فصلنامه پژوهش در مدیریت شماره ۱- دوره ۲- صفحات۶۲۱-۶۰۸
Journal of Research in Management
Issn : 3060-6241

شهرسازی هوشمند و شهر پاک: طراحی و مدیریت شهری با آلایندگی نزدیک به صفر

حامد دهامی [۱*]، حسین مهران پور [۲]

۱ -کارشناسی ارشد مدیریت آموزشی، دانشگاه خلیج فارس. (کارشناس واحد پیشگیری سازمان آتش نشانی)

۲ -کارشناسی مهندسی فناوری عمران - ساختمان سازی، دانشگاه علمی کاربردی همیاری شهرداری‌ها. (محل خدمت - شهرداری منطقه ۲)

چکیده

رشد شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر، همراه با افزایش مصرف انرژی، گسترش حمل‌ونقل موتوری و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی، شهرها را به یکی از اصلی‌ترین کانون‌های تولید آلایندگی و فشار بر محیط‌زیست تبدیل کرده است. پیامدهای این روند، از کاهش کیفیت هوا و تهدید سلامت عمومی تا تشدید تغییرات اقلیمی و کاهش تاب‌آوری شهری، ضرورت بازاندیشی در الگوهای سنتی شهرسازی را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، مفاهیم «شهرسازی هوشمند» و «شهر پاک» به‌عنوان رویکردهایی نوین و مکمل، چارچوبی کارآمد برای حرکت به سوی توسعه شهری پایدار و آلایندگی نزدیک به صفر فراهم می‌آورند. هدف این مقاله مروری، تبیین نقش شهرسازی هوشمند در طراحی و مدیریت شهر پاک و بررسی چگونگی هم‌افزایی فناوری‌های نوین با راهبردهای زیست‌محیطی به‌منظور کاهش انتشار آلاینده‌ها و ارتقای کیفیت زندگی شهری است. تمرکز اصلی پژوهش بر این پرسش است که چگونه ابزارهای هوشمند، داده‌محور و فناورانه می‌توانند به تحقق اهداف کربن‌زدایی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت پایدار منابع در مقیاس شهری کمک کنند. روش تحقیق در این مطالعه از نوع مروری ـ تحلیلی است و با بهره‌گیری از مطالعات و پژوهش‌های علمی معتبر داخلی در حوزه شهر هوشمند، پایداری شهری، مدیریت انرژی، حمل‌ونقل پاک و حکمرانی شهری انجام شده است. محتوای مقاله با رویکردی توصیفی ـ تحلیلی، ابعاد مختلف شهرسازی هوشمند و ارتباط آن با مؤلفه‌های شهر پاک را در بخش‌های موضوعی منسجم بررسی می‌کند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، شبکه‌های هوشمند انرژی و سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش مصرف انرژی، کنترل آلایندگی‌های محلی، بهبود مدیریت ترافیک و ارتقای بهره‌وری منابع دارد. همچنین یکپارچگی داده‌ها و حکمرانی هوشمند، زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر و مداخلات پیشگیرانه در مدیریت شهری است. در نتیجه‌گیری می‌توان بیان کرد که تحقق شهر پاک با آلایندگی نزدیک به صفر بدون اتکا به شهرسازی هوشمند امکان‌پذیر نیست. این گذار نیازمند رویکردی یکپارچه، سرمایه‌گذاری هدفمند، اصلاح سیاست‌ها و مشارکت فعال شهروندان است تا شهرهای آینده به فضاهایی سالم، پایدار و زیست‌پذیر برای نسل‌های کنونی و آتی تبدیل شوند.

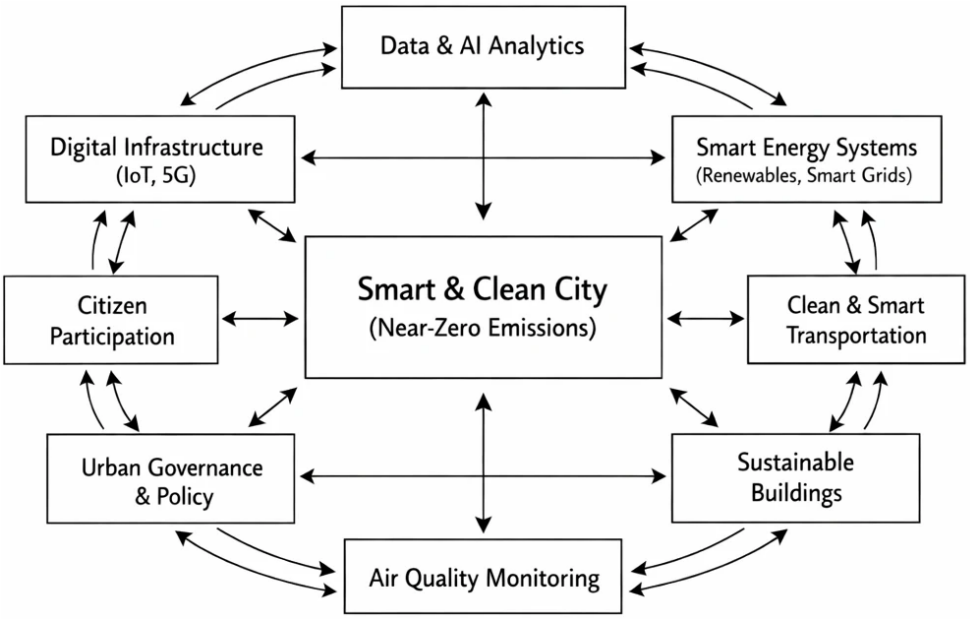
واژگان کلیدی: شهرسازی هوشمند، شهر پاک، توسعه پایدار شهری، مدیریت انرژی، آلایندگی نزدیک به صفر

توسعه شهری در قرن بیستم عمدتاً بر محوریت رشد اقتصادی مبتنی بر مصرف انرژی‌های فسیلی و توسعه زیرساخت‌های متمرکز بنا نهاده شده بود، روندی که به طور مستقیم منجر به افزایش شدید آلودگی‌های محیط زیستی و تشدید تغییرات اقلیمی گردید (زندی‌دولابی، ۲۰۲۲). کلان‌شهرها، به عنوان کانون‌های اصلی فعالیت‌های اقتصادی و جمعیتی، به بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای تبدیل شده‌اند و فشاری سنگین بر ظرفیت تحمل اکوسیستم‌های محلی وارد آورده‌اند. در این بستر تاریخی، نیاز به یک دگرگونی ساختاری و فناوری در الگوی شهرسازی احساس می‌شود که بتواند همزمان کارایی اقتصادی را حفظ کرده و اثرات زیست‌محیطی را به حداقل برساند. این گذار پارادایمی، تلفیقی از دو مفهوم حیاتی شهرسازی معاصر یعنی «شهرسازی هوشمند» و «شهر پاک» را طلب می‌کند؛ جایی که هوشمندی به عنوان اهرم محرک و تسهیل‌گر برای دستیابی به اهداف سخت‌گیرانه زیست‌محیطی تعریف می‌شود (موسوی و همکاران، ۲۰۲۵).

شهرسازی هوشمند، که ریشه در بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیاء (IoT)، تحلیل کلان‌داده‌ها (Big Data Analytics)، هوش مصنوعی (AI)، و شبکه‌های ارتباطی پرسرعت (مانند G۵) دارد، ابزارهای دقیقی برای پایش، تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های شهری فراهم می‌آورد. برخلاف تعاریف اولیه که صرفاً بر جنبه‌های دیجیتالی و ارتباطی تمرکز داشتند، تعریف کنونی شهر هوشمند فراتر از زیرساخت‌های فنی رفته و بر "حکمرانی مشارکتی" و "بهبود کیفیت زندگی شهروندان" تأکید دارد، اما پایداری زیست‌محیطی به عنوان ستون فقرات این هوشمندی تلقی می‌شود (زینالی‌عظیم و همکاران، ۲۰۲۴). اگر هوشمندی به معنای ظرفیت تصمیم‌گیری سریع و مبتنی بر شواهد باشد، کاربرد اصلی آن در حوزه شهری باید معطوف به کاهش ردپای کربن و آلاینده‌ها باشد. در مقابل، مفهوم «شهر پاک» یک هدف غایت‌شناختی را دنبال می‌کند: ایجاد محیطی شهری با انتشار آلاینده‌های محلی نزدیک به صفر و کاهش انتشار کربن دی‌اکسید (یا رسیدن به انتشار خالص صفر) در افق زمانی مشخص. این مفهوم فراتر از مدیریت پسماند و بهبود کیفیت هوا است و شامل کل چرخه انرژی، تولید، مصرف و حمل و نقل می‌شود. تحقق این هدف نیازمند تحولات بنیادین در زیرساخت‌ها، مقررات ساختمانی، و رفتارهای مصرف‌کنندگان است که اجرای آن‌ها بدون ابزارهای مدیریتی پیشرفته، عملاً غیرممکن به نظر می‌رسد. تلاقی این دو مفهوم، یعنی «شهر هوشمند با آلایندگی نزدیک به صفر»، چارچوبی یکپارچه را ترسیم می‌کند که در آن، داده‌ها به سوخت اصلی برای اقدامات محیط‌زیستی تبدیل می‌شوند (چوبینه و همکاران، ۲۰۲۰). هوشمندی به شهر این امکان را می‌دهد که پویایی‌های مصرف انرژی در ساختمان‌ها، الگوهای ترافیکی و توزیع منابع را در لحظه رصد کرده و مداخله‌های دقیق و پیشگیرانه انجام دهد تا از تولید آلودگی پیش از وقوع جلوگیری شود. این رویکرد فعال (Proactive) نسبت به رویکردهای سنتی که عمدتاً واکنشی (Reactive) بوده‌اند، مزیت رقابتی پایداری را فراهم می‌آورد.

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های این ادغام، حوزه انرژی است؛ جایی که شبکه‌های هوشمند (Smart Grids) با ادغام منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر (مانند پنل‌های خورشیدی روی پشت‌بام‌ها)، مدیریت بار را به شکلی دینامیک و کارآمد انجام می‌دهند. این امر نه تنها اتکا به نیروگاه‌های بزرگ فسیلی را کاهش می‌دهد، بلکه تاب‌آوری سیستم انرژی در برابر اختلالات را نیز افزایش می‌دهد، که این خود بخشی از الزامات شهر تاب‌آور هوشمند است. علاوه بر این، در حوزه حمل و نقل، هوشمندی امکان پیاده‌سازی سیستم‌های حمل و نقل خودکار، اشتراکی و الکتریکی (MaaS - Mobility as a Service) را فراهم می‌آورد که هدف نهایی آن حذف کامل وسایل نقلیه آلاینده از معابر شهری و بهینه‌سازی جریان ترافیک برای کاهش اتلاف انرژی ناشی از توقف و حرکت‌های ناگهانی است. الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند مسیرهای بهینه را محاسبه کرده و تقاضای سفر را به سمت وسایل نقلیه عمومی الکتریکی هدایت کنند (شیرویه‌پور و همکاران، ۲۰۲۴).

بنابراین، این مقاله به بررسی این موضوع می‌پردازد که چگونه عناصر تشکیل‌دهنده شهرسازی هوشمند (زیرساخت دیجیتال، تحلیل داده، و اتوماسیون) می‌توانند به عنوان کاتالیزورهایی برای دستیابی به اهداف شهر پاک با آلایندگی نزدیک به صفر عمل کنند. تحلیل حاضر بر جنبه‌های فنی، مدیریتی و سیاستی این هم‌افزایی تمرکز دارد و نشان می‌دهد که بدون یکپارچه‌سازی عمیق داده‌محور، اهداف بلندپروازانه زیست‌محیطی در محیط‌های شهری پیچیده امروزی قابل تحقق نیستند. شهر پاک هوشمند دیگر صرفاً یک آرمان‌شهر انتزاعی نیست، بلکه مجموعه‌ای از راهکارهای عملیاتی است که نیازمند بازتعریف نقش دولت‌ها، بخش خصوصی و خود شهروندان در تولید، مصرف و مدیریت منابع شهری است. این مقاله ساختار یافته است تا ابتدا مبانی نظری و فنی این تلفیق را شرح دهد، سپس کاربردهای آن را در بخش‌های کلیدی شهر (انرژی، حمل و نقل، ساختمان) بررسی کند و در نهایت به چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده بپردازد، با استناد به اصول پایداری تعریف‌شده در ادبیات تخصصی.



شکل ۱. مدل مفهومی شهر هوشمند و شهر پاک با آلایندگی نزدیک به صفر

در شکل ۱، یک مدل مفهومی یکپارچه از «شهر هوشمند و شهر پاک با آلایندگی نزدیک به صفر» ارائه شده است که در آن، هسته مرکزی سیستم شهری بر پایه هم‌افزایی میان فناوری‌های دیجیتال، حکمرانی شهری و زیرساخت‌های پایدار شکل می‌گیرد. در مرکز این مدل، شهر هوشمند و پاک به‌عنوان هدف نهایی قرار دارد که کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهینه‌سازی مصرف منابع را دنبال می‌کند. پیرامون این هسته، مؤلفه‌های کلیدی شامل تحلیل داده و هوش مصنوعی، زیرساخت دیجیتال (اینترنت اشیا و شبکه‌های ارتباطی)، سیستم‌های انرژی هوشمند مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، حمل‌ونقل پاک و هوشمند، ساختمان‌های پایدار، پایش کیفیت هوا، مشارکت شهروندان و سیاست‌گذاری و حکمرانی شهری قرار گرفته‌اند که هر یک نقشی مکمل در تحقق اهداف زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. در این مدل، جریان‌های دوسویه اطلاعات و تصمیم‌گیری میان اجزای مختلف نشان می‌دهد که شهر پاک هوشمند یک سیستم ایستا نیست، بلکه سامانه‌ای پویا و داده‌محور است که از طریق پایش مستمر و تحلیل هوشمند، امکان مداخله‌های پیشگیرانه را فراهم می‌آورد. داده‌های حاصل از پایش کیفیت هوا، مصرف انرژی و الگوهای جابه‌جایی شهری، به‌وسیله تحلیل‌های هوش مصنوعی به سیاست‌ها و اقدامات اجرایی مؤثر تبدیل

می‌شوند و از این طریق، کاهش آلاینده‌هایی نظیر CO_2 و NO_x در مقیاس شهری محقق می‌گردد. این مدل مفهومی نشان می‌دهد که تحقق شهر پاک با آلایندگی نزدیک به صفر تنها در سایه یکپارچگی فناوری، مدیریت شهری و مشارکت اجتماعی امکان‌پذیر است و هرگونه رویکرد جزیره‌ای نمی‌تواند پاسخگوی پیچیدگی‌های محیط شهری معاصر باشد.

۲. شهرسازی هوشمند: چارچوب‌های نظری و زیرساخت‌های فناورانه

شهرسازی هوشمند به عنوان یک رویکرد نوین، از تلفیق پیچیده فناوری‌های دیجیتال و اطلاعاتی با زیرساخت‌های فیزیکی شهر نشأت می‌گیرد تا کارایی عملیاتی، اشتراک دانش، و کیفیت خدمات عمومی را بهبود بخشد. این مفهوم صرفاً به معنای نصب سنسورها و دوربین‌های مداربسته نیست؛ بلکه چارچوبی سیستمی است که بر جمع‌آوری مداوم داده‌ها، تحلیل آن‌ها در زمان واقعی، و استفاده از نتایج تحلیل برای اتخاذ تصمیمات بهینه‌سازی‌شده و خودکار استوار است. رکن اساسی در این چارچوب، ایجاد یک لایه دیجیتال (Digital Twin) از شهر فیزیکی است که امکان شبیه‌سازی سناریوها و پیش‌بینی پیامدهای سیاست‌گذاری‌ها را فراهم می‌آورد (غلامی‌نورآباد و همکاران، ۲۰۲۵).

زیرساخت‌های فناورانه شهر هوشمند بر چند ستون اصلی استوار است که هر کدام نقشی حیاتی در تحقق اهداف پایداری دارند. مهم‌ترین این ستون‌ها، شبکه گسترده‌ای از سنسورهای محیطی (Environmental Sensors) و دستگاه‌های متصل به اینترنت اشیاء (IoT Devices) هستند که داده‌هایی در مورد کیفیت هوا، مصرف آب، جریان ترافیک، و وضعیت انرژی جمع‌آوری می‌کنند. این داده‌ها، جریان حیاتی شهر هوشمند را شکل می‌دهند و دقت تصمیم‌گیری‌ها را به طرز چشمگیری ارتقا می‌دهند؛ این امر با آنچه در حوزه پایداری به عنوان "پایش دقیق" شناخته می‌شود، همخوانی دارد. داده‌های خام جمع‌آوری‌شده توسط شبکه‌های IoT باید از طریق زیرساخت‌های ارتباطی قوی و کم‌تأخیر، مانند شبکه‌های فیبر نوری و 5G، به مراکز پردازش ارسال شوند. توانایی پردازش این حجم عظیم داده‌ها (کلان‌داده‌ها) نیازمند پلتفرم‌های محاسباتی پیشرفته، اغلب مبتنی بر ابر (Cloud) یا محاسبات لبه (Edge Computing) است که امکان تحلیل بلادرنگ و استخراج الگوهای پیچیده را میسر می‌سازد. بدون این قدرت پردازش، داده‌ها صرفاً نویزهایی بدون ارزش عملیاتی باقی می‌مانند.

قلب تپنده فرآیند هوشمندسازی، الگوریتم‌های یادگیری ماشینی (Machine Learning) و هوش مصنوعی (AI) هستند که وظیفه تبدیل داده‌های پردازش‌شده به بینش‌های قابل اجرا (Actionable Insights) را بر عهده دارند (جمشیدی و همکاران، ۲۰۲۳). این الگوریتم‌ها می‌توانند مصرف انرژی ساختمان‌ها را بر اساس پیش‌بینی‌های آب و هوایی مدل‌سازی کنند، مسیرهای بهینه برای ناوگان حمل و نقل عمومی را محاسبه نمایند، یا الگوهای مصرف آب را برای شناسایی نشت‌ها تحلیل کنند. این سطح از تحلیل، فراتر از توانایی‌های سیستم‌های مدیریتی سنتی است (برادران‌خانیان و همکاران، ۲۰۲۰). یکی دیگر از مولفه‌های کلیدی، یکپارچگی و قابلیت تعامل‌پذیری (Interoperability) میان سامانه‌های مختلف شهری است. یک شهر هوشمند کارآمد، شهری است که سیستم مدیریت ترافیک بتواند با شبکه توزیع برق ارتباط برقرار کند تا در صورت تقاضای بالای شارژ وسایل نقلیه الکتریکی، توزیع انرژی را مدیریت نماید. این یکپارچگی افقی و عمودی نیازمند استانداردهای باز و پلتفرم‌های داده‌ای مشترک است که مانع از ایجاد "سیلوهای داده‌ای" سنتی شود.

حکمرانی داده‌محور (Data-Driven Governance) نیز جزء لاینفک چارچوب شهر هوشمند است. اتخاذ تصمیمات سیاستی و توسعه زیرساخت‌ها باید مبتنی بر شواهد دقیق و اندازه‌گیری‌های مداوم عملکرد باشد. این رویکرد شفافیت بیشتری را در عملکرد نهادهای شهری ایجاد می‌کند و امکان ارزیابی مستمر پیشرفت به سوی اهداف تعیین‌شده، مانند کاهش آلایندگی، را

فراهم می‌آورد. در نهایت، شهر هوشمند باید به محیطی پاسخگو و مشارکتی تبدیل شود. اپلیکیشن‌های شهروندی، پلتفرم‌های بازخورد عمومی و استفاده از داده‌های تولیدشده توسط شهروندان (Citizen-Generated Data) به تعامل دوسویه بین حکومت و مردم کمک می‌کند. این جنبه مشارکتی برای تضمین پذیرش اجتماعی و موفقیت بلندمدت ابتکارات پایداری، به ویژه تغییرات رفتاری، حیاتی است. از منظر پایداری، شهر هوشمند ابزاری برای "بهره‌وری منابع" است؛ نه صرفاً ابزاری برای سرعت بخشیدن به فرآیندهای موجود (بقالی‌اقدم و همکاران، ۲۰۲۵). هدف نهایی این است که با همان میزان منابع، خدمات بیشتری ارائه شود، یا با همان خدمات، منابع کمتری مصرف گردد، که این امر مستقیماً به کاهش نیاز به استخراج منابع اولیه و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌ها در زنجیره تأمین منجر می‌شود.

۳. شهر پاک و آلایندگی نزدیک به صفر: تعاریف و اهداف استراتژیک

مفهوم «شهر پاک» (Clean City) یک هدف زیست‌محیطی مطلق نیست، بلکه یک استراتژی مدیریت ریسک بلندمدت است که آلایندگی‌های اصلی شهری را به سطوحی نزدیک به حداقل ممکن کاهش می‌دهد، به گونه‌ای که تأثیرات منفی قابل توجهی بر سلامت انسان و اکوسیستم‌های شهری نداشته باشد. این هدف در سطح جهانی با تعهدات کاهش انتشار کربن در توافق‌نامه پاریس هم‌راستا شده است، اما در سطح محلی، بر آلاینده‌های خاص محیطی که مستقیماً کیفیت زندگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تمرکز دارد. دستیابی به آلایندگی «نزدیک به صفر» (Near-Zero Emission) نیازمند اجماع بر روی یک سری شاخص‌های عملکردی کلیدی (KPIs) است (رضوانیان و همکاران، ۲۰۲۵).

تعریف فنی «نزدیک به صفر» معمولاً به کاهش حداقل ۸۰ تا ۹۵ درصدی انتشار آلاینده‌های کلیدی مانند دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، و ذرات معلق (PM) نسبت به یک سال مبنا (Baseline Year) اشاره دارد. این کاهش باید در تمام بخش‌های اصلی مصرف انرژی و تولید آلودگی، شامل تولید برق، گرمایش/سرمایش ساختمان‌ها، و حمل و نقل، محقق گردد. این یک هدف بلندپروازانه است که صرفاً با بهبودهای تدریجی در کارایی انرژی قابل دستیابی نیست، بلکه نیازمند تحولات بنیادین فناورانه و ساختاری است. یکی از محورهای اصلی برای رسیدن به این سطح از پاکیزگی، «کربن‌زدایی کامل» (Complete Decarbonization) از بخش انرژی است. این امر مستلزم جایگزینی کامل منابع تولید انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی با منابع تجدیدپذیر پایدار مانند خورشیدی، بادی و زمین‌گرمایی است. در محیط شهری، این امر به معنای ترویج تولید انرژی توزیع‌شده (Distributed Energy Generation) و کاهش وابستگی به شبکه‌های انتقال متمرکز است که اغلب با اتلاف انرژی همراه هستند. علاوه بر کربن‌زدایی، کنترل آلاینده‌های محلی حیاتی است. استراتژی‌های پاک‌سازی شهری باید شامل ممنوعیت تدریجی خودروهای دیزلی و بنزینی، ارتقاء استانداردهای احتراق، و استفاده از فناوری‌های تصفیه هوا در منابع ثابت آلودگی باشد (متقی‌دستنائی و همکاران، ۲۰۲۵).

حمل و نقل در شهرهای معاصر یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های محلی است. برای دستیابی به هدف «نزدیک به صفر»، این بخش باید به سمت برقی‌سازی کامل (Full Electrification) و ترویج تحرک فعال (Active Mobility) مانند دوچرخه‌سواری و پیاده‌روی هدایت شود. این گذار نیازمند سرمایه‌گذاری عظیم در زیرساخت‌های شارژ و ایجاد مسیرهای امن و جذاب برای تردد غیرموتوری است. ساختمان‌ها، که سهم بزرگی در مصرف انرژی شهری دارند، باید به سمت استاندارد «انرژی خالص صفر» (Net-Zero Energy) حرکت کنند. ساختمان پاک هوشمند، ساختمانی است که در طول یک سال انرژی مصرفی‌اش برابر با انرژی تولیدی توسط خودش (اغلب از طریق پنل‌های خورشیدی نصب‌شده روی سقف) باشد. این استانداردسازی ساخت‌وساز، نیازمند قوانین سخت‌گیرانه ساختمانی و نظارت مستمر بر عملکرد واقعی آن‌ها است.

مدیریت پسماند نیز نقش مهمی در تعریف شهر پاک ایفا می‌کند. رویکرد سنتی "تولید-مصرف-دفع" باید با مدل اقتصاد چرخشی (Circular Economy) جایگزین شود. هدف، به حداقل رساندن ارسال پسماند به محل دفن یا سوزاندن (که هر دو تولید آلاینده می‌کنند) و به حداکثر رساندن بازیافت، استفاده مجدد و بازیابی انرژی از مواد باقیمانده است. این فرآیند نیازمند سیستم‌های جمع‌آوری هوشمند است که حجم و ترکیب پسماند را در هر منطقه به دقت پایش کنند. در نهایت، تحقق اهداف شهر پاک وابسته به فرهنگ‌سازی و تغییر رفتار شهروندان است (آهنگری، ۲۰۲۵). فناوری‌ها تنها ابزارهایی هستند؛ اما پذیرش عمومی تغییرات در عادات مصرف انرژی، رژیم‌های غذایی، و شیوه‌های حمل و نقل، بدون شفافیت و اطلاع‌رسانی دقیق که توسط سیستم‌های هوشمند فراهم می‌شود، ممکن نخواهد بود. شهر پاک، شهری است که در آن پایداری به بخشی ذاتی از زندگی روزمره تبدیل شده است.

۴. هم‌افزایی شهر هوشمند و شهر پاک: نقش داده‌ها در کربن‌زدایی

هم‌افزایی میان شهر هوشمند و شهر پاک در گرو توانایی شهر در استفاده از داده‌ها برای انجام اقدامات دقیق در جهت کاهش انتشار آلاینده‌ها است. هوشمندی در واقع به «مغز» برنامه کربن‌زدایی تبدیل می‌شود که از سنسورها به عنوان «حواس» خود برای درک لحظه‌ای وضعیت محیطی و عملیاتی استفاده می‌کند. این هم‌افزایی باعث می‌شود که مداخلات به جای کلی‌نگری، هدفمند، مقیاس‌پذیر و به‌موقع باشند، که این امر کارایی کلی سیستم را به طور تصاعدی افزایش می‌دهد. سیستم‌های مدیریت انرژی ساختمان (BEMS) که مجهز به هوش مصنوعی هستند، نمونه بارز این هم‌افزایی هستند. این سیستم‌ها با دریافت داده‌های لحظه‌ای از حسگرهای دما، اشغال فضا، و پیش‌بینی آب و هوای منطقه‌ای، مصرف انرژی سیستم‌های HVAC (گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع) را بهینه می‌کنند. به جای پیروی از یک برنامه زمانی ثابت، سیستم می‌تواند مصرف انرژی را تا ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش دهد، بدون آنکه راحتی ساکنین به خطر بیفتد. این صرفه‌جویی مستقیم به کاهش تقاضا از شبکه برق، و در نتیجه کاهش نیاز به سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها منجر می‌شود (منوچهری و همکاران، ۲۰۲۵).

در بخش حمل و نقل، داده‌های لحظه‌ای ترافیک، وضعیت پارکینگ‌ها، و الگوی سفر شهروندان امکان مدیریت تقاضا (Demand Management) را فراهم می‌آورد. سیستم‌های هوشمند می‌توانند با تنظیم زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی بر اساس جریان واقعی ترافیک، مدت زمان توقف خودروها در تقاطع‌ها را کاهش دهند. این کاهش توقف و حرکت‌های ناگهانی، به طور مستقیم میزان انتشار آلاینده‌های ناشی از احتراق ناقص را پایین می‌آورد و مصرف سوخت را بهینه می‌سازد. همچنین، پیش‌بینی مسیرهای پر ازدحام به رانندگان کمک می‌کند تا از رفتارهای پرمصرف انرژی دوری کنند. شبکه‌های برق هوشمند (Smart Grids) لایه حیاتی دیگری هستند که پایداری را پشتیبانی می‌کنند. با ادغام منابع تجدیدپذیر پراکنده (مانند تولید خورشیدی خانگی)، شبکه سنتی یک‌طرفه به یک سیستم دوطرفه و انعطاف‌پذیر تبدیل می‌شود. الگوریتم‌های یادگیری ماشینی در این شبکه‌ها می‌توانند نوسانات تولید انرژی‌های متغیر (مانند باد و خورشید) را پیش‌بینی کرده و با مدیریت بار (Demand Response) از طریق ارتباط با ساختمان‌ها و وسایل نقلیه متصل، تعادل شبکه را حفظ کنند. این امر از راه‌اندازی نیروگاه‌های پشتیبان فسیلی (Peaker Plants) که در ساعات اوج مصرف فعال می‌شوند و آلودگی زیادی تولید می‌کنند، جلوگیری می‌کند (منوچهری و همکاران، ۲۰۲۵).

نقش داده‌کاوی در شناسایی "نقاط داغ آلودگی" (Pollution Hotspots) نیز غیرقابل اغماض است. استقرار سنسورهای کم‌هزینه در نقاط مختلف شهر، امکان نقشه‌برداری سه‌بعدی و لحظه‌ای از غلظت آلاینده‌ها را فراهم می‌کند. این نقشه‌ها به مدیران شهری اجازه می‌دهد تا مداخله‌های هدفمندتری را اعمال کنند، مانند محدود کردن تردد وسایل نقلیه سنگین در

مناطقی که کیفیت هوا به آستانه‌های خطرناک نزدیک شده است. حکمرانی داده‌محور در این زمینه مستلزم شفافیت در معیارها و پاسخگویی است. شهروندان باید دسترسی به داشبوردهای عمومی داشته باشند که عملکرد شهر در زمینه کاهش انتشار کربن و آلاینده‌ها را به نمایش بگذارد. این شفافیت، اعتماد عمومی را افزایش داده و مشوقی برای پذیرش فناوری‌های جدید و تغییرات سیاستی خواهد بود که اغلب با مقاومت اولیه روبرو می‌شوند (عمران‌زاده، ۲۰۲۵).

در حوزه اقتصاد چرخشی، سیستم‌های هوشمند می‌توانند با استفاده از حسگرهای وزن و نوع‌سنجی در سطل‌های زباله هوشمند، اطلاعات دقیقی از میزان و ترکیب پسماند تولیدی در هر بلوک شهری فراهم آورند. این داده‌ها به بهینه‌سازی مسیر جمع‌آوری زباله (کاهش مسافت طی شده و مصرف سوخت) و همچنین بهبود تفکیک مواد در مبدأ کمک می‌کنند، که نتیجه آن کاهش آلودگی ناشی از دفن زباله و افزایش بازدهی بازیافت است. در نهایت، شهر هوشمند، شهر پاک را از یک هدف آرمان‌گرایانه به یک هدف قابل اندازه‌گیری و مدیریتی تبدیل می‌کند. داده‌ها چارچوبی را فراهم می‌کنند که هر اقدام محیط‌زیستی را به یک فرآیند قابل سنجش تبدیل کرده و امکان بهبود مستمر بر اساس بازخورد عملکردی را میسر می‌سازند، که این لازمه دستیابی به آلایندگی نزدیک به صفر است.

۵. تحول در حوزه انرژی: شبکه‌های هوشمند و ساختمان‌های انرژی صفر

بخش انرژی یکی از مهم‌ترین عرصه‌هایی است که شهرسازی هوشمند باید در آن برای تحقق شهر پاک مداخله کند، زیرا مصرف انرژی ساختمان‌ها و تولید آن، بزرگ‌ترین منبع انتشار $CO^{۲}$ و آلاینده‌های مرتبط در اکثر کلان‌شهرها محسوب می‌شود. هدف اصلی در این بخش، گذار کامل به منابع تجدیدپذیر و مدیریت مصرف به شکلی فعال است که بر اساس تقاضای لحظه‌ای تنظیم شود، نه بر اساس عرضه ثابت. شبکه‌های هوشمند (Smart Grids) ستون فقرات این تحول هستند. برخلاف شبکه‌های سنتی که جریان برق را تنها از نیروگاه‌های بزرگ به مصرف‌کنندگان هدایت می‌کردند، شبکه‌های هوشمند قابلیت تعامل دوطرفه، خودترمیمی، و ادغام منابع تولید پراکنده (DERs) مانند پنل‌های فتوولتائیک نصب‌شده بر روی سقف‌ها و واحدهای ذخیره‌سازی محلی را فراهم می‌آورند. این زیرساخت دیجیتال، پویایی و انعطاف‌پذیری لازم برای مدیریت نوسانات تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم می‌کند (کریمی، ۲۰۲۶).

بهینه‌سازی تولید و توزیع انرژی در شبکه هوشمند با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته صورت می‌گیرد. این الگوریتم‌ها می‌توانند پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت از تولید انرژی بادی و خورشیدی داشته باشند و همزمان، با استفاده از داده‌های آب و هوایی، تقاضای آتی مصرف‌کنندگان را مدل‌سازی کنند. این پیش‌بینی دقیق به اپراتور شبکه اجازه می‌دهد تا قبل از وقوع کمبود یا مازاد انرژی، ذخیره‌سازهای باتری بزرگ شهری را شارژ یا دشارژ کنند، که این امر نیاز به فعال‌سازی نیروگاه‌های کمکی فسیلی را به شدت کاهش می‌دهد. در حوزه مصرف، ساختمان‌ها باید از وضعیت مصرف‌کننده منفعل به تولیدکننده فعال (Prosumer) تغییر کنند. استاندارد ساختمان انرژی خالص صفر (NZEB) ایجاب می‌کند که مجموع انرژی مصرفی سالانه یک ساختمان با انرژی تولیدی آن توسط منابع تجدیدپذیر محلی برابر باشد. این امر با استفاده از طراحی غیرفعال هوشمند (Passive Design) در کنار فناوری‌های فعال (مانند سیستم‌های گرمایش و سرمایش بسیار کارآمد) به دست می‌آید.

سیستم‌های مدیریت ساختمان هوشمند (BEMS) نقشی محوری در تحقق NZEB ایفا می‌کنند. این سیستم‌ها داده‌های سنسورهای داخلی (دما، رطوبت، سطح $CO^{۲}$ ، حضور افراد) را با داده‌های خارجی شبکه هوشمند ترکیب می‌کنند. به عنوان مثال، یک BEMS می‌تواند تشخیص دهد که در ساعات اوج تولید خورشیدی، دمای اتاق‌ها را اندکی افزایش دهد (ذخیره حرارتی) تا در ساعات بعد از ظهر که تولید کم می‌شود، نیازی به سرمایش مصنوعی نباشد؛ این تکنیک به عنوان «انتقال بار حرارتی» (Thermal Load Shifting) شناخته می‌شود. باتری‌های خانگی و محلی، به عنوان بخشی از شبکه توزیع‌یافته،

انعطاف‌پذیری شبکه را افزایش می‌دهند. این باتری‌ها می‌توانند انرژی اضافی تولید شده در طول روز را ذخیره کرده و در ساعات پیک مصرف (هنگامی که انرژی گران‌تر و اغلب با آلودگی بیشتر تولید می‌شود) آن را آزاد کنند. مدیریت این باتری‌ها نیازمند الگوریتم‌های پیشرفته‌ای است که تصمیم بگیرند چه زمانی شارژ و چه زمانی دشارژ کنند، با در نظر گرفتن طول عمر باتری و قیمت لحظه‌ای برق (قربانی سا و همکاران، ۲۰۲۳).

انرژی‌های تجدیدپذیر شهری نباید محدود به خورشیدی باشند. استفاده از انرژی گرمایی زمین، و به ویژه، استفاده از انرژی پسماند شهری از طریق فرآیندهای پیشرفته تبدیل انرژی (مانند پیرولیز کنترل‌شده) که آلایندگی کمی دارند، می‌تواند بخش باقیمانده از تقاضای انرژی شهری را پوشش دهد و اتکا به سوخت‌های فسیلی را به حداقل برساند. در نهایت، هوشمندسازی امکان پایش مصرف انرژی را به سطح دستگاه‌های منفرد (Appliance Level Monitoring) می‌رساند. با تحلیل امضای الکتریکی دستگاه‌ها، می‌توان فهمید کدام دستگاه بیشترین انرژی را مصرف می‌کند و به کاربر یا سیستم مدیریتی هشدار داد. این سطح از جزئیات برای اطمینان از اینکه ساختمان‌ها واقعاً عملکرد انرژی خالص صفر خود را حفظ می‌کنند و نه فقط در زمان ساخت، حیاتی است (فرخی‌زاده، ۲۰۲۰).

۶. حمل و نقل هوشمند: شتاب‌دهنده گذار به تحرک با آلایندگی صفر

بخش حمل و نقل شهری مسئول بخش قابل توجهی از آلودگی هوای محلی، نویز شهری و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. دستیابی به شهر پاک هوشمند مستلزم دگرگونی کامل مدل‌های حمل و نقل از مدل مبتنی بر مالکیت خودروی شخصی و سوخت فسیلی، به سیستمی مبتنی بر تحرک یکپارچه، برقی، و بهینه شده توسط داده‌ها است. شهرسازی هوشمند ابزارهایی را فراهم می‌کند که این گذار را از سطح مفهومی به سطح عملیاتی امکان‌پذیر می‌سازد. محور اصلی این دگرگونی، برقی‌سازی گسترده ناوگان وسایل نقلیه، اعم از اتوبوس‌ها، تاکسی‌ها و خودروهای شخصی است. با این حال، برقی‌سازی به تنهایی کافی نیست؛ زیرا اگر برق مورد نیاز این خودروها از شبکه مبتنی بر سوخت فسیلی تأمین شود، آلودگی صرفاً از اگزوز به دودکش نیروگاه منتقل می‌شود. از این رو، برقی‌سازی باید همزمان با کربن‌زدایی شبکه برق صورت پذیرد، که این هم‌افزایی توسط شبکه هوشمند مدیریت می‌شود. زیرساخت شارژ هوشمند (Smart Charging Infrastructure) نقش تعیین‌کننده‌ای در جلوگیری از بار اضافی بر شبکه برق در ساعات اوج مصرف دارد. سیستم‌های شارژ هوشمند می‌توانند با خودروهای متصل ارتباط برقرار کرده و شارژ را به دوره‌هایی که تولید انرژی‌های تجدیدپذیر زیاد است (مثلاً ظهر برای شارژ خورشیدی) یا شب‌ها که تقاضای کلی پایین است، منتقل کنند. این مدیریت بار دینامیک، از فروپاشی شبکه جلوگیری می‌کند و بهره‌وری انرژی تجدیدپذیر را افزایش می‌دهد (متقی‌دستنائی و همکاران، ۲۰۲۵).

سیستم‌های حمل و نقل عمومی هوشمند (Intelligent Public Transit) با استفاده از داده‌های لحظه‌ای موقعیت‌یابی (GPS) و هوش مصنوعی، کارایی و جذابیت حمل و نقل عمومی را افزایش می‌دهند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توانند مسیرهای اتوبوس‌ها را بر اساس تقاضای لحظه‌ای شهروندان تغییر دهند، زمان‌بندی حرکت را دقیق‌تر سازند و زمان انتظار مسافران را کاهش دهند. این بهبودها، افراد را ترغیب می‌کند تا استفاده از خودروی شخصی را کاهش دهند. مفهوم «تحرک به عنوان یک سرویس» (MaaS - Mobility as a Service) تجلی نهایی اینپارادایم است. MaaS یک پلتفرم واحد دیجیتالی است که دسترسی به تمامی گزینه‌های حمل و نقل (عمومی، اشتراکی، تاکسی، دوچرخه و اسکوتر) را فراهم می‌کند و بهترین، سریع‌ترین و پاک‌ترین مسیر را پیشنهاد می‌دهد. این سیستم‌ها شهروندان را از مالکیت به استفاده هدایت می‌کنند و استفاده از وسایل نقلیه خصوصی که اغلب بیکار هستند و فضا اشغال می‌کنند، کاهش می‌یابد (آهنگری، ۲۰۲۵).

علاوه بر این، توسعه سامانه‌های حمل و نقل خودکار (Autonomous Vehicles - AVs) پتانسیل عظیمی برای کاهش آلودگی دارند. خودروهای خودران می‌توانند با حفظ فواصل ایمن و بهینه‌سازی شتاب و ترمز، مصرف انرژی خود را به حداقل برسانند. همچنین، ناوگان‌های خودران اشتراکی می‌توانند کارایی استفاده از هر وسیله نقلیه را چندین برابر افزایش دهند و نیاز به تعداد کل خودروهای در گردش را کاهش دهند. کنترل ترافیک هوشمند (Intelligent Traffic Control) با استفاده از دوربین‌ها و سنسورهای تعبیه‌شده در زیرساخت‌ها، به تنظیم جریان ترافیک در مقیاس شهری می‌پردازد (منوچهری و همکاران، ۲۰۲۵). این سیستم‌ها می‌توانند با پیش‌بینی تراکم‌ها، مسیرهای جایگزین را از طریق تابلوهای اطلاعات متغیر پیشنهاد دهند و در نتیجه از ایجاد ترافیک‌های سنگین که منجر به مصرف بیش از حد سوخت و افزایش انتشار NOx می‌شوند، جلوگیری کنند. در نهایت، تحرک فعال (پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری) باید با زیرساخت‌های هوشمند پشتیبانی شود. سنسورهای شمارش عابران و دوچرخه‌سواران، اطلاعات دقیقی در مورد میزان استفاده از این وسایل فراهم می‌آورند که این اطلاعات برای اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری در مسیرهای پیاده‌رو و دوچرخه‌سواری ایمن ضروری است، که خود مستقیماً انتشار آلاینده‌ها را در سطح صفر نگه می‌دارد.

۷. مدیریت منابع و اقتصاد چرخشی: کاهش پسماند و مصرف آب با هوشمندی

فراتر از انرژی و حمل و نقل، پایداری یک شهر پاک به مدیریت کارآمد و تقریباً بدون ضایعات سایر منابع حیاتی، یعنی آب و مواد، بستگی دارد. شهرسازی هوشمند ابزارهای دقیقی را برای تبدیل مدل خطی سنتی «استخراج-تولید-دور ریختن» به یک اقتصاد چرخشی (Circular Economy) فراهم می‌کند که اتکای شهر به منابع اولیه را به حداقل رسانده و تولید آلاینده‌های ناشی از دفع زباله را حذف می‌کند. در بخش مدیریت آب، نشت در شبکه‌های توزیع قدیمی شهری می‌تواند تا ۲۰ تا ۳۰ درصد از آب تصفیه‌شده را هدر دهد، که این اتلاف انرژی تصفیه و پمپاژ را نیز به همراه دارد (عمران‌زاده، ۲۰۲۵). شبکه‌های هوشمند آب (Smart Water Networks) با استفاده از سنسورهای فشار، جریان و حسگرهای صوتی، قادرند محل دقیق نشت‌ها را با دقت بالا و در مراحل اولیه شناسایی کنند. این قابلیت پایش لحظه‌ای، امکان تعمیرات پیشگیرانه و کاهش چشمگیر اتلاف منابع حیاتی را فراهم می‌آورد. علاوه بر نشت‌یابی، مدیریت تقاضای آب با استفاده از داده‌ها ضروری است. سیستم‌های هوشمند می‌توانند الگوهای مصرف آب در بخش‌های مختلف شهری (مسکونی، تجاری، صنعتی) را تحلیل کرده و در زمان خشکسالی، با اعمال محدودیت‌های هوشمند و هدفمند بر مناطقی که الگوهای مصرف غیربهینه دارند، تعادل شبکه را حفظ کنند. این امر به کاهش نیاز به پمپاژ آب از منابع دوردست و صرفه‌جویی در انرژی کمک می‌کند (منوچهری و همکاران، ۲۰۲۵).

در حوزه مدیریت پسماند، همان‌طور که اشاره شد، سطل‌های زباله هوشمند (Smart Bins) با سنسورهای سطح پرشدگی، زمان جمع‌آوری زباله را بهینه می‌سازند. این امر منجر به کاهش تعداد دفعات مراجعه خودروهای جمع‌آوری زباله می‌شود؛ در نتیجه مصرف سوخت دیزلی و انتشار آلاینده‌های مربوط به تردد این خودروها در شهر به شدت کاهش می‌یابد. فراتر از بهینه‌سازی جمع‌آوری، هوشمندی در فرآیندهای تفکیک و بازیافت نیز کاربرد دارد. استفاده از رباتیک و بینایی ماشین مبتنی بر هوش مصنوعی در تأسیسات بازیافت پیشرفته (MRFs)، امکان جداسازی دقیق‌تر مواد قابل بازیافت (مانند انواع مختلف پلاستیک) را فراهم می‌آورد. افزایش خلوص مواد بازیافتی، ارزش اقتصادی آن‌ها را بالا برده و موجب می‌شود مواد بیشتری به جای دفن شدن یا سوزانده شدن، دوباره وارد چرخه تولید شوند (کریمی، ۲۰۲۶).

اقتصاد چرخشی در ساختمان‌ها نیز پیاده‌سازی می‌شود. ساختمان‌های هوشمند نه تنها انرژی کمتری مصرف می‌کنند، بلکه مصالح ساختمانی نیز باید به گونه‌ای طراحی شوند که در پایان عمر مفید ساختمان، به راحتی قابل دمونتاژ و استفاده مجدد باشند. پلتفرم‌های داده‌ای می‌توانند «کارت‌های هویت مصالح» (Material Passports) را نگهداری کنند که اطلاعات دقیقی از اجزای ساختمانی را ذخیره می‌کنند تا در آینده برای بازیابی مورد استفاده قرار گیرند. کنترل آلودگی محیطی از طریق پایش مداوم هوا و آب، داده‌های حیاتی برای سلامت کلی شهر فراهم می‌آورد. سیستم‌های هشدار زودهنگام آلودگی ناشی از فعالیت‌های صنعتی یا کشاورزی اطراف شهر، امکان اعمال فوری مقررات توقف تولید یا تغییر فرآیند را فراهم می‌کنند تا از ورود آلاینده‌ها به منابع آب شهری یا انتشار آن‌ها در جو شهر جلوگیری شود. در نهایت، موفقیت در اقتصاد چرخشی شهری نیازمند یکپارچگی میان داده‌های تولید و مصرف است. تولیدکنندگان باید از طریق پلتفرم‌های هوشمند، بازخورد دقیقی در مورد ترکیب پسماند بازیافتی دریافت کنند تا طراحی محصولات آینده خود را برای تسهیل بازیافت تغییر دهند؛ این چرخه ارتباطی، جوهره یک شهر پاک و هوشمند است (قربانی سا و همکاران، ۲۰۲۳).

۸. چالش‌ها، موانع و مسیرهای آینده در تحقق شهر پاک هوشمند

با وجود پتانسیل عظیم تلفیق شهر هوشمند و شهر پاک، مسیر دستیابی به محیط‌های شهری با آلایندگی نزدیک به صفر با چالش‌های متعددی روبرو است که نیازمند راهبردهای دقیق مدیریتی و سرمایه‌گذاری‌های استراتژیک هستند. یکی از بزرگ‌ترین موانع، هزینه اولیه بالای زیرساخت‌های دیجیتال و فیزیکی مورد نیاز است؛ استقرار شبکه‌های حسگرهای IoT، ارتقاء شبکه‌های برق به استانداردهای هوشمند، و نوسازی کل ناوگان حمل و نقل عمومی نیازمند سرمایه‌گذاری‌های هنگفتی است که اغلب از توان مالی شهرداری‌های سنتی فراتر می‌رود. چالش فنی عمده دیگر، مسئله امنیت سایبری و حفظ حریم خصوصی داده‌ها است. با افزایش تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه، شهر به یک هدف بزرگ‌تر برای حملات سایبری تبدیل می‌شود. یک حمله موفق به شبکه هوشمند می‌تواند سیستم‌های حیاتی مانند کنترل ترافیک، شبکه توزیع برق، یا تصفیه‌خانه‌های آب را مختل کند. همچنین، جمع‌آوری حجم عظیمی از داده‌های رفتاری شهروندان، نگرانی‌های جدی در مورد نظارت دولتی و حریم خصوصی فردی ایجاد می‌کند که این موضوع نیازمند چارچوب‌های قانونی شفاف و الگوریتم‌های حفظ حریم خصوصی مانند حریم خصوصی تفاضلی (Differential Privacy) است (فرخی‌زاده، ۲۰۲۰).

مقاومت سازمانی و عدم یکپارچگی نهادی نیز یک مانع ساختاری بزرگ محسوب می‌شود. سیستم‌های سنتی شهری اغلب در بخش‌های مجزا (مانند آب، برق، ترافیک، مسکن) فعالیت می‌کنند که دارای فرهنگ و استانداردهای عملیاتی متفاوتی هستند. برای دستیابی به شهر هوشمند پاک، این سیلوهای سازمانی باید شکسته شوند و یک رویکرد بین بخشی (Cross-Sectoral) برای مدیریت داده و تصمیم‌گیری اتخاذ گردد. این تغییر نیازمند رهبری قوی و اصلاح ساختارهای حکمرانی است. مسائل مربوط به استانداردسازی و قابلیت تعامل‌پذیری (Interoperability) نیز اساسی است. در غیاب استانداردهای ملی یا بین‌المللی واحد برای پلتفرم‌های داده شهری، شهرداری‌ها اغلب مجبور به خرید فناوری‌های انحصاری می‌شوند که باعث ایجاد وابستگی به فروشنده (Vendor Lock-in) و دشواری در ادغام سامانه‌های جدید در آینده می‌گردد. این امر رشد و تکامل اکوسیستم شهر هوشمند را کند می‌کند.

از منظر اجتماعی، موفقیت شهر پاک هوشمند وابسته به پذیرش شهروندان است. اگر فناوری‌های جدید به درستی معرفی نشوند یا اگر منافع ملموسی برای عموم مردم نداشته باشند، مقاومت اجتماعی می‌تواند ابتکارات را به شکست بکشاند. یکی از چالش‌های اصلی، جلوگیری از ایجاد «شکاف دیجیتالی» (Digital Divide) است؛ به طوری که مزایای شهر هوشمند تنها

به ساکنان برخوردار از دسترسی فناوری محدود نشود. مسیرهای آینده نیازمند تمرکز بر توسعه راهکارهای بومی و سازگار با شرایط محلی است. به جای کپی‌برداری صرف از تجربیات موفق جهانی، باید مدل‌هایی توسعه یابد که با تراکم جمعیتی، اقلیم خاص، و منابع موجود شهری همخوانی داشته باشد. تحقیقات آتی باید بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر برای ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین توسعه مواد و فناوری‌های ساختمانی که از نظر زیست‌محیطی تأثیر کمتری دارند، متمرکز شود. در نهایت، تحقق آلایندگی نزدیک به صفر نیازمند ایجاد یک چارچوب نظارتی قوی است که به وضوح اهداف محیط‌زیستی را تعریف کرده و ابزارهای نظارتی هوشمندی برای اعمال آن‌ها فراهم آورد. این چارچوب باید انعطاف‌پذیری لازم برای جذب نوآوری‌های فناورانه آینده را داشته باشد، در حالی که منافع بلندمدت زیست‌محیطی بر منافع کوتاه‌مدت اقتصادی ارجحیت یابد.

۷. چشم‌انداز شهرهای آینده و لزوم اقدام فوری

شهرسازی هوشمند و شهر پاک، دو نیروی تحول‌آفرین هستند که در صورت تلفیق مؤثر، توانایی بازتعریف زندگی شهری در قرن بیست و یکم را دارند و نویدبخش آینده‌ای با آلایندگی نزدیک به صفر و کیفیت زندگی بالا هستند. این مقاله مروری نشان داد که هوشمندی صرفاً یک ابزار کاربردی برای بهبود کارایی نیست، بلکه یک الزام بنیادین برای دستیابی به اهداف سخت‌گیرانه زیست‌محیطی است که توسط مفهوم شهر پاک دنبال می‌شود. بدون استفاده از داده‌ها، تحلیل‌های بلادرنگ، و اتوماسیون مبتنی بر هوش مصنوعی، اهداف کربن‌زدایی و حذف آلاینده‌های محلی در پیچیدگی‌های شهری مدرن دست‌نیافتنی باقی خواهند ماند. موفقیت در این مسیر وابسته به تکامل همزمان زیرساخت‌های فیزیکی (شبکه‌های انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های حمل و نقل برقی و ساختمان‌های NZEB) و زیرساخت‌های دیجیتال (IoT، کلان‌داده‌ها و پلتفرم‌های یکپارچه) است. شبکه‌های هوشمند انرژی، حمل و نقل مبتنی بر MaaS، و سیستم‌های مدیریت منابع با رویکرد اقتصاد چرخشی، همگی نیازمند جریان مستمر و قابل اعتماد داده‌ها هستند تا بتوانند به جای واکنش‌های کند، اقدامات پیشگیرانه و بهینه انجام دهند.

چالش‌های پیش رو، از جمله سرمایه‌گذاری‌های اولیه بالا، مسائل امنیتی سایبری، و مقاومت‌های سازمانی، قابل مدیریت هستند، اما مستلزم اراده سیاسی قوی و چارچوب‌های حکمرانی نوآورانه می‌باشند. شهرداری‌ها باید از رویکرد جزیره‌ای فاصله گرفته و به سمت پلتفرم‌های داده‌ای باز و مشترک حرکت کنند تا قابلیت تعامل میان سیستم‌ها تسهیل گردد. تضمین امنیت و حریم خصوصی داده‌ها نیز برای حفظ اعتماد عمومی و تضمین پذیرش اجتماعی فناوری‌ها حیاتی است. در چشم‌انداز آینده، شهرهایی که این هم‌افزایی را به درستی پیاده‌سازی کنند، نه تنها از نظر محیط زیستی پایدار خواهند بود، بلکه از نظر اقتصادی نیز تاب‌آورتر و از نظر اجتماعی نیز جذاب‌تر خواهند بود. این شهرها مراکز نوآوری خواهند بود که در آن‌ها کیفیت هوا، دسترسی به منابع پاک انرژی و تحرک کارآمد، به جای مزیت‌های لوکس، به حقوق اساسی شهروندی تبدیل می‌شوند.

بنابراین، نتیجه‌گیری اصلی این است که تأخیر در پذیرش این مدل تلفیقی به معنای عقب‌نشینی از اهداف اقلیمی است. اقدام فوری برای سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های هوشمند، تدوین مقررات سخت‌گیرانه برای ساختمان‌ها و حمل و نقل، و ترویج فرهنگ مصرف مسئولانه مبتنی بر داده، تنها راه مطمئن برای تحقق آرمان «شهر پاک هوشمند با آلایندگی نزدیک به صفر» است و این امر نیازمند یک اجماع چندسطحی بین دولت‌ها، بخش خصوصی و جامعه علمی است تا بتوان نسل آینده شهرها را به شیوه‌ای پایدار بنیان نهاد.

۸. ملاحظات سیاستی و توصیه‌های اجرایی برای گذار به شهر پاک هوشمند

تحقق موفقیت‌آمیز شهر پاک هوشمند با آلایندگی نزدیک به صفر، مستلزم تدوین و اجرای مجموعه‌ای از سیاست‌های قاطع و هم‌راستا در حوزه‌های فناوری، مالی و نظارتی است. این توصیه‌ها بر ایجاد یک محیط نظارتی انگیزشی برای جذب سرمایه‌گذاری خصوصی و هدایت توسعه فناوری به سمت اهداف پایداری متمرکز هستند. اولین و مهم‌ترین توصیه سیاستی، وضع استانداردهای اجباری برای ساخت‌وساز است که فراتر از استانداردهای فعلی باشند؛ الزام تمامی ساختمان‌های جدید به کسب گواهینامه انرژی خالص صفر (Net-Zero Energy) یا انرژی فعال (Net-Positive Energy) از طریق قوانین الزام‌آور ساختمانی، یک گام غیرقابل چشم‌پوشی است. دولت‌ها باید مشوق‌های مالی قوی، مانند تسهیلات وام‌های کم‌بهره و یارانه‌های هدفمند، برای ارتقاء سیستم‌های موجود انرژی در ساختمان‌های قدیمی و نصب زیرساخت‌های تولید توزیع‌شده (مانند پنل‌های خورشیدی) ارائه دهند. همزمان، باید مکانیزمی برای قیمت‌گذاری کربن در سطح محلی یا منطقه‌ای ایجاد شود تا هزینه‌های واقعی آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تصمیم‌گیری‌های اقتصادی لحاظ گردد و این امر، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک را به صرفه‌ترین گزینه تبدیل کند.

در حوزه حمل و نقل، سیاست‌ها باید بر حذف تدریجی خودروهای با احتراق داخلی از مناطق مرکزی شهر تمرکز کنند. این امر می‌تواند از طریق مناطق با آلودگی بسیار پایین (ULEZ) یا مناطق صفر انتشار (Zero Emission Zones) که ورود وسایل نقلیه آلاینده را ممنوع می‌کنند، عملی شود. این ممنوعیت‌ها باید با سرمایه‌گذاری همزمان در زیرساخت‌های شارژ سریع و گسترش شبکه حمل و نقل عمومی الکتریکی و خودران همراه باشند تا گزینه‌های جایگزین برای شهروندان فراهم شود. ایجاد یک "پلتفرم داده شهری یکپارچه" (Integrated Urban Data Platform) که بر اساس استانداردهای باز طراحی شده باشد، یک ضرورت زیرساختی است. این پلتفرم باید به عنوان یک نهاد مرکزی برای تبادل داده‌های ایمن و استاندارد بین بخش‌های مختلف (انرژی، ترافیک، آب) عمل کند. دولت باید شفافیت را در مورد داده‌های جمع‌آوری شده تضمین کند و چارچوب‌های سخت‌گیرانه‌ای برای حاکمیت داده (Data Governance) و حفظ حریم خصوصی شهروندان وضع نماید تا از سوءاستفاده‌های احتمالی جلوگیری شود.

برای موفقیت در پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی، سیاست‌ها باید مشوق‌هایی برای تولیدکنندگان فراهم آورند تا محصولات خود را با قابلیت بازیافت بالاتر طراحی کنند (طراحی برای دمونتاژ). همچنین، باید سیستم‌های نظارتی هوشمندی برای پایش میزان انحراف از استانداردهای بازیافت و دفن زباله اعمال شود که این نظارت باید توسط سنسورها و تحلیل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی صورت پذیرد تا اتلاف در این بخش به حداقل برسد. آموزش و توسعه نیروی کار متخصص نیز یک ملاحظه سیاستی مهم است. گذار به شهر هوشمند پاک نیازمند مهارت‌های جدید در مهندسی انرژی، تحلیل داده‌های شهری، و امنیت سایبری است. دولت‌ها باید برنامه‌های آموزشی متمرکز برای تربیت متخصصانی که بتوانند این سامانه‌های پیچیده را توسعه، نصب و نگهداری کنند، اجرا نمایند تا وابستگی به نیروی کار خارجی کاهش یابد. سیاست‌گذاری باید تشویق‌کننده نوآوری باشد. ایجاد "آزمایشگاه‌های زنده" (Living Labs) در محیط واقعی شهر، به شرکت‌ها و دانشگاه‌ها این امکان را می‌دهد که راهکارهای فناورانه خود را در مقیاس کوچک تست و اعتبارسنجی کنند، پیش از آنکه سرمایه‌گذاری‌های کلان شهری بر اساس فناوری‌های اثبات‌نشده انجام گیرد. این رویکرد تکرارشونده (Iterative Approach) ریسک سرمایه‌گذاری عمومی را کاهش می‌دهد. در نهایت، موفقیت شهر پاک هوشمند در گرو مشارکت فعال شهروندان است. سیاست‌ها باید شامل برنامه‌های شفاف ارتباطی باشند که نه تنها مزایای زیست‌محیطی، بلکه مزایای اقتصادی و رفاهی را نیز برای مردم روشن سازند. ایجاد

داشبوردهای عمومی که پیشرفت شهر در رسیدن به اهداف آلایندگی صفر را به نمایش می‌گذارند، یک ابزار قدرتمند برای ایجاد حس مالکیت و تعهد جمعی در قبال این تحول بزرگ شهری است.

نتیجه‌گیری نهایی و چشم‌انداز آینده

این مقاله مروری به طور جامع نشان داد که دستیابی به «شهر پاک با آلایندگی نزدیک به صفر» نه تنها یک آرمان زیست‌محیطی دست‌نیافتنی نیست، بلکه از طریق ادغام استراتژیک با پارادایم «شهرسازی هوشمند»، به یک هدف قابل مدیریت و زمان‌بندی‌شده تبدیل شده است. هوشمندی ابزاری است که ظرفیت‌های شهری برای پایش دقیق، پیش‌بینی رفتارهای پیچیده، و اجرای مداخلات بهینه در مقیاس لحظه‌ای را فراهم می‌آورد، امری که برای کربن‌زدایی کامل در بخش‌های حیاتی مانند انرژی، حمل و نقل و مدیریت منابع ضروری است. تلفیق سنسورهای IoT، تحلیل کلان‌داده‌ها و هوش مصنوعی، شهر را به یک سیستم خودتنظیم‌گر تبدیل می‌کند که می‌تواند نوسانات انرژی‌های تجدیدپذیر را مدیریت کند، جریان ترافیک آلاینده را بهینه سازد، و اقتصاد چرخشی را از سطح نظری به واقعیت تبدیل نماید. زیرساخت‌هایی مانند شبکه‌های هوشمند و پلتفرم‌های MaaS، ستون‌های فیزیکی این تحول هستند که توسط لایه دیجیتال پشتیبانی می‌شوند.

با این حال، این گذار بدون غلبه بر موانع جدی امکان‌پذیر نیست. چالش‌های مالی، امنیت سایبری، نیاز به یکپارچگی سازمانی و مسئله پذیرش اجتماعی نیازمند پاسخ‌های سیاستی دقیق و آینده‌نگر هستند. همان‌طور که در بخش‌های قبل تأکید شد، سیاست‌های موفق باید مبتنی بر استانداردهای اجباری انرژی، مشوق‌های مالی قوی برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک، و ایجاد شفافیت کامل در حکمرانی داده‌ها باشند. آینده شهرسازی در گرو این تلفیق است. شهر پاک هوشمند، تعریفی جدید از زیست‌پذیری را ارائه می‌دهد که در آن کارایی اقتصادی، تاب‌آوری اقلیمی و سلامت عمومی در تعادل کامل قرار دارند. تحقیقات آتی باید بیشتر بر توسعه مدل‌های ارزیابی چندمعیاره برای سنجش موفقیت این تلفیق، و همچنین بر تقویت الگوریتم‌های یادگیری ماشینی متمرکز بر پیش‌بینی‌های بلندمدت اقلیمی شهری تمرکز کنند. به طور خلاصه، شهر هوشمند نه تنها باید کارآمدتر باشد، بلکه باید اخلاقاً متعهد به پایداری باشد. این تعهد اخلاقی که از طریق فناوری اعمال می‌شود، جوهره اصلی برای ایجاد شهرهایی است که بتوانند در مواجهه با بحران‌های زیست‌محیطی، نه تنها بقا یابند، بلکه شکوفا شوند، و در نتیجه، آرمان شهر پاک با آلایندگی نزدیک به صفر را به واقعیت تبدیل سازند. اقدام فعالانه امروز، تعیین‌کننده کیفیت محیط زیست زندگی نسل‌های آینده خواهد بود.

منابع

- فرخی‌زاده, شکوهی. (۲۰۲۰). یکپارچه‌سازی تفکر ناب و توسعه پایدار در زمینه مدیریت سلامت، ایمنی و محیط زیست (HSE) در صنعت ساخت و ساز. دوفصلنامه علمی پژوهش در مهندسی نگهداشت دفاعی, ۲(۱), ۵۸-۷۴.
- قربانی سا, هانا سادات, رضایی فر, امید, ربیع زاده, انسیه. (۲۰۲۳). مروری بر حقوق مهندسی و مدیریت پروژه‌های عمرانی براساس معیارهای ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE). | نشریه عمران و پروژه|, ۵(۶), ۵۸-۶۸.
- کریمی, زرکش. (۲۰۲۶). کاهش بار سرمایشی با بهینه سازی پوسته خارجی ساختمان مسکونی بلند مرتبه قزوین مبتنی بر آنالیز حساسیت. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی, ۱۶(۱), ۲۷-۵۶.
- عمران زاده, عابدینی. (۲۰۲۵). رهیافتی بر جایگاه طراحی معماری و شهرسازی در فرایند سیاست‌گذاری شهری در ایران؛ ارائه مدلی نظری. مطالعات میان رشته‌ای تمدنی انقلاب اسلامی, ۳(۱۲), ۵۳-۸۸.

- علیرضا منوچهری، حسین ذبیحی، و زهر اصادات سعیده. (۲۰۲۵). نقش هوش مصنوعی در بهینه سازی و ارتقای برنامه ریزی دقیق و طراحی شهری. تحقیقات جغرافیایی، ۴۰(۱).
- منوچهری, ذبیحی, زرآبادی, زهراسادات سعیده. (۲۰۲۵). نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی و ارتقای دقت فرآیند برنامه‌ریزی و طراحی شهری پارامتریک. تحقیقات جغرافیایی, ۴۰(۱), ۴۱-۵۲.
- آهنگری, نوید. (۲۰۲۵). فراتحلیل کاربرد هوش مصنوعی در توسعهٔ کاربری‌های ترکیبی اراضی شهر تهران. اقتصاد و برنامه ریزی شهری, ۶(۴), ۱۷۶-۱۹۱.
- متقی دستنائی, افشین, کرمی. (۲۰۲۵). هوش مصنوعی و مدیریت برنامه ریزی گردشگری شهری در اتحادیهٔ اروپا: مطالعهٔ موردی شهر تورین ایتالیا. برنامه ریزی و توسعه گردشگری, ۱۴(۵۵), ۷-۴۷.
- رضوانیان, سیده الهه, حنایی, تکتم. (۲۰۲۵). تحلیل فراروش برنامه‌ریزی کاربری زمین و پایداری اقتصادی: راهکارهای نوین برای بهینه‌سازی شهری. اقتصاد شهری, ۱۰(۲), ۶۷-۷۸.
- بقالی اقدم, صادقی, سیدکمال, نوبهار. (۲۰۲۵). مدل‌سازی شهر هوشمند تبریز در چشم‌انداز ۲۰۳۰: بررسی جامع شاخص‌های محیطی، اقتصادی و حکمرانی. اقتصاد و برنامه ریزی شهری, ۶(۱), ۵۸-۷۵.
- جمشیدی, زارع, عبدالله زاده طرف. (۲۰۲۳). ارزیابی تحقق‌پذیری شاخصه‌های شهر هوشمند (نمونه موردی شهر تبریز). پژوهش های معماری نوین, ۳(۱), e۷۲۵۷۱۵.
- برادران خانیان, پناهی, اصغرپور. (۲۰۲۰). بررسی وضعیت کنونی تحول هوشمند در کلان‌شهر تبریز. اقتصاد شهری, ۵(۲), ۸۵-۱۱۲.
- غلامی نورآباد, هادی, میره ای, جاوید. (۲۰۲۵). تبیین الگوی حکمروایی هوشمند با رویکرد مشارکت مردمی در تصمیم گیری شهری (نمونه موردی: شهر تهران). آمایش فضا و ژئوماتیک, ۲۶(۱), ۱۱۹-۱۳۹.
- شیرویه‌پور, شهریار, مرتضوی, بیات, روح‌الله. (۲۰۲۴). ارائهٔ مدل عوامل مؤثر بر توسعهٔ آیندهٔ شهرهای هوشمند پایدار با تأکید بر مدیریت بهینهٔ انرژی. اقتصاد و برنامه ریزی شهری, ۴(۴), ۱۱۶-۱۳۰.
- زینالی عظیم, فدائی حقی, مهری, علیزاده, امین, جدیری عباسی, ... شریفی. (۲۰۲۴). سنجش عوامل موثر در عدم توسعه شهر هوشمند پایدار تبریز. فصلنامه علوم محیطی, ۲۲(۳), ۴۲۷-۴۴۶.
- چوبینه, دانش, غزاله, منصوری, نجفی مجره, شهبازی, ... سید سعید. (۲۰۲۰). بررسی وضعیت شاخص‌های بهداشت، ایمنی و محیط زیست در برخی از مجموعه‌های سازمانی شهرداری تهران: چالش‌ها، نقاط ضعف و قوت و راهبردهای اصلاحی. مجله اپیدمیولوژی ایران, ۱۶(۲), ۱۴۴-۱۵۲.
- موسوی, سید سجاد, ابراهیمیان, مبین, نجفی, دلفان, ... میرزاهاشمی. (۲۰۲۵). طراحی و اعتبارسنجی ابزار ارزیابی عملکرد HSE در تجمعات شهری: مطالعه موردی تهران. فصلنامه علمی دانش پیشگیری و مدیریت بحران, ۱۵(۳), ۳۲۰-۳۴۳.
- زندی دولابی, امیرکاردوست. (۲۰۲۲). شناسایی و اولویت بندی عوامل تاثیر گذار در ایمنی، سلامت و محیط زیست در پروژه‌های عمرانی با استفاده از تکنیک تصمیم گیری چند معیاره. | نشریه عمران و پروژه|, ۴(۳), ۲۶-۴۲.