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

مروری بر فناوری‌های هوشمند در پایش رطوبت خاک و آبیاری فضای سبز شهری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰
کد مقاله: ۱۰۰۱۹

احسان توکلی آغچغلو[۱]

چکـیده

رشد شتابان شهرنشینی، تغییرات اقلیمی و بحران فزاینده منابع آبی، گذار از سامانه‌های آبیاری سنتی (مبتنی بر زمان‌بندی ثابت) به سامانه‌های هوشمند و داده‌محور را به ضرورتی انکارناپذیر تبدیل کرده است. این مقاله مروری به بررسی یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین پایش رطوبت خاک، از جمله حسگرهای TDR/FDR و حسگرهای غیرتماسی NIR، با زیرساخت‌های اینترنت اشیاء (IoT) برای بهینه‌سازی توزیع آب در فضای سبز شهری می‌پردازد. با تحلیل هم‌افزایی میان جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده هوش مصنوعی، این مطالعه نشان می‌دهد که مدیریت هوشمند آبیاری می‌تواند منجر به کاهش ۳۵ تا ۴۵ درصدی مصرف آب شهری شود و در عین حال، خدمات اکوسیستمی نظیر تنظیم دمای محیط، کاهش جزایر حرارتی و ارتقای سلامت بستر ریشه را تقویت کند. علاوه بر این، مقاله حاضر ضمن واکاوی چالش‌های پیاده‌سازی، بر اهمیت حیاتیِ «قابلیت همکاری» (Interoperability)، بهره‌گیری از پروتکل‌های ارتباطی باز و تأمین امنیت سایبری در زیرساخت‌های حیاتی شهری تأکید می‌ورزد. در پایان، چارچوبی راهبردی مبتنی بر مفهوم «دوقلوهای دیجیتال» و «مدیریت عملکردی» پیشنهاد شده است که گذار از مدیریت واکنشی به حکمرانی پیش‌دستانه و تاب‌آور را ترسیم می‌کند. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که آبیاری هوشمند نه صرفاً یک ابزار کارایی فنی، بلکه یکی از مؤلفه‌های بنیادین در تحقق «شهر اسفنجی» و زیرساخت‌های شهری پایدار است.

واژگـان کلـیدی: آبیاری هوشمند، رطوبت خاک، اینترنت اشیاء (IoT)، شهر تاب‌آور، مدیریت فضای سبز شهری، هوش مصنوعی، پایداری محیط‌زیست.

۱- کارشناسی زمین شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

۱- مقدمه

مدیریت پایدار منابع آب و خاک در محیط‌های شهری به عنوان یکی از چالش‌های اصلی مدیریت مدرن، نیازمند گذار از روش‌های سنتی به فناوری‌های تحلیل مکانی است. رشد افسارگسیخته جمعیت و توسعه فیزیکی شهرها، تعادل اکولوژیک حوزه‌های آبخیز را برهم زده و منجر به بحران‌هایی نظیر سیلاب‌های شهری، فرونشست زمین و آلودگی منابع خاک شده است. (چوداری، ۲۰۰۹)

سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) با قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌های توصیفی و مکانی، بستری برای مدلسازی هیدرولوژیک فراهم آورده‌اند. (بابان و وان‌یوسف، ۲۰۰۳) در کنار آن، فناوری سنجش‌ازدور (RS) امکان پایش بلادرنگ تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی کیفیت خاک را بدون نیاز به عملیات میدانی پرهزینه میسر می‌سازد. (البستاوسی، ۲۰۱۳) تلفیق این دو ابزار در ساختار شهرداری‌ها، مدیریت بحران را از حالت انفعالی به رویکرد پیش‌دستانه و مبتنی بر شواهد تغییر می‌دهد. (آل‌ادامات، ۲۰۰۸) با این حال، استفاده بهینه از این فناوری‌ها مستلزم شناخت دقیق پارامترهای محیطی و استقرار زیرساخت‌های داده‌ای کارآمد است. (ال‌سید، ۲۰۱۵) فقدان داده‌های دقیق و تحلیل‌های مبتنی بر مدل‌سازی فضایی در مدیریت شهری، هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را به مدیریت آب و خاک تحمیل کرده است. (جمشیدی، ۲۰۱۹)

این مقاله با بررسی پتانسیل‌های GIS و سنجش‌ازدور، چارچوبی عملیاتی برای بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در شهرداری‌ها ارائه می‌دهد. (تیموری، ۲۰۲۱) هدف نهایی، دستیابی به الگوی پایداری است که ضمن حفاظت از منابع پایه، تاب‌آوری شهر را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش دهد. (موسوی، ۲۰۲۲) رویکرد این پژوهش بر استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدلسازی‌های هیدرولوژیک استوار است تا با کاهش عدم‌قطعیت‌های مدیریتی، بستر اجرای طرح‌های توسعه شهری را فراهم آورد. (احمدی، ۲۰۲۳) در نهایت، این چارچوب می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مدیران شهری جهت ارتقای بهره‌وری در نگهداری و احیای اکوسیستم‌های شهری عمل نماید. (نظری، ۲۰۲۴)

۲- مبانی نظری

۲-۱- اهمیت پایش رطوبت خاک در آبیاری فضای سبز

رطوبت خاک، حیاتی‌ترین عامل در تأمین نیاز آبی گیاهان است. کمبود یا بیش‌بود رطوبت خاک هر دو می‌توانند منجر به استرس فیزیولوژیک در گیاهان، کاهش رشد، افزایش استعداد به آفات و بیماری‌ها و در نهایت مرگ گیاه شوند. در فضای سبز شهری، پیچیدگی‌هایی نظیر تنوع گونه‌های گیاهی، تفاوت در بافت خاک، عمق ریشه‌ها و شرایط میکرو اقلیمی، نیاز آبی هر منطقه را به‌طور قابل توجهی متغیر می‌سازد. بنابراین، اتکا به برنامه‌های زمانی ثابت برای آبیاری، رویکردی ناکارآمد و پرمصرف است. پایش مستمر و دقیق رطوبت خاک، امکان تعیین زمان و مقدار بهینه آبیاری را فراهم کرده و از اتلاف منابع آب جلوگیری می‌کند. (جونز، ۲۰۲۲)

۲-۲- فناوری‌های حسگری رطوبت خاک

پیشرفت‌های اخیر در حوزه علم مواد و الکترونیک، منجر به توسعه نسل جدیدی از حسگرهای رطوبت خاک شده است. این حسگرها از اصول فیزیکی متفاوتی برای اندازه‌گیری رطوبت استفاده می‌کنند، از جمله:

- حسگرهای مبتنی بر مقاومت الکتریکی (Electrical Resistance): این حسگرها با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بین دو الکترود که در خاک قرار می‌گیرند، رطوبت را تخمین می‌زنند. اگرچه این حسگرها ارزان هستند، اما دقت آن‌ها تحت تأثیر شوری خاک و خوردگی الکترودها قرار می‌گیرد. (لی، ۲۰۲۱)
- حسگرهای مبتنی بر ظرفیت خازنی (Capacitance/Dielectric): این حسگرها با اندازه‌گیری تغییرات ظرفیت خازنی در خاک که تابعی از ثابت دی‌الکتریک آب است، رطوبت را تعیین می‌کنند. این حسگرها دقت بالاتری داشته و کمتر تحت تأثیر شوری خاک قرار می‌گیرند. (محمدی، ۲۰۲۲)
- حسگرهای مبتنی بر اندازه‌گیری زمان پرواز امواج الکترومغناطیسی (TDR/FDR): این روش‌ها با ارسال امواج الکترومغناطیسی به درون خاک و اندازه‌گیری زمان بازگشت یا تغییرات فرکانس، رطوبت و گاهی شوری خاک را با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری می‌کنند. این حسگرها استاندارد طلایی در اندازه‌گیری رطوبت خاک محسوب می‌شوند. (پترسون، ۲۰۲۳)

۲-۳- سیستم‌های آبیاری هوشمند و اتوماسیون

فراتر از پایش رطوبت، فناوری‌های هوشمند به سمت اتوماسیون فرآیند آبیاری حرکت کرده‌اند. این سیستم‌ها با اتصال حسگرهای رطوبت خاک به کنترل‌کننده‌های مرکزی، قادرند به‌طور خودکار شیرهای آب را باز و بسته کنند. الگوریتم‌های پیشرفته در این سیستم‌ها، علاوه بر داده‌های حسگرها، اطلاعات مربوط به پیش‌بینی آب‌وهوا (دما، بارش، تبخیر و تعرق)، نوع گیاه و مرحله رشد آن را نیز در نظر می‌گیرند. این امر باعث می‌شود آبیاری دقیقاً در زمان و مقدار مورد نیاز انجام شود. سیستم‌های آبیاری مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) امکان کنترل و نظارت از راه دور را از طریق اپلیکیشن‌های موبایل یا پلتفرم‌های وب فراهم می‌کنند. (چن، ۲۰۲۳)

۲-۴- سنجش‌ازدور و GIS در ارزیابی نیاز آبی فضاهای سبز

در مقیاس بزرگ‌تر، فناوری سنجش‌ازدور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) نقش مکملی ایفا می‌کنند. تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی و زمانی مناسب، می‌توانند اطلاعاتی در مورد شاخص‌های پوشش گیاهی (مانند NDVI)، دمای سطح زمین (LST) و تبخیر و تعرق منطقه‌ای (ET) ارائه دهند. این داده‌ها که از طریق GIS قابل تحلیل و تلفیق با سایر اطلاعات مکانی (مانند نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و توپوگرافی) هستند، به مدیران شهری کمک می‌کنند تا نیاز آبی کلی مناطق مختلف فضای سبز را برآورد کرده و برنامه‌ریزی‌های کلان آبیاری را تدوین کنند. این رویکرد، به‌ویژه برای پارک‌های بزرگ، کمربندهای سبز شهری و فضاهای سبز خطی (مانند حاشیه بزرگراه‌ها) کاربرد دارد. (لو، ۲۰۲۲)

۲-۵- مزایای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند

پیاده‌سازی این فناوری‌ها در آبیاری فضای سبز شهری، مزایای متعددی به همراه دارد:

- صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف آب: با آبیاری دقیق و بر اساس نیاز واقعی، مصرف آب می‌تواند تا ۳۰-۵۰٪ کاهش یابد. (احمدی، ۲۰۲۳)
- بهبود سلامت و شادابی گیاهان: جلوگیری از تنش‌های آبی (کمبود یا غرقاب) به رشد بهتر و افزایش طول عمر گیاهان منجر می‌شود. (نیکلسون، ۲۰۲۲)
- کاهش هزینه‌های عملیاتی: اتوماسیون فرآیند آبیاری، نیاز به نیروی انسانی برای نظارت و اجرای دستی را کاهش می‌دهد. (وایت، ۲۰۲۳)
- کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی: جلوگیری از شسته شدن کودها و مواد شیمیایی از خاک به دلیل آبیاری بیش از حد. (گرین، ۲۰۲۲)
- امکان پایش و مدیریت از راه دور: دسترسی به داده‌ها و کنترل سیستم‌ها از طریق پلتفرم‌های آنلاین. (پارکر، ۲۰۲۳)

۲-۶- چالش‌های فنی و اجرایی

علی‌رغم مزایای فراوان، پیاده‌سازی این فناوری‌ها با چالش‌هایی نیز روبرو است:

هزینه اولیه بالا: تهیه و نصب حسگرها، کنترل‌کننده‌ها و نرم‌افزارهای هوشمند می‌تواند هزینه‌بر باشد. (براون، ۲۰۲۱)

نیاز به دانش فنی: راه‌اندازی، نگهداری و تفسیر داده‌های حاصل از این سیستم‌ها نیازمند تخصص فنی است. (کالدر، ۲۰۲۲)

استانداردسازی و سازگاری: عدم وجود استانداردهای یکپارچه برای حسگرها و نرم‌افزارها می‌تواند مشکل‌ساز باشد. (دیویس، ۲۰۲۳)

شرایط محیطی: دوام و دقت حسگرها در شرایط سخت محیطی شهری (مانند گرد و غبار، دماهای شدید و تخریب فیزیکی) باید در نظر گرفته شود. (رابرتز، ۲۰۲۲)

۳- فناوری‌های پیشرفته حسگری رطوبت خاک در فضای سبز

امروزه حسگرهای رطوبت خاک به عنوان "چشم‌های دیجیتال" در مدیریت هوشمند فضای سبز عمل می‌کنند. فناوری‌های TDR (بازتاب‌سنجی در حوزه زمان) و FDR (بازتاب‌سنجی در حوزه فرکانس) به دلیل دقت بسیار بالا در اندازه‌گیری محتوای حجمی آب خاک (VWC)، به استانداردی در پروژه‌های تحقیقاتی و فضای سبز لوکس تبدیل شده‌اند. این حسگرها با ارسال پالس‌های الکترومغناطیسی و اندازه‌گیری پاسخ خاک، تحت تأثیر شوری و دمای خاک قرار نمی‌گیرند و داده‌های بسیار پایداری را

ارائه می‌دهند. در مقابل، حسگرهای مبتنی بر پتانسیل ماتریک (Tensiometers) که رطوبت را از منظر نیروی مورد نیاز گیاه برای جذب آب می‌سنجند، در شرایطی که حفظ سلامت ریشه اولویت اصلی است، بسیار دقیق‌تر عمل می‌کنند. (اسمیت، ۲۰۲۳)

علاوه بر حسگرهای تماسی که در عمق ریشه قرار می‌گیرند، نسل جدیدی از حسگرهای غیرتماسی مبتنی بر طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک (NIR) در حال توسعه هستند که بدون نیاز به حفاری یا تخریب ساختار خاک، رطوبت لایه سطحی را تخمین می‌زنند. هرچند این فناوری‌ها هنوز در مراحل آزمایشگاهی یا محدود هستند، اما پتانسیل بالایی برای پایش سریع در فضاهای سبز شهری پرتردد دارند. انتخاب نوع حسگر در پروژه‌های شهرداری باید بر اساس جنس خاک (رسی یا شنی)، عمق ریشه گیاهان غالب و هزینه‌های نگهداری سالانه صورت پذیرد تا از خطاهای اندازه‌گیری جلوگیری شود. (جانز، ۲۰۲۴)

۴- اینترنت اشیاء (IoT) و زیرساخت‌های آبیاری هوشمند

شبکه‌های اینترنت اشیاء (IoT) ستون فقرات آبیاری هوشمند شهری را تشکیل می‌دهند. در این معماری، حسگرها از طریق پروتکل‌های ارتباطی کم‌مصرف (مانند LoRaWAN یا NB-IoT) به دروازه‌های (Gateways) مرکزی متصل می‌شوند. این زیرساخت اجازه می‌دهد که داده‌های رطوبت خاک از سراسر یک پارک بزرگ به‌صورت لحظه‌ای و بدون نیاز به سیم‌کشی‌های پرهزینه به مرکز کنترل ارسال شود. پردازش این داده‌ها در پلتفرم‌های ابری (Cloud) و ترکیب آن‌ها با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، باعث می‌شود سیستم بتواند بر اساس نرخ تبخیر و تعرق پیش‌بینی‌شده برای ۲۴ ساعت آینده، میزان دقیق آب مورد نیاز را پیش‌بینی و شیرهای برقی را باز یا بسته کند. (ویلیامز، ۲۰۲۲)

مدیریت هوشمند بر پایه IoT نه تنها اتلاف آب را به حداقل می‌رساند، بلکه با قابلیت تشخیص نشت (Leakage Detection)، هدررفت آب در شبکه‌های توزیع داخل پارک‌ها را نیز شناسایی می‌کند. زمانی که سنسورهای رطوبت خاک و دبی‌سنج‌ها هم‌زمان فعال باشند، اگر در هنگام آبیاری شاهد افزایش غیرعادی آب در یک نقطه یا افت فشار ناگهانی باشیم، سیستم به‌طور خودکار دستور قطع آب را صادر کرده و هشدار خرابی به تیم فنی ارسال می‌کند. این قابلیت در مقیاس‌های بزرگ شهری، منجر به صرفه‌جویی چشمگیر در هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. (لی، ۲۰۲۵)

۵- نقش GIS و سنجش‌ازدور در مدیریت کلان فضای سبز

در حالی که حسگرهای IoT داده‌های نقطه ای و دقیق ارائه می‌دهند، GIS و سنجش‌ازدور دیدگاه کلان و فضایی به مدیریت آبیاری می‌بخشند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مانند Sentinel-2)، شهرداری‌ها می‌توانند شاخص‌های گیاهی (مانند NDVI) را پایش کرده و مناطق دارای تنش خشکی را در پهنه‌های وسیع فضای سبز شناسایی کنند. GIS این داده‌ها را با مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) و نقشه‌های کاربری اراضی تلفیق کرده و نقشه‌های "پتانسیل نیاز آبی" را تولید می‌کند. این نقشه‌ها به مدیران کمک می‌کند تا اولویت‌بندی آبیاری را در زمان‌های بحرانی کم‌آبی (نظیر پیک تابستان) به دقت تعیین کنند. (براون، ۲۰۲۳)

ترکیب داده‌های سنجش‌ازدور با مدل‌های هیدرولوژیک شهری در بستر GIS، امکان پیش‌بینی روان‌آب و مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز شهری را نیز فراهم می‌کند. برای مثال، تحلیل‌های GIS می‌تواند مشخص کند که در کدام بخش از فضای سبز، زهکشی خاک ضعیف است و احتمال غرقابی شدن وجود دارد؛ بنابراین، برنامه آبیاری هوشمند باید در این نقاط با احتیاط بیشتری تنظیم شود. در واقع، این فناوری‌ها به شهرداری اجازه می‌دهند تا فضای سبز را نه به عنوان جزایر جداگانه، بلکه به عنوان یک شبکه به هم پیوسته که با سیستم هیدرولوژیک شهر در تعامل است، مدیریت نمایند. (پاتل، ۲۰۲۴)

۶- چالش‌ها و راهکارهای اجرایی برای شهرداری‌ها

پیاده‌سازی این سیستم‌ها در شهرداری‌ها با چالش‌های اجرایی متعددی روبروست که مهم‌ترین آن‌ها عدم یکپارچگی زیرساخت‌های فعلی و کمبود نیروی متخصص برای تحلیل داده‌هاست. بسیاری از سیستم‌های آبیاری قدیمی، قابلیت ارتقا به سیستم‌های هوشمند را ندارند و نیازمند نوسازی کامل هستند که بودجه سنگینی می‌طلبد. برای غلبه بر این چالش، توصیه می‌شود شهرداری‌ها از استراتژی "پیاده‌سازی فازبندی شده" استفاده کنند؛ یعنی ابتدا در مناطق حساس یا پارک‌های اصلی که بیشترین مصرف آب را دارند، سیستم‌های پایلوت اجرا شده و پس از اثبات اثربخشی، به سایر مناطق تسری یابد. (مارتین، ۲۰۲۲)

راهکار دیگر، بهره‌گیری از قراردادهای "مدیریت عملکرد آب" با شرکت‌های بخش خصوصی است. در این مدل، شرکت پیمانکار متعهد می‌شود با نصب تجهیزات هوشمند، میزان مصرف آب را تا سطح مشخصی کاهش دهد و هزینه سرمایه‌گذاری خود را از محل صرفه‌جویی حاصل از کاهش قبض آب شهرداری بازگرداند. علاوه بر این، ارتقای سطح سواد دیجیتال پرسنل فضای

سبز و ایجاد واحدهای "تحلیل داده‌های شهری" در شهرداری‌ها، برای پایداری این سیستم‌ها ضروری است. بدون وجود نیروی انسانی که بتواند داده‌های حسگرها را تفسیر کند، این فناوری‌ها تنها به قطعات الکترونیکی بی‌مصرف در دل خاک تبدیل خواهند شد. (تیموری، ۲۰۲۵)

۷- مطالعات موردی: تحلیل تجربیات جهانی در مدیریت هوشمند آبیاری

تجربیات پیاده‌سازی سیستم‌های آبیاری هوشمند در کلان‌شهرهای جهان نشان‌دهنده الگویی از تغییر رفتار مصرف آب است. به عنوان مثال، در پروژه‌های اجرا شده در شهرهای خشک و نیمه‌خشک، جایگزینی سیستم‌های زمان‌بندی ثابت (Timer-based) با سیستم‌های مبتنی بر داده‌های رطوبت خاک، منجر به کاهش میانگین ۳۵ تا ۴۵ درصدی در مصرف آب شده است. در این مطالعات، کلیدی‌ترین عامل موفقیت، کالیبراسیون دقیق حسگرها بر اساس بافت خاک بومی آن منطقه بوده است، چرا که در بسیاری از موارد، استفاده از تنظیمات پیش‌فرضِ کارخانه بدون در نظر گرفتن نفوذپذیری خاک، منجر به آبیاری بیش از حد یا تنش آبی گیاه شده است. (اسمیت، ۲۰۲۳)

در یک مطالعه موردی دیگر در فضاهای سبز عمومیِ یک کلان‌شهر اروپایی، تلفیق داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی محلی با حسگرهای رطوبت خاک، امکان پیش‌بینی دقیق بازه زمانیِ آبیاری را فراهم کرد. نتایج نشان داد که علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، سلامت ظاهری و شادابی چمن‌کاری‌ها و درختان در مقایسه با روش‌های دستی بهبود قابل‌توجهی یافته است. نکته حائز اهمیت در این تجربه، انتقال از مدل «مدیریت واکنشی» (پاسخ به شکایت شهروندان یا مشاهده خشکی) به مدل «مدیریت پیش‌دستانه» بود که توانست هزینه‌های نیروی انسانی برای بررسی روزانه فضای سبز را به شدت کاهش دهد. (جونز، ۲۰۲۲)

۸- الزامات و استانداردهای فنی برای یکپارچه‌سازی سیستم‌ها

برای پایداری سیستم‌های هوشمند در مقیاس شهری، تدوین یک استاندارد واحد در سطح شهرداری ضروری است. اولین چالش فنی، «قابلیت همکاری» (Interoperability) است؛ به این معنا که تجهیزات ارائه‌شده توسط شرکت‌های مختلف باید بتوانند در بستر یک پلتفرم مرکزی با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. پیشنهاد می‌شود شهرداری‌ها برای پروژه‌های جدید، استفاده از پروتکل‌های ارتباطی استاندارد و باز (Open Standards) را برای تمامی پیمانکاران الزامی کنند تا از وابستگی به یک تأمین‌کننده خاص (Vendor Lock-in) و هزینه‌های گزاف آتی جلوگیری شود. (لی، ۲۰۲۱)

علاوه بر این، امنیت سایبری در زیرساخت‌های آبیاری هوشمند نباید نادیده گرفته شود. از آنجا که این سیستم‌ها بخشی از اینترنت اشیاء شهری هستند، هرگونه نفوذ به شبکه می‌تواند منجر به تغییر غیرمجاز در برنامه‌های آبیاری، هدررفت عظیم آب یا حتی آسیب به تاسیسات برقی شود. پیاده‌سازی سیستم‌های احراز هویت قوی، رمزنگاری داده‌ها در طول مسیر انتقال و ایجاد لایه‌های حفاظتی (Firewalls) در مرکز کنترل، از ملزومات فنی است که باید در سند بالادستی مدیریت هوشمند فضای سبز شهری گنجانده شود. (محمدی، ۲۰۲۲)

۹- تحلیل زیست‌محیطی آبیاری هوشمند در پایداری اکوسیستم‌های شهری

آبیاری هوشمند تنها یک ابزار برای کاهش مصرف آب نیست، بلکه بخشی از راهبرد کلان پایداری شهری به شمار می‌رود. فضای سبز شهری در تنظیم دمای محیط، کاهش گردوغبار، افزایش نفوذ آب به خاک، حفظ تنوع زیستی و ارتقای کیفیت زیست‌پذیری شهرها نقش بنیادین دارد. با این حال، زمانی که این فضاها با روش‌های سنتی و بدون توجه به نیاز واقعی گیاه آبیاری می‌شوند، نه‌تنها منابع آب هدر می‌رود، بلکه پایداری اکولوژیک آن‌ها نیز تضعیف می‌شود. آبیاری بیش از حد می‌تواند موجب کاهش اکسیژن خاک، گسترش بیماری‌های قارچی، شست‌وشوی عناصر غذایی و افت کیفیت بستر ریشه شود، در حالی که آبیاری کمتر از نیاز نیز تنش خشکی، کاهش رشد و زوال تدریجی پوشش گیاهی را در پی دارد. از این رو، سامانه‌های هوشمند با تنظیم دقیق تعادل آب در ناحیه ریشه، به حفظ کارکرد اکولوژیک فضای سبز کمک می‌کنند. (براون، ۲۰۲۱)

یکی از مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی کاربرد آبیاری هوشمند، افزایش بهره‌وری مصرف آب در مقیاس اکوسیستم شهری است. در این رویکرد، آب بر اساس وضعیت واقعی خاک، مرحله رشد گیاه، شرایط جوی و ظرفیت نگهداشت رطوبت در خاک تخصیص می‌یابد. چنین سازوکاری موجب می‌شود آب آبیاری نه به شکل روان‌آب سطحی هدر رود و نه به اعماق خارج از دسترس ریشه نفوذ کند. در نتیجه، هم بهره‌وری فیزیکی آب افزایش می‌یابد و هم فشار بر منابع آب زیرزمینی و شبکه‌های تأمین آب شهری کاهش پیدا می‌کند. این موضوع به‌ویژه در شهرهای واقع در اقلیم خشک و نیمه‌خشک که با تنش آبی ساختاری مواجه‌اند، دارای اهمیت دوچندان است و می‌تواند بخشی از سیاست سازگاری شهری با کم‌آبی تلقی شود. (کالدر، ۲۰۲۲)

از منظر خاک‌شناسی محیطی، آبیاری هوشمند به کاهش تخریب تدریجی خاک در فضای سبز شهری نیز کمک می‌کند. در بسیاری از شهرها، خاک فضاهای سبز به دلیل فشردگی ناشی از تردد، اختلاط با نخاله‌های ساختمانی و ضعف ساختمان خاک، ظرفیت محدودی برای نگهداشت آب و تهویه مناسب دارد. در چنین شرایطی، آبیاری بی‌برنامه سبب اشباع موقت، کاهش تخلخل مؤثر و تشدید فرسایش ساختاری خاک می‌شود. سامانه‌های مبتنی بر حسگر، با اعمال آبیاری در مقدار و زمان بهینه، از نوسانات شدید رطوبتی جلوگیری کرده و شرایط مناسب‌تری برای فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک، توسعه ریشه و پایداری فیزیکی بستر فراهم می‌کنند. این مسئله در بلندمدت کیفیت بوم‌شناختی فضای سبز را ارتقا می‌دهد. (دیویس، ۲۰۲۳)

تأثیر آبیاری هوشمند بر کاهش جزایر حرارتی شهری نیز از جنبه‌های بسیار مهم زیست‌محیطی آن است. جزیره حرارتی شهری پدیده‌ای است که در آن دمای مناطق ساخته‌شده شهر نسبت به نواحی پیرامونی بالاتر می‌رود و این افزایش دما بر مصرف انرژی، سلامت عمومی و آسایش حرارتی شهروندان اثر منفی می‌گذارد. پوشش گیاهی سالم از طریق تبخیر و تعرق و ایجاد سایه، یکی از مؤثرترین ابزارهای طبیعی برای تعدیل این پدیده است. زمانی که فضای سبز به دلیل مدیریت نادرست آب دچار تنش شود، توانایی آن برای خنک‌سازی محیط کاهش می‌یابد. در مقابل، آبیاری هوشمند با حفظ رطوبت بهینه در ناحیه ریشه، امکان تداوم عملکرد فیزیولوژیک گیاه را فراهم ساخته و ظرفیت تبخیر و تعرق گیاهان را در سطح مطلوب حفظ می‌کند؛ در نتیجه، نقش فضای سبز در کنترل دمای شهری تقویت می‌شود. (گرین، ۲۰۲۲)

علاوه بر اثرات حرارتی، پایداری پوشش گیاهی ناشی از آبیاری دقیق می‌تواند به بهبود کیفیت هوا نیز منجر شود. گیاهان سالم ظرفیت بیشتری برای جذب ذرات معلق، تولید اکسیژن و تثبیت نسبی برخی آلاینده‌ها دارند. اگرچه آبیاری هوشمند به‌طور مستقیم فناوری کنترل آلودگی هوا نیست، اما از طریق ارتقای سلامت و ماندگاری گیاهان، به حفظ خدمات اکوسیستمی فضای سبز کمک می‌کند. این خدمات شامل تلطیف هوا، کاهش تنش‌های محیطی و تقویت پیوستگی زیستی در بافت شهری است. بنابراین، مزیت اصلی آبیاری هوشمند صرفاً صرفه‌جویی در آب نیست، بلکه تثبیت چندمنظوره کارکردهای اکولوژیک فضای سبز در شرایط فشار اقلیمی و توسعه شهری است. (رابرتز، ۲۰۲۲)

از منظر مدیریت روان‌آب شهری نیز آبیاری هوشمند می‌تواند آثار مثبتی داشته باشد. در سیستم‌های سنتی، آبیاری بیش از حد به‌خصوص در خاک‌های کوبیده یا شیب‌دار، موجب تشکیل روان‌آب و انتقال رسوبات، کودها و آلاینده‌ها به شبکه زهکشی شهری می‌شود. این وضعیت افزون بر اتلاف آب، بار بیشتری بر زیرساخت‌های جمع‌آوری روان‌آب تحمیل می‌کند. در مقابل، سامانه‌های هوشمند با کنترل شدت و زمان آبیاری، احتمال روان‌آب سطحی را کاهش داده و با افزایش هماهنگی میان نیاز آبی گیاه و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، مدیریت آب را به شکلی سازگارتر با چرخه هیدرولوژیکی شهر هدایت می‌کنند. این امر به‌ویژه در برنامه‌های شهر اسفنجی و توسعه زیرساخت سبز اهمیت راهبردی دارد. (پترسون، ۲۰۲۳)

در مجموع، تحلیل زیست‌محیطی نشان می‌دهد که آبیاری هوشمند باید نه به عنوان یک فناوری مجزا، بلکه به عنوان بخشی از سامانه تاب‌آوری محیطی شهر دیده شود. هرچه این فناوری بهتر با مدیریت خاک، گونه‌گزینی گیاهی، طراحی منظر و سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم تلفیق شود، ظرفیت آن برای ارتقای کیفیت محیط شهری بیشتر خواهد شد. بنابراین، ارزیابی موفقیت چنین سامانه‌هایی باید فراتر از شاخص صرفه‌جویی آب باشد و معیارهایی مانند سلامت پوشش گیاهی، کاهش تنش حرارتی، پایداری خاک و بهبود خدمات اکوسیستمی نیز در آن لحاظ گردد. (وایت، ۲۰۲۳)

۱۰- آینده‌پژوهی: نقش هوش مصنوعی پیشرفته و پیش‌بینی‌های اقلیمی در مدیریت آبیاری فضای سبز

روندهای نوظهور در مدیریت فضای سبز شهری نشان می‌دهد که آینده آبیاری هوشمند از سطح «پاسخ به داده» به سطح «پیش‌بینی و تصمیم‌سازی خودکار» در حال حرکت است. در نسل نخست سامانه‌های هوشمند، حسگرها وضعیت فعلی رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کردند و سامانه بر همان اساس تصمیم به آبیاری می‌گرفت. اما در نسل جدید، هوش مصنوعی و مدل‌های پیش‌بینی‌محور در حال تبدیل شدن به هسته اصلی تصمیم‌گیری هستند. این مدل‌ها نه‌تنها داده‌های کنونی خاک و هوا را تحلیل می‌کنند، بلکه با استفاده از الگوهای تاریخی، روندهای فصلی و پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت آب‌وهوایی، نیاز آبی آینده را نیز برآورد می‌نمایند. این تغییر پارادایم سبب می‌شود آبیاری از یک فرایند واکنشی به یک سامانه مدیریتی پیش‌نگر تبدیل شود. (چن، ۲۰۲۳)

هوش مصنوعی در این حوزه عمدتاً بر پایه یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و مدل‌های ترکیبی داده‌محور توسعه می‌یابد. این الگوریتم‌ها قادرند روابط پیچیده میان متغیرهایی چون رطوبت خاک، دمای هوا، تابش خورشید، سرعت باد، نوع پوشش گیاهی، بافت خاک و الگوی مصرف آب را شناسایی کنند؛ روابطی که در روش‌های سنتی و حتی در برخی مدل‌های فیزیکی ساده به‌خوبی قابل استخراج نیستند. در نتیجه، سامانه می‌تواند برای هر قطعه از فضای سبز، الگوی اختصاصی آبیاری تعریف کند. چنین

رویکردی با مفهوم «مدیریت موضع‌ویژه» در کشاورزی دقیق هم‌راستا است، اما در محیط شهری به دلیل ناهمگنی زیاد کاربری‌ها و محدودیت‌های زیرساختی، ارزش بیشتری پیدا می‌کند. (لو، ۲۰۲۲)

یکی از حوزه‌های امیدبخش در آینده، استفاده از هوش مصنوعی مولد و سامانه‌های زبانی پیشرفته برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی است. این سامانه‌ها می‌توانند داده‌های دریافتی از حسگرها، تصاویر ماهواره‌ای، گزارش‌های هواشناسی و سوابق عملکردی را تلفیق کنند و به زبان ساده برای مدیران شهری تفسیر نمایند. به‌عبارت دیگر، نقش این ابزارها صرفاً تحلیل عددی نیست، بلکه تبدیل داده‌های پیچیده به توصیه‌های اجرایی قابل‌فهم نیز هست. برای مثال، سامانه می‌تواند اعلام کند که در یک منطقه خاص، به دلیل افزایش دمای پیش‌بینی‌شده در سه روز آینده و افت رطوبت خاک در عمق ریشه، لازم است برنامه آبیاری با شدت کمتر اما در دفعات بیشتر اجرا شود. این قابلیت، فاصله میان تحلیل داده و تصمیم اجرایی را کاهش می‌دهد. (احمدی، ۲۰۲۳)

پیش‌بینی‌های اقلیمی نیز در آینده مدیریت آبیاری شهری نقشی تعیین‌کننده خواهند داشت. تغییر اقلیم موجب افزایش فراوانی امواج گرما، نامنظمی بارش و تشدید دوره‌های خشکسالی در بسیاری از شهرها شده است. در چنین شرایطی، اتکا به الگوهای تاریخی ثابت دیگر پاسخگو نیست و سامانه‌های آبیاری باید بتوانند خود را با شرایط ناپایدار و پرریسک تطبیق دهند. ادغام داده‌های اقلیمی فصلی و سالانه با سامانه‌های آبیاری هوشمند این امکان را فراهم می‌کند که شهرداری‌ها از هم‌اکنون برای دوره‌های تنش آبی آینده برنامه‌ریزی کنند، گونه‌های مقاوم‌تر را در اولویت قرار دهند و سناریوهای مختلف تخصیص آب را از پیش طراحی نمایند. (نیکلسون، ۲۰۲۲)

از سوی دیگر، آینده این سامانه‌ها به توسعه مفهوم «دوقلوی دیجیتال» برای فضای سبز شهری نیز وابسته است. دوقلوی دیجیتال به یک مدل مجازی پویا از دارایی‌های واقعی شهر گفته می‌شود که به‌طور مستمر با داده‌های واقعی به‌روزرسانی می‌شود. در زمینه آبیاری، چنین مدلی می‌تواند نمایه‌ای زنده از وضعیت خاک، گیاه، شبکه آبیاری و شرایط جوی ارائه دهد. مدیران شهری با استفاده از این بستر قادر خواهند بود پیش از اجرای واقعی، سناریوهای مختلف آبیاری را شبیه‌سازی کنند و آثار هر تصمیم را بر مصرف آب، سلامت گیاه و هزینه‌های نگهداری بسنجند. این قابلیت می‌تواند ریسک تصمیم‌گیری را کاهش داده و بهره‌وری عملیاتی را به شکل چشمگیری افزایش دهد. (پارکر، ۲۰۲۳)

با وجود این چشم‌انداز امیدبخش، توسعه هوش مصنوعی در مدیریت آبیاری با محدودیت‌هایی نیز روبه‌روست. کیفیت خروجی مدل‌ها به شدت به کیفیت داده‌های ورودی وابسته است. اگر حسگرها به‌درستی کالیبره نشده باشند، اگر پوشش داده‌ای در سطح شهر ناقص باشد یا اگر داده‌های گذشته از انسجام کافی برخوردار نباشند، مدل‌های هوش مصنوعی نیز دقت لازم را نخواهند داشت. افزون بر این، خطر «جعبه سیاه» بودن برخی الگوریتم‌ها وجود دارد؛ یعنی مدیران شهری ممکن است توصیه‌های مدل را دریافت کنند بدون آنکه منطق درونی تصمیم را به‌خوبی درک کنند. از این‌رو، آینده موفق این فناوری‌ها در گرو توسعه مدل‌های قابل‌توضیح، شفاف و قابل ممیزی خواهد بود. (کیم، ۲۰۲۳)

ابعاد نهادی و انسانی نیز در آینده‌پژوهی این حوزه بسیار مهم است. حتی پیشرفته‌ترین سامانه‌های هوش مصنوعی بدون وجود ساختار سازمانی مناسب، نیروی انسانی آموزش‌دیده و سیاست‌گذاری هماهنگ، به نتایج مطلوب نخواهند رسید. شهرداری‌ها باید به تدریج از مدل‌های سنتی نگهداری فضای سبز به سمت حکمرانی داده‌محور حرکت کنند. این گذار مستلزم ایجاد بانک‌های داده منسجم، استانداردسازی ثبت و تبادل اطلاعات، آموزش کارشناسان و تعریف سازوکار پاسخ‌گویی در برابر تصمیم‌های خودکار است. آینده آبیاری هوشمند بیش از آنکه صرفاً به تجهیزات وابسته باشد، به بلوغ نهادی مدیریت شهری وابسته است. (محمدی، ۲۰۲۲)

در افق بلندمدت، می‌توان انتظار داشت که آبیاری فضای سبز شهری به بخشی از یک شبکه هوشمند شهری گسترده‌تر تبدیل شود که در آن داده‌های انرژی، آب، هوا، ترافیک و سلامت محیط به‌صورت یکپارچه مبادله می‌شوند. در چنین وضعیتی، تصمیم آبیاری صرفاً بر مبنای رطوبت خاک اتخاذ نخواهد شد، بلکه عواملی مانند هشدار موج گرما، محدودیت انرژی پمپاژ، اولویت‌های اجتماعی محله‌ها و برنامه‌های تاب‌آوری شهری نیز در آن دخیل خواهند بود. این یکپارچگی، فضای سبز را از یک عنصر تزئینی به یک زیرساخت هوشمند و فعال در سامانه مدیریت شهر تبدیل می‌کند. (دیویس، ۲۰۲۳)

۱۱- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که گذار از مدیریت سنتی فضای سبز شهری به سامانه‌های هوشمند پایش رطوبت خاک و آبیاری، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر برای کلان‌شهرهای قرن بیست و یکم است. تقابلِ بحران‌های اقلیمی، کاهش منابع آبی و رشد روزافزون شهرنشینی، الگوی «آبیاری زمان‌بندی‌شده و ثابت» را به عاملی برای اتلاف منابع و تهدید پایداری زیست‌محیطی تبدیل کرده است. یافته‌های این مقاله مؤید آن است که بهره‌گیری از فناوری‌های حسگری (TDR/FDR)، بستر ارتباطی اینترنت اشیاء (IoT) و مدل‌های تحلیلی مبتنی بر هوش مصنوعی، نه‌تنها بهره‌وری مصرف آب را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد، بلکه با

ارتقای سلامت پوشش گیاهی، تقویت خدمات اکوسیستمی و تعدیل جزایر حرارتی، در راستای تحقق مفهوم «شهر تاب‌آور» گام برمی‌دارد.

با این حال، موفقیت این گذار فنی صرفاً در گرو نصب حسگرها نیست؛ بلکه نیازمند یک پارادایم مدیریتی جدید است که «داده» را به عنوان زیرساخت اصلی تصمیم‌گیری به رسمیت بشناسد. یکپارچه‌سازیِ پروتکل‌های باز، امنیت سایبری و کالیبراسیون دقیق بر اساس بافت بومی خاک، پیش‌شرط‌های فنی این تحول هستند. در نهایت، پیشرفت‌های آینده در زمینه هوش مصنوعی مولد و دوقلوهای دیجیتال، نویدبخشِ دوره‌ای است که مدیریت فضای سبز از یک فرایند اجراییِ واکنشی به یک سامانه پیش‌دستانه و هوشمند تبدیل شود. بنابراین، کلید موفقیت در مقیاس شهری، هم‌افزایی میان دانش فنی، ظرفیت‌های نهادی و سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه است تا فضای سبز شهری از عنصری صرفاً تزئینی به یک زیرساخت فعال و پایدار در سامانه مدیریت شهری تبدیل گردد.

۱۱-۱- پیشنهادها و توصیه‌های سیاستی برای مدیریت شهری

برای پیاده‌سازی موفق سامانه‌های آبیاری هوشمند، پیشنهادهای زیر در سطوح مختلفِ فنی، نهادی و اجرایی تدوین شده است:

الف) پیشنهادات فنی و زیرساختی

- تدوین پروتکل‌های استاندارد باز: شهرداری‌ها باید پیمانکاران را ملزم به استفاده از پروتکل‌های ارتباطیِ غیرانحصاری (مانند LoRaWAN یا NB-IoT با درگاه‌های باز) کنند تا از «انحصار فروشنده» و ناتوانی در یکپارچه‌سازی سامانه‌های مختلف در آینده جلوگیری شود.
- سیاست‌گذاری برای دوقلوهای دیجیتال: ایجاد یک لایه اطلاعاتی در سامانه GIS شهرداری که به‌صورت بلادرنگ وضعیت رطوبتی، نیاز آبی گونه‌های گیاهی و بازخورد حسگرها را نمایش دهد. این امر پایه اصلی دوقلوی دیجیتال فضای سبز خواهد بود.
- امنیت سایبریِ زیرساختی: با توجه به اتصال این سامانه‌ها به اینترنت، پیاده‌سازی پروتکل‌های رمزنگاری داده‌ها و ایجاد دیواره‌های آتش (Firewall) در سطح سرورهای مرکزی برای جلوگیری از دسترسی‌های غیرمجاز به شبکه آبیاری شهری الزامی است.

ب) پیشنهادات مدیریتی و سازمانی

- مدیریت عملکردی (Performance-based Management): جایگزینی مدل‌های قراردادی فعلی که بر اساس «تعداد دفعات آبیاری» تنظیم شده‌اند، با مدل‌های «مدیریت عملکرد» که در آن شاخص‌های پایداری، سلامت گیاه و میزان صرفه‌جویی در مصرف آب ملاک پرداخت به پیمانکار قرار می‌گیرد.
- فازبندی پیاده‌سازی (Pilot Projects): اجرای فازبندی‌شده به جای تغییر ناگهانی. پیشنهاد می‌شود ابتدا در پارک‌های شاخص یا بلوارهای با گونه‌های گیاهی حساس، پایلوت‌های مقیاس‌بندی شده اجرا شود تا پیش از توسعه در سطح کل شهر، چالش‌های بافت خاک و کالیبراسیون حسگرها رفع گردد.

ج) پیشنهادات آموزشی و انسانی

- آموزش تخصصی نیروی کار: ایجاد دوره‌های آموزشی برای پرسنل فضای سبز جهت درک خروجی سامانه‌های هوشمند. کارشناسان باید بیاموزند که چگونه با تحلیلِ داده‌های هوشمند، به جای اقدام صرفاً فیزیکی، «تصمیم مدیریتی» بگیرند.
- تغییر رویکرد به سمت ترویج (Engagement): آگاه‌سازی شهروندان از فعالیت‌های هوشمند مدیریت شهری (مثلاً از طریق نصب تابلوهای اطلاعاتی در پارک‌ها) می‌تواند به پذیرش عمومی و حمایت از هزینه‌کردهای تکنولوژیک در این حوزه کمک کند.

د) پیشنهادات پژوهشی و توسعه‌ای

- بومی‌سازی مدل‌های آبیاری: حمایت از پروژه‌های پژوهشی در مراکز دانشگاهی برای تعیین دقیق ضرایب گیاهی و هیدرولیکی گونه‌های گیاهیِ بومی هر شهر، تا مدل‌های هوش مصنوعی با داده‌های دقیق‌تری تغذیه شوند.

- یکپارچه‌سازی با مدیریت روان‌آب: طراحی سامانه‌هایی که در زمان پیش‌بینی بارش‌های سیل‌آسا، به‌صورت خودکار سیستم آبیاری را غیرفعال کرده و ظرفیت جذب آب در خاک را برای مدیریت روان‌آب شهری به حداکثر می‌رسانند.

منابع

1) Ahmadi, M. (2023). Artificial intelligence in urban infrastructure management: Trends and challenges. Journal of Urban Technology, 15(2), 112–128.
2) Brown, A. (2023). Sustainable urban water management: Integrating IoT and soil moisture sensors. Water Resources Management, 29(4), 450–467.
3) Brown, S. (2021). The role of smart irrigation in urban ecosystem resilience. Environmental Science & Policy, 45(1), 33–45.
4) Calder, R. (2022). Environmental benefits of precision irrigation in city parks. Urban Forestry & Urban Greening, 38, 126–139.
5) Chen, X. (2023). Machine learning models for predictive irrigation scheduling. Artificial Intelligence in Agriculture, 12(3), 88–101.
6) Davis, L. (2023). Soil health and smart irrigation: A systemic approach. Soil Science and Plant Nutrition, 55(6), 201–215.
7) Green, T. (2022). Mitigating urban heat islands through smart irrigation practices. Climate Change and Urban Design, 19(2), 210–225.
8) Jones, M. (2024). Connectivity and sensor networks in smart cities. IEEE Internet of Things Journal, 11(3), 567–580.
9) Jones, P. (2022). Case studies in smart irrigation: Efficiency gains in European cities. Urban Water Journal, 17(5), 412–425.
10) Lee, H. (2021). Interoperability and open standards in smart city infrastructure. Smart Cities Journal, 8(2), 99–115.
11) Lee, S. (2025). Advanced communication protocols for IoT-based water management. Journal of Network and Computer Applications, 22(1), 45–60.
12) Lu, Y. (2022). Deep learning applications in automated irrigation systems. Journal of Systems Engineering, 14(4), 305–320.
13) Martin, R. (2022). Performance-based management in urban irrigation contracts. Public Administration and Urban Policy, 24(3), 150–165.
14) Mohammadi, A. (2022). Cybersecurity threats in municipal smart irrigation networks. Journal of Information Security, 10(1), 34–48.
15) Nicholson, K. (2022). Predictive climate modeling for urban resource allocation. Climate Dynamics, 31(7), 890–905.
16) Parker, B. (2023). Digital twins for urban green space management: Future prospects. Computers, Environment and Urban Systems, 35, 102–118.
17) Patel, V. (2024). Economic impacts of shifting from timer-based to sensor-based irrigation. Journal of Environmental Management, 32(4), 512–528.
18) Peterson, K. (2023). Urban green infrastructure and water conservation strategies. Sustainability, 15(9), 7205.
19) Roberts, D. (2022). Soil moisture dynamics and urban ecosystem services. Urban Ecosystems, 25(3), 677–690.
20) Smith, J. (2023). Technologies for soil moisture monitoring in urban landscapes. Agricultural Water Management, 28(2), 205–219.
21) Timouri, M. (2025). Resilient urban environments: The future of smart water management. Urban Studies Review, 40(1), 12–28.
22) White, C. (2023). Managing urban runoff through smart irrigation integration. Journal of Environmental Engineering, 149(4), 04023012.
23) Williams, T. (2022). Remote sensing and GIS in urban water mapping. Remote Sensing of Environment, 27(1), 88–105.

A Review of Smart Technologies for Soil Moisture Monitoring and Urban Green Space Irrigation

Abstract

The rapid pace of urbanization, climate change, and the escalating water resource crisis have made the transition from traditional irrigation systems (based on fixed schedules) to smart, data-driven systems an undeniable necessity. This review article examines the integration of novel soil moisture monitoring technologies, including TDR/FDR sensors and non-contact NIR sensors, with Internet of Things (IoT) infrastructures for optimizing water distribution in urban green spaces. By analyzing the synergy between real-time data collection, Geographic Information Systems (GIS), and predictive Artificial Intelligence (AI) models, this study demonstrates that smart irrigation management can lead to a 35-45% reduction in urban water consumption while simultaneously enhancing ecosystem services such as environmental temperature regulation, reduction of heat islands, and promotion of root zone health. Furthermore, this article, while exploring implementation challenges, emphasizes the critical importance of "Interoperability," the utilization of open communication protocols, and ensuring cybersecurity in vital urban infrastructures. Finally, a strategic framework based on the concepts of "Digital Twins" and "Performance Management" is proposed, outlining the transition from reactive management to proactive and resilient governance. The findings of this research indicate that smart irrigation is not merely a tool for technical efficiency but a fundamental component in achieving the "Sponge City" concept and sustainable urban infrastructure.

Keywords: Smart Irrigation, Soil Moisture, Internet of Things (IoT), Resilient City, Urban Green Space Management, Artificial Intelligence, Environmental Sustainability.