

بهینه‌سازی شرایط استفاده از سموم به منظور مدیریت شدت بیماری‌زایی قارچ *Rhizoctonia solani* در کاهو

Optimization of Fungicide Application Conditions for Managing Disease Severity Caused by *Rhizoctonia solani* in Lettuce

مهدی اسحاقی^۱، ثمین صدیق^{۲*} و مژده ملکی^۳

دریافت: ۱۴۰۴/۳/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۱

چکیده

قارچ *Rhizoctonia solani* Kühn به‌عنوان یکی از عوامل بیماری‌زای خاکزاد خسارت‌زا، موجب بروز بیماری پوسیدگی طوقه و ریشه در بسیاری از محصولات کشاورزی از جمله کاهو (*Lactuca sativa* L.) می‌گردد. کنترل این قارچ به‌دلیل گستره میزبانی بالا و بقای طولانی در خاک، همواره با چالش‌های فراوانی همراه بوده است. در این پژوهش، برای مدلسازی و بهینه‌سازی شدت بیماری‌زایی قارچ *R. solani* در کاهو، از روش سطح پاسخ (RSM) در قالب طرح مرکب مرکزی (CCD) استفاده شد. هدف، تعیین شرایط بهینه مصرف سه نوع قارچ‌کش شامل یک قارچ‌کش شیمیایی (کاربن‌دازیم) و دو فرآورده زیستی (پارس‌باسیل حاوی *Bacillus velezensis* و تریکومیکس HV حاوی *Trichoderma harzianum*) بر شدت بیماری‌زایی دو جدایه متفاوت (B و C) از قارچ *R. solani* در شرایط مزرعه‌ای در شهرستان ورامین بود. نتایج نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در شدت بیماری‌زایی میان جدایه‌ها بود؛ جدایه B نسبت به تیمارها مقاومت بیشتری نشان داد. در حالی که جدایه C به‌طور معنی‌داری نسبت به کاربن‌دازیم حساس‌تر بود. استفاده از قارچ‌کش‌های زیستی تأثیر محافظتی قابل توجهی بر گیاه به‌ویژه در مراحل ابتدایی رشد نشان دادند. همچنین نتایج مدلسازی نشان داد که مدل آماری از برازش مطلوبی برخوردار بوده و قادر به پیش‌بینی دقیق شدت بیماری‌زایی است. بهینه‌سازی مدل نشان داد که بیشترین کارایی کاربن‌دازیم در دز ۳ در هزار و سه نوبت کاربرد در ماه حاصل شد؛ در حالی که برای قارچ‌کش‌های زیستی، دز ۲ در هزار در دو نوبت کاربرد، بهترین عملکرد پیشگیرانه را داشتند. به‌طور کلی، نتایج تأیید کرد که انتخاب نوع قارچ‌کش، زمان و تعداد دفعات مصرف نقش کلیدی در مدیریت پایدار بیماری پوسیدگی طوقه در کاهو دارد.

واژگان کلیدی: *Rhizoctonia solani*، کاهو، قارچ‌کش بیولوژیک، کاربن‌دازیم، کنترل بیماری‌های خاکزاد

مقدمه

بیماری‌های قارچی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده در تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان به شمار می‌روند و خسارات اقتصادی قابل توجهی به بخش‌های مختلف کشاورزی وارد می‌کنند (Fisher et al., 2018). در میان بیماری‌های قارچی، *Rhizoctonia solani* به‌عنوان یک بیمارگر خاکزی با دامنه میزبان گسترده، یکی از چالش‌های اصلی تولید سبزیجات، به‌ویژه کاهو (*Lactuca sativa*) محسوب می‌شود (Parmeter, 2023). این قارچ، عامل بیماری‌هایی نظیر پوسیدگی ریشه و ساقه است که منجر به کاهش کیفیت و کمیت محصول و حتی از بین رفتن گیاه در مراحل اولیه رشد می‌شود (Muzela, 2008; Raid, 2004).

R. solani با داشتن چرخه زیستی پیچیده، ظرفیت بالایی برای بقا در خاک و محیط‌های مختلف دارد که این امر

۱ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه بیماری‌شناسی گیاهی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

۲- دانشیار، گروه گیاه‌پزشکی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

نویسنده مسئول مکاتبات: samin.seddigh@iau.ac.ir

کنترل آن را دشوارتر می کند (Ajayi, 2016). از سوی دیگر، تنوع ژنتیکی بالای این قارچ باعث بروز گونه های متفاوت با حساسیت های مختلف به روش های کنترل شیمیایی و زیستی شده است (Parmeter, 2023). به همین دلیل، مدیریت بیماری های ناشی از این بیمارگر نیازمند رویکردهای جامع و چندجانبه است که ضمن حفظ بهره وری کشاورزی، اثرات منفی زیست محیطی و اقتصادی را کاهش دهد. استفاده از سموم قارچ کش یکی از رایج ترین و مؤثرترین روش ها برای کنترل بیماری های قارچی به شمار می رود (Beaumelle et al., 2023). با این حال، مصرف نادرست و بیش از حد سموم می تواند باعث ایجاد مقاومت در بیمارگرها، کاهش تنوع زیستی خاک، آلودگی منابع آب و بروز خطرات بهداشتی برای انسان ها و دام ها گردد (Aktar et al., 2009). در این راستا، بهینه سازی مصرف سموم به عنوان یک استراتژی کلیدی مطرح است که علاوه بر افزایش کارایی کنترل بیماری، اثرات سوء زیست محیطی را نیز کاهش می دهد (Panth et al., 2020).

مدلسازی اپیدمیولوژیک بیماری های گیاهی به منظور درک بهتر فرآیندهای شیوع بیماری و پیش بینی روند آن، ابزاری حیاتی در مدیریت هوشمند بیماری ها محسوب می شود (Madden et al., 2007). این مدل ها می توانند با بهره گیری از داده های تجربی و شرایط محیطی، سناریوهای مختلف شیوع را شبیه سازی کرده و بهترین استراتژی های مدیریتی را پیشنهاد دهند (Panth et al., 2020). در کنار مدلسازی، بهینه سازی شرایط کاربرد سموم از طریق الگوریتم های پیشرفته مانند الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)، الگوریتم ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization) و روش های یادگیری ماشین (Machine Learning)، امکان تعیین بهترین زمان، دوز و روش مصرف را فراهم می آورد که می تواند به کاهش مصرف سموم و افزایش کارایی کمک کند. این الگوریتم ها به دلیل توانایی بالا در جستجوی پاسخ بهینه در فضاهای پیچیده و چند بعدی، عدم وابستگی به مشتق تابع هدف و قابلیت همگرایی سریع، ابزارهایی مؤثر برای حل مسائل غیرخطی در سامانه های زیستی و کشاورزی محسوب می شوند. چنین ویژگی هایی موجب می شود بتوان از آن ها برای یافتن شرایط بهینه مصرف سموم با حداقل اثرات زیست محیطی و حداکثر کارایی استفاده کرد (Indu et al., 2022; Rebollar-Alviter and Nita, 2011).

مطالعات متعددی اثرات دز و زمان بندی کاربرد سموم را بر کنترل بیماری های ناشی از *R. solani* بررسی کرده اند. به عنوان مثال، Jacobsen و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که استفاده از دوزهای بهینه و زمان بندی مناسب سموم قارچ کش می تواند شدت بیماری را تا بیش از ۵۰ درصد کاهش و در عین حال مصرف سموم را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. این یافته ها نشان دهنده اهمیت توجه دقیق به پارامترهای کاربرد سموم برای کنترل مؤثر بیماری است. با این وجود، بسیاری از این تحقیقات به صورت موردی و بر اساس آزمایش های محدود صورت گرفته اند و به ندرت یک مدل جامع که بتواند عوامل محیطی، ویژگی های بیمارگر و شرایط کاربرد سموم را به طور همزمان مدلسازی و بهینه سازی کند، ارائه شده است (Ajayi-Oyetunde and Bradley, 2018).

از سوی دیگر، ترکیب دانش زیست شناسی بیمارگر با مدل های ریاضی و الگوریتم های بهینه سازی، می تواند ابزاری قدرتمند برای تصمیم گیری های مدیریتی در کشاورزی دقیق (precision agriculture) باشد (Panth et al., 2020). با توجه به پیچیدگی های شیوع بیماری و تأثیر متقابل عوامل متعدد، استفاده از روش های چندمتغیره و داده محور به منظور یافتن شرایط بهینه کاربرد سموم، ضرورت می یابد (Indu et al., 2022).

در ایران، کاهو یکی از مهم ترین سبزیجات مصرفی است که به طور گسترده در مناطق مختلف کشت می شود و خسارت های ناشی از *R. solani* باعث زیان های اقتصادی زیادی شده است. با توجه به این اهمیت و خلاء تحقیقات جامع در زمینه مدلسازی و بهینه سازی کاربرد سموم قارچ کش و نهاده های کنترل گر زیستی در کاهو، انجام این پژوهش از ضرورت بالایی برخوردار است. هدف اصلی این مطالعه، توسعه یک مدل ریاضی دقیق برای مدلسازی شدت بیماری زایی *R. solani* در کاهو و بهینه سازی شرایط کاربرد سموم قارچ کش و نهاده های زیستی با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی نوین است. این مدل می تواند راهنمایی علمی برای کشاورزان و کارشناسان در تعیین بهترین دوز، زمان و روش کاربرد

سموم باشد تا ضمن کنترل مؤثر بیماری، مصرف سموم و آسیب‌های زیست‌محیطی کاهش یابد. بدین ترتیب، این پژوهش می‌تواند سهم مهمی در تحقق کشاورزی پایدار و افزایش امنیت غذایی ایفا کند.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و جداسازی قارچ عامل بیماری

در طول سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲، گیاهان کاهوی آلوده با علائم پوسیدگی ریشه ناشی از *Rhizoctonia solani* از مزارع اصلی کشت کاهو در شهرستان ورامین جمع‌آوری شدند. نمونه‌های آلوده شامل بخش‌هایی از ساقه و ریشه، به آزمایشگاه بیماری‌شناسی گیاهی در دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین-پیشوا منتقل گردیدند. برای جداسازی قارچ، قطعات کوچکی به قطر حدود ۰/۵ تا ۱ سانتی‌متر از ناحیه مرزی بافت سالم و آلوده پس از شستشو با آب و ضدعفونی با محلول هیپوکلریت سدیم ۰/۵٪ به مدت ۱ تا ۲ دقیقه، سه بار با آب مقطر استریل شسته شدند و سپس روی کاغذ صافی سترون خشک گردیدند. این قطعات بر روی محیط کشت PDA (Potato Dextrose Agar) حاوی آنتی‌بیوتیک کلرامفنیکل کشت داده شدند و در دمای ۲۸ درجه سلسیوس انکوبه گردیدند. پس از سه روز، کلنی‌های قارچی با خصوصیات مورفولوژیک *R. solani* شناسایی شده و با استفاده از روش نوک ریشه بر روی محیط کشت آب آگار ۱٪ خالص‌سازی شدند. کشت‌های خالص در محیط PDA برای نگهداری کوتاه‌مدت در دمای ۲۸ درجه سلسیوس نگهداری شدند و پس از تشکیل اسکروت‌ها، به منظور نگهداری بلندمدت، در دمای ۴ درجه سلسیوس حفظ شدند.

آماده‌سازی گیاهان کاهو

بذرهای کاهو رقم اورست ۱ حساس به بیماری، در سینی‌های نشاکاری کشت داده شد و پس از رشد اولیه تا مرحله ۲-۳ برگی، به گلدان‌های استریل حاوی خاک (مخلوطی از خاک زراعی، خاک برگ، ماسه، پرلیت و ورمی‌کمپوست) که در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه اتوکلاو شده بودند، منتقل شدند. در هر گلدان یک نشا کشت شد و گلدان‌ها با برچسب‌گذاری مناسب بر اساس تیمارها در آزمایشگاه به‌صورت تصادفی چیدمان شدند.

شرایط نگهداری آزمایشگاهی

دمای آزمایشگاه به‌طور میانگین در محدوده 25 ± 5 درجه سلسیوس، رطوبت نسبی در بازه ۲۵ تا ۳۵ درصد و دوره نوری ۱۴ ساعت روشنایی و ۱۰ ساعت تاریکی (با استفاده از نور طبیعی) تنظیم شد تا شرایط مناسب رشد گیاه فراهم گردد.

مایه‌زنی گیاهان

سه روز پس از انتقال نشاها و تثبیت رشد اولیه، مرحله مایه‌زنی آغاز شد. سوسپانسیون قارچی از هر جدایه B و C با استفاده از میسلیم‌های رشد کرده در آب مقطر استریل تهیه و به مدت دو ساعت در دستگاه شیکر قرار گرفتند. سپس جهت شمارش کلونی، از هر سوسپانسیون رقت‌سازی انجام شده و بر روی پتری‌دیش کشت داده شد. غلظت جدایه B برابر با 10×10^7 اسپور در میلی‌لیتر و غلظت جدایه C به میزان $10 \times 2/5$ اسپور در میلی‌لیتر در نظر گرفته شد. برای هر گلدان، ۱۰ میلی‌لیتر از سوسپانسیون قارچی به پای گیاه افزوده شد. علائم آلودگی در طی روزهای بعد به‌صورت روزانه ثبت گردید.

تیمار با قارچ‌کش‌ها

سه نوع قارچ‌کش کاربندازیم ۶۰٪ WP (شیمیایی - شرکت آرایشیمی)، تریکومیکس HV (زیستی - شرکت فناوران حیات سبز) و پارس‌باسیل SC (زیستی - شرکت رویان تیسان سبز) مورد آزمایش قرار گرفت. هر قارچ‌کش در سه غلظت ۱، ۲ و ۳ در هزار به‌صورت محلول در آب آبیاری به گیاهان اعمال شد. تعداد دفعات محلول‌پاشی در سه سطح (یک، دو و سه بار در ماه و به فاصله ۷ روز) بررسی گردید.

طراحی آزمایش

برای طراحی آزمایش، از طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design= CCD) در قالب روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology= RSM) استفاده شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل نوع قارچ کش (۳ سطح)، دز مصرفی (۳ سطح)، تعداد دفعات محلول پاشی (۳ سطح) و جدایه قارچ (۲ سطح) بودند. هر تیمار در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۲ انجام شد.

ارزیابی بیماری و شاخص شدت بیماری

ارزیابی‌ها از روز سوم پس از مایه‌زنی و با فواصل چهار روز یک‌بار به مدت ۲۰ روز انجام شد. علائم بیماری بر اساس شاخص شدت بیماری پنج‌درجه‌ای (Glosier et al., 2008) بررسی شد:

۱: گیاه سالم، ۲: زردی برگ‌ها، ۳: پژمردگی جزئی، ۴: پژمردگی شدید، ۵: مرگ کامل گیاه

برای هر گلدان، درصد وقوع بیماری با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{درصد وقوع بیماری} = (\text{تعداد برگ‌های آلوده} / \text{تعداد کل برگ‌ها}) \times 100$$

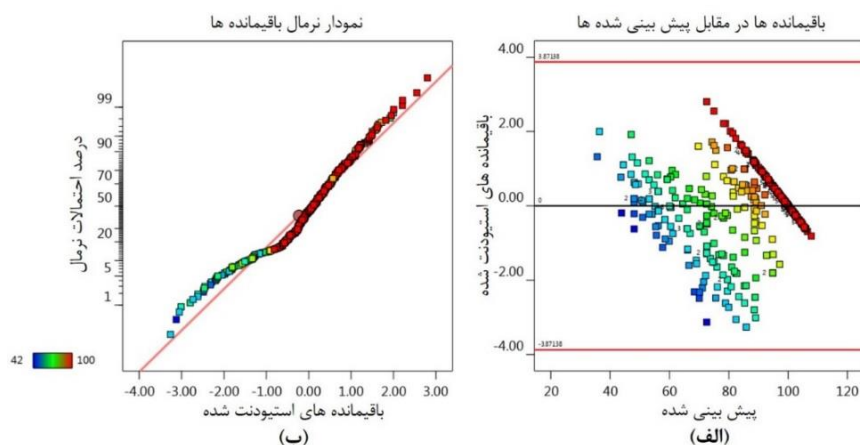
ارزیابی مدل آماری

برای اعتبارسنجی مدل آماری، از آزمون عدم برازش، ضرایب تبیین R^2 و R^2_{adj} و تحلیل باقی‌مانده‌ها استفاده شد. مقدار معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ برای هر عامل نشان‌دهنده تأثیر معنادار آن بر پاسخ بود. با استفاده از RSM، شرایط بهینه جهت کنترل مؤثر بیماری با کمترین اثرات زیست‌محیطی تعیین گردید.

نتایج

ارزیابی صحت داده‌ها در میزان درصد شدت بیماری‌زایی کاهو

درصد خسارت وارد شده به گیاهان کاهو در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است. بررسی پراکندگی داده‌ها و روند باقیمانده‌ها (شکل ۱ ب) نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها به صورت تقریباً خطی و نرمال هستند و خطاها هم‌واریانس دارند.



شکل ۱- پراکندگی خطای مشاهده شده و خطای پیش‌بینی شده باقیمانده (الف)، روند تغییرات باقیمانده‌ها (ب) در درصد

خسارت روی گیاهان

Fig 1. Distribution of observed errors and predicted residual error (a), and trend of residual changes (b) in the percentage of damage on plants

این امر بیانگر عدم وجود روند خاص در داده‌ها و توزیع نرمال آن‌ها است. همچنین مقادیر آماری R^2 برابر با ۰/۷۳، R^2 اصلاح‌شده (Adjusted) برابر با ۰/۷۲ و R^2 پیش‌بینی (Predicted) برابر با ۰/۷۰ نشان‌دهنده قدرت بالای مدل در پیش‌بینی درصد شدت بیماری‌زایی است.

مقایسه فاکتورهای مختلف در شدت بیماری‌زایی

نتایج تجزیه واریانس ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که فاکتورهای زمان سمپاشی، تکرار، نوع سم، جدایه قارچ و بسیاری از اثرات متقابل آن‌ها بر درصد شدت بیماری‌زایی کاهو معنی‌دار بوده‌اند ($p < 0.01$). اثرات متقابل دز سم و زمان سمپاشی، دز سم و تکرار، دز سم و نوع سم، زمان و نوع سم، زمان و جدایه قارچ، تکرار و نوع سم، تکرار و جدایه قارچ و نوع سم و جدایه قارچ نیز تأثیرات معناداری بر شدت بیماری داشتند.

تأثیر فاکتور نوع سم

در شرایط دز ۳ در هزار، سه بار تکرار در ماه و پس از گذشت ۲۰ روز از آزمایش، تأثیر نوع سم بر شدت بیماری‌زایی در دو جدایه قارچ B و C متفاوت بود (شکل ۲). در جدایه B تفاوت معنی‌داری بین سموم پارس باسیل، تریکومیکس HV و کاربندازیم مشاهده نشد (شکل ۲ الف)، اما در جدایه C، کاربندازیم کمترین درصد شدت بیماری و پارس باسیل بیشترین درصد را نشان دادند (شکل ۲ ب).

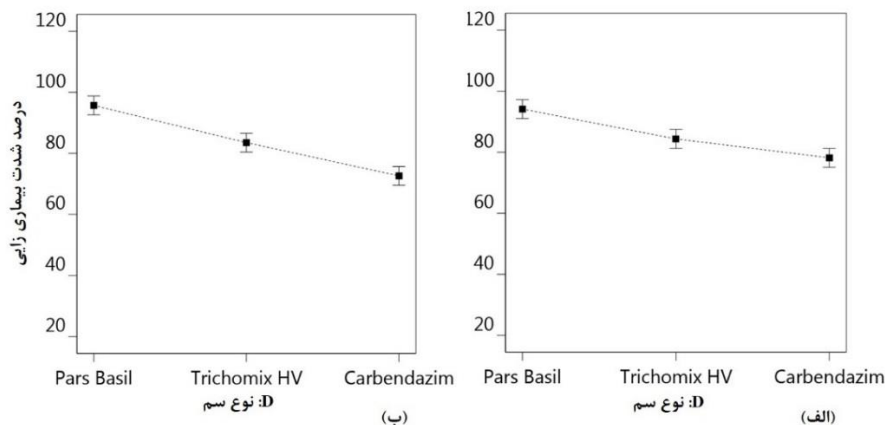
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس برای مدل پاسخ (شدت بیماری‌زایی)

Table 1. Analysis of variance (ANOVA) results for the response model (disease severity)

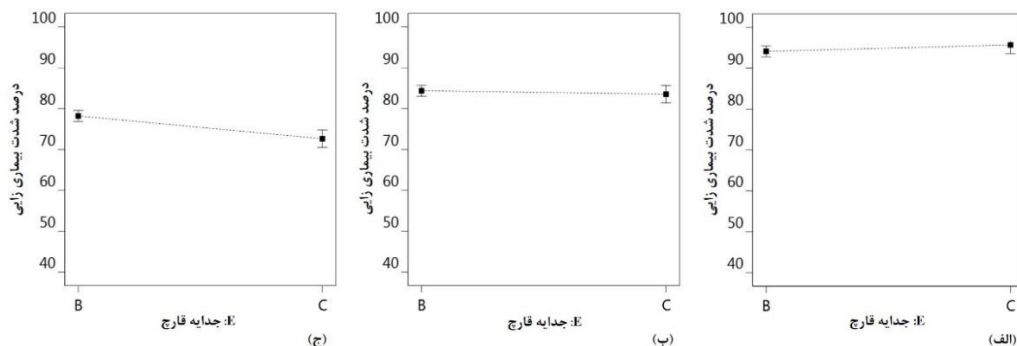
ارزش P P-value	ارزش F F-value	میانگین مربعات MS	درجه آزادی df	مجموع مربعات SS	SOV	منابع تغییرات
< 0.0001	44.95	4503.40	23	1.036E+05	Model	مدل
0.4797	0.5005	50.14	1	50.14	Fungicide dosage (A)	دز سم (A)
< 0.0001	828.34	82986.43	1	82986.43	Timing of application (B)	زمان سمپاشی (B)
0.0233	5.19	520.20	1	520.20	Frequency of application (C)	تکرار (C)
< 0.0001	21.08	2111.59	2	4223.18	Type of fungicide (D)	نوع سم (D)
< 0.0001	22.37	2241.60	1	2241.60	Fungal isolate (E)	جدایه قارچ (E)
0.2593	1.28	127.89	1	127.89	Dosage×Timing	اثر متقابل دز و زمان سمپاشی
0.0009	11.14	1116.30	1	1116.30	Dosage×Frequency	اثر متقابل دز و تکرار
0.0030	5.91	592.04	2	1184.08	Dosage×Type	اثر متقابل دز و نوع سم
0.3083	1.04	104.27	1	104.27	Dosage×Isolate	اثر متقابل دز و جدایه قارچ
0.6859	0.1638	16.41	1	16.41	Timing×Frequency	اثر متقابل زمان و تکرار سمپاشی
< 0.0001	10.01	1003.00	2	2006.00	Timing×Type	اثر متقابل زمان و نوع سم
0.0069	7.37	738.84	1	738.84	Timing×Isolate	اثر متقابل زمان و جدایه قارچ
< 0.0001	11.04	1105.65	2	2211.30	Frequency×Type	اثر متقابل تکرار و نوع سم
0.0045	8.18	819.20	1	819.20	Frequency×Isolate	اثر متقابل تکرار و جدایه قارچ
0.0148	4.26	426.86	2	853.73	Type×Isolate	اثر متقابل نوع سم و جدایه قارچ
0.0865	2.96	296.05	1	296.05	A ²	اثر مربع دز
< 0.0001	39.59	3966.64	1	3966.64	B ²	اثر مربع زمان
0.7343	0.1154	11.56	1	11.56	C ²	اثر مربع تکرار
		100.18	366	36667.32	Residual	باقیمانده
0.0522	1.30	108.41	246	26668.12	Lack of fit	عدم برازش مدل
		83.33	120	9999.20	Pure Error	خطای خالص

تأثیر فاکتور جدایه قارچ

مطالعه اثر جدایه قارچ در شرایط مشابه نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین پارس باسیل و تریکومیکس HV در هر دو جدایه B و C وجود ندارد، اما در تیمار با کاربندازیم شدت بیماری در جدایه C به‌طور معناداری کمتر از جدایه B بود (شکل ۳).



شکل ۲- تأثیر فاکتور نوع سم با دز ۳ در هزار، سه تکرار در ماه و پس از روز بیستم آزمایش در جدایه (الف) B و (ب) C
 Fig. 2. Effect of fungicide type at a concentration of 3 per thousand, applied three times per month after the twentieth day of the experiment on isolate (a) B and (b) C

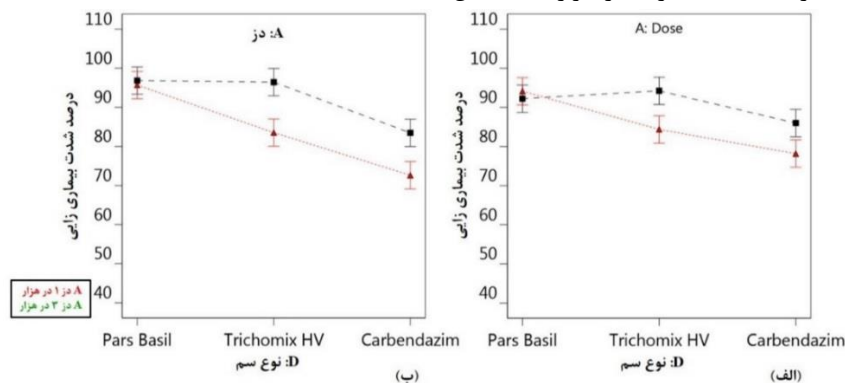


شکل ۳- تأثیر فاکتور جدایه قارچ با دز ۳ در هزار، سه تکرار در ماه و پس از روز بیستم آزمایش در سموم (الف) پارس باسیل، (ب) تریکومیکس HV و (ج) کاربندازیم

Fig. 3. Effect of fungal isolate at a concentration of 3 per thousand, applied three times per month after the twentieth day of the experiment on the fungicides: (a) Pars Basil, (b) Trichomix HV, and (c) Carbendazim

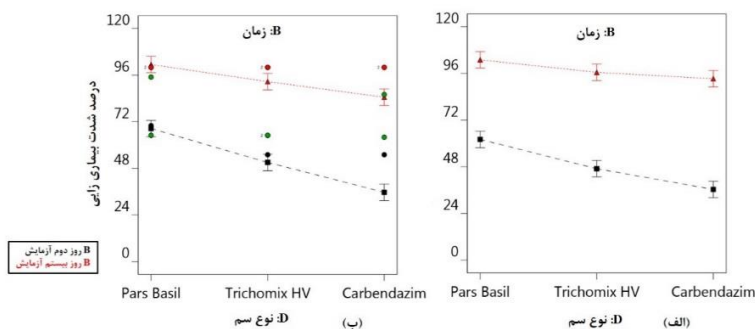
اثرات متقابل فاکتورهای مختلف

اثر متقابل دز سم و نوع سم: در هر دو جدایه B و C، در دزهای یک و سه در هزار تفاوت معنی داری بین سموم مختلف دیده نشد، به استثناء جدایه C که در آن استفاده از دز ۳ در هزار تریکومیکس HV و کاربندازیم منجر به کاهش معنی دار شدت بیماری نسبت به دز ۱ در هزار شد (شکل ۴).



شکل ۴- اثر متقابل نوع سم و دز سم در دو جدایه (الف) B و (ب) C در روز بیستم و با سه تکرار
 Fig. 4. Interaction effect of fungicide type and fungicide dose on two isolates: (a) B and (b) C, on the twentieth day with three replications

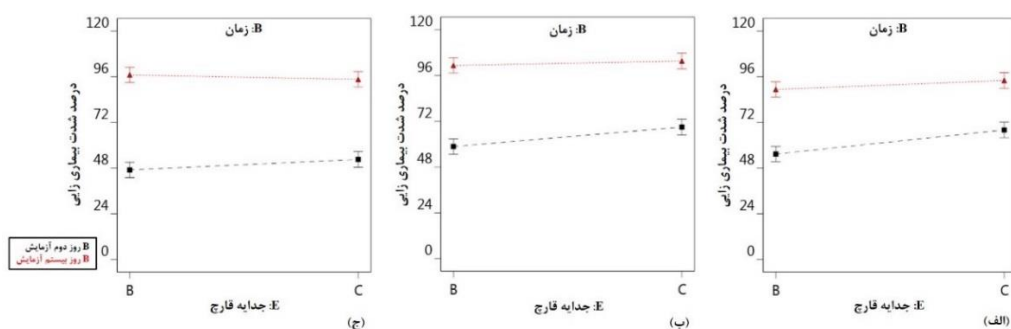
اثر متقابل نوع سم و زمان: شدت بیماری‌زایی به‌طور معنی‌داری با گذشت زمان افزایش یافت (شکل ۵). در روز بیستم، اختلاف معنی‌داری بین سموم در جدایه B دیده نشد، ولی در جدایه C کاربندازیم نسبت به پارس باسیل اختلاف معنی‌داری داشت و عملکرد بهتری نشان داد (شکل ۵).



شکل ۵- اثر متقابل نوع سم و زمان در دو جدایه (الف) B و (ب) C در روز بیستم آزمایش و پس از تکرار سوم

Fig. 5. Interaction effect of fungicide type and time on two isolates: (a) B and (b) C, on the twentieth day of the experiment after the third application

اثر متقابل زمان و جدایه قارچ: میزان شدت بیماری‌زایی در دو جدایه به‌طور معنی‌داری با گذشت زمان افزایش یافت و تفاوت معنی‌داری بین جدایه‌ها در استفاده از پارس باسیل و تریکومیکس HV مشاهده نشد، اما در کاربندازیم شدت بیماری در جدایه C کمتر بود (شکل ۶).

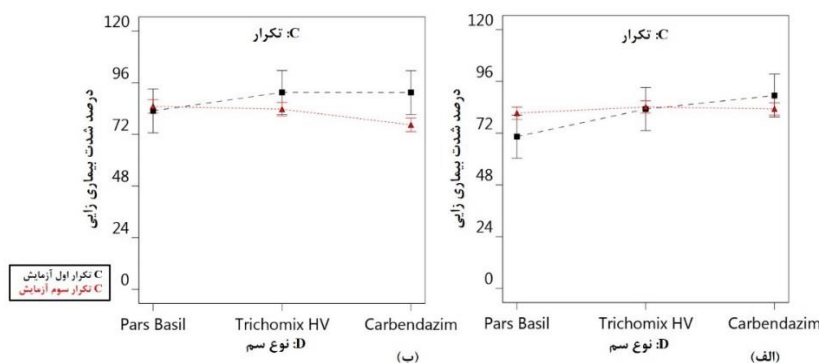


شکل ۶- اثر متقابل زمان و جدایه قارچ در سه سم استفاده شده (الف) پارس باسیل (ب) تریکومیکس HV و (ج) کاربندازیم

در روز بیستم و با دز سه در هزار

Fig. 6. Interaction effect of time and fungal isolate on the three applied fungicides: (a) Pars Basil, (b) Trichomix HV, and (c) Carbendazim, on the twentieth day at a concentration of 3 per thousand

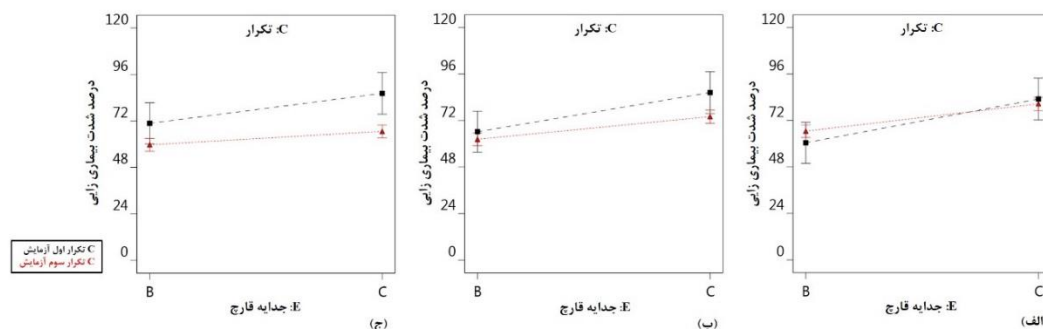
اثر متقابل تکرار و نوع سم: در جدایه B تفاوت معنی‌داری بین یک بار و سه بار تکرار در هیچ یک از سموم مشاهده نشد، اما در جدایه C با استفاده از کاربندازیم سه بار تکرار منجر به کاهش معنی‌دار شدت بیماری شد (شکل ۷).



شکل ۷- اثر متقابل تکرار و نوع سم در دو جدایه (الف) B و (ب) C در روز بیستم و با دز سه در هزار

Fig. 7. Interaction effect of application frequency and fungicide type on two isolates: (a) B and (b) C, on the twentieth day at a concentration of 3 per thousand

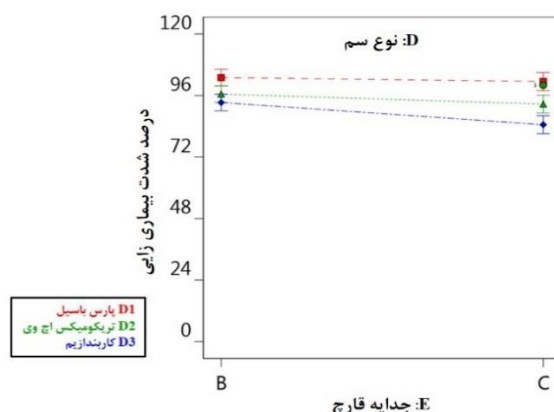
اثر متقابل تکرار و جدایه قارچ: هیچ تفاوت معنی داری بین تکرارها در تیمارهای پارس باسیل و تریکومیکس HV مشاهده نشد، اما در کاربندازیم در جدایه C سه بار تکرار شدت بیماری را به طور معناداری کاهش داد (شکل ۸).



شکل ۸- اثر متقابل تکرار و جدایه قارچ در سه سم استفاده شده (الف) پارس باسیل (ب) تریکومیکس HV و (ج) کاربندازیم در روز بیستم و با دز سه در هزار

Fig. 8. Interaction effect of application frequency and fungal isolate on the three applied fungicides: (a) Pars Basil, (b) Trichomix HV, and (c) Carbendazim, on the twentieth day at a concentration of 3 per thousand

اثر متقابل نوع سم و جدایه قارچ: در هر سه سم مورد بررسی، تفاوت معنی داری بین سموم تریکومیکس و پارس باسیل در هر جدایه وجود نداشت، ولی در جدایه C، کاربندازیم به طور قابل توجهی شدت بیماری زایی را کاهش داد (شکل ۹).



شکل ۹- اثر متقابل نوع سم و جدایه قارچ در سه سم استفاده شده (الف) پارس باسیل (ب) تریکومیکس HV و (ج) کاربندازیم در روز بیستم، با دز سه در هزار و سه تکرار

Fig. 9. Interaction effect of fungicide type and fungal isolate on the three applied fungicides: (a) Pars Basil, (b) Trichomix HV, and (c) Carbendazim, on the twentieth day at a concentration of 3‰ with three replications

به طور کلی، بررسی اثرات متقابل نشان داد که پاسخ گیاه و کارایی قارچ کشها تحت تأثیر هم زمان نوع جدایه، دُز مصرف و تعداد دفعات کاربرد قرار دارد. چنین تعاملاتی از دیدگاه بیولوژیکی بیانگر آن است که رفتار دینامیکی قارچ کشها نه تنها به ویژگی های فیزیولوژیکی عامل بیماری زا بلکه به پایداری ماده مؤثره و سازوکار دفاعی گیاه نیز وابسته است. به عنوان مثال، حساسیت بالاتر جدایه C نسبت به کاربندازیم احتمالاً ناشی از نفوذپذیری بیشتر دیواره سلولی و جذب مؤثرتر ترکیب سیستمیک بوده است، در حالی که کارایی مشابه دو قارچ کش زیستی در هر دو جدایه نشان دهنده ماهیت عمومی تر مکانیسم های بیوکنترلی آنها است. این یافته ها اهمیت تنظیم دقیق دز و زمان مصرف بر اساس ویژگی های زیستی بیمارگر را برجسته می کند.

معادله کلی مدل درصد شدت بیماری‌زایی

برای هر یک از سموم و جدایه‌ها، مدل خطی زیر برای پیش‌بینی درصد شدت بیماری‌زایی ارائه شد که شامل اثرات اصلی و اثرات متقابل دز، زمان و تکرار است. ضرایب مثبت نشان‌دهنده افزایش درصد بیماری با افزایش متغیرها و ضرایب منفی نمایانگر اثر کاهنده متغیرها بر شدت بیماری هستند.

جدایه B در استفاده از پارسیل باسیل:

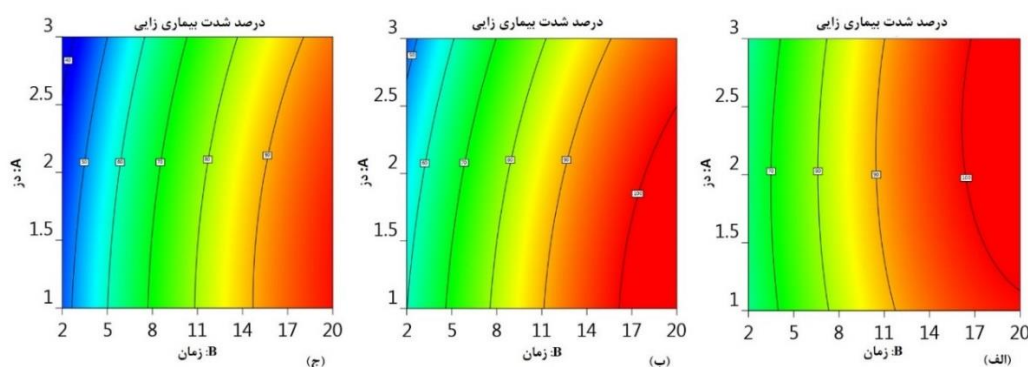
$$\text{Pathogenicity severity\%} = 18.06134 + 15.90714 \text{ Dose} + 3.73846 \text{ Time} + 11.96700 \text{ Repeat} + 0.134904 \text{ Dose} \times \text{Time} - 3.05000 \text{ Dose} \times \text{Repeat} + 0.048327 \text{ Time} \times \text{Repeat} - 1.89023 \text{ Dose}^2 - 0.091567 \text{ Time}^2 - 0.373563 \text{ Repeat}^2$$

جدایه C در استفاده از پارسیل باسیل:

$$\text{Pathogenicity severity\%} = 42.719008279326 + 14.384917718736 \text{ Dose} + 3.2978888595498 \text{ Time} + 7.7003321085356 \text{ Repeat} + 0.1349043715847 \text{ Dose} \times \text{Time} - 3.05 \text{ Dose} \times \text{Repeat} + 0.048326502732244 \text{ Time} \times \text{Repeat} - 1.8902298850575 \text{ Dose}^2 - 0.091566676202769 \text{ Time}^2 - 0.37356321839076 \text{ Repeat}^2$$

بهینه‌سازی شرایط کاهش درصد شدت بیماری‌زایی

فرآیند بهینه‌سازی نشان داد که برای هر یک از سموم پارس‌باسیل، تریکومیکس HV و کاربندازیم در هر جدایه شرایط خاصی از نظر دز مصرف و زمان سمپاشی وجود دارد که منجر به کمترین میزان شدت بیماری‌زایی می‌شود (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).



شکل ۱۰- بهینه‌سازی شرایط استفاده از سموم (الف) پارس باسیل (ب) تریکومیکس HV و (ج) کاربندازیم در صورت

آلودگی به جدایه B در روزهای آزمایش و با شرایط مشخص برای به‌دست آوردن کمترین درصد بیماری‌زایی

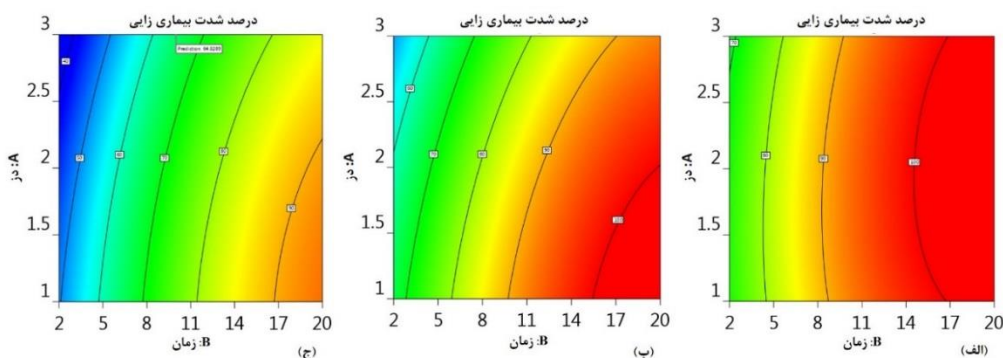
Fig. 10. Optimization of fungicide application conditions: (a) Pars Basil, (b) Trichomix HV, and (c) Carbendazim, under infection with isolate B during the experimental days, with specified conditions to achieve the lowest disease severity percentage

بر اساس جدول ۲، کاربندازیم در جدایه C با دز ۳ در هزار و سه بار کاربرد در ماه بهترین کارایی را در کاهش شدت بیماری نشان داد. در مقابل، قارچ‌کش‌های زیستی در دزهای پایین‌تر (۲ در هزار) و دو نوبت کاربرد به نتایج مطلوبی دست یافتند. این الگو بیانگر آن است که در کنترل بیماری‌های ناشی از *R. solani*، کاربندازیم بیشتر برای شرایط بحرانی پس از آلودگی و قارچ‌کش‌های زیستی برای کاربرد پیشگیرانه پیش از آلودگی مناسب هستند.

بحث

کاهو (*Lactuca sativa* L.) یکی از پرمصرف‌ترین سبزیجات خام در رژیم غذایی انسان است که از ارزش تغذیه‌ای بالایی برخوردار بوده و به دلیل ترکیبات زیست‌فعال خود، نقش مهمی در ارتقاء سلامت عمومی ایفا می‌کند. با این حال، این گیاه نسبت به برخی بیمارگرهای خاکزاد به شدت آسیب‌پذیر است. قارچ *R. solani* Kühn یکی از مهم‌ترین عوامل بیماری‌زای خاکزاد در سراسر جهان محسوب می‌شود که دامنه میزبانی گسترده‌ای دارد و باعث بیماری‌های مخربی در

محصولات زراعی مهم، از جمله کاهو می شود. خسارات ناشی از این بیمارگر در مناطق مختلف ایران از جمله ورامین، به ویژه از طریق ایجاد بیماری پوسیدگی طوقه، به طور مستقیم عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می دهد. پیچیدگی زیستی و فیزیولوژیکی این قارچ موجب شده کنترل آن با چالش های متعددی همراه باشد، به طوری که استفاده طولانی مدت از قارچ کش های شیمیایی نه تنها به کاهش اثربخشی آنها منجر شده بلکه خطرات زیست محیطی و مقاومت قارچ را نیز افزایش داده است (Cook and Baker, 1983).



شکل ۱۱- بهینه سازی شرایط استفاده از سموم (الف) پارس باسیل (ب) تریکومیکس HV و (ج) کاربندازیم در صورت آلودگی به جدایه C در روزهای آزمایش و با شرایط مشخص برای به دست آوردن کمترین درصد بیماری زایی

Fig. 11. Optimization of fungicide application conditions: (a) Pars Basil, (b) Trichomix HV, and (c) Carbendazim, under infection with isolate C during the experimental days, with specified conditions to achieve the lowest disease severity percentage

جدول ۲- شرایط بهینه پیش بینی شده برای کاربرد قارچ کش ها و حداقل شدت بیماری زایی در هر جدایه قارچ *R. solani*

Table 2. Predicted optimal fungicide application conditions and minimum disease severity for each *R. solani* isolate

حداقل شدت بیماری پیش بینی شده (%) Predicted minimum disease (%) severity	زمان بهینه سمپاشی (روز پس از مایه زنی) Optimal application timing (days after inoculation)	تعداد دفعات کاربرد (در ماه) Application frequency (per month)	دوز بهینه (در هزار) Optimal dose (‰)	جدایه قارچ Fungal isolate	نوع قارچ کش Fungicide type
12.5	20	3	3	C	کاربندازیم
25.8	20	3	3	B	Carbendazim
28.4	16	2	2	C	تریکومیکس
30.1	16	2	2	B	Trichomix HV
29.6	15	2	2	C	پارس باسیل
31.0	15	2	2	B	Pars Basil

در این پژوهش، اثربخشی سه تیمار شامل قارچ کش شیمیایی کاربندازیم و دو محصول بیولوژیک پارس باسیل (حاوی *Bacillus velezensis*) و تریکومیکس HV (حاوی *Trichoderma harzianum*) بر کنترل بیماری ناشی از جدایه های B و C قارچ *R. solani* مورد بررسی قرار گرفت. یافته ها نشان داد که شدت بیماری زایی بین دو جدایه متفاوت بوده و پاسخ آن ها به تیمارها نیز به طور معنی داری متفاوت بود. جدایه B نسبت به همه تیمارها مقاومت بالاتری از خود نشان داد که این امر بیانگر اهمیت شناسایی دقیق جدایه ها پیش از انتخاب روش کنترل است. در حالی که جدایه C نسبت به قارچ کش سیستمیک کاربندازیم حساس تر بود و کاهش محسوسی در شدت بیماری در پاسخ به این تیمار مشاهده گردید و اثربخشی تیمارهای بیولوژیک عمدتاً به توان پیشگیرانه آن ها محدود شد.

کاربندازیم به‌عنوان یک قارچ‌کش سیستمیک با توانایی نفوذ به بافت گیاهی، اثرگذاری قابل‌توجهی در کنترل بیماری‌گره‌هایی دارد که وارد اندام‌های داخلی گیاه شده‌اند. در مقابل، تیمارهای بیولوژیک پارس‌باسیل و تریکومیکس HV دارای مکانیسم‌هایی چون تولید متابولیت‌های ضدقارچ مانند ایتورین A و فنگیسین توسط *B. velezensis* و مایکروپارازیتیسم در *T. harzianum* هستند که اثر حفاظتی قوی در سطح ریشه ایجاد می‌کنند (Roca-Couso et al., 2021; Hu et al., 2024; Yousfi et al., 2024). مطالعات نشان داده‌اند که محصولات زیستی مبتنی بر *Bacillus* spp. و *Trichoderma* spp. از طریق القای مقاومت سیستمیک در گیاه (ISR) و نیز بهبود جذب عناصر غذایی موجب افزایش مقاومت عمومی گیاه می‌شوند (Shafi et al., 2017; Vinale et al., 2008).

در پژوهش حاضر، مشاهده شد که قارچ‌کش‌های بیولوژیک در صورت نفوذ بیمارگر به داخل بافت‌های گیاه، قدرت مهارکنندگی کمتری دارند. بر این اساس، استفاده پیش‌کشت از این ترکیبات به‌عنوان راهبردی پیشگیرانه توصیه می‌شود تا از نفوذ اولیه قارچ جلوگیری گردد. از سوی دیگر، قارچ‌کش کاربندازیم نه تنها در مراحل اولیه بلکه در دوره‌های بعدی رشد نیز توانست شدت بیماری را کاهش دهد، به‌ویژه در جدایه C که نسبت به آن حساس‌تر بود. در مقابل، در جدایه B، حتی با افزایش دز کاربندازیم نیز کاهش معنی‌دار بیماری مشاهده نشد که این مسئله نشان‌دهنده مقاومت ذاتی بیشتر این جدایه و ضرورت به‌کارگیری روش‌های کنترل تلفیقی در مواجهه با آن است.

نتایج همچنین نشان داد که تیمار با تریکومیکس HV پس از مدتی موجب بهبود رشد و احیای نسبی گیاهان آسیب‌دیده شد، حال آن‌که این اثر در سایر تیمارها به چشم نمی‌خورد. این یافته با مطالعات پیشین در خصوص نقش تقویتی *Trichoderma* در رشد گیاهان از طریق تولید هورمون‌های رشد هم‌راستا است (Harman et al., 2004). از سوی دیگر، مشاهدات حاکی از آن بود که کاربندازیم علاوه بر مدیریت بیماری، احتمالاً با تحریک برخی مسیرهای دفاعی گیاه، مانع از پیشرفت بیماری گردید. بنابراین به نظر می‌رسد که تأثیر مثبت این قارچ‌کش فراتر از نقش ضدقارچی مستقیم آن است و می‌تواند از طریق ساز و کارهای ناشناخته، چرخه بیماری را مختل نماید.

در نتیجه، با توجه به تأثیر حفاظتی پارس‌باسیل و تریکومیکس HV، استفاده از این تیمارها در مرحله آماده‌سازی خاک و پیش از کشت به‌عنوان اقدامی مؤثر برای پیشگیری توصیه می‌شود. همچنین برای کنترل مؤثرتر بیماری، تقویت گیاه با استفاده از کودهای حاوی عناصر اصلی و ریزمغذی مانند پتاسیم و روی که در ارتقاء مقاومت سلولی نقش دارند، می‌تواند در قالب یک برنامه مدیریت یکپارچه بیماری گنجانده شود. علاوه بر این، با توجه به تفاوت پاسخ جدایه‌ها به تیمارهای مختلف، شناسایی سریع جدایه‌های بیمارگر از طریق روش‌های مولکولی به جای شناسایی‌های مورفولوژیک پیشنهاد می‌شود تا امکان اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مناسب در کوتاه‌ترین زمان فراهم گردد (Ongena et al., 2024; Xu et al., 2021).

یافته‌های این مطالعه از نظر الگوی پاسخ قارچ‌کش‌ها تا حد زیادی با گزارش‌های پیشین همخوانی دارد. به‌عنوان مثال، کاهش قابل توجه شدت بیماری در پاسخ به کاربندازیم مشابه نتایج (Jacobsen et al., 2004) و (Panth et al., 2020) است که هر دو بر اثربخشی بالای این ترکیب در کنترل *R. solani* تأکید کرده‌اند. با این حال، تفاوت مشاهده‌شده بین جدایه‌های B و C در حساسیت به کاربندازیم می‌تواند ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی در مکانیسم‌های مقاومت قارچ باشد که پیش‌تر (Ajayi, 2016) نیز به آن اشاره کرده‌اند. از سوی دیگر، کارایی محدود تیمارهای زیستی در شرایط آلودگی شدید در این پژوهش، با یافته‌های (Hu et al., 2024) و (Yousfi et al., 2024) هم‌راستا است که نشان داده‌اند فرآورده‌های زیستی عمدتاً نقش پیشگیرانه (preventive) دارند و در مهار عفونت‌های پیشرفته تأثیر کمتری دارند. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نتایج حاضر نه تنها تأییدکننده روندهای شناخته شده در کنترل *R. solani* است، بلکه با بهره‌گیری از مدل‌سازی کمی، چارچوبی دقیق‌تر برای تحلیل تعاملی میان نوع قارچ‌کش، جدایه و شرایط کاربرد ارائه می‌دهد.

افزون بر مقایسه اثربخشی تیمارها، یکی از دستاوردهای کلیدی این پژوهش، توسعه و اعتبارسنجی مدل آماری مبتنی بر روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology, RSM) بود. این مدل توانست اثرات اصلی و متقابل نوع

قارچ کش، دز، تعداد دفعات کاربرد و نوع جدایه قارچ را به طور کمی تحلیل کرده و شدت بیماری زایی را با دقت بالا پیش بینی کند. خروجی مدل ($R^2=0.73$) نشان داد که تغییرات جزئی در دز و زمان مصرف می تواند تأثیر قابل توجهی بر کارایی کنترل بیماری داشته باشد. همچنین، فرایند بهینه سازی مدل نشان داد که دز ۳ در هزار و سه نوبت کاربرد در ماه برای قارچ کش کاربندازیم و دز ۲ در هزار و دو نوبت کاربرد برای قارچ کش های زیستی، بهترین شرایط کاهش شدت بیماری را فراهم می کنند. این یافته ها نشان می دهد که استفاده از مدل های آماری چند متغیره می تواند ابزاری قدرتمند برای تصمیم گیری علمی و بهینه سازی مصرف نهاده ها در مدیریت پایدار بیماری های خاکزاد باشد. این پژوهش فراتر از مقایسه ساده تیمارها، چارچوبی تحلیلی فراهم می آورد که قابلیت استفاده در طراحی راهبردهای مدیریتی دقیق تر و کاهش مصرف سموم را دارد. بنابراین، یافته های این تحقیق می تواند به عنوان مبنایی برای توسعه ابزارهای تصمیم یار در مدیریت تلفیقی بیماری های خاکزاد مورد استفاده قرار گیرد.

به طور کلی می توان نتیجه گرفت که موفقیت در کنترل بیماری های خاکزاد ناشی از *Rhizoctonia solani* نه تنها به نوع قارچ کش مورد استفاده بلکه به نوع جدایه، زمان مصرف، شرایط خاک و وضعیت فیزیولوژیک گیاه نیز وابسته است. بنابراین، انتخاب راهبردی چند جانبه با استفاده از عوامل بیولوژیک، ترکیبات شیمیایی با اثر سیستمیک، تقویت گیاه و شناسایی سریع عامل بیماری را می تواند رویکردی پایدار، کارآمد و سازگار با محیط زیست برای مدیریت بیماری پوسیدگی طوقه در کاهو، فراهم آورد.

References

منابع

- Ajayi, O.O. 2016. Genetic diversity and fungicide sensitivity of *Rhizoctonia solani* associated with soybean seedling disease, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ajayi-Oyetunde, O.O. and Bradley, C.A. 2018. *Rhizoctonia solani*: taxonomy, population biology and management of rhizoctonia seedling disease of soybean. Plant pathology 67(1): 3-17. <https://doi.org/10.1111/ppa.12733>.
- Aktar, M.W., Sengupta, D. and Chowdhury, A. 2009. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. Interdisciplinary Toxicology 2(1): 1-12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>.
- Beaumelle, L., Tison, L., Eisenhauer, N., Hines, J., Malladi, S., Pelosi, C., Thouvenot, L. and Phillips, H.R., 2023. Pesticide effects on soil fauna communities-A meta-analysis. Journal of Applied Ecology 60(7): 1239-1253. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14437>.
- Cook, R.J. and Baker, K.F. 1983. The Nature and Practice of Biological Control of Plant Pathogens. American Phytopathological Society (APS Press), 539p.
- Fisher, M.C., Hawkins, N.J., Sanglard, D. and Gurr, S.J. 2018. Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security. Science 360 (6390): 739-742. <https://doi.org/10.1126/science.aap7999>.
- Glosier, B.R., Ogundiwin, E.A., Sidhu, G.S., Sischo, D.R. and Prince, J.P. 2008. A differential series of pepper (*Capsicum annum*) lines delineates fourteen physiological races of *Phytophthora capsici*: Physiological races of *P. capsici* in pepper. Euphytica 162: 23-30. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9532-1>.
- Harman, G.E., Howell, C.R., Viterbo, A., Chet, I. and Lorito, M. 2004. *Trichoderma* species-opportunistic, avirulent plant symbionts. Nature Reviews Microbiology 2(1): 43-56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>.
- Hu, X., Li, M., Yu, Y. and Wang, Z. 2024. Applications of *Bacillus velezensis* in sustainable agriculture: A review of mechanisms and field performance. Biological Control, 191, 105301. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105301>.
- Indu, Baghel, A.S., Bhardwaj, A. and Ibrahim, W. 2022. Optimization of pesticides spray on crops in agriculture using machine learning. Computational Intelligence and Neuroscience 2022(1): 9408535. <https://doi.org/10.1155/2022/9408535>.
- Jacobsen, B., Kephart, K., Zidack, N., Johnston, M. and Ansley, J. 2004. Effect of fungicide and fungicide application timing on reducing yield loss to *Rhizoctonia* crown and root rot. Sugarbeet Research and Extension Reports 35: 224-226.
- Madden, L.V., Hughes, G. and Van den Bosch, F. 2007. The Study of Plant Disease Epidemics. APS Press. <https://doi.org/10.1094/9780890545058>.
- Muzela, J.K.K. 2008. Evaluation of three fungicides for control of soilborne diseases of lettuce seedlings. University of Pretoria, South Africa, 65p.

- Ongena, M., Jourdan, E. and Kieu, N.P. 2024.** Bacterial biocontrol agents: The multifaceted action of *Bacillus* spp. and their application in plant protection. *Trends in Plant Science* 29(2): 117-132. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.01.005>.
- Panth, M., Hassler, S.C. and Baysal-Gurel, F. 2020.** Methods for management of soilborne diseases in crop production. *Agriculture* 10(1): 16. <https://doi.org/10.3390/agriculture10010016>.
- Parmeter, J. R. 2023.** *Rhizoctonia solani*: biology and pathology. University of California Press, 272p.
- Raid, R.N. 2004.** Lettuce diseases and their management. Pp. 121-147. In: Naqvi, S.A.M.H. (eds.). *Diseases of Fruits and Vegetables: Volume II: Diagnosis and Management*. Dordrecht: Springer, Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-2607-2_5.
- Rebollar-Alviter, A. and Nita, M. 2011.** Optimizing fungicide applications for plant disease management: Case studies on strawberry and grape. INTECH Open Access Publisher.
- Roca-Couso, R., Gutiérrez, S., Casquero, P. A. and Ríos-Momberg, M. 2021.** Emerging *Trichoderma* species for biocontrol: Biological features, mechanisms, and applications. *Fungal Biology Reviews* 35(2): 62-78. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.01.003>.
- Shafi, J., Tian, H. and Ji, M. 2017.** *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: A review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 31(3): 446-459. <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950>.
- Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L. and Lorito, M. 2008.** *Trichoderma*-plant-pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry* 40(1): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.07.002>.
- Xu, Y., Gao, Y., Huang, H., Wang, J. and Zhang, L. 2021.** Rapid identification and classification of plant pathogenic fungi using molecular and genomic tools. *Frontiers in Microbiology* 12: 671602. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.671602>.
- Yousfi, M., Sellami, S. and Djebaili, R. 2024.** The emerging role of *Trichoderma harzianum* in sustainable agriculture: Advances in biofungicide development. *Journal of Applied Microbiology* 136(4): 845-857. <https://doi.org/10.1111/jam.15837>.

Modeling and Optimization of Fungicide Application Conditions for Controlling Disease Severity Caused by *Rhizoctonia solani* in Lettuce

M. Eshaghi^{1*}, S. Seddigh² and M. Maleki³

Received: 14 Jun., 2025

Accepted: 2 Sep., 2025

ABSTRACT

Rhizoctonia solani Kühn is recognized as one of the most destructive soil-borne pathogens, responsible for causing collar and root rot in numerous economically important crops, including lettuce (*Lactuca sativa* L.). Due to its broad host range and remarkable persistence in soil ecosystems, effective management of this pathogen remains a significant challenge for sustainable agriculture. In the present study, the Response Surface Methodology (RSM) integrated with a Central Composite Design (CCD) was employed to model and optimize the pathogenicity intensity of *R. solani* on lettuce. The primary objective was to identify the optimal conditions for applying three fungicidal treatments- a chemical fungicide (carbendazim) and two biological formulations (Pars Basil containing *Bacillus velezensis* and Trichomix HV containing *Trichoderma harzianum*- against two distinct isolates (B and C) of *R. solani* under open-field conditions in Varamin, Iran. Significant differences in pathogenicity intensity were observed between the isolates. Isolate B exhibited higher resistance to the applied treatments, whereas isolate C showed a markedly greater sensitivity to carbendazim. The use of biological fungicides provided substantial protective effects, particularly during the early growth stages of the crop. Furthermore, the statistical modeling demonstrated a strong goodness-of-fit, indicating the model's high predictive accuracy in estimating disease severity. Optimization results revealed that the maximum efficacy of carbendazim was achieved at a concentration of 3‰ (3 gL⁻¹) with three applications per month. In contrast, the biological fungicides showed optimal preventive performance at a concentration of 2‰ (2 gL⁻¹) with two applications. Collectively, these findings highlight that the selection of fungicide type, application timing, and treatment frequency plays a pivotal role in the sustainable management of lettuce collar rot disease caused by *R. solani*. This study underscores the potential of integrating chemical and biological control strategies within predictive optimization frameworks to enhance disease suppression while minimizing environmental impact.

Key words: *Rhizoctonia solani*, lettuce, biological fungicide, carbendazim, soil-borne disease control

1 and 3. PhD. Student and Associated Professor, respectively, Department of Plant Pathology, VaP.C., Islamic Azad University, Varamin, Iran

2. Associated Professor, Department of Plant Pathology, VaP.C., Islamic Azad University, Varamin, Iran

Corresponding author: samin.seddigh@iau.ac.ir