



# گیا پزشکی

فصلنامه علمی - ترویجی

گروه گیاهپزشکی دانشکدهگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

سال بیست و چهارم :: شماره هشتم :: زمستان 1404



## در این شماره می خوانیم:

- آشنایی با دستگاه‌های سم‌شناسی در بخش حشره‌شناسی
- نقش سیستم Quorum Sensing در بیماری‌زایی باکتری *Pectobacterium carotovorum*
- برهم‌کنش عوامل مهار زیستی؛ هم‌افزایی یا آنتاگونیسم؟
- عقیم‌سازی حشرات؛ روشی دوستدار محیط‌زیست برای مهار آفات
- تولید یک قاتل خاموش در صنعت تولید شاهدانه
- بیوجار؛ سد فیزیکی و محرک مقاومت درختان میوه در برابر آفات
- مدیریت پایدار مگس‌های میوه

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



## فصلنامه علمی - ترویجی گیاه پزشکی

گروه گیاه پزشکی دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

سال بیست و چهارم :: شماره هشتم :: زمستان ۱۴۰۴

شماره مجوز: ۲۹۲۲۹۹/۱۳

صاحب امتیاز: انجمن علمی دانشجویی گیاهپزشکی دانشگاه تهران

مدیر مسئول: آراین پورخاتون

سردبیر: دکتر امیر میرزادی گوهری

همکاران: افروز بوکان، نگار ناظمی، علیرضا عزمی، سید جواد نوروزیان، مانی جباری، میترا

جباری، آراین پورخاتون

کارشناس نشریه و مدیر تارنما: خانم نگار ناظمی

گرافیکست و صفحه آرا: خانه طراحان دانشجویی میعاد (علیرضا زارع)

با تشکر از: دکتر سید احسان ترابی، دکتر امید اتقیا و شرکت آریوزیست نهاد



سایت نشریه: [giahpezeshksj.ut.ac.ir](http://giahpezeshksj.ut.ac.ir)

مشخصات اعضای هیئت تحریریه و دبیران تخصصی در سایت نشریه قرار دارد

به نام پروردگاری که اندیشه را توان و قلم را معنا می بخشد

# سخن سردبیر!





جدی برای کشت‌های تجاری شاهدانه محسوب می‌شود و آگاهی از آن، ضرورتی انکارناپذیر برای فعالان این حوزه در ایران است. همچنین در این شماره، خواننده با دستگاه‌های کلیدی آزمایشگاه سم‌شناسی (مانند HPLC، الیزاریدر و اسپکتروفتومتر) آشنا می‌شود و از سوی دیگر، سفری به دنیای مولکولی باکتری *Pectobacterium carotovorum* خواهد داشت تا نقش شگفت‌انگیز سامانه‌های Quorum Sensing را در بیماری‌زایی این بیمارگر مهم از نزدیک نظاره کند.

امیدوارم مقالات این شماره برای شما پژوهشگران، دانشجویان و کارشناسان گیاه‌پزشکی سودمند بوده و جرقه‌ای باشد برای پژوهش‌های نو و کاربردی‌تر در عرصه حفاظت از گیاهان.

.....

◀ امیرمیرزادی گوهری؛ سردبیر فصلنامه گیاه‌پزشک

سلام و احترام به همراهان ارجمند فصل‌نامه «گیاه‌پزشک»؛

پیش‌روی شما، شماره هشتم نشریه «گیاه‌پزشک» است؛ نشریه‌ای که از دیرباز کوشیده است پلی میان پژوهش‌های کاربردی و نیازهای مزرعه و گلخانه باشد. در این شماره نیز کوشیده‌ایم تا با گزینش مقاله‌هایی از هر دو شاخه حشره‌شناسی و بیماری‌شناسی گیاهی، پنجره‌ای به سوی دانش روز و راهکارهای نوین در مهار آفات و بیماری‌های گیاهی بگشاییم. در سال‌های اخیر، رویکردهای سازگار با محیط زیست که بر دانش بوم‌شناختی تکیه دارند، جایگاه ویژه‌ای در مدیریت تلفیقی آفات یافته‌اند. از یک سو، شناخت دقیق عوامل مهار زیستی و برهم‌کنش‌های پیچیده میان آن‌ها، راه را برای افزایش کارایی برنامه‌های مهار زیست هموار می‌سازد. از سوی دیگر، روش‌هایی همچون عقیم‌سازی حشرات با اثربخشی تأییدشده در جهان، گزینه‌ای امیدبخش برای کاهش وابستگی به سموم شیمیایی در کشور ما نیز به شمار می‌رود. اما کشاورزی پایدار تنها به مهار آفات محدود نمی‌شود. شناسایی به موقع بیمارگرهای نوظهور، نقشی کلیدی در پیشگیری از خسارت‌های فاجعه‌بار اقتصادی ایفا می‌کند. مقاله «تولد یک قاتل خاموش در صنعت تولید شاهدانه»، ما را با پروتئید نهفته رازک (HLVd) آشنا می‌سازد؛ ویروئیدی که در سطح جهانی تهدیدی

# عقیم سازی حشرات؛

## روش دوستدار محیط زیست برای مهار زیستی آفات

◀ افروز بوکان؛ دانشجوی مقطع دکتری حشره شناسی کشاورزی، گروه گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و

منابع طبیعی، دانشگاه تهران

afrooz.boukan@ut.ac.ir

دریافت: ۵ دی ۱۴۰۴ ■ بازنگری: ۲۶ بهمن ۱۴۰۴ ■ پذیرش: ۲۸ بهمن ۱۴۰۴ ■ انتشار آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22059/giahpszhsj.2026.408867.1041>





## چکیده

راهکار عقیم‌سازی حشرات (Sterile Insect Technique; SIT) یک روش پایدار و دوستدار محیط‌زیست برای مهار زیستی آفات است. این روش با پرورش انبوه و عقیم‌سازی نرهای حشرات هدف و رهاسازی آن‌ها، چرخه تولیدمثل آفات را مختل کرده و جمعیت آن‌ها را بدون تأثیر منفی بر گونه‌های غیرهدف یا اکوسیستم‌های اطراف به‌طور تدریجی کاهش می‌دهد. در سطح جهانی، SIT در کنترل مگس‌های میوه و پشه‌های ناقل بیماری‌هایی مانند مالاریا و دنگی موفق بوده است. در ایران نیز مطالعات روی مگس زیتون، کرم گلوگاه انار و مگس میوه مدیترانه‌ای نشان داده‌اند که با رعایت دوزهای بهینه پرتودهی و طراحی دقیق برنامه، SIT می‌تواند کاهش جمعیت آفات و خسارت اقتصادی را به همراه داشته باشد. این روش فاقد باقی‌مانده‌های شیمیایی، محدود به گونه هدف و همسو با اهداف توسعه پایدار است و پذیرش بالایی در میان کشاورزان دارد. با سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها، آموزش نیروهای متخصص و برنامه‌ریزی منطقه‌ای، SIT می‌تواند به‌عنوان یک روش مکمل و پایدار در کاهش استفاده از سموم شیمیایی و ترویج کشاورزی دوستدار محیط‌زیست عمل کند.

کلمات کلیدی: عقیم‌سازی حشرات، مدیریت آفات، کشاورزی پایدار، مهار زیستی، محیط‌زیست

## مقدمه

افزایش جمعیت جهانی و نیاز فزاینده به تولید پایدار محصولات کشاورزی در کنار پیامدهای تغییرات اقلیمی، به یکی از جدی‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویک در حوزه امنیت غذایی تبدیل شده است. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، سالانه بین ۲۰ تا ۴۰ درصد از محصولات کشاورزی جهان به دلیل خسارات ناشی از آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز از بین می‌رود که این میزان، تهدید مستقیمی برای پایداری تولید غذا محسوب می‌شود (FAO, ۲۰۲۱). این خسارات نه تنها پیامدهای اقتصادی گسترده‌ای برای کشاورزان دارد، بلکه موجب افزایش قیمت مواد غذایی و تشدید نابرابری در دسترسی به غذا در کشورهای در حال توسعه می‌شود (Oerke, ۲۰۰۶).

در دهه‌های گذشته، راهبرد غالب در مدیریت آفات بر پایه مصرف گسترده آفت‌کش‌های شیمیایی بنا شده بود. اگرچه این ترکیبات در کوتاه‌مدت باعث افزایش عملکرد و کاهش سریع جمعیت آفات شدند، اما شواهد علمی نشان می‌دهد که استفاده مداوم از این مواد منجر به بروز مشکلاتی نظیر آلودگی منابع آب و خاک، نابودی حشرات مفید به‌ویژه گرده‌افشان‌ها، اختلال در زنجیره‌های غذایی و تهدید سلامت انسان شده است (Silva et al, ۲۰۰۵; Pimentel).

۲۰۱۹). همچنین، فشار انتخابی ناشی از مصرف مکرر سموم، موجب ظهور جمعیت‌های مقاوم در بسیاری از آفات مهم کشاورزی شده است که کارایی روش‌های شیمیایی را به شدت کاهش داده است (Sparks and Nauen, ۲۰۱۵).

در پاسخ به این چالش‌ها، رویکردهای نوین مدیریت آفات با تأکید بر پایداری زیست‌محیطی و کاهش وابستگی به سموم شیمیایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان، راهکار عقیم‌سازی حشرات یا Sterile Insect Technique (SIT) به‌عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌های کنترل زیست‌سازگار شناخته می‌شود. (Dyck et al, ۲۰۲۱) این روش به جای اتکا بر حذف مستقیم آفت، بر ایجاد اختلال در چرخه تولیدمثل جمعیت هدف استوار است و از طریق رهاسازی نرهای عقیم، موجب کاهش تدریجی جمعیت آفت در طبیعت می‌شود (Bourtzis et al, ۲۰۲۱).

ویژگی برجسته SIT، اختصاصی بودن آن برای گونه هدف و حداقل تأثیر بر حشرات غیر هدف و سایر اجزای اکوسیستم است. به همین دلیل، این راهکار به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت ناحیه‌محور آفات<sup>۱</sup> معرفی شده و در بسیاری از کشورها به‌عنوان جایگزینی پایدار برای روش‌های متعارف شیمیایی مطرح شده است (Klassen and Curtis, ۲۰۰۵; Vreysen et al, ۲۰۰۷).

#### 1. Area-Wide Integrated Pest Management

با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، توسعه کشاورزی پایدار و رشد تقاضا برای محصولات سالم، بررسی ظرفیت‌ها، مزایا و چالش‌های اجرای SIT در نظام‌های کشاورزی اهمیت ویژه‌ای یافته است. این مقاله با رویکردی علمی-ترویجی به معرفی اصول، کارکردها و جایگاه این روش در مدیریت مدرن آفات می‌پردازد و شواهد جهانی و داخلی مربوط به کاربرد آن را مرور می‌کند.

#### :: مبانی زیستی و اکولوژیکی راهکار SIT

راهکار عقیم‌سازی حشرات بر پایه اصول اکولوژی رفتاری، رقابت جنسی و زیست‌شناسی تولیدمثل حشرات بنا شده است. در این روش، نرهای حشره هدف پس از پرورش انبوه در شرایط آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی، در معرض پرتوهای یونیزان (نظیر گاما یا اشعه X) قرار می‌گیرند تا دچار ناهنجاری‌های کروموزومی برگشت‌ناپذیر در سلول‌های جنسی شوند، بدون آن که صفات رفتاری کلیدی مانند جستجوی جفت، پرواز، رقابت‌پذیری جنسی و رفتارهای جفت‌گیری آن‌ها به‌طور کامل از بین برود. (Bourtzis et al, ۲۰۲۱; Dyck et al, ۲۰۲۱)

فرآیند پرتودهی معمولاً با دوزهای کنترل شده انجام می‌شود تا تعادلی میان سطح عقیمی و حفظ تناسب زیستی (fitness) نرهای رهاسازی شده برقرار شود. مطالعات نشان داده‌اند که



دوزه‌های بیش از حد می‌توانند باعث کاهش توان پرواز و جذابیت جنسی نرها شوند و در نتیجه کارایی میدانی برنامه SIT کاهش یابد. (Parker and Mehta, ۲۰۰۷; Vreysen et al, ۲۰۰۷)

از این رو، تعیین دوز بهینه پرتودهی از مهم‌ترین مراحل طراحی برنامه‌های SIT محسوب می‌شود. (Dyck et al, ۲۰۲۱)

پس از رهاسازی در طبیعت، نرهای عقیم با ماده‌های وحشی جفت‌گیری می‌کنند. به دلیل وجود شکاف‌های کروموزومی و آسیب‌های ژنتیکی در اسپرم این نرها، تخم‌های حاصل دچار ناپایداری ژنتیکی شده و قادر به طی مراحل طبیعی رشد جنینی نیستند (Bourtzis et al, ۲۰۲۱)

تکرار این فرآیند در چندین نسل متوالی، منجر به کاهش نرخ زادآوری خالص جمعیت<sup>۲</sup> و در نهایت فروپاشی تدریجی جمعیت آفت می‌شود. (Klassen and Curtis, ۲۰۰۵)

از دیدگاه اکولوژیکی، SIT یک روش کاملاً اختصاصی گونه<sup>۲</sup> محسوب می‌شود و تنها بر جمعیت هدف اثر می‌گذارد. برخلاف سموم شیمیایی که طیف وسیعی از حشرات مفید از جمله گرده‌افشان‌ها و دشمنان طبیعی را نیز نابود می‌کنند، SIT تعادل شبکه‌های غذایی و ساختار اکوسیستم را مختل نمی‌کند (Dyck et al, ۲۰۲۱; Bourtzis et al, ۲۰۰۵)

al, ۲۰۲۱) این ویژگی سبب شده است که SIT به‌عنوان یکی از ایمن‌ترین ابزارهای کنترل جمعیت آفات در چهارچوب مدیریت پایدار زیست‌محیطی شناخته شود.

به‌عنوان نمونه، در مطالعات انجام‌شده روی مگس میوه مدیترانه‌ای (*Ceratitis capitata*) نشان داده شده است که نرهای عقیم، در صورت پرتودهی با دوزه‌های بهینه، قادر هستند به‌طور مؤثر با نرهای طبیعی رقابت کرده و نرخ تفریق تخم‌ها را به‌طور معنی‌داری کاهش دهند (Vreysen et al, ۲۰۰۷; Dyck et al, ۲۰۲۱). این یافته‌ها نقش کلیدی رقابت جنسی و رفتارهای جفت‌گیری را در موفقیت برنامه‌های SIT برجسته می‌سازد.

## ۲.۲ کاربردهای جهانی SIT در کشاورزی و بهداشت عمومی

راهکار عقیم‌سازی حشرات (SIT) نخستین بار به‌صورت موفق در کنترل مگس پیچ‌ساز نیورلد (*Cochliomyia hominivorax*) در ایالات متحده آمریکا اجرا شد. این برنامه، بارهاسازی گسترده نرهای عقیم در مناطق آلوده و در طول چند نسل، توانست جمعیت این آفت را به‌طور کامل ریشه‌کن کند و به‌الگویی موفقیت‌آمیز مدیریت ناحیه‌محور آفات تبدیل شود (Klassen and Curtis, ۲۰۰۵; Dyck et al, ۲۰۲۱). این موفقیت، الهام‌بخش برنامه‌های SIT در سایر نقاط جهان شد.

2. Net reproductive rate

3. Species-specific



به‌ویژه در مورد پشه‌های ناقل مالاریا، دنگی، زیکا و تب زرد، برنامه‌های آزمایشی در آفریقا، آسیا و آمریکای لاتین نشان داده‌اند که رهاسازی نرهای عقیم باعث کاهش معنی‌دار تراکم جمعیت پشه‌ها و کاهش نرخ انتقال بیماری‌ها شده است (Bouyer, ۲۰۲۴; Benedict and Robinson, ۲۰۰۳).

مزیت برجسته SIT در این زمینه، اثرگذاری بر جمعیت هدف و کاهش نیاز به سموم شیمیایی است که به‌نوبه خود منجر به حفظ تنوع زیستی، کاهش آلودگی محیط‌زیست و کاهش خطر مقاومت حشره‌ها به سموم می‌شود. (Bourtzis et al., ۲۰۲۱) علاوه بر این، این روش می‌تواند با سایر استراتژی‌های مدیریت تلفیقی آفات و ناقلین بیماری ترکیب شود تا بیشترین اثربخشی را داشته

در حوزه کشاورزی، SIT به‌ویژه برای کنترل مگس‌های میوه مانند مگس میوه مدیترانه‌ای، *Bactrocera dorsalis* و *Bactrocera oleae* به‌کاررفته است. مطالعات جهانی نشان داده‌اند که رهاسازی منظم نرهای عقیم می‌تواند جمعیت آفات را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد و خسارت اقتصادی در باغات میوه و سبزیجات را کاهش دهد (Dyck et al., ۲۰۲۱; Vreysen et al., ۲۰۰۷). به‌عنوان مثال، در برنامه‌های کنترل *Ceratitis capitata* در آمریکای جنوبی و اروپا، کاهش ۸۰-۹۰ درصدی جمعیت آفت در مناطق هدف گزارش شده است. (Vreysen et al., ۲۰۰۷) در بهداشت عمومی و کنترل ناقلین بیماری‌ها، SIT به‌عنوان ابزار تکمیلی و جایگزین پایدار برای سم‌پاشی شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است.



باشد، به ویژه در مناطق شهری و نیمه شهری که استفاده از آفت کش های شیمیایی محدودیت دارد (Dyck et al, ۲۰۲۱) در مقابل، استفاده مکرر از سموم شیمیایی باعث کاهش تنوع زیستی و اختلال در عملکرد گرده افشان ها و دیگرگونه های مفید می شود. (Silva et al, ۲۰۱۹)

### :: مزایای اقتصادی

اگرچه هزینه های اولیه تولید و رهاسازی حشرات عقیم در SIT بالاست، مطالعات اقتصادی نشان داده اند که در بلندمدت، این روش منجر به کاهش هزینه های خرید سموم شیمیایی، کاهش خسارت محصولات و افزایش بازدهی اقتصادی کشاورزی می شود (Dyck et al, ۲۰۲۱; Vreysen et al, ۲۰۰۷) به عنوان مثال، در برنامه های کنترل مگس پیچ ساز نیوورلد در آمریکای لاتین، هزینه اجرای SIT پس از چند سال کاهش چشمگیر خسارت اقتصادی و صرفه جویی در مصرف سموم را به همراه داشت (Klassen and Curtis, ۲۰۰۵).

### :: مزایای اجتماعی و پذیرش عمومی

SIT با اهداف توسعه پایدار و کشاورزی ارگانیک همراستا است و در نتیجه، پذیرش اجتماعی بیشتری در میان کشاورزان و مصرف کنندگان دارد. این روش باعث کاهش نگرانی های زیست محیطی و سلامت انسانی می شود و می تواند نقش مؤثری در ارتقای آگاهی عمومی درباره مدیریت پایدار

باشد، به ویژه در مناطق شهری و نیمه شهری که استفاده از آفت کش های شیمیایی محدودیت دارد (Dyck et al, ۲۰۲۱).

در مجموع، تجربیات جهانی نشان می دهد که SIT به عنوان ابزار کنترل جمعیت آفات و ناقلین بیماری ها، از مزایای طولانی مدت و سازگار با محیط زیست برخوردار است و می تواند نقش مهمی در توسعه کشاورزی پایدار و کاهش بروز بیماری های ناقل حشره ای ایفا کند. (Klassen, Vreysen et al; ۲۰۲۴, Bouyer; ۲۰۰۵, and Curtis al, ۲۰۰۷)

مزایای زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی راهکار عقیم سازی حشرات (SIT) به دلیل ویژگی های منحصر به فرد خود، مزایای چند جانبه ای از جنبه های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی ارائه می دهد.

### :: مزایای زیست محیطی

یکی از مهم ترین مزایای SIT، عدم استفاده از آفت کش های شیمیایی است. این ویژگی باعث می شود که باقی مانده های سمی در آب، خاک و محصولات کشاورزی ایجاد نشود و سلامت مصرف کنندگان حفظ شود. (Bourtzis et al, ۲۰۲۱) علاوه بر این، SIT با اثرگذاری بر جمعیت هدف، حشرات غیر هدف و دشمنان طبیعی آفات را حفظ می کند که این موضوع برای پایداری

آفات داشته باشد. (Bouyer, 2024) در مناطقی که نگرانی‌های بهداشتی و محیط‌زیستی ناشی از سموم شیمیایی بالا است، SIT به‌عنوان یک راهکار قابل قبول و قابل اجرا برای جامعه محلی معرفی شده است (Bourtzis et al., 2021).

در ایران، نخستین مطالعات سیستماتیک روی راهکار عقیم‌سازی حشرات عمدتاً از دهه‌های اخیر آغاز شده و تمرکز اصلی آن‌ها بر آفات کلیدی کشاورزی بوده است. یکی از مطالعات برجسته در

این زمینه، تحقیق روی مگس زیتون (*Bactrocera oleae*) در استان‌های شمالی و غربی ایران است. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که دوزهای

مشخص تابش گاما می‌توانند عقیمی پایدار ایجاد کنند بدون آنکه توان رقابتی نرها در جفت‌گیری به‌طور قابل توجهی کاهش یابد که این امر برای موفقیت برنامه SIT حیاتی است. (Ahmadi et al., 2018)

در زمینه کرم گلوگاه انار (*Ectomyelois ceratoniae*)، مطالعات انجام‌شده در استان یزد نشان داد که ترکیب SIT با سایر روش‌های مدیریت تلفیقی آفات (IPM) می‌تواند خسارت اقتصادی ناشی از این آفت را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد و بهره‌وری تولید را افزایش دهد. (Soofbaf et al., 2017)

همچنین، تحقیقات آزمایشگاهی و نیمه‌میدانی روی مگس میوه مدیترانه‌ای (*Ceratitis capitata*) در

ایران نشان داده است که نرهای عقیم می‌توانند رقابت‌پذیری مناسبی با نرهای طبیعی داشته باشند و رهاسازی آن‌ها اثر ملموسی در کاهش جمعیت آفت در سطح مزرعه یا باغ داشته باشد (Vreysen et al., 2007; Dyck et al., 2021).

این یافته‌ها اهمیت طراحی دقیق برنامه‌های SIT، انتخاب دوز پرتودهی مناسب و زمان‌بندی رهاسازی را برجسته می‌کنند.

#### چالش‌ها و محدودیت‌های اجرایی

باوجود ظرفیت بالای SIT در کنترل آفات، موانع عملی متعددی بر سر راه اجرای گسترده آن وجود دارد:

- نیاز به زیرساخت‌های پیشرفته: پرورش انبوه و پرتودهی ایمن حشرات نیازمند تجهیزات تخصصی و سرمایه‌گذاری اولیه سنگین است که محدودیت‌های مالی و فنی ایجاد می‌کند (Dyck et al., 2021).

- اجرای منطقه‌ای و هماهنگی: موفقیت SIT وابسته به اجرای منسجم در سطح منطقه‌ای است. برنامه‌های پراکنده و محدود معمولاً اثربخشی پایداری ندارند و نمی‌توانند جمعیت آفت را به‌طور مؤثر کاهش دهند (Klassen and Curtis, 2005).

- نیروی انسانی متخصص و آموزش بهره‌برداران: بهره‌برداران کشاورزی و



مسئولان فنی باید آموزش ببینند تا مدیریت

رهاسازی، پایش جمعیت و ارزیابی تأثیر SIT

به درستی انجام شود. کمبود تخصص و

**:: نتیجه گیری**

آگاهی می تواند موفقیت برنامه را تحت تأثیر

قرار دهد. (Bouyer, 2024)

• پایش و ارزیابی مداوم: موفقیت SIT نیازمند

رصد دقیق جمعیت آفات قبل، حین و بعد

از رهاسازی است. فقدان سامانه های پایش

مناسب می تواند منجر به عدم تطابق میان

اهداف برنامه و نتایج واقعی شود.

با توجه به تجربیات موجود، سرمایه گذاری در

زیرساخت ها، آموزش و برنامه ریزی هماهنگ

منطقه ای، از مهم ترین عوامل موفقیت اجرای

SIT در ایران محسوب می شوند و می توانند این

راهکار را به یک ابزار مؤثر و پایدار در مدیریت آفات

راهکار عقیم سازی حشرات به عنوان یکی از

پیشرفته ترین و پایدارترین روش های مهار زیستی

آفات، توانسته است نشان دهد که می توان

جمعیت آفات هدف را به طور مؤثر و تدریجی

کاهش داد بدون آنکه تعادل زیست محیطی و

سلامت اکوسیستم ها مختل شود. برخلاف

روش های شیمیایی، SIT محدود به گونه هدف

است و حشرات غیر هدف، دشمنان طبیعی و

گرده افشان ها را تحت تأثیر قرار نمی دهد که

این ویژگی، آن را به یک ابزار کلیدی در مدیریت

تلفیقی و پایدار آفات تبدیل کرده است.

تجارب جهانی در کنترل مگس های میوه،

پشه‌های ناقل بیماری و آفات دیگر نشان داده‌اند که رهاسازی منظم نرهای عقیم، به‌ویژه زمانی که با برنامه‌ریزی منطقه‌ای و پایش دقیق جمعیت همراه باشد، می‌تواند کاهش معنی‌دار جمعیت آفات و بهبود عملکرد محصولات کشاورزی و بهداشت عمومی را به همراه داشته باشد. مطالعات ایرانی نیز، از جمله روی مگس زیتون، کرم گلوگاه انار و مگس میوه مدیترانه‌ای، نشان داده‌اند که SIT با رعایت دوزهای بهینه پرتودهی و طراحی دقیق برنامه، می‌تواند در شرایط کشور نیز مؤثر باشد و خسارت اقتصادی را به‌طور چشمگیری کاهش دهد.

با این حال، موفقیت عقیم‌سازی آفات در ایران مستلزم سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های پرورش و پرتودهی، آموزش نیروهای متخصص و هماهنگی منطقه‌ای است تا این روش بتواند به جایگزینی پایدار و محیط‌دوست برای استفاده گسترده از سموم شیمیایی در کشاورزی کشور تبدیل شود. در نهایت، ادغام SIT با استراتژی‌های مدیریت تلفیقی آفات و حمایت سیاست‌گذاران می‌تواند مسیر توسعه کشاورزی پایدار و دوستدار محیط‌زیست در ایران را هموار کند و گامی مؤثر در حفظ منابع طبیعی و سلامت جامعه محسوب شود.



## منابع

- Ahmadi, M., Salehi, B., Abd-Alla, A. M., & Babaie, M. (2018). Feasibility of using the radiation-based sterile insect technique (SIT) to control the olive fruit fly, *Bactrocera oleae* Gmelin (Diptera: Tephritidae) in Iran. *Applied Radiation and Isotopes*, 284-279, 139.
- Benedict, M. Q., & Robinson, A. S. (2003). The first releases of transgenic mosquitoes: an argument for the sterile insect technique. *Trends in parasitology*, 355-349, (8)19
- Bourtzis, K., & Vreysen, M. J. B. (2021). Sterile Insect Technique (SIT) and Its Applications. *Insects* 638, 12, 2021.
- Bouyer, J. (2024). Current status of the sterile insect technique for the suppression of mosquito populations on a global scale. *Infectious Diseases of Poverty*, 68, (1)13.
- Dyck, V. A., Hendrichs, J., & Robinson, A. S. (2021). Sterile insect technique: principles and practice in area-wide integrated pest management (p. 1216). Taylor & Francis.
- Fao, F. (2018). The impact of disasters and crises on agriculture and food security. Report.
- Klassen, W., Curtis, E. C., & Hendrichs, J. (2021). History of the sterile insect technique. In *Sterile insect technique* (pp. 44-1). CRC Press.
- Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of agricultural science*, 43-31, (1)144.
- Parker, A., & Mehta, K. (2007). Sterile insect technique: a model for dose optimization for improved sterile insect quality. *Florida entomologist*, 95-88, (1)90
- Pimentel, D. (2005). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Environment, development and sustainability*, 252-229, (2)7
- Silva, V., Mol, H. G., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils—A hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment*, 1545-1532, 653.
- Soofbaf, M., Salehi, B., Kalantarian, N., Zanganeh, A. H., Babaei, M., Fathollahi, H., ... & Aqda, S. A. A. (2017). Using sterile insect technique against carob moth, *Ectomyelois ceratoniae* (Zeller) (Lep.: Pyralidae), in Yazd province, Iran.
- Sparks, T. C., & Nauen, R. (2015). IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pesticide biochemistry and physiology*, 128-122, 121.
- Vreysen, M. J. B., Robinson, A. S., & Hendrichs, J. (2007). Area-wide control of insect pests: from research to field implementation (pp. 744-723). Springer.

## **Insect Sterilization: An Environmentally Friendly Method for Biological Pest Control**

The Sterile Insect Technique (SIT) is a sustainable and environmentally friendly method for the biological control of pests. This method disrupts the reproductive cycle of target pests by mass-rearing and sterilizing male insects and releasing them into the environment, gradually reducing their populations without negatively impacting non-target species or surrounding ecosystems. Globally, SIT has been successful in controlling fruit flies and mosquitoes that transmit diseases such as malaria and dengue. In Iran, studies on the olive fruit fly, the pomegranate fruit borer, and the Mediterranean fruit fly have shown that by adhering to optimal irradiation doses and carefully designing programs, SIT can lead to a reduction in pest populations and economic losses. This method is free of chemical residues, species-specific, and aligns with sustainable development goals, enjoying high acceptance among farmers. With investment in infrastructure, training of specialized personnel, and regional planning, SIT can serve as a complementary and sustainable approach to reducing the use of chemical pesticides and promoting environmentally friendly agriculture.

**Keywords:** Sterile Insect Technique, Pest management, Sustainable agriculture, biological

# مکانیسم های کنترلی، محلول پاشی بیوچار بر آفات درختان میوه؛

واکاوای رویکردهای فیزیکی و محرک های مقاومت سیستمیک

آرین پورخاتون؛ گروه گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
poorkhatoon@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴ | بازنگری: ۲۶ بهمن ۱۴۰۴ | پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۴۰۴ | انتشار آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22059/giahpzshsj.2026.414621.1055>





## چکیده

این مطالعه مروری به تحلیل جامع ظرفیت‌های نوین بیوچار در قالب محلول پاشی برگ‌گی به‌عنوان یک راهکار میان‌رشته‌ای در مدیریت آفات باغات می‌پردازد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بیوچار فراتر از نقش سنتی خود در اصلاح خاک، از طریق یک مدل دفاعی «دوجانبه» عمل می‌کند: (۱) سد فیزیکی-مکانیکی؛ که شامل مسدودسازی مجاری تنفسی کنه‌ها، سایش قطعات دهانی لاروهای جونده به‌واسطه ذرات سیلیکاتی و اختلال در سیگنال‌های نوری و شیمیایی سطح برگ برای جلوگیری از تخم‌گذاری است؛ (۲) عامل القاکننده مقاومت؛ که با فعال‌سازی مسیرهای دفاعی وابسته به اسید جاسمونیک و اسید سالیسیلیک، منجر به القای مقاومت سیستمیک (ISR) در گیاه میزبان می‌شود. بررسی پایگاه‌های داده تجربی نشان می‌دهد که کارایی بیوچار به‌شدت تحت تأثیر غلظت سوسپانسیون، ابعاد ذرات (غلبه نانو-بیوچار بر میکرو-بیوچار) و پایداری کلئیدی قرار دارد. همچنین، این مقاله با تحلیل چالش‌های فنی، تأکید می‌کند که استفاده از سورفکتانت‌های زیست‌سازگار برای جلوگیری از رسوب در نازل‌ها و مدیریت دوز مصرفی جهت پیش‌گیری از اختلال در هدایت روزنه‌ای، از ارکان اصلی موفقیت این فناوری است. درنهایت، این رویکرد با حفظ دشمنان طبیعی و کاهش بار شیمیایی محیط‌زیست، به‌عنوان یک مؤلفه کلیدی در انتقال به سمت باغبانی ارگانیک و هوشمند پیشنهاد می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت تلفیقی آفات (IPM)، نانو-بیوچار، مقاومت سیستمیک القا شده، برهم‌کنش گیاه-آفت، پایداری سوسپانسیون، سد فیزیکی.



## ۱- مقدمه

بر پایه سمیت سلولی عمل می‌کنند، از طریق مکانیسم‌های چندگانه فیزیکی، شیمیایی و زیستی با آفات مقابله می‌کند. این ذرات می‌توانند از طریق ایجاد خراش‌های میکروسکوپی در کوتیکول حشرات و القای خشکیدگی (Desiccation) و همچنین مسدود کردن منافذ تنفسی، نرخ مرگ‌ومیر را افزایش دهند (Wang et al., ۲۰۱۶). علاوه بر این، بیوچار با تحریک مسیرهای سیگنال دهی گیاه، قادر به فعال‌سازی مقاومت سیستمیک القا شده (ISR) در برابر طیف وسیعی از آفات مکنده و جوینده است (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

با وجود این پتانسیل‌ها، مرور منسجمی بر کارایی محلول‌پاشی بیوچار در گیاهان باغی که دارای فیزیولوژی برگ و کوتیکول متفاوتی نسبت به گیاهان زراعی هستند، کمتر صورت گرفته است. از این رو، هدف از این مقاله مروری، تحلیل مکانیسم‌های اثرگذاری بیوچار در محلول‌پاشی، بررسی شواهد تجربی در کنترل آفات کلیدی باغات و شناسایی چالش‌های فنی جهت استانداردسازی این فناوری در مدیریت تلفیقی آفات است.

## ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار و نقش آن در تعامل با آفات

کارایی بیوچار در کنترل آفات در گرو ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد آن است که به شدت تحت تأثیر نوع ماده اولیه (Feedstock) و دمای

باغداری به‌عنوان یکی از ارکان حیاتی امنیت غذایی و اقتصاد کشاورزی، همواره با چالش‌های جدی ناشی از تهاجم آفات گیاهی روبه‌رو بوده است. در دهه‌های اخیر، کنترل شیمیایی با استفاده از حشره‌کش‌های سنتتیک، روش غالب مدیریت آفات بوده است؛ با این حال، وابستگی بیش از حد به این مواد منجر به پیامدهای ناگواری نظیر ایجاد مقاومت ژنتیکی در آفات، باقی‌ماندن سموم در محصولات، تخریب تنوع زیستی و آسیب به حشرات گرده‌افشان شده است (Ahmad et al., ۲۰۱۴; کریمی و همکاران، ۱۳۹۵).

در پاسخ به این بحران، رویکرد مدیریت تلفیقی آفات (IPM) بر بهره‌گیری از راهکارهای پایدار و سازگار با محیط‌زیست تأکید دارد (Major et al., ۲۰۱۰).

در میان فناوری‌های نوین، بیوچار (Biochar) به‌عنوان یک محصول غنی از کربن حاصل از پیرولیز زیست‌توده در شرایط محدودیت اکسیژن، پتانسیل بالایی در کشاورزی پایدار نشان داده است. اگرچه بخش بزرگی از بررسی موضوع بر نقش بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک تمرکز یافته است (Novak et al., ۲۰۰۹; یداللهی و همکاران، ۱۳۹۸)، اما شواهد نوظهور حاکی از آن است که کاربرد مستقیم بیوچار بر روی کانوپی گیاه از طریق محلول‌پاشی (Foliar Spray) می‌تواند اثرات مستقیمی بر کنترل آفات داشته باشد (Smith & Thompson, ۲۰۲۰).

محلول‌پاشی بیوچار بر خلاف سموم شیمیایی که



ذرات بیوچار نقش حیاتی در انسداد منافذ تنفسی (Spiracles) آفات ایفا می‌کند؛ به طوری که ذرات کوچکتر (به‌ویژه نانو-بیوچار) کارایی بالاتری در خفگی فیزیکی آفات مکنده نشان می‌دهند (نقیبی و صادقی، ۱۴۰۱).

از منظر شیمیایی، سطح بیوچار پوشیده از گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار (نظیر کربوکسیل، هیدروکسیل و گروه‌های فنلی) است که قطبیت و بار سطحی آن را تعیین می‌کنند (Karami et al., ۲۰۱۱). این ویژگی‌های سطحی باعث افزایش چسبندگی (Adhesion) ذرات به سطح واکسی و آب‌گریز برگ گیاهان باغی می‌شود. چسبندگی بالا عاملی کلیدی در مقاومت لایه بیوچار در برابر شستشو توسط باران یا آبیاری بارانی است و زمان تماس (Contact time) آفت با ماده مؤثره را افزایش می‌دهد (Smith & Thompson, ۲۰۲۰).

علاوه بر این، بیوچار به دلیل قدرت (Adsorbent)

پیرولیز قرار دارد (Ahmad et al., ۲۰۱۴). یکی از شاخص‌ترین ویژگی‌های بیوچار، سطح ویژه (Specific Surface Area) بسیار بالا و ساختار متخلخل (Porous structure) آن است. این شبکه تخلخل که در مقیاس‌های میکرو و نانو گسترده شده است، نه تنها بستری برای جذب مواد مغذی فراهم می‌کند، بلکه در محلول پاشی برگ، بیوچار را به یک مانع فیزیکی کارآمد تبدیل می‌سازد (Mukherjee & Zimmerman, ۲۰۱۳).

زمانی که سوسپانسیون بیوچار بر سطح برگ پاشیده می‌شود، پس از تبخیر حلال، لایه‌ای پایدار از ذرات کربنی بر روی کوتیکول تشکیل می‌گردد. این لایه با افزایش زبری سطح برگ، حرکت آفات ریز مانند کنه‌ها و شته‌ها را مختل کرده و با جذب رطوبت کوتیکول بدن حشره، منجر به بروز تنش اسمزی و خشکیدگی فیزیکی (Physical Desiccation) می‌شود (Wang et al., ۲۰۱۶). علاوه بر این، ابعاد



بالا، قادر است ترکیبات فرار گیاهی (VOCs) و فرمون‌های جلب‌کننده آفات را جذب یا پنهان کند (Spokas et al., ۲۰۱۱). این عمل باعث اختلال در فرآیند میزبان‌بایی توسط آفات شده و گیاه را از دید حشرات گیاه‌خوار پنهان می‌سازد. همچنین، تداخل بالای این ماده به آن اجازه می‌دهد تا به‌عنوان یک حامل (Carrier) عمل کرده و آفت‌کش‌های زیستی یا عصاره‌های گیاهی را در درون ساختار خود محصور کرده و بارهاسازی تدریجی، پایداری و اثرگذاری آن‌ها را در شرایط مزرعه‌ای بهبود بخشد (Wang et al., ۲۰۱۶).

### • ۲-۳- تحریک مقاومت سیستمیک القا شده (ISR)

یکی از پیچیده‌ترین جنبه‌های محلول‌پاشی بیوچار، توانایی آن در تغییر فیزیولوژی دفاعی گیاه است. بیوچار حاوی مقادیر اندکی از ترکیبات آلی محلول (مانند اسیدهای آلی و فنل‌ها) است که به‌عنوان (Elicitor) عمل کرده و توسط سلول‌های اپیدرم برگ شناسایی می‌شوند. این شناسایی، مسیرهای سیگنال‌دهی هورمونی، به‌ویژه مسیر اسید جاسمونیک (JA) و اتیلن (ET) را فعال می‌کند که منجر به بروز مقاومت سیستمیک القا شده (ISR) می‌گردد (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

مطالعات نشان داده‌اند که در پاسخ به این تحریک، بیان ژن‌های مرتبط با دفاع (PR-genes) افزایش یافته و منجر به سنتز آنزیم‌های هیدرولیتیک مانند کیتیناز (Chitinase) و گلوکاناز (Glucanase) می‌شود. این آنزیم‌ها با تخریب دیواره بدن آفات و

### ■ ۳- مکانیسم‌های کنترلی: از بازدارندگی فیزیکی تا تحریک دفاع زیستی

مکانیسم‌های اثرگذاری محلول‌پاشی بیوچار بر آفات را می‌توان در دو سطح برهم‌کنش مستقیم فیزیکی و پاسخ‌های القایی زیستی دسته‌بندی کرد. این رویکرد چندگانه (Multi-modal action)، احتمال بروز مقاومت در جمعیت آفات را به‌شدت کاهش می‌دهد.

• ۱-۳- مکانیسم‌های مستقیم فیزیکی و مکانیکی اثرات مستقیم بیوچار عمدتاً ناشی از ساختار ساینده و خاصیت (Hygroscopic) آن است. ذرات بیوچار با برخورد به مفاصل و غشاهای میان‌قطعه‌ای بدن آفات، باعث ایجاد خراش‌های میکروسکوپی در لایه مومی کوتیکول می‌شوند. این تخریب ساختاری منجر به خروج غیرقابل کنترل آب از بدن حشره و

اختلال در سیستم گوارش آن‌ها، نرخ بقا و تولیدمثل آفات را کاهش می‌دهند (Wang et al, ۲۰۱۶). همچنین افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه مانند فیتوالکسین‌ها و تانن‌ها، بافت گیاه را برای آفات جونده ناگوار (Antifeedant) می‌سازد.

هدف، ویژگی‌های ریخت‌شناختی برگ گیاه میزبان و غلظت سوسپانسیون مورد استفاده است. در این بخش، اثرگذاری بیوچار بر گروه‌های مختلف آفات باغی مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

#### • ۴-۱- آفات مکنده (کنه‌ها و شته‌ها)

شته‌ها به دلیل داشتن بدن نرم و سرعت تکثیر بالا، بیشترین حساسیت را به اثرات فیزیکی بیوچار نشان داده‌اند. پژوهش‌ها بر روی شته سبزی سبب نشان داده است که محلول پاشی سوسپانسیون بیوچار مشتق از پسماندهای چوبی، علاوه بر ایجاد تلفات مستقیم، باعث کاهش نرخ باروری (Fecundity) جمعیت‌های باقی مانده می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰). در مورد کنه‌های تار عنکبوتی در باغات انگور، گزارش شده است که نانو ذرات بیوچار بانفوذ به شبکه تارهای تنیده شده توسط کنه و مسدود کردن مجاری تنفسی، کارایی بالاتری نسبت به ذرات میکرومتری دارند (نقیبی و صادقی، ۱۴۰۱). همچنین، بیوچار با افزایش ضخامت لایه کوتیکول از طریق القای رسوب سیلیکات و لیگنین، نفوذ قطعات دهانی آفات مکنده به داخل بافت پارانشیم را دشوار می‌سازد.

#### • ۴-۲- آفات جونده و لارو پروانه‌ها

در کنترل آفات جونده، مکانیسم اصلی از کنترل فیزیکی به سمت بازدارندگی تغذیه‌ای (Antifeedancy) تغییر می‌یابد. مطالعات بر روی لاروهای برگ‌خوار

#### • ۳-۳- هم‌افزایی با عوامل کنترل زیستی (Synergistic Effects)

بیوچار به دلیل تخلخل بالا، پناهگاهی ایمن (Micro-habitat) برای میکروارگانیسم‌های مفید فراهم می‌کند. در محلول پاشی‌های ترکیبی، بیوچار از اسپورهای قارچ‌های بیماری‌زای حشرات (مانند *Beauveria bassiana*) و باکتری‌های حشره کش (مانند *Bacillus thuringiensis*) در برابر اشعه ماوراءبنفش و نوسانات رطوبتی محافظت کرده و ماندگاری و کارایی آن‌ها را بر روی کانوپی درختان افزایش می‌دهد (نقیبی و صادقی، ۱۴۰۱; Smith & Thompson, ۲۰۲۰). این نقش به‌عنوان یک کمک‌کننده زیستی (Bio-adjuvant)، بیوچار را به ابزاری کلیدی در برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات تبدیل می‌کند.

#### ■ ۴-۳- مرور تجربی کاربرد بیوچار در کنترل آفات باغی

بررسی مطالعات تجربی نشان می‌دهد که کارایی محلول پاشی بیوچار تابع مستقیمی از نوع آفت



نشان داده است که وجود ذرات بیوچار بر سطح برگ، باعث سایش دندانهای آرواره لاروها شده و تمایل آن‌ها به تغذیه را به شدت کاهش می‌دهد (Wangetal, ۲۰۱۶). علاوه بر این، القای مقاومت سیستمیک (ISR) و افزایش غلظت ترکیبات بازدارنده هضم در برگ‌های محلول‌پاشی شده، منجر به طولانی شدن دوره لاروی و افزایش مرگومیر در مراحل پیش‌شفرگی می‌گردد (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

آفت کش‌های وسیع الطیف، محلول‌پاشی بیوچار تأثیر سوء ناچیزی بر روی شکارگرانی نظیر کفشدوزک‌ها و زنبورهای پارازیتوئید دارد. این امر ناشی از تفاوت در فیزیولوژی بدن و رفتار تغذیه‌ای این حشرات است. حفظ جمعیت دشمنان طبیعی در کنار کنترل فیزیکی آفات توسط بیوچار، منجر به تقویت کنترل زیستی خودبه‌خودی در اکوسیستم باغ می‌گردد (Ahmad et al, ۲۰۱۴; موسوی و نوری، ۱۳۹۹).

#### • ۳-۴- مگس‌های میوه و آفات میوه خوار

در مراحل حساس رسیدگی میوه در باغات هلو و سیب، محلول‌پاشی بیوچار می‌تواند با تغییر سیگنال‌های شیمیایی سطح میوه، مانع از تخم‌گذاری مگس‌های میوه شود. بیوچار با جذب سطحی (Adsorption) ترکیبات فرار جلب‌کننده که از میوه‌های رسیده ساطع می‌شوند، نوعی «پوشش شیمیایی» ایجاد کرده و احتمال یافتن میزبان توسط آفت را کاهش می‌دهد (Smith & Thompson, ۲۰۲۰). این رویکرد به‌ویژه در مدیریت آفاتی که نسبت به سموم شیمیایی مقاوم شده‌اند، راهکار جایگزین مؤثری گزارش شده است.

به‌رغم پتانسیل‌های ذکر شده، انتقال فناوری محلول‌پاشی بیوچار از شرایط کنترل شده آزمایشگاهی به باغات، مستلزم غلبه بر چندین چالش فنی و زیستی است. کارایی این روش تحت تأثیر متغیرهای متعددی قرار دارد که در ادامه تحلیل می‌شوند.

#### • ۱-۵- ابعاد ذرات و نانوتکنولوژی

اندازه ذرات بیوچار تعیین‌کننده اصلی نرخ پوشش‌دهی و ماندگاری بر سطح کانوپی است. ذرات درشت (میکرومتری) تمایل به رسوب سریع در مخازن سم‌پاش و گرفتگی نازل‌ها دارند، در حالی که نانو-بیوچارها به دلیل سطح ویژه بالاتر، چسبندگی و نفوذپذیری بیشتری در لایه اپیدرم نشان می‌دهند (نقیبی و صادقی، ۱۴۰۱). با این حال، تولید اقتصادی

#### • ۴-۴- ایمنی برای دشمنان طبیعی و حشرات گرده افشان

یکی از مزایای استراتژیک بیوچار در باغات، انتخاب‌پذیری (Selectivity) آن است. برخلاف

گیاه داشته باشند (Mukherjee & Zimmerman, ۲۰۱۳). همچنین، بیوچارهای حاصل از پسماندهای غنی از سیلیس (مانند پوسته برنج) اثرات سایش فیزیکی قوی تری بر بدن آفات دارند (نقیبی و صادقی، ۱۴۰۱)؛ بنابراین، فرمولاسیون بیوچار باید بر اساس نوع آفت هدف و نیاز فیزیولوژیک گیاه انتخاب شود.

• ۴-۵-تداخل با فیزیولوژی گیاه (Phytotoxicity) یکی از چالش‌های کمتر بررسی شده، اثر پوشش تیره بیوچار بر هدایت روزنه‌ای (Stomatal Conductance) و دمای برگ است. غلظت‌های بیش از حد بیوچار ممکن است با مسدود کردن روزنه‌ها، تبادل گازها و فتوسنتز را مختل کرده و یا با جذب بیش از حد نور خورشید، منجر به تنش گرمایی در بافت برگ شود (Wang et al., ۲۰۱۶). همچنین، pH بالای برخی بیوچارها (قلیایی بودن شدید) ممکن است در گیاهان حساس منجر به سوختگی حاشیه برگ‌ها شود. از این رو، تعیین دوز بهینه (Optimum Dosage) برای هر محصول باغی پیش از کاربرد گسترده، الزامی است.

#### ■ ۶- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

یافته‌های این مطالعه مروری تأیید می‌کند که محلول‌پاشی بیوچار فراتر از یک اصلاح‌کننده خاک، به‌عنوان یک ابزار چندمنظوره و کارآمد در

نانو-بیوچار در مقیاس وسیع همچنان یک چالش هزینه‌بر محسوب می‌شود. از این رو، بهینه‌سازی فرآیند آسیاب‌کاری (Milling) برای دستیابی به توزیع اندازه ذرات بهینه، ضرورتی انکارناپذیر است.

#### • ۲-۵- پایداری سوسپانسیون و مواد افزودنی (Adjuvants)

ذرات بیوچار به دلیل ماهیت هیدروفوب (آب‌گریز) و چگالی خاص خود، در حلال‌های آبی ناپایدار بوده و تمایل به ته‌نشینی دارند. برای دستیابی به یک سوسپانسیون یکنواخت، استفاده از سورفکتانت‌ها (Surfactants) و پایدارسازهای زیست‌سازگار ضروری است (Smith & Thompson, ۲۰۲۰). این مواد نه تنها از کلوخه‌شدن (Agglomeration) ذرات جلوگیری می‌کنند، بلکه با کاهش کشش سطحی محلول، باعث پخش‌شدگی بهتر قطرات بر روی سطوح واکسی‌برگ‌های باغی (مانند مرکبات) شده و مقاومت لایه تشکیل شده در برابر شستشوی باران را افزایش می‌دهند.

#### • ۳-۵- نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز

ویژگی‌های بیوچار به شدت تابع شرایط تولید آن است. بیوچارهای تولیدشده در دمای بالا (بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) دارای تخلخل و پایداری کربنی بیشتری هستند، اما ممکن است گروه‌های عاملی کمتری برای تحریک پاسخ‌های سیستمیک



۴- ارزیابی اقتصادی: تحلیل هزینه-فایده تولید بیوچار از پسماندهای محلی باغات در مقایسه با هزینه‌های خرید و اعمال سموم شیمیایی. در نهایت، با توجه به چالش‌های تغییر اقلیم و ظهور آفات مقاوم، ادغام فناوری محلول‌پاشی بیوچار در برنامه‌های مدیریتی می‌تواند گامی بلند در جهت دستیابی به «باغداری هوشمند و پایدار» در ایران و منطقه باشد.

مدیریت تلفیقی آفات (IPM) گیاهان باغی مطرح است. توانمندی این ماده در ایجاد بازدارندگی فیزیکی (از طریق خشکیدگی و خفگی آفات) در کنار نقش الیسیتوری آن در تحریک مقاومت سیستمیک القاشده (ISR)، بیوچار را به جایگزینی پایدار برای آفت‌کش‌های سنتتیک تبدیل کرده است. این رویکرد نه تنها منجر به کاهش جمعیت آفات کلیدی نظیر شته‌ها و کنه‌ها می‌گردد، بلکه به دلیل حفظ جمعیت دشمنان طبیعی و کاهش باقی‌مانده سموم در محصول، سلامت اکوسیستم باغ و مصرف‌کننده را تضمین می‌کند.

با این وجود، گذار از پژوهش‌های آزمایشگاهی به کاربرد گسترده میدانی نیازمند واکاوی در حوزه‌های زیر است:

۱- استانداردسازی فرمولاسیون: توسعه سوسپانسیون‌های پایدار با استفاده از سورفکتانت‌های زیست‌سازگار جهت جلوگیری از سوبذرات و گرفتگی تجهیزات سم‌پاشی.

۲- بهینه‌سازی دوز و زمان مصرف: تعیین غلظت‌های بهینه برای محصولات مختلف (مانند سیب، پسته و مرکبات) به گونه‌ای که تداخلی در هدایت روزنه‌ای و نرخ فتوسنتز گیاه ایجاد نشود.

۳- مطالعات میکروبیوم کانوپی: بررسی تعاملات بیوچار با میکروارگانیسم‌های ساکن سطح برگ و پتانسیل هم‌افزایی آن با عوامل کنترل‌زیستی

## منابع

۱. رضایی، م.، حیدری، ع.؛ و نوری، س. (۱۴۰۰). بررسی نقش محلول پاشی بیوچار بر پاسخ های دفاعی و کنترل شته سبز سیب (Aphis pomi). مجله حفاظت گیاهان (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۵(۲)، ۱۵۵-۱۶۸.
۲. کریمی، ح.؛ و همکاران. (۱۳۹۵). اثرات زیست محیطی آفت کش های شیمیایی و ضرورت گذار به مدیریت پایدار. فصلنامه علوم محیطی، ۱۴(۳)، ۸۹-۱۰۴.
۳. موسوی، س. ع.؛ و نوری، س. (۱۳۹۹). اثرات انتخابی ترکیبات کربنی بر حشرات شکارگر در باغات میوه. دوفصلنامه کنترل بیولوژیک آفات، ۹(۱)، ۴۵-۵۸.
۴. نقیعی، م.؛ و صادقی، ح. (۱۴۰۱). بررسی آزمایشگاهی اثرات فیزیکی نانو-بیوچار بر نرخ مرگ و میر کنه تار عنکبوتی دو لکه ای در شرایط محلول پاشی. مجله دانش گیاه پزشکی ایران، ۵۳(۱)، ۷۷-۹۲.
۵. یداللهی، ع.؛ و همکاران. (۱۳۹۸). کاربرد بیوچار در بهبود ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های تحت کشت درختان میوه. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۹(۴)، ۱۱۲-۱۲۸.
۶. Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (۲۰۱۴). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, ۳۳-۱۹, ۹۹. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
۷. Karami, N., Belzile, N., & Chen, Y. W. (۲۰۱۱). Effect of different carbonaceous adsorbents on the bioavailability of cadmium and antimony in a mixed contaminated soil. *Applied Geochemistry*, ۱۴۱۹-۱۴۱۲, (۸)۲۶.
۸. Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (۲۰۱۵). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
۹. Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (۲۰۱۰). Maize yield and nutrition during ۴ years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, ۱۲۸-۱۱۷, (۱)۳۳۳.
۱۰. Mukherjee, A., & Zimmerman, A. R. (۲۰۱۳). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures. *Geoderma*, ۱۳۰-۱۲۲, ۱۹۳.
۱۱. Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., Ahmedna, M., Rehrh, D., & Schomberg, H. (۲۰۰۹). Characterization of switchgrass-derived biochar for use as a soil conditioner. *Journal of Environmental Quality*, ۳۸(۶), ۲۲۷۱-۲۲۶۱.
۱۲. Smith, J. A., & Thompson, R. (۲۰۲۰). Foliar application of carbon-based nanomaterials: A new frontier in pest management. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, ۴۱۳۵-۴۱۲۰, (۱۴)۶۸.
۱۳. Spokas, K. A., Novak, J. M., & Venterea, R. T. (۲۰۱۱). Biochar's role as an adsorbent for controlling agricultural greenhouse gas emissions. *Chemosphere*, ۸۸۲-۸۶۷, (۵)۸۵.
۱۴. Wang, Y., Lu, J., Wu, Z., & Lin, Z. (۲۰۱۶). Mechanisms of biochar-mediated suppression of plant pests and diseases: A review. *BioControl*, ۳۸۶-۳۷۳, (۴)۶۱.



## Mechanisms of Biochar Foliar Application in Controlling Orchard Pests: From Physical Damage to Induced Systemic Resistance

### Abstract

This review provides a comprehensive analysis of the emerging role of foliar-applied biochar as a cross-disciplinary strategy for orchard pest management. Moving beyond its traditional role as a soil amendment, this study delineates a «dual-action» defense model: 1) Physico-mechanical Barriers, characterized by the occlusion of arthropod respiratory spiracles, abrasion of larval mandibles via silicified particles, and interference with optical and chemical host-seeking cues; and 2) Biological Elicitation\*, which triggers Induced Systemic Resistance (ISR) by activating jasmonic and salicylic acid-dependent signaling pathways. Empirical data synthesis reveals that biochar efficacy is strictly governed by suspension concentration, particle size (with nano-biochar outperforming micro-biochar), and colloidal stability. Furthermore, the study addresses critical technical bottlenecks, emphasizing that the utilization of biocompatible surfactants to prevent nozzle clogging and the optimization of dosage to maintain stomatal conductance are pivotal for field success. Ultimately, this approach is proposed as a cornerstone for transitioning toward smart organic horticulture, ensuring the preservation of natural enemies while significantly reducing the environmental chemical footprint.

**Keywords:** Integrated Pest Management (IPM), Nano-biochar, Induced Systemic Resistance (ISR), Plant-Pest Interactions, Suspension Stability, Physical Barriers.



## آشنایی با دستگاه های آزمایشگاه

### سم شناسی در بخش حشره شناسی

دریافت: ۱۲ بهمن ۱۴۰۴ ■ بازنگری: ۲۹ بهمن ۱۴۰۴ ■ پذیرش: ۳۰ بهمن ۱۴۰۴ ■ انتشار آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22059/giahpzshsj.2026.410322.1049>



[www.aparat.com/v/epvej79](http://www.aparat.com/v/epvej79)

مشاهده فیلم معرفی دستگاه

◀ نگار ناظمی، دانشجوی کارشناسی ارشد بیماری شناسی گیاهی، دانشگاه تهران

Negar.Nazemi1378@gmail.com

#### ۱. دستگاه کروماتوگرافی مایع

اندازه منافذ مشخص) از ستون عبور می کند و در نتیجه به دلیل تفاوت در برهم کنش هر جزء با فاز ساکن و فاز متحرک، اجزای مختلف با زمان های نگهداشت متفاوت از هم جدا می شوند. تاریخچه این فناوری به طور کلی با تحول کروماتوگرافی و سپس پیشرفت های مهندسی و شیمی تحلیلی در اواخر قرن بیستم مرتبط است؛ اما HPLC به ویژه در دهه های

کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) یک روش جداسازی و شناسایی دقیق ترکیبات موجود در نمونه های پیچیده است که در آن مخلوط وارد شونده در یک فاز متحرک مایع (مثل مخلوط آب و حلال های آلی) به کمک یک فاز ساکن داخل ستون (معمولاً ذرات ریز سیلیکا یا مواد پلیمری با



تنظیم شود؛ حالت گرادیان برای نمونه‌های چندجزئی و ترکیبات با قطبیت‌های متفاوت بسیار مفید است. سپس اجزای نمونه داخل ستون بر اساس نوع برهم‌کنش‌شان جداسازی می‌شوند. در روش‌های رایج مثل HPLC فاز معکوس (RP-HPLC) که معمولاً پرکاربردترین است، فاز ساکن نسبتاً آب‌گریز بوده و ترکیبات بر اساس آب‌گریزی/دوستی به حلال‌ها جداسازی می‌شوند؛ در حالی که روش‌های دیگری مانند HPLC فاز نرمال یا تعویض یونی هم وجود دارند که برای اهداف خاص انتخاب می‌شوند. پس از خروج از ستون، آشکارساز (Detector) سیگنال خروجی را بر اساس ویژگی شیمیایی/فیزیکی ترکیب ثبت می‌کند؛ برای مثال آشکارساز UV-Vis برای ترکیباتی که در طول موج‌های مشخص جذب دارند رایج است، در حالی که آشکارساز فلورسانس برای مواد فلورسنت حساسیت بسیار بالایی دارد و آشکارسازهای دیگر مانند ELSD/RI برای ترکیباتی که جذب UV ندارند کاربرد پیدا می‌کنند. در نهایت دیتا سیستم با ایجاد پیک‌های کروماتوگرام (نمودار پاسخ آشکارساز در برابر زمان) زمان‌های نگهداشت و سطح پیک را استخراج می‌کند و با کالیبراسیون (استانداردهای معلوم) مقدارهای کمی را محاسبه می‌کند. از نظر ویژگی‌ها، HPLC معمولاً توانایی جداسازی ترکیبات نزدیک به هم را دارد، برای غلظت‌های پایین هم می‌تواند حساس باشد، قابلیت کنترل دقیق پارامترهایی مثل فشار، دبی، دما و ترکیب فاز متحرک را فراهم

۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ با ایده استفاده از ستون‌های پر از ذرات ریز و نیز پمپ‌های با فشار بالا شکل جدی‌تری گرفت و به تدریج به ابزاری استاندارد در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و صنعتی تبدیل شد. اهمیت HPLC از آنجاست که می‌تواند با دقت و حساسیت بالا، هم کیفی (شناسایی) و هم کمی (اندازه‌گیری مقدار) مواد را در نمونه‌های واقعی مثل داروها، خون و ادرار، عصاره‌های گیاهی، نوشیدنی‌ها، خوراکی‌ها و حتی نمونه‌های محیطی انجام دهد؛ به خصوص وقتی ترکیبات هدف در کنار مواد فراوان و مشابه دیگر وجود دارند. از نظر کاربرد، HPLC در کنترل کیفیت دارو و پیگیری ناخالصی‌ها، تعیین مقدار مواد مؤثره، آزمون‌های صنایع غذایی (ویتامین‌ها، قندها و افزودنی‌ها)، آنالیز آلاینده‌های محیط‌زیست (مثل ترکیبات آلی پایداری)، و همچنین در آزمایش‌های فارماکوکینتیک و بیوشیمی بسیار رایج است. از نظر روش کار، HPLC معمولاً با چند بخش اصلی پیش می‌رود: ابتدا آماده‌سازی نمونه انجام می‌شود (گاهی شامل رقیق‌سازی، فیلتر کردن برای حذف ذرات معلق، و در صورت نیاز استخراج یا پیش‌تصاف)، سپس نمونه توسط وسیله تزریق یا اتوسمپلر به جریان فاز متحرک تزریق می‌شود. در ادامه پمپ فاز متحرک را با فشار بالا و دبی کنترل‌شده به سمت ستون می‌راند. فاز متحرک می‌تواند به صورت ایزوکراتیک (ترکیب ثابت در طول زمان) یا گرادیان (تغییر تدریجی نسبت حلال‌ها در طول جداسازی)

برای نمونه‌گیری خودکار و اندازه‌گیری نمونه‌ها به صورت خودکار استفاده می‌شود. این دستگاه دارای یک قسمت ثبت داده هست که خروجی آن کروماتوگرام‌هایی است که جهت اندازه‌گیری باقی مانده آفت‌کش‌ها کاربرد دارد. فازهای متحرکی مورد استفاده شامل آب و استونیتریل است که معمولاً باید دارای حلال‌های با خلوص بسیار بالا باشند که هزینه بالایی نیز دارند.

نکات مراقبتی: HPLC یک دستگاه نسبتاً حساس بوده و نگهداری این دستگاه یک سری نکات مشخصی دارد:

- ۱- دستگاه بایستی توسط کارشناسی آموزش دیده مورد استفاده قرار گیرد.
- ۲- دستگاه بایستی به صورت دوره‌ای سرویس شود که توسط کارشناس شرکت بررسی شده و کارهای فنی روی آن انجام می‌شود.
- ۳- دستگاه بایستی به‌طور صحیحی کالیبره شود.



شکل ۱. دستگاه کروماتوگرافی مایع

می‌کند، و همچنین امکان اتوماسیون و تکرارپذیری خوب در آزمایش‌های روتین را دارد. همچنین چون انتخاب ستون، نوع فاز ساکن و ترکیب حلال‌ها نقش تعیین‌کننده دارند، HPLC می‌تواند متناسب با نوع ماده هدف (قطبیت، فرّار نبودن، وجود گروه‌های یونی، رفتار اکسیداسیون/کاهش، ...) بهینه‌سازی شود؛ به همین دلیل است که در عمل،<sup>۱</sup> HPLC فقط یک دستگاه نیست، بلکه یک خانواده روش تحلیلی است که با تغییر شرایط می‌توان به نتایج دقیق برای اهداف مختلف رسید.

دستگاه کروماتوگرافی مایع یا HPLC در آزمایشگاه سم‌شناسی بخش حشره‌شناسی طبقه‌ی سوم قرار دارد و عمدتاً در این بخش برای اندازه‌گیری باقی مانده‌ی آفت‌کش‌ها در محصولات کشاورزی، خاک و آب از این دستگاه استفاده می‌شود.

از لحاظ ساختاری این دستگاه دارای Detecture است. شناساگر UV که ترکیباتی که در امواج UV جذب دارند را شناسایی می‌کند. شناساگر RID نیز برای اندازه‌گیری قندها استفاده می‌شود. در حال حاضر این شناساگر کاربرد کمتری در این آزمایشگاه دارد. دستگاه دارای دو عدد پمپ است که وظیفه‌ی برقراری جریان فاز متحرک را دارند. در آن دستگاه انواع مختلف ستون‌ها وجود دارد که برای آفت‌کش‌های مختلف عمدتاً ستون‌های C<sub>18</sub> مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه دارای یک اتوسمپلر است که

## 1. High Performance Liquid Chromatography



[www.aparat.com/v/ksy8b68](http://www.aparat.com/v/ksy8b68)

مشاهده فیلم معرفی دستگاه

## ۲. دستگاه الیزاریدر

الیزاریدر (ELISA Reader) یا «خوانشگر الیزا» دستگاهی است که برای اندازه‌گیری جذب نوری (اپتیکی) چاهک‌های میکروپلیت در آزمون‌های ELISA به کار می‌رود و نقش کلیدی در تبدیل یک واکنش ایمنی-آنزیمی به داده‌های کمی و قابل تحلیل دارد. آزمون ELISA از دهه ۱۹۷۰ به عنوان روشی حساس و اختصاصی برای شناسایی آنتی‌ژن‌ها و آنتی‌بادی‌ها در نمونه‌های سرم، پلاسما، ادرار و سایر مایعات زیستی توسعه یافت و با جایگزین شدن الیزاریدر به جای خواندن دستی رنگ‌ها، دقت، سرعت و تکرارپذیری نتایج به‌طور چشمگیری افزایش پیدا کرد. اهمیت الیزاریدر در این است که امکان اندازه‌گیری کمی نتایج الیزا را فراهم می‌کند؛ یعنی به جای قضاوت چشمی رنگ چاهک‌ها، شدت رنگ هر چاهک را در طول موج مشخص اندازه‌گیری کرده و آن را به صورت عدد جذب نوری (OD) گزارش می‌کند، سپس با استفاده از منحنی استاندارد، غلظت ماده هدف (مثلاً یک هورمون، آنتی‌بادی، آنتی‌ژن ویروسی، سیتوکین و...) محاسبه می‌شود. از نظر کاربرد، الیزاریدر در آزمایشگاه‌های تشخیص پزشکی، در تحقیقات ایمونولوژی و سلولی، در

صنایع داروسازی و واکسن‌سازی، و همچنین در کنترل کیفیت مواد غذایی و دامپزشکی نیز به‌طور گسترده استفاده می‌شود. از نظر ویژگی‌ها، الیزا ریدرها معمولاً قابلیت خوانش چند طول موجی را دارند (مولتی‌مود)، امکان ذخیره و انتقال داده‌ها به رایانه یا شبکه آزمایشگاه را فراهم می‌کنند، و در برخی مدل‌ها با واشر پلیت (Plate Washer) و انکوباتور ادغام شده‌اند تا روند آزمون نیمه خودکار یا تمام خودکار شود. دقت و تکرارپذیری بالا، سرعت خوانش (اندازه‌گیری ده‌ها یا صدها نمونه در یک پلیت)، نیاز به حجم کم نمونه و معرف، و قابلیت استانداردسازی روش، از مزایای مهم این دستگاه است. در مجموع، الیزاریدر پلی است میان واکنش بیوشیمیایی ایمنی-آنزیمی و نتایج عددی قابل تفسیر، و بدون آن، انجام بسیاری از آزمایش‌های تشخیصی و تحقیقاتی با سرعت و دقت امروزی عملاً ممکن نبود.

در این آزمایشگاه، دستگاه الیزاریدر عمدتاً برای سنجش آنزیم‌ها در حشرات استفاده می‌شود. این دستگاه مبتنی بر جذب در طول موجهای مختلف است. پلیت‌های چندخانه مخصوصیدر این دستگاه جهت خوانش قرار می‌گیرد و در طول موج مدنظر که آنزیم‌های حشرات در آن‌ها جذب دارند، این دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای آنزیم‌هایی مثل آنزیم‌های سم‌زدا، استیل کولین استراز و کربوکسیل استرازها و ذخایر انرژی

هر ماده شیمیایی، در طول موج‌های خاصی، تابش نوری را جذب می‌کند یا عبور می‌دهد، عمل می‌کند؛ به این صورت که نمونه درون لام کوچک (کووت) قرار می‌گیرد و نور با شدت مشخص، از میان آن عبور می‌کند. بخشی از این تابش توسط نمونه جذب شده و بخش دیگر عبور می‌کند، اندازه‌گیری میزان عبور یا جذب نوری می‌تواند نشان‌دهنده غلظت ماده در نمونه باشد. تاریخچه اسپکتروفتومتر به اوایل قرن بیستم برمی‌گردد، زمانی که توسعه ابزارهای نوری و فیبر نوری این امکان را فراهم کرد که بتوان میزان جذب مواد شیمیایی را با دقت بالا اندازه‌گیری کرد؛ اما مهم‌ترین تحولات در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ رخ داد که با افزایش حساسیت و کاهش حجم نمونه، این دستگاه‌ها وارد عرصه‌های جدید شدند. اهمیت این دستگاه در دقت، حساسیت و سرعت بالایی اندازه‌گیری مستقیم و کمی غلظت مواد، در بسیاری از آزمایش‌های تشخیصی، کنترل کیفیت، تحقیقات و توسعه دارو، مطالعه بیوشیمی، و تحلیل مواد آلی و معدنی است. روش کار در اسپکتروفتومتر بدین صورت است که نمونه درون لام قرار می‌گیرد و نور منبع با طول موج معین از میان آن عبور می‌کند؛ پس از آن، آشکارساز شدت نوری که از نمونه عبور کرده است را ثبت می‌کند، و در نهایت نرم‌افزار دستگاه بر اساس مقدار عبور (transmittance) یا جذب نوری (absorbance) غلظت ماده مورد نظر را محاسبه می‌کند. معمولاً

در حشرات مثل پروتئین و کربوهیدرات می‌توان استفاده کرد. همچنین به منظور اندازه‌گیری برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در حشرات، مثل سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز، عمدتاً از این دستگاه استفاده می‌شود.

نکات مراقبتی:

- ۱- کالیبراسیون‌های دوره‌ای که هر چندسال یک بار دستگاه باید توسط شرکت سازنده انجام شود.
- ۲- لامپ UV باید هر چندسال یک بار به صورت دوره‌ای بررسی و در صورت لزوم، تعویض گردد.



شکل ۲. محل قرارگیری پلیت در دستگاه خوانش الیزا

### ۳. دستگاه اسپکتروفتومتر

دستگاه اسپکتروفتومتر، ابزاری است که برای اندازه‌گیری میزان جذب یا عبور تابش نوری (معمولاً در طول موج‌های مختلف مرئی و فرابنفش) توسط نمونه‌های شفاف و محلول‌ها به کار می‌رود و در آزمایشات بیوشیمی، شیمی، محیط‌زیست و پزشکی کاربرد فراوان دارد. این دستگاه بر اساس اصل اینکه



### نکات مراقبتی

- ۱- مشابه دستگاه الیزاریدر، سرویس‌های دوره‌ای باید انجام شود و تعویض به موقع لامپ انجام گیرد.
- ۲- جهت کار با دستگاه باید از کارشناس متخصص کمک خواست.



شکل ۳. دستگاه اسپکتروفتومتر و محل قرارگیری کووت‌ها در دستگاه

از فیلترهای نوری یا منشورهای گسسته برای تعیین طول موج خاص بهره می‌برند؛ در نتیجه، دستگاه می‌تواند در طول موج‌های متفاوتی برای تحلیل‌های مختلف به کار گرفته شود. ویژگی‌های مهم اسپکتروفتومتر شامل حساسیت بالا، قابلیت اندازه‌گیری چندین نمونه هم‌زمان، امکان تنظیم طول موج، نیاز به حجم نمونه کم، و قابلیت انتقال داده‌ها به نرم‌افزارهای تحلیل است. علاوه بر این، اسپکتروفتومترهای مدرن مجهز به نمایشگر دیجیتال، قابلیت ثبت و ذخیره نتایج، و ارتباط با کامپیوتر دارند که کار کردن با آنها را آسان‌تر و تکرارپذیرتر می‌سازد. در مجموع، اسپکتروفتومتر وسیله‌ای حیاتی در آزمایش‌های شیمیایی و زیستی است، چون بدون آن، اندازه‌گیری دقیق غلظت مواد در نمونه‌های مختلف، امکان‌پذیر نبود و تشخیص سریع و غیرتخریبی مواد در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و کاربردهای صنعتی به چالش می‌انداخت.

### سپاسگزاری:

از آقای دکتر ترابی، عضو محترم هیئت علمی بخش حشره‌شناسی، پیرو همکاری ایشان تشکر می‌نمایم.

تفاوت این دستگاه با دستگاه الیزاریدر در نحوه به‌کارگیری نمونه‌ها بوده که در این دستگاه از جایگاه‌های کووت استفاده می‌شود. طول موج‌های دستگاه به صورت پیوسته بوده و از طول موج فرابنفش تا نور مرئی را پوشش می‌دهد. این دستگاه برای اندازه‌گیری فعالیت‌های آنزیمی قابل کاربرد است. در این آزمایشگاه برای اندازه‌گیری و تخمین میزان رشد باکتری‌ها در طول موج ۶۰۰ نانومتر از این دستگاه استفاده می‌شود.

# برهم کنش

## میان عوامل مهارزیستی

علیرضا عزمی؛ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی،

دانشگاه تهران

Alirezaazmi@ut.ac.ir

دریافت: ۲۷ دی ۱۴۰۴ ■ بازنگری: ۶ بهمن ۱۴۰۴ ■ پذیرش: ۱۰ بهمن ۱۴۰۴ ■ انتشار آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22059/giahpzshsj.2026.414630.1057>



### چکیده

مهارزیستی به عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت یکپارچه (تلفیقی) آفات (IPM)، در دهه های اخیر مورد توجه ویژه پژوهشگران و متخصصان گیاه پزشکی قرار گرفته است. با افزایش تولید و تجاری سازی عوامل مهارزیستی، موضوع «برهم کنش میان عوامل مختلف مهارزیستی» اهمیت بیشتری پیدا کرده است؛ زیرا موفقیت یا ناکامی بسیاری از برنامه های میدانی به کیفیت و نوع این برهم کنش ها وابسته است. این برهم کنش ها می توانند به صورت هم افزایی، تضعیف اثر یک عامل بر دیگری یا بی تفاوتی بروز کنند. مهم ترین گروه های درگیر در چنین تعاملاتی شامل پارازیتوئیدها، شکارگرها، قارچها، باکتریها، ویروسها و نماتودهای بیمارگر حشرات هستند. این مقاله مروری با هدف بررسی انواع برهم کنش مثبت و منفی میان عوامل مهارزیستی، مکانیسم های زیربنایی این تعاملات، عوامل محیطی مؤثر بر آنها و پیامدهای کاربردی شان در مدیریت آفات تدوین شده است. جمع بندی این بررسی نشان می دهد که شناخت دقیق سازوکارهای تعامل و در نظر گرفتن آنها در طراحی برنامه های مهارزیستی، می تواند به افزایش کارایی و پایداری روش های مدیریت تلفیقی آفات منجر شود.

واژه های کلیدی: مهارزیستی، برهم کنش عوامل زیستی، مدیریت تلفیقی



## مقدمه

زیستی با هم تعامل مثبت داشته باشند و هر دو با استفاده از میزبان مشترک رشد خود را تکمیل کنند) و... رخ دهد و بر کارایی نهایی مهار آفات اثر بگذارد (Hajek and Eilenberg, ۲۰۱۸). بررسی‌ها نشان می‌دهند که ترکیب عوامل مهار زیستی میکرو (مانند باکتری) و ماکرو (مانند پارازیتوئیدها)، در مهار بسیاری از آفات مؤثر و سازگار بوده است؛ در بیش از ۸۰ درصد ترکیب‌های مورد مطالعه، هم‌زیستی سازگار گزارش شده است (Koller and et al, ۲۰۲۳). با این حال، نتیجه نهایی ترکیب عوامل زیستی غالباً به ویژگی‌های گونه‌ها، دز و زمان رهاسازی و شرایط محیطی بستگی دارد (Půža and Tarasco, 2023)؛ بنابراین، مرور شواهد موجود درباره برهم‌کنش میان عوامل مهار زیستی به منظور درک بهتر مزایا، محدودیت‌ها و شرایط بهینه رهاسازی ترکیبی ضروری است. هدف این مقاله مروری، گردآوری یافته‌های اخیر و ارائه چارچوب مفهومی برای استفاده بهینه از ترکیب عوامل زیستی در مدیریت تلفیقی آفات است.

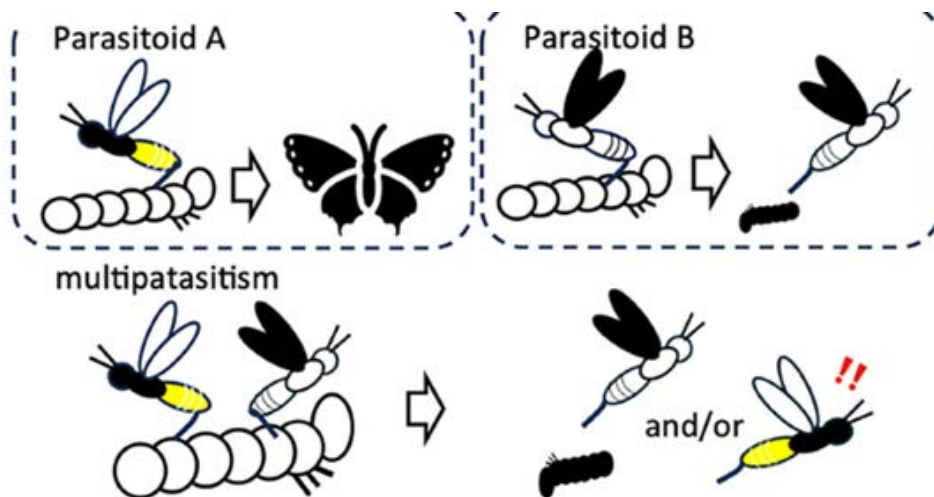
### برهم‌کنش پارازیتوئید با پارازیتوئید

وقتی دو یا چندگونه پارازیتوئید روی یک میزبان مشترک فعالیت می‌کنند، تعامل میان آن‌ها از رقابت تا هم‌زیستی تأثیری مهم بر کارایی مهار زیستی می‌گذارد. این تعاملات می‌تواند در مرحله تخم‌ریزی (تداخل در انتخاب میزبان)، مرحله لارو (رقابت بین لاروها داخل یا خارج میزبان)، یا حتی در رفتار

مهار زیستی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی مدیریت تلفیقی آفات، به دلیل کارایی پایدار و سازگاری بیشتر با محیط زیست، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است (Chandler et al, ۲۰۲۲). با افزایش کاربرد عوامل مهار زیستی شامل پارازیتوئیدها، شکارگرها و عوامل میکروبی مانند قارچ‌ها، نماتودها و باکتری‌های بیماری‌زا، موضوع «برهم‌کنش میان این عوامل» به یکی از مباحث کلیدی در بهبود کارایی برنامه‌های IPM تبدیل شده است (Půža and Tarasco, 2023). برهم‌کنش بین عوامل مهار زیستی به تأثیرات متقابل مثبت، منفی یا خنثی میان دشمنان طبیعی (پارازیتوئیدها، شکارگرها و بیمارگرها) گفته می‌شود که می‌تواند به صورت هم‌افزایی (زمانی که دو عامل اثر همدیگر را تشدید می‌کنند مانند تعامل بین ویروس‌های هم‌زیست دستگاه تولیدمثلی زنبورها *Ichneumonidae*)، رقابت (زمانی که دو عامل مهار زیستی برای رسیدن به یک میزبان تلاش می‌کنند که در نهایت به یک نتیجه منفی در بحث مهار زیستی می‌انجامد)، هایپرپارازیتیسیم (زمانی که دو پارازیتوئید از دو گونه متفاوت یک میزبان را پارازیته می‌کنند که نتیجه آن معمولاً پیروزی یک پارازیتوئید و شکست پارازیتوئید دیگر است)، تداخل (زمانی که ورود یک عامل مهار زیستی باعث توقف یا کندی رشد عامل مهار زیستی دیگری شود)، هم‌زیستی (زمانی که دو عامل مهار

جستجوی میزبان و انتخاب آن باشد (Harvey et al., 2013). در برخی موارد، رهاسازی همزمان دو گونه باعث کاهش بازده هر دو گونه می‌شود؛ برای مثال، در مطالعه‌ای روی دو پارازیتوئید تخم‌سن *Megacopta cribraria*، رهاسازی همزمان زنبور *Paratelenomus saccharalis* و زنبور *Ooencyrtus nezarae* باعث کاهش زادآوری *P. saccharalis* شد، چون *O. nezarae* برنده رقابت و غالب بود (Warsi et al., 2023). از سوی

اختلاف در توانایی تولیدمثلی و تعداد دسته تخم میزبان باعث شد هر دو گونه با همزیستی نسبی در همان میزبان مشترک دوام بیاورند (Cusumano et al., 2022)؛ بنابراین، نتیجه این برهم‌کنش‌ها از رقابت شدید و کاهش کارایی تا همزیستی و افزایش پایداری جمعیت پارازیتوئیدها به خصوصیات زیستی گونه‌ها، تراکم میزبان، زمان و ترتیب رهاسازی و شرایط محیطی وابسته است. این



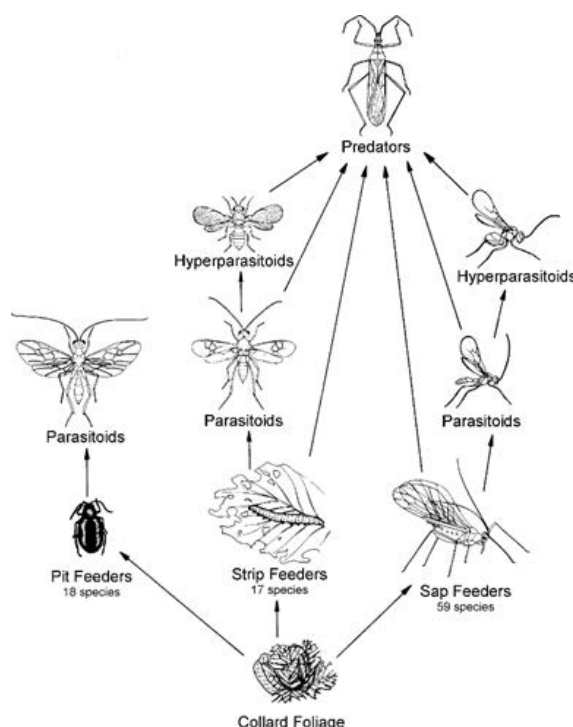
شکل ۱: برهم‌کنش بین دوزنبور پارازیتوئید روی یک میزبان (Kuramitsu et al., 2025)

دیگر، بعضی تحقیقات نشان داده‌اند که ترکیب چندگونه پارازیتوئید می‌تواند به علت تفکیک منابع یا اختلاف در خصوصیات تولیدمثلی گونه‌ها (مانند تعداد تخم، سرعت تخم‌ریزی، انتخاب میزبان و...) باعث همزیستی شود. برای نمونه، در مطالعه‌ای بر روی دو گونه پارازیتوئید تخم، *O. Trissolcus basalis* و *telenomicida* علیه سن سبز پنبه *Nezara viridula*

پیچیدگی نشان می‌دهد وقتی چندگونه پارازیتوئید با هم استفاده می‌شوند، باید سازوکارهای تعامل بین آن‌ها به دقت بررسی و برنامه‌ریزی شود تا مهار زیستی مؤثر و پایدار حاصل شود.

#### برهم‌کنش پارازیتوئید با شکارگر

همان‌طور که در بخش برهم‌کنش پارازیتوئید با



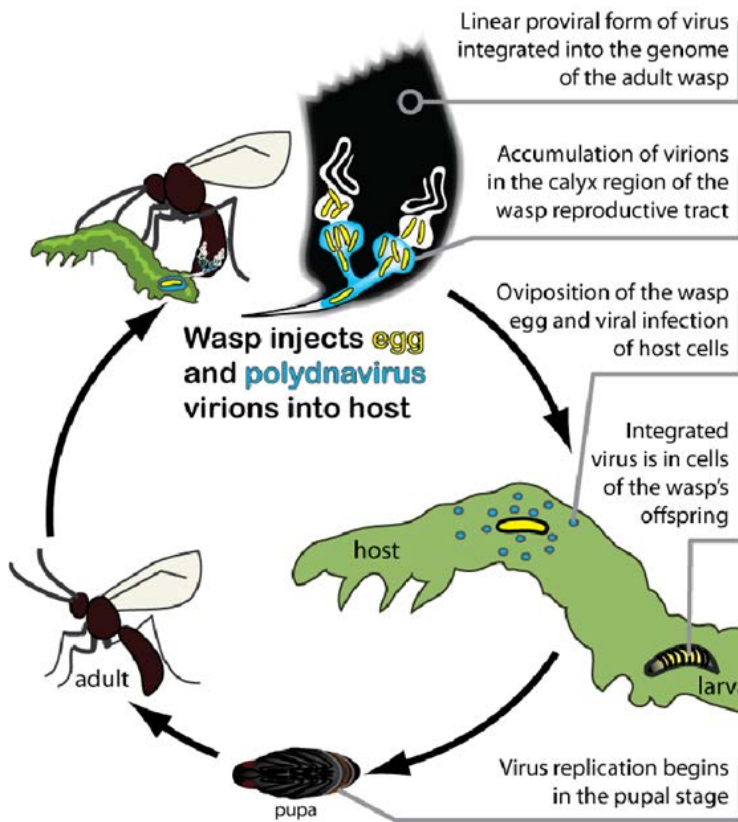
شکل ۲: برهم کنش بین شکارگر با سطوح مختلف پارازیتوئیدی  
(2018, Hajek and Eilenberg)

شود (Půža and Tarasco, ۲۰۲۳). مطالعات نشان داده اند که تعامل بین پارازیتوئیدها و بیماری‌گرهای میکروبی می‌تواند سازگار یا ناسازگار باشد. به عنوان مثال، برخی گونه‌های قارچ‌های بیماری‌گر حشرات آفت مانند *Beauveria bassiana* ممکن است میزبان پارازیتوئیدها را آلوده کرده و نرخ پارازیتیسیم را کاهش دهند، در حالی که گونه‌های دیگر قارچ‌ها اثر منفی کمی بر پارازیتوئیدها دارند و هم‌افزایی رخ می‌دهد (Chaudhary, ۲۰۲۴). همچنین، بررسی‌ها نشان داده اند که انتخاب ترکیب مناسب پارازیتوئید و بیماری‌گر می‌تواند منجر به مهار مؤثرتر آفات شود. برای مثال، در مطالعه‌ای، هم‌زمانی رهاسازی پارازیتوئید

پارازیتوئید اشاره شد، تعامل میان دشمنان طبیعی پیچیده است و می‌تواند شامل رقابت، همزیستی یا کاهش اثرگذاری یکی از گونه‌ها باشد، در ادامه وقتی پارازیتوئیدها با شکارگرها استفاده می‌شوند، این پیچیدگی افزایش می‌یابد. در چنین سیستم‌هایی، شکارگرها ممکن است علاوه بر آفت، میزبان پارازیتوئید یا حتی خود پارازیتوئید را شکار کنند که در این صورت می‌توانند کارایی مهارزیستی را کاهش دهد (Xue et al., ۲۰۲۵). با این حال، گاهی استفاده از این دشمنان منجر به هم‌افزایی می‌شود؛ به این معنا که تفاوت در رفتار، زمان فعالیت و منابع مورد استفاده سبب می‌شود هر دو گونه بتوانند با کمترین تداخل به مهار آفت کمک کنند (Cicero et al., ۲۰۲۴). نتیجه این برهم کنش‌ها به شرایط محیطی، تراکم میزبان، نوع گونه‌ها و ترتیب رهاسازی وابسته است و نشان می‌دهد که هر برنامه مهارزیستی تلفیقی باید پیش از اجرا به دقت آزمایش شود تا هم بیشینه بهره‌وری حاصل شود و هم اثرات منفی تعامل‌ها کاهش یابد.

### :: برهم کنش پارازیتوئید با بیماری‌گرها

وقتی پارازیتوئیدها با بیماری‌گرها ترکیب می‌شوند، این پیچیدگی بیشتر می‌شود. بیماری‌گرها، شامل قارچ‌ها، نماتدها، باکتری‌ها یا ویروس‌های بیماری‌گر حشرات آفت، می‌توانند جمعیت آفات را کاهش دهند، اما حضور آن‌ها ممکن است پارازیتوئیدها را نیز تحت تأثیر قرار دهد و باعث کاهش کارایی مهارزیستی



شکل ۳: برهم کنش بین زنبور پارازیتوئید و ویروس Polidnavirus (2012, Burke and Strand)

B. *Trichogramma sp* و قارچ *bassiana* روی تخم‌های کرم گلوگاه *Ectomyelois ceratoniae* انار باعث کاهش جمعیت آفت شد، در حالی که اثرات منفی بر خود پارازیتوئید محدود بود (Jiang et al., ۲۰۲۳)؛ بنابراین، تعامل پارازیتوئید با بیمارگر وابسته به نوع آفت، ویژگی‌های زیستی و رفتاری پارازیتوئید و نوع بیمارگر است و هر طرح مهار تلفیقی باید با آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی دقیق بررسی شود تا اثرات مثبت بیش‌تر و اثرات منفی کم‌تر شود.

### برهم‌کنش شکارگر با شکارگر

داده‌اند که حضور چندگونه شکارگر ممکن است منجر به شکار درون گروهی شود، یعنی یک شکارگر ممکن است شکارگر دیگر را مصرف کند یا بقای آن را تهدید کند. به‌عنوان مثال، کفش‌دوزک *Harmonia axyridis* به‌عنوان شکارگر غالب می‌تواند شکارگرهای کوچک‌تر مانند *Coccinella septempunctata* یا *Adalia bipunctata* را تحت تأثیر قرار دهد و نرخ جمعیت آن‌ها را کاهش دهد (Snyder and Ives, ۲۰۰۳). با این حال، در شرایطی که گونه‌های شکارگر رفتارها و زمان فعالیت متفاوت داشته باشند، امکان هم‌افزایی وجود دارد و مهار آفت مؤثرتر می‌شود، زیرا

در سیستم‌های مهار زیستی، گونه‌های مختلف شکارگر که بر یک آفت تأثیر دارند، می‌توانند با هم تعامل کنند و این تعامل‌ها تعیین‌کننده موفقیت کنترل هستند. یکی از مهم‌ترین این تعامل‌ها رقابت مستقیم یا غیرمستقیم بین شکارگرها است. رقابت مستقیم شامل مبارزه یا جلوگیری از دسترسی دیگر شکارگرها به منابع غذایی است و رقابت غیرمستقیم ممکن است از طریق کاهش منابع (مثلاً کاهش جمعیت آفت) یا انتشار علامت‌های شیمیایی صورت گیرد (Rosenheim et al., ۱۹۹۵). مطالعات نشان

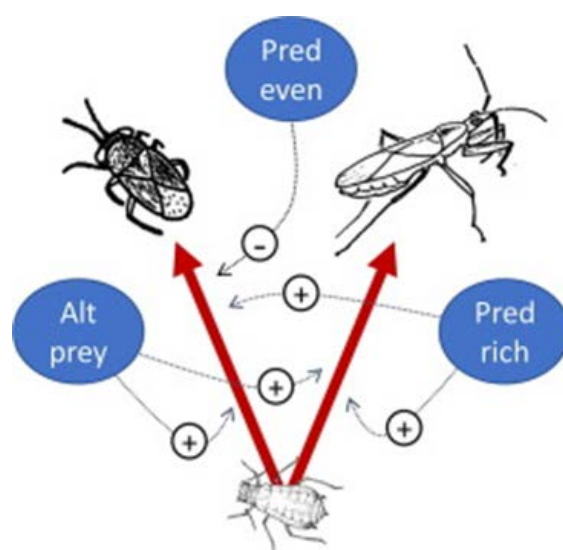


عامل جمعیت آفت را کاهش می‌دهند، در حالی که در حالت ناسازگار، برخی گونه‌های بیمارگر مانند *B. bassiana* ممکن است شکارگرها را آلوده کرده و نرخ شکار را کاهش دهند (Chaudhary, 2024). برای مثال، مطالعه‌ای نشان داد که رهاسازی هم‌زمان شکارگر *H. axyridis* و قارچ *B. bassiana* بر جمعیت شته‌ها، مهار مؤثری ایجاد کرد بدون اینکه نرخ بقای شکارگر به‌طور قابل توجهی کاهش یابد (Xue et al., 2025). این مثال نشان می‌دهد که انتخاب گونه مناسب و زمان بندی رهاسازی برای دستیابی به هم‌افزایی میان شکارگر و بیمارگر ضروری است.

### برهم‌کنش بیمارگر با بیمارگر

وقتی چندین عامل بیماری‌زا هم‌زمان بر یک آفت اعمال می‌شوند، تعامل بین آن‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر موفقیت کنترل داشته باشد. این تعامل‌ها می‌توانند سازگار، ناسازگار یا خنثی باشند. در حالت سازگار، دو یا چند بیمارگر جمعیت آفت را مؤثرتر کاهش می‌دهند، در حالی که در حالت مخالف، حضور یک بیمارگر ممکن است اثر بیمارگر دیگر را کاهش دهد (Chaudhary, 2024). به‌عنوان مثال، ترکیب نماتدهای بیمارگر حشرات و قارچ‌های بیمارگر حشرات می‌تواند اثر هم‌افزایی داشته باشد، زیرا هرگونه قسمت متفاوتی از آفت را هدف قرار می‌دهد یا در زمان‌های مختلف فعال هستند و جمعیت آفت را سریع‌تر کاهش می‌دهد

هرگونه بخش متفاوتی از جمعیت آفت را هدف قرار می‌دهد و رقابت مستقیم کاهش می‌یابد (Finke and Denno, 2002)؛ بنابراین، موفقیت مهارزیستی تلفیقی شکارگرها نیازمند شناخت دقیق از رفتار، الگوهای تغذیه و سازگاری گونه‌هاست تا اثرات منفی تعامل‌ها کاهش و بهره‌وری کنترل افزایش یابد.



شکل ۴: برهم‌کنش بین دو شکارگر برای تصاحب شکار

(Krey et al., 2021)

### برهم‌کنش شکارگر با بیمارگرها

بیمارگرها که همان قارچ‌ها، نماتدها، باکتری‌ها و ویروس‌های آفت‌کش هستند، می‌توانند جمعیت آفات را کاهش دهند، اما حضور آن‌ها ممکن است بر عملکرد شکارگرها تأثیر بگذارد و باعث کاهش کارایی مهارزیستی شود (Půža and Tarasco, 2023). مطالعات نشان داده‌اند که تعامل شکارگر با بیمارگر می‌تواند سازگار یا ناسازگار باشد. در حالت سازگار، بیمارگرها اثر منفی کمی بر شکارگرها دارند و هر دو

**نتیجه گیری** (Puža, 2023). با این حال، برخی ترکیب‌ها

ممکن است رقابتی باشند؛ مثلاً انتشار هم‌زمان قارچ *B. bassiana* و نماتد *Steinernema* در برخی میزبان‌ها باعث کاهش نرخ عفونت هر یک از عوامل شد، زیرا یکی از بیمارگرها میزبان مورد نیاز دیگری را آلوده یا از دسترس خارج می‌کند (Chaudhary, 2024). برای موفقیت این مورد، انتخاب گونه‌های بیمارگر سازگار، زمان بندی رهاسازی و شرایط محیطی اهمیت دارند.

**برهم‌کنش پارازیتوئید، شکارگر و بیمارگرها با****همدیگر**

هنگامی که پارازیتوئیدها، شکارگرها و بیمارگرها هم‌زمان بر یک جمعیت آفت اعمال می‌شوند، سیستم به شدت پیچیده می‌شود و تعامل‌های چندگانه بین دشمنان طبیعی نقش مهمی در موفقیت کنترل دارد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که زمان بندی رهاسازی و انتخاب گونه‌های دشمن طبیعی سازگار کلید موفقیت کنترل تلفیقی است. برای مثال، در مطالعه‌ای استفاده هم‌زمان از شکارگر *H. axyridis*، پارازیتوئید *Pyemotes zhonghuajia* و قارچ *B. bassiana* منجر به کاهش جمعیت شته‌ها شد بدون اینکه بقای دشمنان طبیعی به طور قابل توجهی کاهش یابد (Xue et al, 2025).

تعاملات میان دشمنان طبیعی شامل پارازیتوئیدها، شکارگرها و بیمارگرها نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت مهار زیستی آفات دارند. بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که این تعامل‌ها می‌توانند سازگار، رقابتی یا خنثی باشند و اثرگذاری آن‌ها بر جمعیت آفات به ویژگی‌های گونه‌ها، تراکم جمعیت، زمان بندی رهاسازی و شرایط محیطی بستگی دارد. هم‌افزایی میان دشمنان طبیعی، زمانی رخ می‌دهد که گونه‌ها از منابع متفاوت استفاده کنند یا زمان فعالیت آن‌ها متفاوت باشد که منجر به کنترل مؤثرتر و کاهش جمعیت آفات می‌شود. از سوی دیگر، رقابت، شکار درون‌گروهی یا اثرات مخرب بیمارگرها بر شکارگرها و پارازیتوئیدها می‌تواند بهره‌وری کنترل را کاهش دهد؛ بنابراین، طراحی برنامه‌های مهار زیستی تلفیقی نیازمند شناخت دقیق رفتار، سازگاری گونه‌ها و ارزیابی اثرات متقابل آن‌ها است. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی می‌توانند به شناسایی ترکیب‌های مؤثر و زمان بندی مناسب رهاسازی کمک کنند تا بیشینه مهار آفت با حداقل اثرات منفی بر دشمنان طبیعی حاصل شود. با درک دقیق این برهم‌کنش‌ها و اعمال استراتژی‌های مدیریت تلفیقی، می‌توان مهار پایدار و مؤثری بر جمعیت آفات کشاورزی برقرار کرد و وابستگی به آفت‌کش‌های شیمیایی را کاهش داد.



## منابع

- Burke, G. & Strand, M. (۲۰۱۲). Polydnviruses of Parasitic Wasps : Domestication of Viruses to Act as Gene Delivery Vectors. *Insects*, ۱۱۹-۹۱ :۳.
- Chaudhary, R. (۲۰۲۴). Interactions among microbial biocontrol agents : A mechanistic review. *Biological Control*, ۱۰۵۱۵۰ :۱۹۲.
- Chandler, D., Grant, W. P., Greaves, J., & Prince, G. (۲۰۲۲). Biological control in plant protection : An overview of recent advances. *Pest Management Science*, ۱۵۱۵-۱۵۰۱ : (۴)۷۸.
- Cusumano, A., Peri, E., Al nç, T., & Colazza, S. (۲۰۲۲). Contrasting reproductive traits of competing parasitoids facilitate coexistence on a shared host pest in a biological control perspective. *Pest Management Science*, ۳۳۸۳-۳۳۷۶ : (۸)۷۸.
- Cicero, L., Chavarin Gomez, L. E., Pérez Ascencio, D., Barreto Barriga, O., Guevara, R., Desneux, N., & Ramirez Romero, R. (۲۰۲۴). Influence of alternative prey on the functional response of a predator in two contexts : With and without intraguild predation. *Insects*, ۳۱۵ : (۵)۱۵.
- Finke, D. L., & Denno, R. F. (۲۰۰۲). Intraguild predation strong, omnivory weak : A meta-analysis of predation among arthropod predators. *Ecology*, ۷۵۲-۷۴۵ : (۳)۸۳.
- Hajek, A. E. & Eilenberg J. (۲۰۱۸). Ecological Basis for Use of Predators, Parasitoids, and Pathogens to Control Pests. In : *Natural Enemies : An Introduction to Biological Control*, ۱۳۶-۱۰۹.
- Harvey, J. A., Poelman, E. H., & Tanaka, T. (۲۰۱۳). Intrinsic inter and intraspecific competition in parasitoid wasps. *Annual Review of Entomology*, ۳۵۱-۳۳۳ :۵۸.
- Jiang, H., Zhang, Y., & Wang, X. (۲۰۲۳). Entomopathogens and parasitoids allied in biocontrol : A systematic review. *Biocontrol Science and Technology*, ۸۰۲-۷۸۵ : (۷)۳۳.
- Kuramitsu, K., Kainoh, Y & Konno, K. (۲۰۲۵). Multiparasitism enables a specialist endoparasitoid to complete parasitism in an unsuitable host caterpillar. *Scientific Reports*, ۱۵ : ۸۳۶۱.
- Koller, J., Sutter, L., Gonthier, J., Collatz, J. & Norgrove, L. (۲۰۲۳). Entomopathogens and Parasitoids Allied in Biocontrol : A Systematic Review. *Pathogens*, ۹۵۷ : (۷)۱۲.
- Krey, K., Smith, O., Chapman, E., Crossley, M., Crowder, D., Fu, Z., Harwood, J., Jensen, A., Lynch, C., Snyder, G. & Snyder, W. ۲۰۲۱. Prey and predator biodiversity mediate aphid consumption by generalists. *Biological Control*, ۱۰۴۶۵ : ۱۶۰.

Půža, V. (۲۰۲۳). Interactions between entomopathogenic nematodes and fungi : Compatibility and antagonism. *Journal of Invertebrate Pathology*, ۱۰۷۰۲۴ : ۱۹۶.

Půža, V., & Tarasco, E. (۲۰۲۳). Interactions between Entomopathogenic Fungi and Entomopathogenic Nematodes. *Microorganisms*, ۱۶۳ : (۱)۱۱.

Rosenheim, J. A., Wilhoit, L. R., & Armer, C. A. (۱۹۹۵). Influence of intraguild predation among generalist insect predators on the suppression of an herbivore population. *Ecology*, ۱۶۱۱-۱۵۹۶ : (۴)۷۶.

Snyder, W. E., & Ives, A. R. (۲۰۰۳). Interactions between specialist and generalist predators : Parasitoid-mediated competition and predation. *Ecology*, ۲۶۱۷-۲۶۰۶ : (۱۰)۸۴.

Warsi, S., Chicas Mosier, A. M., Balusu, R. R., Jacobson, A. L., & Fadamiro, H. Y. (۲۰۲۳). Direct and indirect competitive interactions between *Ooencyrtus nezarae* and *Paratelenomus saccharalis* parasitizing *Megacopta cribraria* egg patches. *Insects*, ۳۵ : (۱)۱۴.

Xue, C., Li, X., Qin, H X., Zhang, L., Yang, M F., Wu, C X., & Liu, J F. (۲۰۲۵). Predator-parasitoid interaction between *Harmonia axyridis* (Coleoptera : Coccinellidae) and *Pyemotes zhonghuajia* (Prostigmata : Pyemotidae) in aphid control. *Journal of Economic Entomology*, ۵۱۳-۵۰۵ : (۲)۱۱۸.



## Interactions Among Biological control agents

### Abstract

Biological control, as one of the key components of Integrated Pest Management (IPM), has received special attention from researchers and plant protection specialists in recent decades. With the increasing production and commercialization of biological control agents, the issue of interactions among different biological control agents has gained greater importance, because the success or failure of many field programs depends on the quality and nature of these interactions. These interactions can occur as synergism, antagonism (where one agent weakens the effect of another), or neutrality. The most important groups involved in such interactions include parasitoids, predators, fungi, bacteria, viruses, and entomopathogenic nematodes. This review article aims to investigate the types of positive and negative interactions among biological control agents, the underlying mechanisms of these interactions, the environmental factors affecting them, and their practical implications in pest management. The conclusion of this review indicates that a precise understanding of interaction mechanisms and their consideration in the design of biological control programs can lead to increased efficiency and sustainability of integrated pest management methods.

### Keywords:

Biological control; Interaction of biological agents; Integrated Pest Management (IPM)

# تولد یک قاتل خاموش

## در صنعت تولید شاهدانه

نگار ناظمی، دانشجوی کارشناسی ارشد بیماری شناسی گیاهی، دانشگاه تهران  
Negar.Nazemi1378@gmail.com

دریافت: ۱۱ بهمن ۱۴۰۴ ■ بازنگری: ۲۹ بهمن ۱۴۰۴ ■ پذیرش: ۳۰ بهمن ۱۴۰۴ ■ انتشار آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22059/gjahpzshsj.2026.410327.1050>



### چکیده

Hop latent viroid (HLVd) یا ویروئید نهفته رازک، یکی از مهم‌ترین عوامل بیماری‌زای نوظهور در کشت‌های تجاری شاهدانه (*Cannabis sativa L.*) است که طی سال‌های اخیر، خسارات اقتصادی قابل توجهی در گلخانه‌ها و مزارع کشت شاهدانه، به همراه داشته است. در واقع می‌توان گفت که این ویروئید، بزرگ‌ترین تهدید برای پرورش دهندگان شاهدانه در سراسر جهان است. این ویروئید کوچک‌ترین عامل بیماری‌زای شناخته‌شده در گیاهان بوده و متعلق به خانواده Pospiviroidae و عامل ایجادکننده Dudding disease یا ساقه شکننده، در شاهدانه است. عمدتاً از طریق تکثیر رویشی، ابزارهای آلوده و تماس مکانیکی منتقل می‌شود و با ایجاد اختلال در مسیرهای متابولیکی، کاهش تریکوم و کاهش ترکیبات فعال (کانابینوئیدها و ترپن‌ها)، سبب افت شدید عملکرد گیاه می‌شود. از نظر تاریخی، این بیماری در شاهدانه، در سال ۲۰۱۹ از کالیفرنیا، گزارش گردید. در سال‌های اخیر ویروئید نهفته رازک (HLVd) به همراه نشانه‌های بارزی در شاهدانه گزارش شده است. بررسی بر روی ۲۰۰,۰۰۰ نمونه شاهدانه، آلودگی ۹۰ درصد آن‌ها به این ویروئید را تأیید کرد؛ بنابراین خسارات بالقوه تخمین زده شده به ۴ میلیارد دلار در سال، تنها در ایالات متحده آمریکا رسید. ویروئید نهفته رازک (HLVd) با ایجاد نشانه‌های شدید در شاهدانه، تولید دانه و فیبر را در گونه‌های صنعتی و محتوای کانابینوئید در گونه‌های دارویی، مختل می‌کند. همچنین باعث کاهش ۵۰ تا ۷۰ درصدی محتوای Tetrahydrocannabinol (THC) می‌شود. لازم به ذکر است که تا به حال، گزارشی از آلودگی شاهدانه به این ویروئید از ایران ارائه نشده است.

واژگان کلیدی: شاهدانه، HLVd، THC، Dudding disease، کانابینوئید



## مقدمه

رابطه دلیل ایجاد شکنندگی در ساقه‌ها گزارش کرده‌اند. گیاهان آلوده، اغلب می‌توانند در طول یک دوره رشد، بدون نشانه باشند و سپس نشانه‌هایی مانند زردی و بدشکلی برگ‌ها و همچنین کاهش رشد، ایجاد کنند. در طول گلدهی نیز، گیاهان آلوده به HLVd، کاهش سطح متابولیت‌های ارزشمند را، نشان می‌دهند (Atallah et al., ۲۰۲۳). بر اثر آلودگی گیاهان شاهدانه به این ویروئید، سطح متابولیت‌های ثانویه این گیاه مانند فلاونوئیدها، تتراهیدروکانابینول (THC) و ترپین‌ها، می‌تواند به شدت نوسان داشته باشد که این موضوع بر مقدار و ارزش کل عملکرد این گیاه، تأثیر منفی می‌گذارد. زیان‌های وارده به صنعت شاهدانه، سالانه حدود چهار میلیارد دلار در ایالات متحده آمریکا برآورد شده است که نشان می‌دهد این ویروئید بسیار خطرناک و خسارت‌زا است (Adkar et al., ۲۰۲۳). ویروئید نهفته رازک (HLVd)، با ایجاد نشانه‌هایی شدید در شاهدانه، تولید دانه و فیبر را در گونه‌های صنعتی و محتوای کانابینوئید در گونه‌های دارویی، مختل می‌کند. همچنین باعث کاهش ۵۰ تا ۷۰ درصدی محتوای Tetrahydrocannabinol (THC) می‌شود Warren et al., ۲۰۱۹). (تأبه حال، گزارشی از آلودگی شاهدانه به این ویروئید از ایران، ارائه نشده است.

شاهدانه (*Cannabis sativa* L.)، یکی از نخستین گیاهانی است که برای هزاران سال در اروپا، آسیا، آفریقا و آمریکا به عنوان منبع تأمین الیاف، دانه و روغن و همچنین دارو، کشت شده است (Salami et al., ۲۰۲۰).

ویروئیدها، RNAهای حلقوی بیماری‌زا هستند که گیاهان را آلوده می‌کنند و معمولاً همانند ویروئید اگزوکورتیس مرکبات یا *Citrus exocortis viroid* (CEVd) دارای دامنه میزبانی وسیع و از جمله عوامل بیماری‌زای گیاهی با اهمیت اقتصادی برای گونه‌های متعددی از گیاهان علفی و چوبی به شمار می‌روند (Ortola & Daros, ۲۰۲۳). معمولاً بسیار مسری هستند و می‌توانند به صورت مکانیکی توسط ابزارهای کشاورزی، حشرات، گرده‌ها، دانه‌ها، گیاهان انگلی، پیوند شاخه و ریشه و بیمارگرهای گیاهی قارچی منتقل شوند (Adkar et al., ۲۰۲۳). ویروئید کوتولگی رازک، از خانواده *Pospiviroidae*، برای اولین بار از گیاه رازک، در اسپانیا، توسط پالاس و همکاران (۱۹۸۷) جدا شد (Pallas et al., ۱۹۸۷). اغلب باعث ایجاد نشانه‌های قابل مشاهده در گیاهان نمی‌گردد، به همین دلیل، آن را، ویروئید پنهان می‌نامند (Štajner et al., 2019). یک تهدید بزرگ برای صنعت تولید شاهدانه است و عامل ایجادکننده *Dudding disease* یا ساقه شکننده، است. اخیراً کشاورزان خسارات اقتصادی ویرانگری

**معرفی ویروئیدها**

ویروئیدها، کوچک ترین عوامل عفونت زای شناخته شده تا به امروز هستند که عمدتاً در گیاهان، ایجاد بیماری می کنند. اصطلاح ویروئید توسط Theodor Diener در سال ۱۹۷۱ برای توصیف یک مولکول RNA بیماری زای کوچک بدون پروتئین و با وزن مولکولی کم، پیشنهاد گردید که ۵۰ تا ۸۰ برابر کوچک تر از کوچک ترین ژنوم ویروسی تا آن زمان بود (Diener, ۱۹۷۱). مکانیسم های سلولی زمینه ساز بیماری هنوز به خوبی مورد بررسی قرار نگرفته اند. اگر چه چندین مطالعه نشان می دهند که RNA های ویروئیدی ممکن است به mRNA ها یا پروتئین های میزبان متصل شوند و عملکرد آن ها را مختل کنند (Cottilli et al., ۲۰۱۹). ویروئید غده دوکی سیب زمینی یا (PSTVd) Potato spindle tuber viroid، اولین گونه ای بود که از سیب زمینی ایرلندی در آمریکای شمالی جدا شد (Diener, ۱۹۷۱).

وجود ویروئیدها با کشف بعدی گیاهان مرکباتی که بیماری اگزوکورتیس مرکبات را نشان می دادند، بیشتر از قبل مورد تأیید قرار گرفت. از آن زمان بیش از ۵۰ RNA شبه ویروئید از گیاهان میزبان مختلف از جمله تک و دولپه ای جدا شد. پیشرفت ها در فناوری تشخیص بیماری زای گیاهی ویروئیدهای جدید و توزیع آن ها در مناطق جغرافیایی جدید به طور مداوم گزارش می شود. نشانه های بیماری ویروئیدی در گیاه میزبان تا حد زیادی به هر طبقه بندی شده اند (Adkar et al., ۲۰۱۵).

مشابه بیمارگرهای ویروسی، ویروئیدها وارد سلول می شوند و برای عفونت زایی موفق، به عوامل و آنزیم های میزبان وابسته هستند و تکثیر ویروئیدها در هسته یا در کلروپلاست صورت می گیرد که این موضوع نیز به تعیین طبقه بندی آن ها در خانواده های Pospiviroidae و Avsunviroidae به ترتیب کمک می کند (Flores et al., ۲۰۰۴). پنج گونه در خانواده Avsunviroidae وجود دارد که از طریق مکانیسم دایره غلطان متقارن در کلروپلاست تکثیر می شوند و ۳۹



گونه دیگر در خانواده Pospiviroidae گروه بندی می شوند که تکثیر آن ها از طریق دایره غلطان نامتقارن است (Chiumenti et al, ۲۰۲۱).

### :: ویروئید پنهان رازک

ویروئید پنهان رازک، متعلق به جنس Cocaviroid و خانواده Pospiviroidae است که در سال ۱۹۸۷ پالاس و همکاران بر روی دو گونه از سه گونه تجاری رازک (*Humulus lupulus* L.) از خانواده Canabaceae، از اسپانیا گزارش کردند. اگرچه ژنوم این ویروئید به اندازه ویروئید لکه آفتابی آواکادو یا Avocado Sunblotch Viroid (ASBVd) بود، اما خواص فیزیکی و زیستی آن با ویروئیدهایی که قبلاً مشخص شده بودند، متفاوت بود (Pallas et al, ۲۰۲۳).

ویژگی	فاکتور مورد نظر
مبله ای	ساختار ویروئید
دارد	Central conserved region (CCR)
دارد	منطقه مرکزی محافظت شده
ندارد	Terminal conserved hairpin (TCH)
ندارد	ساختار سنجاق سری
هسته	Self-cleaving activity (i.e., ribozyme)
دایره غلطان نامتقارن	فعالیت خودبرشی
	مکان تکثیر در میزبان
	نوع همانندسازی
	آنزیم مداخله گر در همانندسازی
	DNA – dependents RNA polymerase II

جدول ۱- ویژگی های ویروئید پنهان رازک (HLVd) (Adkar et al, 2023)



شکل ۱- نشانه های بدشکلی برگ ها و زردی رگبرگ ها ناشی از ویروئید نهفته رازک بر روی رازک ژاپنی (Adkar et al, 2023).

### دامنه میزبانی و نحوه انتقال ویروئید پنهان رازک

تا اواسط سال ۲۰۱۹ سه میزبان طبیعی رازک تجاری (*Humulus lupulus*) و رازک ژاپنی (*humulus japonicus*) و گزنه (*Urtica dioica L.*)، به عنوان میزبان های ویروئید پنهان رازک، شناخته شدند. در سال ۲۰۱۹ دو گروه مستقل ویروئید پنهان رازک از میزبان شاهدانه (*Cannabis sativa*) در ایالات متحده ای آمریکا گزارش شدند (Pethybridge, ۲۰۰۸). طبق تحقیقاتی که در سال های اخیر صورت گرفته است، خیار (*Cucumis sativus*)، گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum*)، گل داوودی (*Chrysanthemum morifolium*)، توتون (*Nicotiana benthamiana*) و گیاه گوش موشی (*Arabidopsis thaliana*) هم از میزبانان شناخته شده ای این ویروئید هستند (Atallah et al, ۲۰۲۳).

طبق گزارش ها، این ویروئید با بذر منتقل نمی شود و به صورت خیلی کم با گرده منتقل می شود. همچنین تا به امروز گزارشی از انتقال این ویروئید با ناقل وجود ندارد (Bektaş et al, ۲۰۱۹).

### ویروئید پنهان رازک بر روی شاهدانه

اگرچه آسیب ناشی از این ویروئید در گیاه شاهدانه مشهود است، اما نشانه های مرتبط می تواند بسته به واریته، مبهم باشد و اغلب تا زمانی که توسط محرک های محیطی یا عوامل استرس زا تحریک نشود، مشاهده نشود. به عنوان مثال، گذر به یک دوره نوری گل دهی می تواند یک سری نشانه های را القا کند که منجر به آسیب شناسی مشخص این ویروئید می شود و این بیماری در شاهدانه، به عنوان بیماری dud یا duding disease شناخته می شود (Bektaş et al, ۲۰۱۹). این وضعیت در ساختارهای مختلف گیاهی از جمله ساقه ها، برگ ها و گل ها

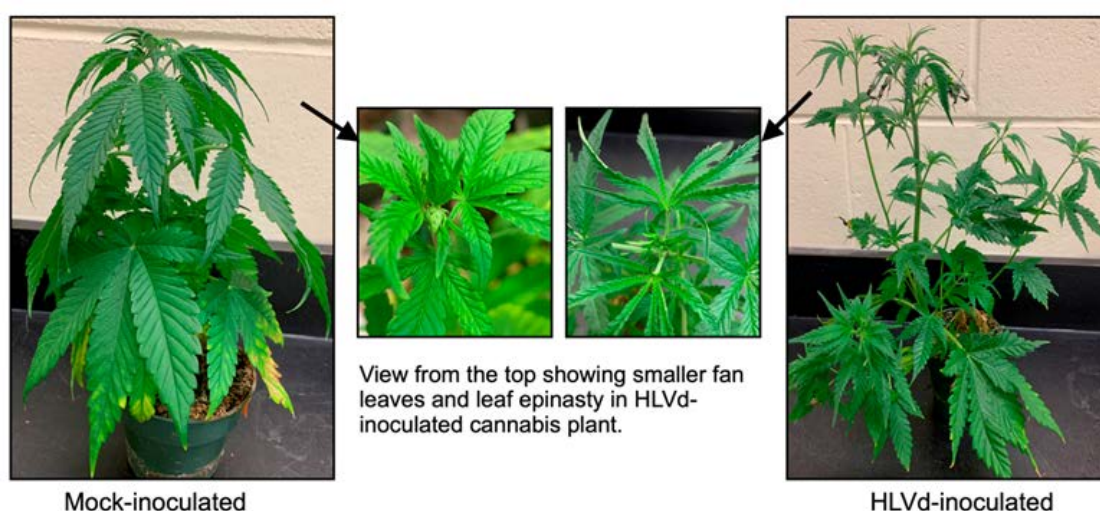
ویروئید پنهان رازک، به صورت مکانیکی از طریق پیوند و با ابزار یا ماشین آلات آلوده منتقل می شود.



و شدت بیماری به ژنوتیپ میزبان بستگی دارد. در ارقام حساس شاهدانه، نشانه‌هایی مانند کاهش فاصله میان‌گره، برگ‌های کوچک‌تر، کوتولگی، بدشکلی بوته، کلروز، شکنندگی ساقه، کاهش توده گل و کاهش تریکوم مشاهده می‌شود (Bektaş et al., ۲۰۱۹). در سال ۲۰۲۱، بررسی بر روی ۲۰۰,۰۰۰ نمونه شاهدانه آلودگی ۹۰ درصد از آن‌ها به این

دیده می‌شود و با کاهش قابل توجه در عملکرد و تولید متابولیت‌های ثانویه همراه است (Foust, ۲۰۲۳).

ویروئید نهفته رازک (HLVd)، تهدید قابل توجهی برای کشت شاهدانه است و بر عملکرد و کیفیت گیاه شاهدانه تأثیر می‌گذارد (Torres et al., ۲۰۲۴).



شکل ۲- نشانه‌های ویروئید نهفته رازک بر روی شاهدانه (Adkar et al., ۲۰۲۳)

ویروئید را تأیید کرد؛ بنابراین خسارت بالقوه تنها در ایالات متحده آمریکا نزدیک به چهار میلیارد دلار در سال تخمین زده شد. اکنون در مناطق کشت شاهدانه در کانادا، این ویروئید گسترش یافته است (Adkar et al., ۲۰۲۳). در شکل دو، نشانه‌های ویروئید نهفته‌ی رازک بر روی شاهدانه را مشاهده می‌کنید که در سمت راست، گیاه سالم و در سمت چپ، گیاه آلوده به این ویروئید قابل مشاهده است.

این وضعیت در ساختارهای مختلف گیاهی از جمله ساقه‌ها، برگ‌ها و گل‌ها دیده می‌شود و با کاهش قابل توجه در عملکرد و تولید متابولیت‌های ثانویه همراه است و این بیماری در شاهدانه، به عنوان بیماری dud یا duding disease شناخته می‌شود (Adkar et al., ۲۰۲۳). در شاهدانه همانند رازک، فقط ارقام خاصی نشانه‌های مرتبط با HLVd را نشان می‌دهند که بیانگر این است که نشانه‌ها

**متابولیت‌های گیاه شاهدانه**

گیاه شاهدانه متابولیت‌های اولیه و ثانویه‌ای را تولید می‌کند که وظایف متعددی دارند. متابولیت‌های اولیه شامل قندهای ساده، اسیدهای آمینه، لیپیدها و اسیدهای نوکلئیک هستند. در واقع ترکیباتی اند که برای فرایندهای سلولی لازم هستند. متابولیت‌های ثانویه مواد شیمیایی تولید شده به وسیله گیاه هستند که برای آن‌ها هیچ نقشی تاکنون در رشد، فتوسنتز، تولیدمثل و دیگر فعالیت‌های اولیه پیدان شده است. این ترکیبات در پاسخ به استرس، مانند عواملی که به عنوان بازدارنده در برابر علف‌خواران تولید می‌شوند، فعالیت می‌کنند (Keeling & Bohlmann, 2006).

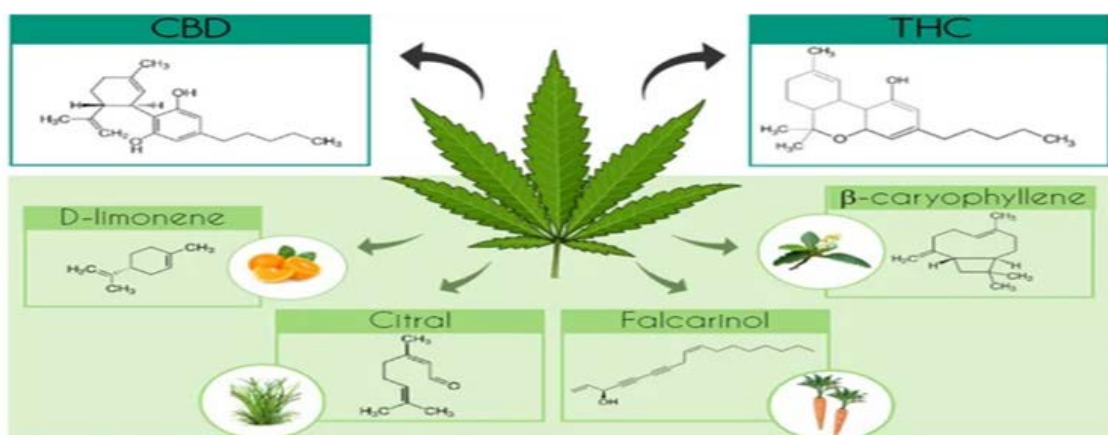
در گیاهان راه‌های متابولیکی زیادی برای تولید متابولیت‌های اولیه وجود دارد که در حیوانات دیده نمی‌شود. تفاوت دیگر در راه‌های متابولیکی گیاهان و حیوانات، گیاهان حاوی راه‌های متابولیکی متنوعی هستند که از راه‌های تولید متابولیت‌های اولیه منشعب می‌شوند و منجر به تولید ترکیباتی می‌شود که موجود برای ادامه حیات نیازی به آن‌ها ندارد. مجموعه این راه‌های متابولیکی حاشیه‌ای را متابولیسم ثانویه می‌نامند. فرآورده‌هایی که از این راه‌های متابولیسمی حاشیه‌ای منشأ می‌گیرند را متابولیت ثانویه می‌نامند. (Nelson & Cox, 2004)

متابولیت‌های ثانویه وظایف متعددی دارند:

از جمله نقش استحکامی (لیگنین)، محافظتی فیتوالکسین‌ها، دارویی (کدئین)، گرده‌افشانی، تولید رنگ (کارتنوئیدها)، مواد اولیه صنایع شیمیایی (صمغ‌ها، رزین‌ها و کائوچو) و نقش اللوپاتی (جاگلون) (Cheng et al, 2007).

گیاهان دارویی، به دلیل دارا بودن متابولیت‌های ثانویه‌ای همانند آلكالوئیدها، گلوکوزیدها، اسانس‌ها، تانن‌ها از اهمیت خاص و ویژه‌ای برخوردار هستند. گل‌های شاهدانه به دلیل وجود ترکیباتی مانند کانابینوئیدها، از جمله تتراهیدروکانابینول (THC) و کانابیدیول (CBD)، همواره مورد توجه قرار گرفته‌اند. THC تأثیرات روان‌گردان دارد، در حالی که CBD به دلیل خواص درمانی متنوعی که دارد، در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. شاهدانه حاوی طیف وسیعی از ترکیبات شیمیایی از جمله کانابینوئیدها، ترپن‌ها، فلاونوئیدها و اسیدهای چرب است (احمدی لاله مرزی و همکاران، 1403). شاهدانه، به دلیل دارا بودن کانابینوئیدهای مختلف (CBG, CNB, CBD, CBC, THC) مورد توجه است (بابایی و سلامی، 1395).

شاهدانه حاوی تقریباً ۵۴۰ ترکیب طبیعی است که به دلیل ساختار شیمیایی مشترک آن‌ها به عنوان فیتوکانابینوئیدها شناخته شده‌اند. این گیاه علفی یک‌ساله، طیف گسترده‌ای از متابولیت‌های ثانویه را تولید می‌کند که در این میان tetrahydrocannabinol (THC- $\Delta^9$ ) و کانابیدیول (CBD) از مهم‌ترین آن‌ها



شکل ۲- نشانه‌های ویروئید نهفته رازک بر روی شاهدانه (Adkar et al., 2023)

است که خواص درمانی  $\Delta^9$ -THC و CBD شامل توانایی عمل به‌عنوان مسکن، ضد استفراغ، عوامل ضد التهاب، ترکیبات ضد تشنج و به‌عنوان عوامل محافظ در تخریب عصبی است (Mishra et al., 2018). وجود اسیدهای چرب چند غیر اشباع، به‌ویژه امگا ۳، در دانه‌های شاهدانه باعث شده است تا این گیاه به‌عنوان یک منبع غذایی ارزشمند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ترکیبات فنولی موجود در شاهدانه خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد التهابی داشته و در پیشگیری برخی از بیماری‌ها مانند بیماری‌های قلبی و عروقی و سرطان مؤثر هستند. در برخی کشورها روغن‌های غنی شده با CBD و عصاره گل‌های خشک شاهدانه برای درمان طیف وسیعی از بیماری‌ها از جمله درد، التهاب، صرع و اختلالات اضطرابی مورد استفاده قرار می‌گیرند (احمدی لاله مرزی و همکاران، ۱۴۰۳). در شکل سه، مهم‌ترین متابولیت‌های ثانویه در گیاه شاهدانه قابل مشاهده است. (Gonçalves et al., 2020).

**تأثیر ویروئید پنهان رازک بر روی محتوای تریپن و روغن‌های ضروری**

علی‌رغم عدم وجود و مشاهده‌ی هرگونه نشانه‌های مشخص در بافت‌های سوماتیک به‌جز در ارقام و شرایط خاص، HLVd باعث ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی می‌شود که هم از نظر کیفی و هم از نظر کمی بر متابولیت‌های غدد ترشحی لوپولین و روغن‌های ضروری تأثیر می‌گذارد، بنابراین نشان می‌دهد که HLVd، واقعاً پنهان نیست (Matoušek et al., 2001). در گیاهان آلوده‌ی شاهدانه به HLVd، این کاهش عملکرد می‌تواند برای رقم Wye Challenger به حداقل ۸ درصد و برای رقم Slovenian به حداکثر ۳۷/۵ درصد برسد (Patzak et al., 2021). کاهش اسید- $\alpha$ -تلخ (آلفا هیدروکسی اسید)، برای ارقام Wye Challenger و Omega به ترتیب ۱۵ درصد

و ۳۰ درصد بود. هر دورقم افزایش اسید  $\beta$ -تلخ (بتا - هیدروکسی بوتیریک اسید) و محتوای روغن رانیز نشان دادند (Matoušek et al., ۲۰۰۱). مقدار بالاتر اسید  $\beta$ -تلخ و محتوای روغن منجر به بلوغ زودرس مخروط‌های رازک می‌شود. (Barbara et al., ۱۹۹۰) تأثیر HLVd بر محتوای اسید  $\alpha$ -تلخ وابسته به ژنوتیپ بوده و این کاهش در اسیدهای تلخ آلفا در ارقام رازک انگلیسی از ۲۰ درصد تا ۵۰ درصد متغیر بود (Adams et al., ۱۹۹۲). سایر ارقام رازک در جمهوری چک نیز کاهش قابل توجهی در محتوای اسید تلخ آلفا در گیاهان آلوده به HLVd نشان دادند؛ به‌عنوان مثال Saaz، ۴۰ درصد کاهش؛ Premiant، ۳۰ درصد کاهش؛ Aurora، ۱۸ درصد کاهش؛ و Sybilla، Marynka، Pulawski، Magnat و Patzak از ۱۱ درصد تا ۲۳ درصد کاهش رانشان دادند (Patzak et al., ۲۰۲۱). همچنین مشخص شده است که HLVd هم بر روغن‌هایی ضروری و هم بر محتوای ترپن‌های رازک تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال در تحقیقاتی که انجام شد، HLVd سطح مونوترپن‌هایی مانند میرسن و هم  $\alpha$ - و  $\beta$ -پینن را در مقایسه با گیاهان سالم، ۲۹ درصد تا ۴۱/۶ درصد افزایش داد (Patzak et al., ۲۰۰۱)؛ اما برخلاف مونوترپن‌ها، HLVd سطح سزکوئی‌ترین‌هایی مانند  $\beta$ -کاریوفیلن،  $\alpha$ -هومولن،  $\alpha$ -کوپن،  $\gamma$ -مورولن،  $\beta$ -بیزابولن،  $\gamma$ -کادینن و  $\delta$ -کادینن را ۱۳ تا ۲۹ درصد کاهش داد. فرض بر این است که تأثیر احتمالی برخی از فرایندهای

کاهش اکسیداتیو که توسط ویروئید فعال می‌شوند، در تجمع الکل‌های ترپن مانند ژرانیول و متیل ژرانات و همچنین در کاهش سطح اکثر کتون‌های شناسایی‌شده در طیف روغن‌های ضروری دخیل هستند (Kovačević & Kač, ۲۰۰۲). با این حال این تغییرات در ترکیب روغن‌های ضروری موجود در مخروط‌های رازک هم وابسته به ژنوتیپ و هم مختص رقم هستند. برای مثال، مشخص شد که محتوای لینالول در مخروط‌های گیاهان آلوده برای ارقام Sybilla، Lubelski و Pulawski بیشتر، اما برای ارقام Marynka و Magnat کمتر است. محتوای متیل‌گرنات در گیاهان آلوده از همه ارقام کمتر بود (Patzak et al., ۲۰۰۱). از نظر اهمیت آلودگی HLVd رازک با اهمیت اقتصادی، حتی کوچک‌ترین تفاوت در محتوا یا ترکیب در اسید تلخ  $\alpha$ ، اسید تلخ  $\beta$ ، محتوای روغن و ترپن، می‌تواند عطر آجو حاصل را تغییر دهد (Pethybridge et al., ۲۰۰۸).

### :: شناسایی و مدیریت ویروئید پنهان رازک

اساس کنترل ویروئید، تولید مواد تکثیرری عاری از ویروئید است. چندین اقدام کنترلی در این زمینه وجود دارد. اولین و مهم‌ترین آن‌ها، پیشگیری است که با آزمایش تمام گیاهان شاهدانه و محصولات شاهدانه وارداتی که می‌توانند به‌عنوان حامل HLVd عمل کنند، انجام می‌شود. از این رو، آزمایش گیاهان و محصولات، برای آلودگی‌های احتمالی HLVd،



که منجر به تجزیه RNA ویروئید شد، مرتبط بود. برخلاف سایر گونه‌های ویروئیدی، HLVD به تولید سطوح ناچیزی از گونه‌های جهش یافته در شرایط کشت استاندارد معروف است. با این حال، گرمادرمانی منجر به افزایش قابل توجه تعداد واریانتهای توالی شناسایی شده در جمعیت HLVD شد (Matousek et al, ۱۹۹۵).

در درجه اول، HLVD، از طریق قلمه‌های رویشی، ابزارهای آلوده و سایر وسایل مکانیکی در داخل مزارع رازک یا تأسیسات کشت کانابیس داخلی گسترش می‌یابد. از آنجایی که هیچ اقدام کنترلی برای بیماری‌های مرتبط با ویروئید در دسترس نیست، گسترش HLVD تنها با استفاده از یک سیستم مدیریت چندلایه که شامل شناسایی و حذف به موقع گیاهان آلوده می‌شود، اما محدود به آن‌ها نیست، قابل پیشگیری است. عدم وجود نشانه‌های قابل مشاهده مرتبط با HLVD، توانایی پرورش دهندگان را در مهار این ویروئیدها به چالش می‌کشد. شاخص گذاری زیستی برای HLVD به دلیل دامنه میزبانی محدود و عدم وجود نشانه‌های عملی نیست. با توجه به این مشکلات و به دلیل روش پرزحمت شاخص گذاری زیستی، می‌توان از روش‌های تشخیص مولکولی مانند هیبریداسیون نقطه‌ای، RT-PCR و qPCR برای تشخیص روتین استفاده کرد. از آنجایی که توزیع ویروئید در گیاه میزبان یکسان نیست، گرفتن نمونه‌های متعدد

روش خوبی است. پس از دریافت گیاهان، قرنطینه ۳۰ روزه برای ارزیابی صحیح وجود عوامل بیماری‌زای گیاهی در مواد گیاهی ورودی بسیار مهم است. با توجه به اینکه HLVD، در بسیاری از ارقام شاهدهانه بدون علامت است، توصیه می‌شود هر گیاه جدید در طول هفته سوم قرنطینه و مطمئناً قبل از ارسال گیاهان تازه دریافت شده به مرحله تولید، آزمایش شود (Adkar et al, ۲۰۲۳). اگرچه هیچ درمان شیمیایی برای کنترل HLVD در دسترس نیست، اما روش‌هایی مانند کشت نوک مریستم، گرمادرمانی و درمان با سرما، به طور قابل توجهی غلظت ویروئید را کاهش می‌دهند (Grudzinska & Solaraska, ۲۰۰۴; Svoboda et al, ۱۹۹۵; Morton et al, ۱۹۹۳). همچنین در پژوهشی، کشت مریستم نوک شاخه با موفقیت HLVD را از دورقم رازک آلوده حذف کرد (Hataya et al, ۱۹۹۲). با این حال، ترکیب تیمار سرما شامل انکوباسیون مواد گیاهی در دمای ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد در تاریکی برای دوره‌های مختلف از ۸ تا ۲۱ ماه و کشت مریستم نوک شاخه‌های با اندازه کمتر از ۵/۰ میلی‌متر در حذف HLVD مؤثرتر بود (Morton et al, ۱۹۹۳).

گرمادرمانی شامل انکوباسیون گیاهان در دمای ۳۶ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۴ روز به سرعت غلظت ویروئید را کاهش داد، در حالی که تیتراصلی پس از شش ماه در شرایط مزرعه بازایی شد. کاهش غلظت HLVD با القای مکانیسم خاموشی RNA

برگ از ساقه پایینی تا بالایی که برگ‌های قدیمی و جدید را پوشش دهد، مهم است. اگر چه کاشت مجدد جزئی پس از حذف گیاهان بیمار و مجاور می‌تواند مؤثر باشد، اما کنترل بهتر با حذف تمام گیاهان آلوده و به دنبال آن کاشت مجدد با ابزار عاری از ویروئید تأیید شده، حاصل شده است (Adkar et al, ۲۰۲۳).

برای از بین بردن رازک‌های آلوده به ویروئید، لازم بود که تمام گیاهان، از جمله ریزوم‌ها، با تیمار اوره و کلروپیکرین در پاییز از بین بروند تا اطمینان حاصل شود که بیماری به محصول بعدی منتقل نمی‌شود. با این حال، در مورد کانابیس (که بیشتر در فضای بسته کشت می‌شود)، انهدام گیاهان آلوده می‌تواند به طور مؤثری از گسترش HLVD در محیط جلوگیری کند (Pethybridge et al, ۲۰۰۸).

HLVD می‌تواند در گل شاهدهانه، در صورتی که در دمای پایین‌تر از دمای اتاق نگهداری شوند، مدت بیشتری زنده بماند. این نشان‌دهنده احتمال انتقال HLVD از طریق محصولات شاهدهانه است که یا بین تولیدکنندگان منتقل می‌شوند یا در بازار خریداری می‌شوند (Pethybridge et al, ۲۰۰۸).

حذف گیاهان آلوده به ویروئید و ضد عفونی ابزارها و محیط اطراف گیاهان آلوده به ویروئید، برای بررسی شیوع ویروئید در مزارع و گلخانه‌ها، بسیار مهم است (Pethybridge et al, ۲۰۰۸). در میان روش‌های مختلف حرارتی و شیمیایی که برای ضد عفونی ابزار در برابر ویروئیدها آزمایش شده‌اند، قابل اعتمادترین و پرکاربردترین آن‌ها محلول آبی حداقل پنج درصد سفیدکننده خانگی (هیپوکلریت سدیم، حداقل یک درصد کلر) است (Lavagi et al, ۲۰۱۷). با این حال، مشخص شد که ضد عفونی کردن ابزار گلخانه با سفیدکننده معمولی کلوروکس، ماده مؤثره پنج درصد هیپوکلریت سدیم (NAOCl) به مدت ۱۰ ثانیه در برابر انتقال PSTVd در گوجه‌فرنگی، مؤثر است (Shahid et al, ۲۰۰۹). اثر خوردگی قوی بر روی ساختار گلخانه و ابزار و اثر بالقوه فیتوتوکسیک بر روی گیاهان، باید قبل از استفاده از سفیدکننده به عنوان ضد عفونی‌کننده در نظر گرفته شود. جایگزین دیگر، ویرکون اس (Virkon S) است که قبلاً در برابر عوامل بیماری‌زای ویروسی انسانی و حیوانی مؤثر بوده است (Zou et al, ۲۰۱۳). اگرچه نسبتاً گران و خورنده است، اما وقتی با غلظت دو درصد (بیست گرم در لیتر) استفاده شود، امیدوارکننده‌ترین ضد عفونی‌کننده علیه ویروئیدها و ویروس‌های آلوده‌کننده گوجه‌فرنگی‌های گلخانه‌ای است (Zou et al, ۲۰۱۳). علاوه بر روش‌های آزمایشی و بهداشتی، حفظ استانداردهای بالای کشت و همچنین رعایت بهداشت کارگران و ضد عفونی منظم ابزارآلات، بسیار مهم است (Adkar et al, ۲۰۲۳).



## نتیجه‌گیری

داده‌های علمی در مورد اثرات منفی HLVD بر محتوای اسید تلخ و ترپن‌ها در گیاهان دارای نشانه و بدون نشانه، توجه محققان را جلب کرده است. عدم وجود نشانه‌های قابل مشاهده مرتبط با HLVD، توانایی پرورش دهندگان شاهدانه را در مهار این ویروئیدها به چالش می‌کشد. تا به امروز گونه‌های مقاوم گیاه شاهدانه در برابر HLVD، شناسایی نشده است. کشت مریستم تنها روش مؤثر کنترلی است که از طریق آن می‌توان گیاهان آلوده را نجات داد. این فرآیند هم پرزحمت و هم پرهزینه است. اگرچه گیاهچه‌های کشت شده، عاری از ویروئید هستند، اما مقاوم به ویروئید، نیستند؛ بنابراین، رعایت اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از شیوع HLVD در یک محیط رشد مشخص، در مدیریت بیماری‌های مرتبط، ضروری است.

## منابع

- احمدی‌لله مرزی، ز؛ واندی، ع؛ و خسروی، ش.، ۱۴۰۳، کاربرد گیاه شاهدانه (*Cannabis sativa L*). در دامپزشکی، دومین کنفرانس ملی دامپزشکی، آمل، <https://civilica.com/doc/2123723>.
- بابائی، م؛ و سلامی، ع. ۱۳۹۵، روش‌های آنالیز و سنجش کانابینوئیدها در شاهدانه، چهارمین همایش ملی، انجمن علمی کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، کرج، <https://civilica.com/doc/518517>
- Adams, A. N., Morton, A., Barbara, D. J., & Ridout, M. S. (1992). The distribution and spread of hop latent viroid within two commercial plantings of hop (*Humulus lupulus*). *Annals of applied biology*, 592-585, (3)121.
- Adkar-Purushothama, C. R., Brosseau, C., Giguère, T., Sano, T., Moffett, P., & Perreault, J. P. (2015). Small RNA Derived from the Virulence Modulating Region of the Potato spindle tuber viroid Silences callose synthase Genes of Tomato Plants. *The Plant cell*, 2194-2178, (8)27. <https://doi.org/10.1105/tpc.15.00523>
- Adkar-Purushothama, C. R., Sano, T., & Perreault, J.-P. (2023). Hop Latent Viroid: A Hidden Threat to the Cannabis Industry. *Viruses*, 681, (3)15. <https://doi.org/10.3390/v15030681>
- Atallah, O. O., Yassin, S. M., & Verchot, J. (2023). New Insights into Hop Latent Viroid Detection, Infectivity, Host Range, and Transmission. *Viruses*, 30, (1)16. <https://doi.org/10.3390/v16010030>
- Barbara, D. J., Morton, A., Adams, A. N., & P.

- Microbiology, 80-75 ,(1)1.
- Flores, R., Delgado, S., Gas, M. E., Carbonell, A., Molina, D., Gago, S., & De la Pena, M. (2004). Viroids: the minimal non-coding RNAs with autonomous replication. FEBS letters, ,(1)567 48-42.
- Grudzińska, M., & Solarska, E. (2004). The elimination of viruses and hop latent viroid from hop (*Humulus lupulus* L.) in Poland. In I International Humulus Symposium 668 (pp. 152-۱۴۹).
- Keeling, C. I., & Bohlmann, J. (2006). Genes, enzymes and chemicals of terpenoid diversity in the constitutive and induced defence of conifers against insects and pathogens. The New phytologist, 675-657 ,(4)170. <https://doi.org/10.1111/j.8137.2006.01716-1469.x>
- Kovačević, M., & Kač, M. (2002). Determination and verification of hop varieties by analysis of essential oils. Food Chemistry, 494-489 ,(4)77.
- Lavagi, I., Matoušek, J., & Vidalakis, G. (2017). Other cocadviroids. In Viroids and satellites (pp. 287-275). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B7-1.00026-801498-12-0-978>
- Love, M. I., Huber, W., & Anders, S. (2014). Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA-seq data with DESeq2. Genome biology, 550 ,(12)15. <https://doi.org/10.1186/s8-0550-014-13059>
- Matoušek, J., Patzak, J., Orctová, L., Schubert, J., Vrba, L., Steger, G., & Riesner, D. (2001). The variability of hop latent viroid as induced upon heat treatment. Virology, 358-349 ,(2)287.
- Matousek, J., Trněná, L., Svoboda, P., Orniaková, P., & Lichtenstein, C. P. (1995). The gradual GREEN, C. (1990). Some effects of hop latent viroid on two cultivars of hop (*Humulus lupulus*) in the UK. Annals of applied biology, -359,(2)117 366.
- Bektaş, A., Hardwick, K. M., Waterman, K., & Kristof, J. (2019). Occurrence of hop latent viroid in *Cannabis sativa* with symptoms of cannabis stunting disease in California. Plant Disease, 2699,(10)103. DOI: 10.1094/PDIS-0459-19-03-PDN
- Cheng, A. X., Lou, Y. G., Mao, Y. B., Lu, S., Wang, L. J., & Chen, X. Y. (2007). Plant terpenoids: Biosynthesis and ecological functions. Journal of Integrative Plant Biology. <https://doi.org/10.1111/j.7909.2007.00395-1744.x>
- Chiumenti, M., Navarro, B., Candresse, T., Flores, R., & Di Serio, F. (2021). Reassessing species demarcation criteria in viroid taxonomy by pairwise identity matrices. Virus evolution, (1)7, veab001. <https://doi.org/10.1093/ve/veab001>
- Cottilli, P., Belda-Palazon, B., Adkar-Purushothama, C. R., Perreault, J. P., Schleiff, E., Rodrigo, I., & Lisón, P. (2019). Citrus exocortis viroid causes ribosomal stress in tomato plants. Nucleic acids research, 8661-8649 ,(16)47.
- Gonçalves, E. C. D., Baldasso, G. M., Bicca, M. A., Paes, R. S., Capasso, R., & Dutra, R. C. (2020). Terpenoids, Cannabimimetic Ligands, beyond the Cannabis Plant. Molecules, 1567 ,(7)25. <https://doi.org/10.3390/molecules25071567>
- Diener, T. O. (1971). Potato spindle tuber "virus": IV. A replicating, low molecular weight RNA. Virology, 428-411 ,(2)45.
- Diener, T. O. (2003). Discovering viroids—a personal perspective. Nature Reviews



- survival. *Virology journal*, 38 ,6. <https://doi.org/422-1743/10.1186X-38-6>
- Štajner, N., Radišek, S., Mishra, A. K., Nath, V. S., Matoušek, J., & Jakše, J. (2019). Evaluation of disease severity and global transcriptome response induced by citrus bark cracking viroid, hop latent viroid, and their co-infection in hop (*Humulus lupulus* L.). *International journal of molecular sciences*, 3154 ,(13)20.
- Svoboda, P., Oriniaková, P., & Lichtenstein, C. P. (1995). The gradual reduction of viroid levels in hop mericlones following heat therapy: A possible role for a nuclease degrading dsRNA. *Biol. Chem. Hoppe-Seyler*, 721-715 ,376
- Torres, A., Pauli, C., Sarmiento, C., Zalewski, & Gaudino, R. (2024). Differential Expression Analysis of *Cannabis sativa* response to thermotherapy of Hops Latent Viroid (HLVd) infection and clearance of the viroid in Tissue Culture Micropropagation. *Plant Biology*, doi: <https://doi.org/2024.04.06.588422/10.1101>
- Zou, S., Guo, J., Gao, R., Dong, L., Zhou, J., Zhang, Y., & Shu, Y. (2013). Inactivation of the novel avian influenza A (H7N9) virus under physical conditions or chemical agents treatment. *Virology journal*, 289 ,(1)10.
- reduction of viroid levels in hop mericlones following heat therapy: a possible role for a nuclease degrading dsRNA. *Biological chemistry Hoppe-Seyler*, 7-715,(12)376.<https://doi.org/10.1515/bchm3.1995.376.12.715>
- Mishra, A. K., Kumar, A., Mishra, D., Nath, V. S., Jakše, J., Kocábek, T., Killi, U. K., Morina, F., & Matoušek, J. (2018). Genome-wide transcriptomic analysis reveals insights into the response to citrus bark cracking viroid (CBCVD) in Hop (*Humulus lupulus*). *Viruses*, 570 ,(10)10. <https://doi.org/10.3390/v10100570>
- Nelson, D.L., & Cox, M.M.)2004.(Lehninger Principles of Biochemistry. W.H. Freeman, Fourth edition, pp. 460.-۴۵.
- Pethybridge, S. J., Hay, F. S., Barbara, D. J., Eastwell, K. C., & Wilson, C. R. (2008). Viruses and viroids infecting hop: Significance, epidemiology, and management. *Plant Disease*, 338-324 ,(3)92.
- Patzak, J., Hencychová, A., Krofta, K., Svoboda, P., & Malířová, I. (2021). The influence of hop latent viroid (HLVd) infection on gene expression and secondary metabolite contents in hop (*Humulus lupulus* L.) glandular trichomes. *Plants*, ,(11)10 2297.
- Patzak, J., Matoušek, J., Krofta, K., & Svoboda, P. (2001). Hop latent viroid (HLVd)-caused pathogenesis: effects of HLVd infection on lupulin composition of meristem culture-derived *Humulus lupulus*. *Biologia plantarum*, ,(4)44 585-579.
- Shahid, M. A., Abubakar, M., Hameed, S., & Hassan, S. (2009). Avian influenza virus (H5N1); effects of physico-chemical factors on its

## The Birth of a Silent Killer in the Cannabis Production Industry

### Abstract

Hop latent viroid (HLVd) is one of the most important emerging pathogens in commercial *Cannabis sativa* cultivation, which in recent years has caused significant economic losses in greenhouses and cannabis farms. In fact, it can be said that this viroid represents the greatest threat to cannabis growers worldwide. This viroid is the smallest known plant pathogen and belongs to the family Pospiviroidae, being the causative agent of Dudding disease, or brittle stem, in cannabis. It is primarily transmitted through vegetative propagation, contaminated tools, and mechanical contact, and by disrupting metabolic pathways, reducing trichomes, and decreasing active compounds (cannabinoids and terpenes), it leads to a severe reduction in plant yield. Historically, this disease in cannabis was first reported in 2019 from California. In recent years, HLVd has been reported in cannabis along with prominent symptoms. Examination of 200,000 cannabis samples confirmed that 90% of them were infected with this viroid; consequently, the estimated potential damage reached up to 4 billion dollars per year, solely in the United States. HLVd, by causing severe symptoms in cannabis, disrupts seed and fiber production in industrial strains and cannabinoid content in medicinal strains. It also leads to a 50 to 70 percent reduction in Tetrahydrocannabinol (THC) content. It is worth mentioning that so far, no reports of cannabis infection with this viroid have been documented in Iran.

**Keywords: Cannabis, HLVd, THC, Dudding Disease, Cannabinoid**



# نقش سیستم‌های Quorum Sensing در بیماری زایی

## باکتری *Pectobacterium carotovorum*

سید جواد نوروزیان؛ گروه گیاه پزشکی، دانشکده کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران  
jnorouzian@yahoo.com

دریافت: ۱۲ بهمن ۱۴۰۴ ■ بازنگری: ۲۹ بهمن ۱۴۰۴ ■ پذیرش: ۳۰ بهمن ۱۴۰۴ ■ انتشار آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22059/giahpzshsj.2026.414630.1057>



### چکیده:

سیستم‌های Quorum Sensing (QS) از مهم‌ترین سازوکارهای تنظیمی در باکتری‌های گرم منفی هستند که امکان ارتباط شیمیایی درون جمعیتی و کنترل هماهنگ رفتارهای وابسته به تراکم سلولی را فراهم می‌کنند. در میان این باکتری‌ها، *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (Pcc) یکی از عوامل اصلی پوسیدگی نرم در گیاهان زراعی محسوب می‌شود. شبکه‌ی QS در این باکتری بر پایه‌ی مولکول‌های سیگنال از نوع N-acyl homoserine lactone (AHL) عمل کرده و از طریق مسیر ExpI/ExpR تنظیم می‌شود. این سیستم با کنترل بیان مجموعه‌ای از ژن‌های پرازاری شامل آنزیم‌های تجزیه‌کننده‌ی دیواره‌ی سلولی گیاه (PCWDEs)، حرکت باکتری و ترشح فاکتورهای بیماری‌زا نقش کلیدی در ایجاد بیماری دارد. در سال‌های اخیر، راهبردهای Quorum Quenching (QQ) با هدف مهار فعالیت QS از طریق آنزیم‌های تجزیه‌کننده‌ی AHL یا مهارکننده‌های گیرنده‌های LuxR توسعه‌یافته‌اند که می‌توانند بدون اعمال فشار انتخابی ناشی از آنتی‌بیوتیک‌ها، منجر به کاهش بیماری‌زایی شوند. این مقاله با مروری جامع بر یافته‌های مولکولی، ژنتیکی و بیوشیمیایی دو دهه‌ی اخیر، ساختار و کارکرد شبکه‌های QS و QQ در Pcc را بررسی کرده و ضمن تحلیل ارتباط بین این دو مسیر، چالش‌ها و چشم‌اندازهای کاربردی کنترل زیستی مبتنی بر خاموش‌سازی ارتباط بین باکتری‌ها را مورد بحث قرار می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: سیستم حدنصاب احساس، پوسیدگی نرم، بیمارگر گیاهی، سیستم تنظیمی

## ۱. مقدمه

سیستم Quorum Sensing (QS) یا «سیستم حد نصاب احساس»، یک سازوکار ارتباطی پیچیده و تکامل یافته در باکتری هاست که از طریق تولید، ترشح و شناسایی مولکول‌های سیگنالی، بیان ژن‌های خاص را به صورت وابسته به تراکم جمعیت تنظیم می‌کند (Bassler & Losick, 2006; Grandclément et al, 2016). این مکانیسم به باکتری‌ها این امکان را می‌دهد که رفتار خود را از حالت تک‌سلولی به حالت چندسلولی تغییر دهند و فرآیندهای پرهزینه‌ای مانند ترشح آنزیم‌های برون‌سلولی، تشکیل بیوفیلم، تحرک و القای بیماری‌زایی را تنها در زمانی اجرا کنند که احتمال موفقیت در غلبه بر دفاع‌های میزبان بالا باشد (Baltenneck et al, 2021; Jones et al, 1993). از این رو، QS نه تنها یک سوئیچ رفتاری، بلکه یک راهکار هوشمندانه برای تخصیص بهینه منابع متابولیکی محسوب می‌شود. در میان بیمارگرهای گیاهی، *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (Pcc) از مهم‌ترین و گسترده‌ترین عوامل بیماری‌زای باکتریایی است که عامل پوسیدگی نرم در طیف وسیعی از محصولات کشاورزی از جمله سیب‌زمینی، کلم، هویج، کاهو و گل‌های زینتی به‌شمار می‌رود (Perfileva et al, 2003; Erwinia, 2025). این باکتری که پیش‌تر با نام *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora* شناخته می‌شد، در فرآیند بیماری‌زایی خود مجموعه‌ای از آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی گیاه (Plant Cell Wall Degrading Enzymes; PCWDEs) نظیر پکتات لیاز (Pel)، پلی‌گالاکتوروناز (Peh)، سلولاز (Cel) و پروتئاز (Prt) را ترشح می‌کند (Pöllumaa et al, 2012; Fan et al, 2020). این آنزیم‌ها، به‌ویژه پکتینازها، با تجزیه شبکه پکتینی دیواره سلولی موجب نرم شدن (maceration) بافت‌های گیاهی، نشست محتویات سلولی و در نهایت نکروز و فساد گسترده می‌شوند (Liu et al, 2008). با این حال تولید این فاکتورهای بیماری‌زا در Pcc به صورت تصادفی یا دائمی صورت نمی‌گیرد؛ بلکه تحت کنترل دقیق سیستم QS است (Li et al, 2022). در این باکتری، حداقل دو سیستم QS فعال شناسایی شده است: (۱) سیستم مبتنی بر N-آسیل هموسرین لاکتون (AHL) که در آن آنزیم سنتتاز ExpI (synthases) مولکول سیگنالی ۳-oxo-C6-HSL را تولید می‌کند و این مولکول توسط گیرنده رونویسی ای ExpR شناسایی شده و منجر به فعال‌سازی ژن‌های هدف می‌شود؛ و (۲) سیستم مبتنی بر ۲-autoinducer (AI-2) که در برخی سویه‌ها نقش مکمل یا جایگزینی دارد (Perfileva et al, 2012; Pöllumaa et al, 2025). سیستم ExpI/ExpR نه تنها به صورت مستقیم بیان ژن‌های *prt*, *pel*, *peh*, *cel* را تنظیم می‌کند،



et al, ۲۰۱۶). مطالعات *in vitro* و *in planta* نشان داده اند که استفاده از لاکتوناژهای باکتریایی یا قارچی و یا انتقال ژن های QQ به گیاهان میزبان، می تواند به طور چشمگیری از بروز پوسیدگی نرم جلوگیری کند (Zhang et al, ۲۰۲۱; Uroz et al, ۲۰۰۹). در این مقاله مروری، با هدف ادغام شواهد ژنتیکی، بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و کاربردی، نقش سیستم های QS به ویژه سیستم AHL محور *ExpI/ExpR* در هماهنگی بیماری زایی *Pcc* به صورت سیستماتیک بررسی می شود. همچنین، پیشرفت های اخیر در درک شبکه های تنظیمی پیچیده وابسته به QS، تعامل این سیستم با سیگنال دهی گیاهی و پتانسیل کاربردی راهکارهای *Quorum Quenching* در مدیریت پایدار این بیماری در شرایط مزرعه ای مورد بحث قرار خواهد گرفت.

## ۲. طبقه بندی و ویژگی های زیستی

### *Pectobacterium carotovorum*

#### ۱/۲. رده بندی تاکسونومیک و تغییرات

##### فیلو ژنتیکی

در گذشته، بر اساس ویژگی های فنوتیپی و بیوشیمیایی، گونه *P. carotovorum* به چندین زیرگونه تقسیم می شد (Gardan et al, ۲۰۰۳). با ظهور روش های مولکولی پیشرفته، به ویژه تحلیل های فیلوژنومیک مبتنی بر توالی های ژنوم کامل، این تقسیم بندی بازنگری شده و بسیاری

بلکه از طریق شبکه های تنظیمی بالادستی از جمله مسیرهای وابسته به *RsmA/RsmB* و *KdgR* با سایر سیستم های سیگنال دهی داخلی هماهنگ می شود (Liu et al, ۲۰۰۸; McGowan et al, ۱۹۹۵). افزون بر این، QS در *Pcc* در فرایندهایی مانند تشکیل بیوفیلم (که مقاومت در برابر تنش های محیطی و آنتی بیوتیک ها را افزایش می دهد)، تولید *carbapenem* (یک آنتی بیوتیک ضد رقابتی) و جلوگیری از القای دفاع های میزبان نقش دارد (Baltenneck et al, ۲۰۲۱). درک دقیق این سازوکارها نه تنها برای فهم بنیادی از زیست شناسی بیماری زایی *Pcc* ضروری است، بلکه زمینه ساز توسعه راهکارهای نوین مهار زیستی به شمار می آید. در سال های اخیر، رویکردی تحت عنوان خاموش سازی حدنصاب (*Quorum Quenching*; QQ) مورد توجه قرار گرفته است. این روش، بر خلاف آنتی بیوتیک ها که به نابودی باکتری ها منجر می شوند، با اختلال در مسیر سیگنال دهی QS فعالیت بیماری زایی را مهار می کند. مکانیسم های اصلی QQ شامل: الف) تخریب آنزیمی AHL ها توسط لاکتوناژها یا آسیلازها، (ب) مهار رقابتی گیرنده های سیگنالی توسط آنتاگونیست های ساختاری و (ج) جذب یا ممانعت از ترشح سیگنال ها است که بدون اعمال فشار انتخابی قوی، توان بیماری زایی را کاهش می دهند (Dong et al, ۲۰۲۱; Grandclément

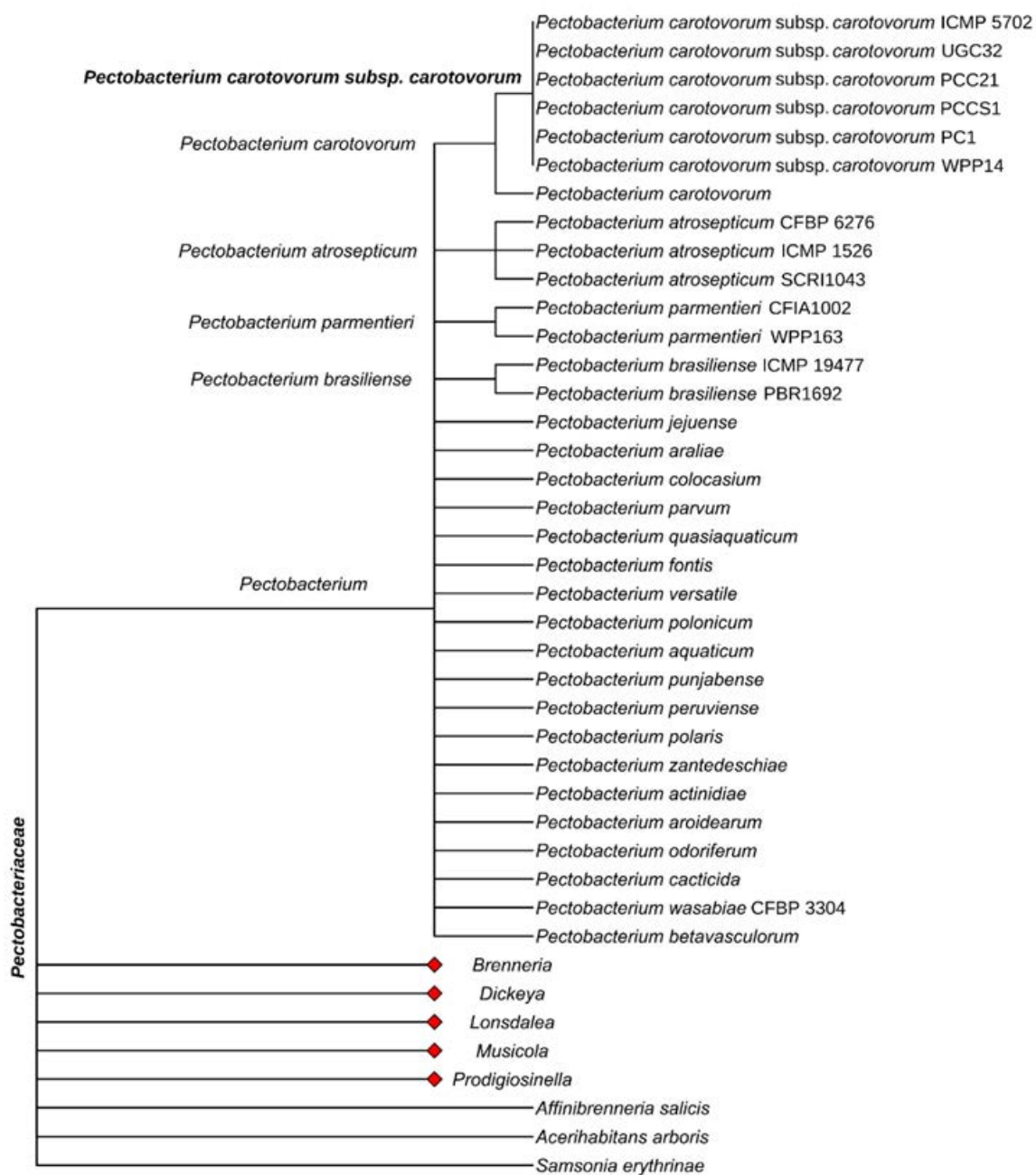
به دلیل ناهمگنی ژنتیکی بالا، طبقه‌بندی جنس *Pectobacterium* همواره در حال بازنگری بوده است. درخت فیلوژنتیکی ارائه شده در شکل ۱، بازنمایی دقیقی از روابط فیلوژنتیکی نیست، بلکه صرفاً بازتابی از نام‌های تاکسونومیک و داده‌های موجود در پایگاه (NCBI GenBank) است. با توجه به پویایی بالای این جنس، تحلیل فیلوژنتیکی جامع از محدوده اهداف این مقاله خارج است.

## ۲/۲ ویژگی‌های ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی

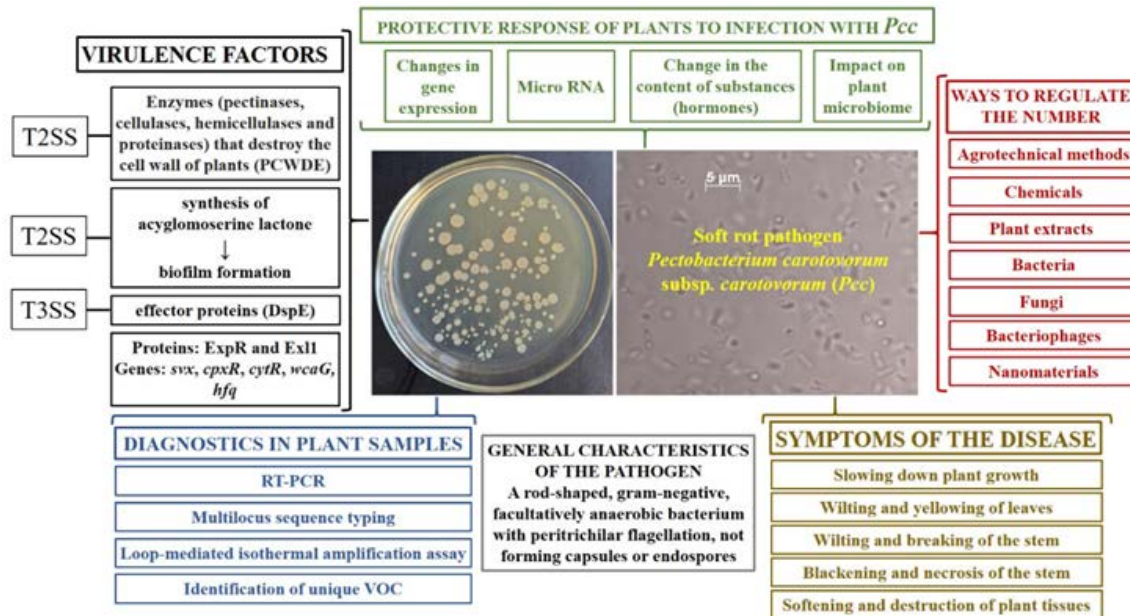
از نظر ریخت‌شناسی، *P. carotovorum* subsp. (*Pcc*) یک باکتری میله‌ای، فاقد اسپور و متحرک با تاژک‌های پیرامونی است (Barış, ۲۰۰۹). ابعاد سلولی آن بین ۰.۶ تا ۱.۸ میکرومتر عرض و ۱.۷ تا ۵.۱ میکرومتر طول دارد (Ryskalieva et al, ۲۰۱۷). کلنی‌های این باکتری بر روی محیط آگار سیب‌زمینی یا گوشت-پیتون، معمولاً طی ۲۴ تا ۴۸ ساعت در دمای بهینه ۲۷ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد رشد می‌کنند و ظاهری کروی، برآمده، صاف و به رنگ کرم تا زرد کم‌رنگ با قطری حدود ۱ تا ۳ میلی‌متر دارند (Ryskaliyeva et al, ۲۰۲۰). سلول‌ها عموماً به صورت منفرد، جفت یا در زنجیره‌های کوتاه مشاهده می‌شوند (Ryskalieva et al, ۲۰۱۷). از نظر بیوشیمیایی، *Pcc* یک باکتری

از زیرگونه‌ها به سطح گونه ارتقا یافته‌اند. برای نمونه، *P. carotovorum* subsp. *atrosepticum*، *P. wasabiae* و *P. odoriferum* اکنون به‌عنوان گونه‌های مستقل شناخته می‌شوند (Gardan et al, ۲۰۰۳; Portier et al, ۲۰۱۹). بر اساس آخرین طبقه‌بندی‌ها، گونه *P. carotovorum* عمدتاً شامل زیرگونه‌ی *P. carotovorum* subsp. (*Pcc*) می‌شود که تمرکز اصلی این مطالعه مروری بر آن قرار دارد. سایر زیرگونه‌های گزارش شده شامل، *odoriferum*، *actinidia* و *brasiliense* هستند (Oulghazi et al, ۲۰۲۵; Portier et al, ۲۰۱۹). اگرچه جایگاه تاکسونومیک برخی از آن‌ها همچنان در حال بررسی است. این بازنگری‌ها ضرورت بهره‌گیری از روش‌های شناسایی مولکولی مبتنی بر توالی ژنی (نظیر *rpoB*، *dnaX*، *16S rRNA*) یا توالی‌یابی کامل ژنوم را برای تفکیک دقیق سویه‌ها برجسته می‌سازد (Zhang et al, ۲۰۱۶; Portier et al, ۲۰۲۰).

*Pectobacterium carotovorum* باکتری گرم‌منفی، میله‌ای و نکروتروف است که به خانواده *Pectobacteriaceae* (که پیش‌تر در خانواده *Enterobacteriaceae* قرار داشت) تعلق دارد. این باکتری یکی از عوامل اصلی بیماری پوسیدگی نرم در طیف وسیعی از گیاهان زراعی به شمار می‌آید (Van Gijsegem et al, ۲۰۲۱).



شکل ۱. درخت فیلوژنتیکی که موقعیت *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* را در خانواده *Pectobacteriaceae* مطابق با فیلوژنی پایگاه داده‌ی NCBI GenBank نشان می‌دهد. نشانه‌های قرمز، شاخه‌های فشرده شده (collapsed clades) را مشخص کرده اند که بانام genus برچسب گذاری شده اند (Perfileva et al., 2025).



شکل ۲. کفی ها و سلول های PCC در محیط کشت گوشت-پپتون آگار، همراه بانمای شماتیک از ویژگی های پایه ای این باکتری (Perfileva et al, ۲۰۲۵).

بی‌هوازی اختیاری، کاتالاز مثبت و دارای توانایی تولید آنزیم‌های پکتولیتیک است. تصاویری از کلنی باکتریایی و سلول‌های Pcc کشت‌شده بر روی آگار گوشت-پپتون، فاکتورهای بیماری‌زایی اصلی آن‌ها که از طریق سیستم‌های ترشحی مختلف (T2SS و T3SS) ترشح می‌شوند، راه‌های احتمالی تنظیم تعداد آن‌ها و همچنین نمایشی شماتیک از سایر داده‌های پایه درباره Pcc/Pc، در شکل ۲ نمایش داده شده است.

### ۳/۲. میزبانی و الگوهای بیماری‌زایی

Pcc بیمارگری با دامنه میزبانی گسترده است و قادر به آلوده‌سازی انواع گیاهان دولپه‌ای از جمله محصولات مهم کشاورزی مانند سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، کلم و هویج می‌باشد (Ma et al, ۲۰۰۷; Toth et al, ۲۰۰۳). توانایی بیماری‌زایی این باکتری عمدتاً به ترشح مجموعه‌ای از آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی گیاه (PCWDEs) از جمله پکتات‌لیازها، پلی‌گالاکتورونازها و سلولولازها وابسته است که با تجزیه ماتریکس پکتینی، موجب نرم شدن بافت‌های گیاهی می‌شوند (Li et al, ۲۰۱۹; Toth et al, ۲۰۰۳). علاوه بر PCWDEها، Pcc از سیستم ترشح نوع سوم (T3SS) برای تزریق افکتورهای پروتئینی به درون سلول‌های میزبان بهره می‌گیرد؛ این سیستم در القای مرگ سلولی و تشدید بیماری نقش دارد (Kim et al, ۲۰۱۱). همچنین، وجود سیستم ترشح نوع



توسط آنزیم‌های خانواده‌ی LuxI سنتز می‌شوند و به وسیله‌ی گیرنده‌های LuxR شناسایی می‌گردند (Whitehead et al., ۲۰۰۱). این سیستم به باکتری‌ها اجازه می‌دهد تا بر اساس تراکم جمعیت، بیان ژن‌های مرتبط با سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیماری‌زایی را تنظیم کنند.

### ۲/۳. اجزای اصلی سیستم LuxI/LuxR

در ساده‌ترین شکل، سیستم QS شامل دو جزء اساسی است: ۱. سنتز سیگنال (LuxI) که مولکول AHL را از پیش‌سازهای متابولیتی نظیر acyl-ACP و S-adenosylmethionine (SAM) تولید می‌کند. ۲. گیرنده‌ی تنظیم‌کننده (LuxR) که در حضور غلظت معینی از AHL فعال شده، به نواحی خاصی از DNA متصل می‌شود و از طریق القای سرکوب بیان ژن‌ها، فرآیندهای مختلف سلولی را تحت کنترل درمی‌آورد (Waters & Bassler, ۲۰۰۵). هر سیستم QS دارای ویژگی اختصاصی نسبت به طول زنجیره‌ی آسیل و گروه‌های جانبی اکسیژنه (hydroxy) یا (oxo) در AHL‌هاست. برای مثال، *Vibrio fischeri* از HSL-oxo-C<sub>6</sub>-۳ بهره می‌گیرد، در حالی که *Pseudomonas aeruginosa* دارای دو سیستم متمایز LasI/LasR (HSL-oxo-C<sub>12</sub>-۳) و RhlI/RhlR (HSL-C<sub>4</sub>) است که در هماهنگی با یکدیگر عمل می‌کنند (Pesci et al., ۱۹۹۷).

ششم (T<sub>6</sub>SS) و سیستم‌های ایمنی سازگاری مانند CRISPR-Cas در برخی سویه‌ها گزارش شده است که می‌تواند نقش مهمی در رقابت با سایر میکروارگانیسم‌ها ایفا کند (Li et al., ۲۰۱۹; Mallick et al., ۲۰۲۲). تفاوت در ترکیب فاکتورهای بیماری‌زا از جمله انواع خاص از پکتات‌لیازها، پروتئازها، سیدروفورها و سیستم‌های ترشحی می‌تواند تا حدی تفاوت در شدت بیماری‌زایی و ترجیح میزبانی میان سویه‌های مختلف Pcc و سایر گونه‌های جنس *Pectobacterium* را توضیح دهد (Glasner et al., ۲۰۰۸; Li et al., ۲۰۱۸; Marquez-Villavicencio et al., ۲۰۱۱).

### ۳. سیستم‌های Quorum Sensing در باکتری‌های گرم منفی

#### ۱/۳. مفهوم عمومی QS در باکتری‌ها

سیستم‌های Quorum Sensing (QS) نخستین بار در باکتری دریایی *Vibrio fischeri* شناسایی شدند، جایی که تولید نورزیستی تنها زمانی رخ می‌داد که تراکم سلولی از حدی معین فراتر می‌رفت (Nealson et al., ۱۹۷۰). این کشف بنیان مفهوم «ارتباط سلول به سلول» را بر اساس تجمع مولکول‌های سیگنال شیمیایی در محیط پیرامونی بنیان نهاد. در باکتری‌های گرم منفی، این مولکول‌های سیگنال عمدتاً از نوع N-acyl homoserine lactones (AHLs) هستند که

### ۳/۳. سیستم‌های QS چندلایه در باکتری‌های

#### گرم منفی

در بسیاری از باکتری‌های بیمارگر، چه انسانی و چه گیاهی، سیستم QS محدود به یک مسیر LuxI/LuxR ساده نیست، بلکه شبکه‌ای پیچیده و چندلایه را شامل می‌شود که با مسیرهای تنظیمی دیگر در تعامل است. به عنوان نمونه، در *Pseudomonas aeruginosa*، شبکه‌ای پیوسته از سیستم‌های Las، Pqs و Rhl وجود دارد که تولید بیوفیلیم و فاکتورهای سمی را هماهنگ می‌سازد. (Lee & Zhang, 2015) در *Agrobacterium tumefaciens*، سیستم TraI/TraR در تنظیم انتقال پلاسמיד Ti که در فرایند ایجاد تومور در گیاه نقش دارد، مؤثر است (Zhang et al., 2002). در *Burkholderia cepacia*، سیستم CepI/CepR بیان ژن‌های دخیل در تولید سیدروفور و تشکیل بیوفیلیم را تنظیم می‌کند (Malott et al., 2009). چنین شبکه‌هایی اغلب با مسیرهای پاسخ به تنش، تنظیم متابولیسم و کنترل رونویسی درهم‌تنیده‌اند و در مجموع نوعی «شبکه‌ی اجتماعی مولکولی» را درون کلنی باکتریایی شکل می‌دهند که هماهنگی جمعی را تضمین می‌کند.

### ۴/۳. سیستم‌های جایگزین QS

افزون بر AHL‌ها، برخی از باکتری‌های گرم منفی از مولکول‌های سیگنال متفاوتی نیز برای ارتباط بهره می‌گیرند، از جمله: ۲-AI (۲-Autoinducer)

مولکولی مشتق از ۴,۵-dihydroxy-۲,۳-pentanedione (DPD) که توسط آنزیم LuxS تولید می‌شود و به عنوان یک سیگنال بین گونه‌ای عمل می‌کند (Xavier & Bassler, 2005) و DSF (Diffusible Signal Factor) خانواده‌ای از اسیدهای چرب ناپیوسته که در باکتری‌هایی چون *Burkholderia* و *Xanthomonas* یافت می‌شود و در کنترل تشکیل بیوفیلیم و تنظیم رفتارهای اجتماعی نقش دارد (Barber et al., 1997). این سیستم‌ها غالباً با مسیرهای AHL تعامل دارند و در برخی بیمارگرها مانند *Pectobacterium carotovorum*، وجود ژن LuxS گزارش شده است؛ با این حال، نقش دقیق عملکردی آن هنوز به‌طور کامل روشن نشده و موضوع بحث‌های پژوهشی است (Rezzonico & Duffy, 2008).

### ۵/۳ همگرایی عملکردی QS در بیمارگرهای

#### گیاهی

بیمارگرهای گیاهی از QS برای هماهنگ‌سازی تولید آنزیم‌های تخریب‌کننده‌ی دیواره‌ی سلولی (PCWDEs) استفاده می‌کنند، فرایندی که برای نفوذ به بافت‌های گیاهی و آغاز پوسیدگی حیاتی است. در *Erwinia chrysanthemi* که اکنون به *Dickeya dadantii* طبقه‌بندی می‌شود و *Pectobacterium carotovorum*، سیستم‌های QS



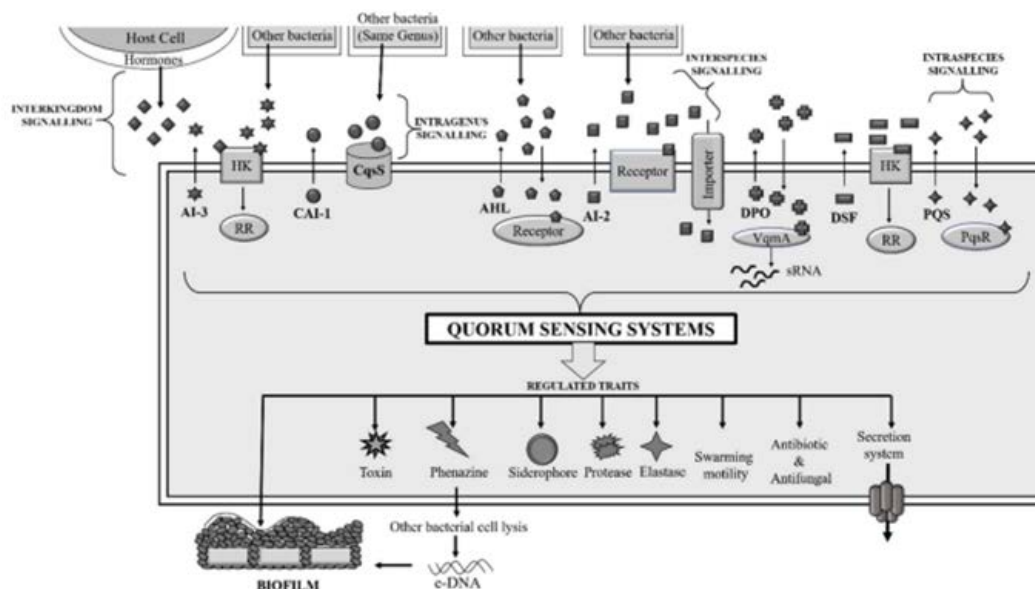
تنظیم‌کننده‌ی اصلی بیان ژن‌های *pel*، *peh*، *cel* و *pri* هستند که مسئول تولید پلی‌گالاکتوروناز، پکتات‌لیاز، سلولاز و پروتئاز می‌باشند (Chatterjee et al., 2002; Liu et al., 2008). از این‌رو، QS در این باکتری‌ها نه تنها به عنوان ابزاری برای تنظیم جمعی رفتارهای فیزیولوژیکی، بلکه به عنوان یکی از ستون‌های اساسی در مکانیسم بیماری‌زایی مطرح است.

#### ۴. سیستم‌های Quorum Sensing در *Pectobacterium carotovorum*

##### ۱/۴ سیستم LuxI/LuxR و مولکول‌های

##### سیگنال AHL

سیستم حد نصاب احساس (Quorum Sensing;) نخستین بار به عنوان یک سازوکار تنظیمی برای کنترل پدیده‌ی نورزیستی (bioluminescence) در باکتری‌های دریایی *Vibrio fischeri* و *Vibrio harveyi* شناسایی شد (Nealson et al., 1979; Nealson & Hastings, 1970). در این باکتری‌ها، مولکول‌های سیگنال‌های خودالقایی (autoinducers) عمل می‌کنند. این سیستم از دو جزء اصلی تشکیل شده است: LuxI به عنوان آنزیم سنتز AHL، مسئول تولید سیگنال است و LuxR، یک تنظیم‌کننده‌ی رونویسی است که پس از اتصال



شکل ۳. تنوع سیستم‌های Quorum Sensing و ویژگی‌های تنظیمی در بیمارگرهای گرم منفی. بیمارگرهای گرم منفی از انواع مختلفی از سیستم‌های Quorum Sensing برای کنترل تشکیل بیوفیلم و بسیاری از عوامل پرازایی استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها بر اساس ماهیت مولکول‌های سیگنال دهنده، نوع گیرنده‌ها و هدف سیگنال دهی با یکدیگر تفاوت دارند. دامنه‌ی سیگنال دهی می‌تواند از ارتباط درون گونه‌ای تا ارتباط بین گونه‌ای و حتی بین قلمرویی (interkingdom) متغیر باشد (Sharma et al., 2024).

به AHL فعال شده و رونویسی از اپرون لوسیفراز را القا می‌کند (Engebrecht et al, ۱۹۸۴). در تراکم پایین سلولی، غلظت AHL در محیط پایین است و سیگنال القایی فعال نمی‌شود؛ اما با افزایش تعداد سلول‌ها (در حدود ۱۰۱۰ سلول در هر میلی‌لیتر)، AHL‌ها تجمع یافته و از غشای سلولی عبور می‌کنند، با گیرنده‌های نوع LuxR در سیتوپلاسم پیوند می‌یابند و کمپلکس فعال LuxR-AHL را تشکیل می‌دهند. این کمپلکس به توالی تنظیمی مشخصی موسوم به lux box متصل می‌شود که یک تکرار معکوس ۲۰ جفت‌بازی در بالادست محل آغاز رونویسی است (Gray et al; ۱۹۹۹, England & Greenberg; ۱۹۹۴; Zhu & Winans, ۲۰۰۱).

از منظر بیوشیمیایی، سنتازهای نوع LuxI از دو پیش‌ساز کلیدی استفاده می‌کنند: S-adenosylmethionine (SAM) برای تشکیل حلقه‌ی هموسرین لاکتون و acyl-ACP برای تأمین زنجیره‌ی آسیل چرب (More et al, ۱۹۹۶; Parsek et al, ۱۹۹۹). مطالعات ساختاری نشان داده‌اند که ناحیه‌ای حفاظت‌شده در پروتئین LuxI (باقیمانده‌های ۲۵ تا ۱۰۴ در پلی‌پپتید ۱۹۳ باقیمانده‌ای) به‌عنوان جایگاه فعال تشکیل پیوند آمیدی میان گروه آسیل و SAM عمل می‌کند (Hanzelka et al, ۱۹۹۷; Parsek et al, ۱۹۹۷).

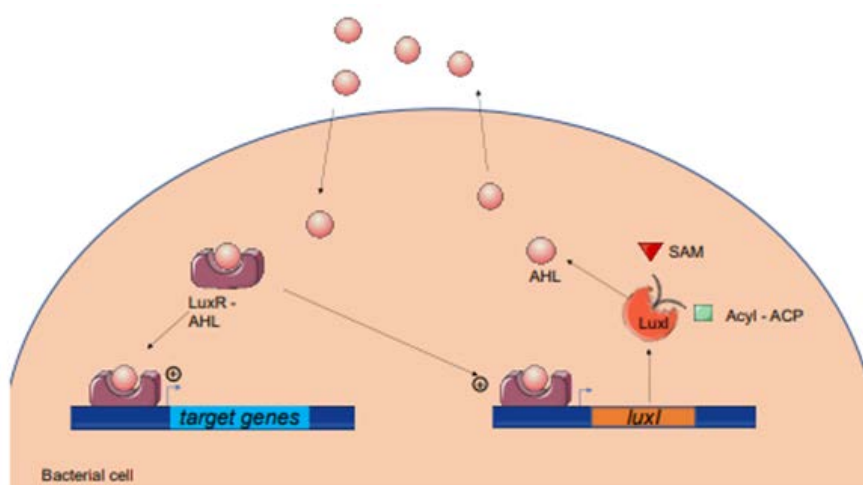
تنوع در طول زنجیره‌ی آسیل ( $C_4$ ) تا ( $C_{18}$ ) و وضعیت اکسیداسیون آن (وجود گروه‌های ۳-اکسو یا ۳-هیدروکسی) سبب ایجاد طیفی از AHL‌ها شده است که پایه‌ی اختصاصیت گونه‌ای در سیستم‌های QS را تشکیل می‌دهد (Kuo et al, ۱۹۹۴). پروتئین‌های نوع LuxR نیز دارای دو خوشه‌ی حفاظت‌شده هستند: یکی در ناحیه‌ی تعامل اتصال به AHL (باقیمانده‌های ۳۸ تا ۶۶) و دیگری در دومین اتصال به DNA (باقیمانده‌های ۱۸۳ تا ۲۲۹) (England & Greenberg, ۱۹۹۹). هر چند این پروتئین‌ها تنها ۱۸ تا ۲۸ درصد همانندی توالی دارند (Whitehead et al, ۲۰۰۱)، عملکردشان الزاماً یکسان نیست؛ به‌عنوان مثال، پروتئین EsaR در *Pantoea stewartii* در غیاب AHL به DNA متصل می‌شود و رونویسی را سرکوب می‌کند، اما اتصال AHL سبب رهاسازی آن از DNA و رفع سرکوب می‌گردد (Minogue et al, ۲۰۰۲; Von Bodman et al, ۱۹۹۸, ۲۰۰۳).

در *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*، همولوگ‌های این سیستم (به‌ویژه ExpI و ExpR) در تنظیم تولید آنزیم‌های تخریب‌کننده‌ی دیواره‌ی سلولی گیاه (PCWDEs) و آنتی‌بیوتیک carbapenem نقش محوری دارند (Jones et al, ۱۹۹۳; Pirhonen et al, ۱۹۹۳). با این وجود، حذف این سیستم‌ها در شرایط آزمایشگاهی مانع از بقا نمی‌شود (Barnard & Salmond, ۲۰۰۷) که نشان می‌دهد نقش اصلی

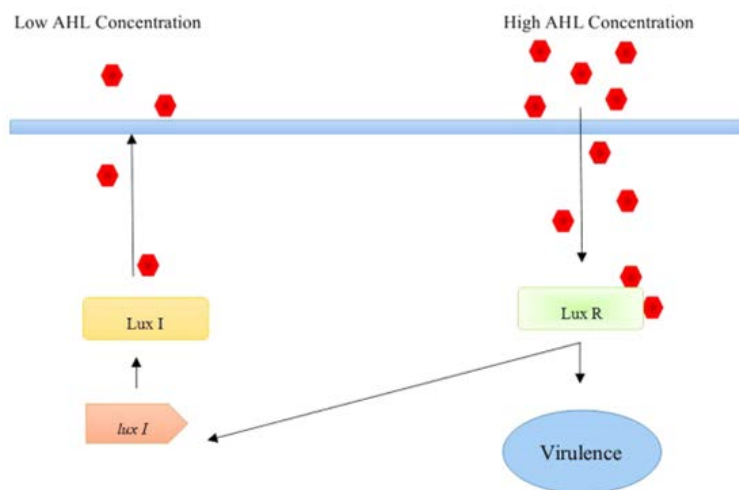


در محیط‌های طبیعی و در حضور نوسانات جمعیت و فشار دفاعی میزبان، برجسته‌تر است (شکل ۴ و ۵).

۲ / ۴ سیستم **ExpI/ExpR** در **Pectobacterium carotovorum** در جنس **Pectobacterium**، تنظیم هماهنگ سنتاز اصلی AHL عمل می‌کند و AHL شامل جفت ژنی همولوگ با LuxI/LuxR، یعنی expI/expR است. پروتئین ExpI به‌عنوان سنتاز اصلی AHL عمل می‌کند و AHL



شکل ۴. سیستم حد نصاب احساس (Quorum Sensing) وابسته به N-آسیل‌هموسرین لاکتون (AHL). یک سنتاز مشابه LuxI با ایجاد پیوند آمیدی بین یک زنجیره‌ی آسید چرب و S-آدنوزیل‌متیونین (SAM)، مولکول‌های AHL را تولید می‌کند (آسیل - پروتئین حامل ACP). در تراکم سلولی پایین، AHL‌ها در محیط کشت رقیق می‌شوند؛ در حالی که در تراکم سلولی بالا، این مولکول‌ها تجمع یافته و به یک آستانه‌ی مشخص می‌رسند. مولکول‌های پیام‌رسان از غشای سلولی عبور کرده و به تنظیم‌کننده مشابه LuxR متصل می‌شوند. سپس کمپلکس LuxR-AHL بیان ژن‌های هدف، از جمله luxI را تنظیم می‌کند. ژن‌های گذرنده‌ی خانواده‌های پروتئینی LuxI و LuxR بسته به سویه و گونه نام‌های متفاوتی دارند و در برخی موارد، گوناگونی در عملکرد آن‌ها مشاهده می‌شود (Baltenneck et al, ۲۰۲۱).



شکل ۵. نمای شماتیک مسیر مدار پیام‌رسانی LuxI/R: شش‌ضلعی‌های قرمز نشان‌دهنده مولکول القاگر خودکار (Autoinducer) هستند که توسط پروتئین LuxI تولید می‌شود.

(۲۰۱۸, Vadakkan et al)

باز می‌دارد (شکل ۶). با افزایش تراکم سلولی و تجمع AHL، تشکیل کمپلکس ExpR-AH مانع اتصال ExpR به DNA می‌شود و در نتیجه بیان ژن‌های پرآزاری فعال می‌گردد (Pöllumaa et al., ۲۰۱۲). در برخی سویه‌ها مانند *P. carotovorum* ATCC ۳۹۰۴۸، سیستم مکمل CarI/CarR نیز وجود دارد که تولید آنتی‌بیوتیک  $\beta$ -لاکتامی carbapenem را تنظیم می‌کند (McGowan et al., ۱۹۹۵). این مسیر علاوه بر نقش در رقابت بوم‌شناختی، بیانگر تعامل میان مسیرهای QS و متابولیسمی در باکتری است.

### ۳/۴. نوع و ساختار AHLها در گونه‌های

#### **Pectobacterium**

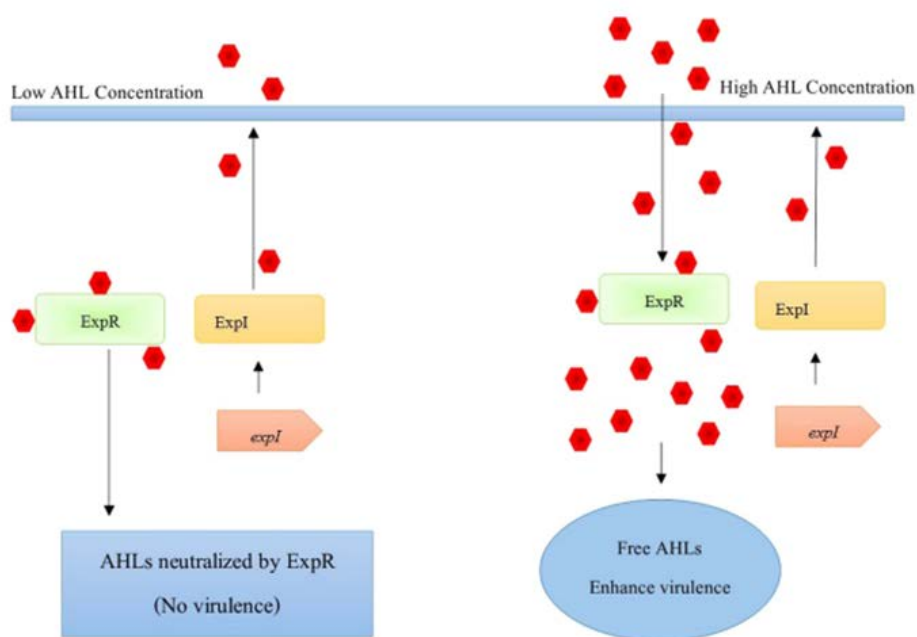
مولکول‌های سیگنال اصلی QS در *Pectobacterium* از خانواده ی N-acyl-homoserine lactone (AHL) هستند (Whitehead et al., ۲۰۰۱; Williams, ۲۰۰۷). این ترکیبات شامل یک حلقه‌ی هموسرین لاکتون متصل به یک زنجیره‌ی اسید چرب از طریق پیوند آمیدی در موقعیت  $\alpha$  هستند. حلقه‌ی لاکتون

های غالب تولیدشده در سویه‌های مختلف شامل مختلف شامل ۳-N-oxo-hexanoyl-L-homoserine lactone (HSL-oxo-C<sub>6</sub>-۳) و ۳-N-oxo-octanoyl-L-homoserine lactone (HSL-oxo-C<sub>8</sub>-۳) هستند (Pöllumaa et al., ۲۰۱۲). سویه‌های مختلف *P. carotovorum* subsp. *carotovorum* (Pcc) از نظر الگوی تولید AHL به دو کلاس تقسیم می‌شوند: کلاس I که عمدتاً HSL<sub>3</sub>-oxo-C<sub>8</sub> تولید می‌کند و کلاس II که غالباً HSL<sub>3</sub>-oxo-C<sub>6</sub> را می‌سازد (Liu et al., ۲۰۰۸). (جدول شماره ۱). تفاوت در نوع AHL تولیدی به ویژگی‌های ساختاری پروتئین ExpI و اندازه‌ی حفره کاتالیتیکی (catalytic pocket) آن مربوط می‌شود که نوع زنجیره‌ی آسید قابل اتصال را تعیین می‌کند. جهش‌های نقطه‌ای در ژن expI از جمله (M1۲۷T) و (F۶۹L) می‌توانند طول زنجیره‌ی سیگنال تولیدی را تغییر داده و در نتیجه بر تنظیم پرآزاری تاثیرگذار باشند (Baltenneck et al., ۲۰۲۱). پروتئین ExpR، تنظیم‌کننده رونویسی از خانواده‌ی LuxR، سیگنال AHL را شناسایی کرده و در پاسخ به آن، بیان ژن‌های پرآزاری نظیر آنزیم‌های PCWDE کنترل می‌کند (Cui et al., ۲۰۰۵). در غیاب AHL، ExpR به DNA متصل شده و بیان ژن RsmA را فعال می‌کند؛ RsmA به نوبه‌ی خود با اتصال به mRNA ژن‌های PCWDE، آن‌ها را از ترجمه



Strain	Major AHL	LuxI/R homologue(s)	QS regulated phenotype(s)	Reference
<b>Class I strains</b>				
<i>Pec</i> SCC3193	3-oxo-C8-AHL 3-oxo-C6-AHL	ExpI/ExpR1/ExpR2	production of PCWDE; virulence	[4,13]
<i>Pec</i> EC153	3-oxo-C8-AHL	AhlI/ExpR	production of PCWDE; virulence	[48,49]
<b>Class II strains</b>				
<i>Pec</i> 71	3-oxo-C6-AHL 3-oxo-C8-AHL	AhlI/ExpR1/ExpR2	production of PCWDE; virulence	[50-52]
<i>Pec</i> SCRI193	3-oxo-C6-AHL	ExpI/ExpR1/ExpR2	production of PCWDE; virulence	[5]
<i>Pec</i> ATCC390048	3-oxo-C6-AHL	CarI/CarR ExpR1/VirR	production of carbapenem and PCWDE; virulence	[52]
<i>Pba</i> SCRI1043	3-oxo-C6-AHL	ExpI/ExpR/VirR	production of PCWDE, Nip	[49,52]

جدول ۱. سیستم حد نصاب احساس (Quorum Sensing) مبتنی بر AHL در پکتوباکتریاهای کلاس I و کلاس II (Pöllumaa et al., ۲۰۱۲)



شکل ۶. نمای شماتیک مسیر سیگنال دهی ExpI/ExpR و شباهت آن با مدار LuxI/LuxR (Vadakkan et al., ۲۰۱۸)

مقابل، *expR* (گاهی در دو نسخه *expR1* و *expR2*) تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیکی متفاوت را ممکن می‌سازد (Cui et al, 2005; Sjöblom et al, 2006). *ExpR* در غیاب *AHL* به پروموتور *rsmA* متصل شده و بیان آن را تحریک می‌کند؛ *RsmA* با اتصال به mRNAهای کدکننده *PCWDE*ها، از ترجمه‌ی آنها جلوگیری می‌کند. با تجمع *AHL*، کمپلکس *ExpR-AHL* دیگر قادر به اتصال به DNA نیست و در نتیجه سطح *RsmA* کاهش می‌یابد و بیان آنزیم‌های بیماری‌زا افزایش می‌یابد (Cui et al, 2005). افزون بر *ExpR*، همولوگ *CarR* در برخی سویه‌ها مانند (ATCC 39048) تولید آنتی‌بیوتیک *carbapenem* را القا می‌کند (McGowan et al, 1995) که مزیت رقابتی مهمی در محیط ریزوسفر فراهم می‌آورد (Axelrood et al, 1988; Toth et al, 2003; Fan et al, 2020).

برای پایداری ساختاری و فعالیت زیستی ضروری است، در حالی که طول و اشباع زنجیره‌ی آسیل، به همراه وجود گروه‌های عاملی مانند *oxo3*- یا *3-hydroxy-*، پایداری و اختصاصیت اتصال به گیرنده‌های *LuxR* را تعیین می‌کند (Parsek et al, 1999; Chhabra et al, 2004). در *P. carotovorum* و *subsp. carotovorum* (*Pcc*) *subsp. brasiliense* (*Pcb*)، *AHL* *HSL (HHL)-C6* و *HSL (OHHL)-oxo-C6-3* هستند، در حالی که مقادیر کمتری از *OXO--3* *HSL-C8* و *HSL (OOHL)-C8* نیز گزارش شده است (Pöllumaa et al, 2012; McGowan et al, 1995). در *P. atrosepticum* نیز ترکیبات مشابهی شناسایی شده‌اند (Liu et al, 2008). این تنوع بازتابی از سازگاری تکاملی سویه‌ها با محیط، میزبان و رقابت میکروبی است (Barnard et al, 2007).

#### ۵/۴. مکانیسم مولکولی فعال‌سازی

##### ژن‌های بیماری‌زا

مکانیسم عمل سیستم *LuxI/LuxR* در *Pectobacterium* بر اساس الگوی کلاسیک *QS* در باکتری‌های گرم منفی است. در چگالی سلولی پایین، سطح *AHL*ها کم است و پروتئین‌های *LuxR* (مانند *ExpR* و *CarR*) بدون لیگاند، یا ناپایدار یا در حالت غیرفعال قرار دارند؛ در نتیجه، ژن‌های پرازایی در سطح پایه بیان می‌شوند

#### ۴/۴. ژن‌های *expI*، *expR*، *carI*، *carR* و

##### عملکرد آنها

هسته‌ی اصلی سیستم *AHL*-محور در *Pectobacterium* راستناز *AHL* از خانواده‌ی *LuxI* و چندین گیرنده‌ی *LuxR* تشکیل می‌دهد. ژن *expI* (که در برخی سویه‌ها با نام‌های *AhII*، *CarI* یا *HsII* شناخته می‌شود) *AHL*های اصلی مانند *oxo--3* *HSL-C6* و *HSL-oxo-C8-3* را سنتز می‌کند (Parsek et al, 1999; Pöllumaa et al, 2012). در



Pectobacterium از طریق تعامل پیچیده بین *carI/carR* و *expI/expR*، یک شبکه تنظیمی چندسطحی ایجاد می‌کند که نه تنها بیان مستقیم *PCWDE* و *carbapenem* را کنترل می‌نماید، بلکه سازگاری متابولیک، رفتارهای اجتماعی و برهم‌کنش‌های بین‌گونه‌ای را نیز هدایت می‌کند. این پیچیدگی، یکی از عوامل کلیدی موفقیت بوم‌شناختی و گستره میزبانی گسترده *Pectobacterium* در محیط‌های گیاهی محسوب می‌شود (Faure and Dessaux, ۲۰۰۷; Liu et al, ۲۰۰۸; Pöllumaa et al, ۲۰۱۲).

#### ۶/۴. سیستم LuxS/AI-۲ و نقش مکمل آن

##### در *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*

دومین سیستم شناخته‌شده‌ی حد نصاب احساس در *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (Pcc) سیستم مبتنی بر LuxS/AI-۲ است. مولکول سیگنالی ۲-Autoinducer (AI-۲) نخستین بار در *Vibrio harveyi* شناسایی شد (Xavier & Bassler, ۲۰۰۵) و وجود ژن *luxS* در سویه‌های مختلف *Pectobacterium* از جمله *Pcc* (*Pba*; *Pectobacterium atrosepticum*) و (ATTn ۱۰) (Coulthurst et al, ۲۰۰۴; Pöllumaa et al, ۲۰۱۲). در حالی که سیستم QS مبتنی بر N-آسیل هموسرین لاکتون

(Jones et al, ۱۹۹۳; Pöllumaa et al, ۲۰۱۲). با افزایش تعداد سلول‌ها، سطح AHL‌ها به آستانه می‌رسد و به دامنه N-ترمینال LuxR‌ها متصل شده، باعث تشکیل کمپلکس‌های فعال دایمری یا الیگومری می‌شوند که به توالی‌های پروموتوری (از جمله motif‌های شبیه lux box) متصل می‌گردند (Urbanowski et al, ۲۰۰۴; Castang et al, ۲۰۰۶).

در *P. atrosepticum*، تحلیل‌های ترنسکرپتومی نشان داده‌اند که QS مبتنی بر *expI* حدود ۲۶ درصد از ترانسکرپتوم را در شرایط درون‌گیاهی کنترل می‌کند (Liu et al, ۲۰۰۸). این *regulon* علاوه بر ژن‌های کدکننده *PCWDE* (مانند پکتینازها، پلی‌گالاکتورونازها و سلولولازها)، شامل ژن‌های سیستم‌های ترشحی نوع I، II، III و VI، ژن‌های مربوط به تحرک (تاژک و کموتاکسی)، تشکیل بیوفیلم، پاسخ به استرس اکسیداتیو و مسیرهای متابولیسم اسیدهای آمینه، قندها و تنفس بی‌هوازی است (Pöllumaa et al, ۲۰۱۲; Liu et al, ۲۰۰۸). این دامنه گسترده تنظیمی نشان می‌دهد که QS نه تنها یک کلید سوئیچ برای فعال‌سازی آنزیم‌های پرازایی است، بلکه یک شبکه هماهنگ‌کننده مرکزی است که رشد، متابولیسم، تحرک و رقابت میکروبی را در طول آلودگی تنظیم می‌کند.

در مجموع، سیستم LuxI/LuxR-AHL در

### بیان ژن‌ها در *Pectobacterium*

۲-Autoinducer (۲-AI) به‌عنوان یک مولکول سیگنالی عمومی در طیف وسیعی از باکتری‌های گرم منفی و گرم مثبت شناخته می‌شود و نقش مهمی در ارتباطات بین‌گونه‌ای ایفا می‌کند. بیوسنتز ۲-AI از مسیر متابولیکی چرخه متیونین فعال شده (activated methyl cycle) نشأت می‌گیرد. در این مسیر، ترکیب S-آدنوزیل متیونین (SAM) پ س از انتقال گروه متیل به بسترهای مختلف، به ۵'-متیل تیوادنوزین (MTA) تبدیل می‌شود. MTA سپس توسط آنزیم MTA/SAH نوکلئوزیداز (معمولاً گذشته توسط ژن *mtn*) به S-آدنوزیل هموسیستئین (SAH) تبدیل شده و در نهایت، SAH به هموسیستئین و آدنوزین تجزیه می‌شود. مرحله کلیدی در تولید ۲-AI زمانی رخ می‌دهد که SAH به عنوان سوبسترای آنزیم LuxS عمل کرده و توسط این آنزیم به pentanedione (DPD)-۲,۳-dihydroxy-۴,۵ تجزیه شود. ترکیب DPD به‌صورت خودبه‌خودی در محیط آبی به فرم‌های مختلف ۲-AI تبدیل می‌شود که ساختار دقیق آن‌ها بسته به شرایط محیطی و حضور یون‌های فلزی (مانند borate در برخی گونه‌ها) متفاوت است (Baltenneck et al., ۲۰۲۱).

با وجود حضور ژن *luxS* در ژنوم بسیاری از باکتری‌های بیماری‌زای گیاهی از جمله

*P. carotovorum* subsp. *carotovorum* (AHL) (Pcc) به‌خوبی شناخته شده است، وجود یک سیستم ۲-LuxS/AI که به‌عنوان یک سیگنال بین‌گونه‌ای (interspecies signal) در این گونه شناخته می‌شود، همچنان به‌صورت ناهمگون و مکمل عمل می‌کند. برخلاف سیستم AHL که از طریق جفت‌های *ExpI/ExpR* یا *CarI/CarR* فعالیت می‌کند، مسیر بیوسنتز ۲-AI از چرخه فعال‌سازی متیونین (activated methyl cycle) نشأت می‌گیرد و به‌عنوان یک محصول جانبی از متابولیسم متیونین، توسط آنزیم LuxS تولید می‌شود. ۲-AI در بسیاری از باکتری‌های گرم منفی و گرم مثبت به‌عنوان یک سیگنال عمومی (Global signal) عمل کرده و امکان ارتباط بین‌گونه‌ای را فراهم می‌آورد. با وجود گزارش‌هایی از وجود *luxS* در برخی سویه‌های *Pectobacterium* شواهد مستقیم از نقش ۲-AI در بیماری‌زایی Pcc محدود است (Pöllumaa et al., ۲۰۱۲). با این حال، نقش ۲-AI در Pcc هنوز به‌خوبی مشخص نیست و به‌نظر می‌رسد نقشی مکمل و احتمالاً بین‌گونه‌ای یعنی سیگنال‌دهی با سایر میکروارگانیسم‌های ریزوسفر، نه کنترل بیماری‌زایی درون‌گونه‌ای داشته باشد (Rezzonico & Duffy, ۲۰۰۸; Pöllumaa et al., ۲۰۱۲).

### ۷/۴. مسیر بیوسنتز ۲-AI و تأثیر آن بر



احتمالی با سایر میکروارگانیسم‌ها در محیط گیاهی (مثلاً در ریزوسفر یا در سطح بافت‌های آلوده) ممکن است نقشی غیرمستقیم و مکمل در اکولوژی باکتری داشته باشد (Baltenneck et al., ۲۰۲۱). در مجموع، برخلاف سیستم LuxI/LuxR-AHL که نقش محوری و اثبات‌شده‌ای در تنظیم بیماری‌زایی Pcc دارد، سیستم LuxS/AI-۲ در این باکتری به احتمال زیاد نقش مستقلاً در کنترل بیان ژن‌های ویروس‌یون ایفای نمی‌کند و بیشتر به‌عنوان یک مؤلفه مکمل یا نتیجه‌ای از فرآیندهای متابولیکی در نظر گرفته می‌شود.

#### ۸/۴. تعامل سیستم‌های حد نصاب احساس

##### (QS) چندگانه در باکتری *Pectobacterium*

##### *carotovorum* subsp. *carotovorum* (Pcc)

*P. carotovorum* subsp. *carotovorum* از نظر ژنتیکی به چندین سیستم QS مجهز است که می‌توانند به صورت هم‌زمان و هماهنگ بر بروز فنوتیپ‌های مرتبط با بیماری‌زایی اثر بگذارند. در میان این سیستم‌ها، مهم‌ترین و مرکزی‌ترین بخش، سیستم وابسته به AHL از نوع ExpI/ExpR است. این سیستم علاوه بر تنظیم مستقیم بیان ژن‌های کدکننده‌ی آنزیم‌های تخریب‌کننده‌ی دیواره گیاهی (PCWDEs) مانند پکتات لیاز، سلولاز و پلی‌گالاکتوروناز، در کنترل فرآیندهای فیزیولوژیکی و رفتاری متعددی از

*Pectobacterium*، مطالعات نشان می‌دهند که LuxS در این گروه از باکتری‌ها بیشتر نقشی متابولیکی دارد تا یک تنظیم‌کننده‌ی مستقیم سیستم QS. برای مثال، در *Erwinia amylovora* که از نظر فیلوژنتیکی به *Pectobacterium* نزدیک است تحقیقات گسترده نشان داده‌اند که حذف ژن luxS تأثیری بر ویروس‌یون ندارد و تنها باعث اختلال در متابولیسم متیونین می‌شود (Sibanda; ۲۰۰۷, Rezzonico & Duffy; et al., ۲۰۱۸). به همین دلیل، محققان استنباط کرده‌اند که توانایی تولید AI-۲ در این گروه از باکتری‌ها ممکن است یک پیامد متابولیکی ثانویه باشد، نه یک سیستم سیگنالینگ تکامل یافته برای هماهنگی جمعیتی.

##### در *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*

اگرچه ژن luxS در ژنوم شناسایی شده است، تاکنون شواهدی دال بر مشارکت مستقیم این سیستم در تنظیم ژن‌های ویروس‌یون یا مسیرهای کلاسیک QS گزارش نشده است. به‌علاوه، هیچ گیرنده اختصاصی AI-۲ (مانند lsr در *Salmonella* یا luxPQ در *Vibrio*) در ژنوم گونه‌های *Pectobacterium* شناسایی نشده است. این یافته‌ها احتمال می‌دهند که AI-۲ در Pcc نه به‌عنوان یک autoinducer عمل‌کردی، بلکه صرفاً به‌عنوان یک محصول جانبی از متابولیسم متیونین تولید می‌شود و هرگونه تعامل

جمله تشکیل بیوفیلیم، تحرک باکتریایی، سنترز آگزوپلی ساکاریدها (EPS)، مقاومت به تنش اکسیداتیو و نیز تولید آنتی بیوتیک‌هایی مانند کارباپنم نقش اساسی دارد (Baltenneck et al, 2021; Li et al, 2022). در Pcc، اغلب بیش از یک همولوگ از تنظیم‌کننده‌های خانواده LuxR وجود دارد. به عنوان مثال، CarR، ExpR<sub>1</sub> و ExpR<sub>2</sub> که هر یک به سیگنال‌های AHL با طول زنجیره‌های باز متفاوت (اعم از C<sub>6</sub>-oxo-HSL و C<sub>8</sub>-oxo-HSL) پاسخ می‌دهند. این تنوع در گیرنده‌های QS امکان پاسخ‌های تنظیمی دقیق‌تر و انعطاف‌پذیرتر به تغییرات چگالی جمعیت باکتری را فراهم می‌کند. از نظر مکانیسم عملکرد، ExpR در غیاب سیگنال AHL به ژن‌های هدف متصل شده و باعث سرکوب بیان آن‌ها می‌شود، در حالی که با حضور سیگنال AHL، کمپلکس ExpR-AHL از DNA جدا شده و به بیان ژن‌های ویروس‌سیون منجر می‌شود. این الگوی تنظیمی با مدل کلاسیک سیستم LuxI/LuxR در *Vibrio fischeri* تفاوت دارد (Baltenneck et al, 2021). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مداخله‌ی هدفمند در سیستم ExpI/ExpR (مثلاً با مهارکننده‌های QS مانند راپونتی‌ژنین (rhapontigenin) در مطالعه‌ی و همکاران سال 2022، نه تنها تولید AHL را مهار می‌کند، بلکه به‌طور هم‌زمان بیان ژن‌های مرتبط با بیوفیلیم،

حرکت و آنزیم‌های خارج سلولی را نیز کاهش می‌دهد، بدون اینکه رشد باکتری را تحت تأثیر قرار دهد. این یافته‌ها بیانگر آن است که سیستم AHL در Pcc، هسته اصلی شبکه تنظیمی ویروس‌سیون بوده و سایر سیستم‌های احتمالی مانند LuxS/AI-2 یا مسیرهای تنظیمی مرتبط با RsmA، نقش‌های فرعی یا مکمل دارند (Li et al, 2022).

## ۵. شبکه‌های تنظیمی مرتبط با Quorum Sensing (QS)

### ۵/۱. برهم‌کنش QS با سیستم‌های تنظیمی RsmA/RsmB، GacS/GacA و PhoP/Q در *Pectobacterium carotovorum*

در باکتری‌های گرم منفی بیماری‌زای گیاهی، از جمله *Pectobacterium carotovorum*، سیستم Quorum Sensing (QS) به‌عنوان یک سیستم مستقل عمل نمی‌کند، بلکه بخشی از شبکه‌ای تنظیمی پیچیده و چندلایه است که سیگنال‌های ناشی از تراکم جمعیت سلولی، وضعیت متابولیک، شرایط محیطی و سیگنال‌های میزبان گیاهی را در سطوح مختلف تنظیم ژن ادغام می‌کند. در این شبکه‌ها، سیستم‌های QS با مسیرهای تنظیمی دیگری مانند RsmA/GacS/GacA، PhoP/PhoQ و RsmB/QseBC در تعامل قرار دارد و از طریق این تعامل‌ها، بیان ژن‌های مرتبط با



باکتری می‌شود، در حالی که افزایش بیان RsmA اثر مهارکننده‌ی معکوس دارد. در مقابل، RNA تنظیمی غیرکدکننده RsmB با اتصال مستقیم به RsmA، فعالیت مهارکننده آن را خنثی می‌کند. نشان داده شده است که RsmB پس از پردازش به یک RNA فعال کوتاه‌تر تبدیل می‌شود که بدون ترجمه به پروتئین، نقش تنظیمی خود را ایفا می‌کند (Liu et al, ۱۹۹۸). این RNA تنظیمی با به دام انداختن مولکول‌های RsmA، مانع از اتصال آن‌ها به mRNAهای هدف شده و در نتیجه پایداری و وزن‌های مرتبط با بیماری‌زایی افزایش می‌یابد. چنین مکانیسمی نمونه‌ای بارز از تنظیم پس‌ترجمه‌ای مبتنی بر RNA در باکتری‌های بیماری‌زای گیاهی به‌شمار می‌رود.

### ۳/۵. برهم‌کنش تنظیمی QS با مدار

#### RsmA/RsmB

در *P. carotovorum*، سیستم QS به‌طور مستقیم با مدار RsmA/RsmB در تعامل تنظیمی قرار دارد. ژن ohll که مسئول سنتز مولکول سیگنال AHL است، تحت کنترل منفی RsmA و کنترل مثبت RsmB قرار دارد (Chatterjee et al, ۱۹۹۵; Liu et al, ۱۹۹۸). این الگوی تنظیمی یک حلقه بازخورد مثبت ایجاد می‌کند؛ به طوری که افزایش تراکم سلولی و تجمع AHL منجر به کاهش فعالیت RsmA یا افزایش بیان RsmB می‌شود و در

بیماری‌زایی، تحرک، تشکیل بیوفیلم و پاسخ به تنش‌های محیطی را به‌طور پویا هماهنگ می‌سازد. این شبکه‌ها، از طریق برهم‌کنش متقابل مسیرهای رونویسی و پس‌ترجمه‌ای، به باکتری اجازه می‌دهند تا بین استراتژی‌های «تهاجم سریع»، «بقاء و مقاومت بلندمدت» و «پراکندگی» بهینه‌ترین انتخاب را داشته باشد (Pöllumaa et al, ۲۰۱۲; Perfileva et al, ۲۰۲۵).

### ۲/۵. محور RsmA/RsmB به‌عنوان گره

#### مرکزی تنظیم پس‌ترجمه‌ای

یکی از اجزای کلیدی این شبکه، سیستم تنظیمی (RsmA/RsmB) همولوگ (CsrA/CsrB) است که عمدتاً در سطح پس‌ترجمه‌ای و از طریق کنترل پایداری و ترجمه mRNAها عمل می‌کند. مطالعات انجام‌شده بر روی *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora* نشان داده‌اند که RsmA یک تنظیم‌کننده منفی عمومی است که با اتصال به mRNAهای هدف، از ترجمه یا پایداری آن‌ها جلوگیری می‌کند و بدین ترتیب بیان ژن‌های کدکننده آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی، فاکتورهای بیماری‌زایی و حتی ژن‌های دخیل در سنتز سیگنال‌های QS را مهار می‌سازد (Chatterjee et al, ۱۹۹۵; Cui et al, ۱۹۹۶). حذف ژن rsmA منجر به افزایش قابل توجه بیان این ژن‌ها و در نتیجه تشدید پرازاری

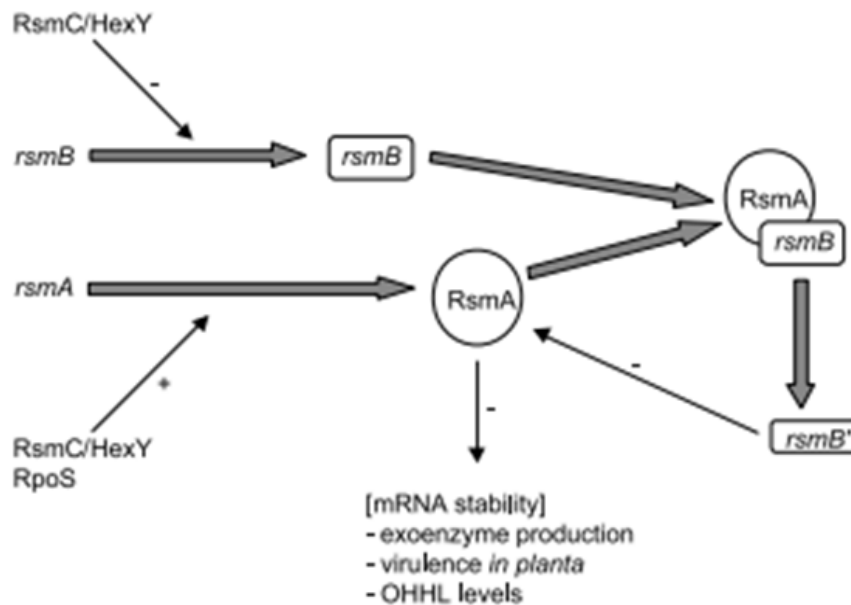
کلیدی میان سیگنال‌های محیطی و محور QS- Rsm عمل می‌کند. در بسیاری از باکتری‌های گرم منفی، فعال‌سازی GacA باعث القای بیان RNAهای تنظیمی کوچک نظیر RsmY و RsmZ می‌شود که عملکردی مشابه RsmB دارند و از طریق مهار RsmA، بیان ژن‌های بیماری‌زایی را فعال می‌سازند (Vakulskas et al, 2015). این مسیر به‌عنوان نقطه‌ی همگرایی مهمی برای سیگنال‌های متابولیکی، محیطی و سیگنال‌های وابسته به QS عمل کرده و خروجی نهایی شبکه را تعدیل می‌کند که جایگاه سیستم GacS/ GacA در این شبکه تنظیمی در شکل ۸ به‌صورت

نهایت تولید بیشتر AHL و تقویت بیان ژن‌های بیماری‌زای را به دنبال دارد. از این منظر QS نه تنها یک مسیر بالادستی، بلکه بخشی از یک مدار خودتقویت‌شونده تنظیمی محسوب می‌شود، که روابط آن میان AHLها، ExpRها و محور RsmA/ RsmB در شکل ۷ به‌صورت یک مدل یکپارچه نشان داده شده است.

#### ۴/۵ نقش سیستم GacS/GacA در اتصال

#### سیگنال‌های محیطی به QS

در سطوح بالاتر شبکه، سیستم‌های دو جزئی GacS/GacA به‌عنوان یک پیونددهنده‌ی



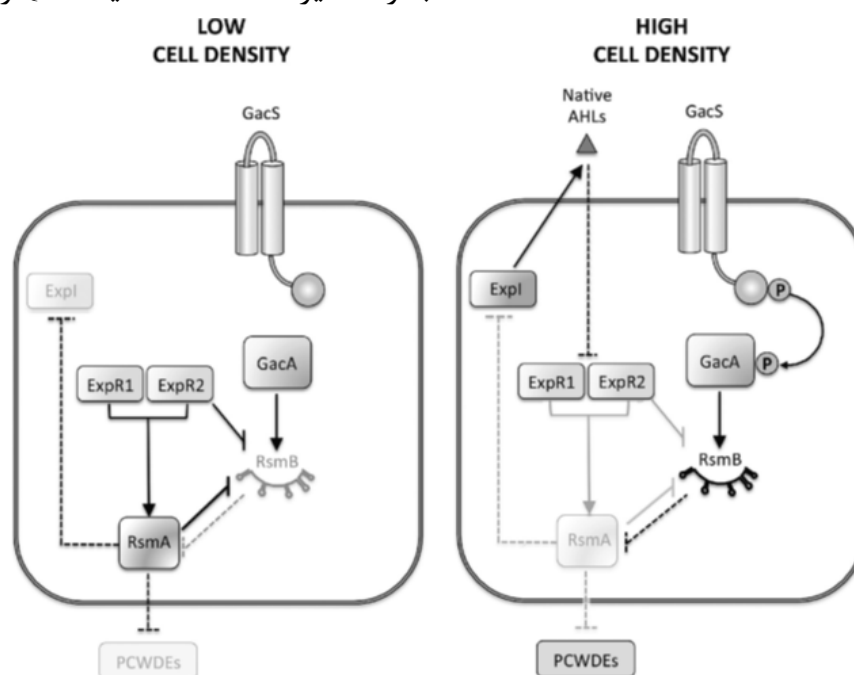
شکل ۷. مدل شبکه تنظیمی RsmA/rsmB/RsmC در *Erwinia carotovora subsp. carotovora*. با ناپایداری رونوشت‌های mRNA مربوط به Carl و آنزیم‌های خارج سلولی، بیان آن‌ها را مهار می‌کند. برهم‌کنش RsmA با rsmB به‌طور بالقوه موجب خروج RsmA از مخزن تنظیم‌کننده‌های سلولی شده و پردازش rsmB به دو گونه RNA را تسهیل می‌کند. گونه RNA کوچک‌تر حاصل از این پردازش (rsmBP) بیان RsmA را از طریق مکانیسمی که هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است، کاهش می‌دهد. علاوه بر این، تنظیم‌کننده‌های RsmC، HexY و RpoS همگی بر سطح سلولی RsmA و rsmB تأثیر می‌گذارند.



شماتیک خلاصه شده است.

اجزای مهم این شبکه تنظیمی است که به شرایطی نظیر کمبود منیزیم، pH اسیدی و حضور کاتیون‌های ضد میکروبی پاسخ می‌دهد. PhoP می‌تواند به‌طور مستقیم بیان ژن‌های بیماری‌زایی را تنظیم کند یا از طریق تأثیر بر مسیر Gac/Rsm، فعالیت QS را به شرایط

۵/۵. ادغام سیستم PhoP/PhoQ با شبکه QS-Rsm سیستم دو جزئی PhoP/PhoQ یکی دیگر از



شکل ۸. مسیرهای اصلی انتقال سیگنال در تنظیم آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی گیاهی (PCWDEs) در گونه‌های *Pectobacterium*. در تراکم سلولی پایین و در شرایطی که غلظت مولکول‌های سیگنال AHL کم است، تنظیم‌کننده‌های ExpR1 و ExpR2 موجب القای رونویسی ژن *rsmA* می‌شوند. افزایش بیان *rsmA* منجر به مهار بیان ژن‌های کدکننده PCWDEs و همچنین مهار بیان ژن *expi* که مسئول سنتز AHL است، می‌گردد. با افزایش تراکم سلولی، مولکول‌های AHL در محیط تجمع یافته و از طریق غیرفعال‌سازی ExpR1 و ExpR2، القای رونویسی *rsmA* را متوقف می‌کنند. هم‌زمان، در تراکم سلولی بالا، سیستم دو جزئی GacS/GacA فعال شده و بیان *rsmB* را القا می‌نماید. *rsmB* یک RNA تنظیمی غیرکدکننده است که با به دام انداختن *RsmA*، فعالیت مهارکننده آن را خنثی می‌کند. *RsmA* در نهایت به افزایش تولید PCWDEs و القای بیماری‌زایی منجر می‌شود. این مدل نشان می‌دهد که تنظیم *rsmB* صرفاً به سیستم GacS/GacA محدود نیست، بلکه به‌طور مستقیم تحت تأثیر سیگنال‌های AHL نیز قرار دارد. در غیاب AHL‌ها، ExpR1 و ExpR2 بیان *rsmB* را سرکوب می‌کنند. سرکوب *rsmB* توسط ExpR1 وابسته به *RsmA* است، در حالی که ExpR2 می‌تواند *rsmB* را به‌صورت وابسته و مستقل از *RsmA* مهار کند. در نتیجه، در تراکم سلولی بالا، افزایش بیان *rsmB* حاصل هم‌زمان فعال‌سازی مسیر GacS/GacA و رفع سرکوب اعمال‌شده توسط ExpR1 و ExpR2 است. در این شکل، خطوط و جعبه‌های سیاه و خاکستری به ترتیب نشان‌دهنده مسیرهای فعال و غیرفعال هستند. فلش‌ها بیانگر فعال‌سازی و خطوط متقاطع نشان‌دهنده سرکوب می‌باشند. خطوط پیوسته تنظیم در سطح رونویسی و خطوط چین‌دار مکانیسم‌های تنظیمی پسارونویسی و پساترجمه‌ای را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که همه برهم‌کنش‌های تنظیمی نمایش داده شده لزوماً از طریق تعاملات مستقیم به اثبات نرسیده‌اند (Valente et al, ۲۰۱۷).

خاص محیط میزبان وابسته سازد (Nuss et al., ۲۰۱۴). این تعامل تضمین می کند که بیان کامل فاکتورهای بیماری زایی تنها در محیط های مناسب میزبان و در تراکم سلولی کافی رخ دهد. ۶/۵. پیوند QS با تحرک، بیوفیلیم و پاسخ های تنشی

شبکه های تنظیمی مرتبط با QS به طور هم زمان چندین صفت کلیدی بیماری زایی را کنترل می کنند. سیستم Rsm/Csr در بسیاری از باکتری ها به عنوان یک سوئیچ عملکردی میان تحرک پلانکتونی (planktonic motility) و تشکیل بیوفیلیم عمل می کند؛ به گونه ای که معمولاً تحرک فعال و تشکیل بیوفیلیم مهار می شود (Romeo et al., ۲۰۱۳). علاوه بر این،

پاسخ های تنشی از طریق فاکتورهای نظیر RpoS و آلامون ppGpp(p) با این شبکه ادغام شده و از طریق تنظیم RNA های کوچک وابسته به Rsm، برنامه ی بیان ژن را به سمت سازگاری با شرایط نامطلوب محیطی هدایت می کنند (Mukherjee et al., ۱۹۹۸ ; Vakulskas et al., ۲۰۱۵). در مجموع، یک مدل یکپارچه از تنظیم بیماری زایی در *Pectobacterium carotovorum* نشان می دهد که سیگنال های ناشی از تراکم سلولی (QS)، وضعیت متابولیک، شرایط محیطی و تنش ها در سطوح رونویسی و پساترجمه ای به طور هم زمان همگرا می شوند. سیستم های

دو جزئی و فاکتورهای رونویسی، بیان RNA های تنظیمی را کنترل می کنند و این RNA ها با تعدیل فعالیت RsmA/Csr، خروجی نهایی شبکه را در سطح پایداری و ترجمه mRNA تعیین می نمایند. در این چارچوب، سیستم QS اغلب به عنوان یک «کلید اصلی» عمل می کند که تنها در صورت هم زمانی شرایط مطلوب، بیان گسترده ژن های بیماری زا را فعال می سازد. چنین معماری تنظیمی چندلایه ای، انعطاف پذیری و دقت بالایی را در هماهنگی رفتار جمعی و بیماری زایی فراهم می کند و اجزای آن اهداف بالقوه ای برای توسعه راهبردهای نوین کنترل بیماری های گیاهی به شمار می روند.

## ۶. خاموش سازی حدنصاب (Quorum Quenching; QQ):

۱/۶. تعریف و اهمیت زیستی Quorum Quenching  
خاموش سازی Quorum Sensing یا Quorum Quenching (QQ) به مجموعه ای از فرآیندهای بیوشیمیایی اطلاق می شود که طی آن ها مولکول های سیگنال دهنده QS، به ویژه AHL ها (acyl-homoserine lactones)، تخریب، تغییر شیمیایی یافته یا غیرفعال می شوند. QQ یک مکانیسم طبیعی برای تضعیف ارتباط بین سلولی بیمارگرها محسوب می شود و نقش مهمی در محدودسازی بیان ژن های



وابسته به بیماری‌زایی دارد. این پدیده به‌ویژه در کنترل بیماری‌های گیاهی با منشأ باکتریایی، از جمله بیماری پوسیدگی نرم ایجاد شده توسط *Pectobacterium carotovorum*، از اهمیت زیستی و کاربردی بالایی برخوردار است (Dong et al, ۲۰۰۱; Grandclément et al, ۲۰۱۶).

۲/۶. خاموش‌سازی QS به‌عنوان یک راهبرد نوین مهار زیستی

با توجه به نقش محوری سیستم QS در تنظیم بیماری‌زایی *Pectobacterium*، مداخله هدفمند در این سیستم که با عنوان خاموش‌سازی Quorum Sensing شناخته می‌شود، به‌عنوان یک راهبرد نوین و امیدوارکننده در مهار زیستی بیماری پوسیدگی نرم مطرح شده است (Fan et al; ۲۰۰۷, Faure & Dessaux, ۲۰۲۰).

خاموش‌سازی QS شامل هر نوع مداخله‌ای است که منجر به اختلال در تولید، انتقال یا درک سیگنال‌های QS شود. یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های خاموش‌سازی (QQ)، استفاده از آنزیم‌های تخریب‌کننده AHL است. در این میان، لاکتوناها مانند AiiA با باز کردن حلقه لاکتون AHL، این مولکول‌های سیگنال‌دهنده را غیرفعال می‌کنند. نشان داده شده است که بیان ژن AiiA در گیاهان میزبان می‌تواند مقاومت قابل توجهی در برابر *Pectobacterium* ایجاد کند (Dong et al, ۲۰۰۱).

۲۰۰۱). آسیلازها، مانند PvdQ از *Pseudomonas aeruginosa*، با شکستن پیوند آمیدی بین زنجیره آسیل و حلقه لاکتون AHL عمل می‌کنند (Huang et al, ۲۰۱۶). همچنین، اکسیدوردوکتازها از طریق ایجاد تغییرات اکسیداتیو در زنجیره آسیل AHL موجب کاهش فعالیت سیگنال‌دهی این مولکول‌ها می‌شوند (Uroz et al, ۲۰۰۵; Grandclément et al, ۲۰۱۶). مکانیسم‌های آنزیمی خاموش‌سازی AHL از طریق لاکتوناها، آسیلازها و اکسیدوردوکتازها به‌ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. برخی باکتری‌های خاک‌زی، از جمله *Rhodococcus erythropolis*، قادرند چندین فعالیت QQ (لاکتوناز، آسیلاز و ردوکتاز) را به‌طور هم‌زمان اعمال کنند که این ویژگی آن‌ها را به عوامل مؤثر در مهار QS تبدیل می‌کند (Uroz et al, ۲۰۰۸). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که میکروارگانیسم‌هایی مانند *Bacillus thuringiensis* و *Rhodococcus erythropolis* با ترشح لاکتوناها می‌توانند سطح AHL را در محیط کاهش داده و از القای بیماری جلوگیری نمایند (Dong et al, ۲۰۰۱; Uroz et al, ۲۰۰۸). دومین مکانیسم مهم خاموش‌سازی QS، استفاده از مهارکننده‌های QS (Quorum Sensing Inhibitors; QSIs) است. این ترکیبات با اتصال رقابتی یا غیررقابتی به گیرنده‌هایی نظیر ExpR، عملکرد آن‌ها را مختل می‌کنند. ترکیبات گیاهی

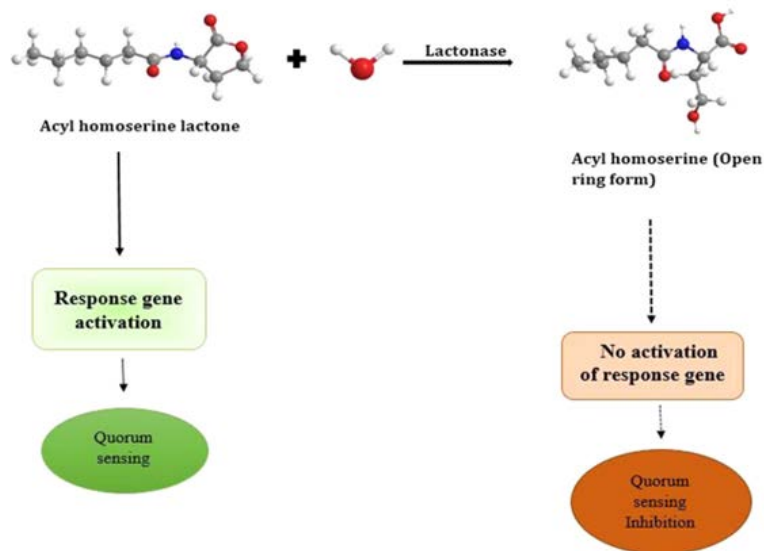
مانند وانیلین، گزانتون ها و ترکیبات فنولی و نیز متابولیت های قارچی نظیر پاتولین و پنیسیلیک اسید، از جمله QSIs مؤثر علیه *Pectobacterium* گزارش شده اند (Grandclément et al, ۲۰۱۶; Rai et al, ۲۰۱۵). علاوه بر این، برخی میکروارگانیسم های خاموش سازی QS، از جمله *Bacillus velezensis* CE۱۰۰، *Lysinibacillus* sp. Gs۵۰ و *Stenotrophomonas maltophilia* در

شرایط آزمایشگاهی (in vitro) و درون گیاهی (in planta) توانسته اند شدت پوسیدگی نرم را به طور معنی داری کاهش دهند (Garge & Nerurkar, ۲۰۱۶; Reina et al, ۲۰۱۹; Htwe Maung et al, ۲۰۲۲). در سال های اخیر، رویکردهای نوینی نیز برای خاموش سازی QS مورد توجه قرار گرفته اند؛ از جمله استفاده از نانوذرات حامل QSIs، مهارکننده های مبتنی بر RNA مانند siRNA برای سرکوب ژن های *expI* یا *expR* و

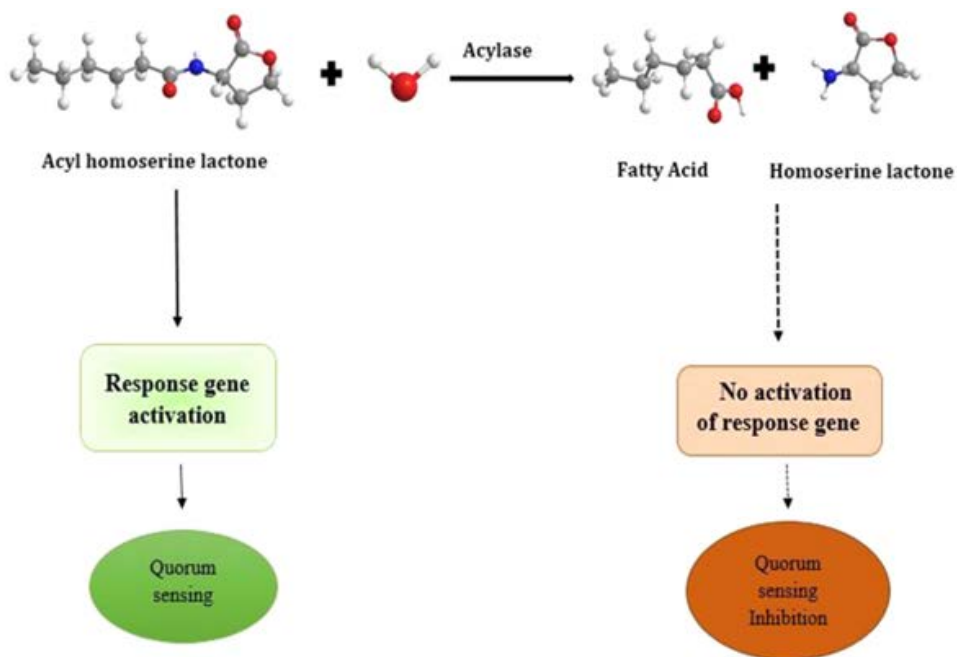
طراحی پپتیدهای مهارکننده بر اساس ساختار گیرنده ExpR. این راهبردها افق های جدیدی را برای توسعه روش های پایدار و هدفمند در کنترل بیماری های باکتریایی گیاهی فراهم کرده اند (Baltenneck et al; ۲۰۰۷, Faure & Dessaux, ۲۰۲۱). نمای کلی اهداف خاموش سازی QS در مسیرهای مختلف سیگنال دهی باکتریایی در شکل ۱۲ ارائه شده است.

### ۷. تعامل QS با کولوژی ریزوسفر و دفاع گیاهی

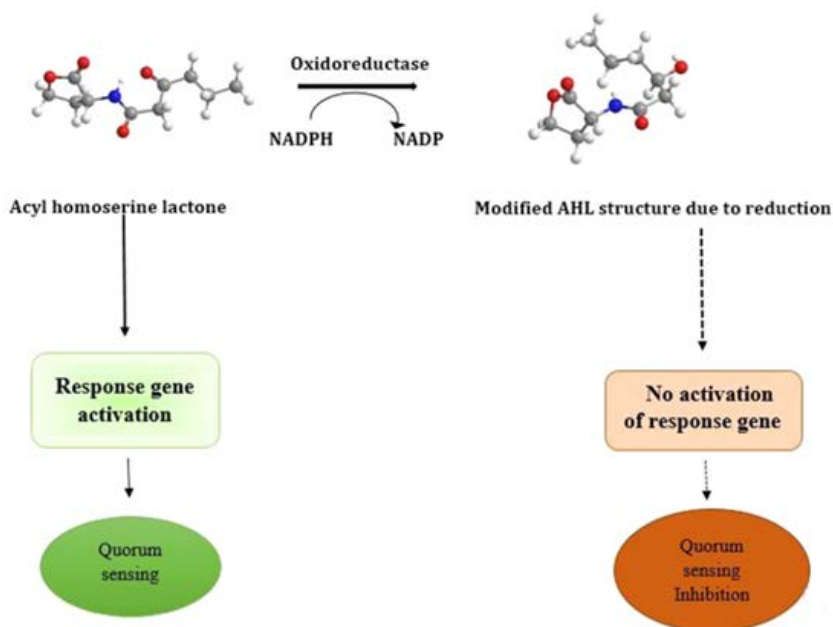
سیستم حد نصاب احساس (Quorum Sensing; QS) در *Pectobacterium* تنها به صورت مستقل عمل نمی کند، بلکه در بستر پویای ریزوسفر و در تعامل مستمر با سایر میکروارگانیسم ها و نیز سیگنال های مشتق از گیاه تنظیم می شود. در محیط ریزوسفر، رقابت و همزیستی میکروبی نقش مهمی در تعدیل فعالیت QS ایفا می کند. به عنوان نمونه، گیاهان در پاسخ به حمله



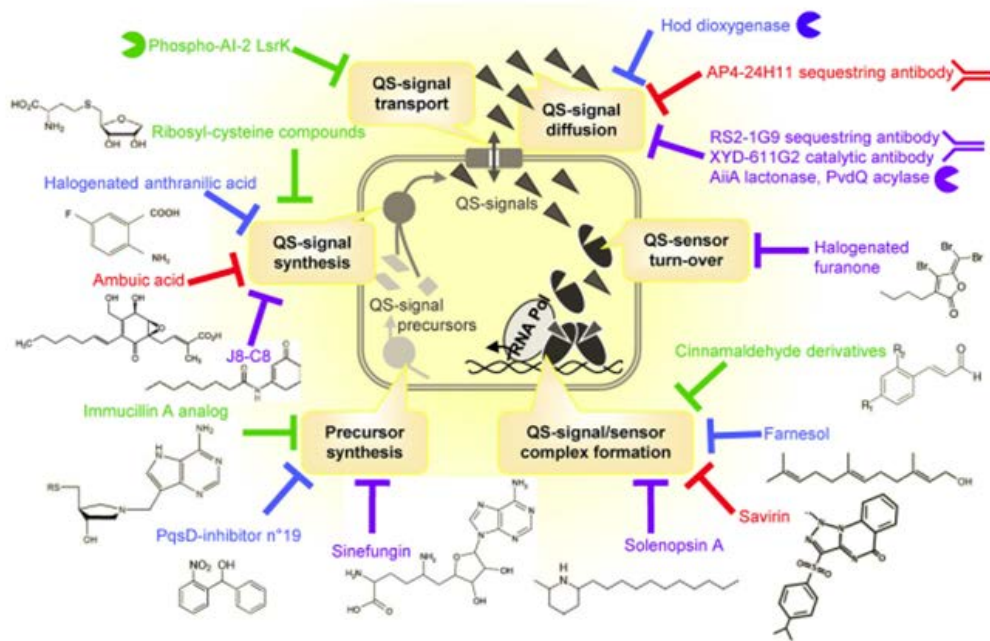
شکل ۹. تغییر ساختاری مولکول AHL در اثر فعالیت هیدرولازی آنزیم لاکتوناژ که منجر به غیرفعال سازی سیگنال دهی باکتریایی می شود (Vadakkan et al, ۲۰۱۸).



شکل ۱۰. تغییر ساختاری مولکول AHL در نتیجه فعالیت هیدرولازی آنزیم آسیلاز که در پی آن مدار Quorum Sensing مختل می‌گردد (Vadakkan et al, ۲۰۱۸).



شکل ۱۱. تغییر ساختاری AHL در اثر واکنش‌های احیایی انجام شده توسط آنزیم‌های اکسیدوردوکتاز که در نهایت منجر به خاموش‌سازی Quorum Sensing می‌شوند (Vadakkan et al, ۲۰۱۸).



شکل ۱۲. خاموش سازی (QS) در مسیرهای QS وابسته به AHL، ۲-AHL، PQS و AIP. مراحل مختلف QS که توسط عوامل هدف قرار می‌گیرند با کادراهی سیاه مشخص شده‌اند. در مورد هر یک از ترکیبات نشان داده شده شامل مهارکننده‌های QS، آنزیم‌ها و آنتی‌بادی‌ها، رنگ خطوط توقف بیانگر مسیر QS تحت تأثیر است: AHL (بنفش)، AIP (قرمز)، PQS (آبی) و AI-۲ (سبز) (Grandclément et al., ۲۰۱۶).

باکتریایی، پپتیدهای ضد میکروبی ترشح می‌کنند که قادرند بیان و فعالیت سیستم QS را تحت تأثیر قرار دهند (Rio-Alvarez et al., ۲۰۱۲). علاوه بر این، برخی باکتری‌های سودمند ریزوسفر نظیر *Pseudomonas fluorescens* از طریق تولید ترکیبات فزار، از جمله دی‌متیل دی‌سولفید (DMDS)، موجب سرکوب سیگنال دهی مبتنی بر AHL در بیمارگرها می‌شوند (Chernin et al., ۲۰۱۱). شواهد نشان می‌دهد که

گیاهان قادر به شناسایی مولکول‌های AHL ترشح شده توسط *Pectobacterium* بوده و در پاسخ به آن‌ها واکنش‌های دفاعی مناسبی را فعال می‌کنند. در این راستا، گزارش شده است که مولکول‌های HSL-OC۸ و HSL-OC۱۲ می‌توانند القای مقاومت سیستمیک (Induced Systemic Resistance; ISR) را در گیاهانی نظیر گوجه‌فرنگی و جو تقویت کنند (Schuhegger et al., ۲۰۰۶; Schenk et al., ۲۰۱۴). این نتایج بیانگر وجود یک تعامل دوطرفه و پیچیده میان سیستم QS باکتری و سازوکارهای دفاعی گیاه میزبان است.

#### ۸. چشم‌انداز آینده

سیستم QS در *Pectobacterium carotovorum* به‌عنوان یک تنظیم‌کننده مرکزی در القای



می‌دهد که این مسیر ممکن است در تعاملات این باکتری با جامعه میکروبی ریزوسفر دخیل باشد (Baltenneck et al., ۲۰۲۱). در نهایت، ترکیبات طبیعی مهارکننده QS نظیر راپونتی‌ژنین و سایر QSIs گیاهی، این پتانسیل را دارند که در آینده‌ای نزدیک به‌عنوان جایگزین‌های سبز و ایمن برای آنتی‌بیوتیک‌ها، به‌ویژه در مراحل پس از برداشت و ذخیره‌سازی محصولات سبزی و صیفی، مورد استفاده قرار گیرند.

#### ■ ۹. بحث

یافته‌ها و شواهد گردآوری شده در این مقاله به‌وضوح نشان می‌دهند که سیستم‌های Quorum Sensing (QS)، به‌ویژه مسیر مبتنی بر N-آسیل هموسرین لاکتون (AHL) از نوع ExpI/ExpR، نقشی محوری و غیرقابل جایگزین در تنظیم بیماری‌زایی باکتری *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (Pcc) ایفا می‌کنند. برخلاف دیدگاه‌های اولیه که QS را صرفاً یک سازوکار «تنظیم بیان ژن‌های پرازاری» تلقی می‌کردند، شواهد مولکولی و ژنومی نشان می‌دهد که این سیستم در Pcc به‌عنوان یک شبکه تنظیمی مرکزی عمل می‌کند که طیف وسیعی از فرآیندهای فیزیولوژیکی، متابولیکی و رفتاری را به‌صورت هماهنگ کنترل می‌نماید (Liu et al., ۲۰۰۸; Pöllumaa et al., ۲۰۱۲). یکی

بیماری‌زایی عمل می‌کند و فرآیندهایی نظیر ترشح آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی گیاه (PCWDEs)، تشکیل بیوفیلم، پاسخ به تنش‌های محیطی و تعامل با جامعه میکروبی پیرامون را به‌صورت هماهنگ کنترل می‌نماید. درک عمیق‌تر این شبکه تنظیمی پیچیده، نه تنها به گسترش دانش ما از مکانیسم‌های بیماری‌زایی گیاهی کمک می‌کند، بلکه زمینه را برای توسعه راهبردهای نوین، غیرسمی و پایدار در کنترل این بیمارگر مهم کشاورزی فراهم می‌سازد. از آنجا که سیستم QS به‌صورت یک شبکه چندلایه با سایر مسیرهای سیگنال‌دهی درهم‌تنیده است، می‌تواند به‌عنوان هدفی مناسب برای توسعه روش‌های مهار زیستی با حداقل اثرات جانبی مطرح شود. پژوهش‌های آینده می‌توانند بر محورهای نظیر استفاده از ابزارهای نوین ژنتیکی مانند CRISPRi برای سرکوب اختصاصی ژن‌های *expI/expR*، مدل‌سازی دینامیک سیستم QS در شرایط واقعی میزبان گیاهی، توسعه فرمولاسیون‌های پایدار از عوامل مختل‌کننده QS (QQ-agents) برای کاربردهای مزرعه‌ای و نیز رویکردهای ترکیبی شامل تلفیق QQ با باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPRs) یا القای مقاومت سیستمیک (ISR) متمرکز شوند. همچنین، اگرچه سیستم ۲-LuxS/AI در *Pectobacterium* نقش غالبی در بیماری‌زایی ندارد، شواهد نشان

از نکات کلیدی که از این مرور حاصل می‌شود، تفاوت‌های سیستم  $\text{ExpI/ExpR}$  در  $\text{Pcc}$  با مدل کلاسیک  $\text{LuxI/LuxR}$  در  $\text{Vibrio fischeri}$  است. در حالی که در مدل کلاسیک،  $\text{LuxR}$  در حضور  $\text{AHL}$  فعال می‌شود و رونویسی ژن‌های هدف را القا می‌کند، در  $\text{Pcc}$  تنظیم‌کننده  $\text{ExpR}$  در غیاب  $\text{AHL}$  نقش یک سرکوبگر فعال را ایفا می‌نماید و از طریق القای بیان  $\text{rsmA}$ ، ترجمه  $\text{mRNA}$  های کدکننده آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی گیاه (PCWDEs) را مهار می‌کند (Cui et al, 2005; Liu et al, 2008). این الگوی تنظیمی «معکوس» نشان‌دهنده سازگاری تکاملی  $\text{Pcc}$  با سبک زندگی نکروتروف و نیاز به کنترل بسیار دقیق زمان و شدت ترشح فاکتورهای بیماری‌زا است.

تعامل سیستم  $\text{QS}$  با محور تنظیمی  $\text{RsmA/RsmB}$  یکی از مهم‌ترین یافته‌های مفهومی در درک بیماری‌زایی  $\text{Pcc}$  محسوب می‌شود. مدار  $\text{QS-Rsm}$  یک حلقه بازخورد مثبت ایجاد می‌کند که در آن افزایش تراکم سلولی و تجمع  $\text{AHL}$  منجر به مهار  $\text{RsmA}$  و آزادسازی ترجمه ژن‌های پرآزاری می‌شود، در حالی که در تراکم‌های پایین سلولی، مهار پساترجمه‌ای مانع از تولید زود هنگام PCWDE ها می‌گردد (Chatterjee et al, 1995; Liu et al, 1998). چنین معماری تنظیمی تضمین می‌کند که تخریب گسترده بافت گیاهی تنها زمانی رخ دهد که جمعیت باکتریایی به حدی رسیده باشد

که بتواند بر دفاع‌های میزبان غلبه کند. از منظر اکولوژیکی داده‌ها نشان می‌دهند که  $\text{QS}$  در  $\text{Pcc}$  صرفاً یک ابزار درون‌گونه‌ای نیست، بلکه در تعامل با جامعه میکروبی ریزوسفر و سیگنال‌های گیاهی نیز معنا پیدا می‌کند. شواهدی مبنی بر شناسایی  $\text{AHL}$  ها توسط گیاهان و القای مقاومت سیستمیک (ISR) وجود دارد که نشان می‌دهد  $\text{QS}$  می‌تواند به‌طور غیرمستقیم پاسخ‌های دفاعی میزبان را نیز شکل دهد (Schenk et al, 2006; Schuegger et al, 2014). این تعامل دوطرفه، دیدگاه کلاسیک «بیمارگر-میزبان» را به یک چارچوب پیچیده‌تر «بیمارگر-میزبان-میکروبیوم» گسترش می‌دهد. در مقابل، نقش سیستم  $\text{LuxS/AI}$  در  $\text{Pcc}$  همچنان مبهم باقی مانده است. اگرچه ژن  $\text{luxS}$  در ژنوم بسیاری از سویه‌ها شناسایی شده، نبود گیرنده‌های اختصاصی  $\text{AI-2}$  و فقدان شواهد مستقیم از تنظیم ژن‌های پرآزاری توسط این مسیر، این فرضیه را تقویت می‌کند که  $\text{LuxS}$  در  $\text{Pcc}$  بیشتر یک مؤلفه متابولیکی وابسته به چرخه متیونین است تا یک سیستم  $\text{QS}$  تکامل یافته (Rezzonico & Duffy, 2008; Pöllumaa et al, 2012). این تمایز اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که همه سیستم‌های موسوم به  $\text{QS}$  الزاماً نقش عملکردی مشابهی در بیماری‌زایی ندارند. از منظر کاربردی، تمرکز بر خاموش‌سازی ( $\text{QS}$  (Quorum Quenching; QQ) به‌عنوان یک راهبرد جایگزین آنتی‌بیوتیک‌ها،



یکی از مهم‌ترین پیامدهای این شبکه تنظیمی پیچیده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مهار سیستم ExpI/ExpR، چه از طریق آنزیم‌های تجزیه‌کننده AHL و چه از طریق مهارکننده‌های گیرنده LuxR، می‌تواند بدون تأثیر بر رشد باکتری، شدت بیماری‌زایی را به‌طور چشمگیری کاهش دهد (Dong et al., 2011; Grandclément et al., 2016; Li et al., 2022). این ویژگی، QQ را به یک ابزار بالقوه کم‌فشار از نظر انتخاب تکاملی و سازگار با اصول کشاورزی پایدار تبدیل می‌کند. در مجموع، شواهد ارائه‌شده در این مقاله نشان می‌دهند که بیماری‌زایی *Pectobacterium carotovorum* حاصل عملکرد یک ژن یا یک مسیر منفرد نیست، بلکه نتیجه همگرایی چندین شبکه تنظیمی وابسته به QS، Rsm، سیستم‌های دو جزئی و سیگنال‌های محیطی است. درک این معماری چندلایه نه تنها برای تبیین موفقیت بوم‌شناختی این بیمارگر ضروری است، بلکه چارچوبی مفهومی برای طراحی راهبردهای نوین مهار زیستی فراهم می‌آورد که به‌جای حذف باکتری، رفتار جمعی آن را هدف قرار می‌دهند.

carotovorum است که از طریق ادغام با محور Rsm و سیستم‌های دو جزئی، رفتارهای اجتماعی، متابولیسم و پرازاری را به‌صورت هماهنگ کنترل می‌کند. نقش حاشیه‌ای LuxS/AI-2 در Pcc، اهمیت تمرکز راهبردهای کنترلی بر هسته AHL-محور را برجسته می‌سازد. بر این اساس، خاموش‌سازی QS—به‌جای حذف باکتری— رویکردی واقع‌بینانه، پایدار و آینده‌دار برای مدیریت پوسیدگی نرم است. مسیرهای پژوهشی آتی می‌توانند با بهره‌گیری از ابزارهای ژنتیکی دقیق مانند (CRISPRi)، مدل‌سازی دینامیک QS در شرایط واقعی میزبان و توسعه فرمولاسیون‌های پایدار QQ، این رویکرد را به کاربردهای عملی نزدیک‌تر کنند. در نهایت، هدف‌گیری «رفتار جمعی» به‌جای «حیات باکتری» می‌تواند پارادایم کنترل بیماری‌های باکتریایی گیاهی را به‌طور معناداری دگرگون سازد.

## ۱۰. نتیجه‌گیری

جمع‌بندی شواهد این مقاله نشان می‌دهد که QS مبتنی بر AHL و به‌ویژه مدار ExpI/ExpR، «کلید اصلی» تنظیم بیماری‌زایی در *Pectobacterium*

## منابع:

- Axelrod PE, Rella M, Schroth MN. (1988). Role of antibiosis in competition of *Erwinia* strains in potato infection courts. *Applied and Environmental Microbiology*, 1229-1222:(5)54.
- Baltenneck, J, Reverchon, S, Hommais, F. (2021). Quorum Sensing Regulation in Phytopathogenic Bacteria. *Microorganisms*, 9, 239. <https://doi.org/10.3390>.
- Barber, C.E.; Tang, J.L.; Feng, J.X.; Pan, M.Q.; Wilson, T.J.G.; Slater, H.; Dow, J.M.; Williams, P.; Daniels, M.J. (1997). A novel regulatory system required for pathogenicity of *Xanthomonas campestris* is mediated by a small diffusible signal molecule. *Mol. Microbiol.* 566–555, 24.
- Barnard, A.M.; Salmond, G.P. (2007). Quorum sensing in *Erwinia* species. *Anal. Bioanal. Chem.*, 387 423–415.
- Barı s, O. Erzurum İlindeki Ma ğaralarda Damlata sı Olu (2009). sumunda Etkili Bakterilerin İzolasyonu, Karakterizasyonu ve Tanısı. Doktora Tezi. Ph.D. Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- Bassler, B. L., & Losick, R. (2006). Bacterially Speaking. *Cell*, 246–237, (2)125.
- Castang, S.; Reverchon, S.; Gouet, P.; Nasser, W. (2006). Direct evidence for the modulation of the activity of the *Erwinia chrysanthemi* quorum-sensing regulator ExpR by acyl homoserine lactone pheromone. *J. Biol. Chem.* 29987–29972, 281.
- Garge, S.S.; Nerurkar, A.S. (2016). Attenuation of quorum sensing regulated virulence of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* through an AHL lactonase produced by *Lysinibacillus* sp. Gs50. *PLoS ONE* 11, 20, e0167344.
- Chatterjee, A., Cui, Y., Liu, Y., Dumenyo, C.K., Chatterjee, A.K. (1995). Inactivation of *rsmA* leads to overproduction of extracellular pectinases, cellulases, and proteases in *Erwinia carotovora* ssp. *carotovora* in the absence of the starvation/cell density sensing signal, N-(3-oxohexanoyl)-L-homoserine lactone. *Appl Environ Microbiol* 67–1959 :61.
- Chhabra, S.R.; Philipp, B.; Eberl, L.; Givskov, M.; Williams, P.; Cámara, M. (2004). Extracellular communication in bacteria. In *Topics in Current Chemistry*; Springer Nature: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 315–279.
- Chernin L, Toklikishvili N, Ovadis M, et al. (2011). Quorum-sensing quenching by rhizobacterial volatiles. *Environ Microbiol Rep*; 704–3:698.
- Coulthurst, S.J.; Kurz, C.L.; Salmond, G.P. (2004). *luxS* mutants of *Serratia* defective in autoinducer-2-dependent 'quorum sensing' show strain-dependent impacts on virulence and production of carbapenem and prodigiosin. *Microbiology*. 910–901, 150.
- Cui Y, Chatterjee A, Hasegawa H, Dixit V, Leigh N, Chatterjee AK. (2005). ExpR, a LuxR homolog of *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*, activates transcription of *rsmA*, which specifies a global



- regulatory RNA-binding protein. *Journal of Bacteriology*. 4803 -4792:(14)187;2005.
- Cui, Y., Madi, L., Mukherjee, A., Dumenyo, C.K., Chatterjee, A.K. (1996). The RsmA-mutants of *Erwinia carotovora* ssp. *carotovora* strain Ecc71 overexpress hrpNECC and elicit a hypersensitive reaction-like response in tobacco leaves. *Mol Plant-Microbe Interact* 573–565:9.
- Dong Y, Wang L, Xu J, Zhang H, Zhang X, Zhang L. (2001). Quenching quorum sensing-dependent bacterial infection by an N-acyl homoserine lactonase. *Nature* 7–411:813.
- Dong, J.; Zhang, L.; Liu, Y.; Zhou, S.; Yang, Y.; Xu, N.; Yang, Q.; Ai, X. (2021). Resveratrol influences the pathogenesis of *Aeromonas hydrophila* by inhibiting production of aerolysin and biofilm. *Food Control*.108083,126.
- Engbrecht, J.; Silverman, M. (1984). Identification of genes and gene products necessary for bacterial bioluminescence. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 4158–4154,81.
- Egland K, Greenberg EP. (1999). Quorum sensing in *Vibrio fischeri*: elements of the luxI promoter. *Mol Microbiol*:204–1197.<https://doi.org/10.1046/j.2958.1999.01261-1365.x>
- Fan, J.; Ma, L.; Zhao, C.; Yan, J.; Che, S.; Zhou, Z.; Wang, H.; Yang, L.; Hu, B. (2020). Transcriptome of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* PccS1 infected in calla plants in vivo highlights a spatiotemporal expression pattern of genes related to virulence, adaptation, and host response. *Mol. Plant Pathol*.891–871,21.
- Fure and Dessaux, 2007; Faure D, Dessaux Y. (2007). Quorum sensing as a target for developing control strategies for the plant pathogen *Pectobacterium*. *Eur J Plant Pathol*. 65–119:353.
- Gardan, L.; Gouy, C.; Christen, R.; Samson, R. (2003). Elevation of three subspecies of *Pectobacterium carotovorum* to species level: *Pectobacterium atrosepticum* sp. nov., *Pectobacterium betavasculorum* sp. nov. and *Pectobacterium wasabiae* sp. nov. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol*. 391–381,53.
- Glasner JD, Marquez-Villavicencio M, Kim HS et al., (2008). Niche specificity and the variable fraction of the *Pectobacterium* pangenome. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 60–1549,21.
- Grandclément, C., Tannières, M., Moréra, S., Dessaux, Y., & Faure, D. (2016). Quorum quenching: Role in nature and applied developments. *FEMS Microbiology Reviews*, 116–86,(1)40. doi: 10.1093/femsre/fuv038.
- Gray, K.M.; Passador, L.; Iglewski, B.H.; Greenberg, E.P. (1994). Interchangeability and specificity of components from the quorum-sensing regulatory systems of *Vibrio fischeri* and *Pseudomonas aeruginosa*. *J. Bacteriol*.3080–3076,176.
- Hanzelka, B.L.; Stevens, A.M.; Parsek, M.R.; Crone, T.J.; Greenberg, E.P. (1997). Mutational analysis of the *Vibrio fischeri* LuxI polypeptide: Critical regions of an autoinducer synthase. *J. Bacteriol*.4887–4882,179.
- Htwe Maung, C.E.; Choub, V.; Cho, J.Y.; Kim, K.Y. (2022). Control of the bacterial soft rot pathogen, *Pectobacterium carotovorum* by *Bacillus velezensis* CE 100 in cucumber. *Microb. Pathog*.105807,173.
- Huang J, Shi Y, Zeng G, Gu Y, Chen G. (2016). Acyl-homoserine lactone based quorum sensing and

- quorum quenching hold promise to determine the performance of biological wastewater treatments: An overview. *Chemosphere* 151-137 :157. DOI: 10.1016/j.chemosphere.05.032.
- Jones, S.; Yu, B.; Bainton, N.; Birdsall, M.; Bycroft, B.; Chhabra, S.; Cox, A.; Golby, P.; Reeves, P.; Stephens, S. (1993). The lux autoinducer regulates the production of exoenzyme virulence determinants in *Erwinia carotovora* and *Pseudomonas aeruginosa*. *EMBO J.*, 2482-2477, 12.
- Kim JH, Choi DC, Yeon KM, et al. (2011). Enzyme-immobilized nanofiltration membrane to mitigate biofouling based on quorum quenching. *Environ Sci Technol.* 7-45:1601.
- Kuo, A.; Blough, N.V.; Dunlap, P.V. (1994). Multiple N-acyl-L-homoserine lactone autoinducers of luminescence in the marine symbiotic bacterium *Vibrio fischeri*. *J. Bacteriol.* 7565-176,7558.
- Lee J, Zhang L. (2015). The hierarchy quorum sensing network in *Pseudomonas aeruginosa*. *Protein Cell* 41-26, 6. <https://doi.org/10.1007/s0100-014-13238-x>.
- Li, B.; Huang, J.; Yi, Y.; Liu, S.; Liu, R.; Xiao, Z.; Li, C. (2022). Effects of rhapontigenin as a novel quorum-sensing inhibitor on exoenzymes and biofilm formation of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* and its application in vegetables. *Molecules.* 8878, 27.
- Li, L.; Yuan, L.; Shi, Y.; Xie, X.; Chai, A.; Wang, Q.; Li, B. (2019). Comparative genomic analysis of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *brasiliense* SX309 provides novel insights into its genetic and phenotypic features. *BMC Genom.* 486, 20.
- Li XY, Ma YL, Liang SQ, Tian Y, Yin SJ, Xie SS, et al. (2018). Comparative genomics of 84 *Pectobacterium* genomes reveals the variations related to a pathogenic lifestyle. *BMC Genomics.* 19:889.
- Liu, H.; Coulthurst, S.J.; Salmond, G.P.C.; Toth, I.K.; Pritchard, L.; Hedley, P.E.; Ravensdale, M.; Humphris, S.; Burr, T.; Takle, G.; et al. (2008). Quorum sensing coordinates brute force and stealth modes of infection in the plant pathogen *Pectobacterium atrosepticum*. *PLoS Pathog.* 4, e1000093.
- Liu Y, Cui Y, Mukherjee A, Chatterjee. Arun K. (1998). Characterization of a novel RNA regulator of *Erwinia carotovora* ssp. *carotovora* that controls production of extracellular enzymes and secondary metabolites. <https://doi.org/10.1046/j.2958.1998.00924-1365.x>
- Ma, B., Hibbing, M. E., Kim, H.-S., Reedy, R. M., (2007). Yedidia, I., Breuer, J., Breuer, J., Glasner, J. D., Perna, N. T., Kelman, A., and Charkowski, A.O. The host range and molecular phylogenies of the soft rot enterobacterial genera *Pectobacterium* and *Dickeya*. *Phytopathology.* 1163-97:1150.
- Mallick, T.; Mishra, R.; Mohanty, S.; Joshi, R.K. (2022). Genome wide analysis of the potato soft rot pathogen *Pectobacterium carotovorum* strain ICMP 5702 to predict novel insights into its genetic features. *Plant Pathol. J.* 114-102, 38.
- Malott RJ, O'Grady EP, Toller J, Inhulsen S, Eberl L, Sokol PA (2009). A Burkholderia cenocepacia orphan LuxR homolog is involved in quorum-sensing regulation. *J Bacteriol.* 10.1128.2460-2447:(8) 191/JB.-01746 08.
- Marquez-villavicencio MP, Weber B, Witherell RA, Willis DK, Amy O. (2011). The 3-Hydroxy-2-butanone



pathway is required for *Pectobacterium carotovorum* pathogenesis. PLoS One (8) 6. DOI: 10.1371/journal.pone.0022974.

McGowan, S.; Sebahia, M.; Jones, S.; Yu, B.; Bainton, N.; Chan, P.F.; Bycroft, B.; Stewart, G.; Williams, P.; Salmond, G.P.C. (1995). Carbapenem antibiotic production in *Erwinia carotovora* is regulated by CarR, a homologue of the LuxR transcriptional activator. *Microbiology*.550–541,141.

Minogue, T.D.; Wehland-von Trebra, M.; Bernhard, F.; von Bodman, S.B. (2002). The autoregulatory role of EsaR, a quorum-sensing regulator in *Pantoea stewartii* ssp. *stewartii*: Evidence for a repressor function. *Mol. Microbiol.*1635–1625,44.

Moré, M.I.; Finger, L.D.; Stryker, J.L.; Fuqua, C.; Eberhard, A.; Winans, S.C. (1996). Enzymatic synthesis of a quorum-sensing autoinducer through use of defined substrates. *Science*. 1658–1655,272.

Mukherjee, A., Cui, Y., Ma, W., Liu, Y., Ishihama, A., Eisenstark, A., et al (1998). RpoS (sigma-S) controls the expression of *rsmA*, a global regulator of secondary metabolites, Harpin and extracellular proteins in *Erwinia carotovora*. *J Bacteriol* (in press).

Nealson, K.H.; Platt, T.; Hastings, J.W. (1970). Cellular control of the synthesis and activity of the bacterial luminescent system. *J. Bacteriol.* 322–313,104.

Nealson, K.H.; Hastings, J.W. (1979). Bacterial bioluminescence: Its control and ecological significance. *Microbiol. Rev.*20.518–496,43. de Kievit, T.R.; Iglewski, B.H. *Bacterial*.

Nuss AM, Schuster F, Kathrin Heroven A, Heine W, Pisano F, Dersch P. (2014). A direct link between the global regulator PhoP and the Csr regulon in *Y. pseudotuberculosis* through the small regulatory RNA CsrC. *RNA Biol.*93–580:(5)11.

Oulghazi, S.; Ed-Dra, A.; Ali, F.; Sarfraz, S. (2025). *Pectobacterium*. In *Compendium of Phytopathogenic Microbes in Agro Ecology*; Amaresan, N., Kumar, K., Eds.; Springer: Cham, Switzerland. pp. 114–93.

Parsek, M.R.; Schaefer, A.L.; Greenberg, E.P. (1997). Analysis of random and site-directed mutations in *rhlII*, a *Pseudomonas aeruginosa* gene encoding an acyl homoserine lactone synthase. *Mol. Microbiol.*,310–301,26.

Parsek, M.R.; Val, D.L.; Hanzelka, B.L.; Cronan, J.E. (1999). Greenberg, E.P. Acyl homoserine-lactone quorum-sensing signal generation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 4365–4360,96.

Perfileva, A. I., Strekalovskaya, E. I., Klushina, N. V., Gorbenko, I. V., & Krutovsky, K. V. (2025). The causative agent of soft rot in plants, the phytopathogenic bacterium *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*. *Agronomy*, 1578,(7)15.

Pesci EC, Pearson JP, Seed PC, Iglewski BH. (1997). Regulation of *las* and *rhl* quorum sensing in *Pseudomonas aeruginosa*. *J Bacteriol.*32–3127:(10)179.

Pirhonen M, Flego D, Heikinheimo R, Palva ET. (1993). A small diffusible signal molecule is responsible for the global control of virulence and exoenzyme production in the plant pathogen *Erwinia carotovora*. *The EMBO Journal.*2467:(6)12.

- Pöllumaa, L.; Alamäe, T.; Mäe, A. (2012). Quorum sensing and expression of virulence in Pectobacteria. *Sensors*. 3349–3327, 12.
- Portier, P.; Pedron, J.; Taghouti, G.; Fischer-Le Saux, M.; Caullireau, E.; Bertrand, C.; Laurent, A.; Chawki, K.; Oulgazi, S.; Moumni, M. (2019). Elevation of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *odoriferum* to species level as *Pectobacterium odoriferum* sp. Nov. proposal of *Pectobacterium brasiliense* sp. nov. and *Pectobacterium actinidiae* sp. Nov. emended description of *Pectobacterium carotovorum* and description of *Pectobacterium versatile* sp. Nov. isolated from streams and symptoms on diverse plants. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 3216–3207, 69.
- Portier, P.; Pedron, J.; Taghouti, G.; Dutrieux, C.; Barny, M.-A. (2020). Updated Taxonomy of *Pectobacterium* Genus in the CIRM-CFBP Bacterial Collection: When Newly Described Species Reveal “Old” Endemic Population. *Microorganisms*. 1441, 8
- Qin, Y.; Luo, Z.Q.; Smyth, A.J.; Gao, P.; von Bodman, S.; Farrand, S.K. (2000). Quorum-sensing signal binding results in dimerization of TraR and its release from membranes into the cytoplasm. *EMBO J.* 5221–5212, 19.
- Rai N, Rai R, Venkatesh KV. (2015). Quorum sensing biosensors. In: Kalia VC (ed). *Quorum Sensing vs Quorum quenching: a Battle with No End in Sight*. India: Springer, 83–173.
- Reina, J.C.; Torres, M.; Llamas, I. (2019). *Stenotrophomonas maltophilia* AHL-degrading strains isolated from marine invertebrate microbiota attenuate the virulence of *Pectobacterium carotovorum* and *Vibrio coralliilyticus*. *Mar. Biotechnol.* 290–276, 21.
- Rezzonico & Duffy, 2008; Rezzonico F, Duffy B. (2008). Lack of genomic evidence of AI-2 receptors suggests a non-quorum sensing role for luxS in most bacteria. *BMC Microbiology*. 154:(1)8.
- Rezzonico, F.; Duffy, B. (2007). The role of LuxS in the fire blight pathogen *Erwinia amylovora* is limited to metabolism and does not involve quorum sensing. *Mol. Plant-Microbe Interactions*. 1297–1284, 20.
- Rio-Alvarez, I.; Rodríguez-Herva, J.J.; Cuartas-Lanza, R.; Toth, I.; Pritchard, L.; Rodríguez-Palenzuela, P.; López-Solanilla, E. (2012). Genome-wide analysis of the response of *Dickeya dadantii* 3937 to plant antimicrobial peptides. *Mol. Plant Microbe Interact.* 533–523, 25.
- Romeo T., Vakulskas C. A., Babitzke P. (2013). Post-transcriptional regulation on a global scale: Form and function of Csr/Rsm systems. *Environ. Microbiol.* 324–313, 15. doi: 10.1111/j.2920.2012.02794-1462. x.
- Ryskaliyeva, B.Z.; Vasilyev, D.A.; Feoktistova, N.A.; Lyashenko, E.A. (2020). Development and testing of the bacteriological scheme of identification of bacteria *Pectobacterium carotovorum*. *Taurida Herald Agrar. Sci.* 142–134, 2.
- Ryskaliyeva, B.Z.; Feoktistova, N.A.; Vasiliev, D.A. (2017). Studying of biological properties of the bacterium of the type of *Pectobacterium carotovorum*. *Universum Chem. Biol.* 20–18, 7. Available online.
- Schenk ST, Hernandez-Reyes C, Samans B, et al. (2014). N-AcylHomoserine lactone primes plants for cell wall reinforcement and induces resistance to bacterial pathogens via the salicylic acid/oxylinpin



- pathway. *Plant Cell*. 23–26:2708.
- Schuhegger R, Ihring A, Gantner S, et al. (2006). Induction of systemic resistance in tomato by N-acyl-L-homoserine lactone-producing rhizosphere bacteria. *Plant Cell Environ*. 18–29:909.
- Sibanda S, Theron J, Shyntum DY, Moleleki LN, Coutinho TA (2016). Characterization of two LuxI/R homologs in *Pantoea ananatis* LMG 2665T. *Canadian Journal of Microbiology*. 903–893:(11)62.
- Sjöblom S, Brader G, Koch G, Palva ET. (2006). Cooperation of two distinct ExpR regulators controls quorum sensing specificity and virulence in the plant pathogen *Erwinia carotovora*. *Molecular Microbiology*. 1489–1474:(6)60.
- Sharma, S., Kumar, S., Kumar, P., & Tripathi, V. N. (2024). Quorum sensing in Gram-negative pathogens, a fresh look. *The Microbe*, 100108, 4.
- Toth IK, Bell KS, Holeva MC, Birch PR. (2003). Soft rot erwiniae: From genes to genomes. *Molecular Plant Pathology*. 30–17:(1)4.
- Urbanowski, M.L.; Lostroh, C.P.; Greenberg, E.P. (2004). Reversible acyl-homoserine lactone binding to purified *Vibrio fischeri* LuxR protein. *J. Bacteriol* 637–631, 186.
- Uroz, S., Chhabra, S. R., Camara, M., Williams, P., Oger, P., and Dessaux, Y. (2005). N-Acylhomoserine lactone quorum-sensing molecules are modified and degraded by *Rhodococcus erythropolis* w2 by both amidolytic and novel oxidoreductase activities. *Microbiology* 3322–3313, 151. doi: 10.1099/mic.00-27961.
- Uroz S, Oger PM, Chapelle E, et al. (2008). A *Rhodococcus* qsdA-encoded enzyme defines a novel class of large-spectrum quorum quenching lactonases. *Appl Environ Microb* 66–74:1357.
- Uroz S, Dessaux Y, Oger P. (2009). Quorum sensing and quorum quenching: the yin and yang of bacterial communication. *Chembiochem*. 16–10:205.
- Vadakkan, K., Choudhury, A. A., Gunasekaran, R., Hemapriya, J., & Vijayanand, S. (2018). Quorum sensing intervened bacterial signaling: pursuit of its cognizance and repression. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 252–239, (2)16.
- Valente, R. S., Nadal-Jimenez, P., Carvalho, A. F., Vieira, F. J., & Xavier, K. B. (2017). Signal integration in quorum sensing enables cross-species induction of virulence in *Pectobacterium wasabiae*. *MBio*, 1128–10, (3)8.
- Vakulskas CA, Potts AH, Babitzke P, Ahmer BMM, Romeo T. (2015). Regulation of bacterial virulence by Csr (Rsm) systems. *Microbiol Mol Biol Rev* 224–79:193. <https://doi.org/10.1128/MMBR.14-00052>.
- Van Gijsegem, F.; Toth, I.K.; van der Wolf, J.M. (2021). Soft rot Pectobacteriaceae: A brief overview. In *Plant Diseases Caused by Dickeya and Pectobacterium Species*; Van Gijsegem, F., van der Wolf, J.M., Toth, I.K., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp.11–1.
- Vannini, A.; Volpari, C.; Di Marco, S. (2004). Crystal structure of the quorum-sensing protein TraM and its interaction with the transcriptional regulator TraR. *J. Biol. Chem*. 24296–24291, 279.

- Von Bodman, S.B.; Majerczak, D.R.; Coplin, D.L. (1998). A negative regulator mediates quorum-sensing control of exopolysaccharide production in *Pantoea stewartii* subsp. *stewartii*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 7692–7687, 95.
- Von Bodman, S.B.; Ball, J.K.; Faini, M.A.; Herrera, C.M.; Minogue, T.D.; Urbanowski, M.L.; Stevens, A.M. (2003). The quorum sensing negative regulators EsaR and ExpREcc, homologues within the LuxR family, retain the ability to function as activators of transcription. *J. Bacteriol.* 7007–7001, 185.
- Welch, M.; Todd, D.E.; Whitehead, N.A.; McGowan, S.J.; Bycroft, B.W.; Salmond, G.P. (2000). N-acyl homoserine lactone binding to the CarR receptor determines quorum-sensing specificity in *Erwinia*. *EMBO J.* 641–631, 15.
- Whitehead, N.A.; Barnard, A.M.L.; Slater, H.; Simpson, N.J.L.; Salmond, G.P.C. (2001). Quorum-sensing in gram-negative bacteria. *FEMS Microbiol Rev.* 404–25:365.
- Williams, P. (2007). Quorum sensing, communication and cross-kingdom signaling in the bacterial world. *Microbiology.* 3938–153, 3923.
- Xavier, K.B., and Bassler, B.L. (2005). Interference with AI-2-mediated bacterial cell-cell communication. *Nature* 753–750, 437.
- Zhang W, Fan X, Li J, Ye T, Mishra S, Zhang L and Chen S (2021). Exploration of the Quorum Quenching Mechanism in *Pseudomonas nitroreducens* W-7 and Its Potential to Attenuate the Virulence of *Dickeya zeae* EC1. *Front. Microbiol.* 12:694161. doi: 10.3389/fmicb.2021.694161
- Zhang HB, Wang LH, Zhang LH. (2002). Genetic control of quorum sensing signal turnover in *Agrobacterium tumefaciens*. *P Natl Acad Sci USA.* 43–99:4638
- Zhang, Y.; Fan, Q.; Loria, R. A. (2016). re-evaluation of the taxonomy of phytopathogenic genera *Dickeya* and *Pectobacterium* using whole-genome sequencing data. *Syst. Appl. Microbiol.* 259–252, 39.
- Zhu, J.; Winanas, S.C. (2001). The quorum-sensing transcriptional regulator TraR requires its cognate signaling ligand for protein folding, protease resistance, and dimerization. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1512–1507, 98.



## The role of Quorum Sensing systems in the pathogenicity of *Pectobacterium carotovorum*

### Abstract

Quorum Sensing (QS) systems are among the most important regulatory mechanisms in Gram-negative bacteria, enabling intra-population chemical communication and the coordinated control of cell density-dependent behaviors. Among these bacteria, *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (Pcc) is recognized as one of the principal causal agents of soft rot disease in cultivated crops. The QS network in this bacterium operates based on N-acyl homoserine lactone (AHL) signal molecules and is regulated through the *ExpI/ExpR* pathway. This system plays a key role in disease development by controlling the expression of a set of virulence genes, including plant cell wall-degrading enzymes (PCWDEs), bacterial motility, and the secretion of pathogenicity factors. In recent years, Quorum Quenching (QQ) strategies have been developed to inhibit QS activity through AHL-degrading enzymes or LuxR receptor inhibitors, which can reduce pathogenicity without imposing the selective pressure associated with antibiotics. This article provides a comprehensive review of the molecular, genetic, and biochemical findings of the past two decades, examining the structure and function of QS and QQ networks in Pcc, and analyzing the relationship between these two pathways while discussing the challenges and practical prospects of biological control based on the disruption of bacterial communication.

**Keywords:** Quorum Sensing; Quorum Quenching; *Pectobacterium carotovorum*; *ExpI/ExpR*; AHLs;



# مدیریت پایدار مگس های میوه

(Diptera : Tephritidae)

◀ | مانی جباری \*

گروه گیاه پزشکی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران

mani.jabbari.mp@gmail.com

◀ | میترا جباری

گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

دریافت: ۱۲ بهمن ۱۴۰۴ ■ بازنگری: ۲۹ بهمن ۱۴۰۴ ■ پذیرش: ۳۰ بهمن ۱۴۰۴ ■ انتشار آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

<https://doi.org/10.22059/giahpzshsj.2026.410364.1051>





## چکیده

مگس‌های میوه، به بسیاری از محصولات باغی (میوه‌ها و سبزیجات) آسیب اقتصادی شدیدی وارد می‌کنند. خسارات آن‌ها شامل پوسیدگی، رسیدن زودرس و ریزش میوه است که منجر به زیان‌های قابل توجه تولید، کاهش درآمد، افزایش فقر، کاهش حجم تجارت محصولات و ممنوعیت یا محدودیت صادرات محصولات باغی از کشورهای در حال توسعه و ... می‌گردد. میوه‌ها و سبزیجات، بخش‌های ضروری یک رژیم غذایی مغذی و متعادل برای انسان‌ها هستند که تحت تأثیر تورم مداوم هزینه‌های غذایی و شرایط آب و هوایی قرار دارند. با وجود پیشرفت در مدیریت و مهار آفات، مگس میوه، همچنان مشکل‌ساز هستند؛ بنابراین، برای کاهش جمعیت آفات، افزایش تجارت و درآمد، بهبود معیشت مردم در بخش باغبانی و تثبیت بازارها برای فروشندگان و مصرف‌کنندگان، یک رویکرد هماهنگ در سراسر کشور و سرمایه‌گذاری در تأسیسات پس از برداشت مورد نیاز است.

کلمات کلیدی: باغبانی، پایش، صادرکنندگان، مهار آفات.

## مقدمه

تولید محصولات باغی با ارزش (میوه و سبزیجات) فرصت‌های بسیار خوبی برای اشتغال، درآمد و رشد اقتصادی فراهم می‌کند (Van Asselt et al., 2018) و به امنیت غذایی و تغذیه کمک می‌کند (Egyir et al., 2022) و اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی مثبتی بر کشورهای صادرکننده دارد (Van den Broeck and Maertens, 2016). بخش باغبانی، به دلیل استفاده فشرده از نیروی کار بامهارت کم در تولید و فعالیت‌های پس از برداشت و ارزش ذاتی بالای محصول، پتانسیل بالایی برای کاهش فقر دارد (Aksoy and Beghin, 2005).

مگس‌های میوه، تقریباً هر محصول باغی را که از نظر اقتصادی اهمیت دارد، نابود می‌کنند. علائم اصلی مرتبط با آسیب، پوسیدگی میوه‌ها است که رخ می‌دهد و در هنگام تخم‌گذاری، موجب زردی زودرس و ریزش میوه‌های آلوده می‌گردد (Huang et al., 2014). بیشتر مگس‌های میوه به جنس‌های *Bactrocera*، *Ceratitis*، *Dacus* و *Zeugodacus* تعلق دارند (White and Goodger, 2009). نمونه‌هایی از مخرب‌ترین گونه‌ها، شامل مگس میوه شرقی (*Bactrocera dorsalis*)، مگس میوه انبه (*Ceratitis cosyra*)، مگس میوه مدیترانه‌ای (*Ceratitis*

عملکرد داشته باشند (Vayssieres et al, ۲۰۰۹). چنین اتفاقاتی در بخش باغبانی به طور جدی معیشت، امنیت غذایی، تغذیه و درآمد میلیون ها نفر را تهدید می کند (Badii et al, ۲۰۱۵).  
 Zeugodacus) و مگس میوه خربزه (capitata cucurbitae) است (شکل ۱) (Badii et al, ۲۰۱۵). تخمین زده می شود که اگر مگس میوه، به اندازه کافی مدیریت نشوند، بسته به محصول، رقم، محل و فصل می توانند بین ۳۰ تا ۹۵ درصد کاهش



شکل ۱- نمونه های از مخرب ترین گونه های مگس میوه



(Plá et al, ۲۰۲۱).

تحقیقات نشان داده است که بدون مدیریت، *Bactrocera dorsalis* می‌تواند برای صنعت مرکبات در چین ۲۵ میلیارد دلار هزینه داشته باشد (Ullah et al, ۲۰۲۳). به‌طور مشابه، ضرر و زیان مربوط به *Bactrocera zonata* در صنعت هلو در چین ۳/۰۷-۰/۸۲ میلیارد دلار برآورد شده است (Qin et al, ۲۰۲۱). در فلوریدا، تلفات مستقیم ناشی از پروتکل قرنطینه ناشی از حمله *B. dorsalis* در سال ۲۰۱۵ بین ۴ تا ۲۳ میلیون دلار برآورد شد (Alvarez et al, ۲۰۱۶).

در جایی که از تکنیک حشره نر عقیم<sup>۱</sup> (SIT) برای مدیریت مگس میوه استفاده می‌شود، تخمین زده می‌شود که هزینه سالانه محیط تغذیه لارو برای تولید هفتگی ۱۸۰ میلیون حشره نر عقیم *C. capitata* و *B. dorsalis* به ترتیب ۱/۳ و ۴/۲۳ میلیون دلار است (USDA-APHIS; So, ۲۰۲۱). سایر تلفات غیرمستقیم، ناشی از مگس میوه شامل هزینه بالای برنامه‌های بررسی و پایش، مهار و ریشه‌کنی است (Ekesi and Billah, ۲۰۰۶). مطالعات نشان داده‌اند که به‌ندرت بیش از ۱ درصد انبه تولیدشده در کشور مالی، به دلیل آلودگی به مگس میوه صادر می‌شود (Vayssieres et al, ۲۰۰۷). تولیدکنندگان در تلاش برای برآوردن نیازهای کشورهای واردکننده، اقدام به تیمارهای

۱. Sterile Insect Technique (SIT)

مگس میوه، از اهمیت قرنطینه‌ای برخوردار است. هنگامی که این آفات در یک کشور وجود دارند، به دلیل محدودیت‌های قرنطینه‌ای سخت (کشورهای واردکننده) به‌عنوان یک مانع مهم برای صادرات محصولات باغی عمل می‌کنند. کشورهای در حال توسعه، اغلب نمی‌توانند این الزامات را برآورده کنند و در نهایت به مانعی برای تجارت تبدیل می‌شوند، محدودیت‌های قرنطینه، اغلب بر حجم تجارت محصولات باغبانی تأثیر منفی می‌گذارد.

## ■ خسارات اقتصادی

بسیاری از کشورها، به دلیل هجوم مگس میوه درآمد خود را از دست می‌دهند، دو کشور کنیا و موزامبیک، به ترتیب ۱/۹ و ۱۷۵/۵ میلیون دلار درآمد از دست دادند که دلیل آن محدودیت قرنطینه *Bactrocera dorsalis* توسط آفریقای جنوبی است (Cugala et al, ۲۰۱۲; José et al, ۲۰۱۳). همچنین در سال ۲۰۰۵، اوگاندا کاهش ۳۷ درصدی در صادرات میوه را به دلیل آلودگی مگس میوه ثبت کرد (Isabirye et al, ۲۰۱۶). خسارات اقتصادی ناشی از مگس میوه بیش از ۲ میلیارد دلار در سراسر آفریقا تخمین زده می‌شود (Niassy et al, ۲۰۲۰). خسارات واردشده به دلیل ممنوعیت واردات کلمانتین اسپانیایی توسط ایالات متحده پس از رهگیری مگس میوه (*Ceratitis capitata*) ۳۰۰ میلیون یورو برآورد شد

تولیدکنندگان میوه و سبزیجات، روش‌های مقرون به صرفه‌ای برای کاهش تلفات و درعین حال رعایت استانداردهای کیفیت ارائه می‌کند. به‌عنوان مثال می‌توان به مهار باغی و زراعی، ضد عفونی خاک، روش‌های جلب و نابودی (MAT<sup>۵</sup>)، کاربرد طعمه مسموم (BAT<sup>۶</sup>) و استفاده از عوامل زیستی و آفت‌کش‌ها اشاره کرد (Rwomushana, ۲۰۰۸).

#### ■ مهار باغی و زراعی

مهار باغی و زراعی (مانند بهداشت باغ، جمع‌آوری و تخریب میوه‌های افتاده و/یا آلوده، برداشت به‌موقع بسته به نوع میوه و بسته‌بندی میوه‌ها) به مهار و سرکوب جمعیت مگس‌های میوه کمک می‌کند (Rwomushana, ۲۰۰۸; USDA-APHIS, ۲۰۰۸). بهداشت باغ از رشد لارو مگس‌های میوه (Vargas et al, ۲۰۰۸). با این حال، برخی از تولیدکنندگان (مخصوصاً غیر صادرکنندگان) اغلب به دلیل نیازهای نیروی کار و هزینه مدیریت آن تمایلی به اتخاذ این استراتژی ندارند (Wangithi et al, ۲۰۲۱). علیرغم ماهیت پرزحمت بهداشت باغ، این یک روش بسیار مؤثر برای سرکوب مگس‌های میوه و یک جزء کلیدی مدیریت یکپارچه آفات

5. Male Annihilation Technique

6. Bait Application Technique

گیاهی گران قیمت می‌کنند (White and Elson-Harris, ۱۹۹۲). هزینه مدیریت مگس میوه، در غنابین ۶۸۸-۹۱۵/۲ دلار در هر هکتار در سال است (Banson and Egyir-Yawson, ۲۰۱۴). در مقایسه، سود بازگشتی ۹۳ دلار برای هر ۱ دلار سرمایه‌گذاری در مدیریت مگس میوه گزارش شده است (Agboka et al, ۲۰۲۴). همچنین مصرف میوه‌های آلوده باعث ایجاد آنتریت اپیزودیک<sup>۲</sup> در انسان می‌شود که منجر به دردهای شکمی و اسهال می‌گردد. این امر پس از مصرف میوه آلوده از گواوا توسط بیماران مبتلا آشکار و لارو B.dorsalis در مدفوع بیماران مبتلا مشاهده شد (Weng et al, ۲۰۰۴).

#### ■ مدیریت مگس‌های میوه

#### ■ اقدامات بهداشتی گیاهی

استانداردهای بین‌المللی اقدامات بهداشتی گیاهی و کنوانسیون بین‌المللی حفاظت از گیاهان (IPPC<sup>۳</sup>) برخی از روش‌های پس از برداشت (مانند عملیات حرارتی بخار، انبار سرد و پرتودهی میوه‌ها) را برای مدیریت مگس‌های میوه‌ای تشریح می‌کند.

رویکرد مدیریت تلفیقی آفات (IPM<sup>۴</sup>) به

2. Enteropathic Arthritis

3. Plant Protection Convention

4. Integrated Pest Management



است (Liquido, ۱۹۹۳). گاهی اوقات میوه‌ها را با روزنامه، کیسه‌های کاغذی و ورقه‌های پلی اتیلن (مخصوصاً برای موز) می‌پیچند تا از تخم‌ریزی آفت جلوگیری شود (Sarker et al, ۲۰۰۹). زیرا تله‌های فرمونی بیشتر در واحد سطح، معمولاً اثربخشی اقدامات مهارتی را کاهش می‌دهد، زیرا مگس‌های نر، منبع بورا بسیار مشکل پیدا می‌کنند (Fezza et al, ۲۰۲۴).

### ■ روش‌های جلب و نابودی

تولیدکنندگان محصولات میوه و سبزیجات از پارافرومون‌ها<sup>۶</sup> برای جذب و کشتن مگس‌های میوه استفاده می‌کنند (Lux et al, ۲۰۰۳). این فرمون جنسی، اجزای فراری هستند که توسط گیاهان میزبان آزاد می‌شوند و مختص گونه‌ها مگس میوه هستند؛ بنابراین، نیاز به دانش کافی در مورد شناسایی مناسب مگس‌های میوه در باغ است تا مشخص شود از کدام طعمه و ترکیب گونه‌ای در باغ استفاده شود. به عنوان مثال، متیل اوژنول (ME)<sup>۸</sup> و Cuelure (CUE) چندین گونه Bactrocera را جذب می‌کنند، Zingerone گونه‌های Bactrocera را که به متیل اوژنول و CUE پاسخ نمی‌دهند و Terpinyl Acetate (TA) و Trimedlure (TML) گونه‌های Ceratitis را جذب می‌کنند (Zain-ul-  
Aabdin et al, ۲۰۲۰; Park et al, ۲۰۲۰). مطالعات نشان داده‌اند که حداقل ۳۲۴ گونه از مگس نر به Cuelure (CUE) و ۱۲۳ گونه به متیل اوژنول جذب می‌شوند (Vargas et al, ۲۰۱۴). تعداد تله‌های توصیه‌شده معمولاً پنج عدد در هر جریب است؛

7. Parapheromones (Male Lures)

8. Methyl Eugenol

### ■ روش طعمه مسموم

طعمه‌های غذایی مسموم<sup>۹</sup> (BAT) برای گونه خاص نیستند و مگس‌های میوه نر و ماده را جذب می‌کنند (White and Elson-Harris, ۱۹۹۲). مگس‌های بالغ پس از بیرون آمدن از شفیره، برای رشد و نمو به قند و پروتئین وابسته هستند (Zhang et al, ۱۹۹۸) و این منابع غذایی حاوی حشره‌کش می‌باشد که مگس‌های میوه را جذب کرده و از بین می‌برد. کشاورزان بدون طعمه‌های مسموم مصنوعی، از شیره نخل، مخلوط مخمر و شکر، به عنوان منابع غذایی برای طعمه‌گذاری مگس‌های میوه استفاده می‌کنند (Abraham et al, ۲۰۲۳).

### ■ مهار زیستی

استفاده از عوامل زیستی (مانند قارچ‌های بیماری‌زا یا حشرات شکارگر) و گیاهان دارویی برای مدیریت آفات نیز مورد توجه تولیدکنندگان میوه و سبزیجات قرار گرفته است. مورچه‌هایی مانند *Oecophylla longinoda*، در صورت وجود، تخم‌گذاری و آسیب میوه را با جلوگیری از مگس‌های میوه کاهش

9. Bait Application Technique

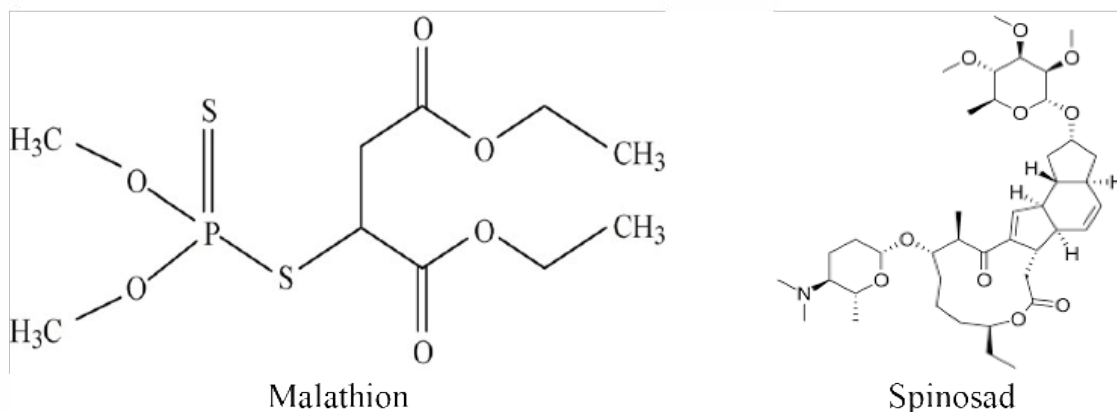
می دهند (Vayssiè res et al, ۲۰۱۶). متأسفانه، این مورچه‌ها تمایل به ترشح اسیدهای فرمیک دارند که باعث می‌شود میوه جذابیت کمتری داشته باشد و به دلیل ماهیت تهاجمی خود باعث ایجاد مزاحمت فیزیکی در هنگام برداشت میوه می‌شوند (Diamé et al, ۲۰۱۸).

قارچ‌های بیماری‌زا مانند *Metarhizium anisopliae* و آفت‌کش‌های زیستی (مانند چریش) نیز برای هدف قرار دادن لارو/شفیره مگس میوه روی خاک اعمال می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که *M. anisopliae* می‌تواند بیش از یک سال در خاک باقی بماند (Ouna, ۲۰۱۰) و لاروها و شفیره‌های *C. cosyra* و *B. dorsalis*, *Z. cucurbitae*, *C. capitata* را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Ekesi et al, ۲۰۰۷). تحقیقات اخیر، دشمنان طبیعی دیگری مانند *Fopius caudatus* (Szé pligeti), *Psytalia cosyrae* (Wilkinson), *Psytalia concolor* (Szé pligeti), *Diachasmimorpha fullawayi* (Silvestri), *Aganapsis* sp., *Tetrastichus giffardianus* Silvestri (Eulophidae, Tetrastichinae), *Ealata clava* Quinlan (Figitidae, Eucoilinae), *Bracon* sp. (Braconidae, Braconinae), *Diachasmimorpha* sp. (Braconidae, Opiinae), *Alysiinae* sp. (Braconidae) و ... را شناسایی کرده است (Zida et al ; ۲۰۱۶, Badii et al, ۲۰۱۲, et al, ۲۰۲۱). مطالعات گزارش کرده‌اند که یک ماده

*Diachasmimorpha longinoda* تاده لاروسن ۲-۳ *B. dorsalis* را به ۵/۹۷ درصد افزایش داده است (Steck et al, ۱۹۸۶). مطالعات مشابه نیز نرخ انگلی ۵۷ درصدی را در نسبت ۳:۱ *Fopius arisanus* به *B. dorsalis* گزارش کرده‌اند (Liu et al, ۲۰۲۱). همچنین در ۱۰ و همکاران (۲۰۰۵) گزارش داده‌اند که پرندگان و جوندگان با مصرف میوه‌های آلوده باعث مرگ و میر بالای لارو می‌شوند.

**■ مهار شیمیایی**

مهار شیمیایی، بخشی از اقدامات مدیریت تلفیقی آفات است که توسط تولیدکنندگان میوه و سبزیجات استفاده می‌شود. حشره‌کش‌ها (مانند اسپینوساد، مالاتیون و ...) (شکل ۲) اغلب با مواد غذایی (مانند پروتئین‌ها، قندها و ...) و سایر مواد جاذب مخلوط می‌شوند و سپس به صورت محلول پاشی نقطه‌ای یا روی نوارهایی که مگس‌های میوه را جذب می‌کنند و از بین می‌برند، استفاده می‌شوند (Badii et al, ۲۰۱۵). اسپینوساد و مالاتیون به دلیل سمیت کم پستانداران و کاهش اثرات زیست‌محیطی بر دشمنان طبیعی به خوبی مورد توجه قرار گرفته‌اند که مالاتیون مقرون به صرفه و دارای سطوح پایینی از مقاومت در برابر مگس میوه را دارد (Guo et al, ۲۰۱۵).



شکل ۲- ساختار شیمیایی حشره‌کش اسپینوساد و مالاتیون

### ■ مدیریت نظارتی آفات

محموله‌های وارداتی، هر زمان که کشور واردکننده آفات را رهگیری کند یا محموله با الزامات بهداشت گیاهی کشور واردکننده مطابقت نداشته باشد، کشور صادرکننده اخطار دریافت می‌کند. متأسفانه باغات تولید میوه و سبزیجات برای بازارهای داخلی تحت این اقدامات مدیریتی سختگیرانه قرار نمی‌گیرند و تلاش صادرکنندگان برای مدیریت مگس‌های میوه را از بین ببرند. تخمین زده می‌شود که کشاورزان در مقیاس کوچک ۸۰ درصد میوه‌ها و سبزیجات را به صادرات و بازارهای محلی ارسال می‌کنند و مدیریت مگس‌های میوه، توسط غیر صادرکنندگان (باغداران مقیاس کوچک) همکاری نمی‌کند. فقدان یک رویکرد سراسری، برای مدیریت مگس میوه، به ایجاد برخی آفات مهاجم کمک کرده است (Lux et al, ۲۰۰۳).

زمانی که میوه‌ها و سبزیجات برای صادرات در نظر گرفته می‌شوند، صادرکننده به منظور ردیابی در اداره حفاظت از گیاهان و خدمات نظارتی ثبت‌نام می‌کند (Stark et al, ۲۰۰۴). این به بازرسان بهداشت، اجازه می‌دهد تا از نزدیک نظارت تا از انطباق با پروتکل‌های تولید و سایر الزامات کشور واردکننده اطمینان حاصل کنند. نمونه‌های محصول نیز قبل از برداشت تحت آنالیز آزمایشگاهی قرار می‌گیرند تا اطمینان حاصل شود که میوه‌ها قبل از اینکه تولیدکنندگان مجاز به برداشت و بسته‌بندی برای صادرات شوند، آلوده نباشند. محموله‌ها در نقطه خروج تحت بازرسی نهایی بهداشت گیاهی قرار می‌گیرند و فقط زمانی مجاز به صادرات هستند که عاری از آلودگی مگس‌های میوه باشد. در طول بازرسی

## نتیجه‌گیری

سازمان حفظ نباتات کشور و بخش تحقیقات برای شناسایی و غربالگری آلودگی مگس‌های میوه، در مبادی خروجی، ضروری است.

صادرات محصولات باغبانی، تأثیر مثبتی بر اقتصاد کشور دارد. با این حال، مگس‌های میوه، همچنان امنیت غذایی و تغذیه مردم و درآمد تولیدکنندگان و تجارت را تهدید می‌کند. همه ذینفعان در بخش باغبانی، باید یک رویکرد هماهنگ در سراسر کشور برای مدیریت مگس‌های میوه اتخاذ کنند، رویکردی که در آن، تله‌ها به آسانی در دسترس و مقرون به صرفه برای همه باشند و استفاده از آنها باید به طور مستمر اجرا شود. ذینفعان، سرمایه‌گذاران خصوصی، شرکای تجاری و دولت نیز ممکن است در سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت، مانند ساخت تأسیسات در منطقه برای تسهیل تجارت روان و رفاه اقتصادی تولیدکننده مشارکت کنند. در واقع، این به کشاورزان خرده‌مالک، کمک می‌کند تا به تولید محصولات بادوام برای مصرف‌کنندگانی که به آنها نیاز دارند ادامه دهند و امنیت غذایی و تغذیه مردم را بهبود بخشند. تلاش‌های آتی در مهار مگس‌های میوه باید بر روی بازرسی، استفاده از تکنیک‌های نر عقیمی و برداشت به موقع و حذف میوه‌ها و سبزیجات آلوده باشد. علاوه بر این، آموزش جامعه پرورش دهندگان و مشتریان برای بهبود میزان موفقیت در برابر مگس‌های میوه حیاتی است؛ بنابراین سرمایه‌گذاری و آموزش برای عملیات گیاه پزشکی

منابع:

- Abraham, J.; Amissah, C.; Osei Kuffour, F.; Dwomoh, J.A. Palm wine as a food-based bait for monitoring adult *Ceratitis ditissima* (Munro) (Diptera: Tephritidae) in citrus orchards. *Afr. Entomol.* 31, 2023, e12637.
- Agboka, K.M.; Tonnang, H.E.Z.; Muriithi, B.W.; Niassy, S.; Ndlela, S.; Abdel-Rahman, E.M.; Mohamed, S.A.; Ekesi, S. Economic impact of a classical biological control program: Application to *Diachasmimorpha longicaudata* against *Bactrocera dorsalis* fruit fly in Kenya. *BioControl* 278–269, 69, 2024.
- Aksoy, M.A.; Beghin, J.C. *Global Agricultural Trade and Developing Countries*; The World Bank: Washington, DC, USA, 2005; pp. 332–1.
- Alvarez, S.; Evans, E.A.; Hodges, A.W. Estimated Costs and Regional Economic Impacts of the Oriental Fruit Fly (*Bactrocera dorsalis*) Outbreak in Miami-Dade County, Florida; IFAS Extension: Gainesville, FL, USA, 2016; pp. 12–1.
- Badii, K.B.; Billah, M.K.; Afreh-Nuamah, K.; Obeng-Ofori, D.; Nyarko, G. Preliminary inventory of hymenopteran parasitoids associated with fruit-infesting flies (Diptera: Tephritidae) in Northern Ghana. *Int. J. Pest Manag.* 62, 2016 275–267.
- Badii, K.B.; Billah, M.K.; Afreh-Nuamah, K.; Obeng-Ofori, D.; Nyarko, G. Review of the pest



- Fezza, T.; Shelly, T.E.; Fox, A.; Beucke, K.; Rohrig, E.; Aldebron, C.; Manoukis, N.E. Less is more: Fewer attract-and-kill sites improve the male annihilation technique against *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). *PLoS ONE*, 2024 19, e0300866.
- Foba, C.N.; Afreh-Nuamah, K.; Billah, M.K.; Obeng-Ofori, D. Species composition of fruit flies (Diptera: Tephritidae) in the Citrus Museum at the Agricultural Research Centre (ARC), Kade, Ghana. *Int. J. Trop. Insect Sci.* 12, 2, 2012V23.
- Guo, Q.L.; Chen, J.H.; Lan, H.B.; Ji, Q.E.; Lin, W.C.; Pan, Y.H.; Zhuang, M.S. Parasitical efficiency of *Fopius arisanus* on eggs of *Bactrocera dorsalis*. *Chin. J. Trop. Agric.* 59+52-51, 35, 2015.
- Huang, Z.; Guo, Q.X.; Wu, Q.M.; Huang, K.H. Morphology, hazards and China-invading risk of *Bactrocera correcta*. *Acta Agric. Jiangxi*, 26, 2014 67+63-61.
- Isabirye, B.E.; Akol, A.M.; Muyinza, H.; Masembe, C.; Rwomushana, I.; Nankinga, C.K. Fruit fly (Diptera: Tephritidae) host status and relative infestation of selected mango cultivars in three agro ecological zones in Uganda. *Int. J. Fruit Sci.* 41-23, 16, 2016.
- José, L.; Cugala, D.; Santos, L. Assessment of invasive fruit fly fruit infestation and damage in Cabo Delgado Province, Northern Mozambique. *Afr. Crop Sci. J.* 28-21, 21, 2013.
- Liquido, N.J. Reduction of Oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) populations in papaya orchards by field sanitation. *J. Agric. Entomol.* 170-163, 10, 1993.
- Liu, J.M.; Huang, Q.C.; Deng, T.J.; Yang, Z.Q.; Lu, W. Field Control of *Bactrocera dorsalis* by artificial status, economic impact and management of fruit-infesting flies (Diptera: Tephritidae) in Africa. *Afr. J. Agric. Res.* 1498-1488, 10, 2015.
- Banson, K.E.; Egyir-Yawson, A. Socio-economic impact of fruit flies control in mango production in Ghana, evidence from Many Krobo. *J. Agric. Sci. Technol.* 463-454, 4, 2014.
- Cugala, D.; Tostão, E.; Affognon, H.; Mutungi, C. Postharvest losses in Africa—Analytical review and synthesis: The case of Mozambique. *Afr. Insect Sci. Food Health* 62-1, 2012.
- Diamé, L.; Rey, J.Y.; Vayssières, J.F.; Grechi, I.; Chailleux, A.; Diarra, K. Ants: Major Functional Elements in Fruit Agro-Ecosystems and Biological Control Agents. *Sustainability*, 2018 23, 10.
- Drew, R.A.I.; Tsuruta, K.; White, I.M. A new species of pest fruit fly (Diptera: Tephritidae: Dacinae) from Sri Lanka and Africa. *Afr. Entomol.*, 13, 2005 154-149.
- Egyir, I.S.; Lartey, A.; Amissah, N.; Asem, F.E. Report on the Horticulture Sector in West Africa; UC Davis: Davis, CA, USA, 2022; pp. 135-1.
- Ekesi, S.; Billah, M.K. Field Guide to the Management of Economically Important Tephritid Fruit Flies in Africa; ICIPE Science Press: Nairobi, Kenya, 2006; p. 160.
- Ekesi, S.; Dimbi, S.; Maniania, N.K. The role of entomopathogenic fungi in the integrated management of tephritid fruit flies (Diptera: Tephritidae) with emphasis on species occurring in Africa. In *Use of Entomopathogenic Fungi in Biological Pest Management*; Ekesi, S., Maniania, N.K., Eds.; Research SignPost: Kerala, India, 2007; pp. 274-239.

- Rwomushana, I. Bioecology of the invasive fruit fly *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) and its Interaction with Indigenous Mango Infesting Fruit Fly Species. Ph.D. Thesis, Kenyatta University, Kenya, 2008; p. 220.
- Sarker, D.; Rahman, M.M.; Barman, J.C. Efficacy of different bagging materials for the control of mango fruit fly. *Bangladesh J. Agric. Res.*, 34, 2009 168–165.
- So, S. Personal Correspondence. Zoom Meeting on Mar 2021, 30, Conference Call on Apr 2021, 22 and Email from May 2021, 14; Facility manager, Hawaii Fruit Fly Rearing Facility, California Department of Food and Agriculture: Waimanalo, HI, USA, 2021
- Stark, J.D.; Vargas, R.I.; Miller, N.W. Toxicity of spinosad in protein bait to three economically important tephritid fruit fly species (Diptera: Tephritidae) and their parasitoids Hymenoptera: Braconidae). *J. Econ. Entomol.* 915–911, 97, 2004.
- Steck, G.J.; Gilstrap, F.E.; Wharton, R.A.; Hart, W.G. Braconid parasitoids attacking fruit flies (Diptera: Tephritidae) in coffee and other fruits in West-Central Africa. *Entomophaga* 67–59, 31, 1986.
- Ullah, F.; Zhang, Y.; Gul, H.; Hafeez, M.; Desneux, N.; Qin, Y. Potential economic impact of *Bactrocera dorsalis* on Chinese citrus based on simulated geographical distribution with MaxEnt and CLIMEX models. *Entomol. Gen.*, 43, 2023 830–821.
- USDA-APHIS. Cost-Benefit Analysis of Sterile Insect Technique for Oriental Fruit Fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel), Management; PPQ, USDA-APHIS: Raleigh, NC, USA, 2021.
- Van Asselt, J.; Di Battista, F.; Kolavalli, S.; Udry, release with *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead). *Guangdong Agric. Sci.*, 48, 2021 123–118.
- Lux, S.A.; Ekesi, S.; Dimbi, S.; Mohamed, S.; Billah, M.K. Mango-Infesting Fruit Flies in Africa: Perspectives and Limitations of Biological Approaches to Their Management; Neuenschwander, P., Borgemeister, C., Langewald, J., Eds.; Biological control in integrated IPM systems in Africa. CABI Publishing: Wallingford, UK, 2003; pp. 294–277.
- Niassy, S.; Ekesi, S.; Migiro, L.; Otieno, W. Sustainable Management of Invasive Pests in Africa; Springer: Berlin, Germany, 2020.
- Ouna, E.A. Entomopathogenicity of Hyphomycete Fungi to Fruit Fly *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) and Their Potential for Biological Control on Mango. M.Sc. Thesis, Kenyatta University, Nairobi, Kenya, 2010; p. 134.
- Park, S.J.; Faveri, S.G.D.; Cheesman, J.; Hanssen, B.L.; Cameron, D.N.S.; Jamie, I.M.; Taylor, P.W. Zingerone in the Flower of *Passiflora maliformis* Attracts an Australian Fruit Fly, *Bactrocera jarvisi* (Tryon). *Molecules* 2877, 25, 2020.
- Plá, I.; García de Oteyza, J.; Tur, C.; Martínez, M.Á.; Laurín, M.C.; Alonso, E.; Martínez, M.; Martín, Á.; Sanchis, R.; Navarro, M.C.; et al. Sterile Insect Technique Programme against Mediterranean Fruit Fly in the Valencian Community (Spain). *Insects* 415, 12, 2021.
- Qin, Y.; Ullah, F.; Fang, Y.; Singh, S.; Zhao, Z.; Zhao, Z.; Li, Z. Prediction of potential economic impact of *Bactrocera zonata* (Diptera: Tephritidae) in China: Peaches as the example hosts. *J. Asia-Pac. Entomol.* 1106–1101, 24, 2021.



- M. Inventory of the fruit fly species (Diptera: Tephritidae) linked to the mango tree in Mali and tests of integrated control. *Fruits* –329,62,2007 341.
- Wangithi, C.M.; Muriithi, B.W.; Belmin, R. Adoption and Dis-Adoption of Sustainable Agriculture: A Case of Farmers' Innovations and Integrated Fruit Fly Management in Kenya. *Agriculture*, 11, 2021 338.
- Weng, W.S.; Deng, X.R.; He, C.R.; Xu, B.H. Larvae of tephritid flies caused diarrhea 1 case. *Chin. J. Parasit. Dis. Control* 25, 17, 2004.
- White, I.M.; Elson-Harris, M.M. Fruit Flies of Economic Significance: Their Identification and Bionomics; CAB International: Walling-ford, UK, 1992; p. 601.
- White, I.M.; Goodger, K.F.M. African *Dacus* (Diptera: Tephritidae); new species and data, with particular reference to the Tel-Aviv University collection. *Zootaxa* 49-1, 2127, 2009.
- Zain-ul-Aabdin, A.; Naheed, B.; Memon, R.M.; Khuhro, N.H.; Soomro, Q.A. Population variations of fruit flies, *Bactrocera* spp. in mango orchards of Hyderabad and Larkana Sindh. *Pure Appl. Biol.* 955-949, 9, 2020.
- Zhang, Q.Y.; Lin, Z.J.; Liu, J.Y.; Chen, H.Z.; Gao, Q.Z.; Sun, G.K.; Hong, Z.Q.; Sun, D.H.; Chen, J.F. Study on the biology of *Bactrocera dorsalis*. *Entomol. J. East China* 71-68, 7, 1998.
- Zida, I.; Nacro, S.; Dabiré, R.A.; Moquet, L.; Haran, J.; Delatte, H. Native hymenopteran parasitoids associated with fruit-infesting flies in three plant formations and prospects for biological control in Western Burkina Faso, West Africa. *Agric. For. Entomol.* 123-114, 24, 2021.
- C.; Baker, N. Performance and Adoption Factors for Open Pollinated and Hybrid Maize Varieties: Evidence from Farmers' Fields in Northern Ghana; International Food Policy Research Institute: Washington, DC, USA, 2018; Volume 45.
- Van den Broeck, G.; Maertens, M. Horticultural exports and food security in developing countries. *Glob. Food Secur.* 20-11, 10, 2016.
- Vargas, R.I.; Leblanc, L.; Piñero, J.C.; Hoffman, K.M. Male annihilation, past, present, and future. In *Trapping Tephritid Fruit Flies. Lures, Area-Wide Programs, and Trade Implications*; Shelly, T., Epsky, N., Jang, E.B., Reyes-Flores, J., Vargas, R., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2014; pp. 511-493.
- Vargas, R.I.; Mau, R.F.L.; Jang, E.B.; Faust, R.M.; Wong, L. The Hawaii fruit fly areawide pest management programme. In *Areawide Pest Management: Theory and Implementation*; Koul, O., Cuperus, G., Eds.; CABI Books: London, UK, 2008; pp. 325-300.
- Vayssières, J.F.; Korie, S.; Ayegnon, D. Correlation of fruit fly (Diptera: Tephritidae) infestation of major mango cultivars in Borgou (Benin) with abiotic and biotic factors and assessment change. *Crop Prot.* 488-477, 28, 2009.
- Vayssières, J.F.; Offenber, J.; Sinzogan, A.; Adandonon, A.; Wargui, R.; Anato, F.; Houngbo, H.Y.; Ouagoussounon, I.; Diamé, I.; Quilici, S.; et al. The Use of Weaver Ants in the Management of Fruit Flies in Africa. In *Fruit Fly Research and Development in Africa-Towards a Sustainable Management Strategy to Improve Horticulture*; Ekesi, S., Mohamed, S., De Meyer, M., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2016.
- Vayssières, J.F.; Sanogo, F.; Noussourou,

## **Sustainable Management of Fruit Flies (Diptera: Tephritidae)**

### **Abstract**

Fruit flies cause severe economic damage to many horticultural crops (fruits and vegetables). Their damage includes rotting, premature ripening and fruit drop, which leads to significant production losses, reduced income, increased poverty, reduced trade volumes of the products and bans or restrictions on exports of horticultural products from developing countries, etc. Fruits and vegetables are essential parts of a nutritious and balanced diet for humans, who are affected by the ongoing inflation of food costs and climatic conditions. Despite advances in pest management and control, fruit flies remain a problem. Therefore, a coordinated approach across the country and investment in post-harvest facilities are needed to reduce pest populations, increase trade and income, improve livelihoods in the horticultural sector and stabilize markets for sellers and consumers.

**Keywords:** Horticulture, Monitoring, Exporters, Pest Control.

# عکاسی از زاویه دوربین گیاهپزشک



◀ آقای محمد خزائی

کنه شکارگر *Phytoseiulus persimilis* در حال شکار و تغذیه از کنه تارتن دولکه‌ای *Tetranychus urticae*

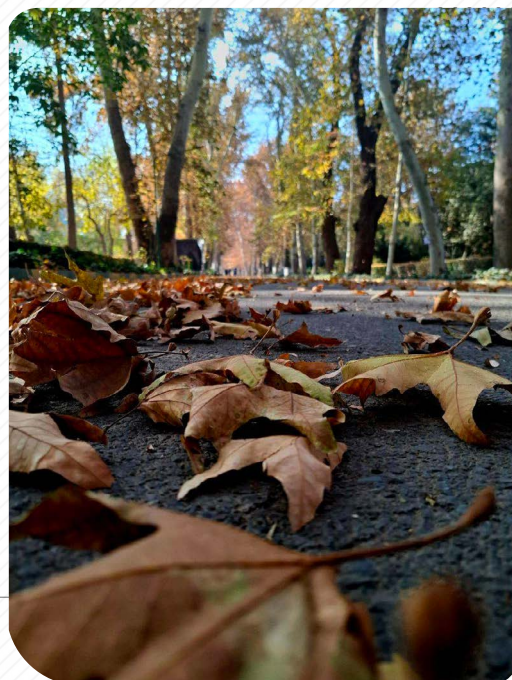
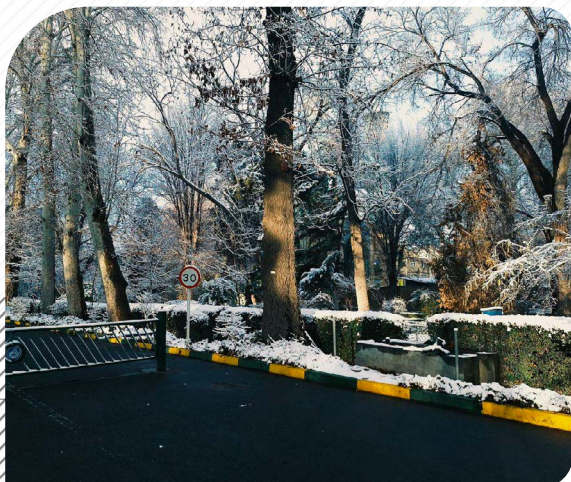


▶ خانم کیمیا امیری

تصویری از شپشک استرالیایی زیر بینوکولار

◀ محمدجواد خرم

دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران



## تیم فروش و لجستیک

### اتعهد، هماهنگی و نظم

سمفونی خدمت‌رسانی  
از سفارش تا تحویل؛  
زنجیره‌ای دقیق  
برای اعتماد پایدار  
نمایندگان و کشاورزان



از زیر دوربین تیم تولید محتوا تا سریال‌های اینستاگرام آریوزیست نهاد



## مارکتینگ

### تولید محتوا، آموزش و اطلاع‌رسانی

از مزارع سرتاسر ایران تا پلتفرم‌های مجازی،  
دانشی که جاری می‌شود؛  
تولید محتوا،  
آموزش حضوری و آنلاین،  
مسیری روشن برای  
توانمندسازی کشاورز ایرانی

## توسعه جهانی در افق پیش رو

### تأمین‌کنندگان جدید

از همکاری‌های جهانی تا مزرعه ایرانی؛  
گسترش شبکه جهانی تأمین،  
ارمغانی از نوآوری‌های برتر دنیا  
برای شکوفایی مزارع ایران!  
از لندن تا دبی و فراتر...



آریوزیست نهاد





ARABCHEM



**Zeiz**  
SEEDING FERTILITY



لسموس

فناوری نو کاربری افزایش دهنده پاسخ هوشمندانه گیاه در برابر بیماری‌ها و برای کشاورزی



روز مزرعه، همکاران، گروه باغبانان و تجربه شگفتایی محصول شما



### کلینیک گیاهپزشکی

#### تشخیص و درمان

تشخیص دقیق،  
درمان به موقع؛  
از هر گوشه ایران،  
سلامت مزرعه شما را  
تضمین می‌کنیم.

### واحد تحقیق و توسعه

#### نوآوری و نیازسنجی

از آزمایشگاه تا مزرعه؛  
نوآوری و نیازسنجی دقیق،  
ضامن انتخاب  
کارآمدترین نهاده‌ها  
برای رویشی پایدار است.

### پایبوت‌ها و روز مزرعه

#### آزمایش و اثبات کیفیت

آزمایش در مزرعه،  
اطمینان در برداشت؛  
کشاورزان ایران،  
شاهد کارایی واقعی  
محصولات ما هستند.



Carbozeiz  
HSA 100



Arabchem  
20-20-20



Lasemous



Arabchem  
12-12-36



Emprizeiz

# بامحصولات زایز پروری از آن شماست



☎ 026 34 000 186

📷 ARYOZIST

🌐 ARYOZIST.COM