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

واکاوی رویکردهای فیزیکی و محرک های مقاومت سیستمیک

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

دریافت: ۱۰ دی ۱۴۰۴ ■ بازنگری: ۲۶ بهمن ۱۴۰۴ ■ پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۴۰۴ ■ انتشار آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵
https://doi.org/10.22059/giahpzshsj.2026.414621.1055

چکیده

ایـــن مطالعه مروری بـــه تحلیل جامع ظرفیت‌هـــای نوین بیوچـــار در قالب محلول‌پاشـــی برگی به‌عنـــوان یک راهکار میان‌رشـــته‌ای در مدیریـــت آفات باغات می‌پـــردازد. یافته‌هـــای این پژوهش نشـــان می‌دهد که بیوچـــار فراتر از نقش ســـنتی خود در اصلاح خاک، از طریق یک مـــدل دفاعی «دوجانبه» عمـــل می‌کند: ۱) ســـد فیزیکی-مکانیکی؛ که شـــامل مسدودســـازی مجاری تنفســـی کنه‌ها، ســـایش قطعات دهانی لاروهای جونده به‌واســـطه ذرات سیلیکاتی و اختلال در ســـیگنال‌های نوری و شـــیمیایی ســـطح برگ برای جلوگیری از تخم‌گذاری اســـت؛ ۲) عامـــل القاکننده مقاومت؛ که با فعال‌ســـازی مســـیرهای دفاعی وابســـته به اسید جاســـمونیک و اسید سالیســـیلیک، منجر به القای مقاومت سیســـتمیک (ISR) در گیاه میزبان می‌شـــود. بررســـی پایگاه‌های داده تجربی نشـــان می‌دهـــد که کارایی بیوچار به‌شـــدت تحت تأثیر غلظت سوسپانســـیون، ابعاد ذرات (غلبه نانو-بیوچار بر میکرو-بیوچار) و پایداری کلوئیدی قـــرار دارد. همچنین، این مقالـــه با تحلیل چالش‌های فنی، تأکید می‌کند که اســـتفاده از ســـورفکتانت‌های زیســـت ســـازگار برای جلوگیری از رســـوب در نازل‌ها و مدیریت دوز مصرفی جهـــت پیش‌گیری از اخـــتلال در هدایت روزنه‌ای، از ارکان اصلـــی موفقیت این فناوری اســـت. درنهایـــت، این رویکرد با حفظ دشـــمنان طبیعی و کاهش بار شـــیمیایی محیط‌زیســـت، به‌عنوان یک مؤلفـــه کلیدی در انتقال به ســـمت باغبانی ارگانیک و هوشـــمند پیشـــنهاد می‌گردد.

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

۱-مقدمه

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؛ بااین‌حال، وابستگی بیش‌ازحد 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 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 سیگنال‌دهی گیاه، قادر به فعال‌سازی مقاومت سیستمیک القاشده (ISR) در برابر طیف وسیعی از آفات مکنده و جوینده است (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

باوجوداین 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. ازاین‌رو، 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 فیزیکوشیمیایی بیوچار و نقش آن در تعامل با آفات

کارایی بیوچار در کنترل آفات در گرو ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصربه‌فرد آن است که به‌شدت تحت تأثیر نوع ماده اولیه (Feedstock) و دمای

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، نه‌تنها بستری برای جذب مواد مغذی فراهم می‌کند، بلکه در محلول‌پاشی 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 ذرات بیوچار نقش حیاتی در انسداد منافذ تنفسی (Spiracles) آفات ایفا می‌کند؛ به‌طوری 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)

بـــالا، قادر اســـت ترکیبات فـــرار گیاهـــی (VOCs) و فرمون‌هـــای جلب‌کننـــده آفـــات را جذب یـــا پنهان کنـــد (Spokas et al., ۲۰۱۱). ایـــن عمـــل باعـــث اخـــتلال در فرآیند میزبان‌یابی توســـط آفات شـــده و گیاه را از دیـــد حشـــرات گیاه‌خوار پنهان می‌ســـازد. همچنیـــن، تخلخل بـــالای این مـــاده بـــه آن اجازه می‌دهـــد تا به‌عنـــوان یـــک حامـــل (Carrier) عمل کرده و آفت‌کش‌های زیســـتی یـــا عصاره‌های گیاهی را در درون ســـاختار خود محصور کرده و با رهاســـازی تدریجـــی، پایـــداری و اثرگـــذاری آن‌ها را در شـــرایط مزرعه‌ای بهبـــود بخشـــد (Wang et al., ۲۰۱۶).

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

مکانیسم‌های اثرگذاری محلول‌پاشـــی بیوچار بر آفات را می‌توان در دو ســـطح برهم‌کنش مســـتقیم فیزیکی و پاسخ‌های القایی زیستی دســـته‌بندی کرد. این رویکرد چندگانه (Multi-modal action)، احتمال بروز مقاومت در جمعیت آفات را به‌شـــدت کاهش می‌دهد.

• ۳-۱-مکانیسم‌های مستقیم فیزیکی و مکانیکی

اثرات مســـتقیم بیوچار عمدتاً ناشی از ساختار ساینده و خاصیـــت (Hygroscopic) آن اســـت. ذرات بیوچار با برخورد به مفاصـــل و غشـــاهای میان‌قطعه‌ای بدن آفات، باعث ایجاد خراش‌های میکروســـکوپی در لایه مومـــی کوتیکول می‌شـــوند. این تخریب ســـاختاری منجر به خروج غیرقابـــل کنترل آب از بدن حشـــره و مرگ در اثر خشـــکی (Desiccation) می‌گردد (Wang et al., ۲۰۱۶). علاوه بر این، لایه کربنی تشکیل‌شـــده بـــر روی برگ، بـــا تغییـــر در بازتاب طیف‌هـــای نوری (به‌ویژه نور UV)، ســـیگنال‌های بصـــری گیاه میزبان را برای آفـــات تغییـــر داده و به‌عنوان یـــک دفع‌کننده فیزیکـــی (Physical Repellent) عمـــل می‌کنـــد که مانع از نشســـتن و تخم‌گذاری آفات روی برگ می‌شود (Smith & Thompson, ۲۰۲۰).

• ۳-۲-تحریک مقاومت سیســـتمیک القاشـــده (ISR)

یکـــی از پیچیده‌تریـــن جنبه‌هـــای محلول‌پاشـــی بیوچار، توانایـــی آن در تغییر فیزیولـــوژی دفاعی گیاه اســـت. بیوچار حاوی مقادیر اندکـــی از ترکیبات آلی محلول (مانند اســـیدهای آلـــی و فنل‌ها) اســـت که به‌عنوان (Elicitor) عمل کرده و توســـط ســـلول‌های اپیدرم برگ شناســـایی می‌شـــوند. این شناســـایی، مســـیرهای ســـیگنال‌دهی هورمونی، به‌ویژه مســـیر اسید جاســـمونیک (JA) و اتیلن (ET) را فعال می‌کند که منجر به بروز مقاومت سیســـتمیک القاشده (ISR) می‌گـــردد (رضایی و همـــکاران، ۱۴۰۰).

مطالعات نشـــان داده‌اند که در پاســـخ به این تحریک، بیـــان ژن‌های مرتبط بـــا دفـــاع (PR-genes) افزایش یافتـــه و منجر بـــه ســـنتز آنزیم‌هـــای هیدرولیتیک مانند کیتیناز (Chitinase) و گلوکانـــاز (Glucanase) می‌شـــود. این آنزیم‌ها بـــا تخریب دیواره بـــدن آفات 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.

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

بیوچار به دلیل تخلخل بالا، پناهگاهی ایمن (Micro-habitat) برای میکروارگانیسم‌های مفید فراهم می‌کند. در محلول‌پاشی‌های ترکیبی، بیوچار از اسپورهای قارچ‌های بیماری‌زای حشرات (مانند Beauveria bassiana) و باکتری‌های حشره‌کش (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- مرور تجربی کاربرد بیوچار در کنترل آفات باغی

بررسی مطالعات تجربی نشان می‌دهد که کارایی محلول‌پاشی بیوچار تابع مستقیمی از نوع آفت هدف، ویژگی‌های ریخت‌شناختی برگ گیاه میزبان و غلظت سوسپانسیون مورداستفاده 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 سبز سیب نشان داده است که محلول‌پاشی سوسپانسیون بیوچار مشتق از پسماندهای چوبی، علاوه بر ایجاد تلفات مستقیم، باعث کاهش نرخ باروری (Fecundity) جمعیت‌های باقی‌مانده می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰). در مورد کنه‌های تارعنکبوتی در باغات انگور، گزارش‌شده است که نانو ذرات بیوچار با نفوذ 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 لاروپروانه‌ها

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

نشـــان داده اســـت که وجود ذرات بیوچار بر سطح برگ، باعث ســـایش دندانه‌هـــای آرواره لاروها شـــده و تمایل آن‌ها به تغذیه را به‌شـــدت کاهش می‌دهد (Wang et al., ۲۰۱۶). علاوه بر این، القای مقاومت سیستمیک (ISR) و افزایش غلظت ترکیبات بازدارنده هضـــم در برگ‌های محلول‌پاشی شده، منجر به طولانی شـــدن دوره لاروی و افزایش مرگ‌ومیر در مراحل پیش‌شـــفیرگی می‌گردد (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

- ۴-۳-مگس‌های میوه و آفات میوه‌خوار

در مراحل حســـاس رســـیدگی میـــوه در باغـــات هلو و ســـیب، محلول‌پاشـــی بیوچـــار می‌تواند بـــا تغییر ســـیگنال‌های شـــیمیایی ســـطح میـــوه، مانـــع از تخم‌گذاری مگس‌های میوه شـــود. بیوچـــار با جذب ســـطحی (Adsorption) ترکیبات فرار جلب‌کننده که از میوه‌های رسیده ساطع می‌شـــوند، نوعی «پوشش شـــیمیایی» ایجاد کرده و احتمال یافتن میزبان توسط آفـــت را کاهـــش می‌دهـــد (Smith & Thompson, ۲۰۲۰). ایـــن رویکرد به‌ویـــژه در مدیریـــت آفاتی که نسبت به ســـموم شـــیمیایی مقاوم شـــده‌اند، راهکار جایگزین مؤثری گزارش‌شـــده اســـت.

- ۴-۴-ایمنی برای دشـــمنان طبیعی و حشـــرات گرده‌افشان

یکـــی از مزایـــای اســـتراتژیک بیوچـــار در باغـــات، انتخاب‌پذیـــری (Selectivity) آن اســـت. برخلاف آفت‌کش هـــای وســـیع‌الطیف، محلول‌پاشـــی بیوچار تأثیر ســـوء ناچیزی بر روی شـــکارگرانی نظیر کفشـــدوزک‌ها و زنبورهای پارازیتوئیـــد دارد. این امر ناشی از تفاوت در فیزیولوژی بدن و رفتار تغذیه‌ای این حشرات اســـت. حفظ جمعیت دشـــمنان طبیعی در کنار کنترل فیزیکی آفات توســـط بیوچـــار، منجر به تقویت کنترل زیســـتی خودبه‌خودی در اکوسیســـتم بـــاغ می‌گـــردد (Ahmad et al., ۲۰۱۴؛ موســـوی و نوری، ۱۳۹۹).

۵-عوامل مؤثر بر کارایـــی و چالش‌های کاربردی در مقیاس میدانی

به‌رغـــم پتانســـیل‌های ذکرشـــده، انتقـــال فناوری محلول‌پاشـــی بیوچـــار از شـــرایط کنترل‌شـــده آزمایشـــگاهی به باغات، مســـتلزم غلبـــه بر چندین چالش فنی و زیســـتی اســـت. کارایی این روش تحت تأثیـــر متغیرهـــای متعددی قـــرار دارد کـــه در ادامه تحلیل می شـــوند.

- ۵-۱-ابعاد ذرات و نانوتکنولوژی

انـــدازه ذرات بیوچـــار تعیین‌کننـــده اصلـــی نـــرخ پوشـــش‌دهی و ماندگاری بر ســـطح کانوپی اســـت. ذرات درشـــت (میکرومتری) تمایل به رسوب سریع در مخازن ســـم‌پاش و گرفتگی نازل‌ها دارند، درحالی‌که نانو-بیوچارها به دلیل ســـطح ویژه بالاتر، چسبندگی و نفوذپذیری بیشـــتری در لایه اپیدرم نشان می‌دهند (نقیبی و صادقی، ۱۴۰۱). بااین‌حال، تولید اقتصادی

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

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

ذرات بیوچار به‌دلیل 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 زیست سازگار ضروری است (Smith & Thompson, ۲۰۲۰). این مواد نه‌تنها از کلوخه‌شدن (Agglomeration) ذرات جلوگیری می‌کنند، بلکه با کاهش کشش سطحی محلول، باعث پخش‌شدگی بهتر قطرات بر روی سطوح واکسی برگ‌های باغی (مانند مرکبات) شده و مقاومت لایه تشکیل‌شده در برابر شستشوی باران را افزایش می‌دهند.

- ۵-۳-نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز

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

- ۵-۴-تداخل با فیزیولوژی گیاه (Phytotoxicity)

یکی از چالش‌های کمتر بررسی‌شده، اثر پوشش تیره بیوچار بر هدایت روزنه‌ای (Stomatal Conductance) و دمای برگ است. غلظت‌های بیش‌ازحد بیوچار ممکن است با مسدود کردن روزنه‌ها، تبادل گازها و فتوسنتز را مختل کرده و یا با جذب بیش‌ازحد 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. ازاین‌رو، 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

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 نه‌تنها 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.

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

۱-استانداردسازی فرمولاسیون: توسعه سوسپانسیون‌های پایدار با استفاده از سورفکتانت‌های زیست سازگار جهت جلوگیری ازرسوب‌ذرات‌وگرفتگی‌تجهیزات‌سم‌پاشی.

۲-بهینه‌سازی دوز و زمان مصرف: تعیین غلظت‌های بهینه برای محصولات مختلف (مانند سیب، پسته و مرکبات) به‌گونه‌ای 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 کنترل زیستی

۴-ارزیابی اقتصادی: تحلیل هزینه-فایده تولید بیوچار از پسماندهای محلی باغات در مقایسه با هزینه‌های خرید و اعمال سموم شیمیایی.

درنهایت، 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.

منابع

۱. رضایی، م.، حیدری، ع؛ و نوری، س. (۱۴۰۰). بررسی نقش محلول‌پاشی بیوچار بر پاسخ‌های 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 زیست‌محیطی آفت‌کش‌های 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. نقیبی، م؛ و صادقی، ح. (۱۴۰۱). بررسی آزمایشگاهی اثرات فیزیکی نانو-بیوچار بر نرخ مرگ‌ومیر کنه تارعنکبوتی دو لکه‌ای در شرایط محلول‌پاشی. مجله دانش گیاه‌پزشکی ایران، ۵۳(۱)، ۷۷-۹۲.

۵. یداللهی، ع؛ و همکاران. (۱۳۹۸). کاربرد بیوچار در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های 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, ۹۹,۱۹-۳۳. https://doi.org/۱۰/۱۰۱۶/j.chemosphere.۲۰۱۳/۱۰/۰۷۱

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, ۲۶(۸),۱۴۱۲-۱۴۱۹.

۸. Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (۲۰۱۵). Biochar for Environmental Management : Science, Technology and Implementation (۲nd 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, ۳۳۳(۱),۱۱۷-۱۲۸.

۱۰. Mukherjee, A., & Zimmerman, A. R. (۲۰۱۳). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures. Geoderma, ۱۹۳,۱۲۲-۱۳۰.

۱۱. Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., Ahmedna, M., Rehrah, D., & Schomberg, H. (۲۰۰۹). Characterization of switchgrass-derived biochar for use as a soil conditioner. Journal of Environmental Quality,,(۶)۳۸ ۲۲۶۱-۲۲۷۱.

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, ۶۸,(۱۴)۴۱۲۰-۴۱۳۵.

۱۳. Spokas, K. A., Novak, J. M., & Venterea, R. T. (۲۰۱۱). Biochar›s role as an adsorbent for controlling agricultural greenhouse gas emissions. Chemosphere, ۸۵,(۵)۸۶۷-۸۸۲.

۱۴. Wang, Y., Lu, J., Wu, Z., & Lin, Z. (۲۰۱۶). Mechanisms of biochar-mediated suppression of plant pests and diseases : A review. BioControl, ۶۱,(۴)۳۷۳-۳۸۶.

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.