

عوامل بیماری زای قارچی

پس از برداشت هلو و راهکارهای مدیریت آنها



■ مانی جباری؛ دانشجوی کارشناسی گیاهپزشکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم شهر

mani.jabbari.mp@gmail.com

■ میترا جباری؛ دانشجوی کارشناس ارشد، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده تولید گیاهی،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

دریافت: ۵ مردادماه ۱۴۰۵ ■ بازنگری: ۱۵ مردادماه ۱۴۰۵ ■ پذیرش: ۲۰ مردادماه ۱۴۰۵ ■ انتشار آنلاین: ۲۰ مردادماه ۱۴۰۵

doi.org/10.22059/giahpzshsj.2026.410140.1047



بیماری‌های قارچی پس از برداشت، یکی از چالش‌های بنیادین در زنجیره تأمین، ذخیره‌سازی و قابلیت بازاریابی میوه هلو (*Prunus persica*) محسوب می‌شوند. حضور بیمارگرهای اثرگذاری نظیر *Monilinia* spp., *Penicillium expansum*, *Rhizopus stolonifera* و *Botrytis cinerea* منجر به خسارات اقتصادی گسترده در سطح جهانی می‌گردد. اگرچه مدیریت سنتی این بیماری‌ها عمدتاً بر پایه استفاده از قارچ‌کش‌های شیمیایی استوار است، اما ظهور مقاومت بیمارگرها، ملاحظات سلامت عمومی و محدودیت‌های مقرراتی، کارایی این روش‌ها را با چالش جدی مواجه کرده است. نوشتار حاضر به بررسی و ارزیابی رویکردهای نوین کنترل شامل متدهای شیمیایی، فیزیکی و زیستی می‌پردازد و به‌طور ویژه بر کاربرد اسانس‌های گیاهی، آنتاگونیست‌های میکروبی، القای مقاومت سیستمیک و ضد عفونی‌کننده‌های سازگار با محیط زیست تمرکز دارد. یافته‌ها نشان می‌دهند که مدیریت تلفیقی، مستعدترین مسیر برای دستیابی به پایداری است. در نهایت، تأکید بر درک دقیق مکانیسم‌های آلودگی و شرایط محیطی حاکم بر اپیدمیولوژی هر بیمارگر، زیربنای طراحی استراتژی‌های کنترل کارآمد و متناسب با پویایی بیماری است.

کلمات کلیدی: اسانس‌های گیاهی، مدیریت پس از برداشت، عوامل بیماری‌زا، مهار زیستی، مدیریت پایداری.

میوه هلو (*Prunus persica*) به دلیل برخورداری از ارزش غذایی بالا و تراکم قابل توجه ترکیبات زیست فعال نظیر فلاونوئیدها، ویتامین C و اسیدهای فنولیک (از جمله اسید کلروژنیک، اسید تئوکلروژنیک و اسید پروتوکاتکونیک)، از جایگاه ویژه‌ای در سبد غذایی برخوردار است (Liu et al, ۲۰۱۵; Zhao et al, ۲۰۱۵). با این حال، ماهیت به شدت فسادپذیر این محصول، آن را در برابر پوسیدگی‌های پس از برداشت که عمدتاً منشأ قارچی دارند، آسیب‌پذیر می‌سازد. فراهم بودن شرایط محیطی مساعد، از جمله دمای گرم و رطوبت بالا در مراحل برداشت و توزیع، بستر مناسبی را برای رشد و توسعه قارچ‌های

بیمارگر نظیر *Monilinia* spp., *Botrytis cinerea* فراهم می‌آورد. این عوامل بیماری‌زا، اغلب از طریق منافذ طبیعی (عدسک‌ها) یا آسیب مکانیکی به بافت میوه نفوذ کرده و با ترشح آنزیم‌های تجزیه‌کننده و تولید مایکوتوکسین‌ها، منجر به افت شدید کیفیت و کاهش عمر انبارداری محصول می‌شوند (Zhang et al, ۲۰۱۹).

اگرچه کنترل سنتی این بیماری‌ها متکی بر قارچ‌کش‌های شیمیایی نظیر فلوئودیوکسونیل، سپرودینیل، پیریمتانیل و ایمازالیل است، اما چالش‌هایی نظیر ظهور سویه‌های مقاوم، نگرانی‌های جدی پیرامون سلامت عمومی و

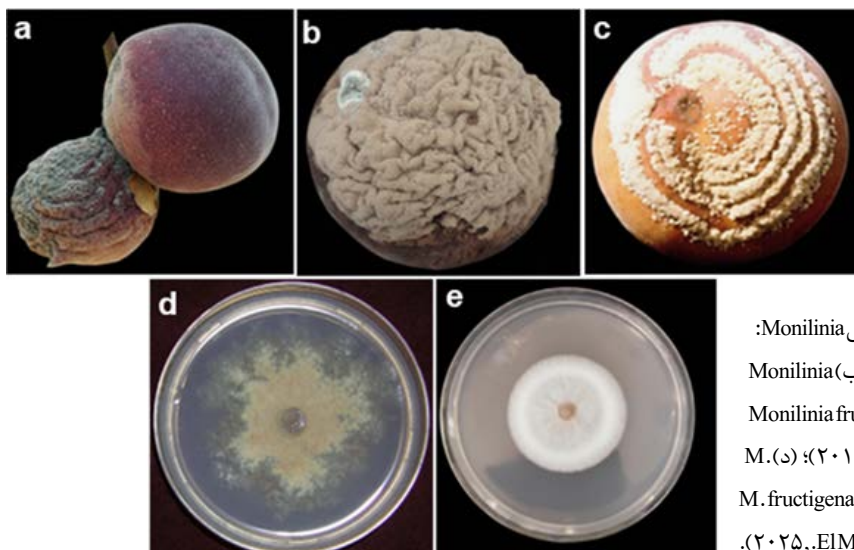
مخاطرات زیست محیطی، لزوم گذار به رویکردهای جایگزین را بیش از پیش نمایان کرده است (Li et al., ۲۰۱۸). در همین راستا، توسعه شیوه های نوین مدیریت پس از برداشت باهدف کاهش ورودی های شیمیایی، به یک اولویت راهبردی در باغبانی مدرن تبدیل شده است. این رویکردها شامل به کارگیری تیمارهای فیزیکی (مانند تابش اشعه فرابنفش و تیمارهای حرارتی)، کنترل زیستی (استفاده از آنتاگونیست های میکروبی نظیر مخمرها و باکتری ها) و بهره گیری از ترکیبات طبیعی (اسانس ها و عصاره های گیاهی) است. افزون بر این، فشارهای نظارتی جهت کاهش مصرف آفت کش ها و تغییر الگوی تقاضای مصرف کنندگان به سوی محصولات سالم و فاقد باقی مانده های شیمیایی، تولیدکنندگان و محققان را به سمت استقرار سیستم های مدیریت یکپارچه پس از برداشت سوق داده است (Schebesta et al., ۲۰۲۰).

پوسیدگی قهوه ای (Brown Rot)

از میان ۳۵ گونه شناخته شده از جنس *Monilinia*، سه گونه ای *Monilinia laxa*، *M. fructicola* و *M. fructigena* اصلی ترین عوامل ایجاد پوسیدگی قهوه ای در هلو محسوب می شوند (Lesik, ۲۰۱۳). این بیمارگرها با کلونیزه کردن گل ها، شاخه ها و میوه ها، طیف گسترده ای از محصولات هسته دار و دانه دار را تحت تأثیر قرار می دهند. از نظر مورفولوژیکی، تمایز میان این گونه ها به دلیل شباهت های ژنتیکی بالا دشوار است، اما

ویژگی های ظاهری کنیدی ها، می تواند به عنوان شاخصی برای تفکیک آن ها به کار رود: *M. laxa* دسته های کوچک خاکستری-سبز (با ابعاد کمتر از ۵/۰ میلی متر) تولید می کند، در حالی که *M. fructicola* دسته های قهوه ای با لکه های تیره (در حدود ۱ میلی متر) و *M. fructigena* پدهای کنیدی زردرنگ و متحدالمرکز (با ابعاد حدود ۵/۱ میلی متر) را از خود نشان می دهند (شکل ۱). پوسیدگی قهوه ای خسارات اقتصادی بسیار سنگینی به صنعت میوه وارد می کند؛ به طوری که در کشورهای نظیر ترکیه، برزیل، اسپانیا و ایتالیا، بیش از ۵۰ درصد از تلفات پس از برداشت هلو ناشی از آلودگی گونه های *Monilinia* است (De Cal et al., ۲۰۰۹; Obi et al., ۲۰۱۸). چرخه زیستی این بیمارگرها شامل مرحله زمستان گذرانی بر روی میوه های مومیایی شده و شانکرهای شاخه است که در فصل بهار منجر به تولید آپوتسیوم ها می گردد (شکل ۲). متعاقب آن، هاگ ها آزاد شده و با آلوده کردن شکوفه ها، چرخه های ثانویه بیماری را آغاز می کنند (Villarino et al., ۲۰۱۰).

توسعه و گسترش اپیدمیولوژی این بیماری به شدت تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی، به ویژه رطوبت بالا و دمای گرم قرار دارد (Casals et al., ۲۰۱۰). مطالعات نشان می دهند که نرخ جوانه زنی کنیدی ها در شرایط دمایی ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی ۹۹٪ بسیار بالا است؛ به گونه ای که *M. fructicola* و *M. fructigena* در کمتر از ۲ ساعت و *M. laxa* طی حدود ۴ ساعت نسبت به جوانه زنی اقدام می کنند (Bernat et al., ۲۰۱۷). از نظر اکولوژی

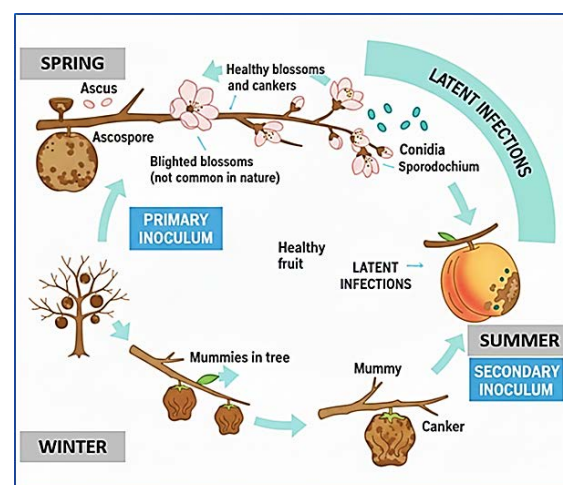


شکل ۱- تصاویر ماکروسکوپی گونه‌های Monilinia:
 (الف) *Monilinia laxa* روی میوه هلو (ب) *Monilinia*
fructicola روی میوه هلو (ج) *Monilinia fructigena*
 روی میوه هلو، (Oliveira Lino et al., ۲۰۱۶); (د) *M.*
fructigena روی محیط کشت PDA (ه) *M.*
fructigena روی محیط کشت PDA. (El Maazouzi et al., ۲۰۲۵).

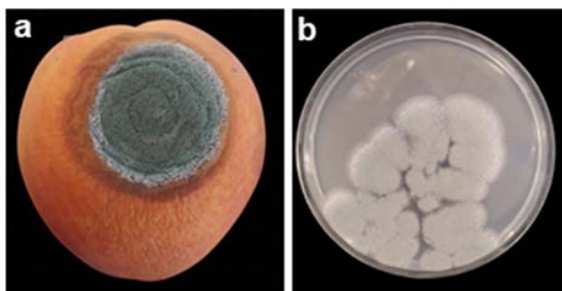
پوسیدگی آبی (Blue Rot) و اهمیت پاتولوژیک *Penicillium expansum*

قارچ *Penicillium expansum* (عضوی از خانواده *Talaromyces*)، به‌عنوان عامل اصلی پوسیدگی آبی (Blue Rot) در هلو و طیف وسیعی از محصولات میوه‌ای، یکی از چالش‌های عمده در صنایع بسته‌بندی و فرآوری محسوب می‌شود (Luciano-Rosario et al., ۲۰۲۰). این بیمارگر به دلیل توانایی سازگاری با دماهای پایین و سنتز متابولیت‌های ثانویه سمی، تهدیدی جدی برای کیفیت و ایمنی محصولات است. فرآیند آلودگی عمدتاً از طریق زخم‌ها یا منافذ طبیعی نظیر عدسک‌ها و محل اتصال کاسبرگ صورت می‌گیرد (Prusky and Lichter, ۲۰۰۷). علائم بالینی در مراحل اولیه شامل ایجاد ضایعات نرم و آبکی است که در ادامه با ظهور تارهای میسلیم سفید و متعاقباً توده‌های کنیدی آبی-سبز متمایز می‌شود (شکل ۳). با پیشرفت کلونیزاسیون، بافت میوه دچار نکروز و لهیدگی شده و با ترشح اسیدهای آلی (به‌ویژه

دمایی، گونه *M. laxa* در دماهای پایین (نزدیک به صفر درجه سانتی‌گراد) عملکرد بهتری دارد، در حالی که *M. fructicola* در محدوده دمایی ۳۰ تا ۳۳ درجه سانتی‌گراد رشد بهتری نشان می‌دهد. نکته متمایزکننده این است که برخلاف *M. laxa*، گونه *M. fructicola* توانایی اسپورزایی در دمای ۳۳ درجه سانتی‌گراد را داراست. علاوه بر این، مدیریت باغ شامل حذف میوه‌های مومیایی شده و هرس صحیح شاخه‌ها، نقش حیاتی در کاهش بار کنیدی در محیط و جلوگیری از شیوع شدید بیماری ایفا می‌کند (Bellamy et al., ۲۰۲۴).



شکل ۲- چرخه زندگی گونه‌های *Monilinia* (Obi et al., ۲۰۱۸)



شکل ۳. تصاویر ماکروسکوپی از قارچ *Penicillium expansum*: (الف) قارچ *Penicillium expansum* روی میوه هلو (ب) تصویر ماکروسکوپی از قارچ *Penicillium expansum* روی محیط کشت PDA (El Maazouzi et al., ۲۰۲۵).

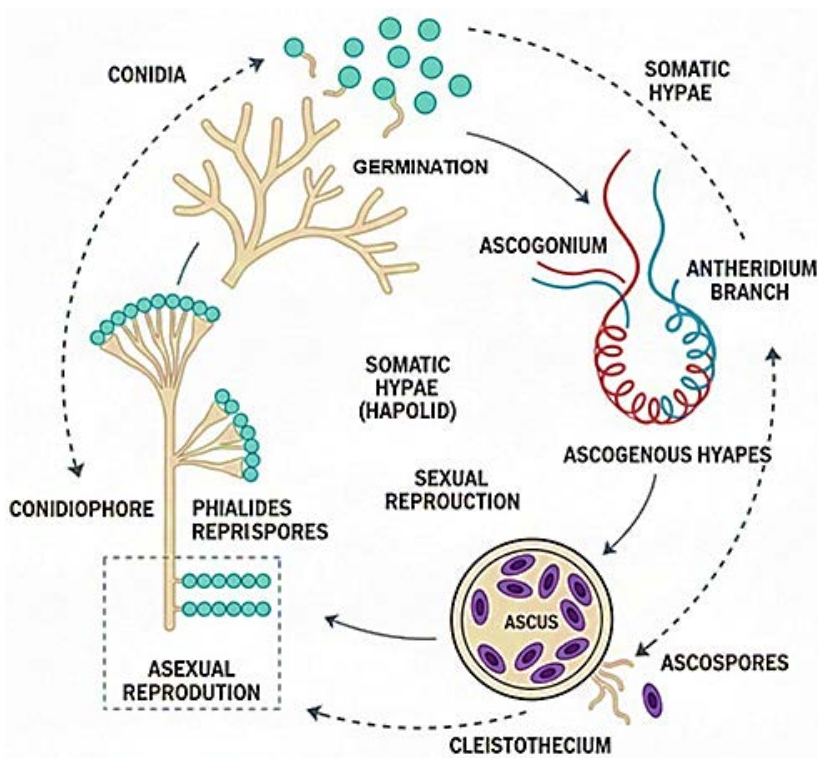
اسید گلوکونیک و اسید سیتریک)، محیط داخلی بافت میزبان به شدت اسیدی می‌گردد که این تغییر pH، فرایند تجزیه آنزیمی را تسهیل می‌کند (Wang et al., ۲۰۱۵).

چرخه تولید مثل و اکولوژی رشد

P. expansum دارای استراتژی‌های تولید مثلی متنوعی شامل روش‌های رویشی، غیر جنسی و جنسی است. در تولید مثل رویشی، هیف‌ها با قطعه‌قطعه شدن به میسلیم‌های مستقل تبدیل می‌شوند (Errampalli, ۲۰۱۴). در مسیر غیر جنسی، کنیدی‌ها بر روی کنیدیوفورها تشکیل شده و توسط جریان باد منتشر می‌شوند؛ در حالی که در مسیر جنسی، با تلاقی ارگان‌های جنسی (آسکوگونیم و آنترییدیوم) و طی مراحل میوز و میتوز، آسکوسپورهایی تولید

می‌شوند که منشأ تشکیل میسلیم‌های جدید هستند (El Maazouzi et al., ۲۰۲۵).

(شکل ۴). تحقیقات نشان می‌دهند که اگرچه محدوده دمایی رشد بهینه برای این قارچ ۱۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است، اما رشد آن در دامنه دمایی ۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد نیز



شکل ۴- چرخه زندگی گونه‌های *Penicillium* (Razzaq, ۲۰۲۵).

یکی از وجوه نگران کننده *P. expansum*، توانایی آن در سنتز متابولیت‌های ثانویه سمی (مایکوتوکسین‌ها) از جمله پاتولین، سیتترینین، چاتوگلوبوزین‌ها، سیتوکالازین‌ها و آندراستین‌ها است (Tannous et al, ۲۰۱۸). در میان این ترکیبات، پاتولین که به‌وفور در محصولات خام و فرآوری شده (نظیر آب‌میوه‌ها) یافت می‌شود، دارای اثرات کبدی و ژنوتوکسیک است. با توجه به این مخاطرات، سازمان غذا و داروی ایالات متحده (FDA) حد مجاز پاتولین را در محصولات فرآوری شده برابر با $0.5 \mu\text{g/ml}$ تعیین کرده است (Saleh and Goktepe, ۲۰۱۹). همچنین، سم سیتترینین نیز به دلیل ایجاد هیپرتروفی کلیه و آسیب به اندامک‌های سلولی (نظیر میتوکندری و شبکه آندوپلاسمی) در مطالعات توکسیکولوژیک مورد توجه ویژه قرار دارد (Sun et al, ۲۰۲۰). با توجه به پتانسیل بیماری‌زایی و سم‌زایی *P. expansum*، اتخاذ رویکردهای جامع مدیریت پس از برداشت امری ضروری است. این استراتژی‌ها باید شامل تلفیقی از مدیریت صحیح عملیات جابجایی (جهت کاهش ضایعات فیزیکی)، کنترل دقیق زنجیره سرد و بهره‌گیری از راهکارهای نوین مهار زیستی یا شیمیایی باشد تا ضمن تضمین سلامت عمومی، زیان‌های اقتصادی ناشی از این پوسیدگی به حداقل برسد (El Maazouzi et al, ۲۰۲۵).

پوسیدگی نرم (Soft Rot) :

ناشی از *Rhizopus stolonifer* :

Rhizopus stolonifer، به‌عنوان یک قارچ رشته‌ای از رده زیگومیست‌ها (*Zygomycetes*)، راسته

Mucorales، خانواده *Mucoraceae* و جنس *Rhizopus*، عامل اصلی بیماری پوسیدگی نرم در هلو و طیف وسیعی از میوه‌های فسادپذیر است (شکل ۵). این بیمارگر یکی از مخرب‌ترین عوامل پس از برداشت محسوب می‌شود که به دلیل سرعت بالای کلونیزاسیون بافت میزبان، خسارات اقتصادی قابل توجهی را در مراحل انبارداری و زنجیره توزیع به همراه دارد (Zhou et al, ۲۰۱۸).

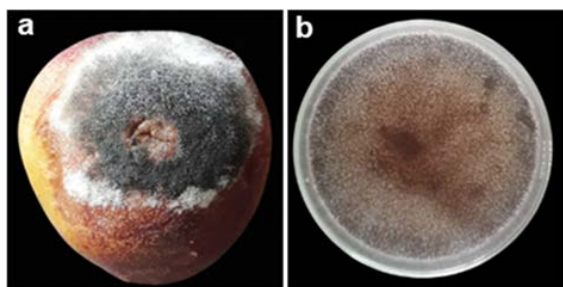
ویژگی‌های مورفولوژیک :

ساختار رویشی *R. stolonifer* شامل ریزوئیدها، اسپورانژیوفورها و اسپورانژیوسپورهای تمایز یافته است (Schipper, ۱۹۸۴). میسلیم‌های اولیه دارای ستون‌های مخروطی-استوانه‌ای خاکستری یا قهوه‌ای هستند که ارتفاع آن‌ها تا ۱۴۰ میکرومتر می‌رسد. در شرایط کشت، این قارچ ابتدا میسلیم‌های سفید و درهم‌تنیده‌ای را ایجاد می‌کند که متعاقباً به اسپورانژیوفورهای سیاه‌رنگ (با طول ۱ تا ۳ میلی‌متر و قطر ۲۰ تا ۲۵ میکرومتر) تبدیل می‌شوند. هر اسپورانژیوفور، یک اسپورانژیوم کروی (با قطر تقریبی ۲۵۰ میکرومتر) را حمل می‌کند که حاوی تعداد بی‌شماری اسپورانژیوسپور با ابعاد و اشکال متغیر (زویه‌دار، نیمه‌کروی یا بیضوی) است که سطحی دارای برآمدگی‌های مشخص دارند (Swingle, ۱۹۰۳).

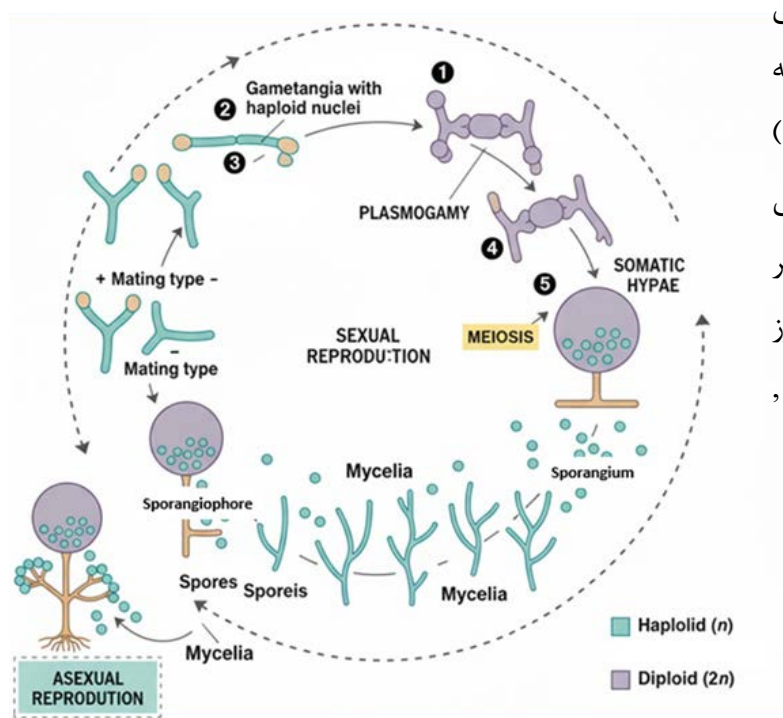
اپیدمیولوژی و پاتوژنز :

ورود *R. stolonifer* به بافت گیاهی عمدتاً از طریق آسیب فیزیکی، ساییدگی‌ها و زخم‌های سطحی

تجزیه کننده دیواره سلولی از جمله زایلاناز، فسفوگلوکوموتاز، سلولاز و آمیلاز، بافت میوه را در کمتر از ۲ تا ۳ روز متلاشی می کند (Al-Hindi et al, ۲۰۱۱). پس از نفوذ اولیه که با ظهور پوشش



شکل ۵- تصاویر ماکروسکوپی از قارچ *Rhizopus stolonifer*: الف: R. stolonifer روی میوه هلوب: R. stolonifer روی محیط کشت PDA (El Maazouzi et al, ۲۰۲۵).



شکل ۵- تصاویر ماکروسکوپی از قارچ *Rhizopus stolonifer*: الف: R. stolonifer روی میوه هلوب: R. stolonifer روی محیط کشت PDA (El Maazouzi et al, ۲۰۲۵).

صورت می پذیرد (Holmes and Stanghellini, ۲۰۰۲). تحقیقات نشان می دهد که آسیب های ناشی از کبودی و خراشیدگی، بیشترین حساسیت را نسبت به آلودگی ایجاد می کنند. علاوه بر این، آب های مورد استفاده در سیستم های شستشوی پس از برداشت، می توانند به منبع ثانویه تلقیح تبدیل شده و موجب گسترش آلودگی در زنجیره بسته بندی شوند (El Maazouzi et al, ۲۰۲۵). رشد بهینه این قارچ در دماهای ۲۳ تا ۲۸ درجه سانتی گراد رخ می دهد و نسبت به دماهای زیر ۱۰ درجه سانتی گراد حساسیت بالایی نشان

می دهد. همچنین، جوانه زنی اسپورانژیوسپورها در دماهای گسترده ای از pH (۳ تا ۱۰) امکان پذیر است. رشد میسلومی این بیمارگر به شدت تحت تأثیر منابع کربن و نیتروژن (مانند ساکارز و گلوتامین) قرار دارد (Amiri et al, ۲۰۱۱).

مکانیسم های تخریب بافت میزبان

پوسیدگی نرم با علائمی نظیر جذب بالای آب توسط بافت و تراوش شیرابه شفاف شناخته می شود. مطالعات نشان می دهند که میزان تولید شیرابه در میوه های آلوده، به مراتب بالاتر از نمونه های سالم است (Mena-Nevarez et al, ۲۰۱۲). این قارچ با ترشح مجموعه ای از آنزیم های

میسلیومی سفید و پنبه‌ای همراه است، سطح بافت با میسلیوم‌های خاکستری رنگ پوشیده شده و در نهایت، توده‌های سیاه رنگ اسپورانژیا ظاهر می‌گردند.

استراتژی‌های تولیدمثل

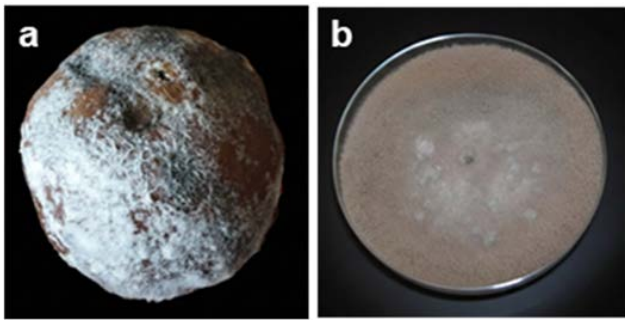
R. stolonifer با بهره‌گیری از هر دو مسیر تولیدمثل جنسی و غیر جنسی، توانمندی بالایی در سازگاری با شرایط متغیر محیطی دارد (شکل ۶). این انعطاف‌پذیری بیولوژیک، نقش بسزایی در بقای این قارچ در محیط‌های انبارداری و تداوم چرخه‌های آلودگی ایفا می‌کند.

R. stolonifer با بهره‌گیری از یک استراتژی تولیدمثلی دوگانه، توانمندی خود را در سازگاری با محیط‌های متغیر و تضمین بقا افزایش می‌دهد (Vazhacharikal et al., ۲۰۱۵). این فرآیند شامل دو مسیر مجزای تولیدمثل جنسی و غیر جنسی است که نقش‌های متفاوتی در تکثیر و تنوع ژنتیکی ایفا می‌کنند: چرخه تولیدمثل جنسی با تشکیل گامتانژی‌های هاپلوئید (n) آغاز می‌گردد. در مرحله نخست، با برخورد این ساختارها، فرآیند پلاسموگامی (Plasmogamy) یا ادغام سیتوپلاسمی رخ داده و منجر به تشکیل یک زیگوسپورانژیم جوان می‌شود. متعاقباً، مرحله کاریوگامی (Karyogamy) با اتحاد هسته‌های هاپلوئید در داخل این ساختار، منجر به تشکیل هسته دیپلوئید (2n) می‌گردد. در نهایت، پس از طی فرآیند میوز (Meiosis)، هاگ‌های هاپلوئیدی جدید تولید شده و در محیط منتشر می‌شوند. این مسیر تولیدمثل، منبع

اصلی ایجاد تنوع ژنتیکی در جمعیت‌های این قارچ محسوب می‌شود که به آن‌ها اجازه می‌دهد با تغییر شرایط محیطی مقابله کنند. در مقابل، تولیدمثل غیر جنسی به گونه‌ای انجام می‌پذیرد که نیازی به پیوند جنسی یا هم‌گامی هسته‌ای ندارد. در این مسیر، هاگ‌های غیر جنسی (مانند اسپورانژیوسپورها) به‌طور مستقیم و با سرعت بالا تولید شده و منتشر می‌گردند. این هاگ‌ها پس از پراکندگی در محیط، با جوانه‌زنی، میسلیوم‌های جدیدی را تشکیل می‌دهند که قادر به ادامه چرخه رشد و کلونیزاسیون سریع بافت میزبان هستند. ترکیب این دو مسیر، یک مزیت تکاملی برای R. stolonifer ایجاد می‌کند: در حالی که تولیدمثل غیر جنسی، گسترش سریع و تکثیر انبوه را در شرایط مطلوب محیطی تضمین می‌کند، تولیدمثل جنسی از طریق ایجاد تنوع ژنتیکی، پتانسیل بقای گونه را در مواجهه با تنش‌های محیطی و فشارهای انتخاب طبیعی فراهم می‌سازد (Vazhacharikal et al., ۲۰۱۵).

پوسیدگی خاکستری (Gray) : ناشی از Botrytis cinerea (Rot)

Botrytis cinerea، متعلق به رده Ascomycetes، یکی از گسترده‌ترین و مخرب‌ترین بیمارگرهای گیاهی در جهان محسوب می‌شود که هم در مراحل پیش از برداشت و هم در پس از برداشت، خسارات اقتصادی سنگینی را به محصولات کشاورزی وارد می‌کند. بر اساس اهمیت علمی و اقتصادی، این قارچ به‌عنوان دومین بیمارگر مهم جهانی رتبه‌بندی شده است



شکل ۷- تصاویر ماکروسکوپی از قارچ Botrytis cinerea الف: B. cinerea روی میوه هلوب: B. cinerea روی محیط کشت PDA (ElMaazouzi et al., ۲۰۲۵).

که خسارات آن در سطح بین‌المللی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود (Hua et al., ۲۰۱۸). برخلاف سایر گونه‌های جنس Botrytis، گونه B. cinerea به دلیل توانایی استثنایی در آلودگی طیف وسیعی

از میزبان‌ها (بیش از ۱۴۰۰ گونه گیاهی)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این بیمارگر به‌طور گسترده بر میوه‌های خانواده Rosaceae از جمله هلو، شلیل، سیب و توت‌فرنگی، چه در مراحل رسیدگی و چه در شرایط انبارداری، تأثیر می‌گذارد.

مورفولوژی و ویژگی‌های ساختاری

از نظر مورفولوژیک، B. cinerea دارای میسلیموم‌های شاخه‌دار با دیواره سلولی مشخص است که رنگ آن‌ها طیف شفاف تا قهوه‌ای را در بر می‌گیرد (شکل ۷). ساختارهای تولیدمثلی و بقای این قارچ عبارت‌اند از:

- کونیدیوفورها و کونیدیایاها: کونیدیوفورها که می‌توانند به‌صورت مستقیم از میسلیموم یا از ساختارهای اسکروت منشعب شوند، بلند، باریک و در بخش انتهایی به‌صورت نامنظم منشعب هستند. سلول‌های رأسی، این ساختارها پهن یا گرد شده و خوشه‌هایی از کونیدیایاها را بر روی دندان‌های کوتاه حمل می‌کنند. کونیدیایاها دارای سطحی صاف، شکلی بیضی‌شکل و رنگی از شفاف تا خاکستری هستند (Barnett and Hunter, ۱۹۹۸).

- اسکروت‌ها (Sclerotia): این ساختارها

توده‌های کروی حاصل از ادغام شاخه‌های میسلیمومی هستند که نقش کلیدی در بقای قارچ ایفا می‌کنند. لایه‌های ملانیزه و گلوکان‌های موجود در پوشش اسکروت، از قارچ در برابر تنش‌های محیطی نظیر خشکی، اشعه ماوراءبنفش (UV) و رقابت میکروبی محافظت می‌کند (Williamson et al., ۲۰۰۷). اسکروت‌ها در شرایط مساعد محیطی، از طریق تولید کونیدیوفورها یا طی فرآیند تولیدمثل جنسی (تشکیل آپوتسیوم) جوانه می‌زنند (Jarvis, ۱۹۷۷).

- ساختارهای بقا و تولیدمثل دیگر: علاوه بر اسکروت، کلامیدوسپورها به‌عنوان ساختارهای بقای کوتاه‌مدت در شرایط نامساعد نقش دارند. میکروکونیدیایان نیز ممکن است از لوله‌های زایا یا به‌صورت درون‌زا تولید شوند و در برخی شرایط، به‌عنوان اسپرماتیا (Spermatia) در فرآیند تولیدمثل جنسی عمل کنند. در چرخه جنسی، آسک‌ها (Ascus) حاوی هشت آسکوسپور هستند که به‌صورت خوشه‌ای از پایه کلاهک‌های آپوتسیال (Apothecial caps) خارج می‌شوند (Fukumori et al., ۲۰۰۴).



اپیدمیولوژی و عوامل مؤثر بر توسعه بیماری

توسعه و گسترش *B. cinerea* بر روی بافت میزبان به شدت تحت تأثیر در دسترس بودن مواد مغذی (مانند گلوکز) از طریق فرآیندهای برونزا (Exocytosis) قرار دارد (Yoder and Whalen, ۱۹۷۵). عوامل محیطی زیر بیشترین نقش را در جوانه زنی اسپورها و نرخ کلونیزاسیون ایفا می کنند:

۱. دما: محدوده دمایی رشد بین ۵ تا ۳۰ درجه سانتی گراد است که دمای بهینه آن در محدوده ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی گراد گزارش شده است.

۲. رطوبت: تولید و انتشار کونیدیاها به شدت به رطوبت نسبی وابسته است؛ رطوبت بین ۶۵ تا ۹۲ درصد باعث افزایش چشمگیر نرخ تکثیر می شود (Ciliberti et al., ۲۰۱۶).

۳. نور و گازهای گیاهی: اسپورزایی هم در شرایط نوری و هم در تاریکی امکان پذیر است (Tan and Epton, ۱۹۷۳)؛ همچنین، گاز اتیلن می تواند به عنوان یک عامل القاکننده برای جوانه زنی نقش داشته باشد.

پاتوژن‌ها و مکانیسم تهاجم

این قارچ به عنوان یک بیمارگر نکروتروف (Necrotroph)، با ترشح مجموعه‌ای از آنزیم‌های تجزیه‌کننده دیواره سلولی و سموم، باعث هضم بافت و آزادسازی مواد مغذی می‌شود (Williamson et al., ۲۰۰۷). حمله به بافت گیاهی از دو طریق صورت می‌پذیرد:

• **فعال (Active):** نفوذ مستقیم به بافت‌های

سالم بدون نیاز به نقطه ورود پیش فرض.

• **غیرفعال (Passive):** ورود از طریق زخم‌ها،

آسیب‌های فیزیکی یا منافذ طبیعی (مانند

روزنه‌ها و عدسک‌ها) (van Kan, ۲۰۰۳).

در مواجهه با این تهاجم، گیاه میزبان ممکن است با فعال‌سازی پاسخ‌های دفاعی، از جمله مرگ برنامه‌ریزی شده سلولی (Programmed Cell Death - PCD)، تلاش کند تا گسترش بیمارگر را مهار کند (Wojtaszek, ۱۹۹۷).

چرخه حیات *B. cinerea*

Botrytis cinerea با بهره‌گیری از یک چرخه حیات منعطف، توانایی تطبیق‌پذیری بالایی را در محیط‌های متغیر نشان می‌دهد (شکل ۸). ویژگی برجسته این بیمارگر، قابلیت تغییر وضعیت تغذیه‌ای بین حالت نکروتروفی (Necrotrophy) در حین کلونیزاسیون بافت‌های زنده و حالت ساپروتروفی (Saprophytism) در حین تجزیه مواد آلی در حال پوسیدگی است (Amselem et al., ۲۰۱۱).

چرخه حیات از طریق جوانه‌زنی کینیدیوسپورها آغاز می‌گردد؛ این اسپورها با تولید ریشه‌های

(Hyphae) اولیه، به سرعت توسعه یافته و

به ساختارهای تخصصی کونیدیوفور تبدیل می‌شوند. این کونیدیوفورها مسئول تولید انبوه کونیدیایا هستند که از طریق تولیدمثل غیرجنسی، امکان انتشار سریع و کلونیزاسیون گسترده میزبان را فراهم می‌کنند. پس از مرگ بافت میزبان یا اتمام منابع تغذیه‌ای در گیاه زنده، قارچ وضعیت خود را به حالت ساپروتروفیک تغییر داده و از طریق تجزیه بقایای گیاهی، بقای خود را در محیط تضمین می‌کند.

تولیدمثل جنسی و بقا

در شرایط محیطی ایده‌آل، *B. cinerea* مسیر تولیدمثل جنسی را برای افزایش تنوع ژنتیکی و بقای طولانی‌مدت طی می‌کند. این فرآیند از طریق جوانه‌زنی اسکلوکروت‌ها آغاز شده که می‌تواند منجر به دو پیامد متفاوت شود:

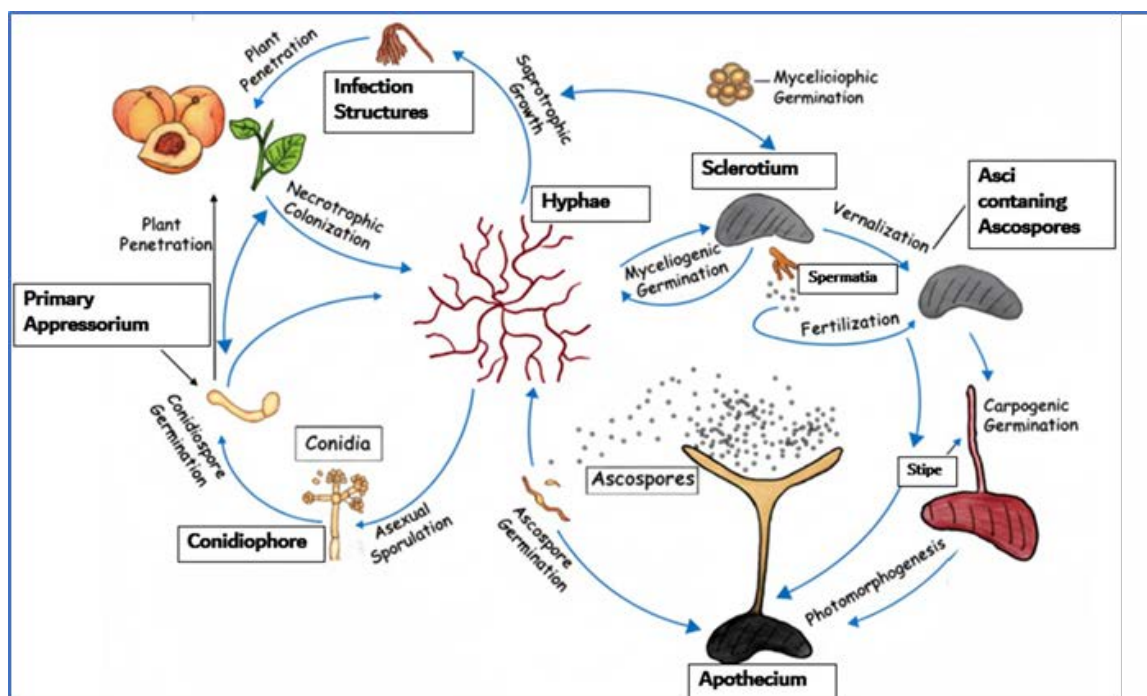
۱. **تشکیل اسپرماتیا (Spermatia):** جهت

تسهیل فرآیند هم‌گامی هسته‌ای.

۲. **تشکیل آپوتسیوم (Apothecium):** ایجاد

ساختارهای بارده جنسی.

با رسیدن به مرحله بلوغ، آپوتسیوم‌ها با آزادسازی آسکوسپورها (Ascospores) در محیط، چرخه تولیدمثل جنسی را تکمیل می‌کنند. این آسکوسپورها به عنوان عوامل اصلی تلقیح عمل کرده و با پراکندگی در فضا، منجر به آلودگی میوه‌ها و گیاهان جدید می‌شوند. توانایی استراتژیک *B. cinerea* در گذار میان حالت‌های نکروتروفیک و ساپروتروفیک، در کنار قابلیت



شکل ۸- چرخه زندگی قارچ *Botrytis cinerea* (Halfeld-Vieira et al., ۲۰۲۰)

رونویسی نظیر TAC۱ هدایت می‌شوند، از دیگر استراتژی‌های ژنی است که با دفع فعال دارو از سلول، غلظت درون سلولی آن را به زیر سطح مهارکننده می‌رساند (Li et al., ۲۰۲۵). تغییرات در مسیرهای متابولیکی، از جمله جهش در ژن‌های URA۳ و ERG۳ نیز از عوامل کاهش اثربخشی سموم محسوب می‌شوند. علاوه بر این، تشکیل بیوفیلم‌ها با ایجاد سد فیزیکی و بیوشیمیایی، پتانسیل بیماری‌زایی و مقاومت را افزایش می‌دهد (Kaur and Nobile, ۲۰۲۳). جهش در فاکتورهای رونویسی مانند TAC۱b می‌تواند با تحریک فرآیندهای مستقل از پمپ‌های خروج، مقاومت را تقویت کند. در نهایت، انعطاف‌پذیری ژنتیکی و تغییرات ساختاری کروموزومی، نظیر تغییر در تعداد کپی ژن‌ها، امکان سازگاری سریع قارچ را با فشار انتخاب ناشی از داروهای ضد قارچ فراهم می‌آورد (Jay et al., ۲۰۲۵).

تولید مثل دوگانه، این گونه را به یکی از سازگارترین و تطبیق‌پذیرترین بیمارگرهای جهان تبدیل کرده است که می‌تواند در طیف وسیعی از اکوسیستم‌ها و شرایط زیستی زنده می‌ماند و تکثیر می‌شود (Amselem et al., ۲۰۱۱).

مکانیسم‌های مقاومت و کنترل شیمیایی قارچ‌ها

مقاومت قارچ‌ها در برابر سموم ضد قارچ از طریق فرآیندهای مولکولی متعدد و شناخته‌شده‌ای ایجاد می‌شود. یکی از مکانیسم‌های کلیدی، اصلاح هدف، است؛ به‌طوری که جهش در ژن‌های حیاتی، از جمله ERG۱۱ (مسئول بیوسنتز ارگسترول ۱۱)، منجر به کاهش میل ترکیبی، سموم گروه آزل و در نتیجه کاهش حساسیت سلول می‌شود. علاوه بر این، افزایش بیان پمپ‌های خروج که توسط تنظیم‌کننده‌های



راهکارهای کنترل شیمیایی و مکانیسم اثر قارچ کش ها

در حوزه مدیریت بیماری های گیاهی، استفاده از قارچ کش های باریسک پایین نظیر فن هگزامید (Fludioxonil) و فلودیوکسونیل (Fenhexamid) در کنترل پوسیدگی قهوه ای پس از برداشت و کپک خاکستری در میوه های هسته دار (هلو، شلیل و آلو) بسیار مؤثر گزارش شده است. در این میان، تبوکوزول (Tebuconazole) کارایی بالاتری در برابر پوسیدگی قهوه ای نسبت به کپک خاکستری نشان می دهد، اما میزان پوسیدگی ریزوپوس را به طور محسوسی کاهش می دهد.

از نظر مکانیسم اثر، فلودیوکسونیل از طریق فعال سازی بیش از حد مسیر سیگنالینگ گلیسرول با اسمولارите بالا، از طریق کینازهای هیستیدین هیبریدی گروه III (HK) عمل می کند.

این مسیر در تنظیم سازگاری سلولی با تنش های محیطی، از جمله تغییرات فشار اسمزی، نقش حیاتی دارد. فعالیت قارچ کشی فلودیوکسونیل ناشی از اختلال در انتقال سیگنال تنش اسمزی است که منجر به تجمع غیرطبیعی گلیسرول و در نهایت مرگ سلولی می شود (Yoshimi et al., 2005; Jacob and Bevan, 2014). در مقابل، فن هگزامید با مهار آنزیم مسئول دمتیلاسیون C4 در مسیر بیوسنتز ارگسترول، از تولید این جزء حیاتی غشای سلولی جلوگیری کرده و منجر به فروپاشی ساختاری و مرگ سلول قارچی می گردد (Billard, 2011). با توجه به کارایی فلودیوکسونیل علیه A. solani و سطح پایین خطر ایجاد مقاومت، این ماده جایگزینی مناسب برای قارچ کش های پرخطر نظیر بوسکالید و پیراکلوستروبین محسوب می شود (Malandrakis et al., 2021).

فعال‌کننده‌های دفاع گیاهی

بر خلاف قارچ‌کش‌های سنتی که مستقیماً بر جمعیت بیمارگرهای قارچی اثر می‌گذارند، فعال‌کننده‌های دفاع گیاهی با تقویت مکانیسم‌های مقاومت ذاتی (Innate Resistance) میوه، از گیاه محافظت می‌کنند. این ترکیبات با تحریک مسیرهای سیگنالینگ دفاعی، توانایی گیاه را در مقابله با تنش‌های زنده افزایش می‌دهند.

اسید بتا-آمینوبوتیریک (BABA)

تیمار با اسید بتا-آمینوبوتیریک (BABA^۱) منجر به تقویت فعالیت آنزیم‌های مرتبط با دفاع، از جمله کیتیناز (PpCHI) و β -۱،۳-گلوکاناز (GLU^۲) شده و با افزایش تجمع لیگنین، پایداری ساختاری و کیفیت میوه را بهبود می‌بخشد. این ترکیب از طریق افزایش رونویسی ژن‌های مرتبط با دفاع، مقاومت هلو را در برابر پوسیدگی ریزوپوس افزایش می‌دهد. مکانیسم اثر BABA شامل القای اثر پرایمینگ، از طریق فعال‌سازی زود هنگام ژن‌های تنظیم‌شونده توسط ردوکس و اصلاح فاکتور رونویسی PpTGA^۱ است. این فرآیند منجر به تولید پراکسید هیدروژن (H₂O₂) از طریق انفجار تنفسی، افزایش بیان همولوگ اکسیداز (PpRBOH) و در نهایت فعال‌سازی پروتئین کیناز وابسته به میتوزن (MAPK) پس از حمله بیمارگر می‌گردد که در نهایت منجر به یک پاسخ دفاعی قدرتمند می‌شود (Li et al., ۲۰۲۱).

1. B-Aminobutyric Acid (BABA)

2. B-1,3-Glucanase (GLU)

۴،۲-اپی‌براسینولید (EBR) و متیل جاسمونات (MeJA)

استفاده از ۴،۲-اپی‌براسینولید (EBR^۳) در غلظت ۵ میکرومولار، بیان ژن‌های مرتبط با پروتئین‌های مربوط به بیماری (PR proteins) شامل، PpCHI، PpGns^۱، فنیل آلانین آمونیاک-لیاز (PpPAL)، PpNPR^۱ و پروتئین‌های PpPR^۱ و PpPR^۴ را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین، این تیمار منجر به تقویت بیوسنتز لیگنین و افزایش ترکیبات فنلی می‌گردد. تجمع ترکیبات ضد قارچی در هلوهای تیمار شده با EBR پس از تلقیح، نشان‌دهنده یک پاسخ دفاعی آماده‌سازی شده است (Li et al., ۲۰۲۰). به‌طور مشابه، کاربرد ۱۰ میکرومولار متیل جاسمونات (MeJA) با تحریک فعالیت آنزیم‌های PpCHI و GLU، منجر به کاهش ضایعات ناشی از R. stolonifer و ترویج یک پاسخ دفاعی اختصاصی در برابر پوسیدگی ریزوپوس شده است (Ji et al., ۲۰۲۱).

بنزوتیادiazول (BTH^۴)

تیمار پس از برداشت هلو با اسید (۱،۲،۳)-تیودیازول-۷-کربوتیوئیک-۲-بنزوات (BTH^۵) در غلظت ۰/۲ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر، به‌طور معناداری آسیب‌های ناشی از P. expansum را کاهش داد. این تیمار ضمن افزایش فعالیت آنزیم‌های PpCHI و GLU، سطح کل فنول‌ها، اسید کلروژنیک و محتوای لیگنین را ارتقا بخشید.

3. 2,4-Epibrassinolide (EBR)

4. Benzothiadiazole

5. Benzo- (1,2,3)-Thiodiazole-7-Carbothioic Acid (BTH)

شایان ذکر است که این بهبودهای دفاعی بدون ایجاد اثر منفی بر ویژگی های کیفی میوه، از جمله محتوای مواد جامد محلول (TSS)، پکتین محلول، اسیدیتته قابل تیتراسیون و سطح اسید اسکوربیک (AA)، صورت گرفت (Liu et al, ۲۰۰۵).

۶- بنزیل آمینوپورین (BAP)

استفاده از ۶-بنزیل آمینوپورین (BAP) در غلظت ۰/۱ میلی گرم بر میلی لیتر، میزان بروز بیماری را از ۷۷/۳٪ در نمونه های شاهد به ۶/۲٪ در میوه های تیمار شده کاهش داد و منجر به حفظ سفتی میوه در سطح ۱۳/۱ مگاپاسکال شد. مکانیسم اثر BAP شامل افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD^۶) و حفظ یکپارچگی غشای سلولی است، بدون آنکه تأثیر قابل توجهی بر میزان کل ترکیبات فنلی یا فلاونوئیدها داشته باشد (Zhang et al, ۲۰۱۵).

اکسید نیتریک و متاسیلیکات سدیم^۷

تیمار با اکسید نیتریک (NO) در غلظت ۱۵ میکرومولار، از طریق القای مولکول های پیام رسانی نظیر NO درون زا، گونه های فعال اکسیژن (ROS)، اسید سالیسیلیک (SA) و اسید جاسمونیک (JA)، مقاومت هلوهای برداشت شده را در برابر *M. fructicola* افزایش می دهد. همچنین، این تیمار با بهره گیری از نیتروپروپوساید

سدیم (SNP^۸) و H₂O₂ فعالیت آنزیم آکونیتاز را مهار می کند (Shi et al, ۲۰۱۵).

در همین راستا، متاسیلیکات سدیم نیز با حفظ استحکام بافت میوه و تحریک سنتز پلی فنول های کل در پاسخ به حمله قارچی، نقش مؤثری در کاهش بیماری ایفای می کند. با این وجود، این ترکیب تأثیر قابل توجهی بر اسیدیتته قابل تیتراسیون یا مواد جامد محلول ندارد. گزارش شده است که استفاده از ۰/۰۰۶ گرم بر میلی لیتر متاسیلیکات سدیم می تواند به طور بالقوه از بروز پوسیدگی قهوه ای در هلو، پیش و پس از برداشت، جلوگیری کند؛ ضمن آنکه موجب افزایش سنتز پلی فنول و حفظ سفتی بافت میوه می شود (Pavanello et al, ۲۰۱۶).

اسانس ها

در سال های اخیر، استفاده از اسانس های گیاهی به عنوان جایگزین های طبیعی برای آفت کش های مصنوعی، به دلیل نگرانی های مرتبط با آلودگی محیط زیست و افزایش مقاومت آفات و عوامل بیماری زای قارچی، توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است. در یکی از مطالعات، کارایی دو اسانس گیاهی شامل شاه پسند (*Verbena officinalis*) با غلظت ۱۰۰۰ ppm و آویشن (*Thymus vulgaris*) با غلظت ۵۰۰ ppm در کنترل پوسیدگی ناشی از گونه های *Monilinia* روی هلو بررسی شد. نتایج نشان داد که اسانس آویشن که عمدتاً حاوی o-cymene با فراوانی ۵۶/۲ درصد بود، نسبت به

6. Superoxide Dismutase (SOD)

7. Nitric Oxide and Sodium Metasilicate

8. Sodium Nitroprusside (SNP)

اسانس شاه‌پسند عملکرد بهتری داشته و قطر ضایعات کمتری ایجاد کرد. اسانس شاه‌پسند نیز غنی از سیترال (۴۴/۵ درصد) و ایزوبورنیل فرمات (۵۴/۴ درصد) بود. به‌طور مشخص، قطر ضایعات ناشی از *M. fructicola* و *M. laxa*، *M. fructigena* در تیمار اسانس آویشن به‌ترتیب ۶، ۹ و ۲۳ میلی‌متر بود، در حالی که این مقادیر برای اسانس شاه‌پسند ۱۷، ۲۵ و ۲۷ میلی‌متر گزارش شد. با این حال، حتی در غلظت‌های بالای مورد استفاده، هیچ‌گونه اثر فیتوتوکسیک بر بافت میوه مشاهده نشد (Elshafie et al., ۲۰۱۵).

در مطالعه‌ای دیگر، ترکیبات ضد قارچی مؤثر علیه *M. fructicola* و *B. cinerea* در اسانس *Thymus capitatus* L. شناسایی شدند. در این میان، کارواکرول و تیمول، از جمله مؤثرترین ترکیبات در مهار جوانه‌زنی اسپور و رشد میسلومی بودند. در آزمون‌های بخاری‌ات، این ترکیبات در غلظت ۱۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر محیط کشت، معادل ۰/۲۵ میلی‌گرم در هر پتری‌دیش، پس از ۴۸ ساعت توانستند به‌ترتیب ۸۵ و ۸۲ درصد مهار در برابر *B. cinerea* و ۳۸ و ۵۷ درصد مهار در برابر *M. fructicola* ایجاد کنند (Tsao and Zhou, ۲۰۰۰).

همچنین، کاربرد اسانس آویشن در قالب تیمارهای پس از برداشت نیز مؤثر گزارش شده است. ترکیب اسانس آویشن و نعناع با صمغ عربی و پلی‌اکسی‌اتیلن سوربیتان مونولورات (Tween ۲۰^۹) منجر به تشکیل محلولی شد که رشد سه بیمارگر *R. stolonifer*، *B. cinerea*، *P. expansum* را به‌طور

مؤثر مهار کرد. نتایج نشان داد که شش روز پس از مصرف، رشد این بیمارگرها به‌ترتیب ۸۳، ۷۷ و ۸۸ درصد کاهش یافت. این محلول حتی در دماهای ۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد نیز در کنترل پوسیدگی پس از برداشت هلو مؤثر بود. در شرایط نگهداری در ۴ درجه سانتی‌گراد، این فرمولاسیون توانست به مدت ۱۰ روز میوه‌ها را در برابر هر سه عامل بیماری‌زا محافظت کند و در مقایسه با تیمار شاهد شامل صمغ عربی و Tween ۲۰، پیشرفت بیماری را تا ۳۰ روز به‌طور معنی‌داری کاهش دهد. در مجموع، این تیمار میزان بروز بیماری را به ۲۵ تا ۳۰ درصد و شدت آن را به ۲۶ تا ۴۶ درصد در طول دوره نگهداری کاهش داد (Alamri et al., ۲۰۲۰). در مقایسه با بخار اسانس دارچین، اسانس آویشن اثربخشی بیشتری در کاهش بروز پوسیدگی قهوه‌ای در دورقم هلو نشان داد. این اثر مطلوب به افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با دفاع و همچنین افزایش محتوای کل ترکیبات فنلی نسبت داده شده است (Cindi et al., ۲۰۱۶).

9. Polyoxyethylene Sorbitan Monolaurate (Tween 20)

ضد عفونی‌کننده‌ها

(Disinfectants)



آب الکترولیز شده خنثی

(Neutral Electrolyzed Water)

استفاده از آب اکسیدکننده الکترولیز شده به روش خیساندن و اسپری روزانه، کارایی بالایی در کنترل بیماری‌های پس از برداشت نشان داده است. گزارش شده است که تیمار هلوهای آلوده به *M. fructicola* با این روش، به‌طوری که تا ۱۲ روز از بروز آلودگی جلوگیری کرد، منجر به کاهش میزان بروز بیماری به ۱۰ درصد و کاهش شدت بیماری به ۶ درصد پس از ۱۴ روز نگهداری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد گردید (Guentzel et al., ۲۰۱۰).

پراکسید هیدروژن^{۱۰}

پراکسید هیدروژن (H_2O_2) با ایجاد آسیب اکسیداتیو در سطوح سلولی مختلف، بر بقا، جوانه‌زنی و رشد میسلیم کندی‌های *P. digitatum* اثرگذاری می‌کند؛ این اثر به‌صورت وابسته به غلظت بوده و همبستگی مستقیمی با نرخ مرگومیر و جوانه‌زنی کندی‌ها دارد. همچنین، این ترکیب منجر به اختلال در پایداری غشایی کندی‌ها و هیف‌های *P. digitatum* می‌گردد (Yan et al., ۲۰۲۵). در مورد کاربرد به‌صورت بخار، مواجهه با بخار H_2O_2 منجر به کاهش لگاریتمی در میزان جوانه‌زنی اسپوره‌های *B. cinerea* می‌شود. با این حال، قرارگیری طولانی مدت در معرض این بخار می‌تواند پیامدهای نامطلوبی نظیر افزایش از دست دادن آب، کاهش سفتی میوه و ایجاد آسیب‌های ظاهری (مانند تغییر رنگ زرد-

قهوه‌ای در میوه و ساقه) داشته باشد که شدت این آسیب‌ها با افزایش غلظت و مدت زمان مواجهه، بیشتر می‌شود (Rij and Forney, ۱۹۹۵).

ازن

استفاده از گاز ازن با غلظت ۰/۵ پی‌پی‌ام (ppm) به مدت ۴۰۰ دقیقه، منجر به کاهش معنی‌دار میانگین شیوع طبیعی ناشی از *M. fructicola* در میوه‌های هسته‌دار شد، بدون اینکه سمیت قابل توجهی بر بافت گیاه مشاهده شود (Drogoudi et al., ۲۰۲۳). همچنین، ازن توانست رشد میسلیم و فرآیند اسپورزایی را در گونه‌های *P. expansum*، *M. fructicola*، *B. cinerea* کند. در شرایط دمایی ۵ درجه سانتی‌گراد، برخلاف میوه‌های شاهد، در تیمارهای ازن، گونه *M. fructicola* فاقد میسلیم هوایی بود و گونه *B. cinerea* تنها میسلیم کوتاه و فشرده (بدون تولید کونیدیا) ایجاد کرد. در مورد *P. expansum* نیز، اگرچه میسلیم خارجی مشاهده شد، اما وسعت ناحیه آلوده به‌طور قابل توجهی کمتر از نمونه‌های شاهد بود و از اسپورزایی جلوگیری گردید (Palou et al., ۲۰۰۲).

اسید پراستیک (PAA)^{۱۱}

تیمار با اسید پراستیک (PAA) به غلظت ۰/۲ میلی گرم بر میلی لیتر در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۰ ثانیه، در مهار پوسیدگی قهوه‌ای بسیار مؤثر است. با این حال، کارایی این

11. Peracetic Acid (PAA)

10. Hydrogen Peroxide

تیمار با افزایش مدت زمان آلودگی (۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت) به طور چشمگیری کاهش می یابد. اگرچه PAA در برابر غلظت های مختلف مایه تلقیح در میوه های هلو و شلیل در مراحل اولیه مؤثر است، اما توانایی ایجاد محافظت در برابر آلودگی های ثانویه را ندارد. همچنین، این ترکیب در هلو میزان پوسیدگی قهوه ای را به ترتیب ۶۱ و ۳۶ درصد کاهش می دهد، اما در مورد میوه های شلیل تحت شرایط آلودگی طبیعی، اثر مهارکنندگی مشاهده نشد (Sisquella et al., ۲۰۱۳).

اسیداستیک

اثرات مهارکنندگی اسید استیک بر رشد *B. cinerea* به صورت وابسته به دوز و زمان گزارش شده است. مواجهه با بخار اسید استیک در $10 \times 3 \times 4$ یا $10 \times 6 \times 3$ غلظت های میلی گرم بر میلی لیتر به مدت ۶ دقیقه و همچنین غلظت $10 \times 3 \times 8$ میلی گرم بر میلی لیتر به مدت ۳ یا ۶ دقیقه، منجر به مهار کامل رشد *B. cinerea* گردید (Lagopodi et al., ۲۰۰۹). علاوه بر این، استفاده از اسید استیک توانست میزان پوسیدگی هسته ناشی از *P. expansum* را از ۹۸ درصد به ۱۶ درصد و پوسیدگی مرکبات ناشی از *P. digitatum* را از ۸۶ درصد به ۱۱ درصد کاهش دهد، بدون آنکه آسیب جدی به بافت میوه وارد کند (Sholberg, ۱۹۹۸). در مورد هلو، این ترکیب با ایجاد آسیب های جزئی، به طور مؤثر از بروز پوسیدگی ناشی از *M. fructicola* و *R. stolonifer* جلوگیری کرد؛ لازم به ذکر است که استفاده از غلظت های بالاتر اسید استیک، منجر

به بروز آسیب های بافتی به صورت رگه های تیره و برجسته می گردد (Sholberg and Gaunce, ۱۹۹۶).

کلرید کلسیم و هیپوکلرید سدیم^{۱۲}

کاربرد محلول های کلسیم در حفظ کیفیت پس از برداشت محصولات باغی مورد توجه پژوهشگران بوده است. مطالعات نشان می دهد که غوطه وری میوه ها در محلول حاوی ۱ درصد کلرید کلسیم و ۱/۵ درصد اسید آسکوربیک، امکان نگهداری بهینه میوه را به مدت ۲۰ روز در شرایط سرد فراهم می آورد (Shalan, ۲۰۲۰). با این وجود، نتایج برخی بررسی ها بیانگر آن است که غوطه وری در محلول کلرید کلسیم و متعاقب آن بسته بندی و نگهداری در دمای ۱۰ درجه سانتی گراد (با رطوبت نسبی 75 ± 5 درصد)، می تواند با تغییرات فیزیولوژیک از جمله کاهش سفتی بافت و میزان اسید آسکوربیک و در مقابل، افزایش شاخص پوسیدگی و درصد کاهش وزن همراه باشد (Sohail et al., ۲۰۱۵).

در مقایسه با روش های شیمیایی، استفاده از تیمارهای فیزیکی مانند آب گرم (دمای ۴۵ درجه سانتی گراد به مدت ۱ دقیقه) در حفظ شاخص های کیفی و کاهش نرخ پوسیدگی گوجه فرنگی طی نگهداری در خنک کننده های تبخیری، اثربخشی بالاتری نسبت به کاربرد محلول هیپوکلریت کلسیم ۱ درصد نشان داده است (Benitez et al., ۲۰۲۱). از سوی دیگر، مدیریت آلودگی در مخازن شناورسازی، اهمیت ویژه ای در کنترل بیماری های پس از برداشت دارد. استفاده از سورفکتانت های

و هوای داغ (^{17}HA)
از کاربرد بیشتری
برخوردارند. این
تکنیک‌ها به‌طور گسترده
برای کاهش پوسیدگی میوه،
به‌تعویق انداختن فرایند رسیدن و حفظ
کیفیت مطلوب محصول در شرایط تجاری مورد
استفاده قرار می‌گیرند.

غیریونی^{۱۳} نظیر
پلی اکسی اتیلن
سوربیتان مونو اولئات
^{۱۴} (Tween ۸۰)، توئین ۲۰
(Tween ۲۰) و سوربیتان مونولورات
^{۱۵} (Span ۲۰) در ترکیب با
هیپوکلریت سدیم، راهکاری مؤثر برای افزایش
کارایی ضد عفونی کننده‌ها در محدودسازی تکثیر
P. expansum در این مخازن محسوب می‌شود
(Okull et al, ۲۰۰۶).

تیمارهای آب داغ

جمریک^{۱۸} و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که
غوطه‌ور کردن هلو در آب داغ با دمای ۴۸ درجه
سانتی‌گراد به مدت ۱۲ دقیقه، جوانه‌زنی
کنیدی‌های M. laxa را به‌طور معنی‌داری کاهش
می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که میزان جوانه‌زنی در
میوه‌های تیمار شده ۹ درصد و در میوه‌های
شاهد ۹۳ درصد بود. با این حال، از نظر سفتی
بافت، اسید دیته قابل تیتراسیون و غلظت مواد
جامد محلول، تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های
تیمار شده و شاهد مشاهده نشد. در مطالعه‌ای
دیگر، کارایی آب گرم، به‌عنوان روشی برای مهار
پوسیدگی در هلو و شلیل آلوده به M. fructicola
ارزیابی شد. در این آزمایش، میوه‌ها به مدت

روش‌های فیزیکی

در سال‌های اخیر، به‌دلیل عدم باقی ماندن بقایای
شیمیایی در محصول تیمار شده و نیز اثرگذاری
حداقلی بر محیط زیست، استفاده از روش‌های
فیزیکی در کنترل بیماری‌های پس از برداشت
میوه‌ها و سبزیجات مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته
است. این روش‌ها به‌ویژه در مدیریت عوامل بیمارگر
پس از برداشت، جایگاه مهمی یافته‌اند.

تیمارهای حرارتی

تیمارهای حرارتی یکی از روش‌های متداول در
نگهداری پس از برداشت محصولات باغی به‌شمار
می‌روند. در میان این روش‌ها، تیمار آب داغ (^{16}HW)

17. Hot Air (HA)

18. Jemric

13. Nonionic Surfactants

14. Polyoxyethylene Sorbitan Monooleate (Tween 80)

15. Sorbitan Monolaurate (Span 20)

16. Hot Water (HW)

۲/۵ دقیقه در آب گرم بادمای ۴۶ یا ۵۰ درجه سانتی گراد غوطه‌ور شدند. نتایج نشان داد که این تیمار، درصد میوه‌های فاسد را از ۸۲/۸ درصد به ترتیب به ۵۹/۳ درصد و ۳۸/۸ درصد کاهش داد. در ادامه، اثر ترکیب اتانول ۱۰ درصد با آب گرم نیز بررسی شد. بدین منظور، میوه‌ها به تنهایی در آب گرم یا در محلول اتانول ۱۰ درصد، در دمای ۴۶ یا ۵۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲/۵ دقیقه غوطه‌ور شدند. نتایج نشان داد که افزودن اتانول ۱۰ درصد، کارایی آب گرم را در مهار پوسیدگی قهوه‌ای به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد؛ به طوری که درصد پوسیدگی به ترتیب به ۳۳/۸ درصد و ۲۴/۵ درصد کاهش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب اتانول ۱۰ درصد با آب گرم می‌تواند روشی مؤثر برای کنترل پوسیدگی در میوه‌های آلوده به *M. fructicola* باشد (Margosan et al, ۱۹۹۷).

تیمارهای هوای داغ (Hot Air Treatment)

وانگ^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۵) کارایی تیمار هوای داغ (HA) در دمای ۴۴ درجه سانتی گراد به مدت ۱۱۴ دقیقه را بر کاهش کپک آبی در گیل‌های شیرین بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که میوه‌های تیمار شده با هوای داغ، در مقایسه با نمونه‌های شاهد، از میزان شیوع بیماری و قطر ضایعات کمتری برخوردار بودند. این تیمار موجب ارتقای فعالیت آنزیم‌های کیتیناز (CHI) و گلوکاناز (GLU) گردید، در حالی که فعالیت آنزیم‌های پلی گالاکتوروناز^{۲۰} (PG) و

19. Wang

20. Polygalacturonase

پکتین متیل استراز^{۲۱} (PME) را سرکوب نمود. افزون بر این، در میوه‌های تیمار شده با هوای داغ، فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی شامل سوپراکسید دیسموتاز^{۲۲} (SOD)، کاتالاز^{۲۳} (CAT)، پراکسیداز^{۲۴} (POD) و پلی فنل اکسیداز^{۲۵} (PPO) به طور معنی داری افزایش یافت؛ هر چند فعالیت آسکوربات پراکسیداز (APX) نسبت به گروه شاهد کمتر گزارش شد.

در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر تیمار هوای داغ (۳۸ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت) با تیمار آب داغ (۴۸ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه) در هلو مقایسه شد. هر دو تیمار ضمن حفظ کیفیت میوه، موجب کاهش سطوح گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی بافت گردیدند. با این حال، نتایج نشان داد که تیمار آب داغ در کاهش علائم قهوه‌ای شدن داخلی (Internal browning) کارآمدتر از هوای داغ است. این برتری عملکردی می‌تواند به انتقال حرارت مطلوب‌تر در محیط مایع نسبت داده شود که تأثیر مستقیم‌تری بر سیستم آنتی اکسیدانی هلو دارد. همچنین، برخلاف تیمار آب داغ که متابولیسم اسید آسکوربیک را در مراحل اولیه و متابولیسم گلوکاتایون (GSH) را در مراحل انتهایی انبارداری بهبود بخشید، تیمار هوای داغ تغییر معنی داری بر متابولیسم این ترکیبات ایجاد نکرد (Huan et al, ۲۰۱۷).

21. Pectin Methylesterase (PME)

22. Superoxide Dismutase (SOD)

23. Catalase

24. peroxidase

25. Ascorbate Peroxidase (APX)

مستقیم عوامل بیمارگر و القای مکانیسم‌های مقاومت فیزیولوژیکی در میوه، به‌طور قابل توجهی آلودگی‌های قارچی ناشی از گونه‌های *Monilinia* و *B. cinerea* را در هلو کاهش می‌دهند. با توجه به نقش این تیمارها در حفظ کیفیت، ارزش غذایی و افزایش ماندگاری محصول، گنجاندن آن‌ها در برنامه‌های مدیریت پس از برداشت توصیه می‌شود؛ هرچند باید توجه داشت که این روش‌ها به‌تنهایی قادر به جلوگیری کامل از پوسیدگی نیستند. لذا جهت دستیابی به حداکثر کارایی و حفظ یکپارچگی ساختار میوه، بهینه‌سازی دقیق پارامترهای زمانی و دمای (ترکیب زمان × دما) امری ضروری است (Di Francesco et al, ۲۰۲۶).

تیمارهای تابش فرابنفش (UV)

به‌کارگیری تابش اشعه فرابنفش (شامل UV-C و UV-B و ترکیبات آن‌ها)، به‌دلیل آثار مثبت در حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری میوه‌ها، در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تیمار UV-C (۷۲/۰ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$) در مقایسه با UV-B (۳۶/۲ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$) ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و حسی هلوهای انبارشده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد را طی یک دوره ۲۵ روزه به‌طور مؤثری بهبود می‌بخشد. افزون بر این، نتایج حاکی از آن است که تیمار ترکیبی UV-C + UV-B (۲۸/۲ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$) در مقایسه با گروه شاهد، دستاوردهای قابل توجهی از جمله کاهش ۲۲/۱ درصدی افت وزن، ۲۹ درصدی

پوسیدگی و ۱۰ درصدی مواد جامد محلول (TSS) را به همراه دارد. همچنین، این تیمار موجب افزایش ۳۴/۷ درصدی در محتوای ویتامین C، ۲۲/۸ درصدی در سفتی بافت، ۴/۷ درصدی در ترکیبات فنلی کل (TPC^{۲۷})، ۹۲/۸ درصدی در اسیدیته قابل تیتراسیون و ۱۷/۷ درصدی در pH محصول می‌گردد (Abdipour et al, ۲۰۱۹).

در خصوص کنترل بیمارگرها، تابش UV-C با شدت ۱۱/۷۴ میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع برای مهار پوسیدگی نرم ناشی از *Rhizopus stolonifer* مؤثر گزارش شده است که بیشترین کارایی آن در زمان پرتودهی ۱۰ دقیقه مشاهده می‌شود. شواهد نشان می‌دهد که ۱۰ تا ۱۵ دقیقه تابش

UV-C رشد میسلومی *R. stolonifer* را کاهش داده و تداوم آن تا ۳۰ دقیقه

26. Total Soluble Solids (TSS)

27. Total Phenolic Content (TPC)

منجر به مهار کامل رشد این بیمارگر می گردد؛ با این وجود، در همان مطالعه، اثربخشی این تیمار بر کنترل حفاظتی یا درمانی *Monilinia fructicola* ناچیز گزارش شده است (Bassetto et al, ۲۰۰۷). اثربخشی غیرفعال سازی *Penicillium expansum* توسط UV-C، به شدت تابش و وضعیت بافت میوه وابسته است. به عنوان نمونه، برای دستیابی به کاهش مشابه در جمعیت *P. expansum*، در گلابی های زخمی به شدت تابش بیشتری (۳/۱ کیلوژول بر مترمربع برای کاهش ۲/۷ لگاریتمی) نسبت به گلابی های سالم (۱/۷ کیلوژول بر مترمربع برای کاهش ۲/۸ لگاریتمی) نیاز است. اگرچه در این مطالعه تفاوت معنی داری در شاخص های وزن، TSS و سفتی بافت بین نمونه های تیمار شده و شاهد مشاهده نشد، اما تغییراتی در ویژگی های حسی (رنگ، طعم و بافت) پس از ۴ تا ۸ هفته انبارداری گزارش گردید (Syamaladevi et al, ۲۰۱۴).

درمان با آنتاگونیست ها

مهارزیستی یک روش اکولوژیکی و مؤثر برای مدیریت بیماری است که شامل معرفی یک ارگانیسم سوم برای مهار عوامل بیماری زا، به جای استفاده از آفت کش های شیمیایی است. این روش به عملکرد میکروارگانیسم های آنتاگونیست متکی است که می توانند بیماری ها را از طریق مکانیسم هایی مانند رقابت مکانی یا تغذیه ای، مقاومت القایی و تولید متابولیت ها کنترل کنند.

تیمارهای باکتریایی (Biological Control)

استفاده از عوامل مهار زیستی به ویژه گونه های جنس *Bacillus* به دلیل اثربخشی در مهار بیمارگرهای قارچی پس از برداشت، مورد توجه گسترده ای قرار گرفته است. بررسی ها نشان داده است که هلوهای تیمار شده با سویه *Bacillus licheniformis* HG ۰۳، در شرایط انبارداری (دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی بالا)، مقاومت چشمگیری در برابر *Rhizopus stolonifer* از خود نشان می دهند. این سویه با تعدیل متابولیسم گونه های فعال اکسیژن (ROS)، کاهش تجمع محصولات پراکسیداسیون لیپیدی و

تیمار UV-C با دوز ۳ کیلوژول بر مترمربع شاخص بیماری و قطر ضایعات ناشی از *R. stolonifer* را در شلیل های تلقیح شده به طور معنی داری کاهش می دهد. این تیمار با تحریک مسیر فنیل پروپانویید و بیوسنتز آنتوسیانین ها، موجب افزایش محتوای ترکیبات فنلی، فلاونوئیدها، آنتوسیانین ها و لیگنین می شود. همچنین، گزارش شده است که UV-C با ارتقای فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی (SOD، CAT و APX) و افزایش سطح اسید آسکوربیک (AA) و گلوتاتیون (GSH) و نیز افزایش فعالیت آنزیم های دفاعی

ارتقای ظرفیت آنتی اکسیدانی بافت، سبب تقویت سیستم دفاعی میزبان می گردد (Wang et al., ۲۰۲۳). همچنین، به کارگیری *Bacillus subtilis* JK-۱۴ با غلظت 1×10^7 CFU در میلی لیتر منجر به کاهش ۷۱/۳ درصدی در بروز بیماری و ۷۳/۵ درصدی در قطر ضایعات ناشی از *Botrytis cinerea* گردید. این تیمار با افزایش معنی دار فعالیت آنزیم های دفاعی شامل SOD، POD و CAT (به ترتیب به میزان ۳۶/۵، ۱۷/۶ و ۲۰/۳ درصد نسبت به گروه شاهد)، نقش مهمی در القای مقاومت در هلو ایفامی کند (Zhang et al., ۲۰۱۹).

در مطالعات دیگر، سویه *Bacillus amyloliquefaciens* PPCB-۰۰۴ آنتاگونیست قدرتمند در مهار رشد میسلیمی بیمارگرهایی نظیر *B. cinerea*، *Penicillium expansum* و *R. stolonifer* معرفی شده است که هاله عدم رشد (Inhibition zone) ایجاد شده توسط آن به ترتیب 28 ± 31 ، 27 ± 24 و 1 ± 11 میلی متر گزارش شده است (Arrebola et al., ۲۰۱۰). علاوه بر این، سویه های *Bacillus vallismortis* و *Bacillus altitudinis* با تولید ترکیبات فرار (VOCs) نظیر ۶-متیل-۲-هپتانول و ۲-پنتیل فوران، ضمن ایجاد آسیب های ساختاری در سلول های *Monilinia fructicola*، رشد میسلیمی آن را تا ۸۰/۳ و ۶۸/۴ درصد مهار می کنند (Liu et al., ۲۰۱۸).

باکتری های گرم منفی، به ویژه گونه های جنس *Pseudomonas*، به دلیل توانایی در تولید ترکیبات ضدقارچی و حضور در محیط های ریزوسفری و فیلوسفر، از اهمیت ویژه ای در مهار زیستی برخوردارند

(Zhang et al., ۲۰۰۹; Lugtenberg and Kamilova, ۲۰۲۰). در مطالعه ای، اثر سویه *Pseudomonas synxantha* (DLS۶۵) بر پوسیدگی قهوه ای هلو بررسی شد. نتایج نشان داد که این سویه پس از ۵ روز انبارداری در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، میزان بروز و شدت بیماری ناشی از *M. fructicola* و *M. fructigena* را تا ۵۰ و ۷۶ درصد کاهش داد. این بازدارندگی در دمای ۱۰ درجه سانتی گراد برای *M. fructicola* به ۶۸ درصد (بروز) و ۹۲ درصد (شدت) و برای *M. fructigena* به ۵۵ درصد (بروز) و ۹۰ درصد (شدت) رسید (Aiello et al., ۲۰۱۹).

در نهایت، سویه های *Pseudomonas fluorescens* CHA۰ و *Pseudomonas aeruginosa* VNSK۲ قادرند مقاومت القایی (Induced Resistance) در برابر *B. cinerea* را در انگور افزایش دهند. این سویه ها با تحریک پاسخ های اکسیداتیو و تسریع در تجمع فیتوآلکسین ها، بافت گیاه را برای مقابله با بیمارگر آماده می سازند. شواهد نشان می دهد که پاسخ های دفاعی القاشده توسط این باکتری ها به واسطه تولید ترکیباتی نظیر پیوچلین (Pyochelin)، پیووردین (Pyoverdine) و اسید سالیسیلیک (SA) صورت می پذیرد که مشابه عملکرد سلول های زنده باکتریایی، موجب مهار توسعه *B. cinerea* می شود (Verhagen et al., ۲۰۱۰).

تیمار با سویه EPS۱۲۵ از *Pantoea agglomerans* به طور قابل توجهی قطر ضایعات پوسیدگی را روی میوه های هسته دار زخمی تلقیح شده با 1×10^3 اسپور در میلی لیتر از *M. laxa* و نگهداری شده در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد کاهش داد. اندازه

ضایعات از ۶۷/۷ تا ۲۲/۳ میلی متر برای میوه های تیمار نشده و از ۷/۳ تا ۴ میلی متر برای میوه های تیمار شده به صورت پیشگیرانه با EPS ۱۲۵ متغیر بود. هیچ تفاوت معنی داری بین تیمار پیشگیرانه با EPS ۱۲۵ و تیمار قارچ کش (تبوکونازول با غلظت ۰/۱۲۵ میلی گرم در میلی لیتر) مشاهده نشد (Bonaterra et al., ۲۰۰۳).

تیمار با مخمر

مهار زیستی بیماری های میوه در مرحله پس از برداشت توسط مخمرهای آنتاگونیست، یک استراتژی مؤثر و امیدوارکننده برای کاهش تلفات میوه پس از برداشت در نظر گرفته شده است. به دلیل اثربخشی *C. laurentii* در محدود کردن کپک خاکستری، کپک آبی و کپک ریزوپوس روی میوه هلو در مرحله پس از برداشت مورد مطالعه قرار گرفته است. غلظت های *C. laurentii* با غلظت $10^9 \times \text{CFU/mL}$ برای جلوگیری کامل از کپک خاکستری پس از ۴ روز انکوباسیون در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد کافی بود. *C. laurentii* پس از نگهداری در دمای ۲ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ روز و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۷ روز، بر ویژگی های کیفی میوه تأثیری نداشت (Zhang et al., ۲۰۰۷). استفاده از *C. laurentii* توانایی قابل توجهی در کاهش پوسیدگی قهوه ای در هر دو دمای ۲۵ و ۱ درجه سانتی گراد نشان داده است. اگرچه جمعیت مخمر در حضور بیمارگر با سرعت بیشتری افزایش یافت، اما سپس به سرعت کاهش یافت. در میوه هایی که با *M. fructicola* به تنهایی

یا همراه با *C. laurentii* تلقیح شده بودند، افزایش پراکسیداسیون لیپید و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی مانند CAT، SOD و POD مشاهده شد. علاوه بر این، الگوی ایزوآنزیم پلی فنل اکسیداز پس از ظهور علائم به طور قابل توجهی تغییر کرد و ایزوفرم های جدیدی از PPO را القا کرد. در مقابل، القای پراکسیداسیون لیپید و فعالیت های CAT، SOD و POD در میوه هایی که با آنتاگونیست *C. laurentii* به تنهایی تلقیح شده بودند، کم بود، اگرچه هیچ تغییر قابل توجهی در ایزوآنزیم های PPO مشاهده نشد (Wang and Tian, ۲۰۰۸).

مخمر *Pichia membranefaciens* در مبارزه با پوسیدگی ریزوپوس در هلو بسیار مؤثر بوده است. علاوه بر این، به نظر می رسد که این مخمر می تواند به طور بالقوه فعالیت آنزیم های مرتبط با دفاع، از جمله PAL، POD، PPO و CAT را افزایش دهد (Zhang et al., ۲۰۲۰). افزودن ۰/۲ میلی گرم در میلی لیتر BTH فعالیت مهار زیستی *P. membranefaciens* را در برابر کپک آبی در هلو بهبود بخشید. این تیمار ترکیبی اثر هم افزایی بر القای فعالیت های CAT، APX، CHI، SOD و GLU داشت که مقاومت میوه در برابر بیماری را در مقایسه با BTH یا مخمر به تنهایی افزایش داد. همچنین منجر به قطر کمتر ضایعات و کاهش بروز کپک آبی در میوه های هلو شد. علاوه بر این، تیمار ترکیبی پس از ۶ روز نگهداری در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، تأثیر نامطلوبی بر پارامترهای کیفی هلو، از جمله سفتی، محتوای TSS، اسیدیته قابل تیتراسیون و محتوای ویتامین C نداشت. این

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از BTH می‌تواند فعالیت زیستی *P. membranefaciens* را افزایش دهد، اما تحقیقات بیشتری برای تعیین اینکه آیا تولید باقیمانده BTH را کاهش می‌دهد یا خیر، مورد نیاز است (Cao et al, ۲۰۱۱).

بنابراین، نشان داده شده است که *Pichia guilliermondii* بیان ژن PAL را تحریک کرده و تجمع ترکیبات فنلی کل، فلاونوئیدهای کل و ترکیبات فنلی را افزایش می‌دهد (Li et al, ۲۰۲۳). افزایش قابل توجهی در محتوای اسید سالیسیلیک درون‌زا در هلوهای آلوده به *R. stolonifer* و *P. expansum* تحریک شده و با *P. guilliermondii* تیمار شده است (Zhao et al, ۲۰۲۰). علاوه بر *P. membranefaciens*، به نظر می‌رسد *Kloeckera apiculata* قادر به انگلی کردن *M. fructicola* است. آزمایش‌های درون‌تنی نشان داد که حضور آن‌ها منجر به کاهش قابل توجهی در میزان پوسیدگی ناشی از *M. fructicola* شده است، با کاهش ۷۶ درصد برای *P. membranefaciens* و ۶۵/۸ درصد برای *K. apiculata*. علاوه بر این، نشان داده شده است که *K. apiculata* قادر به اتصال به هیف‌های *M. fructicola* است (Zhang et al, ۲۰۱۷).

تیمارهای مخمری

(Yeast-Based Biocontrol)

مهار بیولوژیک عوامل بیماری‌زای پس از برداشت با استفاده از مخمرهای آنتاگونیست، به عنوان یک راهبرد کارآمد و امیدوارکننده در کاهش ضایعات میوه مطرح شده است. سویه *Candida laurentii* به منظور

کنترل کپک خاکستری (*Botrytis cinerea*)، کپک آبی (*Penicillium expansum*) و کپک ریزوپوس (*Rhizopus stolonifer*) بر روی هلوپس از برداشت مورد بررسی قرار گرفته است. غلظت 1×10^9 CFU/mL برای این مخمر، برای مهار کامل کپک خاکستری پس از ۴ روز انکوباسیون در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد کافی بود. همچنین، انبارداری هلوهای تیمار شده با *C. laurentii* در دمای ۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ روز و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ روز، تأثیر نامطلوبی بر ویژگی‌های کیفی میوه نداشت (Zhang et al, ۲۰۰۷).

C. laurentii توانایی قابل توجهی در کاهش پوسیدگی قهوه‌ای ناشی از *Monilinia fructicola* در هر دودمای انبارداری ۲۵ و ۱ درجه سانتی‌گراد نشان داد. اگرچه جمعیت مخمر در حضور عامل بیماری‌زا با سرعت بیشتری افزایش یافت، اما متعاقباً به سرعت کاهش یافت. در میوه‌های تلقیح شده با *M. fructicola* (به تنهایی یا همراه با *C. laurentii*)، افزایش پراکسیداسیون لیپید و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر SOD، CAT و POD مشاهده شد. علاوه بر این، الگوی ایزوآنزیم پلی‌فنل اکسیداز (PPO) پس از ظهور علائم بیماری به طور معنی‌داری تغییر کرده و ایزوفرم‌های جدیدی از PPO القا گردید. در مقابل، در میوه‌هایی که صرفاً با آنتاگونیست *C. laurentii* تلقیح شده بودند، القای پراکسیداسیون لیپید و فعالیت آنزیم‌های SOD، CAT و POD کاهش یافت و تغییر قابل توجهی در ایزوآنزیم‌های PPO مشاهده نشد (Wang and Tian, ۲۰۰۸).

مخمر *Pichia membranefaciens* در کنترل پوسیدگی ریزوپوس در هلو اثر بخشی بالایی نشان داده است. این مخمر همچنین پتانسیل افزایش فعالیت آنزیم های مرتبط با دفاع گیاهی، شامل CAT، POD، PAL و PPO را داراست (Zhang et al., ۲۰۲۰). افزودن ۰/۲ میلی گرم بر میلی لیتر از ترکیب BTH (بنزوتیازول) به تیمار مخمری، فعالیت مهار زیستی *P. membranefaciens* علیه کپک آبی در هلو را بهبود بخشید. این تیمار ترکیبی اثر هم افزایی (Synergistic effect) بر القای فعالیت های GLU، SOD، CAT، APX، CHI و SOD داشت که منجر به افزایش مقاومت میوه در برابر بیماری در مقایسه با تیمارهای منفرد BTH یا مخمر گردید. همچنین، این تیمار منجر به کاهش قطر ضایعات و میزان بروز کپک آبی در هلو شد. قابل ذکر است که این تیمار ترکیبی، پس از ۶ روز انبارداری در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، تأثیر نامطلوبی بر پارامترهای کیفی هلو (مانند سفتی، محتوای TSS، اسیدیته قابل تیتراسیون و ویتامین C) نداشت. این یافته ها حاکی از آن است که BTH می تواند فعالیت زیستی *P. membranefaciens* را تقویت کند، اما تحقیقات بیشتری برای ارزیابی پتانسیل کاهش بقایای BTH ضروری است (Cao et al., ۲۰۱۱).

در ادامه، سویه *Pichia guilliermondii* قادر به تحریک بیان ژن PAL (فنیل آلانین آمونیا لیا ز) و افزایش تجمع ترکیبات فنلی کل، فلاونوئیدها و فنول ها بوده است (Li et al., ۲۰۲۳). همچنین، سطوح اسید سالیسیلیک درون زار در هلوهای آلوده به *R. stolonifer* و *P. expansum*، در تیمار با *P.*

guilliermondii به طور قابل توجهی افزایش یافت (Zhao et al., ۲۰۲۰). علاوه بر *P. membranefaciens*، مخمر *Kloeckera apiculata* نیز قادر به انگل زایی (Entomopathogenicity) بر روی *M. fructicola* است. آزمایش های *in vitro* نشان داد که حضور این مخمر منجر به کاهش معنی دار پوسیدگی ناشی از *M. fructicola* شد، به طوری که این کاهش برای *P. membranefaciens* برابر با ۷۶ درصد و برای *K. apiculata* برابر با ۶۵/۸ درصد بود. شواهد حاکی از توانایی *K. apiculata* در اتصال به هیف های *M. fructicola* است (Zhang et al., ۲۰۱۷).



نتیجه‌گیری

مثبتی نشان داده‌اند، اما موانعی چون هزینه، پایداری و تکرارپذیری، پذیرش صنعتی آن‌ها را محدود کرده است. چالش‌های پیش رو شامل کمبود مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مؤثر، درک ناکافی از میکروبیوم میوه، استانداردسازی عوامل مهار زیستی و نیاز به بررسی اثرات هم‌افزایی و پیامدهای حسی-تغذیه‌ای درمان‌ها است. آینده، نویدبخش توسعه محصولات مهار زیستی پیشرفته، استفاده از فناوری نانو، AI/ML برای پایش بیماری‌ها، ادغام ابزارهای “omics” و بهبود سیستم‌های بسته‌بندی است. هدف نهایی، تضمین ایمنی و کیفیت میوه، کاهش ضایعات و دستیابی به کشاورزی پایدار از طریق همکاری‌های میان‌رشته‌ای و پر کردن شکاف میان تحقیق و کاربرد تجاری است.

بیماری‌های قارچی پس از برداشت، از جمله پوسیدگی‌های ناشی از *Monilinia spp.*، *Penicillium expansum*، *Rhizopus stolonifer* و *Botrytis cinerea*، چالش عمده‌ای در تولید میوه هلو محسوب می‌شوند. در حالی که قارچ‌کش‌های شیمیایی سابقه‌ای طولانی در کنترل این بیماری‌ها دارند، ظهور مقاومت، محدودیت‌های نظارتی و تقاضای مصرف‌کننده برای محصولات سالم، نیاز به روش‌های جایگزین و پایدارتر را ضروری ساخته است. روش‌های نویدبخشی چون مهار زیستی (با مخمرها و باکتری‌ها)، تکنیک‌های فیزیکی (UV-C، اتمسفرهای کنترل‌شده) و محصولات طبیعی (اسانس‌ها، عصاره‌های گیاهی) نتایج

- Abdipour, M.; Hosseinfarahi, M.; Naseri, N. Combination Method of UV-B and UV-C Prevents Post-Harvest Decay and Improves Organoleptic Quality of Peach Fruit. *Sci. Hortic.* 108564 ,256 ,2019.
- Aiello, D.; Restuccia, C.; Stefani, E.; Vitale, A.; Cirvilleri, G. Postharvest Biocontrol Ability of *Pseudomonas synxantha* against *Monilinia fructicola* and *Monilinia fructigena* on Stone Fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 89–83 ,149 ,2019.
- Alamri, S.A.M.; Hashem, M.; Alqahtani, M.S.A.; Alshehri, A.M.A.; Mohamed, Z.A.; Ziedan, E.S.H. Formulation of Mint and Thyme Essential Oils with Arabic Gum and Tween to Enhance Their Efficiency in the Control of Postharvest Rots of Peach Fruit. *Can. J. Plant Pathol.* 343–330 ,42 ,2020.
- Al-Hindi, R.R.; Al-Najada, A.R.; Mohamed, S.A. Isolation and Identification of Some Fruit Spoilage Fungi: Screening of Plant Cell Wall Degrading Enzymes. *Afr. J. Microbiol. Res.* 448–443 ,5 ,2011.
- Amiri, A.; Chai, W.; Schnabel, G. Effect of Nutrient Status, pH, Temperature and Water Potential on Germination and Growth of *Rhizopus stolonifer* and *Gilbertella Persicaria*. *J. Plant Pathol.* 612–603 ,93 ,2011.
- Amselem, J.; Cuomo, C.A.; van Kan, J.A.; Viaud, M.; Benito, E.P.; Couloux, A.; Coutinho, P.M.; de Vries, R.P.; Dyer, P.S.; Fillinger, S. Genomic Analysis of the Necrotrophic Fungal Pathogens *Sclerotinia Sclerotiorum* and *Botrytis cinerea*. *PLoS Genet.* 7 ,2011, e1002230.
- Arrebola, E.; Sivakumar, D.; Bacigalupo, R.; Korsten, L. Combined Application of Antagonist *Bacillus amyloliquefaciens* and Essential Oils for the Control of Peach Postharvest Diseases. *Crop Prot.* 377–369 ,29 ,2010.
- Barnett, H.L.; Hunter, B.B. *Illustrated Genera of Imperfect Fungi*; APS Press: St. Paul, MN, USA, 1998.
- Bassetto, E.; Amorim, L.; Benato, E.A.; Gonçalves, F.P.; Lourenço, S.A. Effect of UV-C Irradiation on Postharvest Control of Brown Rot (*Monilinia fructicola*) and Soft Rot (*Rhizopus stolonifer*) of Peaches. *Fitopatol. Bras.* ,2007 399–393 ,32.
- Bellamy, S.; Shaw, M.; Xu, X. Using Microbes to Suppress Overwintering Inoculum of *Monilinia Laxa* on Mummified Fruits and to Protect Cherry Blossoms and Fruit from Infection. *Front. Hortic.* 1504505 ,3 ,2024.
- Benitez1i, M.M.; Saludes, B.; Rivera, F.R.; Adonis, M.; Sudaria, E.H.; Sudaria, E.; Salabao, A. 1Post-Harvest Characteristics of Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) as Affected by Treatment with Hot Water and Sodium Hypochlorite under Three Simple Evaporative Coolers. *Asian J. Resour. Manag. Gov.* 24 ,1 ,2021.
- Bernat, M.; Segarra, J.; Xu, X.-M.; Casals, C.; Usall, J. Influence of Temperature on Decay, Mycelium Development and Sporodochia Production Caused by *Monilinia fructicola* and *M. laxa* on Stone Fruits. *Food Microbiol.* ,2017 118–112 ,64.
- Billard, A. Fenhexamid: Mode d'Action et Résistance Chez le Complexe d'Espèces *Botrytis* spp., Responsable de La Pourriture Grise de La Vigne; Université Paris Sud-Paris 11: Paris, France, 2011.
- Bonaterra, A.; Mari, M.; Casalini, L.; Montesinos, E. Biological Control of *Monilinia laxa* and *Rhizopus stolonifer* in Postharvest of Stone Fruit by *Pantoea Agglomerans* EPS125 and Putative Mechanisms of Antagonism. *Int. J. Food Microbiol.* 104–93 ,84 ,2003.
- Cao, S.; Yang, Z.; Hu, Z.; Zheng, Y. The Effects of the Combination of *Pichia Membranefaciens* and BTH on Controlling of Blue Mould Decay Caused by *Penicillium expansum* in Peach Fruit. *Food Chem.* 996–991 ,124 ,2011.
- Casals, C.; Viñas, I.; Torres, R.; Grier, C.; Usall, J. Effect of Temperature and Water Activity on in Vitro Germination of *Monilinia* spp. *J. Appl. Microbiol.* 54–47 ,108 ,2010.
- Ciliberti, N.; Fermaud, M.; Roudet, J.; Languasco, L.; Rossi, V. Environmental Effects on the Production of *Botrytis cinerea* Conidia on Different Media, Grape Bunch Trash, and Mature Berries: Sporulation Patterns in *Botrytis*

- cinerea. Aust. J. Grape Wine Res. 270–262,22,2016.
- Cindi, M.D.; Soundy, P.; Romanazzi, G.; Sivakumar, D. Different Defense Responses and Brown Rot Control in Two *Prunus Persica* Cultivars to Essential Oil Vapours after Storage. *Postharvest Biol. Technol.* 17–9,119,2016.
 - De Cal, A.; Gell, I.; Usall, J.; Viñas, I.; Melgarejo, P. First Report of Brown Rot Caused by *Monilinia fructicola* in Peach Orchards in Ebro Valley, Spain. *Plant Dis.* 763,93,2009.
 - Di Francesco, A.; Ippolito, A.; Romanazzi, G. Heat Treatments for the Control of Postharvest Decay of Fresh Fruit: Case Studies of Peach Brown Rot, Kiwifruit Gray Mold and Citrus Green and Blue Molds. *Postharvest Biol. Technol.* 113868,231,2026.
 - Drogoudi, P.; Pantelidis, G.; Thomidis, T. Impact of Ozonated Water on Brown Rot Development and Storage Potential of Nectarine and Plum. *Ozone Sci. Eng.* 418–410,45,2023.
 - El Maazouzi, S.; Asfers, A.; Cano, A.; Hernández-Ruiz, J.; Hamdache, A.; Ait Houssa, A.; Ezziyyani, M.; Arnao, M.B. Peach Postharvest Fungal Diseases: Sustainable Management and an Integrative Review of Emerging Strategies. *Crops* 84,5,2025.
 - Elshafie, H.S.; Mancini, E.; Camele, I.; De Martino, L.; De Feo, V. In Vivo Antifungal Activity of Two Essential Oils from Mediterranean Plants against Postharvest Brown Rot Disease of Peach Fruit. *Ind. Crops Prod.* 15–11,66,2015.
 - Errampalli, D. *Penicillium expansum* (Blue Mold). In *Postharvest Decay*; Bautista-Baños, S., Ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA, 2014; pp. 231–189.
 - FAOSTAT. Available online: https://www.fao.org/faostat/fr/#rankings/countries_by_commodity (accessed on 14 September 2025).
 - Fukumori, Y.; Nakajima, M.; Akutsu, K. Microconidia Act the Role as Spermatia in the Sexual Reproduction of *Botrytis cinerea*. *J. Gen. Plant Pathol.* 260–256,70,2004.
 - Guentzel, J.L.; Lam, K.L.; Callan, M.A.; Emmons, S.A.; Dunham, V.L. Postharvest Management of Gray Mold and Brown Rot on Surfaces of Peaches and Grapes Using Electrolyzed Oxidizing Water. *Int. J. Food Microbiol.*,2010 60–54,143.
 - Halfeld-Vieira, B.A.; Terao, D.; Nechet, K.L. First Report of *Geotrichum candidum* Causing Sour-Rot of Melon in Brazil. *Plant Dis.* 1537,104,2020.
 - Holmes, G.J.; Stange, R.R. Influence of Wound Type and Storage Duration on Susceptibility of Sweetpotatoes to *Rhizopus* Soft Rot. *Plant Dis.* 348–345,86,2002.
 - Hua, L.; Yong, C.; Zhanquan, Z.; Boqiang, L.; Guozheng, Q.; Shiping, T. Pathogenic Mechanisms and Control Strategies of *Botrytis cinerea* Causing Post-Harvest Decay in Fruits and Vegetables. *Food Qual. Saf.* 119–111,2,2018.
 - Huan, C.; Han, S.; Jiang, L.; An, X.; Yu, M.; Xu, Y.; Ma, R.; Yu, Z. Postharvest Hot Air and Hot Water Treatments Affect the Antioxidant System in Peach Fruit during Refrigerated Storage. *Postharvest Biol. Technol.* 14–1,126,2017.
 - Jacob, J.J.; Bevan, J.S. Should All Patients with Acromegaly Receive Somatostatin Analogue Therapy before Surgery and, If so, for How Long? *Clin. Endocrinol.* 817–812,81,2014.
 - Jarvis, W.R. *Botryotinia and Botrytis Species: Taxonomy, Physiology and Pathogenicity—A Guide to the Literature*; Agriculture and Agri Food Canada: Ottawa, ON, Canada, 1977.
 - Jay, A.; Jordan, D.F.; Gerstein, A.; Landry, C.R. The Role of Gene Copy Number Variation in Antimicrobial Resistance in Human Fungal Pathogens. *npj Antimicrob. Resist.* 1,3,2025.
 - Jemric, T.; Ivic, D.; Fruk, G.; Matijas, H.S.; Cvjetkovic, B.; Bupic, M.; Pavkovic, B. Reduction of Postharvest Decay

- of Peach and Nectarine Caused by *Monilinia laxa* Using Hot Water Dipping. *Food Bioprocess Technol.*, 4, 2011 154–149.
- Ji, N.; Wang, J.; Zuo, X.; Li, Y.; Li, M.; Wang, K.; Jin, P.; Zheng, Y. PpWRKY45 Is Involved in Methyl Jasmonate Primed Disease Resistance by Enhancing the Expression of Jasmonate Acid Biosynthetic and Pathogenesis-Related Genes of Peach Fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 111390, 172, 2021.
 - Kaur, J.; Nobile, C.J. Antifungal Drug-Resistance Mechanisms in *Candida* Biofilms. *Curr. Opin. Microbiol.*, 2023 102237, 71.
 - Lagopodi, A.L.; Cetiz, K.; Koukounaras, A.; Sfakiotakis, E.M. Acetic Acid, Ethanol and Steam Effects on the Growth of *Botrytis cinerea* in Vitro and Combination of Steam and Modified Atmosphere Packaging to Control Decay in Kiwifruit. *J. Phytopathol.* 84–79, 157, 2009.
 - Lahlali, R.; Friel, D.; Serrhini, M.N.; Jijakli, M. Effect of Incubation Temperature and Relative Humidity on Lesion Diameter of *Botrytis cinerea* Pers. and *Penicillium expansum* Link. on Apple Fruits. *Commun. Agric. Appl. Biol. Sci.* 1161, 71, 2006.
 - Lesik, K. *Monilinia* Species Causing Fruit Brown Rot, Blossom and Twig Blight in Apple Orchards in Belarus. *Proc. Latv. Acad. Sci. Sect. B Nat. Exact Appl. Sci.* 194–192, 67, 2013.
 - Li, C.; Wang, K.; Huang, Y.; Lei, C.; Cao, S.; Qiu, L.; Xu, F.; Jiang, Y.; Zou, Y.; Zheng, Y. Activation of the BABA-induced Priming Defence through Redox Homeostasis and the Modules of TGA1 and MAPKK5 in Postharvest Peach Fruit. *Mol. Plant Pathol.* 1640–1624, 22, 2021.
 - Li, C.H.; Du, M.Y.; Wang, K.T. 4,2-Epibrassinolide Activates Priming Resistance against *Rhizopus stolonifer* Infection in Peach Fruit. *Acta Aliment.* 143–135, 49, 2020.
 - Li, Y.; Hind, C.; Furner-Pardoe, J.; Sutton, J.M.; Rahman, K.M. Understanding the Mechanisms of Resistance to Azole Antifungals in *Candida* Species. *JAC-Antimicrob. Resist.* 7, 2025, d1af106.
 - Li, Y.; Ji, N.; Zuo, X.; Hou, Y.; Zhang, J.; Zou, Y.; Jin, P.; Zheng, Y. PpMYB308 Is Involved in *Pichia guilliermondii*-Induced Disease Resistance against *Rhizopus* Rot by Activating the Phenylpropanoid Pathway in Peach Fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 112115, 195, 2023.
 - Li, Z.; Nie, J.; Yan, Z.; Cheng, Y.; Lan, F.; Huang, Y.; Chen, Q.; Zhao, X.; Li, A. A Monitoring Survey and Dietary Risk Assessment for Pesticide Residues on Peaches in China. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 162–152, 97, 2018.
 - Liu, C.; Yin, X.; Wang, Q.; Peng, Y.; Ma, Y.; Liu, P.; Shi, J. Antagonistic Activities of Volatiles Produced by Two *Bacillus* Strains against *Monilinia fructicola* in Peach Fruit. *J. Sci. Food Agric.* 5763–5756, 98, 2018.
 - Liu, H.; Cao, J.; Jiang, W. Evaluation and Comparison of Vitamin C, Phenolic Compounds, Antioxidant Properties and Metal Chelating Activity of Pulp and Peel from Selected Peach Cultivars. *LWT-Food Sci. Technol.*, 63, 2015 1048–1042.
 - Liu, H.X.; Wang, B.G.; Bi, Y.; Luo, Y.B.; Jiang, W.B. Improving Disease Resistance in Peach Fruit during Storage Using Benzo-(1,2,3)-Thiodiazole-7-Carbothioic Acid S-Methyl Ester (BTH). *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 740–736, 80, 2005.
 - Luciano-Rosario, D.; Keller, N.P.; Jurick, W.M. *Penicillium expansum*: Biology, Omics, and Management Tools for a Global Postharvest Pathogen Causing Blue Mould of Pome Fruit. *Mol. Plant Pathol.* 1404–1391, 21, 2020.
 - Lugtenberg, B.; Kamilova, F. Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria. *Annu. Rev. Microbiol.* 556–541, 63, 2009.
 - Malandrakis, A.A.; Lafka, E.; Flouri, F. Impact of Fludioxonil Resistance on Fitness and Cross-Resistance Profiles of *Alternaria solani* Laboratory Mutants. *Eur. J. Plant Pathol.* 676–665, 161, 2021.

- Margosan, D.A.; Smilanick, J.L.; Simmons, G.F.; Henson, D.J. Combination of Hot Water and Ethanol to Control Postharvest Decay of Peaches and Nectarines. *Plant Dis.* 1409–1405,81,1997.
- Mena-Nevarez, G.; Valencia-Del Toro, G.; Piña-Guzmán, A.B.; Villanueva-Arce, R.; Durán-Páramo, E.; Robles-Martínez, F. Degradation Capacity of Fungi (*Colletotrichum* sp., *Penicillium* sp. and *Rhizopus* sp.) on Mangoes and Oranges. *Afr. J. Agric. Res.* 4574–4564,7,2012.
- Obi, V.I.; Barriuso, J.J.; Gogorcena, Y. Peach Brown Rot: Still in Search of an Ideal Management Option. *Agriculture* 125,8,2018.
- Okull, D.O.; Demirci, A.; Rosenberger, D.; LaBorde, L.F. Susceptibility of *Penicillium expansum* Spores to Sodium Hypochlorite, Electrolyzed Oxidizing Water, and Chlorine Dioxide Solutions Modified with Nonionic Surfactants. *J. Food Prot.* 1948–1944,69,2006.
- Oliveira Lino, L.; Pacheco, I.; Mercier, V.; Faoro, F.; Bassi, D.; Bornard, I.; Quilot-Turion, B. Brown Rot Strikes Prunus Fruit: An Ancient Fight Almost Always Lost. *J. Agric. Food Chem.* 4047–4029,64,2016.
- Palou, L.; Crisosto, C.H.; Smilanick, J.L.; Adaskaveg, J.E.; Zoffoli, J.P. Effects of Continuous 0.3 Ppm Ozone Exposure on Decay Development and Physiological Responses of Peaches and Table Grapes in Cold Storage. *Postharvest Biol. Technol.* 48–39,24,2002.
- Pavanello, E.P.; Brackmann, A.; da Costa, I.F.D.; Both, V.; Ludwig, V. Use of Sodium Metasilicate for Management of Peach Brown Rot. *Pesqui. Agropecuária Trop.* 253–245,46,2016.
- Prusky, D.; Lichter, A. Activation of Quiescent Infections by Postharvest Pathogens during Transition from the Biotrophic to the Necrotrophic Stage. *FEMS Microbiol. Lett.* 8–1,268,2007.
- Razzaq, A. *Penicillium*|Life Cycle|Importance|Occurrence|. Study Solut. 2016. Available online: <https://istudy.pk/penicillium/> (accessed on 5 November 2025).
- Rij, R.E.; Forney, C.F. Phytotoxicity of Vapour Phase Hydrogen Peroxide to Thompson Seedless Grapes and *Botrytis cinerea* Spores. *Crop Prot.* 135–131,14,1995.
- Saleh, I.; Goktepe, I. The Characteristics, Occurrence, and Toxicological Effects of Patulin. *Food Chem. Toxicol.* 311–301,129,2019.
- Sattar, A.; Riaz, A.; Mehmood, N.; Altaf, R.; Afzal, A.; Jabeen, Z. Effect of Incubation Temperature on Lesion Diameter of *Penicillium expansum* on Apple Fruit Varieties. *Int. J. Biosci.* 5–1,12,2018.
- Schebesta, H.; Bernaz, N.; Macchi, C. The European Union Farm to Fork Strategy. *Eur. Food Feed Law Rev.* ,2020 427–420,15.
- Schipper, M.A.A. A Revision of the Genus *Rhizopus*. I. The *Rhizopus stolonifer*-Group and *Rhizopus oryzae*. *Stud. Mycol.* 19,25,1984.
- Shalan, A.M. Post-Harvest Applications by Calcium Chloride and Ascorbic Acid Enhanced Storage Ability of Peach Fruits Cv. Floridaprince. *J. Plant Prod.* 188–179,11,2020.
- Shi, J.Y.; Liu, N.; Gu, R.X.; Zhu, L.Q.; Zhang, C.; Wang, Q.G.; Lei, Z.H.; Liu, Y.Y.; Ren, J.Y. Signals Induced by Exogenous Nitric Oxide and Their Role in Controlling Brown Rot Disease Caused by *Monilinia fructicola* in Postharvest Peach Fruit. *J. Gen. Plant Pathol.* 76–68,81,2015.
- Sholberg, P.L. Fumigation of Fruit with Short-Chain Organic Acids to Reduce the Potential of Postharvest Decay. *Plant Dis.* 693–689,82,1998.
- Sholberg, P.L.; Gaunce, A.P. Fumigation of Stonefruit with Acetic Acid to Control Postharvest Decay. *Crop Prot.*

- 686–681,15,1996.
- Sisquella, M.; Casals, C.; Viñas, I.; Teixidó, N.; Usall, J. Combination of Peracetic Acid and Hot Water Treatment to Control Postharvest Brown Rot on Peaches and Nectarines. *Postharvest Biol. Technol.* 8–1,83,2013.
 - Sohail, M.; Ayub, M.; Khalil, S.A.; Zeb, A.; Ullah, F.; Afridi, S.R.; Ullah, R. Effect of Calcium Chloride Treatment on Post Harvest Quality of Peach Fruit during Cold Storage. *Int. Food Res. J.* 2225,22,2015.
 - Sun, M.-H.; Li, X.-H.; Xu, Y.; Xu, Y.; Pan, Z.-N.; Sun, S.-C. Citrinin Exposure Disrupts Organelle Distribution and Functions in Mouse Oocytes. *Environ. Res.* 109476,185,2020.
 - Swingle, D.B. Formation of the Spores in the Sporangia of *Rhizopus nigricans* and of *Phycomyces Nitens*; US Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1903.
 - Syamaladevi, R.M.; Lupien, S.L.; Bhunia, K.; Sablani, S.S.; Dugan, F.; Rasco, B.; Killinger, K.; Dhingra, A.; Ross, C. UV-C Light Inactivation Kinetics of *Penicillium expansum* on Pear Surfaces: Influence on Physicochemical and Sensory Quality during Storage. *Postharvest Biol. Technol.* 32–27,87,2014.
 - Tan, K.K.; Epton, H.A.S. Effect of Light on the Growth and Sporulation of *Botrytis cinerea*. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 157–145,61,1973.
 - Tannous, J.; Atoui, A.; El Khoury, A.; Francis, Z.; Oswald, I.P.; Puel, O.; Lteif, R. A Study on the Physicochemical Parameters for *Penicillium expansum* Growth and Patulin Production: Effect of Temperature, pH, and Water Activity. *Food Sci. Nutr.* 622–611,4,2016.
 - Tannous, J.; Keller, N.P.; Atoui, A.; El Khoury, A.; Lteif, R.; Oswald, I.P.; Puel, O. Secondary Metabolism in *Penicillium expansum*: Emphasis on Recent Advances in Patulin Research. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2098–2082,58,2018.
 - Tsao, R.; Zhou, T. Antifungal Activity of Monoterpenoids against Postharvest Pathogens *Botrytis cinerea* and *Monilinia fructicola*. *J. Essent. Oil Res.* 121–113,12,2000.
 - van Kan, J.A. Infection Strategies of *Botrytis cinerea*. In *Proceedings of the VIII International Symposium on Postharvest Physiology of Ornamental Plants*, Doorwerth, The Netherlands, 14–10 August 2003; Volume 669, pp. 90–77.
 - Vazhacharikal, P.J.; Mathew, J.J.; Sajeshkumar, N.K.; Prathap, P. Effect of Concentration and pH on the Preservative Action of Calcium Propionate against Black Bread Mold (*Rhizopus stolonifer*) in Kerala. *CIBTech J. Biotechnol.* 12–1,4,2015.
 - Verhagen, B.W.; Trotel-Aziz, P.; Couderchet, M.; Höfte, M.; Aziz, A. *Pseudomonas* spp.-Induced Systemic Resistance to *Botrytis cinerea* Is Associated with Induction and Priming of Defence Responses in Grapevine. *J. Exp. Bot.* 260–249,61,2010.
 - Villarino, M.; Melgarejo, P.; Usall, J.; Segarra, J.; De Cal, A. Primary Inoculum Sources of *Monilinia* spp. in Spanish Peach Orchards and Their Relative Importance in Brown Rot. *Plant Dis.* 1054–1048,94,2010.
 - Wang, C.W.; Ai, J.; Lv, H.Y.; Qin, H.Y.; Yang, Y.M.; Liu, Y.X.; Fan, S.T. First Report of *Penicillium expansum* Causing Postharvest Decay on Stored Kiwifruit (*Actinidia arguta*) in China. *Plant Dis.* 1037,99,2015.
 - Wang, L.; Jin, P.; Wang, J.; Gong, H.; Zhang, S.; Zheng, Y. Hot Air Treatment Induces Resistance against Blue Mold Decay Caused by *Penicillium expansum* in Sweet Cherry (*Prunus cerasus* L.) Fruit. *Sci. Hortic.* 80–74,189,2015.
 - Wang, X.; Zhu, J.; Wei, H.; Ding, Z.; Li, X.; Liu, Z.; Wang, H.; Wang, Y. Biological Control Efficacy of *Bacillus licheniformis* HG03 against Soft Rot Disease of Postharvest Peach. *Food Control.* 109402,145,2023.
 - Wang, Y.; Tian, S. Interaction between *Cryptococcus laurentii*, *Monilinia fructicola*, and Sweet Cherry Fruit at

- Different Temperatures. Agric. Sci. China 57–48,7,2008.
- Williamson, B.; Tudzynski, B.; Tudzynski, P.; Van Kan, J.A.L. Botrytis cinerea: The Cause of Grey Mould Disease. Mol. Plant Pathol. 580–561,8,2007.
 - Wojtaszek, P. Oxidative Burst: An Early Plant Response to Pathogen Infection. Biochem. J. 692–681,322,1997.
 - Yang, M.; Zhang, Y.; Tan, X.; Li, L.; OuYang, Q.; Tao, N. Sodium Cuminate Inhibits the Mycelial Growth of Penicillium digitatum by Inducing Oxidative Stress and Damaging the Cell Membrane. J. Fungi 612,11,2025.
 - Yoder, O.C.; Whalen, M.L. Factors Affecting Postharvest Infection of Stored Cabbage Tissue by Botrytis cinerea. Can. J. Bot. 699–691,53,1975.
 - Yoshimi, A.; Kojima, K.; Takano, Y.; Tanaka, C. Group III Histidine Kinase Is a Positive Regulator of Hog1-Type Mitogen-Activated Protein Kinase in Filamentous Fungi. Eukaryot Cell 1828–1820,4,2005.
 - Zhang, H.; Qiu, Y.; Li, M.; Song, F.; Jiang, M. Functions of Pipecolic Acid on Induced Resistance against Botrytis cinerea and Pseudomonas syringae pv. tomato DC3000 in Tomato Plants. J. Phytopathol. 600–591,168,2020.
 - Zhang, H.; Zheng, X.; Yu, T. Biological Control of Postharvest Diseases of Peach with Cryptococcus laurentii. Food Control 291–287,18,2007.
 - Zhang, J.; Xie, J.; Zhou, Y.; Deng, L.; Yao, S.; Zeng, K. Inhibitory Effect of Pichia Membranaefaciens and Kloeckera apiculata against Monilinia fructicola and Their Biocontrol Ability of Brown Rot in Postharvest Plum. Biol. Control 58–51,114,2017.
 - Zhang, S.; Zheng, Q.; Xu, B.; Liu, J. Identification of the Fungal Pathogens of Postharvest Disease on Peach Fruits and the Control Mechanisms of Bacillus subtilis JK-14. Toxins 322,11,2019.
 - Zhang, W.; Jiang, H.; Cao, J.; Jiang, W. UV-C Treatment Controls Brown Rot in Postharvest Nectarine by Regulating ROS Metabolism and Anthocyanin Synthesis. Postharvest Biol. Technol. 111613,180,2021.
 - Zhang, X.; Wu, F.; Gu, N.; Yan, X.; Wang, K.; Dhanasekaran, S.; Gu, X.; Zhao, L.; Zhang, H. Postharvest Biological Control of Rhizopus Rot and the Mechanisms Involved in Induced Disease Resistance of Peaches by Pichia Membranefaciens. Postharvest Biol. Technol. 111146,163,2020.
 - Zhang, Y.; Zeng, L.; Yang, J.; Zheng, X.; Yu, T. 6-Benzylaminopurine Inhibits Growth of Monilinia fructicola and Induces Defense- Related Mechanism in Peach Fruit. Food Chem. 217–210,187,2015.
 - Zhao, X.; Zhang, W.; Yin, X.; Su, M.; Sun, C.; Li, X.; Chen, K. Phenolic Composition and Antioxidant Properties of Different Peach [Prunus persica (L.) Batsch] Cultivars in China. Int. J. Mol. Sci. 5778–5762,16,2015.
 - Zhao, Y.; Li, Y.; Zhang, B. Induced Resistance in Peach Fruit as Treated by Pichia guilliermondii and Their Possible Mechanism. Int. J. Food Prop. 51–34,23,2020.
 - Zhou, D.; Wang, Z.; Li, M.; Xing, M.; Xian, T.; Tu, K. Carvacrol and Eugenol Effectively Inhibit Rhizopus stolonifer and Control Postharvest Soft Rot Decay in Peaches. J. Appl. Microbiol. 178–166,124,2018.

Abstract

Postharvest fungal diseases are one of the fundamental challenges in the supply chain, storage and marketability of peach (*Prunus persica*) fruit. The presence of effective pathogens such as *Monilinia* spp., *Penicillium expansum*, *Rhizopus stolonifera* and *Botrytis cinerea* leads to extensive economic losses worldwide. Although the traditional management of these diseases is mainly based on the use of chemical fungicides, the emergence of pathogen resistance, public health concerns and regulatory restrictions have seriously challenged the effectiveness of these methods. The present article reviews and evaluates new control approaches including chemical, physical and biological methods, with a particular focus on the use of plant essential oils, microbial antagonists, induction of systemic resistance and environmentally friendly disinfectants. The findings indicate that integrated management is the most promising path to achieving sustainability. Finally, emphasis on a detailed understanding of the mechanisms of contamination and environmental conditions governing the epidemiology of each pathogen underlies the design of efficient control strategies tailored to the dynamics of the disease.

Keywords: Plant Essential Oils, Postharvest Management, Pathogens, Biocontrol, Sustainable Management.