

ارزیابی عملکرد گونه‌های گیاهی مقاوم به تنش خشکی در توسعه فضای سبز شهری پایدار در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران

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:

توسعه و پایداری فضای سبز شهری در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران با چالش‌های جدی ناشی از کمبود منابع آب شیرین، افزایش دما، تبخیر و تعرق بالا و تکرار دوره‌های تنش خشکی مواجه است. در چنین شرایطی، انتخاب و به‌کارگیری گونه‌های گیاهی مقاوم به تنش خشکی، یکی از مؤثرترین راهبردهای مدیریت پایدار فضای سبز شهری به شمار می‌رود. این مقاله مروری با هدف ارزیابی عملکرد گونه‌های گیاهی مقاوم به تنش خشکی و تبیین نقش آن‌ها در توسعه فضای سبز شهری پایدار در جنوب ایران تدوین شده است. روش مطالعه بر پایه مرور نظام‌مند پژوهش‌های داخلی مرتبط با پاسخ‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان به تنش خشکی، مدیریت منابع آب، به‌ویژه استفاده از پساب تصفیه‌شده، و پیامدهای اکولوژیک و اجتماعی فضای سبز شهری استوار است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد گونه‌های مقاوم به خشکی با بهره‌گیری از مکانیسم‌هایی نظیر تنظیم اسمزی، افزایش تجمع اسمولیت‌ها، تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، حفظ پتانسیل آبی برگ و پایداری دستگاه فتوسنتزی، قادر به حفظ رشد نسبی، پوشش سبز و کارکردهای اکوسیستمی خود در شرایط کم‌آبی هستند. همچنین استفاده هدفمند از پساب تصفیه‌شده در آبیاری، در صورت انتخاب مناسب گونه‌های متحمل به شوری و پایش مستمر کیفیت خاک و آب، می‌تواند نقش قابل‌توجهی در کاهش فشار بر منابع آب شیرین داشته باشد. در مقابل، انتخاب نادرست گونه‌ها و مدیریت ناکارآمد منابع آب، منجر به کاهش کیفیت فضای سبز، افزایش هزینه‌های نگهداری و تضعیف خدمات زیست‌محیطی می‌شود. این مقاله تأکید می‌کند که توسعه فضای سبز شهری پایدار در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران مستلزم رویکردی تلفیقی مبتنی بر انتخاب گونه‌های مقاوم، مدیریت هوشمند آب، استفاده کنترل‌شده از پساب و برنامه‌ریزی بلندمدت اکولوژیک است؛ رویکردی که می‌تواند ضمن حفظ کیفیت زندگی شهروندان، تاب‌آوری شهری را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش دهد.

واژگان کلیدی: فضای سبز شهری، تنش خشکی، گونه‌های گیاهی مقاوم، اقلیم گرم و مرطوب، توسعه پایدار

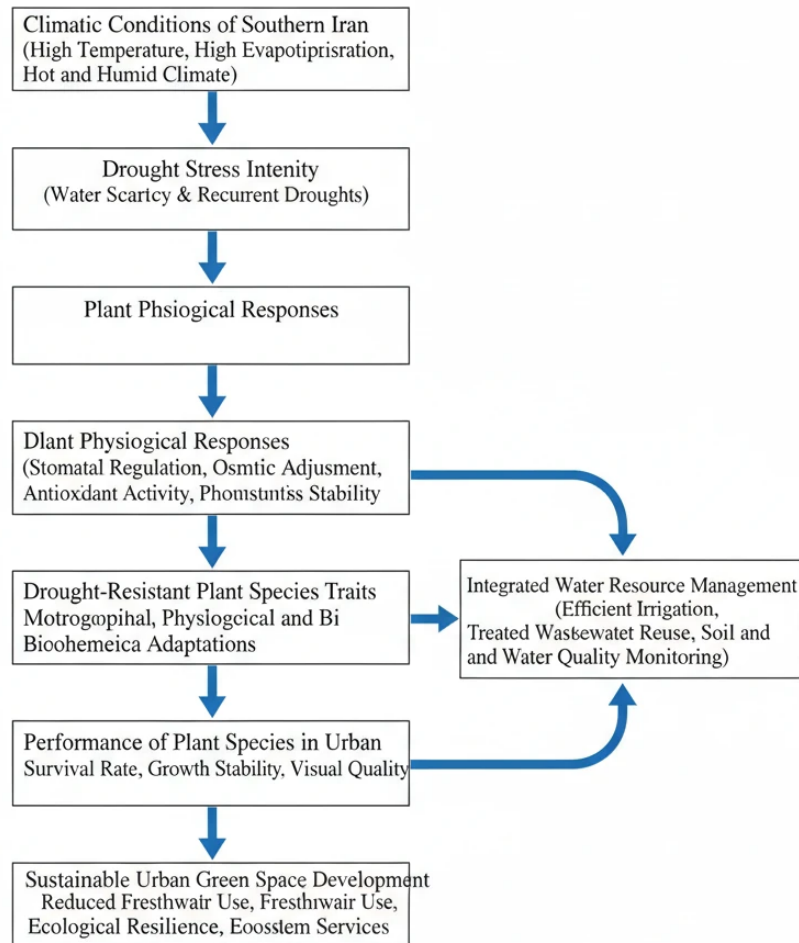
مقدمه

توسعه فضاهای سبز شهری به عنوان یک ضرورت انکارناپذیر در مدیریت شهری مدرن، نقشی حیاتی در ارتقاء کیفیت زندگی شهری، تعدیل ریزاقلیم و افزایش جذابیت بصری محیط ایفا می‌کند؛ با این حال، در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران، این امر با یک پارادوکس اساسی روبروست: تقاضای بالا برای ایجاد پوشش گیاهی سبز و شاداب در تضاد مستقیم با محدودیت‌های شدید منابع آب شیرین و وقوع دوره‌های مکرر و شدید خشکسالی‌های اقلیمی است که منجر به اعمال تنش خشکی مزمن بر گیاهان می‌شود. این شرایط محیطی خاص، که با دمای بالا و تبخیر و تعرق فزاینده همراه است، موجب می‌شود که بسیاری از گونه‌های گیاهی متداول در فضاهای سبز، به سرعت دچار استرس فیزیولوژیک شده و کارایی خود را از دست بدهند، امری که پایداری سرمایه‌گذاری‌های شهری در این بخش را زیر سوال می‌برد و هزینه‌های نگهداری، به‌ویژه در حوزه آبیاری، را به شدت افزایش می‌دهد (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). مسئله اصلی که مدیریت شهری جنوب را با آن مواجه می‌سازد، نحوه انتخاب و به‌کارگیری گونه‌هایی است که نه تنها از نظر زیبایی‌شناختی مطلوب باشند، بلکه دارای سطوح بالایی از تحمل و مقاومت ذاتی در برابر کم‌آبی و شرایط سخت محیطی جنوب کشور باشند، به گونه‌ای که نیاز آبی آن‌ها حداقل بوده و بقای بلندمدتشان تضمین شود (دری و همکاران، ۲۰۱۹).

نیاز به بازنگری در رویکردهای سنتی در طراحی فضای سبز شهری در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که اغلب بر واردات گونه‌های غیربومی با نیاز آبی بالا تأکید داشتند، اکنون به یک ضرورت مدیریتی تبدیل شده است؛ چرا که افزایش جمعیت شهری و محدودیت‌های روزافزون منابع آب زیرزمینی و سطحی، استفاده صرف از آب شیرین برای آبیاری فضای سبز را از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی غیرقابل توجیه می‌سازد و این امر مستلزم جایگزینی استراتژیک گونه‌ها با محوریت تاب‌آوری در برابر خشکی است (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). تأکید پژوهش‌های نوین بر شناسایی مکانیسم‌های بیولوژیکی مقاومت در گیاهان، از جمله تنظیم اسمزی، کنترل روزه‌ها و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، می‌تواند راهنمای دقیقی برای انتخاب گونه‌های مناسب ارائه دهد که در برابر شوک‌های خشکی واکنش مؤثرتری نشان دهند (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). بررسی دقیق عملکرد این گونه‌ها در محیط‌های شهری جنوب، با توجه به اثرات جزیره‌ای حرارت شهری و آلودگی‌های معمول، جنبه‌ای حیاتی از این پژوهش محسوب می‌شود که نیازمند داده‌های تجربی مستند است تا بتوان توصیه‌های عملی برای شهرداری‌ها ارائه کرد (احمدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳).

علاوه بر انتخاب گونه، نحوه مدیریت منابع آب موجود، به‌ویژه بهره‌گیری از پساب‌های شهری تصفیه‌شده به عنوان یک منبع جایگزین، بخش دیگری از راهکار پایداری است که باید با احتیاط مورد مطالعه قرار گیرد؛ استفاده از پساب‌ها می‌تواند بخشی از مشکل کم‌آبی را حل کند، اما این فرآیند خود می‌تواند تنش‌های جدیدی (مانند شوری یا تجمع فلزات سنگین) را به گیاه تحمیل نماید که نیازمند انتخاب گونه‌هایی با تحمل همزمان خشکی و شوری است (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). این تلفیق مدیریت آب و انتخاب گیاه، اساس توسعه یک فضای سبز شهری را تشکیل می‌دهد که نه تنها سبز باقی بماند، بلکه کمترین اتکا را به منابع آب شیرین داشته باشد و در عین حال، خدمات اکوسیستمی مورد انتظار شهروندان را به نحو مطلوب ارائه دهد (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، بیان مسئله این مقاله بر محوریت شکاف دانش موجود در مورد ارزیابی سیستماتیک و جامع گونه‌های گیاهی بومی و سازگار با شرایط تنش خشکی در بافت شهری جنوب ایران، و ارائه چارچوبی علمی برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در مدیریت فضای سبز پایدار، متمرکز است.

در محیط‌های شهری گرم و مرطوب، که اغلب با نوسانات شدید رطوبتی و حرارتی همراه هستند، گیاهان باید توانایی واکنش سریع به تغییرات محیطی را داشته باشند؛ این واکنش‌ها اغلب از طریق تغییرات در محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم‌های دفاعی انجام می‌گیرد که پارامترهای کلیدی در ارزیابی مقاومت هستند (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). عدم توجه به این جزئیات فیزیولوژیک در مرحله طراحی، منجر به ظهور پدیده‌هایی مانند زردی زودرس، کاهش رشد و در نهایت حذف و جایگزینی مکرر گیاهان می‌شود که اتلاف منابع مالی و زمانی شهرداری‌ها را به دنبال دارد و رضایتمندی عمومی را کاهش می‌دهد (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). لذا، یک رویکرد جامع‌نگر ضروری است که نه تنها بر مقاومت ظاهری گیاه تمرکز کند، بلکه مکانیسم‌های داخلی آن در مواجهه با تنش‌های محیطی چندگانه (حرارت، خشکی، و شاید شوری آب آبیاری) را نیز مورد سنجش قرار دهد (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). اهمیت این مطالعه در فراهم آوردن یک پایگاه داده علمی برای تسهیل فرآیند انتخاب گونه‌ها در پروژه‌های شهری جنوب کشور است؛ مناطقی که با وجود پتانسیل بالای اکولوژیکی، به دلیل معضلات مدیریتی در حوزه آب، اغلب با چالش‌های جدی در حفظ فضای سبز مواجه هستند و از منظر تأمین سلامت روان شهروندان و کاهش اثرات گرمای شهری، این فضاها نقشی حیاتی ایفا می‌کنند (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). این مقاله تلاش می‌کند تا با تکیه بر تحقیقات پیشین، چارچوبی تحلیلی برای ارزیابی گونه‌ها ارائه دهد که بتواند به سیاست‌گذاران شهری کمک کند تا از اتلاف منابع جلوگیری کرده و به سمت توسعه پایدار فضای سبز حرکت نمایند که در آن، گیاه انتخابی، نه تنها زنده بماند، بلکه بتواند کارکردهای اکولوژیکی و زیبایی‌شناختی خود را در طول دوره خشکی حفظ کند (صادق پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۱. مدل مفهومی ارزیابی عملکرد گونه‌های گیاهی مقاوم به تنش خشکی در توسعه فضای سبز شهری پایدار در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران.

مدل مفهومی ارائه شده در شکل ۱، چارچوب تحلیلی این مطالعه را برای تبیین روابط میان مؤلفه‌های اقلیمی، زیستی و مدیریتی مؤثر بر پایداری فضای سبز شهری در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران نشان می‌دهد. این مدل بیانگر آن است که شرایط اقلیمی حاکم، شامل دمای بالا و تبخیر و تعرق شدید، موجب افزایش شدت تنش خشکی و محدودیت دسترسی گیاهان به منابع آب می‌شود. در پاسخ به این تنش محیطی، گیاهان از طریق مجموعه‌ای از سازوکارهای فیزیولوژیک نظیر تنظیم روزه‌ها، تنظیم اسمزی، حفظ پایداری فتوسنتزی و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی واکنش نشان می‌دهند که این واکنش‌ها اساس شکل‌گیری صفات مقاومت به خشکی در گونه‌های مختلف گیاهی هستند. عملکرد این صفات در نهایت بر میزان بقا، رشد، کیفیت بصری و تحمل تنش گونه‌های گیاهی در فضای سبز شهری تأثیر می‌گذارد. در بخش پایانی مدل، توسعه فضای سبز شهری پایدار به عنوان برآیند انتخاب گونه‌های مقاوم و عملکرد مطلوب آن‌ها در شرایط کم‌آبی معرفی شده است که منجر به کاهش مصرف آب شیرین، افزایش تاب‌آوری اکولوژیکی و ارتقای خدمات اکوسیستمی شهری می‌گردد. همچنین، نقش مدیریت یکپارچه منابع آب، از جمله به‌کارگیری سامانه‌های آبیاری کارآمد و استفاده از پساب تصفیه‌شده، به

صورت یک عامل پشتیبان و تقویت کننده در بهبود عملکرد گونه‌ها و تحقق پایداری فضای سبز شهری در مدل لحاظ شده است.

تنش خشکی در اقلیم جنوب ایران صرفاً یک کمبود آب نیست، بلکه ترکیبی از دمای بالا، تابش شدید و رطوبت پایین هوا در طول روز است که اثرات تشدیدکننده بر گیاه دارد؛ لذا ارزیابی گونه‌ها باید در محیطی شبیه‌سازی شده یا واقعی با لحاظ کردن این متغیرهای محیطی انجام شود تا نتایج، قابلیت تعمیم به شرایط واقعی فضای سبز شهری را داشته باشند (عباسی کاسکی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). این امر، اهمیت پروژه‌هایی را نشان می‌دهد که بر ارزیابی عملکرد گیاهان تحت تنش‌های ترکیبی تمرکز دارند و به دنبال شناسایی ژنوتیپ‌هایی هستند که بتوانند تعادل بهینه‌ای بین رشد و سازگاری ایجاد کنند، به جای آنکه صرفاً بر روی یک مکانیسم دفاعی خاص تکیه کنند (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹). نهایتاً، ضرورت این مرور جامع در گرو ارائه راهکارهایی عملی برای کاهش مصرف آب فضای سبز شهری، با حفظ کیفیت بصری و اکولوژیکی آن، برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق اقلیمی کشور است. نظام سنتی مدیریت منابع آب فضای سبز شهری در جنوب ایران، به دلیل فقدان داده‌های کافی در مورد نیاز آبی واقعی گونه‌های بومی و سازگار، اغلب ناکارآمد بوده و منجر به هدررفت قابل توجه منابع شده است؛ این ناکارآمدی به طور مستقیم بر پایداری بلندمدت شهرها تأثیر می‌گذارد، چرا که فضای سبز به عنوان یک سیستم مدیریتی پیچیده، نیازمند ورودی‌های دقیق و حساب شده است (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). از این رو، این مقاله با تمرکز بر مبانی علمی انتخاب گونه‌ها، درصدد است تا فاصله میان نیازهای مدیریتی شهرداری‌ها و دانش اکوفیزیولوژیک گیاهان را در زمینه مقاومت به خشکی پر کند و مسیر حرکت به سوی یک فضای سبز انعطاف‌پذیر و تاب‌آور در اقلیم گرم و مرطوب جنوب را هموار سازد (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴).

۲. مبانی نظری تنش خشکی و پاسخ گیاهان در فضای سبز شهری

تنش خشکی به عنوان یک عامل محدود کننده اصلی در محیط‌های شهری جنوب ایران، فراتر از یک ساده کمبود آب در خاک عمل می‌کند و مجموعه‌ای از پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی پیچیده را در گیاهان شهری برمی‌انگیزد؛ این تنش زمانی تشدید می‌شود که دمای بالا و تابش شدید نور، نرخ تعرق را به شدت افزایش داده و گیاه را مجبور به بستن روزنه‌ها می‌کند که این خود منجر به کاهش فتوسنتز و در نتیجه توقف رشد و کاهش کارایی مصرف آب می‌شود (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). در فضای سبز شهری، به دلیل اثرات جزیره‌ای حرارت و محدودیت فضای ریشه‌ای، اثرات منفی خشکی غالباً تشدید شده و گیاهان در معرض استرس‌های چندگانه قرار می‌گیرند که بقای آن‌ها را به شدت به توانایی سازگاری‌شان وابسته می‌سازد (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). درک این سازوکارها برای شهرداری‌ها حیاتی است تا بتوانند با انتخاب گونه‌های دارای مکانیسم‌های دفاعی فعال، از بروز خسارات جبران‌ناپذیر جلوگیری نمایند (دری و همکاران، ۲۰۱۹).

پاسخ‌های اولیه گیاهان به خشکی معمولاً شامل تغییرات در پتانسیل آبی برگ‌ها و کاهش تورژسانس سلولی است که در نهایت بر ظرفیت فتوسنتزی تأثیر می‌گذارد؛ گونه‌های مقاوم، مانند بسیاری از گونه‌های سازگار با اقلیم‌های گرمسیری و نیمه‌گرمسیری، توانایی حفظ پتانسیل آبی برگ‌ها را برای مدت طولانی‌تری نسبت به گونه‌های حساس دارند، عمدتاً از طریق تنظیم مؤثر بسته و باز شدن روزنه‌ها، که یک تعادل ظریف بین حفظ آب و ادامه فتوسنتز را برقرار می‌سازد (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). این تنظیم روزنه‌ای تحت تأثیر هورمون آبسیدیک اسید (ABA) صورت می‌گیرد، که پیام‌رسان اصلی استرس خشکی در گیاهان محسوب می‌شود و کاهش تولید آن یا اختلال در مسیر سیگنال‌دهی آن، می‌تواند گیاه را در برابر تنش آسیب‌پذیر کند (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). در سطح سلولی، گیاهان برای مقابله با استرس اسمزی ناشی از خشکی،

اقدام به تجمع مواد محلول سازگار (اسمولیت‌ها) در سیتوپلاسم می‌کنند تا فشار اسمزی درون سلول را کاهش داده و جذب آب را تسهیل نمایند؛ این اسمولیت‌ها شامل پرولین، قندها و برخی اسیدهای آمینه هستند که نقش محافظتی در برابر دنا توره شدن پروتئین‌ها و تثبیت غشاهای سلولی ایفا می‌کنند (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). در گونه‌های مقاوم به خشکی که برای فضای سبز جنوب ایران پیشنهاد می‌شوند، سطح پرولین اغلب به عنوان یک بیومارکر مهم مقاومت اندازه‌گیری می‌شود؛ افزایش قابل توجه پرولین در پاسخ به کمبود آب، نشان‌دهنده یک استراتژی دفاعی فعال است که بقای سلول را در شرایط بحرانی تضمین می‌کند (احدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳). این مکانیسم‌های بیوشیمیایی، مبنای علمی برای غربالگری و انتخاب گونه‌های برتر هستند، زیرا مقاومت واقعی در سطح مولکولی ریشه دارد (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱).

یکی دیگر از پیامدهای کلیدی تنش خشکی، ایجاد استرس اکسیداتیو ناشی از افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند رادیکال‌های آزاد است که به ساختارهای حیاتی سلول از جمله غشای لیپیدی، پروتئین‌ها و DNA آسیب می‌زنند؛ برای مقابله با این آسیب، گیاهان مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی را فعال می‌کنند (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). سیستم آنتی‌اکسیدانی شامل آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (APX) و همچنین ترکیبات غیرآنزیمی نظیر آسکوربات و گلوتاتیون است که رادیکال‌های آزاد را خنثی‌سازی می‌کنند (کازمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). در گونه‌های مقاوم، فعالیت این آنزیم‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای پس از اعمال تنش افزایش می‌یابد، که این امر نشان‌دهنده توانایی بالای آن‌ها در مدیریت آسیب‌های اکسیداتیو و حفظ یکپارچگی سلولی در طول دوره‌های طولانی کم‌آبی است (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵).

تأثیرات بلندمدت خشکی بر ساختار و عملکرد فضای سبز شهری در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران، فراتر از مرگ گیاه است؛ این امر منجر به کاهش سایه‌اندازی، افزایش دمای سطح شهر و کاهش جذب آلاینده‌ها می‌شود که مستقیماً بر کیفیت زندگی شهروندان تأثیر می‌گذارد (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). گونه‌هایی که برای فضای سبز انتخاب می‌شوند باید علاوه بر تحمل خشکی، بتوانند در برابر شرایط محیطی شهری شامل خاک‌های فشرده، آلودگی‌های هوا و محدودیت‌های نوری در میان بافت متراکم شهری نیز مقاوم باشند؛ لذا انتخاب گونه مقاوم به خشکی باید در بستر تحمل‌پذیری چندعاملی صورت پذیرد (صادق پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). این رویکرد جامع‌نگر، تضمین‌کننده این است که سرمایه‌گذاری‌های شهری در حوزه فضای سبز، در برابر نوسانات اقلیمی آینده تاب‌آور باشند (عباسی کاسکی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). یکی از جنبه‌های مهم پاسخ فیزیولوژیک، واکنش سیستم آوند چوبی به کاویتاسیون (تشکیل حباب هوا در آوندها) است که جریان آب را مختل کرده و منجر به پژمردگی و مرگ گیاه می‌شود؛ گونه‌های مقاوم، اغلب دارای دیواره‌های آوندی با قابلیت انقباض و استحکام بیشتری هستند که از تشکیل و گسترش کاویتاسیون جلوگیری می‌کند (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹). این ویژگی ساختاری، به ویژه در درختان بلند شهری که نیاز به انتقال آب در ارتفاع زیاد دارند، اهمیت فوق‌العاده‌ای پیدا می‌کند، زیرا در شرایط کمبود آب، فشار منفی در سیستم آوند چوبی به حداکثر می‌رسد (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). شناخت این مقاومت‌های ساختاری در کنار پاسخ‌های بیوشیمیایی، چارچوب کاملی برای تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد. در بافت شهری جنوب ایران، به دلیل رطوبت نسبتاً بالای هوا (هرچند میزان بارندگی کم است)، گیاهان ممکن است با تعادل پیچیده‌ای از تنش گرمایی و رطوبتی مواجه باشند که متفاوت از شرایط صحرایی خشک است؛ این امر مستلزم آن است که مطالعات ارزیابی گونه‌ها، علاوه بر شرایط خشک، اثرات دما و رطوبت محیطی غالب بر شهر را نیز مد نظر قرار دهند (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). انتخاب گونه‌هایی که در شرایط گرم و مرطوب به خوبی عمل کرده‌اند و توانایی مدیریت آب خود را حفظ نموده‌اند، در اولویت قرار دارد تا فضای سبز شهری بتواند خدمات خود را در برابر تغییرات اقلیمی حفظ کند (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴).

۳. شاخص‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مقاومت به خشکی

ارزیابی دقیق مقاومت گونه‌های گیاهی در برابر تنش خشکی در فضای سبز شهری نیازمند استفاده از یک مجموعه شاخص‌های چندوجهی است که از سطح ظاهری (مورفولوژیک) تا سطح زیرساختی (فیزیولوژیک و بیوشیمیایی) را پوشش دهد؛ اتکای صرف به پارامترهای ظاهری مانند میزان پژمردگی، در شرایط استرس مزمن می‌تواند گمراه‌کننده باشد، زیرا گیاهان ممکن است پژمردگی ظاهری را برای حفظ بقا تحمل کنند اما کارایی فتوسنتزی آن‌ها به شدت کاهش یافته باشد (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲).

از منظر مورفولوژیک، شاخص‌هایی نظیر نرخ رشد نسبی (RGR)، سطح برگ (LA)، و شاخص نسبت برگ به ساقه (LAR) اطلاعات مهمی در مورد استراتژی رشد گیاه تحت محدودیت آب فراهم می‌آورند؛ گونه‌های مقاوم معمولاً تمایل دارند نسبت به گونه‌های حساس، در شرایط خشکی، تخصیص کمتری به تولید توده برگ جدید داشته باشند و بیشتر منابع را صرف حفظ ساختارهای موجود و توسعه سیستم ریشه‌ای (افزایش نسبت ریشه به ساقه) نمایند (صادق پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعات مربوط به فضای سبز شهری، که هدف حفظ زیبایی و پوشش است، کاهش شدید سطح برگ یک نقطه ضعف محسوب می‌شود، اما این کاهش در مقابل حفظ بقای گیاه در شرایط کم‌آبی، یک سازگاری ضروری تلقی می‌گردد (عباسی کاسکی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). شهرداری‌ها باید گونه‌هایی را انتخاب کنند که این کاهش رشد را به حداقل میزان ممکن برسانند در حالی که سازگاری فیزیولوژیک خود را حفظ می‌کنند (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳).

پتانسیل آبی برگ (Ψ_w) به عنوان مهم‌ترین شاخص فیزیولوژیک مقاومت به خشکی شناخته می‌شود، زیرا مستقیماً با فشار اسمزی و تورژسانس سلولی مرتبط است؛ گونه‌های مقاوم در برابر خشکی قادرند پتانسیل آبی برگ خود را در مقادیر منفی‌تری نسبت به گونه‌های حساس حفظ کنند، که این امر نشان‌دهنده سازگاری اسمزی قوی و توانایی جذب یا حفظ آب در شرایط سخت‌تر خاک است (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). اندازه‌گیری پتانسیل آبی در ساعات مختلف روز و در طول دوره اعمال تنش، تصویر جامعی از نحوه مدیریت آب توسط گیاه در شرایط اوج نیاز آبی شهری فراهم می‌آورد و برای کالیبره کردن برنامه آبیاری بسیار ضروری است (دری و همکاران، ۲۰۱۹).

در حوزه بیوشیمیایی، تجمع پرولین یکی از بارزترین پاسخ‌های دفاعی است که به عنوان یک اسمولیت محافظ عمل می‌کند و به تثبیت ساختارهای پروتئینی و غشایی کمک می‌نماید؛ ارزیابی کمیت پرولین در برگ‌ها یا ریشه‌ها پس از اعمال یک دوره خشک‌سازی کنترل‌شده، ارتباط مستقیمی با میزان سازگاری گیاه در محیط‌های شهری دارد (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). گونه‌هایی که دارای ظرفیت ذخیره‌سازی بالاتری از پرولین هستند، اغلب مقاومت بیشتری در برابر آسیب‌های اسمزی و اکسیداتیو نشان می‌دهند، که این موضوع لزوم اندازه‌گیری دقیق این متابولیت‌ها را در برنامه‌ریزی‌های فضاهای سبز شهری تأیید می‌کند (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵).

فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی، شامل آنزیم‌های SOD، CAT و ترکیبات فنلی، نشان‌دهنده قدرت دفاعی گیاه در برابر استرس اکسیداتیو ناشی از شرایط سخت اقلیمی جنوب است؛ افزایش فعالیت این آنزیم‌ها به موازات کاهش پتانسیل آبی، نشان‌دهنده یک پاسخ دفاعی هماهنگ است که در گونه‌های برتر مشاهده می‌شود (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). حفظ تعادل بین تولید ROS و فعالیت آنزیم‌های خنثی‌کننده، کلید حفظ سلامت کلروپلاست‌ها و در نتیجه تداوم فتوسنتز در طول تنش خشکی است و این امر به طور مستقیم بر پایداری فضای سبز شهری تأثیر می‌گذارد (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳).

استفاده از شاخص‌های غیرمستقیم مانند محتوای رنگدانه‌های کلروفیل و کاروتنوئید نیز اهمیت دارد؛ خشکی معمولاً منجر به تخریب کلروفیل و کاهش نسبت کاروتنوئید به کلروفیل می‌شود که نشان‌دهنده افزایش آسیب اکسیداتیو و کاهش ظرفیت جذب نور است (شاهری و زارعیان، ۲۰۱۹). گونه‌هایی که در برابر تخریب کلروفیل مقاومت نشان می‌دهند، یا به دلیل داشتن دیواره‌های پروتئینی محکم‌تر در اطراف رنگدانه‌ها، یا به دلیل تولید سریع‌تر کلروفیل پس از رفع تنش، عملکرد برتری دارند و برای حفظ پوشش بصری شهر ضروری هستند (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). در نهایت، باید به واکنش‌های وابسته به خاک اشاره کرد؛ اندازه‌گیری ظرفیت نگهداری آب در خاک اطراف ریشه گونه‌های مختلف و همچنین بررسی نحوه تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک تحت اثر تنش آبیاری گونه‌های مختلف، اطلاعات تکمیلی مهمی را فراهم می‌آورد؛ انتخاب گونه‌ای که بتواند به طور مؤثر با اکوسیستم خاک شهری (که اغلب فشرده و فقیر است) تعامل داشته باشد، مقاومت کلی سیستم فضای سبز را افزایش می‌دهد (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). این ارزیابی سه‌گانه (مورفولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی) چارچوبی جامع برای تصمیم‌گیری علمی در مدیریت فضای سبز پایدار در اقلیم جنوب ایران فراهم می‌آورد.

۴. نقش گونه‌های زراعی، باغی و دارویی مقاوم در فضای سبز شهری

استفاده از گونه‌های گیاهی با پتانسیل مقاومت بالا به خشکی، نه تنها یک استراتژی دفاعی در برابر تغییرات اقلیمی، بلکه یک رویکرد فعال در راستای تنوع‌بخشی به اکوسیستم‌های شهری جنوب ایران است؛ در این مناطق، باید از گونه‌های بومی یا سازگار شده‌ای استفاده شود که پتانسیل‌های چندمنظوره (زیبایی، سایه‌اندازی، قابلیت زراعی و حتی دارویی) را به همراه مقاومت فیزیولوژیکی لازم داشته باشند (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). تنوع‌بخشی به گونه‌های مورد استفاده در فضای سبز، ریسک کلی سیستم را کاهش می‌دهد؛ به طوری که شکست یک گونه به دلیل شرایط نامساعد، کل فضای سبز را تحت تأثیر قرار نخواهد داد (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). گونه‌های زراعی مقاوم، مانند برخی از انواع علف‌های هرز یا گیاهان پوششی که توانایی رشد سریع و تثبیت خاک را دارند، می‌توانند به عنوان پوشش‌دهنده زمین (Groundcover) در مناطقی که نیاز به نگهداری کمتری دارند، مورد استفاده قرار گیرند؛ این گیاهان اغلب دارای سیستم ریشه‌ای گسترده‌ای هستند که به جذب بهتر رطوبت‌های سطحی و کاهش تبخیر از سطح خاک کمک می‌کنند (دری و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا، انتخاب گونه‌هایی که قابلیت تثبیت شن و جلوگیری از فرسایش خاک در حاشیه فضاهای سبز را نیز دارند، یک مزیت مدیریتی دوگانه برای شهرداری‌ها محسوب می‌شود (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳).

در مورد گونه‌های باغی (درختان و درختچه‌ها)، که ستون فقرات فضاهای سبز شهری را تشکیل می‌دهند، تأکید بر روی گونه‌هایی است که مکانیسم‌های مقاومت در برابر کاویتاسیون و سازگاری اسمزی قوی دارند؛ مطالعات نشان داده‌اند که بسیاری از گونه‌های متعلق به خانواده‌های سازگار با مناطق مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک، نظیر برخی گونه‌های خانواده موراسه یا اولئاسه، می‌توانند عملکرد مطلوبی در این شرایط داشته باشند، به شرطی که نرخ رشد آن‌ها در زمان جوان‌تر با آبیاری کافی تأمین شود تا به بلوغ و مقاومت ذاتی برسند (احمدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده از گونه‌هایی با چوب متراکم و سیستم آوندی کارآمد در برابر تشکیل حباب‌های هوا، حیاتی است (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴).

یکی از پتانسیل‌های کمتر مورد توجه در فضای سبز شهری، بهره‌گیری از گونه‌های دارویی بومی است که علاوه بر زیبایی، خواص درمانی و کاربردی برای شهروندان دارند و نیاز به نگهداری کمتری نیز نشان می‌دهند؛ بسیاری از گیاهان دارویی مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری، به طور طبیعی استراتژی‌های دفاعی قوی‌تری در برابر تنش‌های محیطی از جمله خشکی ایجاد کرده‌اند که این امر منجر به تجمع ترکیبات ثانویه مفیدی می‌شود (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). ادغام این گیاهان در

طراحی فضای سبز می‌تواند بر ارزش افزوده و پذیرش عمومی این فضاها بیفزاید (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). در مدیریت شهری، باید توجه ویژه‌ای به «سازگاری عملکردی» داشت؛ یعنی گونه‌ای انتخاب شود که نه تنها زنده بماند، بلکه بتواند خدمات مورد انتظار (مانند سایه‌دهی یا کاهش آلاینده‌ها) را در شرایط استرس خشکی نیز ارائه دهد (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). برای مثال، گونه‌ای با کاهش کم در مساحت برگ در شرایط کم‌آبی، حتی اگر اندکی کندتر رشد کند، از گونه‌ای که در ابتدا سریع رشد کرده اما در مواجهه با اولین دوره خشکی دچار ریزش برگ‌های گسترده می‌شود، ارجحیت دارد (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). این موضوع نیازمند کاتالوگ‌سازی دقیق بر اساس داده‌های عملکردی تحت شرایط تنش واقعی است (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲).

تنوع گونه‌ها در فضای سبز شهری جنوب ایران، همچنین به مدیریت بهتر آفات و بیماری‌ها کمک می‌کند؛ فضای سبز تک‌کشتی (Monoculture)، حتی با گونه‌های مقاوم، آسیب‌پذیری بالایی دارد، در حالی که تنوع زیستی حاصل از انتخاب چند گونه مقاوم، تعادل اکولوژیکی را تقویت کرده و نیاز به استفاده از سموم شیمیایی را که خود می‌توانند برای گیاهان استرس‌زا باشند، کاهش می‌دهد (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). این اصل پایداری زیستی، با انتخاب گونه‌هایی که میزبان طبیعی دشمنان طبیعی آفات نیز هستند، تقویت می‌شود (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). بهره‌برداری از گونه‌های بومی منطقه جنوب ایران که تکامل یافته‌اند تا در برابر خشکی‌های دوره‌ای مقاومت کنند، باید در اولویت قرار گیرد، زیرا این گیاهان با شرایط خاک منطقه (از نظر بافت و pH) نیز سازگاری بیشتری دارند و نیاز به اصلاحات اساسی در محیط کشت شهری ندارند (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). این رویکرد مبتنی بر اکولوژی منظر، نه تنها مصرف آب را کاهش می‌دهد، بلکه وابستگی شهرداری‌ها به واردات و نگهداری گونه‌های حساس را به حداقل رسانده و پایداری بلندمدت فضای سبز را تضمین می‌کند (صادق پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰).

۵. مدیریت منابع آب، پساب تصفیه‌شده و پیامدهای اکولوژیک

یکی از مهم‌ترین محورهای توسعه فضای سبز شهری پایدار در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران، بازنگری ریشه‌ای در نحوه تأمین و مدیریت منابع آب است؛ با توجه به بحران شدید منابع آب شیرین، اتکا به آبیاری با پساب تصفیه‌شده به عنوان یک راهبرد جایگزین، اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است، اگرچه این راهبرد مستلزم مدیریت دقیق پیامدهای اکولوژیک و فیزیولوژیک آن بر روی گیاهان است (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). استفاده از پساب، به ویژه پساب ثانویه تصفیه‌شده، می‌تواند به طور قابل توجهی فشار بر آبخوان‌ها و منابع آب آشامیدنی را کاهش دهد، مشروط بر آنکه کیفیت پساب از نظر شوری و غلظت مواد مغذی و آلاینده‌ها کنترل شود (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از پساب، افزایش شوری محیط کشت است؛ بسیاری از گونه‌های گیاهی فضای سبز به غلظت بالای نمک‌ها حساس هستند و آبیاری مداوم با پساب می‌تواند منجر به سمیت یونی و استرس اسمزی ثانویه شود که حتی گونه‌های مقاوم به خشکی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، انتخاب گونه‌هایی که نه تنها تحمل خشکی، بلکه تحمل شوری بالایی نیز دارند، امری ضروری است؛ این امر نیازمند پژوهش‌های دقیق بر روی پاسخ‌های همزمان این گیاهان به تنش‌های ترکیبی خشکی و شوری (Afsharnia et al., 2025) است تا از بروز آسیب‌های شدید بیوشیمیایی جلوگیری شود (احمدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳).

در کنار شوری، میزان نیتروژن موجود در پساب می‌تواند به عنوان یک منبع کود عمل کند، اما در صورت غلظت بیش از حد، می‌تواند منجر به رشد روبشی بیش از حد و در نتیجه افزایش نیاز آبی و کاهش مقاومت به سایر تنش‌ها شود؛ گونه‌های فضای

سبز باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بتوانند نیتروژن موجود را به نحو کارآمدی جذب و متابولیزه کنند بدون اینکه دچار رشد نامتعادل شوند (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). این مدیریت مواد مغذی از طریق پساب، جنبه‌ای از پایداری تغذیه‌ای فضای سبز شهری است که باید در کنار مدیریت آبیاری در نظر گرفته شود (کاظمی نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). از سوی دیگر، تکنیک‌های نوین آبیاری مانند آبیاری قطره‌ای دقیق و کنترل شده با استفاده از سنسورهای رطوبت خاک، نقش محوری در بهینه‌سازی مصرف آب و مدیریت کارآمد پساب دارند؛ این سیستم‌ها امکان اعمال آب در منطقه ریزوسفر (ریشه) و در زمان دقیق نیاز گیاه را فراهم می‌آورند و از هدررفت آب به دلیل رواناب یا تبخیر سطحی جلوگیری می‌کنند (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). در اقلیم گرم و مرطوب، تبخیر مستقیم از سطح خاک بسیار بالاست، لذا پوشش‌دهی مناسب سطح خاک (با مالچ یا گونه‌های پوششی مقاوم) در ترکیب با آبیاری نقطه‌ای، استراتژی موافق برای کاهش اتلاف آب محسوب می‌شود (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱).

بررسی پیامدهای اکولوژیک استفاده از پساب بر سلامت خاک شهری نیز حیاتی است؛ تجمع فلزات سنگین یا پاتوژن‌های احتمالی در اثر استفاده مکرر از پساب، می‌تواند ساختار میکروارگانیسم‌های مفید خاک را تغییر داده و بر سلامت گیاه و در نهایت شهروندان تأثیر بگذارد (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). برای جلوگیری از این امر، ضروری است که فضای سبز شهری به عنوان یک سیستم بسته با پایش مداوم کیفیت آب خروجی (از نظر فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زا) مدیریت شود، به ویژه در مناطقی که تماس مستقیم شهروندان با خاک یا پوشش گیاهی زیاد است (دری و همکاران، ۲۰۱۹). تلفیق برنامه‌ریزی آبیاری با نیاز آبی واقعی گونه‌های مقاوم، که از طریق اندازه‌گیری تبخیر و تعرق مرجع و ضرایب گیاهی تعیین می‌شود، یک رویکرد مبتنی بر شواهد است؛ گونه‌هایی که در این مقاله شناسایی شده‌اند، باید بر اساس نیاز آبی محاسبه شده خود در مدل‌های آبیاری قرار گیرند تا آبیاری بیش از حد (که در اثر ترس از خشکی رخ می‌دهد) و کم‌آبی همزمان مدیریت شوند (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). این رویکرد دقیق، مصرف آب را تا حد امکان کاهش داده و پایداری سیستم را تضمین می‌کند (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). در نهایت، مدیریت منابع آب در فضای سبز شهری جنوب ایران باید بر اساس اصل «اولویت‌بندی منابع» استوار باشد؛ بدین معنا که پساب تصفیه شده در درجه اول برای آبیاری گونه‌های با نیاز آبی متوسط و مقاوم به شوری استفاده شود، در حالی که آب شیرین فقط برای گونه‌های حساس یا در مراحل بحرانی رشد (مانند استقرار اولیه نهال) و یا در مناطقی که تماس عمومی بسیار بالاست، استفاده گردد (صادق پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). این تفکیک منابع آبی، یک استراتژی مدیریتی کلیدی برای افزایش تاب‌آوری شهری در برابر کمبود آب است (عباسی کاسکی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴).

۶. فضای سبز شهری، سلامت، کیفیت زندگی و توسعه پایدار

فضای سبز شهری نقشی فراتر از صرفاً زیبایی‌شناختی ایفا می‌کند؛ این فضاها به عنوان زیرساختی حیاتی در ارتقاء سلامت عمومی شهروندان در اقلیم گرم و مرطوب جنوب عمل می‌کنند، به ویژه از طریق تعدیل اثرات مخرب موج‌های گرمایی و کاهش آلودگی هوا؛ با این حال، کارایی این خدمات اکوسیستمی مستقیماً به سلامت و تراکم پوشش گیاهی وابسته است که توسط تنش خشکی به شدت تهدید می‌شود (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). گونه‌های مقاوم به خشکی، که می‌توانند سبزی‌نگی خود را در شرایط کم‌آبی حفظ کنند، امکان تداوم سایه‌اندازی و تبخیر و تعرق خنک‌کننده را فراهم می‌آورند و به طور مؤثر دمای محیط شهری را کاهش می‌دهند (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). سلامت روانی و جسمی شهروندان ارتباط تنگاتنگی با دسترسی به فضاهای سبز با کیفیت دارد؛ مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مشاهده مناظر طبیعی سبز، استرس را کاهش داده و رفاه ذهنی را بهبود می‌بخشد (صادق پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). زمانی که فضای سبز در اثر خشکی زرد شده یا دچار

ریزش برگ شود، این اثرات مثبت کاهش یافته و حس بی‌توجهی مدیریتی در شهروندان تقویت می‌شود، که این امر رضایتمندی از محیط زندگی را متأثر می‌سازد (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، انتخاب گونه‌های مقاوم، سرمایه‌گذاری مستقیم بر روی سرمایه اجتماعی و سلامت روان جامعه شهری است (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳).

توسعه پایدار شهری، که هدف نهایی مدیریت شهری است، مستلزم ادغام سه رکن اساسی: اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است؛ فضای سبز مقاوم به خشکی در این میان، پلی میان این سه رکن ایجاد می‌کند؛ از جنبه اقتصادی، کاهش مصرف آب و هزینه‌های جایگزینی گیاهان مرده، منجر به صرفه‌جویی منابع مالی شهرداری می‌شود (عباسی کاسکی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). از منظر زیست‌محیطی، حفظ پوشش گیاهی باعث تداوم جذب کربن و بهبود کیفیت هوا در مناطق شهری می‌شود، که در اقلیم جنوب با آلودگی‌های صنعتی و گرد و غبار، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹).

یکی دیگر از جنبه‌های مهم سلامت شهری، کاهش اثر جزیره حرارتی است؛ گیاهان با تبخیر و تعرق، انرژی را مصرف کرده و دمای محیط اطراف را کاهش می‌دهند؛ این فرآیند در گونه‌های مقاوم به خشکی که کمتر دچار بسته شدن روزنه‌ها می‌شوند، کارایی بیشتری دارد، حتی اگر میزان آب مصرفی آن‌ها پایین باشد (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). انتخاب گونه‌هایی که دارای سطح برگ قابل قبول و نفوذپذیری روزنه‌ای مناسب در شرایط گرمای محیطی جنوب هستند، به معنای داشتن یک سیستم تهویه طبیعی و مؤثر شهری است که هزینه‌های انرژی تهویه مطبوع ساختمان‌ها را نیز کاهش می‌دهد (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). تنوع زیستی در فضای سبز شهری، که به طور غیرمستقیم توسط انتخاب گونه‌های مقاوم تقویت می‌شود، به پایداری بلندمدت کمک می‌کند؛ فضاهای سبز شهری باید به عنوان زیستگاه‌هایی برای پرندگان، حشرات مفید و گرده‌افشان‌ها عمل کنند (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). گونه‌هایی که تحت تنش خشکی از بین می‌روند، زیستگاه‌ها را از بین می‌برند؛ در مقابل، گونه‌های سازگار و مقاوم، حتی در فصول خشک، می‌توانند منابع غذایی و سرپناه لازم برای این گونه‌های همراه را فراهم آورند و از این طریق به حفظ تعادل اکولوژیکی شهری یاری رسانند (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴). در چارچوب توسعه پایدار، برنامه‌ریزی برای آینده مستلزم در نظر گرفتن سناریوهای بدبینانه تغییر اقلیم است؛ انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی نه تنها وضعیت فعلی را حفظ می‌کند، بلکه انعطاف‌پذیری سیستم فضای سبز شهری را در برابر شوک‌های اقلیمی آینده افزایش می‌دهد (احمدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳). این رویکرد پیشگیرانه، در تضاد با رویکرد واکنشی جایگزینی گیاهان مرده است و موجب می‌شود منابع مالی شهری به جای صرف شدن بر تعمیرات مستمر، صرف توسعه و ارتقاء کیفیت فضاهای سبز شود (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱).

۷. چالش‌های مدیریتی، زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی شهری

اجرای موفقیت‌آمیز استراتژی انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی در فضای سبز شهری جنوب ایران، با مجموعه‌ای از چالش‌های ساختاری، مدیریتی و فنی در سطح برنامه‌ریزی شهری مواجه است که غلبه بر آن‌ها مستلزم هماهنگی بین بخشی و تغییر پارادایم‌های مدیریتی سنتی است (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). چالش اصلی در سطح برنامه‌ریزی، فقدان یک کاتالوگ ملی یا منطقه‌ای استاندارد برای معرفی و تأیید گونه‌های مناسب برای شرایط اقلیمی گرم و مرطوب تحت تنش خشکی است؛ شهرداری‌ها اغلب بر اساس سلیقه یا در دسترس بودن نهال، گونه‌ها را انتخاب می‌کنند که نتیجه آن استفاده از گونه‌های با نیاز آبی بالا و غیربومی است (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از بزرگترین موانع مدیریتی، مقاومت سازمان‌های اجرایی در برابر تغییرات است؛ تیم‌های فضای سبز عادت به نگهداری گونه‌های خاصی دارند و آموزش مجدد پرسنل برای مدیریت گونه‌های جدید با نیازهای متفاوت (مثلاً تحمل شوری پساب یا نیاز به هرس کمتر) یک فرآیند زمان‌بر و پرهزینه است (دری

و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، زنجیره تأمین نهال در منطقه جنوب، اغلب به ندرت منابع کافی از گونه‌های بومی و مقاوم با کیفیت ژنتیکی بالا را فراهم می‌کند، که این امر انتخاب را محدود می‌سازد (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲).

از منظر زیست‌محیطی، استفاده از پساب‌های تصفیه‌شده، اگرچه ضروری است، اما نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان در زیرساخت‌های تصفیه و شبکه‌های توزیع مجزا است؛ چالش فنی در اینجا، تضمین کیفیت پایدار پساب است، به طوری که غلظت املاح مضر (به ویژه بور و سدیم) همواره زیر حد تحمل گونه‌های انتخابی باقی بماند (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). عدم وجود نظارت کافی بر کیفیت پساب در زمان‌های مختلف سال، می‌تواند منجر به آسیب ناگهانی به گیاهان شده و اعتماد عمومی به این روش بازچرخانی آب را از بین ببرد (احمدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳). چالش دیگر، مسائل مربوط به خاک است؛ خاک‌های مناطق شهری جنوب ایران اغلب از نظر بافتی نامناسب بوده و دارای فشردگی بالا هستند، که این امر نفوذپذیری آب را کاهش داده و شرایط ریشه‌ای نامساعدی را فراهم می‌آورد (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). گیاهان مقاوم به خشکی باید قادر به عملکرد در این خاک‌های سخت باشند؛ لذا، برنامه‌ریزی شهری باید شامل طرح‌هایی برای اصلاح ساختار خاک در محل کاشت (مانند استفاده از کمپوست یا بهبوددهنده‌های خاک) در کنار انتخاب گونه باشد، هرچند که این امر هزینه‌های اولیه اجرا را افزایش می‌دهد (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳).

مسئله شفافیت در داده‌ها و ارزیابی عملکرد، یک چالش مدیریتی مهم است؛ اغلب اطلاعات موجود در مورد عملکرد بلندمدت گونه‌های گیاهی تحت تنش‌های ترکیبی در محیط واقعی شهری (شامل آلودگی و خاک فشرده)، ناقص است (کازمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). شهرداری‌ها نیازمند ایجاد پایگاه‌های داده‌ای هستند که عملکرد گونه‌ها را بر اساس شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در طول سال‌های مختلف پایش کنند تا تصمیمات آن‌ها مبتنی بر شواهد عملی باشد نه فرضیات (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). یکی از چالش‌های برنامه‌ریزی شهری، دید کوتاه‌مدت پروژه‌های عمرانی است؛ فضای سبز یک سرمایه‌گذاری بلندمدت است که نتایج پایداری آن پس از چندین سال نمایان می‌شود، اما برنامه‌ریزی‌ها اغلب چرخه‌های کوتاه‌تری دارند که باعث می‌شود پس از استقرار اولیه، نگهداری و پایش طولانی‌مدت گونه‌های مقاوم نادیده گرفته شود (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). این امر نیازمند الزام قانونی برای تخصیص بودجه مستمر برای نگهداری منطبق با استراتژی پایداری و خشکی است (صادق پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). چالش مربوط به جنبه‌های زیبایی‌شناختی در برابر پایداری نیز مطرح است؛ شهروندان معمولاً به دنبال فضاهای سبز با ظاهری همیشه شاداب و متراکم هستند که با فلسفه "فضای سبز کم‌آب" در تضاد است؛ آموزش عمومی و آگاه‌سازی شهروندان در مورد مزایای اکولوژیکی گونه‌های مقاوم و تحمل نوسانات ظاهری جزئی در برابر صرفه‌جویی در آب، یک ضرورت برنامه‌ریزی شهری است (عباسی کاسکی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). این نیاز به تغییر فرهنگی درک عمومی از فضای سبز پایدار وجود دارد (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹).

نتیجه‌گیری، جمع‌بندی تحلیلی و پیشنهادها

در جمع‌بندی تحلیلی این مقاله مروری، مشخص شد که توسعه فضای سبز شهری پایدار در اقلیم گرم و مرطوب جنوب ایران به شدت منوط به گذار از الگوهای سنتی آبیاری‌محور به رویکردهای اکوفیزیولوژیک مبتنی بر انتخاب گونه‌های مقاوم به تنش خشکی است؛ چالش اصلی این مناطق، نه فقط کمبود آب، بلکه ترکیب دمای بالا، تابش شدید و نیاز به حفظ خدمات اکوسیستمی مانند تعدیل حرارت است که این امر، اهمیت ارزیابی دقیق شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مقاومت را برجسته می‌سازد (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱؛ شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). گونه‌های موفق در این محیط باید دارای

مکانیزم‌های پیشرفته‌ای در تنظیم اسمزی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالا و توانایی حفظ پتانسیل آبی برگ در شرایط بحرانی باشند (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳).

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از پساب تصفیه‌شده یک ضرورت برای حفظ فضای سبز در این مناطق است، اما این راهکار به طور خودکار منجر به پایداری نمی‌شود؛ بلکه نیازمند انتخاب گونه‌هایی است که بتوانند به طور همزمان تنش خشکی و شوری ناشی از پساب را تحمل کنند (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵؛ دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). مدیریت منابع آب در جنوب ایران باید بر پایه تفکیک منابع و آبیاری دقیق مبتنی بر نیاز واقعی گیاه (کالیبره‌شده برای گونه‌های مقاوم) استوار باشد، به جای تکیه بر برنامه‌های زمانی ثابت و پرمصرف (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹؛ دری و همکاران، ۲۰۱۹). توسعه فضای سبز مقاوم، مستقیماً به ارتقاء سلامت شهروندان و دستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک می‌کند، زیرا تداوم خدمات تعدیل حرارت و کیفیت هوا را تضمین می‌نماید؛ اما تحقق این امر در گرو غلبه بر چالش‌های مدیریتی، به‌ویژه فقدان کاتالوگ‌های تأیید شده گونه‌ها و مقاومت‌های سازمانی در برابر به‌کارگیری روش‌های نوین است (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ ولی و همکاران، ۲۰۲۲). برنامه‌ریزی شهری باید از نگاه کوتاه‌مدت به فضای سبز فاصله گرفته و بر سرمایه‌گذاری بلندمدت در نگهداری و پایش گونه‌های سازگار تأکید نماید (صادق پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰).

پیشنهادهای کاربردی:

۱. ایجاد بانک ژن فضای سبز مقاوم: پیشنهاد می‌شود شهرداری‌ها با همکاری مراکز تحقیقاتی، پروژه‌هایی را برای غربالگری گسترده گونه‌های بومی جنوب ایران بر اساس شاخص‌های فیزیولوژیک در شرایط تنش ترکیبی (خشکی و شوری پساب) تعریف کنند و یک کاتالوگ جامع و به‌روز از گونه‌های توصیه شده برای مناطق شهری (درختان، درختچه‌ها، پوششی) تدوین و اجباری سازند (احدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳؛ کیانی و همکاران، ۲۰۲۵).
۲. توسعه زیرساخت آبیاری هوشمند با پساب: تخصیص بودجه برای ایجاد شبکه‌های آبیاری ثانویه مختص پساب و نصب سیستم‌های آبیاری قطره‌ای هوشمند مبتنی بر سنسورهای رطوبت خاک، برای به حداقل رساندن اتلاف آب و اطمینان از توزیع مناسب مواد مغذی موجود در پساب (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ طاهری و همکاران، ۲۰۲۴).
۳. برنامه‌های آموزش و ترویج: اجرای دوره‌های آموزشی مستمر برای مهندسان فضای سبز و کارگران فنی شهرداری‌ها در خصوص مدیریت نگهداری گونه‌های مقاوم به خشکی، و کمپین‌های آگاهی‌بخشی عمومی برای تغییر درک شهروندان از مفهوم فضای سبز پایدار و پذیرش نوسانات ظاهری جزئی در ازای صرفه‌جویی در آب (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴؛ شکورزاده و صبا، ۲۰۲۲).
۴. تحقیق بر روی تنش‌های ترکیبی: تمرکز تحقیقات آینده بر ارزیابی پاسخ‌های همزمان گونه‌ها به تنش‌های چندگانه رایج در جنوب ایران، شامل خشکی، گرمای شدید و شوری (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵؛ برکباف، ۲۰۲۴؛ اورک و نیسی، ۲۰۲۴)، برای تضمین انتخاب گونه‌هایی با بالاترین سطوح تاب‌آوری در عمل (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴؛ تفویضی و همکاران، ۲۰۲۲).
۵. پایش سلامت خاک: ایجاد برنامه مدون برای پایش دوره‌ای کیفیت خاک (به ویژه در مناطقی که با پساب آبیاری می‌شوند) از نظر تجمع نمک و فلزات سنگین، برای اطمینان از عدم بروز آسیب‌های طولانی‌مدت زیست‌محیطی ناشی از بازچرخانی آب (عباسی کاسککی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴؛ احدی‌راد و همکاران، ۲۰۲۳).

منابع

- 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 کنگرفرنکی (*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.
- برکباف، 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، خانه، ... 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 ژنوتیپهای 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 زیست اقلیمی انسان (نمونه موردی: پارک نازوان اصفهان). آرایش فضایی جغرافیایی، ۱۲(۴۲)، ۱۲-۴۲.
- شاهرخی، احمد رضا، زارعیان. (۲۰۱۹). آلودگی های فضای سبز شهری حاصل از کاربرد آفت کش ها و راهکارهای کاهش خطرات آن. پژوهش های نوین علوم جغرافیایی، معماری و شهرسازی، ۱۹(۲)، ۱۷-۲۶.
- شکورزاده، .. صبا. (۲۰۲۲). تحلیل و بررسی مکانیایی و معیارهای برنامه ریزی فضای سبز شهری؛ مورد مطالعه فضاهای سبز شهری شهرستان خوی. معماری سبز، ۳۶(۸)، ۳۸-۵۱.
- شیرازیان، امیر فخریان، 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 ویژگی های 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 تصفیه خانه لوکال چهل بازه). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۷(۶)، ۱۰۳۵-۱۰۵۲.
- عباسی کاسککی، کریم زاده. (۲۰۲۴). امکان سنجی 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 آنترپوی شانون (منطقه مورد مطالعه: شهرستان رشتخوار). کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی، ۱۲(۲)، ۱۳۳-۱۵۰.
- قاسمی، ساره، سبزیلیان، اهتمام، سعیدی، قدرت اله. (۲۰۱۹). ارزیابی تحمل خشکی هیبرید بین گونه ای و چند ژنوتیپ گلرنگ با استفاده از شاخص های مقاومت به خشکی. به نژادی گیاهان زراعی و باغی، ۴(۱)، ۱۶۷-۱۸۱.
- 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، آزموده. (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 پر مصرف 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.