

امکان سنجی فنی، زیست محیطی و بهداشتی استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری فضای سبز

شهری

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:

با گسترش شهرنشینی، افزایش جمعیت و تشدید پدیده تغییر اقلیم، مدیریت پایدار منابع آب به یکی از اساسی ترین چالش های پیش روی مدیران شهری و شهرداری ها تبدیل شده است. فضای سبز شهری به عنوان یکی از مهم ترین زیرساخت های اکولوژیکی شهرها، نقش کلیدی در بهبود کیفیت هوا، تعدیل اقلیم شهری، کاهش جزیره حرارتی، ارتقای سلامت جسمی و روانی شهروندان و افزایش پایداری زیست محیطی ایفا می کند، اما نگهداری و توسعه آن مستلزم تأمین پایدار آب است. در شرایط محدودیت منابع آب شیرین و افت سطح آب های زیرزمینی، استفاده از پساب تصفیه شده شهری به عنوان یک منبع آب جایگزین، رویکردی عملی و اجتناب ناپذیر محسوب می شود. هدف از این مقاله مروری، امکان سنجی فنی، زیست محیطی و بهداشتی استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری فضای سبز شهری با تمرکز بر دیدگاه کارشناسان باغبانی و مدیریت شهری است. در این مطالعه، با اتکا به نتایج پژوهش های انجام شده در داخل کشور، اثرات پساب بر رشد گیاهان فضای سبز، ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک، شوری، عناصر غذایی، فلزات سنگین و نیز پیامدهای بهداشتی و زیست محیطی کوتاه مدت و بلندمدت مورد بررسی تحلیلی قرار گرفته است. یافته ها نشان می دهد که پساب تصفیه شده، در صورت برخورداری از کیفیت مناسب و مدیریت صحیح، می تواند بخش قابل توجهی از نیاز آبی فضای سبز شهری را تأمین کرده و هم زمان از طریق تأمین عناصر غذایی، مصرف کودهای شیمیایی را کاهش دهد. با این حال، چالش هایی نظیر تجمع نمک ها، افزایش نسبت جذب سدیم، انباشت تدریجی فلزات سنگین و ریسک های بهداشتی ناشی از پاتوژن ها، نیازمند پایش مستمر، انتخاب گونه های گیاهی مقاوم، استفاده از روش های آبیاری کارآمد و اعمال سطوح مناسب تصفیه هستند. در مجموع، نتایج این بررسی تأکید می کند که استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری فضای سبز شهری، در چارچوب یک برنامه مدیریتی یکپارچه، مبتنی بر استانداردهای فنی، زیست محیطی و بهداشتی، می تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش تاب آوری شهری، حفاظت از منابع آب و تحقق توسعه پایدار شهری مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: پساب تصفیه شده، آبیاری فضای سبز شهری، شوری خاک، سلامت شهری، توسعه پایدار

مقدمه

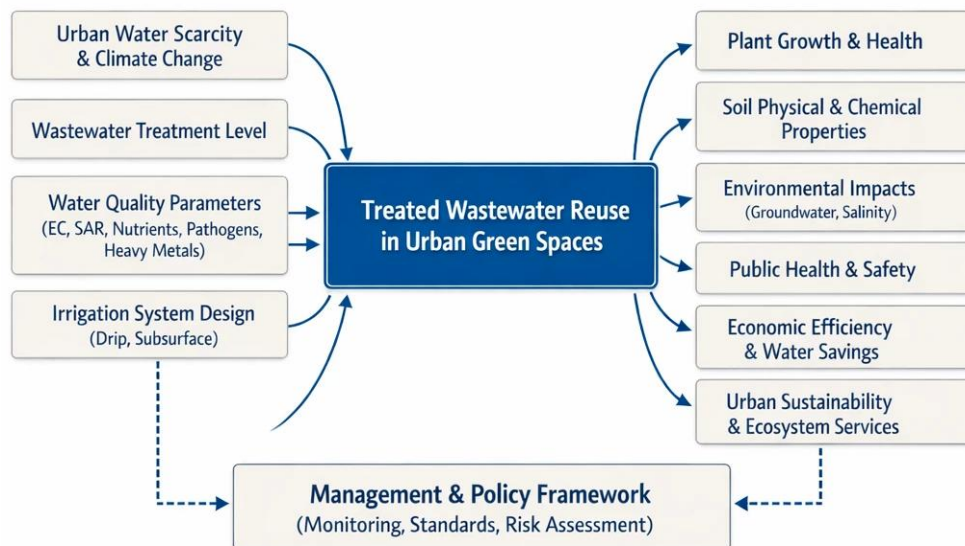
تأمین منابع آب کافی برای توسعه شهری و حفظ خدمات اکوسیستمی شهری، به ویژه فضای سبز، همواره یکی از چالش‌های اصلی پیش روی مدیران شهرداری بوده است؛ در شرایط فعلی که جهان با پدیده جهانی تغییر اقلیم و کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی و سطحی مواجه است، رویکردهای سنتی تأمین آب دیگر پاسخگو نیستند و لزوم نوآوری در مدیریت منابع آب مطرح می‌شود (اورک و نیسی، ۲۰۲۴). فضای سبز شهری نه تنها از نظر زیبایی‌شناختی و تعدیل اقلیم شهری حائز اهمیت است، بلکه نقش حیاتی در بهبود کیفیت هوا، کاهش پدیده جزیره حرارتی شهری و ارتقاء سلامت روانی شهروندان ایفا می‌کند، و این کارکردها مستلزم تأمین منظم و کافی آب است (دری و همکاران، ۲۰۱۹). در مقابل، میزان تولید فاضلاب در شهرها، به موازات افزایش جمعیت و توسعه زیرساخت‌ها، رو به فزونی گذاشته و دفع نامناسب آن به محیط زیست، خود تهدیدی جدی محسوب می‌شود؛ بنابراین، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده به عنوان یک منبع ثانویه آب، یک راهکار دوگانه محسوب می‌شود که هم مشکل کمبود آب را تا حدی مرتفع می‌سازد و هم بار زیست‌محیطی تخلیه پساب را کاهش می‌دهد (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). این رویکرد، که در ادبیات جهانی تحت عنوان "بازچرخانی آب" شناخته می‌شود، نیازمند ارزیابی دقیق و چندوجهی است تا اطمینان حاصل شود که کاربردهای مورد نظر، به ویژه آبیاری فضای سبز، بدون به خطر انداختن سلامت عمومی و پایداری اکوسیستم شهری صورت می‌گیرد؛ این امر به ویژه برای کارشناسان باغبانی که مستقیماً با سلامت گیاه و کیفیت خاک در ارتباط هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵).

ضرورت حرکت به سوی اقتصاد چرخشی آب در بافت شهری، با توجه به افزایش سطح تنش آبی که مناطق مختلف کشور تجربه می‌کنند، بیش از پیش نمایان شده است؛ الگوهای بارش نامنظم و کاهش ورودی به منابع سنتی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های تصفیه و بازتوزیع پساب را توجیه‌پذیر می‌سازد (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴). فضای سبز شهری، به ویژه پارک‌ها، کمربندهای سبز و باغ‌های عمومی، به دلیل دسترسی نسبتاً محدودتر شهروندان عادی و عدم تماس مستقیم با محصولات خوراکی، یکی از بهترین کاندیداها برای استفاده از پساب در مقایسه با آبیاری محصولات زراعی یا شرب محسوب می‌شود (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، کیفیت پساب حتی پس از تصفیه، همچنان حاوی ترکیبات آلی و معدنی محلول است که در صورت عدم نظارت صحیح می‌تواند اثرات نامطلوبی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، جذب عناصر توسط گیاهان و سلامت عمومی شهر ایجاد نماید؛ لذا، تدوین دستورالعمل‌های فنی مبتنی بر داده‌های علمی برای اطمینان از ایمنی این کاربرد ضروری است (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳).

امکان‌سنجی فنی شامل بررسی این موضوع است که آیا پساب تصفیه‌شده می‌تواند نیازهای آبی گیاهان فضای سبز را بدون ایجاد تنش‌های آبی یا شوری برطرف کند؛ این بررسی‌ها باید شامل تحلیل دقیق پارامترهای کیفی نظیر هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، نیتروژن، فسفر و همچنین پسماندهای میکروبی و فلزات سنگین باشد (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). در بسیاری از مناطق، پساب‌ها می‌توانند به عنوان منبع غنی از عناصر غذایی اصلی مانند نیتروژن و فسفر عمل کنند که این امر می‌تواند منجر به کاهش نیاز به مصرف کودهای شیمیایی در نگهداری فضای سبز شود؛ این جنبه اقتصادی-زیست‌محیطی، بازیافت منابع را تقویت می‌بخشد (شاهری و زارعیان، ۲۰۱۹). با این حال، این مزیت باید در برابر خطر بالقوه تجمع نمک‌ها و برهم‌کنش آن‌ها با بافت خاک و نیاز آبی گیاه سنجیده شود، چرا که آبیاری طولانی‌مدت با آب با هدایت الکتریکی بالا می‌تواند به تدریج منجر به تخریب ساختمان خاک و کاهش نفوذپذیری گردد (کاضمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳).

ملاحظات زیست‌محیطی بخش دیگری از این امکان‌سنجی را تشکیل می‌دهد که فراتر از محیط مستقیم خاک و گیاه است؛ این ملاحظات شامل تأثیرات بالقوه بر آب‌های زیرزمینی در صورت نفوذ آب شور یا آلوده از طریق منطقه ریشه، و همچنین پیامدهای بهداشتی ناشی از مواجهه کارکنان خدمات شهری و شهروندان با پساب یا ذرات معلق حاوی پاتوژن‌هاست (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای یا زیرسطحی به جای آبیاری بارانی می‌تواند ریسک تماس مستقیم و تولید آئروسول‌های حاوی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا را به میزان چشمگیری کاهش دهد (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). لذا، در تدوین سیاست‌های استفاده از پساب، باید یک چارچوب نظارتی قوی مبتنی بر تحلیل خطر (Risk Assessment) برای تضمین ایمنی محیط زیست و سلامت عمومی استقرار یابد تا پایداری بلندمدت این رویکرد تضمین شود (آزادی و همکاران، ۲۰۲۳). از منظر کارشناسی باغبانی، انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب برای آبیاری با پساب یک عنصر کلیدی در موفقیت این طرح‌ها است؛ برخی گونه‌ها به دلیل تحمل بالاتر به شوری یا جذب کمتر فلزات سنگین نسبت به دیگران ارجحیت دارند (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). شناسایی گیاهانی که به طور طبیعی در اکوسیستم‌های با شوری نسبتاً بالاتر رشد می‌کنند و توانایی مدیریت تجمع مواد محلول را دارند، می‌تواند استراتژی کاهش ریسک را بهبود بخشد (پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، نوع تصفیه پساب (مثلاً حذف کامل مواد مغذی یا کنترل فلزات سنگین) مستقیماً بر انتخاب گونه‌ها تأثیر می‌گذارد؛ یک سیستم تصفیه پیشرفته می‌تواند دامنه انتخاب گونه‌های زینتی و چمنی را گسترش دهد (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵).

برنامه‌ریزی شهری و ملاحظات اقتصادی نیز در قابلیت اجرایی این پروژه نقش محوری دارند؛ احداث زیرساخت‌های انتقال و توزیع پساب نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجهی است، اما در بلندمدت، صرفه‌جویی در هزینه‌های تأمین آب شیرین و هزینه‌های مربوط به دفع پساب، می‌تواند بازگشت سرمایه را توجیه‌پذیر سازد (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). توسعه پایدار شهری مستلزم در نظر گرفتن این ملاحظات اقتصادی در کنار جنبه‌های فنی و زیست‌محیطی است؛ همچنین، شفافیت در مورد کیفیت پساب و خطرات احتمالی برای جلب اعتماد عمومی و پذیرش اجتماعی این راهکار حیاتی است (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵). در مجموع، این مقاله مروری تلاش دارد تا با ترکیب یافته‌های موجود در زمینه کیفیت پساب، واکنش‌های گیاهی و خاکی، و الزامات مدیریتی، یک چارچوب تحلیلی مستحکم برای کارشناسان شهرداری فراهم آورد تا بتوانند با دیدگاهی جامع، امکان‌سنجی عملیاتی استفاده از پساب تصفیه‌شده در شبکه فضای سبز شهری را به سرانجام برسانند؛ این امر مستلزم تلفیق دانش مهندسی تصفیه با دانش تخصصی باغبانی و اکولوژی شهری است (رجبی، ۲۰۲۵).



شکل ۱. مدل مفهومی امکان‌سنجی فنی، زیست‌محیطی و بهداشتی استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری فضای سبز شهری و ارتباط آن با پایداری شهری و خدمات اکوسیستمی.

مدل مفهومی ارائه‌شده در شکل ۱ چارچوبی یکپارچه برای تحلیل ابعاد مختلف استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری فضای سبز شهری را نشان می‌دهد. در این مدل، عوامل زمینه‌ای شامل کمبود آب شهری و تغییر اقلیم، سطح و نوع تصفیه پساب، پارامترهای کیفی آب (نظیر هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، عناصر غذایی، پاتوژن‌ها و فلزات سنگین) و طراحی سیستم‌های آبیاری به‌عنوان ورودی‌های اصلی در نظر گرفته شده‌اند که بر فرآیند بازچرخانی پساب در فضای سبز شهری اثر می‌گذارند. پیامدهای این فرآیند در قالب پاسخ‌های گیاهی و خاکی، اثرات زیست‌محیطی بر منابع آب و شوری خاک، ملاحظات بهداشتی و ایمنی عمومی، کارایی اقتصادی و صرفه‌جویی در مصرف آب، و در نهایت ارتقای پایداری شهری و خدمات اکوسیستمی منعکس می‌شود. در این میان، چارچوب مدیریت و سیاست‌گذاری شامل پایش مستمر، استانداردهای کیفی و ارزیابی ریسک، به‌عنوان عنصر کنترلی و تنظیم‌کننده، نقش کلیدی در تضمین ایمنی و پایداری بلندمدت استفاده از پساب در سیستم‌های فضای سبز شهری ایفا می‌کند.

۲. چارچوب نظری و ضرورت استفاده از پساب در تنش آبی

استفاده از منابع آب غیرمتعارف، از جمله پساب تصفیه‌شده، دیگر یک گزینه انتخابی نیست، بلکه یک الزام استراتژیک برای مدیریت پایدار منابع آب در مناطق شهری تحت تأثیر کمبود آب است؛ این تغییر پارادایم از "تأمین آب از منابع اولیه" به "بازچرخانی آب" با هدف حفظ اکوسیستم‌های طبیعی و تضمین نیازهای حیاتی انسانی صورت می‌گیرد (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). در مناطقی که نرخ تبخیر بالا و بارش کم است، مانند بسیاری از کلان‌شهرهای کشور، وابستگی مطلق به آب‌های زیرزمینی برای آبیاری فضای سبز، که می‌تواند بخش قابل توجهی از مصرف آب شهری را شامل شود، منجر به فرونشست زمین و کاهش پایداری منابع می‌شود (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، پساب تصفیه‌شده به عنوان "آب مجازی" در

نظر گرفته می‌شود که می‌تواند نیازهای آبی بخش‌هایی را که بالاترین حساسیت زیست‌محیطی را ندارند، برطرف سازد (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵).

تغییر اقلیم پیامدهای پیچیده‌ای بر منابع آب دارد، از جمله افزایش دما که منجر به افزایش تبخیر و تعرق و در نتیجه افزایش نیاز آبی گیاهان می‌شود، در حالی که ممکن است منابع ورودی کاهش یابند (اورک و نیسی، ۲۰۲۴). این وضعیت، نیاز به منابع آب جایگزین را تشدید می‌کند؛ پساب، به ویژه پسایی که با استانداردهای مورد قبول برای آبیاری غیرخوراکی تصفیه شده باشد، می‌تواند بخش عمده‌ای از نیاز آبی فضای سبز را تأمین کند و فشار را از روی منابع بکر کم کند (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). بررسی‌ها نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی برای استفاده از پساب باید به صورت سیستمی و با در نظر گرفتن توزیع فضایی نیاز آبی و دسترسی به زیرساخت‌های انتقال پساب صورت پذیرد تا بازده اقتصادی و زیست‌محیطی به حداکثر برسد (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴). از منظر علمی، پساب‌های شهری دارای غلظت‌های متفاوتی از مواد مغذی (N و P) و شوری (EC) هستند؛ در حالی که مواد مغذی می‌توانند به عنوان یک مزیت تلقی شده و نیاز به کوددهی را کاهش دهند (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹)، شوری یک عامل محدودکننده اصلی محسوب می‌شود. اگر هدایت الکتریکی پساب از یک حد مشخص (معمولاً ۱.۵ تا ۳ دسی‌زیمنس بر متر بسته به نوع گیاه و خاک) بالاتر باشد، می‌تواند پتانسیل اسمزی خاک را افزایش داده و جذب آب توسط ریشه را مختل کند، که نتیجه آن تنش آبی القایی حتی در شرایط مرطوب خاک خواهد بود (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). این موضوع به طور مستقیم با تخصص کارشناس باغبانی مرتبط است که باید بر تعادل بین مزایای تغذیه‌ای و ریسک شوری نظارت نماید (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵).

ملاحظات مربوط به فلزات سنگین نیز در چارچوب تنش‌های بلندمدت زیست‌محیطی قرار می‌گیرند؛ هرچند پساب‌های شهری معمولاً فاقد غلظت‌های بسیار بالای فلزات سنگین (مانند صنایع سنگین) هستند، اما انباشت تدریجی این عناصر در لایه‌های بالایی خاک و جذب بالقوه توسط گیاهان، یک نگرانی بلندمدت است (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). مدیریت این ریسک مستلزم اطمینان از اجرای مؤثر مراحل تصفیه ثانویه و در صورت لزوم، استفاده از گیاهانی است که آستانه تحمل بالاتری دارند یا به دلیل عدم مصرف انسان، ریسک ورود آن‌ها به زنجیره غذایی را به حداقل می‌رسانند (دری و همکاران، ۲۰۱۹). آب‌های زیرزمینی به عنوان منبع اصلی تأمین آب شهری، در معرض تهدید ناشی از برداشت بیش از حد قرار دارند؛ استفاده از پساب در آبیاری فضای سبز شهری، به خصوص در پارک‌های بزرگ با مساحت وسیع، می‌تواند به طور قابل توجهی از سرعت افت سطح آب‌های زیرزمینی بکاهد و زمان بیشتری برای بازسازی طبیعی منابع فراهم آورد (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). این راهکار به طور مستقیم با هدف مدیریت منابع آب در شرایط بحرانی همسو است و از منظر برنامه‌ریزی منطقه‌ای، یک اقدام پیشگیرانه محسوب می‌شود (رجبی، ۲۰۲۵).

نقش پوشش گیاهی در این میان دوگانه است: از یک سو، گیاهان مصرف‌کننده آب پساب هستند و باید تحمل کافی در برابر ترکیبات آن داشته باشند؛ از سوی دیگر، گونه‌های منتخب می‌توانند به عنوان فیلترهای طبیعی عمل کنند و بخشی از آلاینده‌های باقی‌مانده در پساب را جذب یا متابولیزه کنند (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). انتخاب گونه‌های مقاوم به شوری، مانند برخی از درختان و درختچه‌های بومی مناطق خشک، که دارای سازگاری‌های فیزیولوژیکی برای مدیریت غلظت نمک در بافت‌های خود هستند، می‌تواند موفقیت طرح را تضمین کند (پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). در نهایت، اجرای موفقیت‌آمیز طرح‌های استفاده مجدد از پساب نیازمند یکپارچه‌سازی میان بخش‌های مختلف شهری است؛ مهندسان تصفیه باید پارامترهای خروجی را با نیازهای باغبانی و محیط زیست هماهنگ سازند، و مدیران شهری باید زیرساخت‌های لازم برای جداسازی شبکه

توزیع پساب از شبکه آب شرب را فراهم آورند (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). این یکپارچگی است که امکان دستیابی به اهداف توسعه پایدار و کاهش آسیب پذیری شهری در برابر خشکسالی را میسر می سازد (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵).

پیامدهای اقتصادی نیز در چارچوب تنش آبی اهمیت می یابد؛ در صورت کمبود شدید آب، هزینه تأمین آب برای نگهداری فضای سبز از طریق منابع متعارف می تواند به حدی افزایش یابد که اجرای یک سیستم مستقل پساب رسانی مقرون به صرفه به نظر برسد، حتی با در نظر گرفتن هزینه های تصفیه و توزیع ثانویه (برکباف، ۲۰۲۴). این تحلیل هزینه-فایده باید همواره وضعیت خاص هر شهر و هزینه های فرصت استفاده از آب شیرین در بخش های اولویت دارتر (مانند شرب و صنعت) را لحاظ کند (عباسی کاسکی و کریمزاده، ۲۰۲۴).

۳. اثرات فنی پساب بر رشد گیاهان، خاک، شوری و عناصر غذایی

کیفیت پساب تصفیه شده مهم ترین عامل تعیین کننده در امکان سنجی فنی استفاده از آن در آبیاری فضای سبز است و کارشناسان باغبانی باید تحلیل دقیقی از پارامترهای شیمیایی آن داشته باشند؛ این پارامترها مستقیماً بر رشد گیاه، سلامت خاک و پایداری اکوسیستم تأثیر می گذارند (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از مزایای اصلی استفاده از پساب، تأمین مواد مغذی است؛ پسابها معمولاً حاوی غلظت های قابل توجهی از نیتروژن (به صورت نترات و آمونیوم) و فسفر (به صورت فسفات) هستند که عناصر ضروری برای فتوسنتز و رشد رویشی گیاهان محسوب می شوند (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). در یک مطالعه موردی، مشاهده شد که آبیاری با پساب می تواند نیاز به کوددهی نیتروژنه را تا ۵۰ درصد کاهش دهد، که این امر هم از نظر اقتصادی و هم از نظر کاهش آلودگی های محیطی ناشی از رواناب کود حائز اهمیت است (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). اما بزرگترین چالش فنی، شوری آب آبیاری است که عمده تاً توسط هدایت الکتریکی (EC) اندازه گیری می شود؛ تجمع یون های سدیم (Na^+)، کلر (Cl^-) و سولفات (SO_4^{2-}) در منطقه ریشه، با افزایش پتانسیل اسمزی، مانع جذب آب شده و منجر به تنش آبی غیرضروری در گیاه می گردد (کاظمی نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). برای گونه های حساس فضای سبز، مانند بسیاری از چمن ها یا گیاهان زینتی ظریف، لازم است پساب از طریق تصفیه پیشرفته (مانند اسمز معکوس) نمک زدایی شود، که این امر هزینه پروژه را به شدت افزایش می دهد (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). در مقابل، استفاده از گونه های مقاوم تر به شوری، مانند برخی از درختان بومی مناطق خشک، می تواند امکان استفاده مستقیم از پساب با EC متوسط را فراهم آورد (پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰).

نسبت جذب سدیم (SAR) یک پارامتر حیاتی دیگر است که بر ساختمان فیزیکی خاک تأثیر می گذارد؛ سدیم بالا باعث جایگزینی کاتیون های مفیدی مانند کلسیم و منیزیم بر روی کمپلکس تبادل کلوئیدی خاک شده و منجر به پراکندگی ذرات ریز خاک (رس و سیلت) می شود (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). این پدیده به کاهش تخلخل، افت شدید نفوذپذیری و در نهایت سفت شدن سطح خاک (خاک سازی) منجر می شود که مانع تهویه ریشه و نفوذ آب در بلندمدت می گردد؛ این موضوع برای کارشناس باغبانی به معنای نیاز به اعمال مداوم مواد اصلاح کننده خاک (مانند گچ) و شستشوی منظم خاک است (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). اثرات فلزات سنگین بر رشد گیاه و خاک باید به دقت پایش شود؛ عناصری مانند کادمیوم، سرب، نیکل و روی، حتی در غلظت های پایین، می توانند در گیاهان تجمع یابند و در صورت انتقال به بخش های خوراکی (اگرچه فضای سبز شهری معمولاً غیرخوراکی است، اما ریسک انتقال به محیط زیست وجود دارد) یا از طریق خاک به سایر بخش های اکوسیستم وارد شوند (درویش بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). سازوکارهای جذب فلزات توسط گیاهان پیچیده است و تحت تأثیر pH خاک و حضور سایر لیگاندها قرار دارد؛ گیاهان مختلف آستانه های تحمل متفاوتی دارند و برخی گونه ها مانند

گیاهان جمع کننده زیستی (Hyperaccumulators) ممکن است برای تثبیت آلودگی های خاص استفاده شوند، هرچند در فضای سبز شهری این کاربرد محدود است (ولی و همکاران، ۲۰۲۲).

تأثیر بر pH خاک نیز باید مورد توجه قرار گیرد؛ اگرچه پساب اغلب نزدیک به خنثی است، اما حضور نیتروژن آمونیومی می تواند پس از نیتریفیکاسیون منجر به اسیدی شدن موضعی خاک در اطراف ریشه شود، که این امر می تواند حلالیت و جذب برخی عناصر دیگر، از جمله آلومینیوم در غلظت های بالا، را تغییر دهد (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). در مقابل، در خاک های اسیدی، پساب ممکن است به دلیل داشتن یون های بیکربنات، خاصیت بافری ایجاد کند و از کاهش بیشتر pH جلوگیری نماید (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). مدیریت آبیاری با پساب نیازمند دقت بالا در اجرای رژیم آبیاری است؛ آبیاری بیش از حد با پساب، به دلیل شوری بالاتر نسبت به آب شیرین، می تواند منجر به اشباع منطقه ریشه شود که این خود باعث کاهش اکسیژن محلول و آسیب به ریشه می گردد، حتی اگر گیاه به شوری مقاوم باشد (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴). استفاده از سیستم های آبیاری با کارایی بالا مانند آبیاری قطره ای، که نفوذ عمیق و آهسته آب را تضمین می کند، به کاهش تبخیر سطحی و جلوگیری از تجمع نمک در نزدیکی سطح خاک کمک می کند (عباسی کاسکی و کریم زاده، ۲۰۲۴).

از منظر اقتصادی-فنی، میزان تصفیه مورد نیاز به طور مستقیم بر هزینه نهایی آب تأثیر می گذارد؛ اگر پساب تنها برای آبیاری درختان مقاوم به شوری استفاده شود، تصفیه ثانویه ساده کفایت می کند، اما برای چمنزارهای مناطق پرتدد، نیاز به تصفیه پیشرفته برای حذف پاتوژن ها و کاهش شوری ضروری است (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵). ارزیابی دقیق نیاز واقعی آبی گونه های غالب فضای سبز شهری و انطباق آن با ویژگی های کیفی پساب موجود، سنگ بنای امکان سنجی فنی پایدار است (برکباف، ۲۰۲۴). در نهایت، باید در نظر داشت که ویژگی های پساب در طول زمان و با تغییر الگوهای مصرف و فصل ها متغیر است؛ پایش مداوم کیفیت پساب در نقطه مصرف (توری خروجی شبکه توزیع) برای تنظیم رژیم کوددهی و آبیاری ضروری است تا از اثرات ناخواسته فنی جلوگیری شود؛ این پایش باید به طور خاص بر تغییرات در غلظت نمک ها و میکروآلاینده ها تمرکز کند (آزادی و همکاران، ۲۰۲۳).

۴. پیامدهای زیست محیطی کوتاه مدت و بلندمدت

استفاده مجدد از پساب در مقیاس شهری، پیامدهای زیست محیطی گسترده ای در کوتاه مدت و بلندمدت بر سیستم های محیطی شهری و حومه اعمال می کند که ارزیابی آن ها برای تصمیم گیری کارشناسان شهرداری حیاتی است (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). در کوتاه مدت، مهم ترین مزیت زیست محیطی، کاهش بار آلاینده های تخلیه شده به رودخانه ها، دریاچه ها و آب های زیرزمینی است؛ این امر به بهبود کیفیت اکوسیستم های آبی دریافت کننده پساب کمک کرده و از فرآیندهای یوتریفیکاسیون ناشی از ورود بیش از حد نیتروژن و فسفر جلوگیری می کند (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، کاهش برداشت از منابع آب شیرین، فشار هیدرولوژیکی بر سفره های آب زیرزمینی را کم کرده و اثرات مخرب ناشی از آن مانند کاهش سطح آب و نفوذ آب شور را کاهش می دهد (اورک و نیسی، ۲۰۲۴).

با این حال، پیامدهای منفی کوتاه مدت معمولاً به کیفیت پساب بستگی دارد؛ اگر پساب دارای بار میکروبی بالایی باشد (علیرغم تصفیه اولیه)، خطر انتقال پاتوژن ها به محیط زیست اطراف فضای سبز و همچنین آلودگی سطحی ناشی از رواناب های احتمالی وجود دارد (درویش بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). برای کاهش این ریسک، استفاده از پساب با درجه تصفیه بالا (مانند پساب ثانویه پیشرفته یا ضد عفونی شده) برای مناطقی که احتمال تماس عمومی وجود دارد، ضروری است (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴).

۲۰۲۴). در بلندمدت، اثرات زیست‌محیطی عمدتاً با انباشت ترکیبات شیمیایی در خاک و آب‌های زیرزمینی مرتبط است؛ همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، تجمع نمک‌ها (به ویژه سدیم) می‌تواند ساختار خاک را به طور برگشت‌ناپذیر تغییر دهد و آن را برای استفاده‌های آبی (حتی در صورت تغییر منبع آبی) نامناسب سازد؛ این امر مستلزم یک برنامه مدیریت شستشوی خاک (Leaching Requirement) است که باید در برنامه آبیاری گنجانده شود (کازمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). این فرآیند شستشو، خود باعث افزایش تخلیه آب آلوده به مواد محلول به زیر حریم ریشه می‌شود که باید برای آن راهکار دفع مناسبی در نظر گرفته شود (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵).

اثرات بلندمدت تجمع فلزات سنگین نیز نگران‌کننده است؛ با وجود اینکه گیاهان می‌توانند فلزات را جذب کنند، اما اگر غلظت‌ها از آستانه تحمل گیاه فراتر رود یا اگر پساب حاوی مقادیر زیادی از یک فلز خاص باشد، این عناصر در خاک تجمع یافته و خطر فرسایش و انتقال به محیط‌های مجاور را افزایش می‌دهند (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات بلندمدت نشان می‌دهد که حتی فلزاتی مانند روی (Zn) که برای گیاه ضروری است، در غلظت‌های بالاتر می‌توانند سمیت ایجاد کنند و با سایر عناصر حیاتی (مانند آهن) رقابت نمایند (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). علاوه بر مواد مغذی و فلزات، پساب حاوی میکروآلاینده‌ها (مانند داروها، مواد بهداشتی شخصی، و ترکیبات آلی پایدار) است که سیستم‌های تصفیه معمولاً به طور کامل آن‌ها را حذف نمی‌کنند (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). اثرات بلندمدت این ترکیبات بر حیات میکروبی خاک و همچنین پتانسیل تجمع آن‌ها در زنجیره‌های غذایی محلی در فضای سبز، نیازمند تحقیقات پایش مستمر است، هرچند که ریسک انتقال آن‌ها به محیط‌های حساس کمتر است (دری و همکاران، ۲۰۱۹).

از منظر حفظ پوشش گیاهی، در صورت عدم انتخاب گونه‌های مناسب، تأثیر زیست‌محیطی منفی شامل مرگ و میر گیاهان به دلیل سمیت نمک یا عناصر خاص (مانند بور یا سدیم) بروز می‌کند که موجب از دست رفتن پوشش گیاهی و افزایش فرسایش خاک می‌شود (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). این وضعیت به طور مستقیم بر کارایی منظر شهری و نقش محیطی فضای سبز تأثیر منفی می‌گذارد (پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). برنامه‌ریزی برای بازیافت بلندمدت خاک نیز اهمیت دارد؛ اگر پس از سال‌ها آبیاری، خاک دچار اشباع از نمک و سدیم شود، عملیات احیای خاک می‌تواند بسیار پرهزینه و زمان‌بر باشد، که این امر پایداری پروژه را در طولانی مدت به چالش می‌کشد (آزادی و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و شیمیایی خاک قبل از شروع پروژه، برای تخمین نرخ تجمع سالانه آلاینده‌ها، یک اقدام پیشگیرانه زیست‌محیطی ضروری است (رجبی، ۲۰۲۵). در نهایت، تأثیر بر تنوع زیستی محلی، به ویژه جوامع میکروبی خاک و حشرات گرده‌افشان، از دیگر جنبه‌های زیست‌محیطی است که می‌تواند تحت تأثیر مواد شیمیایی موجود در پساب قرار گیرد؛ ارزیابی پایداری زیستی خاک باید به عنوان بخشی از مطالعات بلندمدت گنجانده شود تا اطمینان حاصل شود که خدمات اکوسیستمی فضای سبز شهری حفظ می‌گردد (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵).

۵. ملاحظات بهداشتی و سلامت شهروندان

در زمینه استفاده از پساب تصفیه‌شده در فضای سبز شهری، ملاحظات بهداشتی و سلامت شهروندان از اولویت‌های اصلی تصمیم‌گیری برای هر کارشناس شهرداری است؛ هدف اصلی این است که ضمن بهره‌برداری از منبع آب ثانویه، هیچ‌گونه ریسک بهداشتی قابل ملاحظه‌ای برای کارکنان خدمات شهری، کاربران فضای سبز و ساکنین مجاور ایجاد نشود (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). ریسک‌های بهداشتی عمدتاً از دو منبع ناشی می‌شوند: آلودگی میکروبی (باکتری‌ها، ویروس‌ها، کیست‌های انگلی) و آلودگی شیمیایی (فلزات سنگین و میکروآلاینده‌ها) (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). استانداردهای

ملی و بین‌المللی برای پساب مورد استفاده در آبیاری، معمولاً بر حذف کامل یا کاهش چشمگیر پاتوژن‌ها تأکید دارند؛ در فضای سبز، بسته به نوع استفاده، سطح مجاز آلودگی میکروبی متفاوت است؛ برای مناطقی که تماس فیزیکی بالا است (مانند زمین‌های بازی کودکان یا مناطق چمن‌کاری که ممکن است محل بازی یا استراحت باشند)، نیاز به سطح تصفیه بسیار بالاتری در مقایسه با فضای سبز حاشیه بزرگراه‌ها است (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). حذف کلیفرم‌های مدفوعی به عنوان شاخص اصلی آلودگی، یک الزام پایه است (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳).

بزرگترین ریسک بهداشتی کوتاه‌مدت در فرآیند کاربرد، تماس مستقیم با پساب یا آئروسول‌های تولید شده توسط سیستم‌های آبیاری است؛ آبیاری بارانی به دلیل ایجاد ذرات معلق کوچک حاوی میکروارگانیسم‌ها، پرخطرترین روش محسوب می‌شود و باید در مناطقی که از پساب استفاده می‌شود، کاملاً اجتناب شود (آزادی و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده از سیستم‌های آبیاری زیرسطحی یا قطره‌ای که مستقیماً آب را به منطقه ریشه می‌رسانند، ریسک تنفس یا تماس پوستی با پساب را به طور مؤثری کاهش می‌دهد (عباسی کاسکی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). در خصوص آلاینده‌های شیمیایی، به ویژه فلزات سنگین، ریسک اصلی بلندمدت است؛ اگرچه گیاهان زینتی خوراکی نیستند، اما تجمع این فلزات در بافت گیاهی و سپس ورود آن‌ها به زنجیره غذایی حیات وحش شهری یا انتقال خاک آلوده از طریق گرد و غبار به محیط استنشاقی شهروندان یک نگرانی بلندمدت محسوب می‌شود (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳). این امر مستلزم پایش دقیق غلظت فلزات در پساب ورودی و خاک منطقه ریشه است تا از انباشت سالانه فراتر از آستانه‌های ایمنی جلوگیری شود (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲).

ملاحظات بهداشتی برای کارکنان خدمات شهری که مستقیماً با پساب یا گیاهان آبیاری شده سروکار دارند، حیاتی است؛ این افراد باید آموزش‌های لازم در خصوص استفاده از تجهیزات حفاظت فردی (PPE) مانند دستکش و ماسک‌های مناسب را فرا گیرند و برنامه‌های غربالگری سلامت شغلی برای آن‌ها تعریف شود (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴). کارکنان باید از خطرات احتمالی مواجهه با پاتوژن‌ها و همچنین مواد شیمیایی موجود در پساب مطلع باشند (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). اطلاع‌رسانی عمومی و شفافیت نقش کلیدی در پذیرش اجتماعی و کاهش نگرانی‌های بهداشتی شهروندان دارد؛ شهرداری باید به طور واضح مکان‌هایی که از پساب استفاده می‌شود را علامت‌گذاری کند و اطلاعات مربوط به کیفیت پساب و اقدامات مدیریتی اتخاذ شده برای ایمنی را در دسترس عموم قرار دهد (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵). این شفافیت مانع از سوءتفاهم‌ها و استفاده‌های نایمن توسط شهروندان می‌شود (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴). مدیریت ضایعات سبز تولید شده در این مناطق نیز باید با ملاحظات بهداشتی هماهنگ باشد؛ اگر پساب حاوی پاتوژن‌ها یا سطوح بالایی از مواد خاص باشد، کمپوست کردن ضایعات سبز و استفاده مجدد از آن در همان مکان باید با احتیاط صورت گیرد تا ریسک انتشار مجدد آلاینده‌ها به حداقل برسد (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). در نهایت، توجه به میکروآلاینده‌ها و مواد دارویی باقی‌مانده در پساب‌ها، که تأثیرات ناشناخته‌ای بر سلامت انسان در بلندمدت دارند، یک حوزه تحقیقاتی فعال است که شهرداری‌ها باید با همکاری مراکز علمی به صورت مستمر آن را پایش کنند؛ اگرچه ریسک انتقال مستقیم پایین است، اما انباشت در خاک و تأثیر بر میکروبیوم می‌تواند به طور غیرمستقیم بر سلامت انسان تأثیر بگذارد (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵).

۶. نقش پوشش گیاهی، طراحی فضای سبز و گونه‌های مقاوم

انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب و طراحی هوشمندانه فضای سبز، دو رکن اساسی در بهینه‌سازی فنی و کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی و بهداشتی استفاده از پساب تصفیه‌شده هستند؛ این امر مستلزم درک عمیق از فیزیولوژی گیاه در برابر تنش‌های ناشی از شوری و سمیت عناصر خاص است (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). گونه‌های فضای سبز شهری باید بر اساس

میزان تحملشان به هدایت الکتریکی (EC) پساب، نسبت سدیم به سایر کاتیون‌ها (SAR) و غلظت بور (B) و کلر (Cl) دسته‌بندی شوند (پرتانی و همکاران، ۲۰۲۰). برای مناطقی که از پساب با شوری متوسط استفاده می‌شود، باید گونه‌هایی انتخاب شوند که دارای سازوکارهای فیزیولوژیکی پیشرفته برای مقابله با استرس اسمزی باشند؛ این سازوکارها شامل توانایی در ترشح نمک از طریق غدد نمکی (در گونه‌های هالوفیت)، یا تجمع نمک در اندام‌های غیرفعال مانند برگ‌های مسن و ریزش آن‌ها است (پرتانی و همکاران، ۲۰۱۹). درختان و درختچه‌های بومی مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولاً تحمل بالاتری نسبت به گیاهان گرمسیری یا گونه‌های چمنی وارداتی دارند (احسانی و همکاران، ۲۰۲۴).

طراحی فضای سبز باید سیستم آبیاری را به گونه‌ای متمرکز کند که تمرکز نمک در منطقه ریشه به حداقل برسد؛ در این راستا، سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) به عنوان بهترین روش شناخته می‌شوند، زیرا آب را مستقیماً به عمق مورد نیاز رسانده و تبخیر سطحی و تجمع نمک در نزدیکی سطح خاک را به شدت کاهش می‌دهند (قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۴). این روش به ویژه در خاک‌هایی با بافت سنگین که مستعد خاک‌سازی ناشی از سدیم هستند، اهمیت مضاعفی دارد (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). در طراحی، باید از آبیاری بیش از حد جلوگیری شود؛ اگرچه پساب همیشه در دسترس است، آبیاری اضافی با هدف شستشوی نمک باید به دقت کنترل شود تا از اشباع دائمی خاک و کمبود اکسیژن در ناحیه ریشه جلوگیری شود (عباسی کاسکی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). نسبت آب شستشو (Leaching Requirement) باید بر اساس میزان شوری پساب و آستانه تحمل گیاه و بر اساس فرمول‌های دقیق هیدرولیکی محاسبه و اعمال گردد (دشتکی و همکاران، ۲۰۲۳).

برای مناطقی که نیاز به چمن‌زنی دارند، انتخاب گونه‌های چمنی مقاوم به شوری مانند برخی از انواع *Festuca* یا *Paspalum* که تحمل بالاتری نسبت به شوری دارند، حیاتی است (شیرازیان و همکاران، ۲۰۲۳). در مقایسه با گونه‌های حساس‌تر مانند برخی از ارقام *Poa pratensis*، این گونه‌های مقاوم‌تر می‌توانند با پساب‌های با EC بالاتر سازگار شوند و هزینه‌های تصفیه را کاهش دهند (آزادی و همکاران، ۲۰۲۳). تأثیر متقابل عناصر غذایی موجود در پساب و جذب عناصر کمیاب توسط گیاه نیز باید در طراحی منظر لحاظ شود؛ به عنوان مثال، در برخی پساب‌ها ممکن است غلظت بالای فسفر باعث تثبیت آهن یا روی در خاک شود و کمبود این عناصر در گیاه (کلروز) را در پی داشته باشد (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵). کارشناس باغبانی باید با استفاده از آزمایش‌های دوره‌ای خاک و بافت گیاه، برنامه تغذیه‌ای مکمل را تنظیم کند تا از این عدم توازن جلوگیری شود (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). همچنین، در طراحی فضاهای سبز مجاور مسیرهای تردد شهروندان، باید گونه‌های با ریزش برگ کم و مواردی که کمتر مستعد جذب فلزات سنگین در بافت‌های سطحی هستند، ترجیح داده شوند تا ریسک انتقال آلودگی از طریق گرد و غبار معلق کاهش یابد (دری و همکاران، ۲۰۱۹). طراحی منظر باید به گونه‌ای باشد که دسترسی عمومی به مناطق ریشه یا تماس مستقیم با گیاهان به حداقل برسد، به ویژه اگر سطح تصفیه پساب پایین باشد (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). در نهایت، رویکرد جامع در طراحی باید شامل ایجاد حریم‌های ایمنی (Buffer Zones) بین منطقه آبیاری با پساب و منابع آب زیرزمینی یا مناطق حساس باشد؛ این حریم‌ها که اغلب با گیاهان غیرحساس پوشانده می‌شوند، به عنوان لایه‌های محافظتی اضافی در برابر نشت یا رواناب عمل می‌کنند و پایداری زیست‌محیطی طرح را تضمین می‌نمایند (رجبی، ۲۰۲۵).

۷. مدیریت، برنامه‌ریزی، اقتصاد و توسعه پایدار شهری

امکان‌سنجی استفاده از پساب تصفیه‌شده فراتر از ملاحظات فنی و زیست‌محیطی است و در هسته خود نیازمند یک چارچوب مدیریتی، برنامه‌ریزی دقیق بلندمدت و تحلیل اقتصادی مستحکم در راستای اهداف توسعه پایدار شهری قرار دارد (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵). مدیریت موفقیت‌آمیز این سیستم‌ها مستلزم ایجاد یکپارچگی سازمانی بین بخش آب، بخش فاضلاب و شهرداری (به ویژه معاونت فضای سبز) است؛ این همکاری باید شامل تدوین استانداردهای مشترک برای کیفیت پساب قابل قبول برای آبیاری فضای سبز باشد (طاهری و همکاران، ۲۰۲۴).

در سطح برنامه‌ریزی، باید یک نقشه‌برداری جامع از نیاز آبی فضای سبز شهری در مقابل پتانسیل تولید پساب تصفیه‌شده در فصول مختلف صورت پذیرد؛ این تحلیل باید مشخص کند که کدام مناطق شهری به دلیل نزدیکی به تصفیه‌خانه و نیاز آبی بالا، اولویت نخست برای استفاده از پساب را دارند (برکباف، ۲۰۲۴). توسعه زیرساخت‌های انتقال، شامل خطوط لوله اختصاصی، باید با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه شهری آبی و تفکیک کامل شبکه آب شرب و غیرشرب صورت گیرد تا از هرگونه اختلاط یا آلودگی متقاطع جلوگیری شود (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹). تحلیل اقتصادی اجرای چنین پروژه‌هایی نشان می‌دهد که اگرچه سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث تصفیه‌خانه‌های با استاندارد بالاتر (مانند تصفیه سه‌گانه یا پیشرفته) و احداث شبکه توزیع ثانویه قابل توجه است، اما صرفه‌جویی حاصل از عدم نیاز به تصفیه و انتقال آب شیرین برای مصارف غیرشرب، در بلندمدت بازگشت اقتصادی مثبت ایجاد می‌کند (عباسی کاسککی و کریم‌زاده، ۲۰۲۴). علاوه بر این، پساب می‌تواند به عنوان منبع درآمدی برای سازمان تأمین آب تلقی شود که این امر مدل مالی مدیریت شهری را تقویت می‌بخشد (افشارنیا و همکاران، ۲۰۲۵).

از منظر توسعه پایدار، استفاده از پساب به طور مستقیم به اهداف مربوط به مدیریت آب و شهرسازی پایدار کمک می‌کند؛ با کاهش برداشت از منابع آب تجدیدنپذیر، شهر به سوی انعطاف‌پذیری بیشتری در برابر شوک‌های اقلیمی حرکت می‌کند (اورک و نیسی، ۲۰۲۴). همچنین، بازچرخانی مواد مغذی (N و P) که در فرآیند تصفیه حذف می‌شوند، به عنوان یک منبع کودی در خاک به کار گرفته شده و چرخه بسته منابع در محیط شهری را تقویت می‌نماید (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹). مدیریت ریسک باید بخشی جدایی‌ناپذیر از برنامه عملیاتی باشد؛ این شامل استقرار سیستم‌های پایش مستمر کیفیت پساب در خروجی تصفیه‌خانه و در نقاط مصرف در فضای سبز است؛ هرگونه نوسان در کیفیت باید منجر به اخطار فوری و تعدیل رژیم آبیاری یا توقف موقت شود (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، تدوین پروتکل‌های واکنش به شرایط اضطراری، مانند نشت خطوط لوله یا آلودگی‌های غیرمنتظره، از وظایف مدیریتی است (دری و همکاران، ۲۰۱۹).

برنامه‌ریزی باید شامل آموزش مستمر نیروی انسانی باشد؛ کارکنان فنی و باغبانی باید در مورد ویژگی‌های شیمیایی پساب، روش‌های صحیح استفاده از آن، و نحوه کار با سیستم‌های آبیاری تخصصی آموزش ببینند (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). عدم آموزش کافی می‌تواند منجر به اشتباهاتی شود که اثرات منفی شوری یا تغذیه‌ای را تشدید نماید (آزادی و همکاران، ۲۰۲۳).

توسعه پایدار شهری همچنین مستلزم تعامل با ذینفعان و جلب مشارکت عمومی است؛ عدم پذیرش اجتماعی به دلیل نگرانی‌های بهداشتی می‌تواند هرگونه برنامه بلندمدت را با شکست مواجه کند (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، برنامه‌ریزی باید شامل کمپین‌های آگاهی‌بخشی باشد که مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی را در کنار اقدامات احتیاطی اتخاذ شده برای تضمین ایمنی برجسته سازد (کیانی و همکاران، ۲۰۲۵). در نهایت، استفاده از پساب باید در چارچوب یک برنامه جامع

مدیریت منابع آب شهر گنجانده شود که در آن، پساب تنها یک منبع جایگزین نیست، بلکه بخشی یکپارچه از استراتژی انعطاف‌پذیری شهر در برابر خشکسالی‌های آتی است (رجبی، ۲۰۲۵).

نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل جامع صورت گرفته در این مقاله مروری، استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری فضای سبز شهری نه تنها از نظر فنی امکان‌پذیر است، بلکه در شرایط تنش آبی کنونی و چالش‌های تغییر اقلیم، به یک استراتژی حیاتی برای حفظ پایداری اکوسیستم‌های شهری تبدیل شده است (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۹؛ اورک و نیسی، ۲۰۲۴). یافته‌ها تأکید دارند که مزایای این رویکرد، شامل کاهش فشار بر منابع آب شیرین، تأمین عناصر غذایی برای گیاهان و کاهش بار آلودگی تخلیه‌شده به محیط زیست، در صورتی قابل دستیابی است که یک چارچوب مدیریتی سخت‌گیرانه بر آن حاکم باشد (گشسبی و همکاران، ۲۰۲۱). مهم‌ترین نتیجه‌گیری فنی این است که کیفیت پساب باید به دقت مدیریت شود؛ هرچند مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر می‌توانند جایگزین کود شوند (شاهرخی و زارعیان، ۲۰۱۹)، چالش اصلی در کنترل شوری و نسبت سدیم (SAR) نهفته است که در بلندمدت می‌تواند ساختار خاک را تخریب کرده و باعث تنش آبی القایی گردد (کاظمی‌نژادفرد و همکاران، ۲۰۲۳). لذا، انتخاب گونه‌های گیاهی مقاوم و اجرای روش‌های آبیاری کارآمد مانند آبیاری قطره‌ای برای کاهش تجمع نمک در سطح خاک، از الزامات اساسی برای کارشناس باغبانی است (ولی و همکاران، ۲۰۲۲). در حوزه ملاحظات بهداشتی، ریسک‌های مربوط به پاتوژن‌ها و فلزات سنگین باید از طریق سرمایه‌گذاری در سطح مناسب تصفیه (معمولاً تصفیه ثانویه پیشرفته با ضدعفونی قوی) کنترل شوند (درویش‌بلوچی و همکاران، ۲۰۲۲). اجتناب از آبیاری بارانی و اطمینان از عدم تماس مستقیم با پساب، اقدامات اساسی برای محافظت از سلامت شهروندان و کارکنان خدمات شهری هستند و نیاز به آموزش و اطلاع‌رسانی دقیق را برجسته می‌سازند (آزادی و همکاران، ۲۰۲۳).

از منظر توسعه پایدار، این طرح باید به عنوان یک زیرساخت حیاتی در نظر گرفته شود که نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت و ادغام میان بخشی است؛ تحلیل‌های اقتصادی نشان می‌دهند که در شرایط کم‌آبی مزمن، هزینه‌های عملیاتی استفاده از پساب از هزینه‌های تأمین آب جایگزین مقرون به صرفه‌تر خواهد بود (برکاف، ۲۰۲۴). موفقیت در این مسیر، مستلزم تعهد مدیریتی برای پایش مداوم کیفیت و تدوین پروتکل‌های عملیاتی دقیق برای مدیریت شوری و آلودگی‌های نوظهور است (رجبی، ۲۰۲۵). در مجموع، پساب تصفیه‌شده ابزاری قدرتمند برای تقویت تاب‌آوری شهری در برابر بحران‌های آبی است، مشروط بر اینکه رویکردی علمی، محتاطانه و مبتنی بر بهترین شیوه‌های فنی و مدیریتی اتخاذ گردد (عمونیا و همکاران، ۲۰۲۵).

منابع

- 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 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.
- برکباف، نرجس سادات. (۲۰۲۴). بررسی نقش فضاهای سبز شهری در توسعه پایدار شهری. جغرافیا و روابط انسانی، ۳(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 انتهایی فصل بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی خصوصیات مورفولوژیک و فنولوژیک ژنوتیپهای گندم نان. مجله پژوهشهای گیاهی (مجله زیست شناسی ایران) (علمی)، ۳۶(۳)، ۲۶۲-۲۷۸.
- رجبی. (۲۰۲۵). تبیین چالش‌های نظری کیفیت هوای داخلی ساختمان‌های سبز و فرصت‌های بهبود آن. پژوهش‌های 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).
- شاه‌رخ، احمدرضا، 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، سبزیلیان، 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.
- 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. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۱)، ۱-۱۸.