

کنترل زیستی بیماری سپتوریوز برگ‌گی گندم با استفاده از جدایه‌های *Trichoderma*

حمیده خواسی^۱، امیر میرزادی‌گوهری^۱✉، خلیل‌بردی فتوحی‌فرا^۱، محمد جوان‌نیکخواه^۱، محسن فرزانه^۲، شهرام نعیمی^۳
^۱بخش بیماری‌شناسی گیاهی، گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ^۲گروه کشاورزی، پژوهشکده گیاهان و مواد اولیه دارویی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. ^۳بخش تحقیقات کنترل بیولوژیک، موسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. mirzadighohari@ut.ac.ir
 دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۲ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

چکیده

طی دو دهه گذشته، امکان کنترل زیستی بیماری سپتوریوز برگ‌گی گندم ناشی از *Zymoseptoria tritici*، به‌عنوان یک جایگزین قابل اطمینان و ایمن برای روش کنترل شیمیایی در حال ارزیابی است. جنس *Trichoderma* دربرگیرنده تعداد زیادی عوامل کنترل زیستی است که به‌طور گسترده علیه بیماری‌های گیاهی در سراسر جهان استفاده می‌شوند. گونه‌های *Trichoderma* در کنار کنترل مستقیم بیمارگرهای گیاهی، ویژگی‌های مفید دیگری نیز برای میزبان‌های گیاهی خود فراهم می‌آورند. این پژوهش، با هدف ارزیابی اثر چند جدایه آنتاگونیست دارای پتانسیل اندوفیتی قارچ *Trichoderma* در کنترل بیماری سپتوریوز برگ‌گی گندم رقم تیرگان در شرایط گلخانه‌ای انجام شده است. جدایه‌های آنتاگونیست *Trichoderma* به دو روش تیمار بذری در زمان کاشت، و پاشش روی گیاه ۷۲ ساعت پیش از مایه‌زنی با جدایه بیمارگر، استفاده شدند. شدت بیماری سپتوریوز برگ‌گی، ۲۱ روز پس از مایه‌زنی با *Z. tritici* IPO323 محاسبه گردید. پیش‌تیمار رقم حساس گندم با جدایه‌های کنترل زیستی *Trichoderma* به‌طور معنی‌داری ($\alpha = 0/01$) شدت بیماری را کاهش داد؛ که در این بین، جدایه *T. harzianum* AS12-2 با کاهش به ترتیب ۸۰/۱۲ و ۷۷/۷۱ درصدی سطح نکروز برگ و پوشش پیکنیدیومی، میانگین بیشترین درصد بازدارندگی از سپتوریوز برگ‌گی را در هر دو روش کاربرد به خود اختصاص داده است. براساس نتایج این پژوهش جدایه‌های *Trichoderma* به‌عنوان جایگزین/مکمل‌های ایمن قارچ‌کش‌های شیمیایی، ظرفیت بالایی برای گنجانده شدن در برنامه‌های مدیریت تلفیقی بیماری سپتوریوز برگ‌گی گندم دارند.

کلمات کلیدی: مدیریت بیماری، آنتاگونیست، اندوفیت، کشاورزی پایدار، *Zymoseptoria tritici*

Biocontrol of Septoria tritici blotch disease of wheat using *Trichoderma* isolates

Hamideh Khavasi¹, Amir Mirzadi Gohari¹✉, Khalil-Berdi Fotouhifar¹, Mohammad Javan-Nikkhah¹, Mohsen Farzaneh², Shahram Naeimi³

¹Plant Pathology Division, Department of Plant Protection, Agriculture Faculty, Collage of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. ²Department of Agriculture, Medicinal Plants and Drugs Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. ³Department of Biological Control Research, Iranian Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

✉mirzadighohari@ut.ac.ir

Received: 23 November 2023 Revised: 18 February 2023 Accepted: 17 September 2023

Abstract

Over the past two decades, biological control of wheat septoria tritici blotch (STB) caused by *Zymoseptoria tritici* has been evaluated as a reliable and safe alternative or complement to chemical control. The genus *Trichoderma* includes several biocontrol agents (BCAs) widely used worldwide against plant diseases. Besides direct control of plant pathogens, *Trichoderma* spp as BCAs provide numerous other beneficial features for their plant hosts. The current study aimed to assess the potential biocontrol ability of several antagonistic *Trichoderma* isolates with endophytic potential on STB reduction in wheat cultivar Tigran under greenhouse conditions. The antagonists were used as a seed-coated treatment at the sowing time and sprayed on the plants 72 h before *Z. tritici* IPO323 inoculation. STB severity was calculated 21 days after the pathogen inoculation. The biocontrol isolates significantly ($\alpha = 0.01$) reduced the disease severity on cv. Tigran. *T. harzianum* AS12-2 provided the highest average percentage of STB inhibition in both application methods. Application of *T. harzianum* AS12-2 led to a reduction in the percentage of leaf area covered by lesions (PLACL) and the percentage of leaf area covered by pycnidia (PLACP) by 80.12% and 77.71%, respectively. *Trichoderma* biocontrol isolates could be considered safe and reliable alternatives/complements for sustainable agriculture in integrated management programs of wheat STB.

Key words: Antagonist, Endophyte, Disease management, Sustainable agriculture, *Zymoseptoria tritici*

How to cite:

Khavasi H, Mirzadi Gohari A, Fotouhifar KB, Javan-Nikkhah M, Farzaneh M, Naeimi S, 2024. Biocontrol of Septoria tritici blotch disease of wheat using *Trichoderma* isolates. *Journal of Applied Research in Plant Protection* 13 (3): 269-284.

مقدمه

حافظه رونویسی موثر پاسخ‌های گیاه، جدایه‌های کنترل زیستی *Trichoderma* را به نماینده‌های اصلی در پژوهش‌های حوزه کنترل زیستی بیماری‌های گیاهی تبدیل کرده است (Woo et al. 2023). این درحالی است که در کشور ما علی‌رغم وجود منابع متعدد و متنوع، تاکنون تجاری‌سازی محصولات زیستی بر پایه جدایه‌های بومی آنتاگونیست *Trichoderma* توسعه قابل توجهی نیافته است.

گندم جزو پنج محصول گیاهی اصلی تامین کننده کالری بشر و سومین غله پرمصرف دنیاست (Shewry 2009; O'Driscoll et al. 2014; Stukenbrock & Gurr 2023). با توجه به افزایش جمعیت جهان به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه، افزایش عملکرد این محصول در سطح جهانی یک اولویت اصلی برای تامین کافی غذا و حفظ امنیت غذایی است (Duveiller et al. 2007; O'Driscoll et al. 2014). این درحالی است که، کاهش در دسترس بودن زمین‌های زراعی مناسب، تغییر آب‌وهوا و انواع تنش‌های غیرقابل پیش‌بینی زیستی و غیرزیستی، تهدیدی مداوم برای تولید گندم در سطح منطقه‌ای و جهانی محسوب می‌شود (Figueroa et al. 2018). در این بین، قارچ‌های بیماری‌زا محدودیتی قابل‌توجه در تولید گندم به‌وجود می‌آورند به‌طوری که عملکرد گندم به‌طور متوسط سالانه ۲۰-۱۵ درصد از بیماری‌های قارچی آسیب می‌بیند (Figueroa et al. 2018; Stukenbrock & Gurr 2023). قارچ *Zymoseptoria tritici* (Roberge ex Desm.) (Quaedvli. & Crous 2011) مهم‌ترین بیماری‌های گندم به‌ویژه در مناطق معتدل است (Quaedvlieg et al. 2011; Figueroa et al. 2018) که در صورت فراهم بودن شرایط مناسب کاهش تا ۵۰ درصدی عملکرد را به‌دنبال دارد (Eyal et al. 1987; Mojerlou et al. 2009; Fones & Gurr 2015). تغییر روش‌های کشاورزی به‌ویژه افزایش سطح کشت ارقام پاکوتاه و مقاوم به زنگ‌ها جهانی آب‌وهوا (Dean et al. 2012; Bearchell et al. 2005; Wahdan et al. 2020) این بیماری را به سومین بیماری مهم گندم در دنیا (Yang et al. 2022)، مهم‌ترین بیماری گندم در سطح اروپا (Brennan et al. 2019) و سومین بیماری مهم گندم در ایالات متحده، تبدیل کرده است (Ponomarenko et al. 2011). در ایران هم، این بیماری به‌ویژه در سال‌های پرباران، به شکل اپیدمی‌های منطقه‌ای در استان‌های بزرگ و مهم تولیدکننده گندم اتفاق می‌افتد و کاهش عملکرد ناشی از

سیاست‌های کشاورزی در سراسر جهان، هر روز با اهمیت و سرعت بیشتری به‌وسیله‌ی نهادهای تامین کننده غذا، در حال تغییر به سمت کم کردن و جایگزینی محصولات ساختگی شیمیایی با فرآورده‌های زیستی و ایمن است. مدیریت آفات و بیماری‌های گیاهی به‌شیوه کنترل زیستی، یکی از راهبردی‌ترین ابزار و رویکردهای کشاورزی مدرن برای رسیدن به این هدف می‌باشد (Thambugala et al. 2020). قارچ‌های عامل کنترل زیستی با توان آنتاگونیستی روی بیمارگرهای مختلف، از عوامل مهم کنترل بیمارگرهای گیاهی می‌باشند که در سراسر جهان درحال استفاده هستند و نتایج امیدوارکننده‌ای به دنبال داشته‌اند (Thambugala et al. 2020; Zeilinger 2023). در این بین، سهم و اهمیت گونه‌های مفید *Trichoderma*، بیشتر از سایر عوامل قارچی کنترل زیستی می‌باشد. از زمان معرفی جنس (Persoon 1794) *Trichoderma* تاکنون، گونه‌های این جنس به دلیل اثرات مثبت و مفیدی که در تعامل با گیاهان فراهم کرده‌اند؛ همواره مورد توجه مطالعات پژوهشی در حوزه‌های بیوتکنولوژی و کشاورزی بوده‌اند (Howell 2003; Naeimi et al. 2022; dos Sontos & dos Sontos 2023; Barakat et al. 2023). به‌طوری که می‌توان *T. harzianum* Rifai را رایج‌ترین و توسعه یافته‌ترین عامل کنترل زیستی دانست که برای گستره وسیعی از بیمارگرها، استفاده می‌شود (Zeilinger 2023). جدایه‌های مفید *Trichoderma* به شکل زیست‌محافظ، کود زیستی، اصلاح‌کننده خاک، تجزیه‌کننده زیستی و زیست‌پالاینده در محصولات تجاری در حال استفاده هستند (Hidangmayum & Dwivedi 2018; Thambugala et al. 2020; Sarrocco 2023; Woo et al. 2023). اثرات مفید *Trichoderma* روی برهم‌کنش‌های گیاه با تنش‌های زیستی و غیرزیستی به آنتاگونیسم مستقیم، افزایش رشد گیاه به‌ویژه ریشه‌های متأثر از تنش، مقاومت سیستمیک به بیماری‌ها، مقاومت سیستمیک به تنش‌های غیرزیستی مانند شوری و دماهای فرین (Extreme temperatures)، بهبود شاخص‌های قدرت بذر، تجزیه مواد آلی، انحلال فسفر و افزایش دسترسی به ریزمغذی‌ها و بهبود کارایی نیتروژن نسبت داده می‌شود (Harman 2000; Benítez et al. 2004; Singh et al. 2005; Lorito et al. 2010; Mastouri et al. 2010; Shores et al. 2010; Bae et al. 2011; Zaidi et al. 2014; Mirrahime et al. 2022). دست کاری ترکیب میکروبی و برهم‌کنش با سایر میکروارگانیسم‌ها به‌ویژه در محیط ریزوسفر در کنار فعال کردن

برای کاهش اثرات ناشی از بیماری سپتوریوز برگی لازم و ضروری است (Jensen et al. 2019). کنترل سپتوریوز برگی با استفاده از قارچ‌های عامل کنترل زیستی، یک رویکرد نوآورانه است که در مقایسه با سایر بیماری‌های برگی گندم نیاز به توجه بیشتری دارد. امکان استفاده از عوامل کنترل زیستی برای بیماری سپتوریوز برگی، در چند مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. بیشتر این گزارش‌ها مربوط به کاربرد باکتری‌های آنتاگونیست به‌ویژه تعدادی از استرین‌های فلورسنت سودوموناد و اعضای جنس *Bacillus* و یا آنتی‌بیوتیک‌های حاصل از این جدایه‌ها می‌باشد (Kildea et al. 2008; Lynch et al. 2016; Samain et al. 2017; Mejri et al. 2018; Eisner et al. 2023). از جمله، در ارزیابی درون‌گیاهی جدایه‌های باکتریایی به‌دست آمده از برگ و ریزوسفر غلاتی مانند گندم، جو و یولاف، هفت جدایه کاهش ۹۲ درصدی شدت بیماری سپتوریوز برگی را در شرایط کنترل شده به همراه داشته‌اند. در مرحله ارزیابی مزرعه‌ای این جدایه‌ها، فقط کاربرد برگی سویه *B. megatrium* MKB135 شدت سپتوریوز برگی را تا سطح ۸۰ درصد کاهش داده است (Kildea et al. 2008). استفاده از باکتری شکارگر *Myxococcus xanthus* Beebe کاهش جمعیت *Z. tritici* را در بقایای گندم به همراه داشته است. آسکوکارپ‌های قارچ عامل بیماری روی بقایای گندم از منابع مهم اینوکولوم بیماری در ابتدای فصل محسوب می‌شوند. استفاده از عوامل کنترل زیستی دارای رفتار شکارگری روی بقایای گندم، می‌تواند بر توسعه بیماری طی فصل بعدی موثر واقع شود (Eisner et al. 2023). در بین قارچ‌های آنتاگونیست، بیشتر جدایه‌های ریزوسفری قارچ *T. harzianum* مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Perelló et al. 1997, 2009; Cordo et al. 2016; Stocco et al. 2007). در مطالعه (Cordo et al. 2007)، اثر ۴۰ جدایه کنترل زیستی *Trichoderma* بر سپتوریوز برگی، در کاربرد به‌صورت پوشش بذر و محلول‌پاشی، در شرایط گلخانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. بیش از نیمی از این جدایه‌ها شدت STB را بیش از ۵۰ درصد کاهش داده‌اند. استفاده از جدایه‌های *Trichoderma* به روش تیمار بذر، موثرتر از کاربرد آن‌ها به‌صورت مستقیم روی گیاه گزارش شده است. بهترین عملکرد در کاهش شدت بیماری در کاربرد بذری *T. harzianum* Th5 ثبت شده که از فیلوپلن (Phylloplane) گندم به دست آمده است. عملکرد کنترل زیستی این جدایه، در پژوهش (Perelló et al. 2009) در شرایط مزرعه‌ای نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. کاهش ۷۰ درصدی شدت سپتوریوز

آن ۴۰-۱۰ درصد برآورد شده است (Kia & Torabi 2008; Eslahi & Mojerlou 2018; Omrani et al. 2023). در استان خوزستان و گلستان مهم‌ترین مناطق بروز بیماری سپتوریوز برگی گندم هستند. البته بیماری از استان‌های اردبیل، ایلام، فارس، لرستان و مرکزی نیز گزارش شده است (Kia et al. 2018). وجود مرحله غیرجنسی چندچرخه‌ای و یک چرخه فعال جنسی در دوره زندگی قارچ عامل این بیماری (Brennan et al. 2019)، جهش، نوترکیبی جنسی و همچنین امکان جریان ژنی (Vagndorf 2018; Feurtey et al. 2023) تنوع ژنتیکی زیاد در جمعیت‌های قارچ عامل بیماری را به‌همراه دارد (Dalvand et al. 2018 a,b).

در حال حاضر کنترل بیماری سپتوریوز برگی وابسته به کاربرد گسترده قارچ‌کش‌های شیمیایی و استفاده از ارقام مقاوم است. مدیریت همه‌گیری‌های این بیماری با استفاده گسترده از این قارچ‌کش‌های شیمیایی در کنار بهره‌مندی قارچ عامل بیماری از سیستم تولیدمثلی جنسی و غیرجنسی (Fones & Gurr 2015) منجر به پیدایش جمعیت‌های مقاوم قارچی به تمام گروه‌های اصلی این قارچ‌کش‌ها شده است (O'Driscoll et al. 2014; Brennan et al. 2019; McDonald et al. 2019; Benbow et al. 2020; Tidd et al. 2023). از سوی دیگر، علی‌رغم پیشرفت‌های چشم‌گیر در معرفی ارقام مقاوم در برابر این بیماری، مقاومت در ارقام معرفی شده تا به امروز، جزئی (Partial resistance) (Chartrain et al. 2004; Arraiano & Brown 2006; Brown et al. 2015) اختصاصی ژنوتیپ (Brown et al. 2015; Battache et al. 2022; Tidd et al. 2023) و کم‌دوام (Kema et al. 2018; Tidd et al. 2023) می‌باشد. به‌طوری‌که، کاربرد گسترده قارچ‌کش‌های شیمیایی (Cowger & Mundt 2002) و تنوع ژنتیکی زیاد در جمعیت‌های قارچ عامل بیماری (Abrinbana 2018; Dalvand et al. 2018 a,b; Mahboubi et al. 2022) باعث انتخاب جدایه‌های با تهاجم بیشتر شده (Hauelsen et al. 2019) و ارقام دارای مقاومت جزئی را با خطر شکسته شدن مقاومت، روبه‌رو ساخته است (Brown et al. 2015; Fones & Gurr 2015; Karlsson et al. 2017; Yang et al. 2022). از این‌رو، با توجه به ظهور ژنوتیپ‌های مقاوم این بیمارگر در برابر قارچ‌کش‌های رایج استفاده شده، اثرات نامطلوب این مواد شیمیایی روی محیط‌زیست و سلامت انسان در کنار امکان شکسته شدن مقاومت تک‌ژنی طی تکامل توأم (Orellana-Torrejon et al. 2022; Fones et al. 2023; Tidd et al. 2023)، دستیابی به رویکردی کارآمد و دوست‌دار محیط‌زیست

Pseudomonas و Waller, Zuccaro & Sellose (2022) *protegens* CHA0-mCherry در شرایط گلخانه‌ای روی گندم رقم تجن گزارش شده است. در تیمار بذرها با این دو جدایه، شدت بیماری سپتوریوز برگی به‌طور میانگین به میزان ۵۲ درصد کاهش یافته است. تیمار همزمان بذرها با این دو جدایه، میانگین کاهش شدت بیماری ناشی از *Z. tritici* را تا ۷۱ درصد در گندم رقم تجن بهبود داده است. مطابق اطلاعات ما، این مطالعه، نخستین بررسی درخصوص توانایی کاندیدهای بومی کنترل زیستی سپتوریوز برگی در کشور می‌باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی درون‌گیاهی چند جدایه آنتاگونیست متعلق به *Trichoderma* spp. که در پاتوسیستم‌های دیگر به‌طور موفق عمل کرده‌اند، در شرایط گلخانه‌ای انجام شده است.

مواد و روش‌ها

جدایه بیمارگر

در تمامی آزمون‌های غربالگری این پژوهش از جدایه استاندارد قارچ *Z. tritici* IPO323 که ژنوم آن به‌صورت کامل توالی‌یابی شده است (Goodwin et al. 2011)، استفاده گردید.

جدایه‌های کنترل زیستی *Trichoderma*

پنج جدایه *Trichoderma* که توانایی کنترل زیستی آن‌ها در پاتوسیستم‌های دیگر تحت شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای نشان داده شده است (Naeimi et al. 2011, 2019, 2020; Kari Dolatabad et al. 2017)؛ در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات این جدایه‌ها در جدول یک خلاصه شده است.

برگی در کاربرد بذری این جدایه معادل سطح حفاظت قارچ‌کش‌های شیمیایی ثبت شده علیه STB گزارش شده است. کاهش ۵۰ درصدی شدت بیماری در کاربرد جدایه‌های ریزوسفری *T. harzianum* در شرایط گلخانه‌ای در مطالعه Stocco et al. (2016) نیز گزارش شده است. با ثبت افزایش سطح فعالیت آنزیم‌های پروتئاز در برگ‌های حاصل از بذرها، تیمار شده با این جدایه‌ها در مقایسه با گیاهچه‌های شاهد و در نتیجه عدم جداسازی مجدد *T. harzianum* از این برگ‌ها، برانگیختن پاسخ‌های ایمنی سازوکار احتمالی جدایه‌های کنترل زیستی در کاهش شدت بیماری سپتوریوز برگی معرفی شده است. کاربرد جدایه‌های کنترل زیستی قارچ *Clonostachys rosea* (Preuss) Mussat در طی یک بررسی پنج ساله، شدت بیماری ناشی از STB را در شرایط مزرعه‌ای کاهش داده است. اثر کاهشی این جدایه‌ها که از ریزوسفر، اندام‌های گیاهی و سیست نماتد غلات جداسازی شده‌اند، با اضافه کردن سوبه‌های کنترل زیستی *P. chlororaphis* افزایش یافته است (Jensen et al. 2019). اخیراً Latz et al. (2020) کاهش ۷۵ درصدی شدت بیماری را در کاربرد مزرعه‌ای دو جدایه اندوفیت گندم *Penicillium olsonii* ML37 Bainier & Sartory و *Acremonium alternatum* ML38 Link گزارش کرده‌اند. سطح حفاظت این جدایه‌ها معادل قارچ‌کش‌های تجاری ثبت شده علیه سپتوریوز برگی اعلام شده است. شدت بیماری سپتوریوز برگی فقط در کاربرد برگی این جدایه‌ها کاهش نشان داده است و تیمار بذرها با سوسپانسیون اسپوری جدایه‌های قارچی اندوفیت، اثر کاهشی روی شدت بیماری نداشته است. در مطالعه Ashrafi et al. (2021) نیز کاهش شدت سپتوریوز برگی با استفاده از *Serendipita indica* (Sav. Verma, Aj. Varma, Rexer, G. Kost & P. Franken) M. Weiss, F.

جدول ۱. جدایه‌های آنتاگونیست *Trichoderma* استفاده شده در ارزیابی‌های درون‌گیاهی.

Table 1. Antagonist *Trichoderma* isolates used in *in planta* assays.

Isolate cod	<i>Trichoderma</i> species	Origin	Reference
AS3-5	<i>Trichoderma harzianum</i> complex	Paddy rice field	Naeimi et al. 2010, 2011
AS12-2	“	Soil	Naeimi et al. 2010, 2011
SS1-1	“	Paddy rice field	Naeimi et al. 2010, 2011
AD1-3	<i>T. virens</i>	Rice debris	Naeimi et al. 2010, 2011
I46	<i>T. longibrachiatum</i>	Leaf endosphere	Kari Dolatabad et al. 2017

مواد گیاهی

IPO323، از بین ۱۳ ژنوتیپ گندم که بیشترین سطح زیر کشت را در نواحی گسترش بیماری در استان‌های گلستان و خوزستان دارند؛ استفاده شده است (داده‌های منتشر نشده). پیش از کشت، بذرها گندم رقم تیرگان به مدت یک دقیقه با

برای آزمون‌های گلخانه‌ای، از گندم رقم تیرگان (دریافت شده از بخش غلات موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر) پس از ارزیابی فنوتیپی واکنش در برابر جدایه مرجع *Z. tritici*

روی 10^7 اسپور در هر میلی‌لیتر تنظیم گردید (Mirzadi (Gohari 2015; Seybold et al. 2020).

اثر جدایه‌های کنترل زیستی بر شدت بیماری ناشی از *Zymoseptoria tritici* IPO323 در شرایط گلخانه

جدایه‌های *Trichoderma*، به‌صورت تیمار بذری و پاشش روی برگ استفاده شدند. در آزمایش‌های اولیه، جدایه‌های کاندید کنترل زیستی اسپتوریوز برگی در دو غلظت spore/ml 10^6 و 10^7 و جدایه بیمارگر با غلظت spore/ml 10^6 به کار رفتند. در کاربرد به‌صورت پاشش روی گیاه، برگ‌های اول گیاهچه‌های ده روزه گندم با سوسپانسیون اسپوری جدایه‌های *Trichoderma* (با غلظت 10^8 spore/ml) مایه‌زنی شدند. گیاهچه‌های شاهد با آب مقطر دوبار سترون تیمار شدند. تمام گیاهچه‌های مایه‌زنی شده، به مدت ۴۸ ساعت در کیسه‌های شفاف پلی‌اتیلنی نگهداری شده و پس از این مدت به محفظه نگهداری دارای پوشش شفاف منتقل گردیده و با آرایش طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار قرار گرفتند. رطوبت نسبی به بالای ۸۵ درصد افزایش یافت. ۷۲ ساعت پس از کاربرد جدایه‌های کنترل زیستی، برگ‌های اول گیاهچه‌های گندم با سوسپانسیون اسپوری پنج روزه *Z. tritici* (با غلظت 10^7 spore/ml) مایه‌زنی شدند. پیش از مایه‌زنی با جدایه بیمارگر، برگ‌های دوم گیاهچه‌ها حذف گردید (Dutta et al. 2020). پس از آلوده سازی با جدایه بیمارگر نیز، تمام گیاهچه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در پوشش‌های شفاف پلی‌اتیلنی نگهداری و سپس به محفظه‌های نگهداری منتقل شدند. برای آغشته سازی بذر، بذرهای گندم رقم تیرگان ابتدا به مدت یک دقیقه با اتانول ۹۶ درصد، ۱۰ دقیقه با سدیم‌هیپوکلریت پنج درصد و یک دقیقه با اتانول ۷۰ درصد ضدعفونی شده و سه بار با آب مقطر دو بار سترون شستشو داده شدند. پس از حذف رطوبت اضافی بین حوله‌های کاغذی سترون، بذرها با 20 میلی‌لیتر سوسپانسیون اسپوری (10^8 spore/ml) هر کدام از جدایه‌ها و با آب مقطر سترون و توپین ۲۰ برای کنترل، به مدت ۲۴ ساعت در شرایط تاریکی و ۲۵ درجه سلسیوس به شدت تکان داده شده و سپس به شیوه بالا کشت شدند. ده روز پس از کشت بذرها، مایه‌زنی با جدایه بیمارگر روی برگ‌های اول گیاهچه‌های حاصل و مانند قبل انجام شد. برای گیاهچه‌های شاهد از آب مقطر استفاده گردید. بیست‌ویک روز پس از مایه‌زنی با *Z. tritici* IPO323، برگ‌های اول در تمام تیمارها برداشت و روی کاغذ A4 ثابت شدند تا برای ارزیابی

اتانول ۷۰ درصد و سپس یک دقیقه با محلول دو درصد سدیم‌هیپوکلریت ضدعفونی شده و سه بار با آب مقطر دو بار سترون شستشو داده شدند. پنج عدد بذر ضدعفونی شده در گلدان‌های پلاستیکی به قطر ۱۰ سانتی‌متر، حاوی نسبت مساوی از خاک مزرعه، ورمی‌کمپوست و پرلیت سترون شده (۹۰ دقیقه در ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۵ بار) کشت شدند. گلدان‌ها در گلخانه با دمای ۲۶ درجه سلسیوس، نور روزانه ۱۶ ساعت و رطوبت نسبی ۵۰ درصد درون محفظه‌های پلاستیکی شفاف نگهداری شدند.

تهیه زادمایه جدایه‌های کنترل زیستی

تشتک‌های ۹۰ میلی‌متری PDA (۲۰۰ گرم سیب‌زمینی-۲۰ گرم دکستروز-۲۰ گرم آگار) حامل کشت‌های ۱۰ روزه جدایه‌های کنترل زیستی، با ۷-۵ میلی‌لیتر آب مقطر دو بار سترون و ۰/۰۵ درصد توپین ۸۰ غوطه‌ور شدند. اسپورها با کمک اسکالپل سترون جمع‌آوری شده و با عبور دادن از پارچه لملم از میسلیم‌ها جدا گردیدند. غلظت سوسپانسیون اسپوری با کمک لام هموسیتومتر روی 10^8 اسپور در هر میلی‌لیتر تنظیم شد. بلافاصله پیش از کاربرد به‌عنوان پوشش بذر یا پاشش روی گیاه، ۰/۰۱ درصد توپین ۲۰ به سوسپانسیون اسپوری اضافه گردید (Card 2005).

تهیه زادمایه جدایه بیمارگر

آماده‌سازی *Z. tritici* IPO323 روی محیط کشت عصاره مخمر-عصاره مالت-دکستروز-آگار (YMDA) به نسبت ۴:۴:۴:۲ (Eyal et al. 1987) و محیط عصاره مخمر-ساکارز (YS) به نسبت ۱:۱ (Dutta et al. 2021) در دمای ۱۸ درجه سلسیوس انجام گردید (Mirzadi Gohari 2015; Fagundes et al. 2020). جدایه بیمارگر از ذخیره موجود در فریزر ۸۰- درجه سلسیوس، ابتدا روی محیط YMDA کشت و به مدت ۵-۳ روز در تاریکی نگهداری گردید. پس از رشد روی محیط جامد، بیومس حاصل به‌عنوان زادمایه برای مایه‌زنی محیط کشت YS استفاده شده و به مدت پنج روز دیگر در دستگاه شیکر با سرعت متوسط (۱۲۰ rpm) نگهداری گردید. سوسپانسیون اسپوری تولید شده در محیط YS، پس از عبور دادن از پارچه لملم دو لایه به مدت ۹ دقیقه در دمای محیط و 3000 rpm سانتریفیوژ گردید. اسپورهای جمع‌آوری شده دوباره با مقدار ۳-۲ میلی‌لیتر آب مقطر دو بار سترون به‌صورت سوسپانسیون درآمدند. غلظت سوسپانسیون با استفاده از لام هموسیتومتر

(یک دقیقه)، سدیم هیپوکلریت حاوی پنج درصد کلرین فعال (پنج دقیقه)، اتانول ۷۰ درصد (یک دقیقه) انجام شد (Larran *et al.* 2002). پس از سه بار شستشو با آب مقطر دو بار سترون (در مجموع هفت دقیقه) آب اضافی قطعات ضد عفونی شده بین چند لایه حوله کاغذی گرفته شد و با پنس سترون در تشتک‌های PDA حاوی آنتی‌بیوتیک کلرامفنیکول (۱۰ mg/l) کشت شدند. برای ارزیابی اثرگذاری روش ضد عفونی سطحی، ۱۰۰ μl آب از آخرین مرحله شستشو در تشتک‌های PDA (حاوی آنتی‌بیوتیک یاد شده) پخش گردید. تشتک‌ها در شرایط تاریکی و ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند و هر روز برای ردیابی رشد قارچی مورد بررسی قرار می‌گرفتند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری

داده‌های مربوط به شدت سپتوریوز برگی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (9.1.3) مورد تجزیه‌های یک‌طرفه پس از آنوا (Post-anova analysis) قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD ($\alpha = 0.05$) انجام شد. نمودارها در محیط Excel 2016 و جداول در محیط Word 2016 رسم شده‌اند.

نتایج

کاهش شدت سپتوریوز برگی با کاربرد جدایه‌های *Trichoderma* شدت سپتوریوز برگی ناشی از *Z. tritici* IPO323 با کاربرد جدایه‌های آنتاگونیست *Trichoderma* روی گندم رقم تیرگان کاهش یافت. روش کاربرد جدایه‌های کنترل زیستی مورد استفاده در این مطالعه، بر میزان کاهش شدت بیماری اثر می‌گذارد (جدول ۲).

شدت سپتوریوز برگی مورد استفاده قرار بگیرند. این آزمایش در چهار تکرار در دو سری مستقل از هم برای حصول اطمینان از نتایج انجام گردید. سطح نکرز برگ و سطح حامل پیکنیدیوم‌های بیمارگر، با استفاده از نرم‌افزار ImageJ2 (Schneider *et al.*, 2012) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

ردیابی جدایه‌های کنترل زیستی در اندوسفر گندم

یکصد عدد بذر گندم به مدت یک دقیقه در اتانول ۹۶ درصد، ده دقیقه در سدیم هیپوکلریت حاوی پنج درصد کلرین فعال و یک دقیقه اتانول ۷۰ درصد ضد عفونی شدند. سپس سه بار و هر بار به مدت یک دقیقه در آب مقطر دو بار سترون شستشو داده شدند. پس از حذف رطوبت اضافی بذرها بین حوله‌های کاغذی سترون، ۲۵ عدد بذر ضد عفونی سطحی شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و ۱۲۰ rpm با ۱۰ میلی‌لیتر سوسپانسیون اسپوری حاوی 10^8 اسپور در هر میلی‌لیتر هر کدام از جدایه‌های *Trichoderma* (در مجموع 10^9 اسپور) به همراه ۰/۰۱ درصد توپین ۲۰ تیمار شدند. برای کنترل، بذرها با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر دو بار سترون به همراه ۰/۰۱ درصد توپین ۲۰ تیمار گردیدند. پس از این مدت، در گلدان‌های به قطر ۱۰ سانتی‌متر حاوی بستر یاد شده کشت و در گلخانه با شرایط قبل نگهداری شدند. یک ماه پس از کشت، از هر تکرار به‌طور تصادفی یک گیاهچه به همراه ریشه با دقت خارج شده (در مجموع چهار عدد گیاهچه برای هر تیمار) و در کیسه‌های شفاف پلاستیکی و به‌سرعت به آزمایشگاه منتقل شدند. خاک ریشه‌ها با آب شهری شستشو داده شد. از برگ اول، غلاف برگ، طوقه و ریشه قطعات حدود پنج سانتی‌متری تهیه شد و دوباره شستشو داده شدند. ضد عفونی سطحی قطعات گیاهی با خیساندن آن‌ها در اتانول ۹۶ درجه

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر روش کاربرد جدایه‌های *Trichoderma* بر کاهش شدت بیماری سپتوریوز برگی.

Table 2. Analysis of variance for impact of *Trichoderma* isolates application method on STB severity reduction.

Source of Variation	df	MS	
		PLACL (%)	PLACP (%)
Block	3	56.931 ^{ns}	154.059 ^{ns}
<i>Trichoderma</i> isolates	2	2235.840 ^{***}	642.525 [*]
Application Method	1	224.958 [*]	2291.345 ^{***}
<i>Trichoderma</i> isolates*Application Method	2	3100.584 ^{***}	1198.133 ^{***}
Error	14	47.897	122.033
%CV		11.827	14.29

ns: not significant

*Significant at $\alpha=0/05$

***Significant at $\alpha=0/01$

PLACL: Percentage of Leaf Area covered by Lesions

PLACP: Percentage of Leaf Area covered by Pycnidia

اختلاف معنی‌داری از نظر شدت بیماری در غلظت‌های مختلف بیمارگر مشاهده نشد ($\alpha = 0/01$)، داده‌ها فقط برای ترکیب 10^8 (spore/ml) آنتاگونیست و 10^7 (spore/ml) بیمارگر و برای جدایه‌هایی که رفتار کنترل زیستی نشان دادند؛ نمایش داده شده است (جدول ۳).

در آزمایش‌های اولیه جدایه‌های آنتاگونیست با دو غلظت 10^7 و 10^8 اسپور در میلی‌لیتر و جدایه بیمارگر با غلظت‌های 10^6 و 10^7 اسپور در میلی‌لیتر، به کار برده شد. شروع رفتار بازدارندگی جدایه‌های *Trichoderma* با کاربرد آن‌ها در غلظت‌های بیشتر از جدایه بیمارگر اتفاق افتاد. از آنجایی که

جدول ۳. اثر کاربرد جدایه‌های *Trichoderma* بر درصد سطح نکروزه برگ و سطح حامل پیکنیدیوم‌ها.

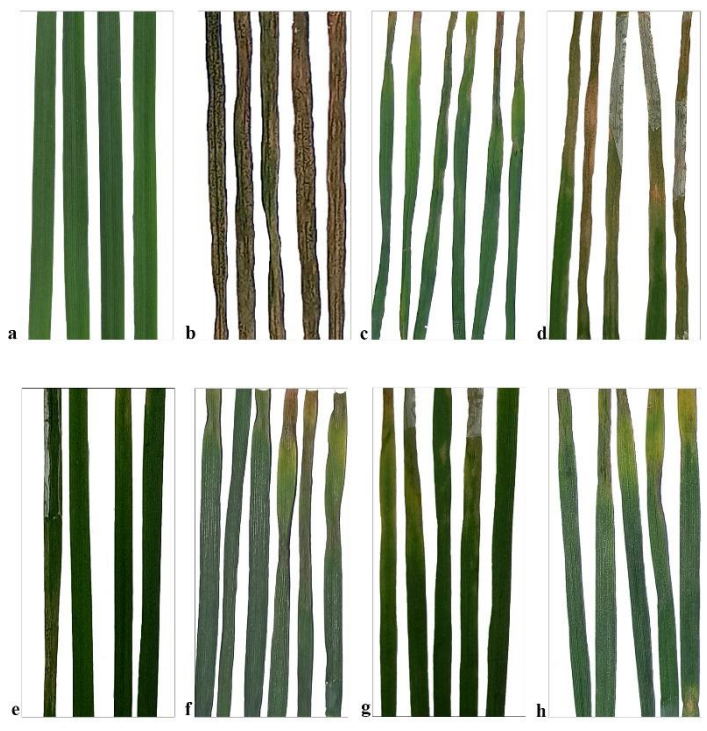
Table 2. Impact of *Trichoderma* isolates application on percentage of leaf necrotic area and area covered by the pycnidia.

Application Method	PLACL (%)	PLACP (%)
<i>Z. tritici</i> IPO323 (Control)	91.41 ^a	52.24 ^a
<i>T. harzianum</i> AS12-2 (LS)	25.74 ^{cd}	13.00 ^c
<i>T. harzianum</i> AS12-2 (ST)	10.60 ^c	10.29 ^c
<i>T. virens</i> AD1-3 (LS)	27.08 ^d	9.01 ^c
<i>T. virens</i> AD1-3 (ST)	59.25 ^b	7.43 ^c
<i>T. longibrachiatum</i> I46 (LS)	73.44 ^b	25.74 ^b
<i>T. longibrachiatum</i> I46 (ST)	32.50 ^d	6.32 ^c

Means followed by the same letter are not significantly different ($\alpha=0/05$) according to LSD test

LS: Leaf spraying

ST: Seed treatment

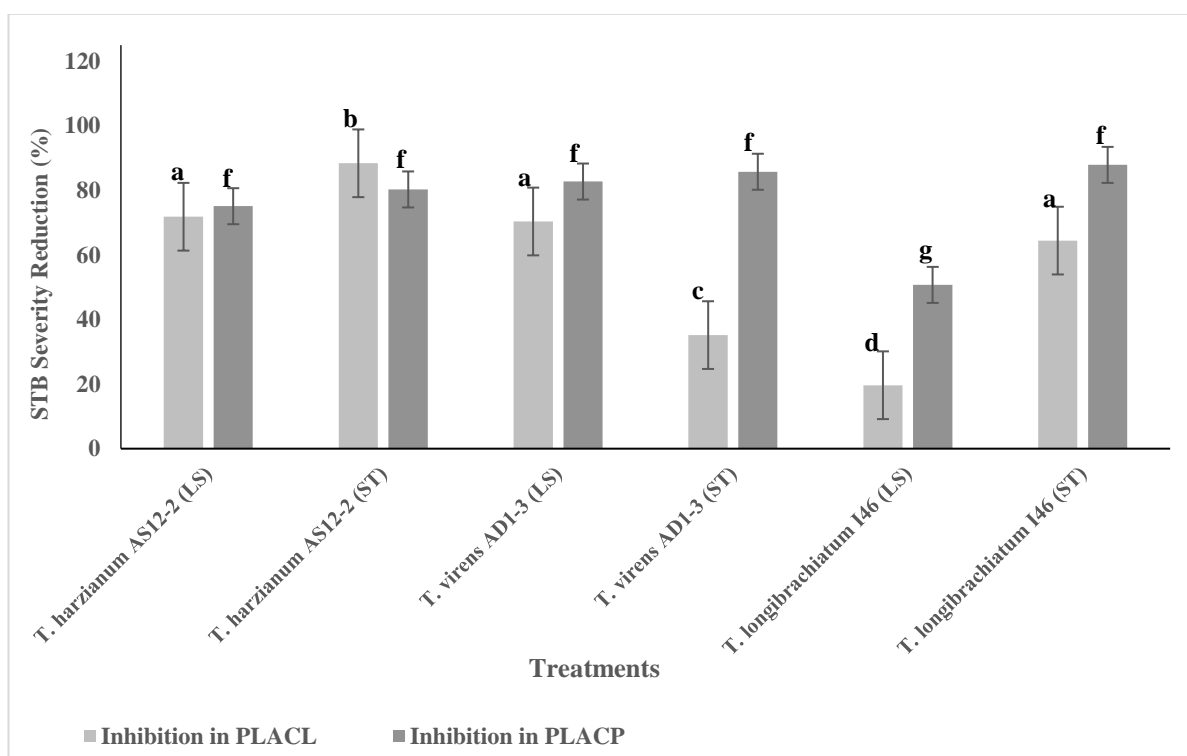


شکل ۱. پیش‌تیمار گندم رقم تیرگان با جدایه‌های کنترل زیستی *Trichoderma* شدت بیماری را کاهش داده است. تصاویر در روز ۲۱ پس از مایه‌زنی با *Zymoseptoria tritici* IPO323 تهیه شده است، **a**) گیاهچه‌های شاهد، **b**) کنترل مثبت (*Z. tritici* IPO323)، **c**) تیمار بذر با *T. longibrachiatum* I46، **d**) پاشش *T. longibrachiatum* I46، **e**) پاشش *T. virens* AD1-3، **f**) تیمار بذر با *T. virens* AD1-3، **g**) پاشش *T. harzianum* AS12-2، **h**) تیمار بذر با *T. harzianum* AS12-2.

Figure 1. Pre-treatment of wheat cultivar Tirgan with *Trichoderma* biocontrol isolates has reduced the disease severity. Images were taken on day 21 after inoculation with *Z. tritici* IPO323. **a**) Control seedlings, **b**) Positive control (*Z. tritici* IPO323), **c**) Seed treatment with *T. longibrachiatum* I46, **d**) Spray *T. longibrachiatum* I46, **e**) Spray *T. virens* AD1-3, **f**) Seed treatment with *T. virens* AD1-3, **g**) Spray *T. harzianum* AS12-2, **h**) Seed treatment with *T. harzianum* AS12-2.

بیماری دیده نشد (داده‌ها برای این دو جدایه نمایش داده نشده است). به این ترتیب، پیش‌تیمار با جدایه‌های کنترل زیستی *Trichoderma* کاهش شدت سپتوریوز برگی را در گندم رقم تیرگان به دنبال داشت (شکل ۲)؛ میزان این کاهش به روش کاربرد این جدایه‌ها بستگی دارد (جدول ۲). صرف‌نظر از روش کاربرد، سطح حامل پیکنیدیوم‌های بیمارگر در حضور جدایه‌های کنترل زیستی *Trichoderma* کاهش بیشتری نشان می‌دهد (جدول ۳). اشاره می‌گردد که، کاهش بیش از ۵۰ درصد شدت بیماری، معیار رفتار کنترل زیستی جدایه‌های به کار رفته در این مطالعه روی بیماری سپتوریوز برگی در نظر گرفته شده است.

از پنج جدایه *Trichoderma* مورد استفاده در این پژوهش، دو جدایه *T. harzianum* AS12-2 و *T. virens* AD1-3، در هر دو شیوه کاربرد اثر بازدارندگی از سپتوریوز برگی گندم نشان دادند. اگرچه میزان کاهش شدت بیماری در کاربرد برگی این دو جدایه تفاوت معنی‌داری نشان نمی‌دهد (جدول ۳)؛ اما جدایه *T. harzianum* AS12-2 در هر دو شیوه کاربرد سطح بالاتری از حفاظت گیاهچه‌های گندم را فراهم کرد. جدایه اندوفیت *T. longibrachiatum* I46، فقط در کاربرد به‌صورت تیمار بذری منجر به کاهش موثر شدت بیماری در گیاهچه‌های حاصل گردید (شکل ۱). در حضور دو جدایه SS1-1 و AS3-5 متعلق به کمپلکس گونه‌ای *T. harzianum*، بازدارندگی از



شکل ۲. کاهش شدت STB پس از کاربرد جدایه‌های *Trichoderma* کنترل زیستی به‌صورت پوشش بذری به هنگام کشت و ۷۲ ساعت پیش از مایه‌زنی با بیمارگر استفاده شده‌اند. شدت بیماری ۲۱ روز پس از آلوده‌سازی گیاهچه‌های گندم رقم تیرگان با جدایه بیمارگر محاسبه شده است.

Figure 2. STB severity reduction by application of *Trichoderma* isolates. The biocontrol isolates were used as seed coating at the sowing time or 72 h before the pathogen inoculation. The disease severity was calculated 21 days after the pathogen inoculation.

شده، جدایه *T. harzianum* AS12-2 فقط از ریشه و طوقه دوباره جداسازی گردید. حضور *T. longibrachiatum* I46 علاوه بر طوقه، در برگ‌های اول نیز ردیابی شد. با عدم جداسازی از قطعات گیاهی ضدعفونی سطحی شده، رشد اندوفیتی سایر جدایه‌های *Trichoderma* در اندوسفر گندم رقم تیرگان تایید نگردید.

ردیابی جدایه‌های کنترل زیستی در اندوسفر گندم ضدعفونی سطحی قطعات گیاهی، به‌طور موثری میکروارگانیسم‌های اپی‌فیت را حذف نمود، به‌طوری که پس از گذشت یک ماه در تشک‌های PDA مربوط به ارزیابی اثرگذاری ضدعفونی سطحی، اثری از پرگنه قارچی یا کلنی‌های باکتریایی مشاهده نشد. از قطعات گیاهی ضدعفونی سطحی

بحث

رویشی نسبت به بیماری محافظت کند (Cordo et al. 2007,)
 et al. 2009; Perelló et al. 2020). با این حال، در مطالعه
 Latz (2020) شدت سپتوریوز برگی در گیاهچه‌های حاصل از
 تیمار بذرهای رقم حساس گندم با جدایه‌های اندوفیت قارچی،
 کاهش نیافته است؛ و فقط کاربرد آن‌ها به‌صورت محلول‌پاشی
 روی برگ، کاهش موثر شدت بیماری را به دنبال داشته است.
 در پژوهش حاضر، کاربرد جدایه‌های کنترل زیستی
Trichoderma به هر دو روش استفاده مستقیم روی گیاه و
 تیمار بذری، سطح حفاظت قابل قبولی از سپتوریوز برگی را
 روی گندم رقم تیرگان فراهم نموده است (جدول ۳). دو جدایه
T. harzianum AS12-2 و *T. virens* AD1-3، در هر دو روش
 کاربرد، کاهش معنی‌دار شدت بیماری را در پی داشتند. با این
 حال، رشد اندوفیتی این دو جدایه در برگ‌های رقم تیرگان
 ردیابی نگردید. در مطالعه Cordo et al. (2007) و Perelló et
 al. (2009) نیز کلنیزاسیون اندوسفر برگ‌های حاصل از تیمار
 بذرها با جدایه‌های ریزوسفری *Trichoderma* مشاهده نشده
 است.

وجود توانایی کلنیزاسیون بافت‌های گیاهی در تعدادی از
 گونه‌های فرصت‌طلب *Trichoderma* نشان می‌دهد این قارچ
 ابزار لازم برای برقراری ارتباط نزدیک‌تر با میزبان گیاهی را طی
 تکامل کسب نموده است (Druzhinina et al. 2011). مطالعاتی
 نشان داده است پاسخ‌های دفاعی برانگیخته شده به‌وسیله
 جدایه‌های اندوفیت *Trichoderma*، قابلیت انتقال به نسل
 بعدی گیاه میزبان را دارد و نتاج را در برابر طیف گسترده‌ای از
 تنش‌های زیستی و غیرزیستی محافظت می‌کند (Medeiros et
 al. 2017; Woo et al. 2023). این پاسخ‌ها که شامل کنترل
 زیستی غیرمستقیم انواع بیمارگرهای گیاهی، اثرگذاری روی
 پرایمینگ و حافظه گیاهی (Plant memory) و افزایش تحمل
 به طیف متنوعی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی است،
 مهم‌ترین پاسخ‌های دفاعی القایی جدایه‌های *Trichoderma* در
 گیاهان میزبان شناخته شده‌اند (Zaidi et al. 2014; Woo et
 al. 2023). در صورتی که این ویژگی (کلنیزاسیون بافت‌های
 داخلی میزبان) در جدایه‌های آنتاگونیست این قارچ، ردیابی
 شود؛ می‌توان امیدوار بود که خاصیت کنترل زیستی پایدارتری
 (Latz et al. 2018) ایجاد گردد. از سوی دیگر، توانایی اشغال
 فضاهای بین سلولی گیاه، جدایه‌های آنتاگونیست را از تاثیر
 منفی شرایط محیطی بر ویژگی‌های کنترل زیستی محافظت
 خواهد کرد (Collinge et al. 2022). جدایه *T.*
longibrachiatum I46 که به‌صورت اندوفیت از برگ‌های پسته

در این مطالعه، با غربال درون‌گیاهی پنج جدایه
 آنتاگونیست متعلق به جنس *Trichoderma*، موفق شدیم به
 سه جدایه موثر بر کاهش شدت بیماری سپتوریوز برگی ناشی
 از *Z. tritici* IPO323 در شرایط گلخانه‌ای دست پیدا کنیم
 (شکل ۲). درحالی که امکان کنترل زیستی سپتوریوز برگی با
 باکتری‌ها و قارچ‌های آنتاگونیست در چند مطالعه، بررسی و
 تایید شده است (Cordo et al. 2007; Kildea et al. 2008; Perelló et al. 2009; Stocco et al. 2016; Jensen et al. 2019; Latz et al. 2020; Ashrafi et al. 2021; Eisner et al. 2023)؛ این نخستین پژوهش درخصوص امکان کنترل زیستی
 این بیماری با استفاده از جدایه‌های قارچی زیست‌مهارگر در
 کشور است. هم‌چنان که در سایر پژوهش‌ها نشان داده شده
 است (Cordo et al. 2007, 2020; Perelló et al. 2009) روش
 کاربرد جدایه‌های آنتاگونیست *Trichoderma* بر میزان کاهش
 شدت بیماری موثر است. در بین جدایه‌های این مطالعه، *T.*
harzianum AS12-2 در کاربرد به‌صورت پوشش بذر و هم در
 کاربرد مستقیم روی گیاه، بیشترین میانگین کاهش شدت
 سپتوریوز برگی را ثبت نمود. این جدایه به‌طور میانگین سطح
 نکروز برگ را ۸۰/۱۲ درصد و سطح پوشیده از پیکنیدیوم را
 ۷۷/۷۱ درصد کاهش داد (شکل ۲). استفاده از *T. viren* AD1-
 3 نیز در هر دو روش کاربرد، کاهش موثر سپتوریوز برگی را
 به دنبال داشت. سطح حامل پیکنیدیوم‌ها در حضور این جدایه
 نسبت به سطح نکروز برگ، کاهش بیشتری نشان می‌دهد
 (جدول ۳). جدایه اندوفیت *T. longibrachiatum* I46، فقط در
 کاربرد به‌صورت تیمار بذری کاهش موثر شدت بیماری را در
 پی داشت. در کاربرد برگی این جدایه، سطح نکروز برگ کاهش
 موثری نشان نمی‌دهد، اما سطح حامل پیکنیدیوم‌های بیمارگر
 به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است (شکل ۱).

چندین مطالعه، نشان داده است که جدایه‌های ریزوسفری
Trichoderma در کاربرد به‌صورت برگی به دلیل برخی شرایط
 از جمله عدم تحمل کنیدیوم‌ها نسبت به نور فرابنفش و عدم
 توانایی کلنیزاسیون فیلوسفر، کارایی لازم برای کنترل سپتوریوز
 برگی را ندارند و با گذشت فصل و تکرار چرخه‌های بیماری،
 خاصیت کنترل زیستی آن‌ها روی بیماری کاهش می‌یابد
 (Cordo et al. 2007; Perelló et al. 2009). این پژوهش‌ها،
 کاربرد بذری جدایه‌های کنترل زیستی *Trichoderma* را روشی
 ارزان و موثر برای کاهش شدت بیماری سپتوریوز برگی معرفی
 می‌کنند که ارزان‌تر و موثرتر از کاربرد قارچ‌کش‌هاست و
 می‌تواند برای مدت طولانی‌تری، گیاه گندم را طی یک فصل

به صورت مایه زنی بذر، تزریق در خاک و محلول پاشی در مراحل رشدی مختلف گندم و در شرایط مزرعه و گلخانه گزارش شده است. همچنین، کاهش شدت آلودگی به *Heterodera avenae* (Zhang et al. 2014) و *Meloidogyne javanica* (Sahebani et al. 2008) در کاربرد غلظت‌های متفاوت از سویسپانسیون اسپوری جدایه‌های *Trichoderma* در شرایط گلخانه مشاهده شده است. همچنین اخیراً، کاهش بیماری ناشی از *Fusarium graminearum* Schwabe در کنار افزایش وزن خشک بذرهای گندم، در کاربرد جدایه‌های بومی *Trichoderma* روی بذر و سنبله‌های گندم رقم زرین گزارش شده است (Narmani et al. 2019). در تمامی این مطالعات در کنار کاهش بیماری، استرین‌های به کار رفته باعث افزایش وزن خشک و تر، بهبود جوانه‌زنی، پنجه‌زنی و در نهایت افزایش عملکرد دانه شده‌اند (Gangwar & Sing 2018). با این حال، همه گونه‌ها یا سویه‌های *Trichoderma* ظرفیت یکسانی برای کنترل بیمارگرها یا آفات را ندارند و به طور یکسان و موثر به محصولات یا ارقام مختلف در مکان‌های جغرافیایی متفاوت پاسخ نمی‌دهند. به علاوه، ماندگاری سطح استاندارد حفاظتی این جدایه‌ها در بازه‌های زمانی طولانی و شرایط میدانی مناطق مختلف یکسان نیست (Woo et al. 2023). از سوی دیگر، توجه به این نکته ضروری است که رابطه گیاه-*Trichoderma* سیستمی چندمتغیره و پویاست، به این دلیل که، هر دو شریک متابولیت‌هایی تولید می‌کنند که با هم برهم‌کنش دارند؛ روند تولید این متابولیت‌ها با گذشت زمان تغییر کرده و روی این برهم‌کنش تاثیر می‌گذارد (Jaroszuk-Ścisiel et al. 2019). به همین دلیل ضروری است اثرگذاری جدایه‌های آنتاگونیست در پاتوسیستم‌های مختلف با در نظر گرفتن گیاه میزبان، بیماری و محیط (Latz et al. 2020) مورد ارزیابی قرار بگیرد. به علاوه، سویه‌های کنترل زیستی این قارچ توانایی بالا برای کلنیزاسیون ریشه، سازگاری با محیط‌های تازه و اشغال آشیانه‌های اکولوژیکی متنوع دارند. از این رو، بررسی و ارزیابی تأثیری که سویه‌های *Trichoderma* ممکن است بر موجودات و گیاهان غیرهدف و همچنین خاک و محیط‌های ریزوسفری داشته باشند، مهم است (Woo et al. 2023).

تاکنون جمعیت‌های مقاوم قارچ *Z. tritici* به هر چهار گروه عمده قارچ‌کش ثبت شده در اروپا علیه بیماری سپتوریوز برگی گزارش شده است (Benbow et al. 2020). از سوی دیگر، بیشتر ژن‌های موسوم به *Stb1-21* که به ارقام گندم مقاومت در برابر این بیماری را می‌بخشند، اثر بخشی خود را در برابر

جداسازی شده است (Kari Dolatabad et al. 2017). در کاربرد به صورت تیمار بذری شدت سپتوریوز برگی را به طور معنی‌داری کاهش داد (جدول ۲). جداسازی مجدد این جدایه از اندوسفر گندم رقم تیرگان، نشان می‌دهد این جدایه می‌تواند با میزبان گندم خود، ارتباط تخصصی‌تری برقرار کند. چراکه، برهم‌کنش قارچ‌های عامل کنترل زیستی واجد سبک زندگی اندوفیتی با گیاه میزبان مستلزم تشخیص و سپس غیرفعال کردن سیستم ایمنی میزبان است. در ادامه این رابطه همزیستی، هردو شریک فواید متعددی از هم دریافت می‌کنند (Baron & Rigobelo 2022). (Khavasi et al. 2023) نیز با جداسازی یک جدایه *Trichoderma* sp. از اندوسفر بذر گندم رقم تیرگان، خاصیت کنترل زیستی این جدایه را روی بیماری سپتوریوز برگی گزارش کرده‌اند. تیمار بذرهای عاری از همزیست قابل کشت این رقم با جدایه اندوفیت *Trichoderma* sp. رشد اندوفیتی آن در گندم رقم تیرگان را به دنبال داشته است. به طوری که ۳۵ روز پس از کشت، جدایه یاد شده پس از ضد عفونی سطحی از ریشه، برگ‌های اول، دوم، سوم و چهارم گیاهچه‌های حاصل دوباره جداسازی شده است (Khavasi et al. 2023). با این حال، برقراری ارتباط بین رفتار اندوفیتی و کنترل زیستی جدایه‌های اندوفیت *Trichoderma* نیازمند انجام آزمایش‌های تکمیلی است. همچنان که، در مطالعه‌ای دیگر نیز کلنیزاسیون اندوفیتی شرط لازم برای بروز رفتار کنترل زیستی جدایه‌های قارچی اندوفیت گزارش نشده است (Latz et al. 2020).

در مورد اثر مستقیم و غیرمستقیم *Trichoderma* spp. در کنترل بیماری‌های گندم گزارش‌های متعددی وجود دارد (Innocenti et al. 2003; Perelló et al. 2003; Sahebani & Hadavi 2008; Zafari et al. 2008; Baghani et al. 2012; Yadav et al. 2015; Baroncelli et al. 2016; Stocco et al. 2016; Xue et al. 2017; El-Sharkawy et al. 2018; de Silva et al. 2018; Jaroszuk-Ścisiel et al. 2019; Narmani et al. 2019; Kiani Vafa et al. 2021). کاهش شدت زنگ برگی (El-Sharkawy et al. 2015)، کاهش شدت بیماری پاخوره (Zafari et al. 2008; Kiani Vafa et al. 2021)، کاهش محتوی میکوتوکسین، کاهش بیماری در آزمایشگاه و مزرعه و رقابت در بقایای گندم در گندم‌های آلوده به بلایت فوزاریومی خوشه (*Fusarium Head Blight*) (Baroncelli et al. 2016)، کاهش اینوکولوم موثر بذرزاد FHB (Xue et al. 2017)، کاهش معنی‌دار بیماری ناشی از *Bipolaris sorokiniana* Shoemaker از *Trichoderma* (Yadav et al. 2015)، در کاربرد جدایه‌های

AS12-2 و حفظ کردن توانایی کنترل زیستی پس از یک سال نگهداری، این استرین را به کاندیدی با اهمیت برای گنجانده شدن در برنامه‌های تجاری‌سازی فرمولاسیون‌ها تبدیل می‌کند (Naeimi et al. 2020). با ارزیابی پتانسیل اثر بازدارندگی این جدایه روی جدایه‌های ایرانی قارچ *Z. tritici* می‌توان با اطمینان خاطر بیشتری در مورد تکمیل آزمون‌های غربالگری (سازگاری با قارچ‌کش‌ها، تجمع کاربرد بذری و برگی، تعداد دفعات کاربرد) این جدایه برای کاربرد در شرایط مزرعه‌ای تصمیم گرفت. در همین راستا، بررسی سازوکار درگیر در رفتار کنترل زیستی AS12-2 *T. harzianum* که منجر به بهبود پاسخ‌های دفاعی گندم آلوده شده با *Z. tritici* از جمله تغییر بیان ژن‌های دفاعی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن، مقاومت روزنه‌ای و ... می‌شود، به تکمیل یافته‌های این پژوهش کمک شایانی خواهد نمود.

سیاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوریان کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۰۰۱۴۳» انجام شده است. از دانشگاه تهران بابت فراهم آوردن فضا و تجهیزات لازم برای انجام این مطالعه سپاس‌گزاری می‌گردد.

References

- Abrinbana M, 2018. Variation in aggressiveness components of *Zyoseptoria tritici* populations in Iran. *Journal of Phytopathology* 166(1): 10–17.
- Arraiano LS, Brown JKM, 2006. Identification of isolate-specific, and partial resistance to septoria tritici blotch in 238 European wheat cultivars and breeding lines. *Plant Pathology* 55(6): 726–738.
- Bae H, Roberts DP, Lim HS, Strem MD, Park SC, et al., 2011. Endophytic *Trichoderma* isolates from tropical environments delay disease onset and induce resistance against *Phytophthora capsici* in hot pepper using multiple mechanisms. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 24(3): 336–351.
- Baghani F, Rahnema K, Aghajani MA, Dehghan A, 2012. Biological control of *Fusarium* head blight (*Fusarium graminearum*) by application of three native *Trichoderma* species in field. *Journal of Plant Production* 19(2): 123–139 (In Persian with English abstract).
- Bakhshi T, Ahmadi FS, Sarbarzeh MA, Mehrabi R, Seifi A, 2023. Resistance of wheat genotypes to *Mycosphaerella graminicola* isolates at seedling stage under greenhouse conditions. *Food Science & Nutrition* 00: 1–14.
- Barakat I, Chtaina N, El Kamli T, Grappin P, El Guilli M, et al., 2023. Bioactivity of *Trichoderma harzianum* a peptaibols against *Zyoseptoria tritici* causal agent of Septoria leaf blotch of wheat. *Journal of Plant Protection Research* 63(1): 59–67.
- Baron NC, Rigobelo EC, 2022. Endophytic fungi: a tool for plant growth promotion and sustainable agriculture. *Mycology* 13(1): 39–55.
- Baroncelli R, Zapparata A, Piaggieschi G, Sarrocco S, Vannacci G, 2016. Draft whole-genome sequence of *Trichoderma gamsii* T6085, a promising biocontrol agent of *Fusarium* Head Blight on wheat. *Genome*

- Announcements* 4(1): e01747–15.
- Battache M, Lebrun MH, Sakai K, Soudière O, Cambon F, *et al.*, 2022. Blocked at the stomatal gate, a key step of wheat Stb16q-mediated resistance to *Zymoseptoria tritici*. *Frontiers in Plant Science* 13: p.921074.
- Bearchell SJ, Fraaije BA, Shaw MW, Fitt BD, 2005. Wheat archive links long-term fungal pathogen population dynamics to air pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102(15): 5438–5442.
- Benbow HR, Brennan C, Zhou B, Christodoulou T, Berry S, *et al.*, 2020. Insights into the resistance of a synthetically-derived wheat to Septoria tritici blotch disease: less is more. *BMC Plant Biology* 20(1): 1–23.
- Benítez T, Rincón AM, Limón MC, Codon AC, 2004. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology* 7(4): 249–260.
- Brennan CJ, Benbow HR, Mullins E, Doohan, FM, 2019. A review of the known unknowns in the early stages of septoria tritici blotch disease of wheat. *Plant Pathology* 68(8): 1427–1438.
- Brown JK, Chartrain L, Lasserre-Zuber P, Sainenac C, 2015. Genetics of resistance to *Zymoseptoria tritici* and applications to wheat breeding. *Fungal Genetics & Biology* 79: 33–41.
- Card SD, 2005. Biological control of *Botrytis cinerea* in lettuce & strawberry crops. PhD thesis, Plant Pathology, Lincoln University, New Zealand.
- Chartrain L, Brading PA, Widdowson JP, Brown JKM, 2004. Partial resistance to Septoria tritici blotch (*Mycosphaerella graminicola*) in wheat cultivars Arina and Riband. *Phytopathology* 94(5): 497–504.
- Collinge DB, Jensen B, Jørgensen HJ, 2022. Fungal endophytes in plants and their relationship to plant disease. *Current Opinion in Microbiology* 69: p.102177.
- Cordo CA, Monaco CI, Segarra CI, Simon MR, Mansilla AY, *et al.*, 2007. *Trichoderma* spp. as elicitors of wheat plant defense responses against *Septoria tritici*. *Biocontrol Science & Technology* 17(7): 687–698.
- Cordo C, Altamirano R, Simón MR, Stocco MC, Lampugnani G, *et al.*, 2020. Biocontrol strategies to reduce the impact of Septoria tritici blotch in wheat. *Revista de la Facultad de Agronomía* 119(2): p.14.
- Cowger C, Mundt CC, 2002. Aggressiveness of *Mycosphaerella graminicola* isolates from susceptible and partially resistant wheat cultivars. *Phytopathology* 92(6): 624–630.
- Dalvand M, Soleimani Pari MJ, Zafari D, 2018a. Evaluating the efficacy of STB resistance genes to Iranian *Zymoseptoria tritici* isolates. *Journal of Plant Diseases & Protection* 125: 27–32.
- Dalvand M, Zafari D, Soleimani Pari MJ, Rookparvar R, Tabib Ghafari SM, 2018b. Studying genetic diversity in *Zymoseptoria tritici*, causal agent of Septoria tritici blotch, by using ISSR and SSR markers. *Journal of Agricultural Science & Technology* 20(6): 1307–1316.
- De Silva NI, Brooks S, Lumyong S, Hyde KD, 2019. Use of endophytes as biocontrol agents. *Fungal Biology Reviews* 33(2): 133–148.
- Dean R, Van Kan JA, Pretorius ZA, Hammond-Kosack KE, Di Pietro A, *et al.*, 2012. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology* 13(4): 414–430.
- Dos Santos UR, Dos Santos JL, 2023. *Trichoderma* after crossing kingdoms: infections in human populations. *Journal of Toxicology & Environmental Health* 26(2): 97–126.
- Dutta A, Croll D, McDonald BA, Barrett LG, 2021. Maintenance of variation in virulence and reproduction in populations of an agricultural plant pathogen. *Evolutionary Applications* 14(2): 335–347.
- Druzhinina IS, Seidl-Seiboth V, Herrera-Estrella A, Horwitz BA, Kenerley CM, *et al.*, 2011. *Trichoderma*: the genomics of opportunistic success. *Nature Reviews Microbiology* 9(10): 749–759.
- Eisner SA, Fiegna F, McDonald BA, Velicer GJ, 2023. Bacterial predation of a fungal wheat pathogen: prelude to experimental evolution of enhanced biocontrol agents. *Plant Pathology* 00:1–10.
- El-Sharkawy HH, Rashad YM, Ibrahim SA, 2018. Biocontrol of stem rust disease of wheat using arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma* spp. *Physiological & Molecular Plant Pathology* 103: 84–91.
- Eslahi M, Mojerlou S, 2017. Evaluation the efficiency of Falcon® fungicide to control wheat leaf blotch

- caused by *Mycosphaerella graminicola*. *Research in Plant Pathology* 5(2): 2.
- Eyal Z, Scharen AL, Prescott JM, Ginkel M, 1987. The septoria diseases of wheat: concepts and methods of disease management. CIMMYT, Mexico. 52 pp.
- Fagundes WC, Haueisen J, Stukenbrock EH, 2020. Dissecting the biology of the fungal wheat pathogen *Zymoseptoria tritici*: a laboratory workflow. *Current Protocols in Microbiology* 59(1): e128.
- Feurtey A, Lorrain C, McDonald MC, Milgate A, Solomon PS, *et al.*, 2023. A thousand-genome panel retraces the global spread and adaptation of a major fungal crop pathogen. *Nature Communications* 14(1): 1059.
- Figuroa M, Hammond-Kosack KE, Solomon PS, 2018. A review of wheat diseases—a field perspective. *Molecular Plant Pathology* 19(6): 1523–1536.
- Fones H, Gurr S, 2015. The impact of Septoria tritici blotch disease on wheat: an EU perspective. *Fungal Genetics & Biology* 79: 3–7.
- Fones H, Soanes D, Gurr S, 2023. Epiphytic proliferation of *Zymoseptoria tritici* isolates on resistant wheat leaves. *Fungal Genetics & Biology* 168(2023): p.103822.
- Gangwar OP, Singh AP, 2018. *Trichoderma* as an efficacious bioagent for combating biotic and abiotic stresses of wheat—a review. *Agricultural Reviews* 39(1): 48–54.
- Ghaneie A, 2017. Host specificity of *Zymoseptoria tritici* isolates interacting with wheat and effect of Salicylic acid exogenous application on gene expression of signaling pathway in host. PhD thesis, Plant Pathology, Tarbiat Modarres University, Iran (In Persian with English abstract).
- Goodwin SB, M'barek SB, Dhillon B, Wittenberg AH, Crane CF, *et al.*, 2011. Finished genome of the fungal wheat pathogen *Mycosphaerella graminicola* reveals dispensome structure, chromosome plasticity, and stealth pathogenesis. *PLOS Genetics* 7(6): e1002070.
- Harman GE, 2000. Myths and dogmas of biocontrol changes in perceptions derived from research on *Trichoderma harzianum* T-22. *Plant Disease* 84(4): 377–393.
- Haueisen J, Möller M, Eschenbrenner CJ, Graubert J, Seybold H, *et al.*, 2019. Highly flexible infection programs in a specialized wheat pathogen. *Ecology & Evolution* 9(1): 275–294.
- Hidangmayum A, Dwivedi P, 2018. Plant responses to *Trichoderma* spp. and their tolerance to abiotic stresses: a review. *Journal of Pharmacogn Phytochem* 7(1): 758–766.
- Howell CR, 2003. Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: the history and evolution of current concepts. *Plant Disease* 87(1): 4–10.
- Innocenti G, Roberti R, Montanari M, Zakrisson E, 2003. Efficacy of microorganisms antagonistic to *Rhizoctonia cerealis* and their cell wall degrading enzymatic activities. *Mycological Research* 107(4): 421–427.
- Jarozuk-Ściśeł J, Tyśkiewicz R, Nowak A, Ozimek E, Majewska M, *et al.*, 2019. Phytohormones (auxin, gibberellin) and ACC deaminase *in vitro* synthesized by the mycoparasitic *Trichoderma* DEMTkZ3A0 strain and changes in the level of auxin and plant resistance markers in wheat seedlings inoculated with this strain conidia. *International Journal of Molecular Sciences* 20(19): 4923.
- Jensen DF, Mikkelsen B, Karlsson M, Hökeberg M, 2019. Biocontrol of Septoria tritici Blotch (bca control of stb). Google Patent, WO2019125294A1. Date issued: 27 June.
- Kari Dolatabad H, Javan-Nikkhah M, Shier WT, 2017. Evaluation of antifungal, phosphate solubilisation, and siderophore and chitinase release activities of endophytic fungi from *Pistacia vera*. *Mycological Progress* 16(8): 777–790.
- Karlsson I, Friberg H, Kolseth AK, Steinberg C, Persson P, 2017. Organic farming increases richness of fungal taxa in the wheat phyllosphere. *Molecular Ecology* 26(13): 3424–3436.
- Kema GH, Mirzadi Gohari A, Aouini L, Gibriel HA, Ware SB, *et al.*, 2018. Stress and sexual reproduction affect the dynamics of the wheat pathogen effector AvrStb6 and strobilurin resistance. *Nature Genetics* 50(3): 75–380.
- Khavasi H, Javan-Nikkhah M, Feechan A, Mirzadi Gohari A, 2023. A seed endophytic *Trichoderma* sp. protects the wheat plant against infection caused by the fungal wheat pathogen *Zymoseptoria tritici*. 12th International Congress of Plant Pathology, August 20-25, Lyon, France. P1.1–123.

- Kia S, Torabi M, 2008. Effects of infection with septoria leaf blotch (*septoria tritici* Rob ex Desm.) at different growth stages on yield and yield components of wheat cultivars in Gorgan. *Seed & Plant Journal* 24(2): 237–252.
- Kia S, Rahnama K, Soltanloo H, Babaeizad V, Aghajani MA, 2018. Identification of resistance sources to septoria tritici blotch with causal agent *Zymoseptoria tritici* in bread wheat genotypes. *Journal of Agricultural Biotechnology* 10(1): 49–65.
- Kiani Vafa S, Bazgir E, Darvishnia M, 2021. Biological control of wheat take-all disease using *Trichoderma harzianum* and *T. viride*. *Journal of Applied Research in Plant Protection* 10 (3): 93–107 (In Persian with English abstract).
- Kildea S, Ransbotyn V, Khan MR, Fagan B, Leonard G, et al., 2008. *Bacillus megaterium* shows potential for the biocontrol of Septoria tritici blotch of wheat. *Biological Control* 47(1): 37–45.
- Larran S, Perelló A, Simon MR, Moreno V, 2002. Isolation and analysis of endophytic microorganisms in wheat (*Triticum aestivum* L.) leaves. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 18(7): 683–686.
- Latz MA, Jensen B, Collinge DB, Jørgensen HJ, 2018. Endophytic fungi as biocontrol agents: elucidating mechanisms in disease suppression. *Plant Ecology & Diversity* 11(5-6): 555–567.
- Latz MA, Jensen B, Collinge DB, Jørgensen HJ, 2020. Identification of two endophytic fungi that control Septoria tritici blotch in the field, using a structured screening approach. *Biological Control* 141: 104128.
- Lorito M, Woo SL, Harman GE, Monte E, 2010. Translational research on *Trichoderma*: from 'omics to the field. *Annual Review of Phytopathology* 48: 395–417.
- Lynch KM, Zannini E, Guo J, Axel C, Arendt EK, et al., 2016. Control of *Zymoseptoria tritici* cause of septoria tritici blotch of wheat using antifungal *Lactobacillus* strains. *Journal of Applied Microbiology* 121(2): 485–494.
- Mahboubi M, Talebi R, Sarbarzeh MA, Naji AM, Mehrabi R, 2020. Resistance and virulence variability in wheat–*Zymoseptoria tritici* interactions. *Crop and Pasture Science* 71(7): 645–652.
- Mahboubi M, Talebi R, Mehrabi R, Mohammad Naji A, Maccaferri M, et al., 2022. Genetic analysis of novel resistance sources and genome-wide association mapping identified novel QTLs for resistance to *Zymoseptoria tritici*, the causal agent of septoria tritici blotch in wheat. *Journal of Applied Genetics* 63(3):429–445.
- Mastouri F, Björkman T, Harman GE, 2010. Seed treatment with *Trichoderma harzianum* alleviates biotic, abiotic, and physiological stresses in germinating seeds and seedlings. *Phytopathology* 100(11): 1213–1221.
- McDonald MC, Renkin M, Spackman M, Orchard B, Croll D, et al., 2019. Rapid parallel evolution of azole fungicide resistance in Australian populations of the wheat pathogen *Zymoseptoria tritici*. *Applied & Environmental Microbiology* 85(4): e01908–18.
- Medeiros HAD, Araújo Filho JVD, Freitas LGD, Castillo P, Rubio MB, et al., 2017. Tomato progeny inherit resistance to the nematode *Meloidogyne javanica* linked to plant growth induced by the biocontrol fungus *Trichoderma atroviride*. *Scientific Reports* 7(1): 1–13.
- Mejri S, Siah A, Coutte F, Magnin-Robert M, Roux B, et al., 2018. Biocontrol of the wheat pathogen *Zymoseptoria tritici* using cyclic lipopeptides from *Bacillus subtilis*. *Environmental Science & Pollution Research* 25(30): 29822–29833.
- Mirrahimi SR, Pirnia M, Sabbagh SK, Seifati SE, Keikah S, et al., 2022. Comparative effect of gr24 phytohormone and two fungal species alone or in combination in increasing resistance of two tomato cultivars against *Fusarium* wilt dises. *Journal of Applied Research in Plant Protection* 12 (1): 43–56 (In Persian with English abstract).
- Mirzadi Gohari A, 2015. Identification and functional characterization of putative (a) virulence factors in the fungal wheat pathogen *Zymoseptoria tritici*. PhD thesis, Molecular Plant Pathology, Wageningen University, Netherland.
- Mojerlou S, Safaie N, Alizadeh A, Khelghatibana F, 2009. Measuring and modeling crop loss of wheat caused by septoria leaf blotch in seven cultivars and lines in Iran. *Journal of Plant Protection Research* 49(3): 257–262.
- Naeimi S, Okhovvat SM, Javan-Nikkhah M, Vágvölgyi C, Khosravi V, et al., 2010. Biological control of *Rhizoctonia solani* AG1-1A, the causal agent of rice

- sheath blight with *Trichoderma* strains. *Phytopathologia Mediterranea* 49(3): 287–300.
- Naeimi S, Kocsubé S, Antal Z, Okhovvat SM, Javan-Nikkhah M, *et al.*, 2011. Strain-specific SCAR markers for the detection of *Trichoderma harzianum* AS12-2, a biological control agent against *Rhizoctonia solani*, the causal agent of rice sheath blight. *Acta Biologica Hungarica* 62(1): 73–84.
- Naeimi S, Khosravi V, Nouri MZ, Hoda H, Vágvölgyi C, *et al.*, 2019. Biological control of rice sheath blight disease with formulation of indigenous *Trichoderma* strains under paddy field conditions. *Acta Biologica Szegediensis* 63(1): 37–43.
- Naeimi S, Khosravi V, Varga A, Vágvölgyi C, Kredics L, 2020. Screening of organic substrates for solid-state fermentation, viability and bioefficacy of *Trichoderma harzianum* AS12-2, a biocontrol strain against rice sheath blight disease. *Agronomy* 10(9): 1258.
- Narmani A, Arzanlou M, Babaiahari A, Masteri Farahani H, 2019. Biological control of wheat Fusarium head blight using antagonistic strains of commercial and local *Trichoderma*, isolated from wheat plant rhizosphere. *Journal of Applied Research in Plant Protection* 8(2): 1–20 (In Persian with English abstract).
- O'Driscoll A, Kildea S, Doohan F, Spink J, Mullins E, 2014. The wheat-septoria conflict: a new front opening up?. *Trends in Plant Science* 19(9): 602–610.
- Omran A, Roohparvar R, Shahbazi k, 2023. Reaction of wheat lines candidate for introduction as new commercial cultivars to septoria tritici blotch. *Applied Entomology & Phytopathology* 90(2): 195–208 (In Persian with English abstract).
- Orellana-Torrejón C, Vidal T, Gazeau G, Boixel AL, Géllisse S, *et al.*, 2022. Multiple scenarios for sexual crosses in the fungal pathogen *Zymoseptoria tritici* on wheat residues: potential consequences for virulence gene transmission. *Fungal Genetics & Biology* 163: p.103744.
- Perelló A, Monaco C, Simon MR, Sisterna M, Dal Bello GS, 2003. Biocontrol efficacy of *Trichoderma* isolates for tan spot of wheat in Argentina. *Crop Protection* 22(9): 1099–1106.
- Perelló AE, Moreno MV, Mónaco C, Simón MR, Cordo C, 2009. Biological control of septoria tritici blotch on wheat by *Trichoderma* spp. under field conditions in Argentina. *BioControl* 54(1): 113–122.
- Persoon CH, 1794. *Disposita methodica fungorum. Römer's Neues Magazin für die Botanik* 1:81–128.
- Ponomarenko A, Goodwin SB, Kema GHJ, 2011. Septoria tritici blotch (STB) of wheat. *Plant Health Instructor*: DOI:10.1094/PHI-I-2011-0407-01.
- Quaedvlieg W, Kema GHJ, Groenewald JZ, Verkley GJM, Seifbarghi S, *et al.*, 2011. *Zymoseptoria* gen. nov.: a new genus to accommodate septoria-like species occurring on graminicolous hosts. *Persoonia: Molecular Phylogeny & Evolution of Fungi* 26: 57–69.
- Roohparvar R, Omran A, Dehghan MA, Dalvand M, 2023. Virulence factors of *Zymoseptoria tritici*, the fungal pathogen of wheat septoria leaf blotch in disease hot spots during the years 2019-2021. *Journal of Applied Research in Plant Protection* 12(3): 257–270.
- Sahebani N, Hadavi N, 2008. Biological control of the root-knot nematode *Meloidogyne javanica* by *Trichoderma harzianum*. *Soil Biology & Biochemistry* 40(8): 2016–2020.
- Samain E, van Tuinen D, Jeet P, Aussenac T, Selim S, 2017. Biological control of septoria leaf blotch and growth promotion in wheat by *Paenibacillus* sp. strain B2 and *Curtobacterium plantarum* strain EDS. *Biological Control* 114: 87–96.
- Sarrocco S, 2023. Biological disease control by beneficial (micro) organisms: selected breakthroughs in the past 50 years. *Phytopathology* 113(4): 732–740.
- Schneider CA, Rasb WS, Eliceiri KW, 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* 9(7): 671–675.
- Seybold H, Demetrowitsch .J, Hassani MA, Szymczak S, Reim E, *et al.*, 2020. A fungal pathogen induces systemic susceptibility and systemic shifts in wheat metabolome and microbiome composition. *Nature Communications* 11(1): 1–12.
- Shewry PR. 2009. Wheat. *Journal of Experimental Botany* 60(6): 1537–1553.
- Shores M, Harman GE, Mastouri F, 2010. Induced systemic resistance and plant responses to fungal biocontrol agents. *Annual Review of Phytopathology* 48: 21–43.

- Singh US, Zaidi NW, Joshi D, Khan T, John D, *et al.*, 2005. *Trichoderma*: a microbe with multifaceted activity. *Annual Review of Plant Pathology* 3 (3): 33–75.
- Stocco MC, Mónaco CI, Abramoff C, Lampugnani G, Salerno G, *et al.*, 2016. Selection and characterization of Argentine isolates of *Trichoderma harzianum* for effective biocontrol of septoria leaf blotch of wheat. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 32(3): 49.
- Stukenbrock E, Gurr S, 2023. Address the growing urgency of fungal disease in crops. *Nature* 617(7959): 31–34.
- Tabib Ghaffary SM, Faris JD, Friesen TL, Visser RG, van der Lee, *et al.*, 2012. New broad-spectrum resistance to septoria tritici blotch derived from synthetic hexaploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 124: 125–142.
- Thambugala KM, Daranagama DA, Phillips AJ, Kannangara SD, Promputtha I, 2020. Fungi vs. fungi in biocontrol: An overview of fungal antagonists applied against fungal plant pathogens. *Frontiers in Cellular & Infection Microbiology* 10: 604923.
- Tidd H, Rudd JJ, Ray RV, Bryant R, Kanyuka K, 2023. A large bioassay identifies *stb* resistance genes that provide broad resistance against septoria tritici blotch disease in the UK. *Frontiers in Plant Science* 13: p.1070986.
- Vagndorf NJ, 2018. *Zymoseptoria tritici*–variation in host resistance and variability in the fungi. PhD thesis, Plant Breeding Aarhus University, Denmark.
- Wahdan FMS, Hossen S, Tanunchai B, Schädler M, Buscot F, *et al.*, 2020. Future climate significantly alters fungal plant pathogen dynamics during the early phase of wheat litter decomposition. *Microorganisms* 8(6): 908.
- Woo SL, Hermosa R, Lorito M, Monte E, 2023. *Trichoderma*: A multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology* 21(5): 312–326.
- Xue AG, Guo W, Chen Y, Siddiqui I, March G, *et al.*, 2017. Effect of seed treatment with novel strains of *Trichoderma* spp. on establishment and yield of spring wheat. *Crop Protection* 96: 97–102.
- Yadav B, Singh R, Kumar A, 2015. Management of spot blotch of wheat using Fungicides, Bio-agents and Botanicals. *African Journal of Agricultural Research* 10(25): 2494–2500.
- Yang N, Ovenden B, Baxter B, McDonald MC, Solomon PS, *et al.*, 2022. Multi-stage resistance to *Zymoseptoria tritici* revealed by GWAS in an Australian bread wheat diversity panel. *Frontiers in Plant Science* 13: p.990915.
- Zafari D, Koushki MM, Bazgir E, 2008. Biocontrol evaluation of wheat take-all disease by *Trichoderma* screened isolates. *African Journal of Biotechnology* 7(20): 3653–3659.
- Zaidi NW, Dar MH, Singh S, Singh US, 2014. *Trichoderma* species as abiotic stress relievers in plants. In: *Biotechnology & Biology of Trichoderma*. Elsevier, Poland. Pp. 515–525.
- Zeilinger S, 2023. Biocontrol fungi for plant disease research. *Open Access Government*: 256–257. <https://www.openaccessgovernment.org/article/biocontrol-fungi-plant-disease-research/162981/>. (Accessed on 06 November 2023).
- Zhang S, Gan Y, Xu B, Xue Y, 2014. The parasitic and lethal effects of *Trichoderma longibrachiatum* against *Heterodera avenae*. *Biological Control* 72: 1–8.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)