊκών εκστρατειών. Ειδικότερα, η πρωτοβουλία για τη βιολογική γεωργία προωθεί τη χρήση βιώσιμων γεωργικών τεχνικών, ενισχύοντας τη βιολογική γεωργία

ως μία βιώσιμη λύση για την επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας.

Σύμφωνα με τις πολιτικές αυτές, η βιολογική γεωργία συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος, περιορίζοντας τη χρήση χημικών και άλλων επιβλαβών ουσιών. Στην ίδια γραμμή, ενθαρρύνεται η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η ενίσχυση της ανάπτυξης της αγροτικής βιοποικιλότητας, ενώ ενισχύεται η κοινωνική υπευθυνότητα και η διάδοση της πράσινης και υγιεινής διατροφής στους καταναλωτές (European Commission, 2020).

4.4.4 Προκλήσεις και περιορισμοί της εφαρμογής των πολιτικών βιολογικής γεωργίας

Παρά την πρόοδο που έχει γίνει, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις που περιορίζουν την πλήρη εφαρμογή της βιολογικής γεωργίας στην Ε.Ε. Αυτές περιλαμβάνουν τον υψηλό κόστος παραγωγής, τις περιορισμένες αγορές για βιολογικά προϊόντα σε κάποιες χώρες και τη δυσκολία πιστοποίησης των βιολογικών προϊόντων σε αρκετές περιοχές. Επιπλέον, η αντισταθμιστική στήριξη και τα κίνητρα για τη μετάβαση των γεωργών στην βιολογική γεωργία εξακολουθούν να απαιτούν βελτίωση.

Η βιολογική γεωργία στην Ε.Ε. υποστηρίζεται από ένα ισχυρό νομικό και πολιτικό πλαίσιο, το οποίο προσφέρει κίνητρα και οικονομική στήριξη για τους γεωργούς και τους καταναλωτές. Παρά τις προκλήσεις και τα εμπόδια, η συνεχής ανάπτυξη της βιολογικής γεωργίας και η εφαρμογή πολιτικών για τη μείωση της εξάρτησης από χημικά μέσα διασφαλίζουν τη βιωσιμότητα της γεωργίας και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αγροτικής παραγωγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΩΝ IN VITRO ΜΕΛΕΤΩΝ ΤΟΥ TRICHODERMA ENANTI ΠΑΘΟΓΟΝΩΝ ΜΥΚΗΤΩΝ

Το πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση ενδεικτικών in vitro μελετών που εξετάζουν τη δράση ειδών του *Trichoderma* έναντι σημαντικών φυτοπαθογόνων μυκήτων, όπως τα *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis*. Οι in vitro δοκιμές αποτελούν ένα καθιερωμένο πειραματικό σύστημα που επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση του ανταγωνισμού μεταξύ ωφέλιμων και παθογόνων μυκήτων, προσφέροντας σαφή ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα για τους μηχανισμούς αντιμυκητιακής δράσης του *Trichoderma*. Η βιβλιογραφική επισκόπηση που ακολουθεί επικεντρώνεται σε τρεις πρόσφατες, αντιπροσωπευτικές μελέτες, οι οποίες αναδεικνύουν τη σημασία του *Trichoderma* ως βιολογικού παράγοντα ελέγχου και παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση της λειτουργίας του σε εργαστηριακό επίπεδο. Παράλληλα, επιχειρείται μια συγκριτική αξιολόγηση των ερευνητικών ευρημάτων, με στόχο τη σύνδεσή τους με τους γνωστούς μηχανισμούς δράσης του *Trichoderma* και τη διερεύνηση των προοπτικών μελλοντικής έρευνας στον τομέα της βιολογικής φυτοπροστασίας.

5.1 Σκοπός και Επιστημονικό Πλαίσιο της Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Ο σκοπός της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι η συστηματική αξιολόγηση ενδεικτικών in vitro μελετών που εξετάζουν τη δράση του *Trichoderma* έναντι σημαντικών φυτοπαθογόνων μυκήτων, όπως *Fusarium oxysporum*, *Verticillium dahliae* και *Botrytis cinerea*. Οι in vitro μελέτες αποτελούν κρίσιμο εργαλείο για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ωφέλιμων και παθογόνων μυκήτων, καθώς επιτρέπουν τον έλεγχο πειραματικών παραμέτρων και τη σαφή παρατήρηση μηχανισμών, όπως ο ανταγωνισμός, ο μυκοπαρασιτισμός και η παραγωγή αντιμικροβιακών ουσιών (Benítez et al., 2004· Harman et al., 2004).

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθοδολογικής προσέγγισης βασίζεται στο γεγονός ότι το *Trichoderma* έχει αναγνωριστεί διεθνώς ως ένας από τους πιο αποτελεσματικούς βιολογικούς παράγοντες καταπολέμησης, με υψηλή ικανότητα αναστολής της ανάπτυξης πλήθους παθογόνων μυκήτων (Aparna et al., 2012· Vinale et al., 2013). Πλήθος μελετών έχει δείξει ότι τα είδη του *Trichoderma* εμφανίζουν σημαντικές αντιμυκητιακές ιδιότητες μέσω μηχανισμών όπως η παραγωγή λυτικών ενζύμων, η σύνθεση δευτερογενών μεταβολιτών και η ενεργοποίηση της φυτικής άμυνας (Sharma et al., 2015· Sivasithamparam et al., 2013).

Η ανασκόπηση αυτή εστιάζει σε τρεις πρόσφατες και αντιπροσωπευτικές μελέτες που εξετάζουν την αντιμυκητιακή δράση του *Trichoderma* έναντι των τριών προαναφερθέντων παθογόνων. Οι μελέτες επιλέχθηκαν με βάση την επιστημονική τους εγκυρότητα, τη χρήση καθιερωμένων πειραματικών μεθόδων όπως το dual culture assay και την αξιόπιστη ποσοτικοποίηση της αναστολής ανάπτυξης των παθογόνων (Fotouhiyan et al., 2017· Jagrati et al., 2018· Muñoz et al., 2018). Μέσω της συγκριτικής τους ανάλυσης, επιχειρείται η διερεύνηση κοινών προτύπων αποτελεσματικότητας, διαφορών μεταξύ ειδών του *Trichoderma* και παραγόντων που επηρεάζουν την ένταση της αντιμυκητιακής δράσης.

Το επιστημονικό πλαίσιο της παρούσας ενότητας αντανακλά την αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμες λύσεις φυτοπροστασίας, καθώς οι χημικές μέθοδοι καταπολέμησης παρουσιάζουν περιβαλλοντικούς και υγειονομικούς κινδύνους (Tsiropoulos et al., 2017). Το *Trichoderma* προβάλλει ως μια από τις πλέον υποσχόμενες επιλογές βιολογικού ελέγχου, και η παρούσα ανασκόπηση στοχεύει να αναδείξει τα ερευνητικά δεδομένα που υποστηρίζουν τον ρόλο του αυτό.

5.2 Αναλυτική Παρουσίαση Αντιπροσωπευτικής In Vitro Μελέτης Ανταγωνισμού *Trichoderma*–*Fusarium*

Η συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζει μια από τις πλέον χαρακτηριστικές και πρόσφατες in vitro μελέτες που εξετάζουν την ανταγωνιστική δράση του *Trichoderma* έναντι του *Fusarium oxysporum*, ενός από τους σημαντικότερους παθογόνους μύκητες που προκαλούν μαρασμό σε πλήθος καλλιεργειών. Η μελέτη των Jagrati et al. (2018)

αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής του dual culture assay για την αξιολόγηση της βιολογικής δράσης διαφόρων ειδών *Trichoderma*. Η επιλογή της μελέτης αυτής βασίζεται τόσο στην υψηλή μεθοδολογική της ποιότητα όσο και στην άμεση συνάφειά της με το θεωρητικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

5.2.1 Στόχοι και Ερευνητική Προσέγγιση της Μελέτης

Κύριος στόχος της μελέτης των Jagrati et al. (2018) ήταν η αξιολόγηση της ικανότητας διαφορετικών στελεχών *Trichoderma* να αναστέλλουν την ανάπτυξη του *Fusarium oxysporum* μέσω του ανταγωνισμού σε συνθήκες εργαστηρίου. Η έρευνα αποσκοπούσε στη σύγκριση της αποτελεσματικότητας μεταξύ ειδών όπως *Trichoderma harzianum*, *T. viride* και *T. koningii*, με σκοπό τον εντοπισμό του πιο δραστικού στελέχους.

Η μελέτη στηρίζεται στην ευρέως χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία dual culture, η οποία επιτρέπει την άμεση παρατήρηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο μυκήτων και παρέχει σαφείς ενδείξεις για την ανάπτυξη νεκρών ζωνών, την αναστολή ανάπτυξης και την ανταγωνιστική συμπεριφορά (Benítez et al., 2004· Harman et al., 2004).

Σε αυτό το πλαίσιο, η μελέτη εξετάζει:

- την ακτινική ανάπτυξη των δύο μυκήτων,
- το ποσοστό αναστολής του παθογόνου,
- τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ζώνης αλληλεπίδρασης,
- και τη σχετική υπεροχή των διαφορετικών ειδών *Trichoderma*.

5.2.2 Περιγραφή Μεθοδολογίας και Πειραματικού Πρωτοκόλλου (Dual Culture Assay)

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε τρυβλία Petri με υπόστρωμα Potato Dextrose Agar (PDA), ένα από τα πλέον καθιερωμένα θρεπτικά μέσα για πειράματα μυκήτων (Aparna et al., 2012). Στο κέντρο κάθε τρυβλίου τοποθετήθηκε δίσκος μυκηλίου *Fusarium oxysporum*, ενώ στην αντίθετη πλευρά τοποθετήθηκε ένας αντίστοιχος δίσκος του επιλεγμένου στελέχους *Trichoderma*.

Τα τρυβλία επωάστηκαν στους $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ για διάστημα 7 ημερών, συνθήκες κατάλληλες για την εκδήλωση ανταγωνισμού μεταξύ των δύο μυκήτων. Η ανάπτυξη των αποικιών μετρήθηκε καθημερινά με εκατοστάρι, ενώ το ποσοστό αναστολής υπολογίστηκε με βάση τον τύπο του Vincent (1950):

$$I (\%) = [(C - T) / C] \times 100$$

όπου:

- C = ανάπτυξη παθογόνου στον μάρτυρα
- T = ανάπτυξη παθογόνου στην παρουσία *Trichoderma*

Κατά την ανάπτυξη των μυκήτων, παρατηρήθηκαν:

- σχηματισμός ζωνών αναχαίτισης (inhibition zones),
- υπερπαρασιτισμός (overgrowth) του παθογόνου από το *Trichoderma*,
- μεταβολές στη μορφολογία του *Fusarium* (αποχρωματισμός, αναστολή σποριογένεσης).

Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί μία από τις πιο αξιόπιστες τεχνικές για την ποσοτικοποίηση της αντιμυκητιακής δράσης και εφαρμόζεται διεθνώς (Vinale et al., 2013· Sivasithamparam et al., 2013).

5.2.3 Κύρια Πειραματικά Ευρήματα και Ποσοτική Αξιολόγηση

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλα τα στελέχη *Trichoderma* παρουσίασαν σημαντική αντιμυκητιακή δράση κατά του *Fusarium oxysporum*. Συγκεκριμένα:

- Το *Trichoderma harzianum* εμφάνισε το υψηλότερο ποσοστό αναστολής (70–82%),
- ενώ το *T. viride* πέτυχε αναστολή 60–75%,
- και το *T. koningii* παρουσίασε χαμηλότερες τιμές (50–65%).

Η ισχυρότερη δράση του *T. harzianum* αποδίδεται στην ικανότητά του να παράγει υψηλές ποσότητες λυτικών ενζύμων, όπως χιτινάσες και γλυκανάσες, καθώς και δευτερογενείς μεταβολίτες με αντιμικροβιακές ιδιότητες (Sharma et al., 2015).

Η δημιουργία νεκρής ζώνης μεταξύ των δύο μυκήτων αποτέλεσε δείκτη έντονου ανταγωνισμού, ενώ σε πολλές περιπτώσεις το *Trichoderma* υπερανάπτύχθηκε πάνω από την αποικία του παθογόνου, φαινόμενο χαρακτηριστικό του μυκοπαρασιτισμού (Benítez et al., 2004).

5.2.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων και Συσχέτιση με Γνωστούς Μηχανισμούς Δράσης του *Trichoderma*

Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν τη βιβλιογραφία που αναγνωρίζει το *Trichoderma harzianum* ως ένα από τα πιο αποτελεσματικά στελέχη βιολογικής καταπολέμησης (Vinale et al., 2013). Η υψηλή ανασταλτική του δράση σχετίζεται με:

- Ανταγωνισμό για θρεπτικά συστατικά και χώρο,
- Ενεργή έκκριση λυτικών ενζύμων,
- Παραγωγή αντιβιοτικών δευτερογενών μεταβολιτών,
- Μυκοπαρασιτισμό και υπερανάπτυξη πάνω στο παθογόνο,
- Δυνατότητα αποδόμησης κυτταρικού τοιχώματος του *Fusarium*.

Η μελέτη δείχνει ότι το *Trichoderma* δεν περιορίζεται απλώς στην παρεμπόδιση της ανάπτυξης, αλλά δρα συνολικά μέσω πολλαπλών και αλληλοενισχυόμενων μηχανισμών. Η αποτελεσματικότητα αυτή υποστηρίζει τη χρήση του ως βιώσιμη εναλλακτική έναντι χημικών μυκητοκτόνων.

5.3 Συγκριτική Παρουσίαση Πρόσφατων In Vitro Μελετών για *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis*

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει δύο ακόμη πρόσφατες in vitro μελέτες που εξετάζουν την αντιμυκητιακή δράση του *Trichoderma* έναντι των παθογόνων *Verticillium dahliae* και *Botrytis cinerea*. Σε συνδυασμό με τη μελέτη που αναλύθηκε στην υποενότητα 5.2 για το *Fusarium oxysporum*, οι μελέτες αυτές προσφέρουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της βιολογικής αποτελεσματικότητας του *Trichoderma* έναντι διαφορετικών φυτοπαθογόνων μυκήτων. Οι δύο επιλεγμένες έρευνες χρησιμοποιούν παρόμοιες πειραματικές διατάξεις dual culture, επιτρέποντας την άμεση συγκριτική τους αξιολόγηση και την εξαγωγή κοινών τάσεων και διαφορών ως προς την ένταση της ανασταλτικής δράσης.

5.3.1 Πειραματικές Προσεγγίσεις κατά Ειδών *Fusarium*

Η μελέτη των Jagrati et al. (2018), η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 5.2, αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της ικανότητας του *Trichoderma* να προκαλεί σημαντική αναστολή στην ανάπτυξη του *Fusarium oxysporum*. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν υψηλά ποσοστά αναστολής, κυρίως από το *Trichoderma harzianum*, επιβεβαιώνοντας προηγούμενες μελέτες που αναφέρουν την αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου είδους σε καλλιέργειες που πλήττονται από *Fusarium* (Sharma et al., 2015). Τα ευρήματα αυτά αποτελούν σημείο αναφοράς για τη σύγκριση με τις επόμενες υποενότητες.

5.3.2 In Vitro Μελέτες έναντι *Verticillium* spp.

Η μελέτη των Fotouhiyan et al. (2017) διερεύνησε την αποτελεσματικότητα του *Trichoderma harzianum* στην καταπολέμηση του *Verticillium dahliae*, παθογόνου που προκαλεί σοβαρή ασθένεια μαρασμού στην καλλιέργεια φιστικιάς. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο dual culture, όπου το *Trichoderma* και το *Verticillium* τοποθετήθηκαν σε αντίθετα σημεία του ίδιου τρυβλίου PDA. Η ανάπτυξη των μυκήτων παρακολούθηθηκε για επτά ημέρες και υπολογίστηκε το ποσοστό αναστολής του παθογόνου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το *Trichoderma harzianum* προκάλεσε αναστολή ανάπτυξης που κυμάνθηκε από 60 % έως 78 %, τιμές οι οποίες θεωρούνται υψηλές σε πειράματα εργαστηριακού ανταγωνισμού. Παρατηρήθηκε επίσης αλλαγή στη μορφολογία της αποικίας του *Verticillium*, με μείωση της πυκνότητας του μυκηλίου και του ρυθμού ακτινικής επέκτασης, ένδειξη ότι το *Trichoderma* ασκεί ισχυρή βιολογική πίεση στο παθογόνο (Fotouhiyan et al., 2017).

Ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία της μελέτης υποδηλώνουν ότι το *Trichoderma* ασκεί τη δράση του μέσω:

- παραγωγής εξωκυτταρικών ενζύμων όπως χιτινάσες και γλυκανάσες,
- ανταγωνισμού για θρεπτικά συστατικά και χώρο,
- παραγωγής δευτερογενών μεταβολιτών που μειώνουν τη βιωσιμότητα του παθογόνου.

Τα συγκεκριμένα ευρήματα συμφωνούν με αντίστοιχες μελέτες που αναφέρουν ότι το *Verticillium* είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στη δράση του *Trichoderma* λόγω της δομής

του μυκηλίου του και της χαμηλότερης ανταγωνιστικής του ικανότητας (Vinale et al., 2013).

5.3.3 Βιολογικός Έλεγχος του *Botrytis cinerea* μέσω *Trichoderma* spp.

Η μελέτη των Muñoz et al. (2018) αξιολόγησε την ικανότητα των *Trichoderma harzianum* και *Trichoderma asperellum* να αναστείλουν την ανάπτυξη διαφορετικών γενετικών απομονώσεων του *Botrytis cinerea*, του μύκητα που προκαλεί τη γνωστή ασθένεια της γκρίζας σήψης. Το *Botrytis* θεωρείται από τα πιο επιθετικά παθογόνα, με υψηλή ικανότητα προσαρμογής και μεγάλη παραγωγή σπορίων.

Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν επίσης τη μέθοδο dual culture και παρατήρησαν εντυπωσιακά υψηλά επίπεδα αναστολής που κυμάνθηκαν από 65 % έως 90 %, ανάλογα με το στέλεχος του *Trichoderma* και την γενετική ποικιλιότητα του παθογόνου. Το *Trichoderma asperellum* παρουσίασε ορισμένες φορές ισχυρότερη ανασταλτική δράση από το *T. harzianum*, γεγονός που αποδίδεται στην παραγωγή αυξημένων ποσοτήτων πτητικών οργανικών ενώσεων και ενζύμων αποδόμησης κυτταρικού τοιχώματος (Muñoz et al., 2018).

Η μελέτη έδειξε επίσης:

- τον σχηματισμό νεκρών ζωνών μεταξύ των δύο μυκήτων,
- τον αποχρωματισμό και τη μείωση της πυκνότητας του μυκηλίου του *Botrytis*,
- την εμφάνιση υπερπαρασιτισμού, όπου το *Trichoderma* υπερκάλυπτε τις αποικίες του παθογόνου.

Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με προηγούμενες δημοσιεύσεις που υποστηρίζουν ότι το *Botrytis* είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε στελέχη *Trichoderma* λόγω της χημικής δράσης των παραγόμενων μεταβολιτών όπως οι πτερόνες και οι πεπτιδικές τοξίνες (Benítez et al., 2004· Vinale et al., 2013).

5.4 Σύνθεση και Συγκριτική Αξιολόγηση των Βιβλιογραφικών Ευρημάτων

Οι τρεις *in vitro* μελέτες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως προσφέρουν μια συνολική εικόνα της αποτελεσματικότητας του *Trichoderma* απέναντι σε διαφορετικούς φυτοπαθογόνους μύκητες, χρησιμοποιώντας συγκρίσιμες μεθοδολογικές προσεγγίσεις. Τα δεδομένα που προκύπτουν επιτρέπουν τη σύγκριση των τάσεων, των μηχανισμών δράσης και των ποσοστών αναστολής, αναδεικνύοντας τα είδη *Trichoderma* που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη βιολογική δραστηριότητα. Παράλληλα, αναδεικνύονται οι ιδιαιτερότητες κάθε παθογόνου, οι οποίες επηρεάζουν την έκταση της ανασταλτικής δράσης.

5.4.1 Ομοιότητες και Διαφορές στα Πειραματικά Πρωτόκολλα

Οι τρεις μελέτες παρουσιάζουν σημαντική μεθοδολογική ομοιομορφία, καθώς όλες βασίζονται στη δοκιμασία *dual culture assay*, η οποία αποτελεί διεθνώς αναγνωρισμένη τεχνική για την αξιολόγηση της αντιμυκητιακής δράσης του *Trichoderma* (Benítez et al., 2004). Στο σύνολο των μελετών χρησιμοποιήθηκε θρεπτικό υπόστρωμα PDA, κοινή θερμοκρασία επώασης (25 ± 2 °C) και καθημερινή μέτρηση της ακτινικής ανάπτυξης, επιτρέποντας τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Παρά τις ομοιότητες, προκύπτουν και ορισμένες λειτουργικές διαφοροποιήσεις. Στη μελέτη του Jagrati et al. (2018) εξετάστηκαν πολλαπλά στελέχη *Trichoderma* για τη δράση τους έναντι του *Fusarium oxysporum*, επιτρέποντας τη σύγκριση της αποτελεσματικότητας μεταξύ ειδών. Στη μελέτη των Fotouhiyan et al. (2017) αξιολογήθηκε αποκλειστικά το *Trichoderma harzianum*, γεγονός που καθιστά τα αποτελέσματα πιο στοχευμένα για το *Verticillium dahliae*. Στο πείραμα των Muñoz et al. (2018), εξετάστηκε επίσης η γενετική ποικιλότητα του *Botrytis cinerea*, κάτι που προσέφερε πρόσθετη πληροφορία για την απόκριση διαφορετικών απομονώσεων στο *Trichoderma*.

Οι ομοιότητες στα πρωτόκολλα ενισχύουν την αξιοπιστία της σύγκρισης, ενώ οι διαφορές στην επιλογή στελεχών ή απομονώσεων παρέχουν χρήσιμη ένδειξη ότι η αποτελεσματικότητα του *Trichoderma* ενδέχεται να διαφοροποιείται ανάλογα με τη γενετική ποικιλότητα τόσο του ωφέλιμου όσο και του παθογόνου μύκητα.

5.4.2 Κύριοι Μηχανισμοί Αντιμυκητιακής Δράσης που Αναδεικνύονται από τη Βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα των τριών μελετών συγκλίνουν στην παρατήρηση ότι το *Trichoderma* ασκεί ισχυρή αντιμυκητιακή δράση μέσω συνδυασμού μηχανισμών, οι οποίοι έχουν τεκμηριωθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία. Ο ανταγωνισμός για θρεπτικά συστατικά και χώρο αποτελεί έναν από τους πιο άμεσα παρατηρήσιμους μηχανισμούς, καθώς σε όλες τις μελέτες το *Trichoderma* περιόρισε σημαντικά την ακτινική ανάπτυξη των παθογόνων (Harman et al., 2004).

Παράλληλα, ο σχηματισμός νεκρών ζωνών, η αλλαγή στη μορφολογία των αποικιών και ο αποχρωματισμός του μυκήλιου των παθογόνων, όπως καταγράφηκαν από τους Muñoz et al. (2018) και Fotouhiyan et al. (2017), αποτελούν ενδείξεις έκκρισης δευτερογενών μεταβολιτών με αντιβιοτική δράση, όπως πτητικές οργανικές ενώσεις και υδατοδιαλυτές αντιμικροβιακές ουσίες.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και τα εξωκυτταρικά λυτικά ένζυμα, όπως χιτινάσες, 1,3-βήτα-γλυκανάσες και πρωτεάσες, τα οποία έχουν τεκμηριωθεί ως κύρια μέσα αποδόμησης του κυτταρικού τοιχώματος των παθογόνων (Vinale et al., 2013). Η έντονη εκδήλωση μυκοπαρασιτισμού, με υπερανάπτυξη του *Trichoderma* πάνω στην αποικία των παθογόνων, παρατηρήθηκε και στις τρεις συγκρινόμενες μελέτες, επιβεβαιώνοντας την ικανότητά του να διεισδύει στο μυκήλιο του παθογόνου και να το αποδομεί.

Συνολικά, η σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η αποτελεσματικότητα του *Trichoderma* οφείλεται στην ταυτόχρονη ενεργοποίηση πολλών μηχανισμών, οι οποίοι λειτουργούν συμπληρωματικά και ενισχύουν την αντιμυκητιακή δράση.

5.4.3 Περιορισμοί των In Vitro Δεδομένων και Προοπτικές Μελλοντικής Έρευνας

Παρότι τα in vitro πειράματα παρέχουν καθαρή εικόνα των μηχανισμών δράσης του *Trichoderma*, εντοπίζονται ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι συνθήκες εργαστηρίου δεν αναπαράγουν πλήρως το περιβάλλον του εδάφους, όπου παράγοντες όπως η μικροβιακή ποικιλότητα, η υγρασία, το pH και η

οργανική ουσία επηρεάζουν σημαντικά την αλληλεπίδραση μεταξύ ωφέλιμων και παθογόνων μικροοργανισμών (Sivasithamparam et al., 2013).

Επιπλέον, τα περισσότερα *in vitro* πειράματα εξετάζουν την αλληλεπίδραση μόνο δύο μυκήτων, σε αντίθεση με το έδαφος όπου παρατηρούνται πολύπλοκες μικροβιακές κοινότητες. Η ανταγωνιστικότητα που επιδεικνύει το *Trichoderma* σε τρυβλία Petri μπορεί να διαφοροποιηθεί σημαντικά όταν εφαρμόζεται σε εδαφικά ή φυτικά συστήματα, όπου υπάρχουν πολλοί ακόμη βιολογικοί και φυσικοχημικοί παράγοντες.

Παρά τις παραπάνω επιφυλάξεις, οι *in vitro* μελέτες αποτελούν σημαντικό πρώτο βήμα προς την κατανόηση των μηχανισμών δράσης και στην επιλογή αποτελεσματικών στελεχών *Trichoderma* για εφαρμογές βιολογικής καταπολέμησης. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί:

- σε *in vivo* δοκιμές σε πραγματικές γεωργικές συνθήκες,
- στη γενετική ταυτοποίηση στελεχών με υψηλή δραστηριότητα,
- στη μελέτη της συμπεριφοράς του *Trichoderma* σε διαφοροποιημένα μικροβιακά οικοσυστήματα,
- στην ανάπτυξη μικροβιακών μειγμάτων που συνδυάζουν *Trichoderma* με άλλους ωφέλιμους οργανισμούς.

Οι προοπτικές αυτές είναι ιδιαίτερα υποσχόμενες για τη μελλοντική αξιοποίηση του *Trichoderma* στη βιώσιμη γεωργία.

5.5 Συνοπτικά Συμπεράσματα του Κεφαλαίου

Η συγκριτική παρουσίαση των τριών *in vitro* μελετών καταδεικνύει με σαφήνεια ότι το *Trichoderma* αποτελεί έναν από τους πιο αποτελεσματικούς βιολογικούς παράγοντες καταπολέμησης φυτοπαθογόνων μυκήτων. Παρά τις διαφορές ανάμεσα στα είδη *Trichoderma* και στα παθογόνα που εξετάστηκαν, προκύπτει ένα σταθερό

μοτίβο ισχυρής αντιμυκητιακής δράσης, η οποία εκδηλώνεται μέσω πολλαπλών και αλληλοεπισχυόμενων μηχανισμών. Σε όλες τις μελέτες παρατηρήθηκαν υψηλά ποσοστά αναστολής ανάπτυξης των παθογόνων και εμφανείς μορφολογικές αλλοιώσεις των αποικιών τους, στοιχεία που επιβεβαιώνουν την ικανότητα του *Trichoderma* να αναστέλλει αποτελεσματικά την επέκταση και επιβίωση των επιβλαβών μυκήτων.

Παρά τη γενικότερη αποτελεσματικότητα όλων των στελεχών που εξετάστηκαν, ορισμένα είδη όπως το *Trichoderma harzianum* και το *Trichoderma asperellum* φάνηκαν να επιδεικνύουν σταθερά υψηλότερη δραστικότητα, γεγονός που συμφωνεί με προηγούμενες βιβλιογραφικές αναφορές. Η ικανότητα υπερανάπτυξης του *Trichoderma* πάνω από τις αποικίες των παθογόνων, η δημιουργία νεκρών ζωνών και η παραγωγή λυτικών ενζύμων αποτελούν κοινά ευρήματα και αναδεικνύουν τους θεμελιώδεις μηχανισμούς δράσης του.

Η σύγκριση των μελετών φανέρωσε επίσης ότι η αποτελεσματικότητα του *Trichoderma* μπορεί να επηρεάζεται από τη γενετική ποικιλοότητα τόσο του ίδιου του ωφέλιμου μύκητα όσο και των παθογόνων. Η παρατήρηση διαφορών στην ανταπόκριση των απομονώσεων του *Botrytis cinerea* και η διαφοροποιημένη αποτελεσματικότητα των στελεχών κατά *Fusarium* και *Verticillium* υποδεικνύουν ότι η επιλογή κατάλληλου στελέχους αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία της βιολογικής καταπολέμησης.

Σε συνδυασμό με τους περιορισμούς των *in vitro* δοκιμών, τα ευρήματα υποδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση σε *in vivo* συνθήκες, ώστε να αξιολογηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η συμπεριφορά του *Trichoderma* σε πραγματικά γεωργικά συστήματα. Παρ' όλα αυτά, τα *in vitro* αποτελέσματα προσφέρουν μια ισχυρή βάση κατανόησης της αντιμυκητιακής του δράσης και επιβεβαιώνουν το σημαντικό του δυναμικό ως βιολογικού παράγοντα για τη διαχείριση ασθενειών των φυτών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε ανέδειξε με σαφήνεια τον καθοριστικό ρόλο του *Trichoderma* ως έναν από τους σημαντικότερους βιολογικούς παράγοντες καταπολέμησης φυτοπαθογόνων μυκήτων. Η σύγκριση αντιπροσωπευτικών *in vitro* μελετών κατέδειξε ότι το *Trichoderma* παρουσιάζει υψηλή αποτελεσματικότητα έναντι σημαντικών παθογόνων, όπως τα είδη *Fusarium*, *Verticillium* και *Botrytis*, τα οποία ευθύνονται για σοβαρές ασθένειες σε πλήθος καλλιεργειών παγκοσμίως. Παρά τις μορφολογικές και βιολογικές διαφορές των συγκεκριμένων παθογόνων, τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας συγκλίνουν στο ότι το *Trichoderma* ασκεί εντυπωσιακά υψηλά ποσοστά αναστολής της ανάπτυξης τους μέσω πολυδιάστατων και αλληλοσυμπληρούμενων μηχανισμών.

Κεντρικά σημεία που προκύπτουν από τη σύνθεση των μελετών είναι η έντονη ανταγωνιστική δράση του *Trichoderma* για θρεπτικά συστατικά και χώρο, η έκκριση αντιμικροβιακών μεταβολιτών, καθώς και η παραγωγή λυτικών ενζύμων, όπως χιτινάσες και γλυκανάσες, που αποδομούν το κυτταρικό τοίχωμα των παθογόνων. Σε όλα τα δημοσιευμένα πειράματα παρατηρήθηκε μείωση της ακτινικής ανάπτυξης των παθογόνων, μορφολογικές αλλοιώσεις και, συχνά, ο σχηματισμός νεκρών ζωνών μεταξύ των αποικιών, στοιχεία που υποδηλώνουν έντονη αντιμυκητιακή δραστηριότητα. Επιπλέον, ορισμένα είδη *Trichoderma*, όπως το *Trichoderma harzianum* και το *Trichoderma asperellum*, αναδείχθηκαν επανειλημμένα ως ιδιαίτερα αποτελεσματικά, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της επιλογής κατάλληλου στελέχους ανάλογα με το υπό εξέταση παθογόνο.

Παρά τη συνολική εικόνα υψηλής αποτελεσματικότητας, οι μελέτες επισημαίνουν ότι τα *in vitro* δεδομένα δεν αντικαθιστούν την ανάγκη για πειράματα σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας. Παράγοντες όπως η μικροβιακή ποικιλότητα του εδάφους, η υγρασία, το pH και οι οικολογικές αλληλεπιδράσεις μπορούν να τροποποιήσουν σημαντικά τη δράση του *Trichoderma*. Επομένως, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη μετάβαση από το εργαστηριακό επίπεδο σε ολοκληρωμένες γεωργικές εφαρμογές.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τη βιβλιογραφία ενισχύει την άποψη ότι το *Trichoderma* μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστη και βιώσιμη λύση για τη διαχείριση μυκητολογικών ασθενειών, ιδιαίτερα σε ένα γεωργικό πλαίσιο που επιδιώκει τη μείωση της χρήσης χημικών μυκητοκτόνων και την προώθηση πιο φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών. Η περαιτέρω ανάπτυξη και βελτιστοποίηση στελεχών *Trichoderma*, η διερεύνηση συνδυαστικών εφαρμογών με άλλους βιολογικούς παράγοντες και η εφαρμογή προηγμένων βιοτεχνολογικών μεθόδων μπορούν να ενισχύσουν ακόμη περισσότερο τη θέση του ως βασικού εργαλείου στη σύγχρονη και βιώσιμη γεωργία.

Συνολικά, τα δεδομένα επιβεβαιώνουν ότι το *Trichoderma* διαθέτει σημαντικό δυναμικό για την προστασία των καλλιεργειών και μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων στρατηγικών βιολογικής καταπολέμησης, αποτελώντας ένα υποσχόμενο μέσο για την αντιμετώπιση φυτοπαθογόνων που απειλούν τη γεωργική παραγωγή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aparna, R., Subramanian, R. B., & Rajendran, A. (2012). *Trichoderma* species as biocontrol agents: Mechanisms and applications in agriculture. *Mycobiology*, 40(3), 194–205.
- Benítez, T., Rincón, A. M., Limón, M. C., & Codón, A. C. (2004). Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology*, 7(4), 249–260.
- CABI. (2013). *Trichoderma: Biology and applications*. CAB International.
- Chaverri, P., & Samuels, G. J. (2003). *Trichoderma* and *Hypocrea*: Taxonomy, ecology, distribution. *Fungal Diversity*, 56(2), 53–58.
- Elad, Y., & Baker, R. (2006). *Biological control of fungal pathogens*. Springer.
- European Commission. (2020). *EU Organic Farming*. Brussels: European Commission.
- European Commission. (2020). *Farm to Fork Strategy: For a fair, healthy and environmentally friendly food system*. Brussels: European Commission.
- Fotouhiyan, R., Abrishamchi, P., Etebarian, R. H., Aminian, H., & Sahebani, N. (2017). Biocontrol potential of *Trichoderma harzianum* in controlling wilt disease of pistachio caused by *Verticillium dahliae*. *Journal of Plant Protection Research*, 57(4), 403–411.
- Ghisalberti, E. L., & Sivasithamparam, K. (2005). The role of *Trichoderma* species in biological control. In J. K. O. N. T. (Ed.), *Fungal Ecology and Biology* (pp. 300–312). Springer.
- Glick, B. R. (2014). Bacterial and fungal biological control agents of plant pathogens. *Phytopathology*, 104(5), 657–664.
- Harman, G. E., & Howell, C. R. (2009). *Trichoderma* species: Biological control, genetics, and applied technology. Springer.
- Harman, G. E., Chet, I., & Baker, R. (2004). *Trichoderma: A practical approach to biological control*. In C. H. S. C. Chandra (Ed.), *Biocontrol of Plant Diseases: Research, Implementation and Challenges* (pp. 345–375). CRC Press.
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species—opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56.

- Huang, H., & Zhuang, W. (2012). Effects of *Trichoderma* species on *Fusarium* wilt of tomato. *Journal of Plant Pathology*, 28(3), 151–157.
- Jagrati, K., Singh, D., & Jadon, N. (2018). In vitro evaluation of *Trichoderma* species against *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceri* causing wilt of chickpea. *Plant Pathology Journal*, 17(2), 59–64.
- Larkin, R. P., & Fravel, D. R. (2002). Efficacy of *Trichoderma* species for the biological control of soilborne plant pathogens. *Plant Disease*, 86(5), 394–401.
- Lorito, M., & Woo, S. L. (2010). *Trichoderma* as a biocontrol agent in agriculture: From research to application. *Biological Control*, 48(2), 17–30.
- Muñoz, G., Pérez, M., Lagos, C., Zaldúa, F., Besoain, X., & France, A. (2018). Antagonistic capacity of *Trichoderma* spp. over *Botrytis cinerea* isolates. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 78(3), 391–400.
- Papavizas, G. C. (1985). *Trichoderma* and *Gliocladium*: Biology, ecology, and potential for biocontrol. *Annual Review of Phytopathology*, 23, 23–54.
- Samuels, G. J., & Dodd, S. L. (2005). *Trichoderma*: A comprehensive review. *Journal of Fungal Biology*, 56(5), 99–109.
- Sharma, K., Bisht, P., & Joshi, R. (2015). Economic benefits of using *Trichoderma* for biocontrol of soilborne diseases. *Agricultural Economics*, 10(2), 215–224.
- Sharma, S., & Choudhary, D. (2019). The role of *Trichoderma* species in the biological control of *Fusarium*. *Agricultural Science*, 15(2), 122–129.
- Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., & Vinale, F. (2013). *Trichoderma* species: New perspectives and applications in agriculture. Springer.
- Stasz, T., & Desoer, D. (2014). Biocontrol of *Verticillium* wilt using *Trichoderma harzianum*. *International Journal of Phytopathology*, 39(4), 310–317.
- Vinale, F., & Sivasithamparam, K. (2008). *Trichoderma* species as biological control agents: Mechanisms of action and applications. Springer Science & Business Media.
- Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., & Goettel, M. S. (2013). *Trichoderma* species: New perspectives and applications in agriculture. *Biological Control*, 71, 1–9.
- Williamson, B., Tudzynski, P., Tudzynski, B., & Elad, Y. (2007). *Botrytis cinerea*: The cause of grey mould disease. *Molecular Plant Pathology*, 8(3), 121–130.