دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

نقش عوامل بیوکنترل قارچی و باکتریایی در کنترل بیماری‌های گیاهی: پیشرفت‌ها، موانع و پتانسیل‌ها

محدثه پهلوانی[1]، محدثه تاج دانی[1]، شقایق نصر (نویسنده مسئول)[1و2]

[1]دانشگاه علم و فرهنگ، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین زیستی، گروه زیست فناوری میکروبی، تهران

m.pahlevani@stu.usc.ac.ir

M.Tajdani1401@stu.usc.ac.ir

[2]مرکز ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران، بانک میکروارگانیسم‌ها، تهران

Shaghayegh963@yahoo.com; nasr@ibrc.ir

چکیـــده: گیاهان به طور مداوم در معرض عوامل بیماری‌زای گیاهی مختلف مانند قارچ‌ها، نماتدها، باکتری‌ها و ویروس‌ها هســـتند. این عوامل بیماری‌زا می‌توانند به طور قابل توجهی بهره‌وری محصـــولات مهم را در ســـراســـر جهان کاهش دهند. در حالی که اســـتفاده از آفت‌کش‌های شـیمیایی در کنترل بیماری‌های متعدد در محصـولات عمده موثر بوده اسـت، استفاده بیش از حد از مواد شیمیایی سنتزی اثرات مضـری بر محیط زیسـت و سـلامت انسـان دارد که کاربرد این آفت‌کش‌ها در بخش کشـاورزی را محدود می‌کند. آینده استفاده از آفت‌کش‌ها در کشـــاورزی به دلیل ناپایداری، اثرات نامطلوب زیســـت محیطی و ارتباط آن با افزایش مقاومت در برابر پاتوژن‌های گیاهی نامشـخص است. از این رو، این وضعیت توسعه شیوه‌های جدید پایدار در کشاورزی را ترغیب می‌کند. یک رویکرد امیدوارکننده بکارگیری اندوفیت‌ها اسـت؛ که شـامل میکروارگانیسم‌های غیر بیماری‌زا هستند که در قسمت‌های داخلی گیاهان ساکن هستند. در نتیجه، محققان در سـراسـر جهان تمرکز خود را به سـمت اسـتراتژی‌های جایگزین سازگار با محیط زیست برای جلوگیری از بیماری‌های گیاهی معطوف کرده اند. کنترل زیستی پاتوژن‌های گیاهی، روشی با سمیت کم‌تر و ایمنی بیشتر است که شدت بیماری‌های مختلف محصولات را کاهش می‌دهد. انواعی از عوامل کنترل بیولوژیکی در دسـترس هسـتند، اما تحقیقات بیشـتری برای شـناسـایی میکروب‌های بالقوه و محصولات طبیعی آن‌ها با فعالیت آنتاگونیسـتی برای کنترل طیف وسـیعی از بیماری‌های محصـولات کشـاورزی مورد نیاز اسـت. هدف این بررسی، برجسـته کردن اهمیت اسـتراتژی‌های کنترل زیسـتی برای مدیریت بیماری‌های محصـولات کشـاورزی اسـت. علاوه بر این، بر نقش میکروب‌های مفید در کنترل بیماری‌های گیاهی و وضـعیت فعلی مکانیسم‌های کنترل زیستی آن‌ها متمرکز می‌شود. این بررسی همچنین چالش‌ها و نیاز به توسعه آینده روش‌های کنترل زیستی را برای اطمینان از مدیریت مؤثر بیماری‌زاها برای کشاورزی پایدار، پوشش خواهد داد.

کلیدواژه‌ها: کنترل زیستی، محصولات طبیعی، عوامل کنترل میکروبی، بیماری‌های گیاهی، کشاورزی پایدار

مقدمه

پاتوژن‌های گیاهی یک تهدید جدی برای بهره‌وری محصولات کشاورزی در سراسر جهان هستند. فراهم کردن غذای کافی برای جمعیت رو به رشد جهان، نیازمند یک سیستم مدیریت کارآمد برای کنترل بیماری‌های مختلف محصول مورد نیاز است. تا به امروز، توسعه محصولات مقاوم به بیماری، استفاده از آفت‌کش‌های شیمیایی و اجرای استراتژی‌های موثر، رویکردهای اولیه برای کنترل بیماری‌های گیاهی بوده اند. این رویکردها ابزاری برای افزایش تولید و کیفیت محصول در چند دهه گذشته بوده اند [۱]. با این حال، استفاده بیش از حد از آفت‌کش‌های شیمیایی منجر به آلودگی محیط زیست شده و در نتیجه استفاده از آن‌ها را در بخش کشاورزی محدود کرده است. در حال حاضر، محققان در حال بررسی استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید به عنوان یک استراتژی سازگار با محیط زیست برای کنترل بیماری‌های محصولات کشاورزی هستند [۲]. طیف متنوعی از جنس‌های باکتریایی پتانسیل زیادی را به عنوان عوامل کنترل زیستی برای بیماری‌های مختلف گیاهی نشان داده اند؛ همچنین نشان داده شده است که قارچ‌ها نقش مهمی در پیشگیری از بیماری‌های مهم در محصولات اصلی دارند. تحقیقات بر روی سویه‌های قارچی به عنوان عوامل کنترل زیستی برای کنترل بیماری‌های گیاهی نیز مورد توجه قرار گرفته اند. این عوامل کنترل زیستی مبتنی بر قارچ و باکتری، فعالیت آنتاگونیستی قابل‌توجهی را در برابر انواع پاتوژن‌های خاک و گیاهان موجود در هوا نشان می‌دهند؛ که آن‌ها را به آفت‌کش‌های زیستی بالقوه برای مطالعات مزرعه یا گلخانه تبدیل می‌کنند [۴].

استفاده از آنتاگونیست‌های میکروبی از رویکردهای امیدوارکننده‌ای هستند، که می‌توانند توانایی کنترل، سرکوب یا مهار پاتوژن‌های گیاهی را داشته باشند. میکروارگانیسم‌هایی که در قسمت‌های داخلی بافت‌های گیاهی زندگی می‌کنند و باعث آسیب نمی‌شوند، اندوفیت نامیده می‌شوند؛ که توانایی عمل به عنوان آنتاگونیست بیماری‌زای گیاهی را دارند. تحقیقات مربوط به اندوفیت‌ها در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های ذاتی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته اند؛ که آن‌ها را به اهداف تحقیقات پزشکی و کشاورزی، به ویژه با توجه به تحقیقات کشاورزی پایدار برای اقدامات حفاظتی تبدیل کرده اند [۵]. نشان داده شده است که اندوفیت‌ها جذب مواد مغذی را تقویت کرده و رشد میزبان را افزایش می‌دهند. آن‌ها ممکن است ظرفیت گیاه را برای مقاومت در برابر تنش‌های غیرزیستی و زیستی مختلف افزایش دهند و مقاومت گیاه را در برابر حشرات و سایر آفات افزایش دهند. آن‌ها فیتوهورمون ها و سایر مواد فعال زیستی را با کاربردهای بیوتکنولوژیکی بالقوه در زمینه های مختلف ایجاد می‌کنند [۶]. آن‌ها به ویژه در کشاورزی مفید هستند؛ زیرا به عنوان عوامل تقویت کننده‌ی رشد محصول و عوامل کنترل زیستی پاتوژن‌های گیاهی هستند.

عوامل کنترل زیستی از مکانیسم‌های مختلفی برای محافظت از گیاهان در برابر تهاجم پاتوژن‌ها استفاده می‌کنند. با استفاده از یک یا ترکیبی از فرآیندها، آن‌ها ممکن است به طور مستقیم یا غیرمستقیم با پاتوژن برای کاهش بیماری گیاهی تعامل داشته باشند [۱]. عوامل کنترل میکروبی در منطقه ریزوسفر، برای فضا و منابع غذایی رقابت می‌کنند و از طریق تولید مواد مختلف مانند لیپوپپتیدها، بیوسورفکتانت‌ها، باکتریوسین‌ها، مواد فرار و آنزیم‌هایی که با کند کردن رشد یا فعالیت متابولیکی پاتوژن‌ها دارای اثرات ضدمیکروبی هستند، با بیماری‌زایی پاتوژن‌ها تداخل می‌کنند [۳،۴].

عوامل کنترل میکروبی، ممکن است به طور غیرمستقیم به وسیله تحریک پاسخ دفاعی یا تقویت رشد گیاهان، از آن‌ها محافظت کنند [۱،۵]. در نتیجه، میزبان تحت طیف وسیعی از فرآیندهای دفاعی بیوشیمیایی و مولکولی قرار می‌گیرد که به عنوان یک مکانیسم دفاعی در برابر پاتوژن‌های مختلف عمل می‌کنند. علاوه بر این، میکروب های مفید ممکن است با افزایش مواد مغذی و جذب آب یا با تولید مواد

شـیمیایی مانند هورمون‌ها برای حفظ تناسـب اندام گیاه، رشـد گیاه را تقویت کنند [۷]. بسـیاری از فرآیندها در تعاملات پیچیده بین پاتوژن‌ها، میکروب‌های مفید و گیاهان شـرکت می‌کنند. بنابراین، شـناسـایی مکانیسم‌های مسئول کنترل زیستی یک چالش بزرگ است [۱،۷]. از این رو، درک مکانیسـم عمل در پشـت اثر محافظتی عامل کنترل زیسـتی، بهینه سـازی کنترل بیولوژیکی را آسـان تر می‌کند. شـرایط ایده آل برای تعامل بین عامل بیوکنترل، پاتوژن، میزبان و توسعه فرمولاسیون و تکنیک های کاربردی مناسب برای بهبود سلامت گیـاه و کشـــاورزی پـایدار فراهم می‌کند. میکروب های مفید، در درجه اول باکتری‌ها و قارچ‌ها، منابع فراوانی از ترکیبات طبیعی مختلف هسـتند که پتانسـیل کنترل بیماری‌های گیاهی را در سـطوح مختلف دارند. میکروب‌هایی که پاتوژن‌های گیاهی را سـرکوب می‌کنند، ترکیبات طبیعی از جمله متابولیت‌های ثانویه تولید می‌کنند [۲،۵]. این ترکیبات از نظر سـاختاری ترکیبات متنوع و با وزن مولکولی کم هستند؛ که برای بقا ضروری نیستند مگر اینکه میکروب‌ها در معرض شرایط نامساعد قرار گیرند. متابولیت‌های ثانویه مانند آنتی بیوتیک‌ها، سموم، پپتیدهای ریبوزومی، پپتیدهای غیر ریبوزومی، پلی کتیدها و ترکیبات آلی فرار، به طور گسترده گزارش شده‌اند؛ که دارای فعالیت آنتاگونیسـتی در برابر انواع پاتوژن‌های گیاهی هسـتند [۱،۸]. این ترکیبات با ایجاد فعل و انفعالات میکروب-گیاه در سـیستم خاک، نقش مهمی در مبارزه با بیماری‌های مختلف دارند. برخی از میکروارگانیسـم‌های مفید، متابولیت‌های ثانویه‌ای را تولید می‌کنند که پاسـخ‌های دفاعی گیاه را تحریک می‌کنند و باعث ایجاد مقاومت سـیستمیک در برابر پاتوژن‌های مهاجم می‌شوند. با توجه به تحقیقات بیوشیمیایی و ژنومی، ژن‌های متابولیت ثانویه مرتبط با فعالیت کنترل زیستی در خوشه‌های ژنی یافت می شوند [۹]. این بررسی اطلاعات کافی در مورد وضعیت فعلی و توسعه آینده استراتژی‌های کنترل زیستی برای کشاورزی پایدار ارائه می‌دهد. ما به بررسی پیشرفت‌هایی می‌پردازیم که در این زمینه ایجاد شـده اسـت. جسـتجوی اسـتراتژی کنترل زیسـتی، عوامل مؤثر بر عوامل کنترل زیستی و چالش‌ها با تمرکز بر رویه‌های قانونی و پارامترهایی که بر استفاده از آن‌ها برای توسعه تجاری‌سازی تأثیر می‌گذارند، در این پژوهش مورد توجه قرار می‌گیرد.

۱- باکتری‌های مفید و پیشگیری از بیماری‌های زراعی

بسـیاری از مطالعات نقش باکتری‌های مفید را در تقویت رشـد گیاه و مقاومت در برابر بیماری در محصولات مورد بررسی قرار داده‌اند. در حال حاضـر، بسـیاری از باکتری‌ها از جنس‌های مختلف، از جمله *Bacillus*، *Paenibacillus*، *Agrobacterium*، *Bradyrhizobium*، *Acinetobacter*، *Azospirillum*، *Azotobacter*، *Pseudomonas*، *Rhizobium* و *Streptomyces* بـه عنوان عوامل کنترل زیسـتی برای کنترل بیماری‌های مختلف در محصولات اصلی ثبت شده‌اند. پاتوژن‌های گیاهی، عمدتاً باکتری‌ها، قارچ‌ها و نماتدها، باعث بیماری‌های جدی گیاهی می‌شـوند که مانع مهمی برای سـلامت محصـول و عملکرد پایدار است. گیاهان زمانی که توسط باکتری‌های بیماری‌زا مانند *Pseudomonas savastanoi*، *Xanthomonas axonopodis* و *Ralstonia solanacearum* آلوده می شـوند، بسـیار تحت تاثیر قرار می‌گیرند. اگرچه تلقیح با گونه‌های *Bacillus* رشـد پاتوژن را سـرکوب می‌کند و شـدت بیماری را در بسـیاری از محصولات آلوده کاهش می‌دهد [۱۰].

استفاده از باکتری‌های مفید می‌تواند رشد گیاه را بهبود بخشد و بیماری‌های مختلف باکتریایی، قارچی و نماتد را بدون آسیب رساندن به محیط زیست کنترل کند. باکتری‌های مفید بیوفیلم‌ها و متابولیت‌های ثانویه مانند سورفاکتین، ایتورین، باسیلومایسین و فنزیسین را ایجاد می‌کنند که با ایجاد فعل و انفعالات میکروبی گیاهی در ناحیه ریزوسفر، جمعیت پاتوژن گیاهی را کاهش می‌دهند. گونه های *Bacillus* از طریق تولید آنزیم‌های خارج سلولی مانند کیتوزاناز، پروتئاز، گلوکاناز و سلولاز به دیواره های سلولی میسلیوم می چسبند و سبب تغییرشکل هیف‌ها می شوند[۱۱و۵]. لیپوپپتیدها، از جمله فنزیسین، ایتورین، پومیلاسیدین، میکسیرین و سورفاکتین، پپتیدهای ضدقارچی هستند که در برابر قارچ‌های بیماری‌زا در ریزوسفرها عمل می‌کنند [۱]. بسیاری از باکتری‌ها، به ویژه گونه‌های *Bacillus*، *Pseudomonas* و

Burkholderia برای سرکوب نماتدها در گیاهان مختلف با تأثیر بر رفتار نماتد مانند تغذیه و تولید مثل بکارگرفته شده‌اند [۱۲]. مطالعات قبلی نشان داده اند که تیمار بیولوژیکی با جدایه های *Bacillus* در کنترل آلودگی نماتد گره ریشه موثر بوده است. همچنین گزارش شده است که آن‌ها جمعیت نماتد را در ریشه ها و خاک آلوده کاهش می‌دهند. همچنین گزارش شده است گونه های *Bacillus* از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با دفاع مانند پلی فنل اکسیداز، پراکسیداز و فنیل آلانین آمونیاک لیاز و همچنین ترشحات ریشه و تغییراتی مانند آمینواسیدها و پلی ساکاریدها، مقاومت سیستمیک القایی را در گیاهان در برابر پاتوژن‌های مختلف تحریک می‌کند [۱،۱۳]. باکتری‌های کنترل زیستی گونه‌های *Bacillus* و *Pseudomonas* گزارش شده است که علیه پاتوژن‌های گیاهی مختلف در محصولات اصلی موثر است. وجود چندین خوشه ژن بیوسنتزی مسئول سنتز متابولیت‌های ثانویه در جدایه‌های *Bacillus velezensis* یافت شد. این متابولیت‌های فعال زیستی با تنوع شیمیایی ممکن است به عنوان منبعی برای توسعه داروهای جدید استفاده شوند. مطالعات اخیر در مورد سنتز مواد فعال زیستی، ترکیبات شیمیایی، خوشه‌های ژن فعال زیست فعال جالب و کاربردهای بیولوژیکی *B.velezensis* و گونه‌های *Bacillus* مرتبط در پیشگیری از بیماری‌های گیاهی برای تضمین کشاورزی پایدار موثر خواهد بود [۵،۱۴]. کاربردهای متعددی برای ترکیبات ضدمیکروبی ساخته شده توسط *B.velezensis* در مدیریت پاتوژن‌های گیاهی وجود دارد. *B.velezensis* از لیپوپپتیدهای سورفاکتین، ایتورین و فنزیسین برای ایجاد اثرات آنتاگونیستی علیه *R. solanacearum* و *Fusarium oxysporum* استفاده می‌کند [۱۲،۱۵].

سویه *B. velezensis* QST 713 به صورت صنعتی به عنوان یک عامل کنترل زیستی برای محافظت از قارچ خوراکی *Agaricus bisporus*، در یک مدل میکرو کمپوست و مهار *aggressivum f. europaeum* استفاده می‌شود که باعث بیماری کپک سبز می‌شود. به نظر می‌رسد که برای انجام اقدامات خود اساساً به آنتی بیوز و ایجاد مقاومت سیستمیک در انواع گونه‌های گیاهی متکی هستند [۱۶]. علاوه بر این، *B. subtilis* به عنوان یک عامل کلیدی در کنترل بیماری‌های مختلف محصولات زراعی شناخته شده است. *B. subtilis* IBFCB-4 یک عامل کنترل زیستی بالقوه برای مهار پژمردگی فوزاریوم هندوانه است. یک نمونه مهم از اندوفیت اگزوژن برای جلوگیری از پژمردگی فوزاریوم موز در چین، سویه *B. subtilis* R31 جدا شده از برگ‌های *orchid Dendrobium* است. بنابراین، تحقیقات گسترده‌ای باید برای توسعه فن آوری فرمولاسیون کارآمد و بررسی محصولات طبیعی مختلف با تعیین فعالیت ضدمیکروبی آن‌ها در شرایط آزمایشگاهی و همچنین برای مدیریت موثر بیماری‌های مختلف محصول انجام شود [۱۷].

۲- قارچ‌های مفید و پیشگیری از بیماری‌های زراعی

قارچ‌های مفید مقادیر زیادی از ترکیبات زیست فعال تولید می‌کنند که می‌توانند به عنوان مواد شیمیایی کشاورزی برای حفاظت از محصولات استفاده شوند. توسعه سویه‌های قارچی به عنوان عوامل کنترل میکروبی برای بیماری‌های گیاهی توجه زیادی را به خود جلب کرده است زیرا مشخص شده است که بسیاری از قارچ‌های مفید رشد پاتوژن‌های مختلف گیاهی را مهار می‌کنند. *Trichoderma* ، *Aspergillus* و *Penicillium* از جمله محبوب‌ترین جنس‌های قارچی هستند که به عنوان عوامل کنترل میکروبی در برابر بیماری‌های باکتریایی و قارچی گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین گزارش شده است که قارچ‌هایی مانند *Gliocladium* و *Saccharomyce* دارای فعالیت آنتاگونیستی در برابر انواع پاتوژن‌ها هستند [۱،۱۹]. بیشتر اندوفیت‌های قارچی که میکروارگانیسم‌های متنوعی هستند، بدون علامت در بافت‌های داخلی گیاه زندگی می‌کنند. قارچ‌های اندوفیت از طریق متقابل‌گرایی و در موارد نادر انگلی با میزبان‌های خود تعامل نزدیک و پیچیده‌ای دارند.

آن‌ها برای محافظت از میزبان خود در برابر باکتری‌ها و آفات بیماری‌زا بسیار مهم هستند زیرا توانایی آن‌ها در تولید انواع متابولیت‌های ثانویه از نظر ساختاری متنوع و فیزیولوژیکی فعال است [۵،۱۲]. قارچ‌های اندوفیت یک منبع غنی برای کشف متابولیت‌های ثانویه جدید با طیف گسترده‌ای از کاربردهای بالقوه کشاورزی هستند. متابولیت‌های متعددی با ساختارهای شیمیایی مختلف از جمله ترپنوئیدها، آلکالوئیدها، استروئیدها، پپتیدها، ایزوکومارین‌ها، بنزوپیرانون‌ها و کینون‌ها در قارچ‌های اندوفیت شناسایی شده‌اند. شناسایی این متابولیت‌ها یک پایه شیمیایی محکم برای توسعه مواد شیمیایی کشاورزی فراهم کرد که ممکن است ضدباکتری، ضدقارچ، علف‌کش، نماتدکش، حشره‌کش و سایر محصولات کشاورزی باشند [۲۰]. از این رو، انواع زیادی از قارچ‌ها وجود دارند که در پیوندهای ریزوسفری و اندوفیتی با گیاهان تعامل دارند.

۳- تولید محصولات بیولوژیک ضدمیکروبی

محصولات ضدمیکروبی مختلف تولید شده توسط عوامل کنترل بیولوژیکی، به عنوان مثال، باکتری‌ها و قارچ‌ها، و تاثیر آن‌ها بر پاتوژن‌های گیاهی و پارامترهای رشد گیاه واجد اهمیت است. محصولات ضدمیکروبی تولید شده توسط باکتری‌ها و قارچ‌ها مانند متابولیت‌های ثانویه فنزیسین، سورفاکتین و باسیل لومایسین D باعث ایجاد مقاومت سیستمیک می شوند و همچنین دارای فعالیت آنتاگونیستی طیف گسترده‌ای در برابر بیماری‌های مختلف هستند. ترکیبات آلی فرار تولید شده توسط میکروب‌ها صفات رشد گیاه را بهبود بخشیده و شاخص‌های بیماری را به طور مستقیم و غیر مستقیم کاهش می‌دهند. بسیاری از قارچ‌ها، به ویژه *Trichoderma*، به دلیل فعالیت‌های آنتاگونیستی وسیع الطیف خود در برابر پاتوژن‌های گیاهی مختلف مشهور هستند. *Trichoderma* یک جنس قارچی گسترده است که در خاک به عنوان ساکنان، ساپروتروف‌ها، همزیست‌های گیاهی و انگل یافت می‌شود. این جنس حاوی قارچ‌های رشته‌ای است که به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان عوامل کنترل زیستی علیه پاتوژن‌های گیاهی در کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱]. پتانسیل کنترل مستقیم و غیرمستقیم عوامل کنترل میکروبی در برابر پاتوژن‌های گیاهی در دهه گذشته برای اطمینان از مدیریت کارآمد بیماری‌های گیاهی به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است که *Trichoderma* آفات حشرات را مستقیماً از طریق انگلی و سنتز ترکیبات حشره‌کش، دفع متابولیت‌ها و مواد شیمیایی ضدتغذیه کنترل می‌کند. رویکردهای غیر مستقیم شامل جذب دشمنان طبیعی، تحریک مکانیسم‌های دفاعی سیستمیک گیاه، و میکروب‌های انگلی همزیست حشرات است. بنابراین استفاده از *Trichoderma* در کشاورزی در مبارزه با آفات حشرات و پاتوژن‌های گیاهی موثر است و آن را به عنوان یک گزینه آینده امیدوارکننده برای پیشرفت کشاورزی پایدار معرفی می‌کند. این قارچ یک پتانسیل آنتاگونیستی قوی در برابر بیش از ۸۰ درصد پاتوژن‌های گیاهی نشان داده است. TAET *T. aggressivum f. europaeum* یک فعالیت آنتاگونیستی قوی علیه *Botrytis cinerea*، *Sclerotinia sclerotiorum* و *Mycosphaerella melonis* با تأثیر بر رشد میسلیوم نشان داد. علاوه بر این، جوانه زنی *S. sclerotia sclerotiorum* را به طور کامل متوقف کرد[۲۲].

TaspHu1 *Trichoderma asperellum*، از *Juglans mandshurica* Maxim درچین جداشده است که در خاک‌های ریزوسفر باعث افزایش مقاومت در نهال‌های گوجه فرنگی در برابر بیماری لکه برگی ناشی از *Alternaria alternata* می شوند. به وضوح نشان داده شده است که *Trichoderma* نقش مهمی در مهار پاتوژن‌های گیاهی به طور غیرمستقیم در ناحیه ریزوسفر از طریق افزایش ایمنی گیاه دارد. بنابراین، گونه‌های *Trichoderma* را می توان در ترکیب با چندین تکنیک جایگزین دیگر در مدیریت آفات برای کشاورزی پایدار استفاده کرد [۲۳].

۴- مکانیسم‌های کنترل زیستی در کنترل بیماری‌های گیاهی

درک مکانیسم‌های کنترل زیستی پاتوژن‌های گیاهی برای ایجاد یک محیط بهینه برای مدیریت موثر طیف متنوعی از بیماری‌های گیاهی ضروری است. مطالعات زیادی در ۲۰ سال گذشته در رابطه با نقش عوامل کنترل زیستی از نظر پیشگیری از بیماری‌های محصول، استقرار ریزوسفر و ترویج رشد گیاه انجام شده است. مکانیسم‌های کنترل زیستی بیماری‌های گیاهی عمدتاً شامل آنتی‌بیوز، ایجاد آنزیم‌های هیدرولیتیک، رقابت برای ریزمغذی‌ها، اصلاح ریزوسفر و ایجاد مقاومت سیستمیک در گیاهان میزبان است. باکتری‌های مفید مانندگونه‌های *Pseudomonas* و *IlusBaci* ممکن است از طریق افزایش ایمنی به توسعه مقاومت بیماری با طیف گسترده در گیاهان کمک کند [۲۴]. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که اندوفیت‌های مفید ریشه، مانند گونه های *Glomus* و *Trichoderma* ، عفونت‌های نماتد اندوانگلی را با فعال کردن سیستم ایمنی گیاه کاهش می‌دهند [۱۶]. پتانسیل عوامل بیوکنترل میکروبی برای مدیریت بیماری‌های گیاهی شامل روش‌های مختلفی است. بهینه‌سازی کنترل زیستی با مطالعه مکانیسم‌های موثر در ایجاد نقش مفید میکروب‌ها آسان‌تر می‌شود. عوامل بیوکنترل میکروبی ممکن است از این مکانیسم‌ها به طور مستقیم یا غیر مستقیم برای مبارزه با بیماری‌های گیاهی استفاده کنند. در یک رویکرد مستقیم، عوامل بیوکنترل میکروبی با رقابت در ریزوسفر، به طور مستقیم به پاتوژن واکنش متضاد نشان می‌دهند، از جمله آنتی‌بیوز، انگلی، کاهش بیماری‌زایی، و عفونت مثال‌هایی از این واکنش‌ها است [۲۲]. این امر باعث توسعه عوامل بیو کنترل میکروبی در ریزوسفر می‌شود، از جمله ایجاد بیوفیلم‌هایی که از استقرار پاتوژن‌ها در ریشه ها جلوگیری می‌کند، ترشح ریزمغذی‌های ضروری مانند سیدروفورها یک سیستم جذب ریزمغذی موثر در رقابت با آفات است. استراتژی‌های غیرمستقیم شامل ترویج واکنش‌های دفاعی گیاه، توسعه گیاه و کوددهی خاک است. القای مقاومت سیستمیک گیاه، که موانع ساختاری ایجاد می‌کند و میزبان را وادار به ایجاد چندین دفاع بیوشیمیایی و مولکولی می‌کند، می‌تواند توسط عوامل بیوکنترل میکروبی آغاز شود. دفاع توسط تولید فیتوالکسین‌ها، فیتوهورمون‌ها و آنزیم‌های محافظ مانند فنیل آلانین، کیتیناز، آمونیاک لیاز، ترکیبات فنلی نشان داده می‌شود [۱،۵].

۴-۱ محصولات طبیعی میکروبی: یک سلاح بالقوه در بخش کشاورزی

ترکیبات میکروبی محصولات طبیعی با پتانسیل قوی برای کنترل بیماری‌های گیاهی هستند. انواع مختلفی از ترکیبات ضدمیکروبی از باکتری‌ها و قارچ‌های مفید جدا شده است [۱۲]. محصولات طبیعی مهم جدا شده از میکروب‌های کنترل زیستی که برای پیشگیری از بیماری‌های محصول استفاده می شوند به تفصیل در زیر توضیح داده شده‌اند.

۴-۲ باکتری‌ها به عنوان منبع ارزشمند محصولات طبیعی

باکتری‌های مفید طیف متنوعی از محصولات طبیعی را برای مدیریت موثر بیماری‌های مختلف گیاهی تولید می‌کنند. ترکیبات ضدمیکروبی‌ها که توسط باکتری‌ها (۲۹۰۰)، قارچ‌ها (۴۹۰۰) و اکتینومیست‌ها (۸۷۰۰ آنتی‌بیوتیک مجزا) تولید می‌شوند، شامل لیپوپپتیدهایی مانند ایتورین، سورفاکتین و فنزیسین هستند [۲۵]. همچنین گزارش شده است که گونه *Pseudomonas* محصولات طبیعی مختلفی تولید می‌کند، از جمله آنزیم‌های خارج سلولی مانند سلولاز، کیتیناز، پروتئازها و بتا گلوکاناز و همچنین سایر ترکیبات ضدمیکروبی مانند فنازین‌ها، سیدروفورها، سیانید و ۲و۴- دی استیل فلوروگلوسینول، برای کنترل بسیاری از بیماری‌های گیاهی است [۲۵]. اعضای خانواده فنزیسین و ایتورین عمدتاً مسئول کنترل بسیاری از بیماری‌های قارچی گیاهان هستند. هیف‌ها و کنیدی‌های پاتوژن‌های قارچی مختلف، از جمله *F. graminearum* و *Monilinia fructicola*، مشاهده شده است که توسط این لیپوپپتیدها آسیب

دیده‌اند [۲۶]. با این حال، ایتورین‌ها و فنزیسین‌ها نیز به ندرت دارای فعالیت ضدباکتریایی علیه *Xanthomonas campestris*، *Pectobacterium carotovorum*، *X. axonopodis pv . vesicatoria* و *R.solanacearum* هستند [۲۷].

سایر مواد فعال بیولوژیکی تولید شده توسط گونه‌های *Bacillus* عبارتند از: مایکوسوبتیلین، سوبتیلیسین، سابلانسین، باسیلیزین، کلروتتین، مایکوباسیلین، ریزوکتیکین‌ها، باسیلین و دیفیسیدین که همگی در کنترل بیماری‌های مختلف گیاهی مفید هستند [۵،۱۲]. ترکیبات آلی فرار تولید شده توسط باکتری‌ها برای ترویج رشد گیاه و کاهش شدت بیماری‌های محصول ثبت شده است. ترکیبات آلی فرار باکتریایی برای سلامت انسان سمیت کمتری دارند و همچنین مقرون به صرفه‌تر هستند. بنابراین، شناسایی ترکیبات آلی فرار مختلف با پتانسیل آنتاگونیستی طیف گسترده توجه قابل توجهی را به خود جلب می‌کند [۳۸]. ترکیبات آلی فرار شامل الکل، آلدئیدها، کتون‌ها، هیدروکربن‌ها، اسیدها و ترپن‌ها مسئول کنترل پاتوژن‌های متعدد گیاهی هستند [۱۲].

مطالعات زیادی در مورد خواص ضدمیکروبی ترکیبات آلی فرار در برابر *S. sclerotiorum*، *B. cinerea*، *M. solani*، *aM. fructicol* انجام شده است [۲۸]. به طور خلاصه، تمام محصولات طبیعی باکتریایی در کنترل بیماری‌های مختلف محصولات کشاورزی، حفظ حاصل‌خیزی خاک و تنظیم میکروب‌های ریزوسفر برای سلامت گیاه مفید هستند.

۳-۴ محصولات طبیعی قارچی برای پیشگیری از بیماری‌های زراعی

قارچها مواد مختلفی تولید می‌کنند که بتوانند در محیط‌های نامطلوب مقاومت کنند. ترکیبات مبتنی بر قارچها از محصولات مهم کشاورزی در برابر پاتوژن‌های مختلف محافظت می‌کند [۱۴]. پتانسیل کنترل زیستی قارچها به دلیل منبع بزرگ ترکیبات زیست فعال و توانایی آن‌ها در مبارزه با بیماری‌های متعدد محصولات زراعی است. انواع مختلف محصولات طبیعی تولید شده توسط قارچها، از جمله آنتی بیوتیک‌ها، پلی کتیدها، پپتیدهای غیر ریبوزومی، ترکیبات معطر و متابولیت‌های هتروسیکلیک هستند. مواد شیمیایی متعدد تولید شده توسط گونه‌های *Trichoderma* همچنین به عنوان عوامل کنترل زیستی در کنترل بسیاری از بیماری‌های محصول استفاده می‌شود [۱۸،۲۱]. گونه‌های *Trichoderma* و *Gliocladium virens* به تولید ترکیبات ضدقارچی متعددی مانند گلیوویرین، ویریدیول، والینوتروسین، ویریدین، گلیوتوکسین و هپتلیدیک اسید شناخته شده است [۲۹].

سویه‌های *Trichoderma harzianum* T22 و *Trichoderma harzianum* TC39 به عنوان تولید کننده آنتی بیوتیک‌هایی مانند ۱_ هیدروکسی۳ _ متیل آنتراکینون، آزافیلون، هارزیانوپیریدون و هارزیانولید توصیف شده‌اند. این محصولات طبیعی می‌توانند رشد پاتوژن های گیاهی مانند *Botrytis cinerea*، *Rhizoctonia solani*، *Leptosphaeria maculans*، *Pythium ultimum* و *Phytophthora cinnamomin* را سرکوب کنند. انواع مختلف ترکیبات ثانویه با استفاده از روش‌های مختلف از جمله کروماتوگرافی ستونی، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا ، کروماتوگرافی مایع - طیف‌سنجی جرمی و کروماتوگرافی گازی - طیف‌سنجی جرمی از قارچها جدا و شناسایی شده‌اند [۱،۵]. سه سویه *Chaetomium globosum*، یعنی Cg7، Cg6 و Cg5 ، Chaetoglobosin را تولید کردند؛ که یک آنتی بیوتیک در عصاره کشت آن‌ها که برای کاهش بیماری‌های پس از برداشت در میوه‌های متعدد استفاده می‌شود. کنترل زیستی نماتدها و بیماری‌های گیاهی تاکنون با *Trichoderma* مرتبط بوده است. بسیاری از گونه‌ها به ویژه به عنوان عوامل کنترل زیستی از جمله *T. polysporum*، *T. harzianum*، *T.gamsii*، *T. atroviride* و *T. viride* موثر هستند. یک عنصر حیاتی سیستم‌های خاک-گیاه، تنوع زیادی از جوامع قارچی است که به طور فعال در مناطق ریزوسفر و اندوفیت تعامل دارند [۱۹]. ریزوسفر ناحیه اطراف ریشه گیاه است که جمعیت منحصر به فردی از میکروارگانیسم‌ها در آن زندگی می‌کنند. در حالی که اندوسفریک به نواحی درون سلولی بافت‌های گیاهی اشاره دارد که توسط اندوفیت‌های میکروبی بدون آسیب رساندن به گیاهان میزبان ساکن هستند. تعامل بین گیاهان و

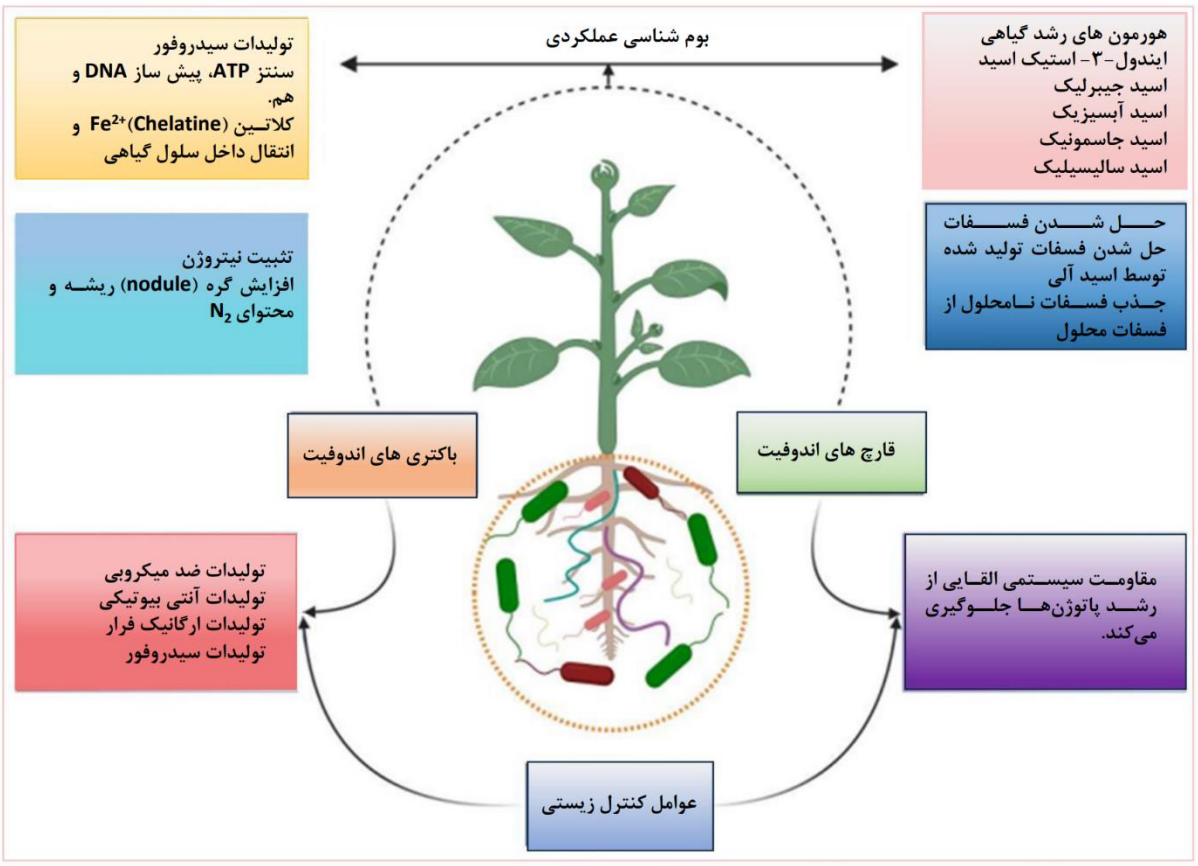
قارچ‌ها در مناطق ریزوسفری و اندوفیتی برای ارتقای رشد و مقاومت در برابر بیماری‌ها در برابر عوامل بیماری‌زا بسیار مهم است [۵]. گونه‌های میکوریزی (Mycorrhizal) قارچ‌های ریشه‌دار بخش قابل‌توجهی از قارچ ریزوسفر را تشکیل می‌دهند و تأثیر زیادی بر زندگی گیاهی از جمله تغذیه و رشد گیاه دارند و در برابر تنش‌های زیستی تحمل می‌کنند. از این رو، این قارچ‌ها را می‌توان به‌عنوان کودهای زیستی سازگار با محیط زیست، تلقیح زیستی و عوامل بیوکنترل میکروبی به جای آفت‌کش‌های شیمیایی مورد استفاده قرار داد [۳۰].

۴-۴ عوامل کنترل زیستی باعث رشد گیاه می شوند

میکروب‌های محرک رشد گیاه به کلونیزاسیون کارآمد ریشه کمک می‌کنند، با سایر میکروارگانیسم‌های خاک رقابت می‌کنند، سیستم‌های دفاعی میزبان را در برابر پاتوژن‌ها تحریک می‌کنند و رشد گیاه را از طریق مکانیسم‌های مختلف تقویت می‌کنند [۶۲]. میکروب‌های محرک رشد گیاه دارای عوامل کنترل زیستی به نام ریزوباکتری‌ها و ریزوقارچ‌های محرک رشد گیاه هستند؛ که با بیماری‌های محصول مبارزه می‌کنند. در مطالعات قبلی گزارش شده است که *Bacillus*، *Pseudomonas*، *Actinobacteria* و *Lactobacillus* در استراتژی‌های مختلف حفاظت از محصولات استفاده شده است [۳۹]. سویه‌های کنترل زیستی *Bacillus pumilis* و *Bacillus amyloliquefaciens* ویژگی‌های مهم بسیاری مانند تولید سیدروفور، حل شدن فسفات، تولید ایندول ۳-استیک اسید و فعالیت آنتاگونیستی نسبت به پاتوژن‌های قارچی را نشان دادند که می‌تواند رشد گیاه را از نظر تعداد برگ، زیست توده و طول ساقه را بهبود بخشد [۲۴].

کودهای زیستی یا میکروارگانیسم‌ها رشد گیاه را به طرق مختلف از جمله تثبیت نیتروژن، حل شدن فسفات، تولید سیدروفور و تولید HCN افزایش دهند. بسیاری از سویه‌های باکتریایی با تولید اسیدهای آلی یا سیدروفورها دسترسی آهن را افزایش می‌دهند. ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند اکسین‌هایی تولید کند که به شدت بر رشد ریشه و معماری تأثیر می‌گذارد. ایندول۳- استیک اسید، یک اکسین تولید شده توسط ریزوباکتری محرک رشد گیاه، توجه زیادی را در ارتقاء رشد گیاه در شرایط نامطلوب به خود جلب کرده است [۲۶].

ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه تولیدکننده‌ی اکسین، بیان ژن‌های مختلف درگیر در سیستم‌های دفاعی و ارتقای رشد گیاه را تنظیم می‌کنند [۴۰]. سویه‌های ریزو باکتری‌های محرک رشد گیاه همچنین از طریق تولید سایر فیتوهورمون‌های مهم مانند جیبرلین‌ها و سیتوکینین‌ها در برابر استرس مقاومت می‌کنند. ریزو باکتری‌های محرک رشدگیاه به تولید متابولیت‌های ثانویه پیچیده مانند فلاونوئیدها، ترپن‌ها و ترکیبات فنلی معروف است که ممکن است میکروب‌های خاصی را به ریزوسفر بکشاند [۲۷]. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که عوامل کنترل زیستی از طریق مکانیسم‌های مختلف به ارتقای رشد گیاه کمک می‌کنند، که هنوز نیازمند مطالعات دقیق با استفاده از تکنیک‌های مدرن مورد استفاده در فعل و انفعالات گیاهی-میکروبی است. مکانیسم‌های عمومی عوامل کنترل بیولوژیکی باکتری‌ها و قارچ‌ها بر روی صفات رشد گیاه و مقاومت دفاعی گیاه به طور خلاصه در شکل زیر گزارش شده است [۲۷،۳۸].



شکل ۱: مکانیسم عمومی عوامل کنترل بیولوژیکی باکتری‌ها و قارچ‌ها بر صفات رشد گیاه و مقاومت دفاعی گیاه نشان می‌دهد. عوامل بیوکنترل میکروبی، مانند قارچ‌ها و باکتری‌ها، می‌توانند انواع مختلفی از هورمون‌های گیاهی، تثبیت نیتروژن، تولید سیدروفور، حل شدن فسفات و مقاومت سیستمیک را تولید کنند که در نتیجه باعث بهبود رشد گیاه و کنترل بیماری‌های گیاهی می‌شود. عامل بیوکنترل به سایر باکتری‌ها و قارچ‌ها برای بهبود سلامت گیاه کمک می‌کند. فلش‌های مختلف اتصالات مکانیزم متفاوتی را نشان می‌دهد که توسط قارچ‌ها و باکتری‌ها تولید می‌شود [۲۸].

۵- چالش‌های ایجاد میکروب‌های مفید به عنوان عوامل بیوکنترل

این استراتژی کنترل بیولوژیکی در ابتدا در پایان قرن نوزدهم مورد استفاده قرار گرفت. این استراتژی کنترل زیستی برای کنترل بیماری‌های گیاهی است [۳۱]. از آنجایی که این روش جایگزین موثری برای آفت‌کش‌های شیمیایی برای کنترل آفات و بیماری‌های گیاهی ارائه می‌دهد، هنوز چالش‌های مختلفی برای غلبه بر آن وجود دارد. این چالش‌ها در زیر به اختصار مورد بحث قرار می‌گیرند.

۵-۱ انتقال عوامل کنترل زیستی از آزمایشگاه به میدان

محققان در حال غربالگری میکروب‌های بالقوه به عنوان بخشی از فعالیت خود برای ایجاد داروهای آفت‌کش بیولوژیکی هستند که برای کنترل بیماری‌های گیاهی در کشاورزی بسیار موثر است. این سویه‌ها معمولاً بر اساس عواملی مانند مقاومت به بیماری، محدوده میزبان، در دسترس بودن، فرمولاسیون، تولید انبوه و عملکرد کشاورز انتخاب می شوند. عملکرد ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه را می توان با در

نظر گرفتن مکان‌های جغرافیایی، گونه‌های محصول میزبان، انواع خاک و عوامل محیطی ارزیابی کرد [۱۰]. رشد عوامل بیوکنترل میکروبی معمولاً در محیط‌های کنترل شده مانند گلخانه‌ها آسان تر است. ترجیح اکثر محققان در این مرحله ممکن است با قابلیت اطمینان محیط مرتبط باشد. عملکرد عوامل بیوکنترل میکروبی در آزمایشات گلخانه ای می‌تواند پشتیبانی نظری و عملی مهمی را برای استفاده در مزرعه فراهم کند. در نتیجه، امکان سنجی و کارایی ریزوباکتری‌های محرک رشدگیاه برای تولید باغبانی تجاری، مدیریت بیماری و شرایط تغییرات آب و هوایی مزرعه ممکن است تضمین شود [۴۱]. پایداری عوامل بیوکنترل میکروبی تحت تأثیر روش فرمولاسیون، حمل و نقل و محیط ذخیره سازی است. برای دستیابی به سطوح بالای موفقیت استراتژی عامل بیوکنترل میکروبی، بهبود فن آوری فرمولاسیون، افزایش مدت زمان ذخیره سازی محصول عامل بیوکنترل میکروبی، بهینه سازی تولید سویه‌های میکروبی انتخاب شده و دستیابی به کاربرد در مقیاس بزرگ از طریق شرکت‌های تولیدی کم هزینه واجد اهمیت است. بسیاری از دانشمندان به دنبال راه حلی برای افزایش ماندگاری ریزو باکتری محرک رشدگیاه با کاهش دمای ذخیره سازی یا تغییر ترکیب مخلوط‌های افزودنی هستند [۵،۳۲]. در طول فرمولاسیون و کارآزمایی‌های کارایی میدانی، شرکای بخش خصوصی و آزمایشگاه‌های دارای مجوز، ارزیابی‌های ضروری زیست محیطی و سلامت انسان و همچنین تضمین کیفیت برای تجاری‌سازی نهایی آفت‌کش‌های زیستی را انجام می‌دهند. قبل از استفاده از آفت‌کش‌های زیستی در مقیاس بزرگ در این زمینه، مقامات دولتی باید مجوزهای لازم را صادر نمایند. به طور معمول، مجموعه ثبت و مقررات آفت‌کش‌های زیستی شامل نسخه های اصلاح شده آفت‌کش های سنتزی و همچنین ارزیابی خطر است. این موارد شامل آزمایش‌های اکوتوکسیکولوژیکال (ecotoxicological) و سم‌شناسی و همچنین مطالعات مکانیسم عمل و طیف میزبان می‌شود. دستیابی به اکثر این الزامات برای تولیدکنندگان دشوار است زیرا تولید آفت‌کش‌های زیستی موثر در حالی که استانداردهای ایمنی و سازگاری قابل قبول برای تجاری سازی را حفظ می‌کند ممکن است کار دشواری باشد [۳۳].

۲-۵ چالش‌های مرتبط با جداسازی بیوکنترل میکروبی

کنترل بیولوژیکی میکروبی تکنیکی با طیف فعالیت گسترده در برابر پاتوژن‌ها و آفات مختلف است. کنترل زیستی میکروبی می‌تواند از رشد گیاه حمایت کند، تحمل تنش را افزایش دهد، از تغذیه گیاه حمایت کند و با پاتوژن‌های گیاهی مخالفت کند. نیاز به تشدید پایدار بهره‌وری کشاورزی با استفاده از تحقیقات اندوفیت برای مبارزه با تنش‌های زنده (بیماری‌زا و آفات) و تنش‌های غیرزیستی به دلیل پیچیدگی میکروبیوم‌های مرتبط با گیاهان، چالش‌های ذاتی دارد. از این رو، ادغام عوامل کنترل زیستی گیاهی یک رویکرد کارآمد است که راه حلی امیدوارکننده برای افزایش بهره وری کشاورزی ارائه می‌دهد. با این حال، استفاده تجاری کارآمد از ارگانیسم‌های اندوفیت به‌عنوان عوامل کنترل زیستی یا محرک‌های رشد نیازمند پرداختن به چندین چالش مرتبط با جداسازی این میکروارگانیسم‌ها است. بنابراین، استفاده از روش‌های جدید جداسازی و غربالگری برای به دست آوردن کنترل زیستی میکروبی بومی با فعالیت آنتاگونیستی موثر مورد نیاز است [۴۲]. یکی از چالش‌های مرتبط با جداسازی خرماهای مختلف بیوکنترل میکروبی، آلودگی به مایکوتوکسین است [۳۴]. با این حال، سم‌زدایی، تبدیل و جذب مایکوتوکسین می‌تواند آلودگی مایکوتوکسین را به شکل مخمر، باکتری، قارچ و آنزیم کاهش دهد. این عوامل می‌توانند مایکوتوکسین‌ها را قبل از اثر مخرب مستقیم آن‌ها بر برداشت، تجزیه یا جذب کنند. با این وجود، این استراتژی‌ها در طول تعاملات تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرند و بنابراین خطر فزاینده‌ای از نوترکیبی جنسی بین خطوط سم زا و سویه‌های کنترل زیستی میکروبی وجود دارد. این اتفاق در نهایت منجر به پیدایش سویه های سم زا بیش از حد بیماری‌زا می‌شود. بنابراین، برای پرداختن به این مشکل، تعیین ویژگی‌های عوامل کنترل زیستی میکروبی در سطح جنس، با استفاده از روش‌های حساس، برای شناسایی عملکردی بهتر در سطح گونه مورد نیاز است [۳۵]. سم‌زدایی زیستی مایکوتوکسین‌ها با استفاده از باکتری‌های اسید لاکتیک پروبیوتیک به طور موثری آلاینده‌ها را از طریق تخریب زیستی یا مسیرهای جذب زیستی حذف کرده است. جذب بیولوژیکی شامل اتصال مستقیم سم به باکتری است که در آن اتصال تحت تأثیر میل باکتریایی به سم است. با این حال، تجزیه زیستی، که در مقایسه با جذب زیستی

بادوام‌تر و برگشت ناپذیرتر است، می‌تواند ساختار سم را تغییر دهد و منجر به تولید متابولیت‌های ناخواسته شود (مانند آفلاتوکسیکل از آفلاتوکسین B1)، که می‌تواند برای میزبان مضر باشد [۳۶]. بنابراین به خودی خود اجرای یا فرصت سازگاری با کنترل زیستی طبیعی را کاهش می‌دهد.

چالش دیگر عوامل بیوکنترل میکروبی مکانیسم‌های آنتاگونیستی است که پاتوژن‌ها و تعاملات پیچیده آن‌ها را بین میزبان، پاتوژن و محیط کنترل یا سرکوب می‌کند. این فعل و انفعالات را می‌توان تحت تأثیر عوامل متعددی قرار داد که شامل شرایط محیطی و حضور فلور میکروبی ساکن در سیستم بیولوژیکی می‌شود. با این حال، تشدید تلاش‌ها برای درک بهتر مکانیسم و نحوه عملکرد در زمینه آنتی‌بیوز مستقیم، هیپرپارازیتیسم، القای مقاومت و رقابت برای فضا و مواد مغذی، بهینه‌سازی کنترل زیستی را تسهیل می‌کند و امکان استفاده از سویه‌های کارآمدتر را درمحیط زیست به طور صحیح فراهم می‌کند. استفاده از عوامل کنترل بیولوژیکی میکروبی در صنعت کشاورزی به منظم‌سازی و تجاری‌سازی میکروارگانیسم‌ها بستگی دارد و در عین حال به آن‌ها اجازه می‌دهد همچنان با آفت‌کش‌ها و بخورهای شیمیایی سنتزی رقابت نمایند [۴۳،۴۴]. همچنین ارزیابی سم شناسی این عوامل مفید است، در حالی که باید تلاش های جسورانه‌ای در جهت توسعه روش‌های نگهداری مناسب و استراتژی‌های تولید در مقیاس تجاری انجام شود [۳۷].

۶- نتیجه گیری

استفاده از میکروب‌های مفید برای کنترل بیماری‌های محصولات زراعی ایمن و سازگار با محیط زیست استراتژی است که توجه بسیاری از دانشمندان در بخش حفاظت از محصولات را به خود جلب کرده است. این بررسی به اهمیت استراتژی‌های کنترل زیستی در پیشگیری از بیماری‌های مهم در محصولات می‌پردازد. ترکیبی از اقدامات اصلاحی و کنترل زیستی برای حفظ تنوع و سلامت اکوسیستم مورد نیاز است؛ بنابراین، رویکردهای یکپارچه برای محافظت از تنوع زیستی از کاهش بیشتر و حفظ شیوه‌های کشاورزی پایدار مورد نیاز است. این بررسی برای محققینی که برهمکنش‌های میکروب-گیاه را مطالعه می‌کنند مفیدتر خواهد بود، زیرا دانش کافی در مورد وضعیت فعلی و نیازها برای توسعه بیشتر استراتژی‌های کنترل زیستی برای اطمینان از یک سیستم مدیریت پایدار بیماری‌های گیاهی ارائه می‌دهد. تحقیق درباره میکروارگانیسم‌ها به ویژه حیاتی است، زیرا آن‌ها مزایای متعددی (عوامل طبیعی) در مقایسه با روش‌های شیمیایی فعلی دارند. در نتیجه، با افزایش نیازهای جهانی برای تولید غذا در کنار آب و هوای متفاوت، فناوری‌های جدید مختلف می‌توانند به طور پایدار چالش‌های متعددی را در مدیریت بیماری با کاهش ورودی‌های شیمیایی خطرناک و تأیید تشخیص سریع و مهار عوامل بیماری‌زای گیاهی کاهش دهند. تحقیقات اندوفیتی پتانسیل را در نقش رویکردهای پایدار در کشاورزی به دلیل ارتقای رشد و مهارت‌های کنترل زیستی فیتوپاتوژن میکروارگانیسم‌های مرتبط با گیاهان نشان داده است.

منابع

[1] Farzand, A.; Moosa, A.; Zubair, M.; Khan, A.R.; Massawe, V.C.; Tahir, H.A.S.; Sheikh, T.M.M.; Ayaz, M.; Gao, X. Suppression of Sclerotinia sclerotiorum by the Induction of Systemic Resistance and Regulation of Antioxidant Pathways in Tomato Using Fengycin Produced by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. Biomolecules 2019, 9, 613.

[2] Zubair, M.; Farzand, A.; Mumtaz, F.; Khan, A.R.; Sheikh, T.M.M.; Haider, M.S.; Yu, C.; Wang, Y.; Ayaz, M.; Gu, Q.; et al. Novel Genetic Dysregulations and Oxidative Damage in Fusarium graminearum Induced by Plant Defense Eliciting Psychrophilic *Bacillus atrophaeus* Ts1. Int. J. Mol. Sci. 2021, 22, 12094.

[3] Babalola, O.O. Beneficial Bacteria of Agricultural Importance. Biotechnol. Lett. 2010, 32, 1559–1570.

[4] Saeki, E.K.; Kobayashi, R.K.T.;Nakazato, G.Quorum Sensing System:Target to Control the Spread of Bacterial Infections. Microb Pathog. 2020, 142, 104068.

[5] Chen, Y.; Hu, B.; Xing, J.;Li, C.Endophytes: The novel sources for plant terpenoid biosynthesis.Appl. Microbiol. Biotechnol. 2021,105, 4501–4513.

[6] Xia, Y.; Liu, J.; Chen, C.; Mo, X.; Tan, Q.; He, Y.; Wang, Z.; Yin, J.; Zhou, G. The Multifunctions and Future Prospects of Endophytes and Their Metabolites in Plant Disease Management. Microorganisms 2022, 10, 1072.

[7] Zubair, M.; Hanif, A.; Farzand, A.; Sheikh, T.M.M.; Khan, A.R.; Suleman, M.; Ayaz, M.; Gao, X. Genetic Screening and Expression Analysis of Psychrophilic *Bacillus* spp. Reveal Their Potential to Alleviate Cold Stress and Modulate Phytohormones in Wheat. Microorganisms 2019, 7, 337.

[8] Farzand, A.; Moosa, A.; Zubair, M.; Rashid Khan, A.; Hanif, A.; Tahir, H.A.S.; Gao, X. Marker Assisted Detection and LC-MS Analysis of Antimicrobial Compounds in Different *Bacillus* Strains and Their Antifungal Effect on *Sclerotinia sclerotiorum*. Biol. Control 2019, 133, 91–102.

[9] Stringlis, I.A.; Zhang, H.; Pieterse, C.M.J.; Bolton, M.D.; De Jonge, R. Microbial Small Molecules-Weapons of Plant Subversion. Nat. Prod. Rep. 2018, 35, 410–433.

[10] Ayaz, M.; Ali, Q.; Jiang, Q.; Wang, R.; Wang, Z.; Mu, G.; Khan, S.A.; Khan, A.R.; Manghwar, H.; Wu, H.; et al. Salt Tolerant *Bacillus* Strains Improve Plant Growth Traits and Regulation of Phytohormones in Wheat under Salinity Stress. Plants 2022, 11, 2769.

[11] da Silva, L.R.; Inglis, M.C.V.; Moraes, M.C.B.; Magalhães, D.M.; Sifuentes, D.N.; Martins, I.; de Mello, S.C.M. Morphological and Protein Alterations in *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary after Exposure to Volatile Organic Compounds of *Trichoderma* spp. Biol. Control 2020, 147, 104279.

[12] Cao, H.; Jiao, Y.; Yin, N.; Li, Y.; Ling, J.; Mao, Z.; Yang, Y.; Xie, B. Analysis of the Activity and Biological Control Efficacy of the *Bacillus subtilis* Strain Bs-1 against *Meloidogyne incognita*. Crop Prot. 2019, 122, 125–135.

[13] Jacob, J.;Krishnan, G.V.; Thankappan, D.; Amma, D.K.B.N.S. Endophytic Bacterial Strains Induced Systemic Resistance in Agriculturally Important Crop Plants. In Microbial Endophytes; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; 75–105.

[14] Katz, L.; Baltz, R.H. Natural Product Discovery: Past, Present, and Future.J. Ind. Microbiol. Biotechnol. 2016, 43, 155–176.

[15] Wu, L.; Wu, H.; Chen, L.; Xie, S.; Zang, H.; Borriss, R.; Gao, X. Bacilysin from *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 Has Specific Bactericidal Activity against Harmful Algal Bloom Species. Appl. Environ. Microbiol. 2014, 80, 7512–7520.

[16] Molinari, S.; Leonetti, P. Bio-Control Agents Activate Plant Immune Response and Prime Susceptible Tomato against Root-Knot Nematodes. PLoS ONE 2019, 14, e0213230.

[17] Zhu, J.; Tan, T.; Shen, A.; Yang, X.; Yu, Y.; Gao, C.; Li, Z.; Cheng, Y.; Chen, J.; Guo, L. Biocontrol Potential of *Bacillus subtilis* IBFCBF-4 against Fusarium Wilt of Watermelon. J. Plant Pathol. 2020, 102, 433–441.

[18] Thambugala, K.M.; Daranagama, D.A.; Phillips, A.J.L.; Kannangara, S.D.; Promputtha, I. Fungi vs. Fungi in Biocontrol: An Overview of Fungal Antagonists Applied Against Fungal Plant Pathogens. Front.Cell.Infect. Microbiol. 2020, 10, 604923.

[19] Zimmermann, S.D.; Marqués-gálvez, J.E. Endophytic Fungi: From Symbiosis to Secondary Metabolite Communications or Vice Versa? Front. Plant Sci. 2021, 12, 791033.

[20] Risoli, S.; Cotrozzi, L.; Sarrocco, S.; Nuzzaci, M.; Pellegrini, E.; Vitti, A. *Trichoderma*-Induced Resistance to Botrytis cinerea in *Solanum* Species: A Meta-Analysis. Plants 2022, 11, 180.

[21] Degani, O.; Dor, S. *Trichoderma* Biological Control to Protect Sensitive Maize Hybrids against Late Wilt Disease in the Field. J. Fungi 2021, 7, 315.

[22] Lahlali, R.; Ezrari, S.; Radouane, N.; Kenfaoui, J.; Esmaeel, Q.; El Hamss, H.; Belabess, Z.; Barka, E.A. Biological Control of Plant Pathogens: A Global Perspective. Microorganisms 2022, 10, 596.

[23] Yu, Z.; Wang, Z.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Liu, Z. Biocontrol and Growth-Promoting Effect of *asperellum* TaspHu1 Isolate from *Juglans mandshurica* Rhizosphere Soil. Microbiol. Res. 2021, 242, 126596.

[24] Köhl, J.; Kolnaar, R.; Ravensberg, W.J. Mode of Action of Microbial Biological Control Agents against Plant Diseases: Relevance beyond Efficacy. Front. Plant Sci. 2019, 10, 845.

[25] Beck, C.; Garzón, J.F.G.; Weber, T. Recent Advances in Re-Engineering Modular PKS and NRPS Assembly Lines. Biotechnol. Bioprocess Eng. 2020, 25, 886–894.

[26] Aiello, D.; Restuccia, C.; Stefani, E.; Vitale, A.; Cirvilleri, G. Postharvest Biology and Technology Postharvest Biocontrol Ability of *Pseudomonas synxantha* against *Monilinia fructicola* and *Monilinia fructigena* on Stone Fruit. Postharvest Biol. Technol. 2019, 149, 83–89.

[27] Chen, M.C.; Wang, J.P.; Zhu, Y.J.; Liu, B.; Yang, W.J.; Ruan, C.Q. Antibacterial Activity against *Ralstonia solanacearum* of the Lipopeptides Secreted from the *Bacillus amyloliquefaciens* Strain FJAT-2349. J. Appl. Microbiol. 2019, 126, 1519–1529.

[28] Liu, C.; Yin, X.; Wang, Q.; Peng, Y.; Liu, P.; Agricultural, S.; Province, S.; Shi, J. Antagonistic Activities of Volatiles Produced by Two *Bacillus* Strains Against *Monilinia fructicola* in Peach Fruit. J. Sci. Food Agric. 2018, 98, 5756–5763.

[29] El-Saadony, M.T.; Saad, A.M.; Soliman, S.M.; Salem, H.M.; Ahmed, A.I.; Mahmood, M.; El-Tahan, A.M.; Ebrahim, A.A.M.; El- Mageed, T.A.A.; Negm, S.H.; et al. Plant Growth-Promoting Microorganisms as Biocontrol Agents of Plant Diseases: Mechanisms, Challenges and Future Perspectives. Front. Plant Sci. 2022, 13, 923880.

[30] Mosaddeghi, M.R.; Hosseini, F.; Hajabbasi, M.A.; Sabzalian, M.R.; Sepehri, M. Epichloë spp. and Serendipita indica Endophytic Fungi: Functions in Plant-Soil Relations. Adv. Agron. 2021, 165, 59–113.

[31] Stenberg, J.A.; Sundh, I.; Becher, P.G.; Björkman, C.; Dubey, M.; Egan, P.A.; Friberg, H.; Gil, J.F.; Jensen, D.F.; Jonsson, M.; et al. When Is It Biological Control? A Framework of Definitions, Mechanisms, and Classifications. J. Pest Sci. 2021, 94, 665–676.

[32] Marina, T.A.-E.; Maythsulene, I.S.O.; Valacia, L.S.-L.; Marta, C.C.F.; Amadou, H.B.; Edemilson, C.C.; Marcio, V. de C.B.C. Shelf Life Enhancement of Plant Growth Promoting Rhizobacteria Using a Simple Formulation Screening Method. Afr. J. Microbiol. Res.2018, 12, 115–126.

[33] He, D.-C.; He, M.-H.; Amalin, D.M.; Liu, W.; Alvindia, D.G.; Zhan, J. Biological Control of Plant Diseases: An Evolutionary and Eco-Economic Consideration. Pathogens 2021, 10, 1311.

[34] Moral J.; Garcia-Lopez, M.T.; Camiletti, B.X.; Jaime, R.; Michailides, T.J.; Bandyopadhyay, R.; Ortega-Beltran, A. Present Status and Perspective on the Future Use of Aflatoxin Biocontrol Products. Agronomy 2020, 10, 491.

[35] Gouveia, D.; Pible, O.; Culotta, K.; Jouffret, V.; Geffard, O.; Chaumot, A.; Degli-Esposti, D.; Armengaud, J. Combining proteoge-nomics and metaproteomics for deep taxonomic and functional characterization of microbiomes from a non-sequence host. NPJ Biofilms Microbiomes 2020, 6, 23.

[36] Afshar, P.; Shokrzadeh, M.; Raeisi, S.N.; Ghorbani-HasanSaraei, A.; Nasiraii, L.R. Aflatoxins biodetoxification strategies based on probiotic bacteria. Toxicon 2020, 178, 50–58.

[37] Leneveu-Jenvrin, C.; Charles, F.; Barba, F.J.; Remize, F. Role of biological control agents and physical treatments in maintaining the quality of fresh and minimally-processed fruit and vegetables. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2020, 60, 2837–2855.

[38] Tahir, H.A.S.S.; Gu, Q.; Wu, H.; Raza, W.; Hanif, A.; Wu, L.; Colman, M.V.; Gao, X. Plant Growth Promotion by Volatile Organic Compounds Produced by *Bacillus subtilis* SYST2. Front. Microbiol. 2017, 8, 171.

[39] Tahir, H.A.S.; Gu, Q.; Wu, H.; Niu, Y.; Huo, R.; Gao, X. Bacillus Volatiles Adversely Affect the Physiology and Ultra-Structure of *Ralstonia solanacearum* and Induce Systemic Resistance in *Tobacco* against Bacterial Wilt. Sci. Rep. 2017, 7, 40481.

[40] Issazadeh, K.; Rad, S.K.; Zarrabi, S.; Rahimibashar, M.R. Antagonism of *Bacillus* Species against *Xanthomonas campestris pv campestris* and *Pectobacterium carotovorum* subsp. carotovorum. Afr. J. Microbiol. Res. 2012, 6, 1615–1620.

[41] Ali, Q.; Ayaz, M.; Mu, G.; Hussain, A.; Yuanyuan, Q.; Yu, C.; Xu, Y.; Manghwar, H.; Gu, Q.; Wu, H.; et al. Revealing Plant Growth-Promoting Mechanisms of *Bacillus* Strains in Elevating Rice Growth and Its Interaction with Salt Stress. Front. Plant Sci. 2022, 13, 994902.

[42] Pereyra, M.M.; Díaz, M.A.; Soliz-Santander, F.F.; Poehlein, A.; Meinhardt, F.; Daniel, R.; Dib, J.R. Screening Methods for Isolation of Biocontrol Epiphytic Yeasts against *Penicillium digitatum* in Lemons. J. Fungi 2021, 7, 166.

[43] Zhang, X.; Li, B.; Zhang, Z.; Chen, Y.; Tian, S. Antagonistic Yeasts: A Promising Alternative to Chemical Fungicides for Controlling Postharvest Decay of Fruit. J. Fungi 2020, 6, 158.

[44] Vedamurthy, A.B.; Varsha, S.L.; Shruthi, S.D. Regulatory requirement for commercialization of biocontrol agents. In Biocontrol Agents and Secondary Metablites, 1st ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 659–675.