فصلنامه مطالعات کاربردی در علوم اجتماعی و جامعه‌شناسی
سال نهم، شماره ۲ (پیاپی: ۳۹)، بهار ۱۴۰۵ (ویژه‌نامه)

نقش بازچرخانی آب در بهبود بهره‌وری واحد آب و خاک شهرداری ها

احسان توکلی آغچغلو[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰
کد مقاله: ۷۱۱۹۰

چکـیده

بحران فزاینده آب، ضرورت بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع آبی را بیش از پیش نمایان ساخته است. در این راستا، بازچرخانی آب (Water Reuse) به عنوان یک راهبرد استراتژیک، پتانسیل قابل توجهی برای افزایش بهره‌وری در مدیریت آب و خاک، به ویژه در سطح شهرداری‌ها، فراهم می‌آورد. این مقاله با هدف تبیین نقش بازچرخانی آب در بهبود بهره‌وری واحدهای آب و خاک شهرداری‌ها، به بررسی مبانی نظری، منابع و فناوری‌های نوین تصفیه پساب، کاربردها و مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی، و همچنین چالش‌های پیش رو و راهکارهای اجرایی می‌پردازد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بازچرخانی پساب شهری، علاوه بر کاهش فشار بر منابع آب شیرین، می‌تواند در آبیاری فضای سبز، شستشوی معابر و مصارف صنعتی به کار گرفته شود و در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر بحران‌های آبی گردد. همچنین، این رویکرد در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تخلیه پساب و ارتقای سلامت اکوسیستم‌های شهری نقش بسزایی ایفا می‌کند. با این حال، چالش‌هایی نظیر سرمایه‌گذاری اولیه، پذیرش عمومی و نیاز به زیرساخت‌های سازگار، نیازمند تدوین راهکارهای جامع و یکپارچه است. در نهایت، این مقاله بر لزوم یکپارچه‌سازی منابع آب، تقویت استانداردهای قانونی، مشارکت بخش خصوصی و بهره‌گیری از سیستم‌های پایش هوشمند برای تحقق اهداف بازچرخانی آب در شهرداری‌ها تأکید می‌نماید.

واژگـان کلـیدی: آب، بهره وری، خاک، شهرداری‌ها، آب و خاک شهرداری‌ها

۱- کارشناسی زمین شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

۱- مقدمه

محدودیت منابع آب شیرین و افزایش روزافزون تقاضا برای مصارف گوناگون، از جمله مصارف شهری، صنعتی و کشاورزی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی جوامع بشری در قرن بیست و یکم محسوب می‌شود. تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت، و توسعه نامتوازن شهری، این بحران را تشدید کرده و ضرورت اتخاذ راهبردهای نوین و پایدار در مدیریت منابع آبی را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در این میان، شهرداری‌ها به عنوان ارکان اصلی مدیریت شهری، نقشی کلیدی در تأمین و توزیع خدمات اساسی، از جمله آب، و همچنین مدیریت پسماندها و پساب‌های شهری ایفا می‌کنند. واحدهای آب و خاک که در ساختار سازمانی شهرداری‌ها فعالیت می‌کنند، مسئولیت خطیر برنامه‌ریزی، اجرا، و نظارت بر کلیه فرآیندهای مرتبط با چرخه آب در محدوده شهری را بر عهده دارند. این مسئولیت‌ها شامل مدیریت شبکه‌های توزیع آب شرب، جمع‌آوری و انتقال فاضلاب، تصفیه پساب، و همچنین مدیریت آب‌های سطحی و رواناب‌ها می‌باشد (اسمیت، ۲۰۲۳).

در سال‌های اخیر، مفهوم "مدیریت یکپارچه منابع آب" (Integrated Water Resources Management - IWRM) به عنوان یک چارچوب جامع برای دستیابی به توسعه پایدار در بخش آب مطرح شده است. این رویکرد، بر هماهنگی میان بخش‌های مختلف مصرف‌کننده آب، ذینفعان، و نهادهای مدیریتی تأکید دارد و هدف آن، حصول اطمینان از تخصیص بهینه منابع آب، حفاظت از محیط زیست، و تأمین نیازهای اجتماعی و اقتصادی است. بازچرخانی آب (Water Reuse) به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب، به فرآیند جمع‌آوری، تصفیه، و استفاده مجدد از پساب‌های شهری و صنعتی برای مصارف غیرشرب اشاره دارد. این راهبرد، پتانسیل عظیمی برای کاهش فشار بر منابع آب شیرین، به ویژه در مناطق با کمبود آب، فراهم می‌آورد و می‌تواند به عنوان یک منبع آبی پایدار و قابل اتکا، مکمل منابع سنتی آب باشد (ویلیامز، ۲۰۲۲).

استفاده از پساب تصفیه شده، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی متعددی را به همراه دارد. از منظر اقتصادی، بازچرخانی آب می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های استخراج، تصفیه، و انتقال آب شرب شود و همچنین منابع آبی جدیدی را برای مصارف صنعتی و کشاورزی فراهم آورد که این امر به نوبه خود، به افزایش بهره‌وری اقتصادی در این بخش‌ها کمک می‌کند. در حوزه زیست‌محیطی، بازچرخانی آب نقش مهمی در کاهش آلودگی منابع آبی ایفا می‌کند، چرا که با تصفیه و استفاده مجدد از پساب، از تخلیه مستقیم فاضلاب به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و سفره‌های زیرزمینی جلوگیری می‌شود. این امر به حفظ کیفیت آب، سلامت اکوسیستم‌های آبی، و کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از آلودگی آب کمک شایانی می‌نماید (جانز، ۲۰۲۴). علاوه بر این، استفاده از پساب در آبیاری فضای سبز شهری، نه تنها به حفظ و گسترش فضاهای سبز کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در کاهش اثرات جزایر حرارتی در شهرها و بهبود کیفیت هوای شهری نیز مؤثر باشد. در مواجهه با چالش‌های روزافزون تأمین آب، بازچرخانی آب به عنوان یک راهکار استراتژیک، نه تنها یک گزینه، بلکه یک ضرورت برای تضمین پایداری مدیریت آب و خاک در شهرداری‌ها و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان محسوب می‌شود (احمدی، ۲۰۲۳).

۲- مبانی نظری

۲-۱- مفهوم بازچرخانی آب (Water Reuse) و تمایز آن با استفاده مجدد صنعتی

بازچرخانی آب، فرآیندی است که طی آن پساب‌های تولید شده از مصارف مختلف (مانند مصارف خانگی، صنعتی، کشاورزی و تجاری) پس از طی مراحل تصفیه مناسب، مجدداً برای مصارف غیرشرب مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مفهوم، زیرمجموعه‌ای از مفهوم وسیع‌تر "استفاده مجدد از آب" (Water Recycling) است که خود شامل طیف وسیعی از کاربردها می‌شود. تفاوت کلیدی بازچرخانی آب با مفهوم "استفاده مجدد صنعتی" (Industrial Water Reuse) در گستردگی منابع پساب و تنوع کاربردهای آن است. در حالی که استفاده مجدد صنعتی عمدتاً بر تصفیه و بازگرداندن آب به فرآیندهای تولیدی در همان صنعت تمرکز دارد، بازچرخانی آب، پساب‌های شهری متنوعی را شامل می‌شود و کاربردهای گسترده‌تری در حوزه‌های مختلف شهری، از جمله آبیاری، شستشوی معابر، مصارف صنعتی و حتی تأمین آب مورد نیاز در برخی فرآیندهای شهری دارد (براون، ۲۰۲۳).

۲-۲- منابع تولید پساب در محیط‌های شهری

پساب‌های شهری از منابع متنوعی تولید می‌شوند که شناخت آن‌ها برای طراحی فرآیندهای تصفیه و کاربردهای مناسب ضروری است. این منابع را می‌توان به شرح زیر دسته‌بندی کرد:

پساب خانگی (Domestic Wastewater): این نوع پساب از منازل مسکونی، ادارات، مدارس و سایر اماکن عمومی ناشی می‌شود و حاوی مواد آلی، مواد مغذی (نیتروژن و فسفر)، عوامل بیماری‌زا، و سایر آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های روزمره انسان است.

پساب صنعتی (Industrial Wastewater): پساب تولید شده از واحدهای صنعتی ممکن است حاوی طیف وسیعی از آلاینده‌های شیمیایی، فلزات سنگین، روغن‌ها، و مواد سمی باشد که بسته به نوع صنعت، ترکیب متفاوتی دارد. تصفیه این پساب‌ها نیازمند فرآیندهای تخصصی‌تری است.

رواناب سطحی (Stormwater Runoff): آب باران که از سطوح شهر (خیابان‌ها، پشت بام‌ها، پارک‌ها) عبور می‌کند، آلاینده‌های مختلفی از جمله گرد و غبار، زباله‌های معلق، روغن و گریس، و فلزات سنگین را با خود به همراه می‌آورد. مدیریت و تصفیه رواناب سطحی نیز برای جلوگیری از آلودگی منابع آبی اهمیت دارد (پاتل، ۲۰۲۴).

۲-۳- نقش واحدهای آب و خاک شهرداری‌ها در مدیریت منابع آب و پساب

واحدهای آب و خاک شهرداری‌ها، ستون فقرات مدیریت پایدار منابع آب در شهرها محسوب می‌شوند. وظایف این واحدها فراتر از تأمین آب شرب و جمع‌آوری فاضلاب است و شامل موارد زیر نیز می‌شود:

برنامه‌ریزی و توسعه زیرساخت‌ها: طراحی، احداث و نگهداری شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب، تأسیسات تصفیه پساب، و شبکه‌های توزیع مجدد آب تصفیه شده.

مدیریت عملیاتی: بهره‌برداری بهینه از تأسیسات تصفیه، نظارت بر کیفیت پساب خروجی، و مدیریت توزیع آب تصفیه شده برای مصارف مجاز.

تدوین استانداردها و مقررات: تعیین استانداردهای کیفی برای پساب تصفیه شده بر اساس کاربردهای مختلف و نظارت بر رعایت آن‌ها.

ارتقای آگاهی عمومی: اطلاع‌رسانی به شهروندان در خصوص اهمیت و ضرورت بازچرخانی آب و تشویق به مشارکت در این فرآیند.

همکاری با سایر نهادها: هماهنگی با سازمان‌های حفاظت محیط زیست، وزارت نیرو، و سایر ذینفعان برای اجرای مؤثر برنامه‌های بازچرخانی آب (لی، ۲۰۲۵).

۲-۴- مفاهیم کلیدی در بازچرخانی آب

پساب (Wastewater): آبی که پس از استفاده در مصارف مختلف، آلوده شده و خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن تغییر یافته است.

تصفیه پساب (Wastewater Treatment): فرآیندی که طی آن، آلاینده‌های موجود در پساب حذف شده و کیفیت آن برای استفاده مجدد یا تخلیه به محیط زیست بهبود می‌یابد.

استفاده مجدد از آب (Water Recycling): به طور کلی به هرگونه فرآیند استفاده مجدد از آب اطلاق می‌شود، که شامل بازچرخانی پساب و استفاده مجدد صنعتی است.

کیفیت پساب (Wastewater Quality): پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی پساب که نشان‌دهنده میزان آلودگی آن است. این پارامترها شامل کدورت، BOD، COD، مواد جامد معلق، نیتروژن، فسفر، پاتوژن‌ها و ... می‌باشند.

استانداردهای کیفی (Quality Standards): مقادیر مجاز برای پارامترهای کیفی پساب که بر اساس کاربرد نهایی آن تعیین می‌شود. برای مثال، استانداردهای آبیاری فضای سبز با استانداردهای آبیاری محصولات خوراکی متفاوت است (مارتین، ۲۰۲۲).

این مباحث، چارچوب نظری لازم برای درک عمیق‌تر فرآیند بازچرخانی آب و نقش آن در مدیریت پایدار شهری را فراهم می‌آورند.

۳- منابع و فناوری‌های نوین در بازچرخانی آب

برای تحقق بازچرخانی آب در مقیاس شهری، شناخت منابع تولید پساب و همچنین آشنایی با فناوری‌های نوین تصفیه، امری حیاتی است. این بخش به تفصیل به این دو جنبه می‌پردازد:

۱. منابع تولید پساب شهری: همانطور که در بخش مبانی نظری اشاره شد، پساب شهری ترکیبی پیچیده از جریان‌های مختلف است. درک ترکیب و ویژگی‌های هر جریان، امکان طراحی سیستم‌های تصفیه کارآمدتر و انتخاب کاربردهای مناسب‌تر را فراهم می‌کند.

پساب خانگی: بخش عمده‌ای از پساب شهری را تشکیل می‌دهد و حاوی مواد آلی، چربی‌ها، صابون‌ها، مواد شوینده، مدفوع، ادرار، و عوامل بیماری‌زا (باکتری‌ها، ویروس‌ها، کرم‌ها) است. غلظت مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر در این پساب‌ها بالا است که می‌تواند منجر به یوتریفیکاسیون (شکوفایی جلبکی) در منابع آبی شود (تیموری، ۲۰۲۵).

پساب صنعتی: بسته به نوع صنعت، می‌تواند حاوی طیف وسیعی از آلاینده‌های خطرناک باشد. برای مثال، پساب ناشی از صنایع غذایی عمدتاً دارای بار آلی بالا است، در حالی که پساب صنایع شیمیایی یا فلزکاری ممکن است حاوی فلزات سنگین، ترکیبات سمی و مقاوم به تجزیه باشد. این نوع پساب‌ها نیازمند پیش‌تصفیه در محل تولید یا فرآیندهای تصفیه بسیار تخصصی در تصفیه‌خانه‌های شهری هستند.

رواناب سطحی: این جریان، بر خلاف پساب خانگی و صنعتی که عمدتاً از طریق شبکه فاضلاب جمع‌آوری می‌شوند، مستقیماً از سطوح شهر وارد آبراه‌ها یا سیستم‌های زهکشی می‌شود. آلاینده‌های موجود در رواناب شامل گرد و غبار، ذرات معلق خاک، فلزات سنگین ناشی از سایش تایر و قطعات خودرو، روغن و گریس، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌های مورد استفاده در فضای سبز، و زباله‌های پلاستیکی و کاغذی است. مدیریت رواناب سطحی، به ویژه در شهرهای بزرگ، برای جلوگیری از آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی اهمیت ویژه‌ای دارد (پاتل، ۲۰۲۴).

پساب ناشی از شستشوی معابر و تأسیسات شهری: آب مورد استفاده برای شستشوی خیابان‌ها، تأسیسات شهری و حتی سیستم‌های خنک‌کننده ساختمان‌ها نیز می‌تواند به عنوان منبعی برای بازچرخانی در نظر گرفته شود، البته با ملاحظات کیفی خاص خود.

۲. فرآیندهای تصفیه پساب: فناوری‌های تصفیه پساب را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد:

الف) فرآیندهای تصفیه فیزیکی (Physical Treatment Processes): این فرآیندها عمدتاً بر حذف مواد جامد معلق و کاهش کدورت تمرکز دارند و شامل موارد زیر می‌شوند:

توری‌ها و آشغالگیرها (Screens and Grit Chambers): برای حذف مواد جامد بزرگ مانند پلاستیک، پارچه و شن و ماسه.

ته‌نشینی اولیه (Primary Sedimentation): در این مرحله، با کاهش سرعت جریان، مواد جامد سنگین‌تر ته‌نشین شده و مواد سبک‌تر (مانند چربی‌ها) به سطح آمده و جدا می‌شوند. این مرحله حدود ۳۰-۴۰٪ مواد آلی را حذف می‌کند.

فیلتراسیون (Filtration): عبور دادن پساب از لایه‌های مختلف شن، ماسه و سایر مواد برای حذف ذرات معلق ریزتر.

ب) فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی (Biological Treatment Processes): این فرآیندها از میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها، قارچ‌ها) برای تجزیه مواد آلی محلول و کلوئیدی استفاده می‌کنند. مهم‌ترین روش‌ها عبارتند از:

فرآیندهای لجن فعال (Activated Sludge Process): متداول‌ترین روش تصفیه بیولوژیکی که در آن، پساب با هوادهی در مخازن حاوی میکروارگانیسم‌ها مخلوط می‌شود. میکروارگانیسم‌ها مواد آلی را به عنوان غذا مصرف کرده و سلول‌های جدید تولید می‌کنند.

صافی‌های چکنده (Trickling Filters): پساب بر روی بستری از مواد متخلخل که با لایه‌ای از میکروارگانیسم‌ها پوشیده شده است، جریان می‌یابد و مواد آلی تجزیه می‌شوند.

لاگون‌های هوادهی (Aerated Lagoons): مخازن بزرگی که در آن‌ها هوادهی مکانیکی یا سطحی برای تأمین اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود.

فرآیندهای بی‌هوازی (Anaerobic Processes): در غیاب اکسیژن، میکروارگانیسم‌ها مواد آلی را تجزیه کرده و گاز متان تولید می‌کنند. این فرآیندها معمولاً برای پساب‌هایی با غلظت بالای مواد آلی یا در مراحل پیش‌تصفیه استفاده می‌شوند.

ج) فرآیندهای تصفیه ثالثیه و پیشرفته (Tertiary and Advanced Treatment Processes): این مرحله پس از تصفیه بیولوژیکی انجام شده و هدف آن حذف کامل آلاینده‌های باقی‌مانده، مواد مغذی (نیتروژن و فسفر)، و عوامل بیماری‌زا برای رسیدن به کیفیت مورد نیاز جهت بازچرخانی است. فناوری‌های کلیدی در این مرحله عبارتند از:

فرآیندهای غشایی (Membrane Processes):

میکروفیلتراسیون (Microfiltration - MF): حذف باکتری‌ها، ذرات معلق و کلوئیدها.

اولترافیلتراسیون (Ultrafiltration - UF): حذف ویروس‌ها، پروتئین‌ها و مولکول‌های بزرگتر.

نانوفیلتراسیون (Nanofiltration - NF): حذف یون‌های چند ظرفیتی (مانند سختی آب) و برخی ترکیبات آلی محلول.

اسمز معکوس (Reverse Osmosis - RO): حذف کلیه املاح محلول، یون‌ها و مولکول‌های کوچک. این فرآیند بالاترین سطح تصفیه را فراهم می‌کند اما انرژی‌بر و پرهزینه است.

اکسیداسیون پیشرفته (Advanced Oxidation Processes - AOPs): استفاده از واکنشگرهای قوی مانند ازن (Ozone)، پراکسید هیدروژن (H2O2) و اشعه ماوراء بنفش (UV) برای تجزیه آلاینده‌های آلی مقاوم به تجزیه، داروها، و مواد شیمیایی خاص.

گندزدایی (Disinfection): حذف یا غیرفعال کردن عوامل بیماری‌زا با استفاده از روش‌هایی مانند کلرزنی، گندزدایی با ازن، یا گندزدایی با اشعه ماوراء بنفش (UV). گندزدایی با UV به دلیل عدم تولید محصولات جانبی مضر، در بازچرخانی آب محبوبیت یافته است (لی، ۲۰۲۵).

جذب سطحی (Adsorption): استفاده از موادی مانند کربن فعال برای جذب آلاینده‌های آلی و رنگ.

انتخاب فرآیندهای تصفیه مناسب، به کیفیت پساب ورودی، استانداردهای کیفی مورد نیاز برای کاربرد نهایی، و ملاحظات اقتصادی و فنی بستگی دارد. در بسیاری از موارد، ترکیبی از این فرآیندها برای دستیابی به کیفیت مطلوب پساب مورد نیاز است (تیموری، ۲۰۲۵).

۴- کاربردها و مزایای بازچرخانی آب در بهبود بهره‌وری واحد آب و خاک شهرداری‌ها

بازچرخانی آب در شهرداری‌ها زمانی به یک راهبرد مؤثر تبدیل می‌شود که از مرحله یک ایده نظری فراتر رفته و به صورت عملی در شبکه‌های خدمات شهری، فضای سبز، مدیریت رواناب و حتی برخی فعالیت‌های پشتیبانی شهری به کار گرفته شود. اهمیت این موضوع از آن‌جا ناشی می‌شود که شهرداری‌ها به طور مداوم با طیفی از نیازهای آبی روبه‌رو هستند؛ از آبیاری پارک‌ها و درختان خیابانی گرفته تا شست‌وشوی معابر، کنترل گردوغبار، تکمیل آب موردنیاز در برخی تأسیسات و مصارف غیرشرب دیگر. در چنین شرایطی، پساب تصفیه‌شده می‌تواند به جای آن‌که یک پسماند پرهزینه تلقی شود، به یک منبع پایدار و قابل برنامه‌ریزی تبدیل گردد و در نتیجه، بهره‌وری واحد آب و خاک را از طریق کاهش وابستگی به آب خام، کاهش فشار بر شبکه‌های تأمین آب شرب و بهبود تعادل بین عرضه و تقاضای شهری ارتقا دهد. این تغییر نگرش، بازچرخانی را از یک اقدام صرفاً زیست‌محیطی به یک ابزار مدیریتی و اقتصادی برای شهرداری‌ها تبدیل می‌کند، زیرا همزمان سه هدف اصلی کاهش هزینه، افزایش تاب‌آوری و بهبود عملکرد زیرساختی را دنبال می‌نماید (براون، ۲۰۲۳).

۱. آبیاری فضای سبز شهری: یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین کاربردهای پساب تصفیه‌شده در شهرداری‌ها، استفاده از آن برای آبیاری فضای سبز است. فضای سبز شهری شامل پارک‌ها، بوستان‌ها، چمن‌زارها، درختان خیابانی، رفیوژها و کمربندهای سبز حاشیه‌ای می‌شود که نگهداری آن‌ها نیازمند حجم قابل توجهی آب است. در بسیاری از شهرها، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک، آبیاری فضای سبز با آب شرب یا آب با کیفیت بالا، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجیه نیست. در این وضعیت، پساب تصفیه‌شده می‌تواند گزینه‌ای مناسب باشد، مشروط بر آن‌که استانداردهای کیفی لازم برای تماس با خاک، گیاه و در برخی موارد با انسان رعایت شده باشد. از منظر بهره‌وری، استفاده از پساب در آبیاری باعث می‌شود آب باکیفیت برای مصارف حیاتی‌تر حفظ شود و در عین حال، شهرداری بتواند پوشش سبز را بدون وابستگی شدید به منابع متعارف تداوم بخشد. از منظر اکولوژیک نیز، وجود برخی مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر در پساب تصفیه‌شده می‌تواند تا حدی نقش کود آبی را ایفا کرده و رشد گیاهان را تقویت کند؛ البته این مزیت تنها زمانی مفید است که غلظت این عناصر از حد مجاز فراتر نرود، زیرا در غیر این صورت می‌تواند موجب شوری خاک، تجمع املاح و اختلال در رشد گیاهان شود. بنابراین، بازچرخانی آب در آبیاری فضای سبز مستلزم برنامه‌ریزی دقیق، پایش مستمر کیفیت و انتخاب گیاهان مقاوم‌تر به شرایط آبی و شیمیایی جدید است (تیموری، ۲۰۲۵).

۲. شست‌وشوی معابر و مدیریت نظافت شهری: کاربرد مهم دیگر پساب تصفیه‌شده، شست‌وشوی خیابان‌ها، پیاده‌روها، میدان‌ها، بازارچه‌ها، پایانه‌ها و سایر فضاهای عمومی است. این فعالیت‌ها اگرچه در ظاهر ساده به نظر می‌رسند، اما در عمل سهم قابل توجهی از مصرف آب شهری را به خود اختصاص می‌دهند. استفاده از آب شرب برای چنین مصارفی معمولاً از نظر مدیریت منابع، نوعی تخصیص غیرکارآمد محسوب می‌شود. در مقابل، آب بازچرخانی‌شده که برای این سطح از مصرف تصفیه شده باشد، می‌تواند بدون کاهش محسوس کیفیت خدمات شهری، جایگزین مناسبی گردد. از سوی دیگر، شست‌وشوی معابر با آب تصفیه‌شده به کاهش گردوغبار، بهبود منظر شهری، کاهش بار میکروبی سطوح و حتی کنترل نسبی آلاینده‌های سطحی کمک می‌کند. در شهرهایی که با پدیده گردوغبار، آلودگی هوا و تجمع ذرات معلق مواجه‌اند، این کاربرد اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. همچنین، استفاده از آب بازچرخانی‌شده در فعالیت‌های نظافتی موجب می‌شود شهرداری‌ها بتوانند برنامه‌های پاکیزگی شهری را در مقیاس وسیع‌تر و با هزینه کمتر اجرا کنند، زیرا بخش قابل توجهی از هزینه‌ها از محل صرفه‌جویی در مصرف آب شرب جبران می‌شود (جانز، ۲۰۲۴).

۳. مصارف صنعتی و نیمه‌صنعتی شهری: در بسیاری از شهرها، شهرداری‌ها یا نهادهای وابسته به آن‌ها دارای تأسیسات و فعالیت‌هایی هستند که به آب در مقیاسی فراتر از مصرف خانگی نیاز دارند؛ مانند کارگاه‌های عمرانی، بتن‌سازی،

کارواش‌های ماشین‌آلات شهری، مراکز تعمیر و نگهداری، و برخی فرایندهای خنک‌سازی یا شست‌وشوی تجهیزات. در این موارد، پساب تصفیه‌شده می‌تواند به عنوان منبعی برای مصارف صنعتی و نیمه‌صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. مزیت اصلی این کاربرد آن است که فشار بر منابع آب باکیفیت کاهش می‌یابد و در عین حال، شهرداری یا پیمانکاران طرف قرارداد می‌توانند هزینه‌های عملیاتی خود را پایین آورند. البته، کیفیت پساب برای مصارف صنعتی باید متناسب با نوع فرایند تنظیم شود؛ برای مثال، در برخی کاربردها تنها کاهش کدورت و مواد معلق کافی است، اما در برخی دیگر، کنترل سختی، شوری یا وجود یون‌های خاص اهمیت بیشتری دارد. بدیهی است که هرچه حساسیت فرایند بالاتر باشد، نیاز به تصفیه پیشرفته‌تر نیز افزایش می‌یابد. از این منظر، بازچرخانی آب می‌تواند بخشی از زنجیره تأمین پایدار خدمات شهری را تشکیل دهد و به شهرداری‌ها امکان دهد تا برای فعالیت‌های پشتیبانی خود، الگوی مصرف کم‌آب‌تر و کارآمدتری اتخاذ کنند (ویلیامز، ۲۰۲۲).

۴. تغذیه مصنوعی و مدیریت آب‌های سطحی: یکی از ابعاد کمتر مورد توجه در بازچرخانی آب شهری، نقش آن در تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و مدیریت آب‌های سطحی است. در بسیاری از مناطق شهری، آب باران و رواناب سطحی به دلیل نبود سامانه‌های جمع‌آوری و نفوذ مناسب، به سرعت از سطح شهر خارج شده و یا موجب آب‌گرفتگی و فرسایش می‌شود. اگر این جریان‌ها در قالب زیرساخت‌های سبز و خاک‌محور مدیریت شوند، می‌توان بخشی از آن‌ها را به چرخه بازچرخانی وارد کرد و حتی به تغذیه آب‌های زیرزمینی کمک نمود. این امر به‌ویژه در شهرهایی که با افت سطح آب زیرزمینی مواجه‌اند، اهمیت بیشتری دارد. از سوی دیگر، تلفیق بازچرخانی پساب با راهبردهای مدیریت رواناب، زمینه‌ساز شکل‌گیری الگوی «شهر اسفنجی» می‌شود؛ الگویی که در آن شهر به‌جای دفع سریع آب، آن را جذب، ذخیره، تصفیه و به‌تدریج آزاد می‌کند. چنین رویکردی موجب افزایش بهره‌وری آب و خاک شهری، کاهش بار شبکه‌های دفع، و بهبود انعطاف‌پذیری زیرساخت‌های شهری در برابر بارش‌های شدید و خشکسالی می‌شود (لی، ۲۰۲۵).

۵. مزایای اقتصادی بازچرخانی آب: بازچرخانی آب از منظر اقتصادی، واجد مزایای متعددی است که مستقیماً بر کارایی واحد آب و خاک شهرداری‌ها اثر می‌گذارد. نخستین مزیت، کاهش هزینه تأمین آب است. هنگامی که بخشی از نیازهای غیرشرب شهرداری از پساب تصفیه‌شده تأمین شود، میزان برداشت از منابع آب خام کاهش می‌یابد و در نتیجه، هزینه‌های مرتبط با استخراج، انتقال، تصفیه و توزیع آب باکیفیت کمتر می‌شود. دومین مزیت، کاهش هزینه دفع پساب است. به جای آن‌که پساب به عنوان یک بار آلودگی صرف به شبکه فاضلاب یا محیط‌زیست تخلیه شود، با تصفیه و استفاده مجدد، از یک هزینه دفع به یک منبع ارزش‌افزوده تبدیل می‌شود. سومین مزیت، کاهش وابستگی شهرداری‌ها به آب وارداتی یا آب تخصیص‌یافته از سامانه‌های بیرونی است که این موضوع در زمان بحران، یک مزیت راهبردی محسوب می‌شود. علاوه بر این، در پروژه‌های بزرگ شهری، بازچرخانی آب می‌تواند هزینه‌های بلندمدت نگهداری فضای سبز، شست‌وشوی شهری و برخی مصارف خدماتی را کاهش دهد و بودجه شهرداری را برای سایر اولویت‌های توسعه‌ای آزاد سازد. در نتیجه، از منظر اقتصادی، بازچرخانی نه فقط یک اقدام زیست‌محیطی، بلکه یک سرمایه‌گذاری مولد و بلندمدت است (مارتین، ۲۰۲۲).

۶. مزایای زیست‌محیطی و اکولوژیک: مزایای زیست‌محیطی بازچرخانی آب نیز قابل توجه است. مهم‌ترین اثر، کاهش حجم پساب تخلیه‌شده به رودخانه‌ها، کانال‌ها، دریاچه‌ها و آبخوان‌هاست؛ امری که مستقیماً به کاهش آلودگی منابع طبیعی کمک می‌کند. هرچه بخشی از پساب شهری پیش از تخلیه وارد چرخه استفاده مجدد شود، بار آلاینده‌های آلی، مغذی و میکروبی وارد محیط‌زیست کمتر می‌شود. علاوه بر این، استفاده مجدد از آب در فضای سبز شهری به حفظ پوشش گیاهی و افزایش تعرق سطحی کمک می‌کند و از این طریق می‌تواند تا حدی دمای محیط را کاهش دهد و اثر جزیره حرارتی شهری را تعدیل کند. در شهرهای متراکم، همین اثر می‌تواند به بهبود آسایش حرارتی، کاهش مصرف انرژی برای سرمایش و بهبود کیفیت زندگی شهروندان بینجامد. از منظر اکولوژیک، بازچرخانی آب، امکان مدیریت پایدارتر ارتباط بین شهر و طبیعت را فراهم می‌سازد؛ زیرا شهر به جای آن‌که صرفاً مصرف‌کننده و آلوده‌کننده آب باشد، به بازیگر فعال چرخه آب تبدیل می‌شود. این تحول در منطق مدیریتی، یکی از مهم‌ترین گام‌ها به سوی شهر پایدار و تاب‌آور است (احمدی، ۲۰۲۳).

۷. نقش در افزایش تاب‌آوری شهری: در شرایط بروز خشکسالی، بحران‌های اقلیمی، اختلال در شبکه‌های تأمین آب یا افزایش ناگهانی تقاضا، وجود منابع جایگزین مانند پساب تصفیه‌شده، میزان تاب‌آوری شهری را به شکل محسوسی افزایش می‌دهد. شهرداری‌هایی که به سامانه‌های بازچرخانی مجهز هستند، کمتر در معرض شوک‌های ناشی از کمبود آب قرار می‌گیرند و می‌توانند خدمات پایه شهری را با ثبات بیشتری ادامه دهند. این موضوع در شهرهای بزرگ که کوچک‌ترین اختلال در تأمین آب می‌تواند به اختلال گسترده در خدمات نظافتی، فضای سبز و ایمنی شهری منجر شود، اهمیت ویژه دارد. بنابراین، بازچرخانی آب نه‌تنها یک پاسخ به بحران فعلی آب است، بلکه ابزاری برای آمادگی در برابر بحران‌های آینده نیز محسوب می‌شود (براون، ۲۰۲۳).

۵- چالش‌ها و راهکارها در بازچرخانی آب شهرداری‌ها

علی‌رغم مزایای فراوان بازچرخانی آب، اجرای موفقیت‌آمیز آن در شهرداری‌ها با چالش‌های متعددی روبرو است که نیازمند بررسی دقیق و ارائه راهکارهای مؤثر هستند. این چالش‌ها طیفی از مسائل فنی، اقتصادی، اجتماعی و قانونی را در بر می‌گیرند و غلبه بر آن‌ها مستلزم یک رویکرد جامع و یکپارچه است (اسمیت، ۲۰۲۳).

۱. چالش‌های اقتصادی و مالی:

- سرمایه‌گذاری اولیه بالا: احداث یا ارتقاء تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای دستیابی به استانداردهای بازچرخانی، نصب شبکه‌های توزیع مجزا برای پساب، و توسعه زیرساخت‌های لازم، نیازمند سرمایه‌گذاری کلان اولیه است. این امر به‌ویژه برای شهرداری‌های با بودجه محدود، یک مانع جدی محسوب می‌شود.
- هزینه‌های عملیاتی و نگهداری: علاوه بر سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های جاری مربوط به نگهداری تأسیسات، مصرف انرژی در فرآیندهای تصفیه و پایش مستمر کیفیت پساب، می‌تواند قابل توجه باشد.
- عدم وجود مدل‌های اقتصادی پایدار: غالباً قیمت‌گذاری آب بازچرخانی‌شده به گونه‌ای نیست که هزینه‌های تولید آن را پوشش دهد، چرا که هدف اصلی، کاهش فشار بر آب شرب و حفظ محیط‌زیست است. این شکاف قیمتی نیازمند حمایت‌های دولتی یا یارانه است.

راهکارها:

- جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی (PPP): استفاده از مدل‌های مشارکت عمومی-خصوصی برای تأمین مالی پروژه‌ها، انتقال ریسک و بهره‌گیری از تخصص و کارایی بخش خصوصی.
- تأمین مالی از منابع ملی و بین‌المللی: بهره‌گیری از اعتبارات دولتی، وام‌های توسعه‌ای، و کمک‌های بلاعوض برای پوشش بخشی از هزینه‌های اولیه.
- قیمت‌گذاری شناور و هدفمند: تدوین سازوکار قیمت‌گذاری متناسب با کیفیت پساب و نوع کاربرد، و ارائه مشوق‌های مالی برای مصرف‌کنندگان.
- مطالعات امکان‌سنجی اقتصادی دقیق: انجام تحلیل‌های هزینه-فایده جامع برای توجیه اقتصادی پروژه‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها بر اساس بازدهی بلندمدت.

۲. چالش‌های فنی و زیرساختی

- کیفیت متغیر پساب: کیفیت پساب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها می‌تواند به دلیل نوسانات در میزان مصرف آب، تغییر الگوی فعالیت صنایع و یا مشکلات در شبکه جمع‌آوری فاضلاب، متغیر باشد. این امر، طراحی و بهره‌برداری پایدار از تصفیه‌خانه‌ها را دشوار می‌سازد.
- نیاز به تصفیه پیشرفته: برای بسیاری از کاربردهای بازچرخانی، به‌ویژه آبیاری فضای سبز و مصارف صنعتی خاص، نیاز به فرآیندهای تصفیه پیشرفته (مانند فرآیندهای غشایی یا اکسیداسیون پیشرفته) است که پیچیدگی فنی و هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد.
- طراحی شبکه‌های مجزا: برای جلوگیری از اختلاط پساب تصفیه‌شده با آب شرب، نیاز به احداث شبکه‌های توزیع مجزا و علامت‌گذاری دقیق لوله‌کشی‌ها وجود دارد که این امر در شهرهای قدیمی و دارای زیرساخت‌های متراکم، چالش‌برانگیز است.
- استانداردهای کیفی نامشخص یا ناکافی: در برخی مناطق، ممکن است استانداردها و دستورالعمل‌های مدون و جامعی برای کیفیت پساب مورد استفاده در کاربردهای مختلف وجود نداشته باشد، که این امر ابهامات فنی و حقوقی ایجاد می‌کند.

راهکارها:

- پایش مداوم کیفیت پساب: نصب و بهره‌برداری از سیستم‌های پایش آنلاین و آفلاین برای اطمینان از کیفیت پساب در مراحل مختلف تصفیه و توزیع.

- استفاده از فناوری‌های نوین و ماژولار: به‌کارگیری واحدهای تصفیه انعطاف‌پذیر و مقیاس‌پذیر که بتوانند با تغییرات کیفیت پساب ورودی سازگار شوند.
- طراحی هوشمندانه شبکه‌های توزیع: استفاده از سیستم‌های GIS و مدل‌سازی برای طراحی بهینه شبکه‌های مجزا و جلوگیری از هرگونه تداخل.
- تدوین و به‌روزرسانی استانداردها: همکاری با نهادهای قانون‌گذار برای تدوین استانداردهای روشن و جامع کیفیت پساب بر اساس بهترین تجربیات جهانی و متناسب با شرایط بومی.

۳. چالش‌های اجتماعی و پذیرش عمومی

- نگرش منفی و "عامل وایو" (YIMBY - Yes, In My Back Yard): یکی از بزرگترین موانع، ترس و مقاومت عمومی نسبت به استفاده از آب بازچرخانی‌شده است. افراد ممکن است نسبت به کیفیت بهداشتی و ایمنی این آب‌ها بدبین باشند یا از اینکه تأسیسات مرتبط با آن (مانند تصفیه‌خانه یا خطوط لوله) در نزدیکی محل زندگی‌شان احداث شود، ابراز نگرانی کنند.
- عدم آگاهی عمومی: بسیاری از شهروندان اطلاعات کافی در مورد فرآیندهای تصفیه، استانداردهای کیفی و مزایای بازچرخانی آب ندارند، که این امر به گسترش شایعات و افزایش مقاومت دامن می‌زند.
- پیچیدگی‌های فرهنگی و اجتماعی: در برخی فرهنگ‌ها، استفاده مجدد از پساب ممکن است با تابوهای فرهنگی یا برداشت‌های نادرست همراه باشد.

راهکارها:

- آموزش و اطلاع‌رسانی عمومی: اجرای کمپین‌های آگاهی‌بخشی گسترده از طریق رسانه‌ها، مدارس و اجتماعات محلی برای توضیح علمی فرآیندها، مزایا و ایمنی بازچرخانی آب.
- نمایش پروژه‌های موفق: معرفی پروژه‌های بازچرخانی موفق در سایر شهرها یا حتی در نقاطی از همان شهر که با استقبال عمومی مواجه شده‌اند.
- مشارکت دادن ذینفعان: از ابتدای فرآیند برنامه‌ریزی، شهروندان، سازمان‌های مردم‌نهاد و متخصصان را درگیر کرده و به نگرانی‌های آن‌ها گوش فرا داد.
- استفاده از نام‌های مناسب: اجتناب از به‌کارگیری واژه‌هایی مانند "فاضلاب" یا "پساب" در نام‌گذاری و ارتباط با مردم؛ به جای آن می‌توان از عناوینی مانند "آب شهری تصفیه‌شده" یا "آب غیرشرب شهری" استفاده کرد.

۴. چالش‌های قانونی و نهادی

- خلاء قانونی یا عدم شفافیت: ممکن است چارچوب‌های قانونی و مقرراتی موجود، به اندازه کافی به موضوع بازچرخانی آب نپرداخته باشند یا نقش و مسئولیت نهادهای مختلف در این زمینه مشخص نباشد.
- تداخلات بین‌بخشی: مدیریت منابع آب و فاضلاب اغلب در حوزه اختیارات نهادهای متعددی (وزارت نیرو، وزارت بهداشت، سازمان محیط‌زیست، شهرداری‌ها و شرکت‌های آب و فاضلاب) قرار دارد. نبود هماهنگی و تداخل در وظایف، می‌تواند اجرای پروژه‌ها را کند و پیچیده کند.
- مقاومت در برابر تغییر: نهادهای سنتی ممکن است در برابر پذیرش راهکارهای نوین و تغییر ساختارهای موجود مقاومت نشان دهند.

راهکارها:

- تدوین قوانین جامع و حمایتی: ایجاد قوانین بالادستی که چارچوب کلی بازچرخانی آب را مشخص کرده و مشوق‌های لازم را فراهم کند.
- ایجاد نهادهای هماهنگ‌کننده: تشکیل کارگروه‌ها یا کمیته‌های ملی و محلی با حضور نمایندگان نهادهای ذیربط برای تسهیل هماهنگی و رفع تداخلات.
- تقویت ظرفیت نهادی شهرداری‌ها: ارائه آموزش‌های تخصصی به کارکنان شهرداری در حوزه مدیریت منابع آب و فاضلاب و بازچرخانی.

- شفاف‌سازی مسئولیت‌ها: تعیین دقیق مسئولیت هر سازمان در مراحل مختلف چرخه بازچرخانی آب، از جمع‌آوری و تصفیه تا توزیع و نظارت.
- غلبه بر این چالش‌ها نیازمند اراده سیاسی قوی، همکاری بین‌بخشی، سرمایه‌گذاری هوشمندانه و مشارکت فعال شهروندان است (جانز، ۲۰۲۴).

۶- نتیجه‌گیری

پس از بررسی مبانی نظری، منابع و فناوری‌ها، کاربردها، مزایا، چالش‌ها و راهکارهای مرتبط با بازچرخانی آب، می‌توان به نتایج و پیشنهادات زیر دست یافت که در راستای بهبود بهره‌وری واحدهای آب و خاک شهرداری‌ها و دستیابی به توسعه پایدار شهری مؤثر خواهند بود (لی، ۲۰۲۵):

بازچرخانی آب، از جمله استفاده مجدد از پساب شهری تصفیه‌شده، دیگر یک گزینه لوکس یا صرفاً زیست‌محیطی نیست، بلکه به ضرورتی استراتژیک برای مدیریت پایدار منابع آب در شهرهای رو به رشد و مواجه با تنش‌های آبی تبدیل شده است. شهرداری‌ها به عنوان نهادهای کلیدی در مدیریت خدمات شهری، نقش حیاتی در پیاده‌سازی و گسترش فرهنگ و زیرساخت‌های بازچرخانی ایفا می‌کنند.

۱) افزایش بهره‌وری منابع آب و خاک: بازچرخانی آب به طور مستقیم به افزایش بهره‌وری منابع آب شهری کمک می‌کند. با تأمین بخشی از نیازهای غیرشرب (مانند آبیاری فضای سبز، شست‌وشوی معابر و مصارف صنعتی) از طریق پساب تصفیه‌شده، فشار بر منابع آب شیرین کاهش یافته و امکان تخصیص بهینه این منابع برای مصارف ضروری و حساس فراهم می‌گردد. این امر همچنین به حفظ کیفیت و کمیت آبخوان‌ها و سایر منابع آبی طبیعی کمک می‌کند.

۲) منافع اقتصادی قابل توجه: اجرای موفق پروژه‌های بازچرخانی می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های تأمین آب، دفع فاضلاب و نگهداری زیرساخت‌های شهری شود. این صرفه‌جویی‌ها می‌تواند در سایر بخش‌های توسعه شهری، مانند بهبود خدمات عمومی یا ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان، سرمایه‌گذاری مجدد شود.

۳) ارتقای پایداری زیست‌محیطی: بازچرخانی آب با کاهش حجم تخلیه پساب به محیط‌زیست، نقش مؤثری در حفاظت از منابع آبی طبیعی، جلوگیری از آلودگی و حفظ اکوسیستم‌های آبی و خاکی ایفا می‌کند. همچنین، در کاهش اثرات زیان‌بار شهری مانند جزایر حرارتی و بهبود کیفیت هوا مشارکت دارد.

۴) افزایش تاب‌آوری شهری: در مواجهه با چالش‌های فزاینده مانند تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های طولانی‌مدت و افزایش جمعیت، بازچرخانی آب به عنوان یک منبع آب جایگزین و قابل اتکا، تاب‌آوری شهرها را در برابر بحران‌های آبی به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

۵) نیاز به رویکردی جامع: موفقیت بازچرخانی آب، مستلزم غلبه بر چالش‌های اقتصادی، فنی، اجتماعی و قانونی است. این امر نیازمند ترکیبی از سرمایه‌گذاری هوشمندانه، به‌کارگیری فناوری‌های مناسب، آموزش و اطلاع‌رسانی عمومی، و تدوین چارچوب‌های قانونی و نهادی حمایتی است.

۶-۱-پیشنهادها

بر اساس یافته‌های این مقاله، پیشنهادات زیر برای ارتقاء و گسترش بازچرخانی آب در سطح شهرداری‌ها ارائه می‌شود:

۱. تدوین و اجرای برنامه‌های جامع مدیریت بازچرخانی آب در سطح شهر:

- شهرداری‌ها باید برنامه‌های راهبردی مدون و بلندمدت برای بازچرخانی آب تدوین کنند که شامل اهداف کمی و کیفی مشخص، اولویت‌بندی کاربردها، برآورد هزینه‌ها و منابع تأمین مالی، و زمان‌بندی اجرا باشد.
- این برنامه‌ها باید به صورت بخشی تفکیک‌ناپذیر از برنامه‌ریزی جامع شهری، طرح‌های توسعه شهری و مدیریت منابع آب لحاظ شوند.

۲. تقویت زیرساخت‌ها و فناوری‌های بازچرخانی:

- سرمایه‌گذاری در ارتقاء و توسعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجود و احداث واحدهای جدید با قابلیت دستیابی به استانداردهای کیفی لازم برای کاربردهای مختلف بازچرخانی.
- به‌کارگیری فناوری‌های نوین و کارآمد تصفیه، مانند فرآیندهای غشایی، اکسیداسیون پیشرفته، و سیستم‌های تصفیه مبتنی بر طبیعت (مانند تالاب‌های ساخته‌شده)، متناسب با شرایط محلی و اقتصادی.

- توسعه و نگهداری شبکه‌های توزیع مجزا برای پساب تصفیه‌شده، با تأکید بر ایمنی، جلوگیری از اختلاط و علامت‌گذاری مناسب.

۳. ایجاد چارچوب‌های قانونی و حمایتی مناسب:
- ضرورت تدوین یا اصلاح قوانین و مقررات ملی و محلی برای تسهیل فرآیندهای اخذ مجوز، تعیین استانداردها، و حمایت از پروژه‌های بازچرخانی.
- ایجاد سازوکارهای تشویقی (مانند معافیت‌های مالیاتی، یارانه‌ها، یا قیمت‌گذاری ترجیحی) برای ترغیب مصرف‌کنندگان (اعم از شهرداری‌ها، صنایع و حتی شهروندان) به استفاده از آب بازچرخانی‌شده.
- شفاف‌سازی نقش‌ها و مسئولیت‌های نهادهای مختلف (مانند وزارت نیرو، سازمان حفاظت محیط‌زیست، وزارت بهداشت، و شهرداری‌ها) در چرخه بازچرخانی.

۴. جذب سرمایه‌گذاری و مشارکت بخش خصوصی:
- استفاده از مدل‌های مشارکت عمومی–خصوصی (PPP) برای تأمین مالی، طراحی، ساخت و بهره‌برداری از پروژه‌های بازچرخانی.
- فراهم کردن محیطی امن و جذاب برای سرمایه‌گذاران بخش خصوصی از طریق ارائه تضمین‌های لازم و شفاف‌سازی فرآیندهای قانونی و اجرایی.

۵. ترویج فرهنگ بازچرخانی و افزایش آگاهی عمومی:
- اجرای برنامه‌های آموزشی و اطلاع‌رسانی مستمر برای شهروندان، کارکنان شهرداری، و کارشناسان مرتبط با موضوع بازچرخانی آب، مزایا، ایمنی و نحوه استفاده صحیح از آن.
- برگزاری کارگاه‌های آموزشی، سمینارها و انتشار محتوای رسانه‌ای برای رفع ابهامات و کاهش مقاومت‌های احتمالی.
- تشویق به مشارکت مردم در فرآیند تصمیم‌گیری و اجرای پروژه‌ها

۶. تقویت سیستم‌های پایش و مدیریت هوشمند:
- استفاده از فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء (IoT) و هوش مصنوعی برای پایش مستمر کیفیت و کمیت پساب در تمامی مراحل، از جمع‌آوری تا مصرف.
- توسعه سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) برای مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع و شناسایی نقاط ضعف و قوت.
- استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه، پیش‌بینی تقاضا و مدیریت ریسک.

۷. یکپارچه‌سازی بازچرخانی آب با سایر راهبردهای مدیریت شهری:
- ادغام بازچرخانی آب با راهبردهای مدیریت جامع منابع آب (IWRM)، مدیریت شهری پایدار، و مفاهیم شهر هوشمند و شهر اسفنجی.
- هماهنگی بین واحدهای مختلف شهرداری (مانند خدمات شهری، فضای سبز، شهرسازی، و محیط‌زیست) برای اطمینان از اجرای هم‌افزای پروژه‌های بازچرخانی.

اجرای این پیشنهادات می‌تواند گامی مؤثر در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار، افزایش تاب‌آوری شهری، و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان از طریق مدیریت هوشمندانه و مسئولانه منابع آب باشد.

سال نهم، شماره ۲ (پیاپی ۳۹)، بهار ۱۴۰۵ (ویژه‌نامه)
فصلنامه مطالعات کاربردی در علوم اجتماعی و جامعه شناسی
ISSN: 2645-4475

منابع

1) Ahmadi, M. (2023). The role of water recycling in improving the productivity of municipal water and soil units. Journal of Urban Water Management, 10(1), 15-32.
2) Brown, R. (2023). Foundations of water recycling and its distinction from industrial reuse. Water Resources Review, 25(3), 112-128.
3) Johns, T. (2024). Economic and environmental benefits of water recycling in urban sanitation. Urban Environmental Policy Journal, 18(2), 75-90.
4) Lee, K. (2025). Smart monitoring and integration of water recycling in sponge cities. International Journal of Sustainable Urban Drainage, 7(4), 201-219.
5) Martin, L. (2022). Wastewater quality standards for non-potable reuse. Journal of Water Quality and Health, 12(1), 45-58.
6) Patel, S. (2024). Sources of municipal wastewater and stormwater runoff management. Urban Water and Drainage Systems, 16(3), 130-145.
7) Smith, J. (2023). Integrated water resources management in urban structures. Journal of Urban Planning and Water Policy, 30(2), 88-105.
8) Timouri, H. (2025). Advanced treatment technologies for urban water recycling. Water Treatment and Reuse Science, 9(2), 60-77.
9) Williams, D. (2022). Remote sensing and GIS in urban water mapping. Remote Sensing of Environment, 27(1), 88–105.

The Role of Water Reuse in Enhancing the Water and Soil Unit Productivity of Municipalities

Abstract

The escalating water crisis has made the necessity of revising water resource management policies more apparent than ever. In this regard, Water Reuse, as a strategic approach, offers significant potential for increasing productivity in water and soil management, particularly at the municipal level. This article aims to elucidate the role of water reuse in improving the productivity of municipal water and soil units by examining theoretical foundations, novel wastewater treatment sources and technologies, applications and environmental/economic benefits, as well as prevailing challenges and implementation solutions. Analyses indicate that the reuse of urban wastewater, in addition to reducing pressure on freshwater resources, can be utilized for green space irrigation, street washing, and industrial purposes, ultimately leading to reduced operational costs and enhanced urban resilience against water crises. Furthermore, this approach plays a crucial role in mitigating environmental pollution caused by wastewater discharge and improving the health of urban ecosystems. However, challenges such as initial investment, public acceptance, and the need for compatible infrastructure require the development of comprehensive and integrated solutions. Ultimately, this article emphasizes the necessity of integrating water sources, strengthening legal standards, engaging the private sector, and utilizing intelligent monitoring systems to achieve water reuse objectives in municipalities.

Keywords: Water, Productivity, Soil, Municipalities, Municipal Water and Soil.