

تحلیل الگوی شیوع آفات و بیماری‌های فضای سبز شهری و ارائه راهبردهای مدیریت تلفیقی (IPM) در شرایط تنش کم‌آبی

وحید مرادی^۱، اسمعیل شجاعی نسب^۲

- ۱- کارشناسی ارشد رشته کشاورزی باغبانی، گرایش فیزیولوژی و اصلاح گیاهان زینتی، دانشگاه آزاد شیراز، شیراز، ایران.
- ۲- کارشناسی رشته تولیدات گیاهی، گرایش باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

چکیده:

رشد شتابان شهرنشینی و تشدید تغییرات اقلیمی، فضاهای سبز شهری را با چالش‌های اکولوژیکی متعددی مواجه ساخته است که در این میان، تنش کم‌آبی به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده سلامت پوشش گیاهی شهری مطرح می‌باشد. کمبود آب، نه‌تنها رشد و پایداری گیاهان زینتی و درختان شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه با تغییر پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه، الگوی شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی را نیز دگرگون می‌سازد. تضعیف مکانیسم‌های دفاعی گیاه، کاهش کارایی دشمنان طبیعی و تشدید اثر تنش‌های محیطی همزمان، موجب افزایش آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های فضای سبز شهری در برابر عوامل خسارت‌زا شده است. هدف از این مقاله، تحلیل جامع الگوهای بروز آفات و بیماری‌ها در فضای سبز شهری تحت شرایط تنش کم‌آبی و ارائه راهبردهای مؤثر مدیریت تلفیقی آفات (IPM) با رویکردی پایدار و سازگار با محدودیت منابع آبی می‌باشد. روش تحقیق به‌صورت یک مطالعه مروری تحلیلی انجام شده و با بررسی و تلفیق نتایج پژوهش‌های مرتبط در حوزه تنش‌های محیطی، فیزیولوژی گیاه، کیفیت آب آبیاری، شیوع آفات و بیماری‌ها و اصول مدیریت تلفیقی آفات در فضاهای سبز شهری صورت گرفته است. یافته‌ها نشان داد که تنش کم‌آبی از طریق تغییر ترکیب شیره گیاهی، کاهش تولید متابولیت‌های دفاعی، اختلال در تعادل عنصری گیاه و کاهش جمعیت دشمنان طبیعی، زمینه‌ساز افزایش جمعیت آفات مکنده، کنه‌ها و تشدید بیماری‌های عروقی و خاک‌زاد می‌گردد. همچنین هم‌زمانی کم‌آبی با تنش‌هایی نظیر شوری آب آبیاری، آلودگی هوا و دمای بالای محیط شهری، اثرات منفی را تشدید می‌کند. در نتیجه‌گیری می‌توان بیان کرد که موفقیت مدیریت آفات و بیماری‌های فضای سبز شهری در شرایط کم‌آبی، مستلزم ادغام مدیریت منابع آب با برنامه‌های IPM، انتخاب گونه‌های مقاوم، بهبود ساختار خاک و تقویت کنترل بیولوژیک است. چنین رویکردی، نقش مؤثری در افزایش تاب‌آوری اکولوژیک و پایداری بلندمدت فضاهای سبز شهری خواهد داشت.

واژگان کلیدی: مدیریت تلفیقی آفات، تنش کم‌آبی، فضای سبز شهری، بیماری‌های گیاهی، مدیریت پایدار شهری

مقدمه

توسعه شهری فزاینده و تغییرات اقلیمی، نظام‌های فضاهای سبز شهری را در معرض فشارهای متعددی قرار داده است که در میان آن‌ها، کمبود و محدودیت منابع آب شیرین، به ویژه در مناطق شهری ایران، به عاملی تعیین کننده در سلامت و بقای پوشش گیاهی تبدیل شده است. فضای سبز شهری صرفاً مجموعه‌ای از درختان و گیاهان زینتی نیست، بلکه یک اکوسیستم پیچیده شهری است که نقش‌های اکولوژیکی حیاتی نظیر تنظیم دما، تصفیه هوا، مدیریت رواناب و تأمین سلامت روانی شهروندان را ایفا می‌کند (احمدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال، نیاز روزافزون شهرها به آب و کاهش نزولات آسمانی، مدیریت منابع آبیاری فضای سبز را به یک چالش اساسی تبدیل کرده است، و این تنش آبی زمینه‌ساز تغییرات ساختاری و عملکردی در میزبان و عوامل خسارت‌زا می‌شود. این تغییرات، پویایی سنتی روابط بین گیاهان و آفات و بیماری‌ها را دگرگون ساخته و منجر به بروز الگوهای جدیدی از خسارت و شیوع می‌گردد که شناخت آن‌ها برای حفظ این سرمایه‌های محیطی ضروری است.

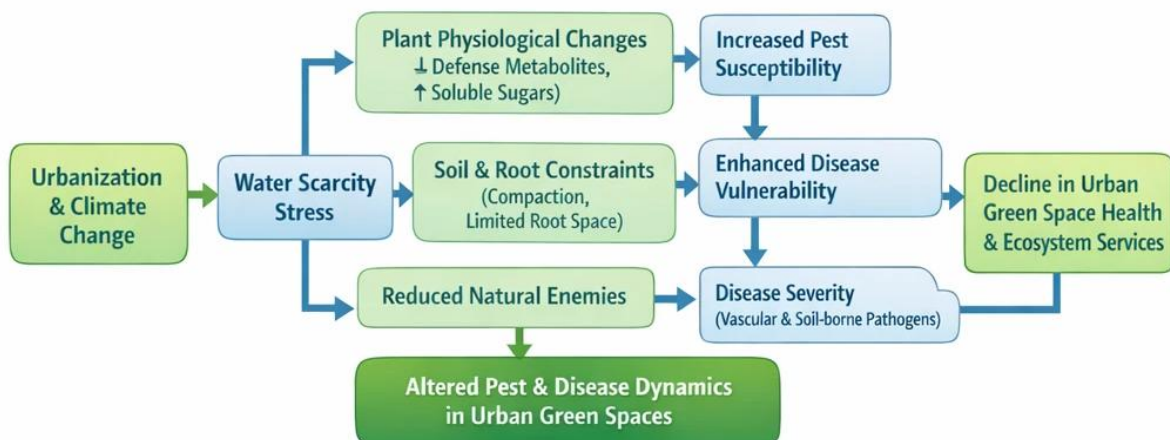
تنش ناشی از کم‌آبی نه تنها بر رشد و توسعه گیاه تأثیر می‌گذارد، بلکه آستانه آسیب‌پذیری گیاه را در برابر عوامل بیولوژیکی، از جمله حشرات، کنه‌ها، و عوامل بیماری‌زای قارچی و باکتریایی، به شدت تغییر می‌دهد (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). گیاهان در مواجهه با کم‌آبی، مکانیسم‌های دفاعی خود را تغییر می‌دهند؛ این تغییرات می‌توانند شامل کاهش تولید متابولیت‌های ثانویه دفاعی، کاهش رشد ریشه‌ای نسبت به شاخ و برگ، و تغییر در نسبت‌های شیمیایی داخلی گیاه، مانند محتوای قندها و نیتروژن، باشند که اغلب جذابیت گیاه را برای برخی گونه‌های آفات افزایش می‌دهد (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). درک این تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی که تحت شرایط تنش آبی رخ می‌دهند، کلید تفسیر الگوهای جدید شیوع آفات در پارک‌ها، کمربندهای سبز و سایر فضاهای سبز شهری خواهد بود.

آفات مکنده، مانند شته‌ها و سپرداران، به طور خاص نسبت به تغییرات در شیره گیاهی ناشی از کم‌آبی حساس هستند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که تنش آبی می‌تواند غلظت قندهای محلول در شیره را افزایش دهد که به عنوان منبع انرژی غنی برای این حشرات عمل کرده و منجر به افزایش نرخ تولید مثل و بقای آن‌ها می‌شود (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). در مقابل، تنش شدید ممکن است به دلیل کاهش کلی سوخت و ساز گیاه، به طور موقت جمعیت برخی آفات را کاهش دهد؛ اما این کاهش اغلب موقتی بوده و با استقرار مجدد گیاه، شیوع شدیدتر خواهد بود. مدیریت نامناسب آبیاری، که اغلب به عنوان واکنشی سریع به کمبود آب اعمال می‌شود، با ایجاد دوره‌های مرطوب و سپس خشکی‌های شدید، محیط مناسبی برای نوسانات جمعیتی آفات ایجاد می‌کند (آزادی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳).

از سوی دیگر، بیماری‌های گیاهی، به ویژه آن‌هایی که توسط قارچ‌های خاکی و عروقی ایجاد می‌شوند، تعامل پیچیده‌ای با وضعیت آبیاری دارند. در شرایط کم‌آبی، گیاه ضعیف شده، کمتر قادر به فعال‌سازی دفاع سیستمیک خود در برابر پاتوژن‌ها است (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). به طور خاص، بیماری‌های ناشی از فوزاریوم و ورتیسیلیوم که سیستم آوند چوبی را هدف قرار می‌دهند، در گیاهانی که به دلیل کم‌آبی دچار کایتاسیون و اختلال در انتقال آب شده‌اند، به شدت تشدید می‌یابند، زیرا توانایی گیاه برای ممانعت از نفوذ پاتوژن از طریق مسیرهای آبی کاهش می‌یابد (رجبی، ۲۰۲۵). بررسی این تعاملات نشان می‌دهد که مدیریت آب، نه تنها برای بقای گیاه، بلکه به عنوان یک استراتژی پیشگیرانه در کنترل بیولوژیکی، دارای اهمیت حیاتی است. در بافت شهری، شرایط محیطی اغلب از حالت طبیعی فاصله دارد؛ عواملی نظیر آلودگی هوا، فشرده‌سازی خاک، و محدودیت فضای ریشه‌ای، استرس کم‌آبی را تشدید می‌کنند (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). این فشارهای مضاعف، اثرات سمی کم‌آبی را تقویت کرده و گیاهان را به سمت آستانه تحمل خود سوق می‌دهند. به عنوان مثال، گیاهانی که در

خاک‌های شهری با تراکم بالا کاشته شده‌اند، توانایی کمتری برای توسعه سیستم ریشه‌ای عمیق برای دسترسی به رطوبت‌های زیرین دارند، در نتیجه در برابر تنش سطحی آب آسیب‌پذیرترند (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). این وضعیت اکولوژیکی شهری نیازمند مدل‌های پیش‌بینی و مدیریتی است که تعامل متقابل این عوامل استرس‌زا را در نظر بگیرند.

یکی از جنبه‌های کمتر مورد توجه، تأثیر کم‌آبی بر دشمنان طبیعی آفات است. منابع آبی برای حشرات مفید، به ویژه شکارچیان و انگل‌شناسان، نه تنها برای تغذیه مستقیم، بلکه برای حفظ زیستگاه و چرخه زندگی آن‌ها ضروری است (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). خشک شدن پوشش گیاهی و کاهش رطوبت محیطی ناشی از کم‌آبی، می‌تواند جمعیت دشمنان طبیعی را به شدت کاهش دهد، و این امر زمینه را برای انفجار جمعیت آفات فراهم می‌سازد، حتی اگر میزبان گیاهی کمی ضعیف‌تر شده باشد. این عدم تعادل در ساختار جامعه، نشان‌دهنده پیچیدگی مدیریت آفات در شرایط کم‌آبی است. این مقاله مروری تلاش می‌کند تا با جمع‌آوری داده‌های پراکنده در مورد تأثیر کم‌آبی بر دینامیک آفات و بیماری‌ها در فضای سبز شهری، چارچوبی تحلیلی برای درک این پدیده‌ها ارائه دهد. تمرکز اصلی بر روی مکانیسم‌هایی است که از طریق آن‌ها تغییرات در دسترسی به آب، پاسخ‌های دفاعی گیاه را تغییر داده و الگوهای خسارت را در اکوسیستم‌های شهری اصلاح می‌کند. این تحلیل به صورت منسجم در هشت بخش ساختار یافته است تا یک دید جامع از مبانی نظری تا راهبردهای مدیریتی ارائه شود (عباسی کاسککی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). در نهایت، پیامدهای عملی این یافته‌ها برای برنامه‌ریزان و مدیران فضای سبز شهری بسیار حیاتی است. اگر راهکارهای مدیریتی صرفاً بر حذف آفات متمرکز شوند بدون آنکه تنش محیطی اصلی، یعنی کم‌آبی، را هدف قرار دهند، اقدامات کنترلی موقتی خواهند بود و فشار بر منابع آبی برای حفظ پوشش گیاهی آسیب‌پذیر افزایش خواهد یافت. بنابراین، ادغام مدیریت آب و مدیریت آفات در یک رویکرد واحد، اصلی‌ترین نیاز حوزه پژوهش و عمل در مدیریت پایدار فضای سبز شهری محسوب می‌شود (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۱. مدل مفهومی تأثیر شهرنشینی و تنش کم‌آبی بر تغییر الگوی بویایی آفات و بیماری‌ها و پیامدهای آن بر سلامت و کارکرد اکوسیستم‌های فضای سبز شهری.

این مدل مفهومی نشان می‌دهد که چگونه شهرنشینی و تغییرات اقلیمی از طریق تشدید تنش کم‌آبی، زنجیره‌ای از تغییرات فیزیولوژیک در گیاهان فضای سبز شهری ایجاد می‌کنند که شامل کاهش تولید ترکیبات دفاعی، افزایش قندهای محلول و محدودیت رشد ریشه ناشی از تراکم و شرایط نامناسب خاک شهری است. این تغییرات، حساسیت گیاهان را نسبت به آفات

مکنده افزایش داده و هم‌زمان آسیب‌پذیری آن‌ها را در برابر بیماری‌های گیاهی، به‌ویژه پاتوژن‌های خاکزاد و آوندی، تشدید می‌نماید. از سوی دیگر، کاهش دسترسی به رطوبت و تخریب زیستگاه‌ها، موجب افت جمعیت دشمنان طبیعی آفات شده و تعادل زیستی اکوسیستم‌های شهری را بر هم می‌زند. برآیند این فرآیندها، تغییر پویایی جمعیت آفات و شدت بیماری‌ها در فضاها، سبب شهری است که در نهایت به کاهش سلامت پوشش گیاهی و افت خدمات اکوسیستمی نظیر تنظیم دما، بهبود کیفیت هوا و ارتقای رفاه شهروندان منجر می‌شود. این چارچوب مفهومی تأکید می‌کند که مدیریت پایدار فضای سبز شهری مستلزم رویکردی تلفیقی است که هم‌زمان مدیریت منابع آب و راهبردهای مدیریت تلفیقی آفات را در یک ساختار منسجم در نظر گیرد.

۲) مفاهیم و مبانی نظری تنش کم‌آبی در فضای سبز شهری

تنش کم‌آبی (Water Stress) در محیط شهری، وضعیتی است که در آن پتانسیل آب در بافت‌های گیاهی به حدی کاهش می‌یابد که فرآیندهای فیزیولوژیک حیاتی دچار اختلال می‌شوند و این وضعیت به طور معمول ناشی از عدم تعادل بین میزان تبخیر و تعرق بالقوه (ETP) و آبیاری مؤثر است (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). برخلاف محیط‌های طبیعی، فضای سبز شهری با محدودیت‌های ساختاری فراوانی مواجه است؛ از جمله حجم محدود خاک قابل دسترسی، نسبت بالای نسبت سطح به حجم در توده‌های خاکی متراکم، و سطوح بالای آلودگی که همگی بر توانایی گیاه در جذب و نگهداری رطوبت تأثیر می‌گذارند. این محدودیت‌های محیطی، گیاهان شهری را ذاتاً مستعدتر به تنش آبی می‌کند، حتی در مقایسه با گونه‌های مشابه در اراضی طبیعی مجاور. مکانیسم‌های کلیدی پاسخ گیاه به کم‌آبی شامل واکنش‌های سلولی، بافتی و سیستمی هستند. در سطح سلولی، کاهش تورژسانس منجر به کاهش تقسیم سلولی و کاهش اندازه نهایی سلول‌ها می‌شود، که این امر مستقیماً بر رشد کلی گیاه تأثیر می‌گذارد (دری و همکاران، ۲۰۱۹). در سطح سیستمی، اولین واکنش دفاعی، بسته شدن روزنه‌ها برای کاهش تلفات آب از طریق تعرق است؛ این بسته شدن، فتوسنتز را محدود کرده و تولید کربوهیدرات‌ها را کاهش می‌دهد که انرژی لازم برای رشد و تولید مواد دفاعی را کاهش می‌دهد. این توازن بین حفظ آب و تولید انرژی، یک نقطه عطف بحرانی در تعیین سرنوشت گیاه در برابر تنش‌های ثانویه است.

اهمیت پتانسیل آب در خاک و بافت گیاه در مطالعات تنش آب حیاتی است. پتانسیل آب پایین‌تر در بافت‌ها (منفی‌تر شدن پتانسیل) نشان‌دهنده شدت بیشتر تنش است (قمرینا و همکاران، ۲۰۲۴). در شرایط کم‌آبی شهری، به دلیل تبخیر بالا و آبیاری ناکافی یا نامناسب، ریشه‌ها مجبور به جستجو در اعماق می‌شوند، اما در محیط‌های شهری، موانع فیزیکی و شیمیایی خاک، این جستجو را محدود کرده و باعث می‌شود که گیاه زودتر از حد انتظار به آستانه تنش بحرانی برسد. این پدیده سبب می‌شود که گونه‌های گیاهی که معمولاً در شرایط مرطوب سازگارند، در فضای سبز شهری عملکرد ضعیفی داشته باشند. تنش کم‌آبی بر تولید متابولیت‌های ثانویه که نقش مهمی در دفاع شیمیایی گیاه دارند، اثرگذار است. برخی مطالعات نشان می‌دهند که تحت تنش ملایم تا متوسط، تولید ترکیبات فنلی و آنتی‌اکسیدان‌ها ممکن است افزایش یابد که یک پاسخ انطباقی اولیه است (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). اما اگر تنش ادامه یابد، منابع انرژی گیاه صرف ترمیم آسیب‌های اکسیداتیو شده و ذخایر لازم برای تولید ترکیبات دفاعی در برابر آفات و بیماری‌ها کاهش می‌یابد. این تغییر در اولویت‌های متابولیکی، گیاه را از حالت دفاع فعال به حالت بقای فیزیولوژیکی سوق می‌دهد و آسیب‌پذیری آن را افزایش می‌دهد.

یکی دیگر از تغییرات بنیادی ناشی از کم‌آبی، تغییر در نسبت‌های عنصری درون بافت گیاه است، به ویژه نسبت کربن به نیتروژن ((C/N)). هنگامی که رشد گیاه به دلیل محدودیت آب کند می‌شود، تولید کربوهیدرات‌ها (کربن) نسبت به جذب

نیترژن در بافت‌ها افزایش می‌یابد (پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). این افزایش نسبی نیترژن در بافت‌های جوان می‌تواند جذابیت آن‌ها را برای حشرات مکنده که به دنبال نیترژن غنی هستند، افزایش دهد، در حالی که افزایش کربوهیدرات‌ها ممکن است مقاومت فیزیکی یا شیمیایی در برابر برخی پاتوژن‌ها را بهبود بخشد، که این اثرات دوگانه نیازمند تفکیک دقیق در مدل‌های مدیریتی است. مفهوم آستانه تحمل تنش آبی در گیاهان فضای سبز شهری بسیار مهم است؛ زیرا اغلب گونه‌های زینتی کاشته شده در شهرها، در برابر تنش‌های محیطی کمتری نسبت به گونه‌های بومی مقاومت دارند (تفویضی و همکاران، ۲۰۲۲). آستانه تحمل به صورت نقطه‌ای تعریف می‌شود که پس از عبور از آن، میزان خسارت به حدی می‌رسد که دیگر امکان بازگشت کامل به وضعیت سلامت اولیه وجود ندارد یا هزینه انرژی لازم برای بازیابی، توجیه اقتصادی یا اکولوژیکی ندارد. شناسایی این آستانه‌ها برای طراحی برنامه‌های آبیاری تنشی مدیریت شده ضروری است.

تنش آبی می‌تواند منجر به تغییرات در ساختار میکروارگانیسم‌های خاک و رابطه آن‌ها با ریشه گیاه شود. کم‌آبی بر فعالیت قارچ‌های میکوریزا که در افزایش دسترسی به آب و مواد مغذی نقش دارند، تأثیر می‌گذارد (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵). کاهش همزیستی با میکوریزا به دلیل خشکی، شبکه‌ی حمایتی گیاه را تضعیف کرده و گیاه را در برابر پاتوژن‌های خاک‌زی و همچنین جذب عناصر مورد نیاز برای تقویت دفاع شیمیایی، آسیب‌پذیرتر می‌سازد. این وابستگی متقابل اکولوژیک، یکی از مبانی نظری اصلی در درک مقاومت گیاه تحت تنش آب است. در نهایت، درک تنش کم‌آبی در فضای سبز شهری مستلزم در نظر گرفتن ماهیت تنوع زیستی موجود است. فضای سبز شهری معمولاً از مجموعه‌ای از گونه‌ها با نیازهای آبی متفاوت تشکیل شده است؛ اعمال یک برنامه آبیاری یکسان برای همه، منجر به ایجاد تنش آبی مضاعف در گونه‌های حساس و هدررفت آب در گونه‌های مقاوم می‌شود. بنابراین، مدل‌های نظری باید مبتنی بر پروفایل‌های گیاهی و نیازهای فیزیولوژیک هر گونه برای تنظیم دقیق استراتژی‌های آبیاری باشند تا پاسخ‌های دفاعی بهینه حفظ شده و بروز آفات و بیماری‌ها به حداقل برسد (برکباف و نرجس سادات، ۲۰۲۴).

۳) الگوهای شیوع آفات در شرایط کم‌آبی

کم‌آبی به عنوان یک عامل استرس‌زای محیطی اولیه، به طور اساسی الگوهای جمعیت‌شناختی و رفتاری بسیاری از آفات فضای سبز شهری را تغییر می‌دهد و می‌تواند منجر به افزایش نرخ رشد جمعیت، تغییر در گونه‌های غالب، و طولانی‌تر شدن دوره‌های فعالیت شود. تأثیر تنش آبی بر آفات معمولاً از طریق دو مسیر اصلی اعمال می‌شود: ۱) تأثیر مستقیم بر میزبان گیاهی و جذابیت آن، و ۲) تأثیر مستقیم بر بقا و رشد خود آفت. در بسیاری از موارد، مسیر اول غالب است و گیاه ضعیف‌شده، محیطی مساعدتر برای استقرار و تکثیر آفت فراهم می‌آورد (اورک و نیسی، ۲۰۲۴). یکی از مهم‌ترین تأثیرات تنش آبی، افزایش حساسیت گیاه به حشرات مکنده است. شته‌ها، زنجره‌ها و شپشک‌ها که با مکیدن شیره گیاهی تغذیه می‌کنند، اغلب در گیاهانی که تحت تنش آب خفیف تا متوسط قرار دارند، افزایش جمعیت نشان می‌دهند (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴). این پدیده به دلیل تغییر در ترکیب شیمیایی شیره گیاهی است؛ تنش آب باعث می‌شود که نسبت مواد محلول جامد، به ویژه قندهای ساده، در شیره افزایش یابد، در حالی که محتوای نیترژن محلول ممکن است به طور نسبی بالا بماند (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). این شیره غلیظ‌تر و پرقندتر، منبع انرژی متمرکزتری برای این آفات فراهم کرده و به آن‌ها اجازه می‌دهد چرخه‌های زندگی کوتاه‌تری داشته و تعداد نسل بیشتری در سال تولید کنند.

تنش شدید آبی، هرچند که می‌تواند با کاهش کلی فتوسنتز و تولید مواد غذایی، میزبان را برای همه آفات نامطلوب سازد، اما مکانیسم‌های دفاعی گیاه را نیز مختل می‌کند. کم‌آبی باعث کاهش تولید ترکیبات دفاعی مانند ترکیبات فنلی یا

آلکالوئیدها می‌شود که معمولاً نقش محافظتی در برابر تغذیه یا تخم‌گذاری حشرات دارند (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). هنگامی که دفاع شیمیایی گیاه کاهش می‌یابد، حشرات حتی با وجود کاهش کیفیت غذایی کلی، می‌توانند با موفقیت بیشتری استقرار یابند و خسارت قابل توجهی وارد کنند؛ این امر به ویژه در مورد آفات که نسبت به ترکیبات شیمیایی حساسیت کمتری دارند، مشهود است. الگوی شیوع گونه‌های خاصی از آفات در پاسخ به کم‌آبی شهری تغییر می‌کند. به عنوان مثال، کنه‌های تار عنکبوتی (مانند ترانیکوس) در شرایط خشکی و رطوبت نسبی پایین محیط، به شدت افزایش می‌یابند (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). این کنه‌ها از محیط‌های خشک و گرم استقبال می‌کنند و فقدان رطوبت هوا که معمولاً توسط تعرق گیاهان سالم تأمین می‌شود، به نفع آن‌هاست. بنابراین، در مناطقی از فضای سبز که آبیاری آن‌ها به شدت محدود شده است، شاهد افزایش انفجاری جمعیت این کنه‌ها خواهیم بود که علائم خسارت آن‌ها (زردی و برنزی شدن برگ‌ها) اغلب با علائم تنش آبی اشتباه گرفته می‌شود.

تأثیر تنش آبی بر آفات چوب‌خوار و ناقل بیماری نیز قابل تأمل است. بسیاری از سرخرطومی‌های چوب‌خوار و سوسک‌های پوست‌خوار، تمایل دارند که گونه‌های ضعیف‌تر و مسن‌تر را هدف قرار دهند که مشخصه آن‌ها کاهش ظرفیت دفاعی و اختلال در جریان شیره است (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). گیاهان تحت تنش مزمن آبی، علائم استرس را به شکل ترشحات صمغی کاهش‌یافته یا تغییر یافته نشان می‌دهند، که این امر توانایی گیاه برای مقابله با نفوذ این آفات را تضعیف می‌کند. این آفات می‌توانند به عنوان عوامل ثانویه مرگ گیاه در اکوسیستم‌های شهری عمل کنند. برنامه‌های آبیاری نامنظم که در پاسخ به کمبود آب اعمال می‌شوند، خود عاملی برای تحریک شیوع آفات هستند. تناوب بین دوره‌های خشکی شدید و آبیاری بیش از حد (که اغلب برای جبران سریع خسارت انجام می‌شود)، شوک‌های محیطی بزرگی به گیاه وارد می‌کند و چرخه زندگی برخی آفات را تسریع می‌بخشد (آزادی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳). این نوسانات، هم بر متابولیسم گیاه و هم بر حشرات مفید تأثیر می‌گذارد و منجر به از بین رفتن کنترل بیولوژیک طبیعی شده و زمینه را برای شیوع‌های غیرمنتظره آفات فراهم می‌آورد.

تغییرات در جامعه حشرات مفید نیز الگوی شیوع را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دشمنان طبیعی آفات، از جمله زنبورهای پارازیتوئید و کنه‌های شکارگر، اغلب به منابع آب محیطی برای بقا، تخم‌ریزی و تغذیه وابسته هستند (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). کاهش رطوبت هوا و خشکی محیط اطراف گیاه، به ویژه برای مراحل رشدی این حشرات مفید، بسیار زبان‌آور است. کاهش فعالیت شکارچیان، امکان می‌دهد که حتی جمعیت‌های آفاتی که از نظر کمی افزایش نیافته‌اند، از نظر کیفی (تأثیرگذاری بر گیاه) مؤثرتر شوند، زیرا فشار کنترل بیولوژیک حذف شده است. در نهایت، الگوی شیوع آفات در شرایط کم‌آبی، تابعی از استراتژی‌های مدیریتی اعمال شده است. اگر مدیران فضای سبز صرفاً بر پایه برنامه زمانی آبیاری عمل کنند و نه بر اساس نیاز فیزیولوژیک واقعی گیاه که توسط تنش آبی تعدیل شده، این امر منجر به ایجاد یک محیط غیرمستعد برای دفاع گیاه و در نتیجه افزایش شیوع آفات خواهد شد. درک دقیق از آستانه‌های تنش آبی هر گونه برای پیش‌بینی زمان و شدت حملات آفات در اکوسیستم شهری ضروری است (رجبی، ۲۰۲۵).

۴) الگوهای بروز بیماری‌های گیاهی در اکوسیستم فضای سبز شهری

تنش کم‌آبی، از طریق تضعیف سیستم دفاعی گیاه و تغییر در شرایط محیطی ریزجذب (Rhizosphere)، نقش محوری در تغییر الگوی بروز و شدت بیماری‌های گیاهی در فضای سبز شهری ایفا می‌کند. بیماری‌ها به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: بیماری‌های ناشی از پاتوژن‌های خاکی (مانند نماتدها و قارچ‌های عامل پژمردگی) و بیماری‌های ناشی از پاتوژن‌های هوابرد. کم‌آبی، تعاملات پیچیده‌ای با هر دو گروه ایجاد می‌کند که غالباً منجر به افزایش آسیب‌پذیری گیاهان به ویژه در محیط

شهری می‌شود (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌ها، تأثیر کم‌آبی بر دفاع سیستمیک القا شده (ISR) و دفاع القا شده سیستمیک (SAR) در گیاه است. گیاه برای مقابله با پاتوژن‌ها، منابع انرژی را صرف تولید ترکیبات دفاعی مانند فیتوالکسین‌ها می‌کند. در شرایط کم‌آبی، با توجه به محدودیت منابع کربن ناشی از کاهش فتوسنتز، گیاه مجبور است بین دفاع در برابر خشکی و دفاع در برابر پاتوژن‌ها اولویت‌بندی کند (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). این رقابت انرژی اغلب منجر به کاهش پاسخ‌های دفاعی مؤثر در برابر بیماری‌ها می‌شود، به ویژه در مراحل اولیه حمله پاتوژن.

بیماری‌های عروقی و پژمردگی ناشی از قارچ‌هایی نظیر *Fusarium* و *Verticillium* در گیاهان تحت تنش آبی به طور قابل توجهی تشدید می‌شوند (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). این پاتوژن‌ها سیستم انتقال آب را مسدود می‌کنند. هنگامی که گیاه خود در اثر تنش آبی دچار کاویتاسیون (تشکیل حباب‌های هوا در آوندها) و اختلال در انتقال آب شده باشد، کارایی مکانیسم‌های دفاعی فیزیکی گیاه علیه نفوذ قارچ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، محیط ریشه‌زایی خشک‌تر ممکن است برای برخی پاتوژن‌های خاکی شرایط مطلوبی برای رشد و تهاجم فراهم سازد، هرچند که این رابطه همیشه خطی نیست. تأثیر کم‌آبی بر میکروارگانیسم‌های خاک بسیار پیچیده است و می‌تواند به نفع پاتوژن‌ها یا به نفع عوامل کنترل‌کننده باشد. مطالعات نشان می‌دهد که خشکی‌های مکرر می‌تواند تنوع و فعالیت قارچ‌های سودمند خاک (مانند میکوریزا یا باکتری‌های محرک رشد گیاه) را کاهش دهد (عباسی کاسککی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). این کاهش حمایت‌های بیولوژیک از ریشه، گیاه را در برابر پاتوژن‌های فرصت‌طلب خاک‌زی آسیب‌پذیرتر می‌سازد، زیرا ارتباط همزیستی که به افزایش جذب آب و مواد مغذی کمک می‌کرد، مختل شده است.

بروز بیماری‌های هوابرد نیز تحت تأثیر کم‌آبی قرار می‌گیرد، اما اغلب به صورت غیرمستقیم. به عنوان مثال، قارچ‌هایی که برای جوانه زنی اسپورهای خود نیاز به لایه‌ای از آب روی سطح برگ دارند، ممکن است در شرایط کم‌آبی محیطی کلی، کمتر فرصت بروز پیدا کنند (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹). اما اگر آبیاری به صورت بارانی و غیرصحیح انجام شود و شب‌ها گیاه مرطوب بماند، با وجود کمبود کلی آب، شرایط موضعی مناسبی برای برخی بیماری‌های برگ فراهم می‌شود. در واقع، نوسانات آبیاری، الگوی بروز بیماری‌ها را از الگوی وابسته به رطوبت زیاد به الگوی وابسته به ضعف میزبان تغییر می‌دهد. تغییرات در بیوشیمی برگ ناشی از تنش آبی نیز بر بیماری‌زایی تأثیر می‌گذارد. کاهش در غلظت نیتروژن محلول در شرایط کم‌آبی مزمن (به دلیل محدودیت جذب از خاک) ممکن است برای برخی پاتوژن‌هایی که برای رشد خود به نیتروژن نیاز دارند، چالش‌برانگیز باشد (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، در مقابل، افزایش نسبی ترکیبات کربنی (قندها) در برگ‌های تحت استرس، می‌تواند انرژی لازم برای رشد میسلیوم برخی قارچ‌ها را فراهم کند، که این نشان‌دهنده اثرات متضاد کم‌آبی بر انواع مختلف پاتوژن‌ها است. علاوه بر این، در بافت شهری، استفاده از گونه‌های گیاهی سازگار با شرایط خشک، در صورت عدم رعایت اصول کشت، ممکن است به سرعت به دلیل استرس مضاعف محیطی (آلودگی، تراکم) از بین برود و بستر مناسبی برای عوامل ثانویه فراهم کند. گیاهانی که به اجبار در شرایطی دور از نیاز اکولوژیک خود نگهداری می‌شوند، مانند کاشته شدن گونه‌های آب‌دوست در نواحی خشک شهر، تحمل‌پذیری پایینی در برابر بیماری‌ها نشان می‌دهند و بروز بیماری‌ها در آن‌ها به یک الگوی دائمی تبدیل می‌شود (دری و همکاران، ۲۰۱۹). در نهایت، الگوهای بروز بیماری‌ها در شرایط کم‌آبی شهری نیازمند نظارت مداوم و تفکیک علائم است. اغلب علائم تنش آبی (نکروز، زردی) با علائم بیماری اشتباه گرفته می‌شوند که منجر به تشخیص نادرست و استفاده نامناسب از سموم یا افزایش غیرضروری در مصرف آب می‌شود. شناخت دقیق اینکه کدام بیماری‌ها در پاسخ به کدام سطح از تنش آبی فعال‌تر می‌شوند، برای تدوین استراتژی‌های پیشگیرانه مبتنی بر مدیریت آب ضروری است (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴).

۵) نقش تنش‌های محیطی و کیفیت آب آبیاری در تشدید آفات و بیماری‌ها

فضای سبز شهری یک محیط مصنوعی و مجاور با زیرساخت‌های انسانی است که در آن تنش کم‌آبی به ندرت به صورت ایزوله عمل می‌کند؛ بلکه همواره با سایر تنش‌های محیطی و کیفیت نامطلوب منابع آبیاری همزمان می‌شود و این همزمانی اثرات تجمعی و تشدیدکننده بر سلامت گیاه و شیوع عوامل خسارت‌زا دارد (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). این تنش‌های مضاعف، ظرفیت بیولوژیکی گیاه برای مقاومت را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند و آستانه تحمل را پایین می‌آورند. تنش شوری آب آبیاری یکی از رایج‌ترین عوامل تشدید کننده در محیط‌های شهری است، به ویژه در مناطقی که از منابع آب با کیفیت پایین تر یا آب باز یافتی استفاده می‌شود (پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). شوری آب، علاوه بر ایجاد تنش اسمزی که مانند کم‌آبی عمل می‌کند، جذب عناصر ضروری مانند پتاسیم و کلسیم را برای گیاه دشوار می‌سازد و جذب سدیم و کلر را افزایش می‌دهد که این امر خود یک سمیت ویژه ایجاد می‌کند. گیاهانی که همزمان از تنش آبی و شوری رنج می‌برند، به شدت ضعیف شده و به هدف آسانی برای آفات مکنده تبدیل می‌شوند، چرا که ترکیبات دفاعی آن‌ها به دلیل کمبود انرژی برای تولید، تضعیف شده است (تفویضی و همکاران، ۲۰۲۲).

آلودگی‌های هوا، نظیر دی‌اکسید گوگرد ((SO_2))، ازن ((O_3)) و ذرات معلق، که در محیط‌های شهری فراوان هستند، به طور مستقیم به کوتیکول برگ آسیب زده و روزنه‌ها را تحریک یا مسدود می‌کنند. این آسیب فیزیکی، نفوذ پاتوژن‌ها را تسهیل کرده و همچنین تبخیر آب از سطح برگ را تغییر می‌دهد (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵). زمانی که یک گیاه تحت تأثیر آلاینده‌های شیمیایی قرار می‌گیرد، منابع انرژی‌اش صرف ترمیم آسیب‌های اکسیداتیو می‌شود و دفاع در برابر آفات بیولوژیک کاهش می‌یابد؛ این وضعیت به ویژه برای بیماری‌های قارچی هوابرد در شرایط کمبود رطوبت محیطی، خطرناک است. کیفیت نامناسب آب، تأثیرات مستقیمی بر ساختار خاک و عملکرد ریشه دارد. آبیاری با آب حاوی غلظت بالایی از مواد جامد معلق (TDS) یا مقادیر زیاد بی‌کربنات‌ها می‌تواند به مرور زمان باعث شوری و قلیایی شدن خاک شده و زهکشی را مختل کند (برکباف و نرجس سادات، ۲۰۲۴). خاک شور و فشرده، توانایی کمتری در حفظ رطوبت قابل دسترس برای گیاه دارد و این امر تنش کم‌آبی را تشدید می‌کند. در چنین شرایطی، پاتوژن‌های خاکی مانند نماتدها که به خاک‌های ضعیف و فشرده تمایل دارند، رشد سریع‌تری خواهند داشت.

تنش‌های حرارتی که اغلب در محیط‌های شهری به دلیل پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) تشدید می‌شوند، مستقیماً با کم‌آبی در تعامل هستند. کمبود آب توانایی گیاه برای خنک‌سازی از طریق تعرق را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، دمای بافت گیاهی به طور قابل ملاحظه‌ای از دمای محیط بالاتر می‌رود (اورک و نیسی، ۲۰۲۴). این گرمای اضافی، خود به تنش مضاعف فیزیولوژیک تبدیل می‌شود و سرعت متابولیسم آفات را افزایش می‌دهد، در نتیجه نرخ تکامل آن‌ها تسریع شده و در یک فصل، نسل‌های بیشتری می‌توانند به گیاه آسیب بزنند. تغییر در میزان مصرف کودها، که اغلب در مدیریت فضای سبز شهری برای جبران رشد ناشی از کم‌آبی انجام می‌شود، می‌تواند خود عاملی تشدیدکننده باشد. کوددهی بیش از حد نیتروژنی، به ویژه در شرایط کم‌آبی، منجر به رشد سریع و آبی بافت‌های جدید می‌شود که از نظر تغذیه‌ای برای حشرات مکنده بسیار جذاب هستند (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، کوددهی نامتعادل می‌تواند باعث کاهش جذب عناصر دفاعی مانند پتاسیم و کلسیم شود که نقش اساسی در استحکام دیواره سلولی و مقاومت در برابر پاتوژن‌های نفوذ کننده دارند.

نقش عوامل بیولوژیکی نیز در تشدید این شرایط محیطی پررنگ است. کاهش رطوبت خاک باعث کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید می‌شود که وظیفه تجزیه مواد آلی و تثبیت برخی مواد سمی را دارند (شکورزاده و صبا، ۲۰۲۲). با

تضعیف این جمعیت‌های سودمند، مواد سمی یا بقایای آلاینده‌ها در منطقه ریزجذب تجمع یافته و جذب آب و مواد مغذی را مختل می‌کنند، که نتیجه نهایی آن تشدید تنش کم‌آبی حتی با آبیاری متوسط است. در نهایت، مدیریت ناکارآمد آبیاری، که اغلب شامل آبیاری با فواصل طولانی و حجم زیاد برای جبران دوره خشکی است، خود یک تنش محیطی محسوب می‌شود. این نوسانات شدید آبی، رشد ناپایدار و غیریکنواخت گیاه را به دنبال دارد، که باعث ایجاد نقاط ضعف ساختاری می‌شود که به طور مؤثری توسط آفات و بیماری‌ها مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. بنابراین، برای کنترل مؤثر آفات در فضای سبز شهری، باید مدیریت کیفیت آب و تنش‌های همزمان محیطی را در اولویت قرار داد (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹).

۶) مدیریت تلفیقی آفات (IPM) در فضای سبز شهری تحت تنش کم‌آبی

مدیریت تلفیقی آفات (IPM) در اکوسیستم‌های فضای سبز شهری که تحت تنش مزمن کم‌آبی قرار دارند، نیازمند یک رویکرد بازنگری شده است که در آن مدیریت منابع آب به عنوان سنگ بنای کنترل بیولوژیکی و شیمیایی در نظر گرفته شود (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). رویکرد سنتی IPM که عمدتاً بر آستانه‌های اقتصادی کنترل متمرکز است، باید با در نظر گرفتن پایداری فیزیولوژیک گیاه در برابر خشکی ادغام شود تا استراتژی‌های کنترلی نه تنها آفات را مدیریت کنند بلکه تاب‌آوری میزبان را نیز افزایش دهند. اولین گام در IPM سازگار با کم‌آبی، اجرای دقیق مانیتورینگ و تعیین آستانه خطر است، با این تفاوت که آستانه خسارت باید بر اساس سطح تنش آبی تعیین شود. گیاه تحت تنش شدید، آستانه تحمل خسارت کمتری دارد و اقدامات کنترلی باید زودتر آغاز شود (احدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳). مانیتورینگ باید شامل اندازه‌گیری‌های دقیق پتانسیل آب برگ در کنار شمارش جمعیت آفات باشد تا بتوان ارتباط دقیق بین سطح تنش و واکنش آفت را درک کرد و از اقدامات پیشگیرانه غیرضروری که منابع آبی را هدر می‌دهند، اجتناب نمود.

استفاده از روش‌های پیشگیرانه زراعی، در این شرایط اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند. انتخاب ارقام گیاهی که نه تنها نسبت به آفات مقاوم هستند، بلکه دارای تحمل ذاتی بالایی نسبت به شرایط کم‌آبی (آب‌گریزی کمتر برگ، ریشه‌های عمیق‌تر) باشند، زیربنای هر برنامه IPM موفق است (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، بهبود ساختار خاک از طریق افزودن مواد آلی، ظرفیت نگهداری آب را در منطقه ریشه افزایش داده و نیاز به آبیاری مکرر را کاهش می‌دهد، که این امر به طور غیرمستقیم از شدت تنش آبی کاسته و دفاع گیاه را تقویت می‌کند. کنترل بیولوژیک در اکوسیستم‌های شهری تحت تنش آبی نیازمند ملاحظات ویژه‌ای است، زیرا خشکی می‌تواند دشمنان طبیعی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). مدیران باید تلاش کنند تا زیستگاه‌های پناهگاهی مناسبی برای حشرات مفید فراهم آورند؛ این امر ممکن است شامل آبیاری موضعی و محدود برای حفظ رطوبت در نزدیکی نقاط استقرار حشرات مفید، حتی در دوره‌هایی باشد که کل گیاه تحت آبیاری تنشی قرار دارد. حفظ دشمنان طبیعی، جایگزینی مؤثر برای استفاده از آفت‌کش‌ها در شرایطی است که گیاه به دلیل کم‌آبی حساس شده است.

استفاده از روش‌های کنترل فیزیکی و مکانیکی باید با دقت بیشتری انجام شود. هرس فرم دهی یا هرس بهداشتی برای حذف قسمت‌های آلوده یا بسیار ضعیف شده ناشی از کم‌آبی، برای کاهش منابع تلقیح بیماری‌ها و پناهگاه آفات ضروری است (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). با این حال، هرس شدید باید در دوره‌های تنش آبی پرهیز شود، زیرا منجر به افزایش سطح تبخیر از بافت‌های باقی‌مانده و افزایش استرس دمایی می‌شود. همچنین، استفاده از مالچ‌ها برای حفظ رطوبت خاک، همزمان

با کنترل علف‌های هرز که رقیب آبی هستند، یک استراتژی مؤثر در کاهش عمق تنش آبی است. در مورد استفاده از آفت‌کش‌ها، که باید آخرین راهکار در IPM باشد، کم‌آبی بر کارایی و ایمنی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. در گیاهان تحت تنش آبی، جذب سیستمیک آفت‌کش‌ها ممکن است کاهش یابد زیرا جریان آب در آن‌ها کند شده است (آزادی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، بقایای آفت‌کش‌ها در بافت‌های گیاهی ممکن است به دلیل کاهش سرعت رشد و متابولیسم گیاه، برای مدت طولانی‌تری باقی بماند که خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی را افزایش می‌دهد. بنابراین، انتخاب آفت‌کش‌هایی که اثر تماسی قوی‌تری دارند و یا استفاده از فرمولاسیون‌های خاص برای نفوذ در بافت‌های متراکم‌تر، ضروری است.

مدیریت آبیاری به عنوان یک فاکتور کنترلی IPM، نیازمند انتقال از سیستم‌های مبتنی بر زمان‌بندی به سیستم‌های مبتنی بر نیاز گیاه است. استفاده از روش‌های آبیاری قطره‌ای کارآمد و اعمال آب در زمان‌هایی که تبخیر حداقل است (مانند اوایل صبح)، به جذب حداکثری آب توسط ریشه کمک می‌کند و نیاز به مصرف اضافی آب را برای رسیدن به عمق مناسب کاهش می‌دهد (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). آبیاری هدفمند در اطراف ریشه می‌تواند از استرس آب در نواحی بحرانی جلوگیری کرده و دفاع شیمیایی گیاه را حفظ نماید. در نهایت، IPM در شرایط کم‌آبی باید یک رویکرد پیشگیرانه بلندمدت داشته باشد که بر تقویت سلامت کلی اکوسیستم فضای سبز شهری تمرکز کند. این امر مستلزم آموزش مستمر کارشناسان فضای سبز در مورد تعاملات پیچیده آب و آفات است، به طوری که آن‌ها بتوانند تشخیص دهند که آیا علائم مشاهده شده ناشی از آفت است یا یک پاسخ فیزیولوژیک به تنش آبی که نیازمند تنظیم برنامه آبیاری است (رجبی، ۲۰۲۵).

۷) راهبردهای مدیریتی، اکولوژیک و بهره‌برداری پایدار شهری

دستیابی به بهره‌برداری پایدار از فضای سبز شهری در شرایط کم‌آبی مستلزم یک تغییر پارادایم از نگهداری صرفاً زیبایی‌شناختی به سمت مدیریت اکولوژیک و تقویت عملکرد حفاظتی گیاهان است. این راهبردها باید بر بهینه‌سازی مصرف آب، افزایش مقاومت اکوسیستم و کاهش وابستگی به مداخلات شیمیایی متمرکز باشند (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). ادغام اصول اکولوژی شهری با مدیریت بحران آب، تنها راه تضمین بقای بلندمدت این محیط‌ها است. اولین و مهم‌ترین راهبرد، اجرای دقیق آبیاری هوشمند و مبتنی بر نیاز فیزیولوژیک است. این امر شامل نصب سنسورهای رطوبت خاک در عمق‌های مختلف ریشه و همچنین استفاده از مدل‌های تبخیر و تعرق مرجع و اصلاح شده برای محاسبه دقیق نیاز آبی گونه‌های مختلف (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). هدف باید دستیابی به "آبیاری تنشی کنترل شده" باشد، جایی که گیاه تا نزدیکی آستانه تنش آبی آبیاری می‌شود اما از رسیدن به نقطه آسیب برگ‌ها جلوگیری می‌گردد. این روش، گیاه را به تولید ترکیبات دفاعی القا می‌کند بدون آنکه ذخایر انرژی‌اش برای بقا تحلیل رود.

دگرگونی در ترکیب گونه‌ای فضای سبز شهری یک راهبرد اکولوژیک بلندمدت است. جایگزینی گونه‌های پربار آب‌خواه و زینتی با گونه‌های بومی یا گونه‌های سازگار با خشکی (Xeriscaping) که به طور طبیعی دارای سازگاری‌های فیزیولوژیک برای حفظ آب هستند، می‌تواند نیاز آبی کلی فضای سبز را به شدت کاهش دهد (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). این گونه‌ها اغلب دارای مکانیسم‌های دفاعی ذاتی قوی‌تری در برابر آفات هستند، زیرا تکامل در شرایط کم‌آبی، آن‌ها را در برابر تنش‌های محیطی همزمان مقاوم‌تر ساخته است. مدیریت خاک به عنوان یک مخزن آب، نقشی حیاتی ایفا می‌کند. بهبود نفوذپذیری خاک‌های متراکم شهری از طریق هوادهی مکانیکی و افزودن مواد آلی پایدار مانند کمپوست، ظرفیت ذخیره آب مفید را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد (عباسی کاسککی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). افزودن مالچ‌های آلی یا معدنی بر روی سطح خاک

نیز به شدت تبخیر سطحی را کاهش می‌دهد و از نوسانات شدید رطوبتی در منطقه ریزجذب که به ریشه‌ها آسیب می‌زند، جلوگیری می‌کند؛ این کار به طور غیرمستقیم پایداری گیاه در برابر آفات را تضمین می‌نماید.

تقویت جنبه‌های کنترل بیولوژیک در شرایط کم‌آبی نیازمند استراتژی‌های حمایتی است. این شامل ایجاد یا حفظ زیستگاه‌های دوستدار حشرات مفید (مانند کاشت گیاهان شهدزا) در حاشیه یا درون باغ‌هاست، به گونه‌ای که این پناهگاه‌ها حتی در زمان کاهش آبیاری عمومی، به رطوبت کافی برای بقای دشمنان طبیعی دسترسی داشته باشند (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹). در این حالت، کنترل بیولوژیک به عنوان یک سیستم دفاعی پایدار عمل می‌کند که مستقل از مداخلات آبیاری مکرر باقی می‌ماند. راهبرد دیگر، اجرای دقیق‌تر هرس‌های بهداشتی و تنک کردن درختان است. حذف شاخ و برگ‌های مسن، بیمار یا آسیب‌دیده، نه تنها منبع آلودگی و لانه آفت را از بین می‌برد، بلکه میزان سطح برگ در معرض تابش مستقیم خورشید و تعرق را کاهش می‌دهد و بدین ترتیب فشار کلی بر سیستم آبیاری را کمتر می‌کند (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). این اقدام باید با احتیاط و در زمان مناسب انجام شود تا باعث تحریک رشد سریع و آبی در فصل نامناسب نگردد، که خود زمینه‌ساز آفت می‌شود. بازیافت و استفاده مجدد از آب، به عنوان بخشی از بهره‌برداری پایدار، باید مورد توجه قرار گیرد. با این حال، استفاده از آب‌های خاکستری یا پساب‌های تصفیه شده، مستلزم پایش مستمر کیفیت آب از نظر شوری، pH و غلظت فلزات سنگین است، زیرا این عوامل می‌توانند به طور مستقیم تنش شوری و سمیت را در فضای سبز تشدید کنند (دری و همکاران، ۲۰۱۹). این امر نیازمند سیستمی است که کیفیت آب ورودی را با تحمل گونه‌های گیاهی کاشته شده در هر منطقه مطابقت دهد. در نهایت، آموزش و مشارکت عمومی در مدیریت شهری بسیار حیاتی است. شهروندان باید درک کنند که فضای سبز تحت شرایط کم‌آبی، نیازمند مراقبت‌های متفاوتی است و ممکن است در برخی فصول، علائم ظاهری آن با خشکی همراه باشد نه لزوماً حمله آفت (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). ترویج فرهنگ استفاده مسئولانه از آب و گزارش‌دهی دقیق در مورد مشاهده آفات، به مدیران اجازه می‌دهد تا منابع محدود آب و کنترل را به صورت استراتژیک و هدفمندتری به کار گیرند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تحلیل جامع الگوهای شیوع آفات و بیماری‌ها در فضای سبز شهری تحت شرایط کم‌آبی نشان می‌دهد که تنش آبی عامل کلیدی در تغییر دینامیک اکوسیستم‌های شهری است و نقش آن فراتر از محدود کردن رشد گیاه بوده و مستقیماً مکانیسم‌های دفاعی و آستانه آسیب‌پذیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). کم‌آبی مزمن، با تضعیف پاسخ‌های فیزیولوژیک میزبان و تغییر در ساختار جامعه حشرات مفید، محیطی مستعد برای افزایش خسارت ناشی از آفات مکنده و تشدید بیماری‌های عروقی ایجاد می‌کند (پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). این یافته‌ها بر این موضوع تأکید دارند که مدیریت آفات و بیماری‌ها در چنین محیط‌هایی نمی‌تواند صرفاً واکنشی به ظهور علائم خسارت باشد، بلکه باید یک رویکرد پیشگیرانه مبتنی بر مدیریت یکپارچه منابع آب و سلامت گیاه باشد.

تداخل تنش‌های محیطی و کیفیت پایین آب آبیاری، اثرات منفی تنش آبی را مضاعف کرده و نیاز به انتخاب‌های مدیریتی دقیق‌تر را دوچندان می‌سازد (تفویضی و همکاران، ۲۰۲۲). مشخص شد که گونه‌های گیاهی که در شرایط شهری کاشته شده‌اند، به دلیل محدودیت‌های ساختاری خاک و آلودگی، ظرفیت کمتری برای انطباق با کم‌آبی دارند و این موضوع، فضای مانور را برای استراتژی‌های مدیریتی IPM محدود می‌کند (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، پذیرش استراتژی‌هایی نظیر زراعت مقاوم به خشکی و بهبود کارایی مصرف آب در اولویت قرار می‌گیرد. نتیجه‌گیری اصلی این است که پایداری فضای سبز شهری در عصر کم‌آبی، مستقیماً به توانایی ما در حفظ تعادل متابولیک گیاه وابسته است؛ گیاهی که از نظر آبی دچار

استرس شدید است، دیگر منابعی برای دفاع شیمیایی فعال علیه عوامل ثانویه نخواهد داشت (برکباف و نرجس سادات، ۲۰۲۴). مدیریت تلفیقی آفات (IPM) در این بستر، باید آبیاری را به عنوان یک عامل کنترلی کلیدی، نه یک نیاز صرفاً خدماتی، در نظر بگیرد و بر حفظ کارایی دشمنان طبیعی تحت شرایط خشک تأکید ورزد (اورک و نیسی، ۲۰۲۴).

بر اساس یافته‌های این مقاله مروری و برای تضمین سلامت بلندمدت فضای سبز شهری، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

۱. پیشنهاد ۱: توسعه سامانه‌های پایش تلفیقی آب و آفت: لازم است مدل‌های پیش‌بینی شیوع آفات به گونه‌ای کالیبره شوند که پارامترهای پتانسیل آب خاک و برگ را به عنوان ورودی اصلی در نظر بگیرند، و سیستم‌های هشدار زودهنگام بر اساس آستانه‌های تنش آبی طراحی شوند (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴). این امر نیازمند سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سنجش از راه دور و سنسورهای محیطی است.
 ۲. پیشنهاد ۲: اولویت‌دهی به تقویت ساختار خاک: برنامه‌های مدیریت فضای سبز شهری باید شامل الزامات جدی برای بهبود ساختار فیزیکی خاک (افزودن مواد آلی پایدار) برای افزایش ظرفیت نگهداری آب مفید باشند تا وابستگی به آبیاری‌های مکرر کاهش یابد و استرس‌های محیطی تعدیل شوند (شکورزاده و صبا، ۲۰۲۲).
 ۳. پیشنهاد ۳: بازنگری در ترکیب گونه‌ای با رویکرد اکولوژیک: در طراحی و بازپیرایی فضای سبز، گونه‌های با نیاز آبی کم و سازگار با شرایط شهری (مانند گونه‌های بومی مقاوم به خشکی) باید جایگزین گونه‌های پراب‌خواه شوند تا نیاز آبی کلی اکوسیستم کاهش یابد و مقاومت ذاتی در برابر آفات افزایش یابد (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹).
 ۴. پیشنهاد ۴: تحقیق هدفمند بر روی اثرات تنش در شهر: نیاز به مطالعات تجربی بیشتر در محیط‌های شهری واقعی برای تفکیک اثرات کم‌آبی از اثرات آلودگی و شوری بر روی واکنش‌های دفاعی گونه‌های رایج فضای سبز شهری و همچنین تأثیر آن‌ها بر کارایی روش‌های کنترل بیولوژیک در شرایط تنش وجود دارد (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵).
 ۵. پیشنهاد ۵: اجرای آبیاری هدفمند برای حفظ کنترل بیولوژیک: در دوره‌های اعمال محدودیت آبی، باید تلاش شود که حاشیه یا نواحی خاصی که محل تجمع دشمنان طبیعی آفات هستند، به صورت موضعی و حداقل رطوبت مورد نیاز را دریافت کنند تا از فروپاشی کامل زنجیره غذایی کنترل بیولوژیک جلوگیری شود (احدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳).
- با اجرای این راهبردهای یکپارچه، می‌توان اطمینان حاصل کرد که فضای سبز شهری نه تنها در برابر بحران‌های کم‌آبی مقاومت نشان می‌دهد، بلکه به عنوان یک شبکه اکولوژیکی پایدار، نقش حیاتی خود را در ارتقای کیفیت زندگی شهری ایفا نماید (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱).

منابع

- قمرنیا، عباسی، محمد رسول، فرمانی فرد. (۲۰۲۴). اثرات آبیاری با پساب تصفیه شده فاضلاب شهری کرمانشاه بر غلظت و توزیع فلزات سنگین در گیاه باقلا. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۴(۱)، ۱-۱۸.
- کاظمی نژادفرد سیدعلی، لاهیجانیان اکرم الملوک، نیکو محمدرضا، حسنی امیرحسام. (۲۰۲۳). بهینه سازی چندهدفه و مدیریت تخصیص پساب تصفیه شده به منظور آبیاری فضای سبز شهری.
- کیانی، کامیاب، زندیه، مدی، ضرابی، آزموه. (۲۰۲۵). ارزیابی اثرگذاری پوشش سبز بر آلودگی هوا و نرخ مرگ و میر در شهر تهران. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی، ۱۵(۲)، ۱۱۱-۱۴۲.
- گشسبی، حیدری، صباغ، سید کاظم، مکاریان. (۲۰۲۱). تاثیر تنش کم آبی و کودهای زیستی و غیرزیستی بر عملکرد سرشاخه های گلدار، رنگدانه های فتوسنتزی و غلظت عناصر پرمصرف گیاه در آویشن زراعی (*Thymus vulgaris L*). علوم گیاهان زراعی ایران، ۵۲(۲)، ۱۵۷-۱۷۲.
- ولی، برآبادی، امیراحمدی. (۲۰۲۲). تعیین الگوی کشت و ارزیابی گونه های کشت شده با پساب تصفیه شده شهری جهت احیای اراضی بیابانی (مطالعه موردی: تصفیه خانه فاضلاب شهر سبزوار). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۷(۲۵)، ۳۷-۴۷.
- احدی راد، رضوان، پوربیرامی هیر، چمنی، ملکی لجایر، ایزدی، نورالدین. (۲۰۲۳). تاثیر تنش خشکی بر ویژگی های مورفولوژیکی و بیوشیمیایی برخی گونه های گل سوسن. پژوهش های تولید گیاهی، ۳۰(۱)، ۴۹-۶۵.
- احسانی، سیده ریحانه، سلطانی فرد، هادی، قدرتی، کراچی، هادی. (۲۰۲۴). ارزیابی نقش مشارکت های مردمی در توسعه و نگهداری فضاهای سبز شهری (مورد مطالعه: فضای سبز شهر قوچان). محیط شناسی، ۵۰(۲)، ۱۴۷-۱۶۶.
- افشارنیا، خوانین زاده، کریمی. (۲۰۲۵). بررسی واکنش رشد و مقاومت به تنش شوری در گیاه دارویی کنگرفرنگی (*Cynara scolymus L*). تنش های محیطی در علوم زراعی، ۱۸(۱)، ۹۱-۱۰۷.
- اورک، نیسی. (۲۰۲۴). تاثیر فضای سبز شهری بر کیفیت زندگی شهروندان شهرستان شوشتر. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست، ۳(۱)، ۷۱-۸۳.
- آزادگر، آناهیتا، یوسفی شهیر، هانیه. (۲۰۲۳). تحلیلی بر بازنگری طراحی فضاهای شهری (خیابان های) کلان شهر تبریز در مواجهه با شیوع بیماری های همه گیر مبتنی بر تجربیات جهانی به روش ماتریس SWOT و QSPM. فضای شهری و حیات اجتماعی، ۱(۳)، ۷۳-۸۷.
- برکیاف، نرجس سادات. (۲۰۲۴). بررسی نقش فضاهای سبز شهری در توسعه پایدار شهری. جغرافیا و روابط انسانی، ۶(۳)، ۶۱۸-۶۳۲.
- پرتانی، مدنی، سید محمد رضا، سید سراجی، میر حسن. (۲۰۱۹). ارزیابی اثر میان مدت آبیاری با پساب تصفیه شده بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک. فصلنامه علوم محیطی، ۱۷(۲)، ۶۹-۸۰.
- درویش بلوچی، مرجان، مهدی خواه، مونا، زراعتگر بورانی، حنانه، ... پروانه. (۲۰۲۲). تشخیص و جلوگیری از بیماری های زیستی و غیرزیستی اکوسیستم های فضای سبز شهری. پژوهش های نوین علوم جغرافیایی، معماری و شهرسازی، ۳۶(۴)، ۶۱-۷۸.
- دری، شهرکی، سردار شهرکی. (۲۰۱۹). ارزیابی اقتصادی استفاده از پساب فاضلاب شهری و هزینه کنترل آلودگی در آبیاری فضای سبز شهر زاهدان. مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۵)، ۹۹-۱۱۱.
- دشتکی، بی همتا، مجیدی، اسلام، عزیزی نژاد. (۲۰۲۳). اثر تنش خشکی انتهای فصل بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی خصوصیات مورفولوژیک و فنولوژیک ژنوتیپ های گندم نان. مجله پژوهش های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران) (علمی)، ۳۶(۳)، ۲۶۲-۲۷۸.
- رجبی. (۲۰۲۵). تبیین چالش های نظری کیفیت هوای داخلی ساختمان های سبز و فرصت های بهبود آن. پژوهش های معماری نوین، ۵(۲)، ۴۳-۵۸.

- رومینا تفویضی، امین حبیبی، مهدی شیبانی، رزا وکیلی نژاد. (۲۰۲۲). نقش ارتفاع تاج پوشش گیاهی فضای سبز شهری بر آسایش زیست‌اقليمی انسان (نمونه موردی: پارک ناژوان اصفهان). آرایش فضایی جغرافیایی، ۱۲(۴۲).
- شاهرخی، احمد رضا، زارعیان. (۲۰۱۹). آلودگی‌های فضای سبز شهری حاصل از کاربرد آفت کش‌ها و راهکارهای کاهش خطرات آن. پژوهش‌های نوین علوم جغرافیایی، معماری و شهرسازی، ۱۹(۲)، ۱۷-۲۶.
- شکورزاده، .. صبا. (۲۰۲۲). تحلیل و بررسی مکانیابی و معیارهای برنامه‌ریزی فضای سبز شهری؛ مورد مطالعه فضاهای سبز شهری شهرستان خوی. معماری سبز، ۳۶(۸)، ۳۸-۵۱.
- شیرازیان، امیرفخریان، رهنما، محمدرحیم. (۲۰۲۳). تحلیل توزیع فضایی شیوع بیماری سرطان در شهر مشهد با رویکرد کیفیت محیط طبیعی شهری. برنامه ریزی توسعه کالبدی، ۹(۴)، ۴۷-۶۰.
- صادق پرتانی، سید محمد رضا مدنی، میر حسن سید سراجی. (۲۰۲۰). ارزیابی اثر میان مدت آبیاری با پساب تصفیه شده بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک. علوم محیطی.
- طاهری، سیده محدثه طاهری، بانژاد، کریمی میاندواب، هادی. (۲۰۲۴). بررسی امکان استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری با توجه به اثرات زیست محیطی آن (مطالعه موردی پساب خروجی تصفیه‌خانه لوکال چهل بازه). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۷(۶)، ۱۰۳۵-۱۰۵۲.
- عباسی کاسککی، کریم زاده. (۲۰۲۴). امکان‌سنجی استفاده مجدد از پساب در آبیاری فضای سبز (مورد مطالعه: فاضلاب شهر تربت حیدریه). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۸(۴)، ۵۴۵-۵۵۸.
- عمونیا، یوسفی روشن، جنگی، امیر حسن. (۲۰۲۵). ارزیابی اثرات کاهش سطح آب زیرزمینی بر پراکندگی پوشش گیاهی با مدل آنتروپی شانون (منطقه مورد مطالعه: شهرستان رشتخوار). کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، ۱۲(۲)، ۱۳۳-۱۵۰.
- قاسمی، ساره، سبزه‌علیان، اهتمام، سعیدی، قدرت اله. (۲۰۱۹). ارزیابی تحمل خشکی هیبرید بین‌گونه‌ای و چند ژنوتیپ گلرنگ با استفاده از شاخص‌های مقاومت به خشکی. به نژادی گیاهان زراعی و باغی، ۴(۱)، ۱۶۷-۱۸۱.