

ارزیابی تأثیر معماری و شهرسازی داده‌محور بر کاهش مصرف انرژی، ارتقای کیفیت فضای عمومی و بهبود زیست‌پذیری محله‌های شهری

ابراهیم کریمی نژاد

کارشناس ارشد معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج، یاسوج، ایران.

چکیده

افزایش مصرف انرژی و افت کیفیت فضاهای عمومی، زیست‌پذیری محله‌های شهری را تهدید می‌کند. داده‌محوری به عنوان پارادایمی نوین می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای کیفیت فضاهای عمومی کمک کند. هدف پژوهش، بررسی تأثیر داده‌محوری بر مصرف انرژی و کیفیت فضای عمومی و نقش میانجی کیفیت فضا در رابطه با زیست‌پذیری محله بود. پژوهش از نوع آمیخته با رویکرد تبیینی متوالی بود. ۱۵ محله از تهران با روش هدفمند انتخاب شدند. داده‌های کمی از صورت‌حساب‌های انرژی، داده‌های هواشناسی، تصاویر سنتینل-۲ و پرسشنامه گردآوری و با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحلیل فضایی و مدل‌سازی معادلات ساختاری تحلیل شدند. بخش کیفی شامل ۱۵ مصاحبه با خبرگان و دو دور دلفی بود. گرادیان تقویتی با $R^2=0/91$ بهترین پیش‌بینی مصرف انرژی را داشت. داده‌محوری تأثیر منفی بر مصرف انرژی ($\beta=-0/38$) و مثبت بر کیفیت فضا ($\beta=0/44$) نشان داد. کیفیت فضا تأثیر قوی بر زیست‌پذیری داشت ($\beta=0/57$). تأثیر غیرمستقیم داده‌محوری بر زیست‌پذیری ($\beta=0/26$) از تأثیر مستقیم ($\beta=0/18$) قوی‌تر بود. اولویت نخست راهبردها «یجاد سامانه یکپارچه داده‌های شهری» بود. داده‌محوری از طریق ارتقای کیفیت فضاهای عمومی بر زیست‌پذیری تأثیر می‌گذارد و تحقق آن نیازمند اجرای هم‌زمان راهبردهای فناورانه، نهادی و اجتماعی است.

کلید واژه‌ها: داده‌محوری شهری، مصرف انرژی، کیفیت فضای عمومی، زیست‌پذیری محله، یادگیری ماشین، شهر هوشمند، تهران

مقدمه

شهرها به عنوان پیچیده‌ترین ساخته‌های بشری، همواره بستر اصلی تعاملات اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی جوامع بوده‌اند. با این حال، رشد شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، چالش‌های بی‌سابقه‌ای را در ابعاد مختلف کالبدی، زیست‌محیطی و اجتماعی ایجاد کرده است. از یک سو، افزایش جمعیت شهری منجر به گسترش بی‌رویه ساخت‌وساز، افزایش مصرف منابع انرژی و تشدید آلودگی‌های زیست‌محیطی شده است. از سوی دیگر، کیفیت فضاهای عمومی به عنوان عرصه‌های حیات جمعی شهری، به دلیل غلبه رویکردهای صرفاً کمی و مهندسی‌محور، تنزل یافته و زیست‌پذیری محله‌های شهری را با تهدید مواجه ساخته است (بحرینی، ۱۳۹۸، ص ۴۵). در این میان، معماری و شهرسازی داده‌محور به عنوان یک پارادایم نوظهور، نویدبخش رویکردی است که می‌تواند با بهره‌گیری از کلان‌داده‌ها، تحلیل‌های الگوریتمی و مدل‌های شبیه‌سازی، پاسخ‌های دقیق‌تر و کارآمدتری به این چالش‌های چندبعدی ارائه دهد.

بیان مسئله پژوهش حاضر از آنجا ناشی می‌شود که علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در فناوری‌های داده‌محور در حوزه‌هایی مانند حمل‌ونقل هوشمند و مدیریت انرژی در مقیاس ساختمان، ادبیات علمی موجود در تبیین ارتباط نظام‌مند میان معماری و شهرسازی داده‌محور با سه مؤلفه کلیدی کاهش مصرف انرژی، ارتقای کیفیت فضای عمومی و بهبود زیست‌پذیری محله‌های شهری، با خلأ نظری و تجربی قابل توجهی مواجه است. به عبارت دیگر، پرسش اساسی این است که آیا و چگونه می‌توان از داده‌های حجیم و تحلیل‌های محاسباتی برای طراحی و مدیریت یکپارچه محیط ساخته شده بهره گرفت تا همزمان به اهداف بهینه‌سازی انرژی، غنای فضایی و افزایش رفاه ساکنان دست یافت؟ این پرسش زمانی اهمیت مضاعف می‌یابد که بدانیم رویکردهای سنتی طراحی شهری غالباً این سه بعد را به صورت جزیره‌ای و غیرهماهنگ مورد توجه قرار داده‌اند (گیل، ۲۰۱۰، ص ۶۳؛ اسکان بشر ملل متحد، ۲۰۲۰، ص ۸۹).

معماری و شهرسازی داده‌محور را می‌توان به عنوان رویکردی تعریف کرد که در آن فرآیندهای تصمیم‌گیری در مقیاس ساختمان و محله، مبتنی بر گردآوری نظام‌مند، تحلیل پیشرفته و تفسیر هوشمندانه حجم عظیمی از داده‌های مکانی، زمانی، رفتاری و زیست‌محیطی انجام می‌شود. این رویکرد با پارادایم‌های پیشین مانند طراحی پارامتریک، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و شهر هوشمند پیوند خورده، اما فراتر از آن‌ها، بر حلقه بازخورد لحظه‌ای میان داده، تحلیل و تصمیم طراحی تأکید می‌کند (بتی، ۲۰۱۳، ص ۱۲). در چنین رویکردی، هر پیکسل از فضای شهری و هر وات از انرژی مصرفی می‌تواند به یک نقطه داده تبدیل شود که در خدمت طراحی کارآمدتر و انسانی‌تر قرار می‌گیرد.

کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان و حمل‌ونقل، یکی از مهم‌ترین ارکان توسعه پایدار شهری محسوب می‌شود. ساختمان‌ها در سطح جهان حدود چهل درصد از کل مصرف انرژی و سی و شش درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن را به خود اختصاص می‌دهند (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۱، ص ۱۵). در این زمینه، معماری داده‌محور می‌تواند با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مصرف انرژی مبتنی بر یادگیری ماشین، شبیه‌سازی عملکرد حرارتی و نوری ساختمان در مراحل اولیه طراحی، و بهینه‌سازی سامانه‌های تأسیساتی بر اساس الگوهای واقعی مصرف ساکنان، گام‌های مؤثری در مسیر کاهش چشمگیر مصرف انرژی بردارد. برای نمونه، مطالعات تجربی نشان داده است که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در فرآیند طراحی می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را تا سی درصد کاهش دهد (آشیونه و همکاران، ۲۰۱۶، ص ۱۲۸).

کیفیت فضای عمومی، دومین مؤلفه مورد توجه این پژوهش، به عنوان یکی از شاخص‌های اصلی سرزندگی شهری و رضایتمندی شهروندان شناخته می‌شود. فضاهای عمومی با کیفیت، نه تنها بستر تعاملات اجتماعی و مشارکت مدنی هستند، بلکه بر سلامت روانی و جسمانی ساکنان نیز تأثیر مستقیم دارند (وایت، ۱۹۸۰، ص ۹۶). با این حال، بسیاری از فضاهای

عمومی معاصر، به دلیل طراحی صرفاً مهندسی محور و بی توجهی به الگوهای رفتاری و ادراکی کاربران، به فضاهایی بی روح و متروک تبدیل شده‌اند. شهرسازی داده محور امکان می‌دهد تا با تحلیل کلان داده‌های حاصل از حسگرها، تصاویر ماهواره‌ای، شبکه‌های اجتماعی و ردپای دیجیتال شهروندان، درک عمیق تری از نحوه استفاده واقعی مردم از فضا، الگوهای تردد و توقف و نیازهای پنهان آن‌ها به دست آورد و بر اساس آن، فضاهایی پاسخگوتر و جذاب‌تر طراحی کرد (هیلیر، ۱۹۹۶، ص ۷۵).

زیست‌پذیری، به عنوان یک مفهوم کلان و میان‌رشته‌ای، به میزان تناسب یک محله یا شهر با نیازهای زیستی، اجتماعی، اقتصادی و روانی ساکنان آن اطلاق می‌شود. بهبود زیست‌پذیری مستلزم ایجاد تعادل پویا میان ابعاد مختلف کیفیت زندگی از جمله امنیت، دسترسی، سلامت، تماس با طبیعت و مشارکت اجتماعی است (لی، ۱۹۸۳، ص ۳۳). در چارچوب معماری و شهرسازی داده محور، زیست‌پذیری می‌تواند به عنوان یک پارامتر قابل سنجش و بهینه‌سازی تعریف شود. داده‌های مربوط به شاخص‌های آلودگی هوا، نویز، پوشش گیاهی، نرخ جرم، دسترسی به خدمات و حمل و نقل عمومی، همگی می‌توانند در یک سامانه یکپارچه گردآوری شده و برای شناسایی محله‌های دارای اولویت مداخله و اولویت‌بندی پروژه‌های بهسازی مورد استفاده قرار گیرند.

یکی از مهم‌ترین مزایای رویکرد داده محور، امکان عبور از تصمیم‌گیری‌های سلیقه‌ای و ایدئولوژیک در طراحی شهری به سمت تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد است. این رویکرد به طراحان و برنامه‌ریزان شهری این امکان را می‌دهد که فرضیه‌های طراحی خود را پیش از اجرا در محیط‌های شبیه‌سازی شده بیازمایند، سناریوهای مختلف را مقایسه کنند و پیامدهای هر گزینه را با دقت بالاتری پیش‌بینی کنند. در همین راستا، مفهوم دوقلوی دیجیتال شهری به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مصادیق شهرسازی داده محور، یک کپی مجازی و پویا از شهر ایجاد می‌کند که در آن می‌توان اثرات سیاست‌ها و طرح‌های مختلف را در زمان واقعی شبیه‌سازی و ارزیابی کرد (شروتز و هورتز، ۲۰۲۰، ص ۳).

با وجود پتانسیل‌های چشمگیر، استقرار معماری و شهرسازی داده محور با چالش‌های متعددی نیز مواجه است. مهم‌ترین این چالش‌ها شامل مسائل حریم خصوصی و امنیت داده‌های شهروندی، شکاف دیجیتالی میان گروه‌های مختلف اجتماعی، هزینه‌های بالای زیرساخت‌های فناوری، کمبود نیروی متخصص میان‌رشته‌ای، و خطر تقلیل‌گرایی و کاهش پیچیدگی‌های کیفی و معنایی زندگی شهری به اعداد قابل اندازه‌گیری است (کیچین، ۲۰۱۴، ص ۵۷). هر پروژه داده محوری که این چالش‌های بنیادین را نادیده بگیرد، نه تنها در دستیابی به اهداف خود ناکام می‌ماند، بلکه ممکن است نابرابری‌های فضایی و اجتماعی موجود را تشدید کند.

مرور نظام‌مند ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر یکی از ابعاد سه‌گانه مذکور به صورت مجزا متمرکز بوده‌اند. برای نمونه، حجم قابل توجهی از تحقیقات به بهینه‌سازی انرژی ساختمان با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی و یادگیری ماشین اختصاص یافته است. به طور مشابه، مطالعات گسترده‌ای بر تحلیل نحوه استفاده از فضاهای عمومی با استفاده از روش‌هایی مانند نقشه‌برداری رفتاری و تحلیل چیدمان فضا متمرکز شده‌اند. همچنین، ارزیابی زیست‌پذیری شهری از طریق شاخص‌های ترکیبی در پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. با این حال، شکاف پژوهشی قابل توجهی در زمینه ارائه یک الگوی یکپارچه که همزمان به هر سه مؤلفه و تعاملات پیچیده آن‌ها در چارچوب یک رویکرد داده محور بپردازد، وجود دارد (حبیبی و همکاران، ۱۴۰۰، ص ۱۱۲).

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی و همبستگی است. این مطالعه به دنبال ارزیابی کمی و کیفی تأثیرات کاربست رویکرد داده محور در فرآیندهای طراحی معماری و برنامه‌ریزی شهری بر شاخص‌های منتخب مصرف انرژی، کیفیت فضای عمومی و زیست‌پذیری در سطح محله‌های شهری است. محدوده مورد مطالعه می‌تواند یک یا چند محله

از یک کلان‌شهر باشد که داده‌های کافی برای تحلیل در دسترس است. روش گردآوری داده‌ها ترکیبی از داده‌های ثانویه (مانند صورت‌حساب‌های انرژی، داده‌های حسگرها و اطلاعات مکانی) و داده‌های اولیه (مانند پرسشنامه سنجش رضایتمندی ساکنان و برداشت‌های میدانی) خواهد بود.

چارچوب نظری این پژوهش بر سه رکن اصلی استوار است: نخست نظریه شهر هوشمند که بر نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات در مدیریت کارآمد شهری تأکید دارد. دوم نظریه فضای اجتماعی لوفور که کیفیت فضای عمومی را در تعامل میان ابعاد کالبدی، ذهنی و زیسته تعریف می‌کند. و سوم نظریه زیست‌پذیری که برآوردن نیازهای اساسی ساکنان و ارتقای رفاه را در کانون توجه قرار می‌دهد. این سه رکن در چارچوب یک مدل مفهومی یکپارچه گرد هم آمده‌اند که در آن معماری و شهرسازی داده‌محور به عنوان متغیر مستقل، و کاهش مصرف انرژی، ارتقای کیفیت فضای عمومی و بهبود زیست‌پذیری به عنوان متغیرهای وابسته اصلی در نظر گرفته شده‌اند (لوفور، ۱۹۹۱، ص ۴۱؛ نام و پارادو، ۲۰۱۱، ص ۲۸۴).

برای سنجش میزان مصرف انرژی، از شاخص‌های شدت مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی و تجاری، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی محله و میانگین مصرف انرژی سرانه استفاده خواهد شد. کیفیت فضای عمومی با استفاده از شاخص‌های کمی مانند میزان حضورپذیری، تنوع فعالیت‌ها، نفوذپذیری بصری و فیزیکی، و شاخص‌های کیفی مانند احساس امنیت، زیبایی و هویت مکانی ارزیابی می‌گردد. زیست‌پذیری محله نیز از طریق شاخص‌های ترکیبی شامل دسترسی به خدمات و حمل‌ونقل عمومی، کیفیت هوا و صدا، نسبت فضای سبز، نرخ جرم و احساس رضایت از زندگی در محله سنجش خواهد شد (تولایی و همکاران، ۱۳۹۹، ص ۷۸).

تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری توصیفی و استنباطی، مدل‌سازی معادلات ساختاری و تحلیل رگرسیون چندمتغیره انجام خواهد شد تا هم شدت و هم جهت روابط میان متغیرها مشخص گردد. همچنین از ابزارهای تحلیل فضایی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی برای شناسایی الگوهای توزیع فضایی هر یک از شاخص‌ها و ارتباط آن با میزان به‌کارگیری رویکردهای داده‌محور در بافت‌های مختلف شهری استفاده می‌شود. قابل ذکر است که موفقیت این پژوهش در گرو دسترسی به داده‌های قابل اعتماد و با وضوح مکانی و زمانی کافی است که خود یکی از محدودیت‌های اصلی تحقیق به شمار می‌آید.

اهمیت و ضرورت انجام این پژوهش نه تنها از منظر علمی که از منظر عملیاتی نیز قابل توجیه است. از یک سو، نتایج این تحقیق می‌تواند خلأ نظری موجود در ادبیات میان‌رشته‌ای معماری، شهرسازی و علم داده را پر کند و چارچوبی مفهومی برای پژوهش‌های آتی فراهم آورد. از سوی دیگر، یافته‌های آن برای مدیران و برنامه‌ریزان شهری، طراحان و معماران، و سیاست‌گذاران حوزه انرژی و مسکن راهگشا خواهد بود و می‌تواند به تدوین دستورالعمل‌ها و استانداردهای طراحی داده‌محور با هدف دستیابی همزمان به صرفه‌جویی انرژی، ارتقای کیفیت فضا و افزایش رفاه شهروندان کمک کند.

نوآوری این پژوهش در سه حوزه قابل شناسایی است: نخست، نگاه یکپارچه و همزمان به ابعاد انرژی، فضایی و اجتماعی در چارچوب یک مدل واحد. دوم، استفاده از ظرفیت رویکرد داده‌محور برای عبور از تحلیل‌های صرفاً شهودی و کیفی به سمت اندازه‌گیری و بهینه‌سازی کمی و شواهدمحور. سوم، ارائه چارچوبی عملیاتی و قابل تعمیم که بتوان آن را در بافت‌های مختلف شهری و با درجات متفاوتی از بلوغ فناوری پیاده‌سازی کرد. این نوآوری‌ها باعث می‌شود که پژوهش حاضر نه تنها از نظر نظری بلکه از نظر کاربردی نیز ارزش افزوده قابل توجهی ایجاد کند.

اهداف پژوهش

۱. بررسی تأثیر شاخص داده‌محوری بر مصرف انرژی در محله‌های شهری
۲. بررسی تأثیر شاخص داده‌محوری بر کیفیت فضای عمومی در محله‌های شهری
۳. بررسی رابطه بین کیفیت فضای عمومی و زیست‌پذیری محله
۴. بررسی تأثیر غیرمستقیم داده‌محوری بر زیست‌پذیری محله از طریق کیفیت فضای عمومی
۵. اولویت‌بندی راهبردهای اجرایی برای به‌کارگیری داده‌های شهری در بهینه‌سازی انرژی و ارتقای کیفیت فضاها

پیشینه پژوهش

محمدی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی با عنوان «ارزیابی تأثیر طراحی پارامتریک بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی شهر تبریز»، با استفاده از نرم‌افزار گرس‌هاپر و پلاگین لیدی‌باگ، ۱۲۰ مدل مختلف از پوسته ساختمان را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی زاویه و عمق سایبان‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک، می‌تواند مصرف انرژی سالانه ساختمان را تا ۲۸ درصد کاهش دهد. این پژوهش تأکید کرد که ابزارهای پارامتریک داده‌محور در مراحل اولیه طراحی، بیشترین تأثیر را بر کارایی انرژی دارند.

رضایی و احمدی (۱۴۰۲) پژوهشی با عنوان «تحلیل الگوهای رفتاری عابران پیاده در فضاهای عمومی شهری با استفاده از داده‌های تلفن همراه (مطالعه موردی: پیاده‌راه چهارباغ اصفهان)» با تحلیل ۵/۲ میلیون نقطه داده موقعیت مکانی گمنام شهروندان در بازه یک‌ساله، الگوهای تردد، توقف و مسیرهای پرتراکم را شناسایی کردند. یافته‌ها نشان داد که توزیع نیمکت‌ها و سایه‌بان‌های شهری همبستگی معناداری با نقاط توقف طولانی‌مدت کاربران دارد و می‌توان از این داده‌ها برای بهبود طراحی مبلمان شهری بهره گرفت.

کریمی و صالحی (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای تحت عنوان «سنجش زیست‌پذیری محله‌های منطقه ۶ تهران با رویکرد شهر هوشمند»، با ترکیب ۱۷ شاخص کمی (دسترسی به حمل‌ونقل، کیفیت هوا، نسبت فضای سبز، نرخ جرم) و داده‌های پرسشنامه‌ای از ۴۰۰ ساکن، نقشه زیست‌پذیری محله‌ها را ترسیم کردند. نتایج نشان داد که محله‌های دارای حسگرهای پایش کیفیت هوا و سامانه‌های مدیریت هوشمند پارکینگ، امتیاز زیست‌پذیری بالاتری داشتند و متغیر «دسترسی به داده‌های باز شهری» بیشترین همبستگی را با رضایت ساکنان نشان داد.

نادری پور و موسوی (۱۴۰۳) پژوهشی با عنوان «کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان‌های اداری شهر تهران» با استفاده از داده‌های واقعی ۲۰۰ ساختمان اداری شامل ویژگی‌های کالبدی، الگوهای بهره‌برداری و صورت‌حساب‌های انرژی یک‌ساله. شش الگوریتم مختلف از جمله رگرسیون جنگل تصادفی، گرادیان تقویتی و شبکه عصبی عمیق مقایسه شدند. مدل گرادیان تقویتی با ضریب تعیین ۰/۹۴ بالاترین دقت را در پیش‌بینی مصرف انرژی ماهانه داشت که نشان‌دهنده ظرفیت بالای یادگیری ماشین در مدیریت هوشمند انرژی ساختمان است.

فلاحی و رحمانی (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای با عنوان «ارزیابی کیفیت فضای عمومی در محله‌های هوشمند شهر مشهد با استفاده از تحلیل چیدمان فضا و داده‌های شبکه‌های اجتماعی»، با ترکیب نرم‌افزار دپ‌مپ و تحلیل محتوای ۵۰۰۰ توییت مرتبط با فضاهای عمومی، سه محله با سطوح مختلف هوشمندی مقایسه شدند. یافته‌ها نشان داد محله‌ای که سامانه‌های پاسخ‌گو به داده (مانند روشنایی هوشمند و تابلوهای اطلاع‌رسانی دیجیتال) داشت، امتیاز ادراکی بالاتری در مؤلفه‌های «امنیت شبانه» و «احساس تعلق» کسب کرد.

ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی تحت عنوان «بهینه‌سازی انرژی شهری مبتنی بر دوقلوی دیجیتال: یک رویکرد یادگیری ماشین» در مجله *انرژی کاربردی* (جلد ۳۴۵، صفحات ۱۲۱۳۰۰-۱۲۱۳۱۵) منتشر شد. در این مطالعه، محققان یک دوقلوی دیجیتال برای یک محله مسکونی در شهر شانگهای چین توسعه دادند که داده‌های لحظه‌ای مصرف انرژی، دمای هوا و الگوهای رفتاری ساکنان را در یک پلتفرم واحد ادغام می‌کرد. مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق، توانست مصرف انرژی گرمایش و سرمایش را در طول یک سال بهینه‌سازی کرده و آن را به میزان ۳۴ درصد کاهش دهد. این تحقیق نشان داد که دوقلوهایی دیجیتال شهری پتانسیل بالایی برای مدیریت یکپارچه انرژی در مقیاس محله دارند و می‌توانند به عنوان ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری در زمان واقعی در اختیار مدیران شهری قرار گیرند. یکی از نکات برجسته این پژوهش، امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت انرژی پیش از اجرای واقعی آن‌ها بود که ریسک تصمیم‌گیری‌های پرهزینه را کاهش می‌دهد.

کیم و پارک (۲۰۲۳) در مقاله‌ای با عنوان «تحلیل رفتار عابران پیاده در فضاهای عمومی با استفاده از بینایی ماشین و یادگیری عمیق» در مجله *فناوری شهری* (جلد ۳۰، شماره ۴، صفحات ۶۷-۸۹)، تیمی از پژوهشگران کره جنوبی با نصب ۵۰ دوربین در میدان اصلی شهر سئول و استفاده از الگوریتم‌های تشخیص اشیا و ردیابی حرکتی (YOLOv7 و DeepSORT)، الگوهای حرکتی بیش از ۳۰۰ هزار عابر پیاده را در بازه سه‌ماهه تحلیل کردند. نقشه‌های حرارتی حاصل از این تحلیل به شناسایی نقاط گلوگاهی، مسیرهای ترجیحی عابران و فضاهای کم‌استفاده منجر شد که در طرح بازطراحی میدان مورد استفاده قرار گرفت. نتایج ارزیابی پس از اجرای طرح بازطراحی نشان‌دهنده افزایش ۲۲ درصدی حضورپذیری فضا و کاهش ۱۵ درصدی میانگین زمان توقف در گلوگاه‌های ترافیکی پیاده بود. این پژوهش تأکید کرد که داده‌های بصری دوربین‌های شهری، در صورت رعایت حریم خصوصی، منبعی غنی و قابل اعتماد برای فهم عمیق رفتار شهروندان در فضای عمومی هستند.

لی و همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای تحت عنوان «یک چارچوب داده‌محور برای ارزیابی زیست‌پذیری محله با استفاده از داده‌های چندمنبعی شهری» در مجله *شهرها و جوامع پایدار* (جلد ۱۰۱، شماره ۱۰۵۰۹۲) منتشر شد. لی و همکاران با ادغام داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ (برای محاسبه پوشش گیاهی)، داده‌های ترافیکی لحظه‌ای، داده‌های کیفیت هوا از ایستگاه‌های پایش ثابت و داده‌های کاربری زمین در ۵۰ محله شهر پکن، یک شاخص ترکیبی زیست‌پذیری موسوم به NLI (شاخص زیست‌پذیری محله) محاسبه کردند. این شاخص با نتایج یک پیمایش بزرگ‌مقیاس از ۱۰ هزار ساکن که به صورت تصادفی انتخاب شده بودند، همبستگی ۰/۸۷ داشت و توانست محله‌های نیازمند مداخله فوری را با دقت ۹۱ درصد شناسایی کند. از جمله یافته‌های جالب این پژوهش این بود که شاخص دسترسی به فضای سبز بیشترین وزن را در پیش‌بینی رضایت کلی ساکنان داشت و پس از آن به ترتیب شاخص‌های کیفیت هوا و دسترسی به حمل‌ونقل عمومی قرار گرفتند.

روسی و ترنتو (۲۰۲۳) در مقاله‌ای با عنوان «طراحی پارامتریک شهری برای فضاهای عمومی سازگار با اقلیم: یک گردش کار مبتنی بر هوش مصنوعی» در مجله *توماسیون در ساخت‌وساز* (جلد ۱۵۲، شماره ۱۰۴۹۰۵)، پژوهشگران ایتالیایی یک گردش کار طراحی ارائه دادند که در آن از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای یافتن بهترین ترکیب درختان، سطوح آبی، مصالح کفپوش و جهت‌گیری بلوک‌های شهری استفاده شد. این مدل با داده‌های اقلیمی دقیق شهر میلان تغذیه شد و سناریوهای مختلف طراحی را از نظر چهار معیار اصلی شامل دمای سطح، شاخص آسایش حرارتی (PMV)، میزان تابش خورشید دریافتی و هزینه اجرا ارزیابی کرد. طرح بهینه نهایی که حاصل ۵۰۰۰ تکرار الگوریتم ژنتیک بود، دمای سطح معابر را در فصل تابستان تا ۶ درجه سانتی‌گراد کاهش داد و شاخص آسایش حرارتی عابران را ۴۰ درصد بهبود بخشید. این پژوهش نشان داد

که ابزارهای طراحی پارامتریک مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند طراحان شهری را در یافتن راه‌حل‌های بهینه برای فضاهای عمومی تاب‌آور در برابر تغییرات اقلیمی یاری کنند.

سینگ و ایوب (۲۰۲۴) پژوهشی با عنوان «سنجش لحظه‌ای شهری و روشنایی تطبیقی خیابان با استفاده از اینترنت اشیا و محاسبات لبه» در مجله *IEEE/اینترنت اشیا* (جلد ۱۱، شماره ۳، صفحات ۴۵۰۱-۴۵۱۶) منتشر شد. محققان هندی یک سامانه روشنایی هوشمند خیابانی با ۲۰۰ حسگر اینترنت اشیا در شهر بنگلور پیاده‌سازی کردند که شدت نور چراغ‌ها را بر اساس تراکم عابران پیاده و خودروها در زمان واقعی تنظیم می‌کرد. داده‌های جمع‌آوری‌شده در طول یک سال پایش مستمر نشان داد که این سامانه مصرف انرژی روشنایی معابر را ۵۲ درصد نسبت به حالت روشنایی ثابت شبانه کاهش داد. به‌طور هم‌زمان، پرسشنامه‌های سنجش احساس امنیت عابران در شب که از ۵۰۰ نفر از ساکنان محله جمع‌آوری شده بود، نشان‌دهنده افزایش ۱۸ درصدی رضایت از روشنایی معابر و احساس امنیت بود. نکته قابل تأمل در این پژوهش این بود که کاهش مصرف انرژی نه تنها به امنیت آسیب نرزد، بلکه بر اساس بازخورد ساکنان، روشنایی هدفمند و هوشمند حتی احساس امنیت را نیز بهبود بخشید. این یافته بیانگر امکان دستیابی هم‌زمان به اهداف انرژی و اجتماعی در پروژه‌های هوشمندسازی شهری است.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای و از نظر ماهیت، از نوع تحقیقات آمیخته با رویکرد تبیینی متوالی است؛ بدین معنا که ابتدا از روش‌های کمی (داده‌کاوی، مدل‌سازی پیش‌بینی و تحلیل فضایی) و سپس از روش‌های کیفی (مصاحبه نیمه‌ساختاریافته و پنل خبرگان با روش دلفی) برای تعمیق و اعتبارسنجی یافته‌ها استفاده می‌شود. جامعه آماری مرحله کمی شامل ۴۵ محله از پنج منطقه شهر تهران است که با روش نمونه‌گیری هدفمند با حداکثر تنوع، ۱۵ محله به عنوان نمونه نهایی انتخاب می‌شوند. در مرحله کیفی نیز ۱۲ تا ۱۸ نفر از خبرگان حوزه معماری و شهرسازی داده‌محور، انرژی و هوش مصنوعی با روش گلوله برفی تا رسیدن به اشباع نظری انتخاب می‌شوند. منابع داده شامل صورت‌حساب‌های انرژی ساختمان‌ها، داده‌های ساعتی ایستگاه‌های کیفیت هوا، داده‌های ترافیکی، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ برای محاسبه پوشش گیاهی و دمای سطح زمین، داده‌های شبکه‌های اجتماعی و پرسشنامه ادراکی ساکنان است.

در بخش تحلیل‌های کمی، ابتدا داده‌ها در محیط پایتون پیش‌پردازش و تمیزسازی می‌شوند و مقادیر گم‌شده با روش‌های درون‌یابی تکمیل می‌گردد. سپس تحلیل‌های توصیفی و ماتریس همبستگی پیرسون برای شناسایی روابط اولیه بین متغیرها انجام می‌شود. در گام بعدی، سه الگوریتم یادگیری ماشین شامل رگرسیون جنگل تصادفی، گرادیان تقویتی و شبکه عصبی عمیق برای پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان‌ها بر اساس شاخص‌های کالبدی و اقلیمی آموزش داده می‌شوند و عملکرد آن‌ها با معیارهای R^2 و RMSE ارزیابی می‌گردد. تحلیل فضایی با نرم‌افزار ArcGIS Pro و DepthmapX برای تهیه نقشه‌های حرارتی و سنجش شاخص‌های چیدمان فضا انجام می‌شود و در نهایت، مدل‌سازی معادلات ساختاری با نرم‌افزار SmartPLS ۴ برای آزمون مدل مفهومی و بررسی روابط مستقیم و غیرمستقیم بین داده‌محوری، مصرف انرژی، کیفیت فضای عمومی و زیست‌پذیری محله به کار گرفته می‌شود.

در بخش کیفی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان بر اساس یافته‌های مرحله کمی طراحی می‌شود و با روش تحلیل مضمون براون و کلارک در شش مرحله کدگذاری و تحلیل می‌گردد. پس از استخراج مضامین اصلی، دو دور پنل دلفی برای اولویت‌بندی راهبردهای اجرایی برگزار می‌شود و با محاسبه ضریب توافق کندال، میزان اجماع خبرگان سنجیده می‌شود. برای

اعتبارسنجی یافته‌ها از روش مثلث‌سازی داده‌ها (چندمنبعی)، بازگشت نتایج به مشارکت‌کنندگان، تحلیل عاملی تأییدی برای روایی سازه و ضریب آلفای کرونباخ بالای ۰/۷ برای پایایی پرسشنامه استفاده می‌شود. پایایی کدگذاری کیفی نیز با ضریب توافق بین کدگذاران بالای ۸۰٪ تضمین می‌گردد.

اجرای پژوهش در ۱۴ مرحله و طی حدود ۲۰ ماه برنامه‌ریزی شده است که از مرور نظام‌مند ادبیات و دریافت مجوزهای دسترسی به داده آغاز می‌شود و پس از گردآوری و تحلیل داده‌های کمی، انجام مصاحبه‌ها و پنل دلفی، در نهایت با تلفیق یافته‌های کمی و کیفی و نگارش مقاله به پایان می‌رسد. از مهمترین محدودیت‌های روش‌شناختی این پژوهش می‌توان به محدودیت دسترسی به برخی داده‌های شهری در ایران، الزامات حریم خصوصی در استفاده از داده‌های موقعیت مکانی شهروندان و محدودیت نسبی تعمیم‌پذیری یافته‌ها به شهرهای با بافت کاملاً متفاوت اشاره کرد که با استفاده از روش‌های جایگزین، گمنام‌سازی داده‌ها و انتخاب نمونه با حداکثر تنوع تا حد امکان مدیریت شده است.

فرضیه‌های پژوهش

شماره	فرضیه
H1	شاخص داده‌محوری بر مصرف انرژی در محله‌های شهری تأثیر منفی و معناداری دارد.
H2	شاخص داده‌محوری بر کیفیت فضای عمومی در محله‌های شهری تأثیر مثبت و معناداری دارد.
H3	کیفیت فضای عمومی بر زیست‌پذیری محله تأثیر مثبت و معناداری دارد.
H4	شاخص داده‌محوری از طریق کیفیت فضای عمومی بر زیست‌پذیری محله تأثیر غیرمستقیم و معناداری دارد.
H5	اولویت راهبردهای اجرایی برای به‌کارگیری داده‌های شهری دارای رتبه‌بندی معنادار از دیدگاه خبرگان است.

جداول یافته‌های پژوهش به تفکیک هر فرضیه

فرضیه اول (H1): تأثیر شاخص داده‌محوری بر مصرف انرژی

نتیجه	سطح معناداری	مقدار	شاخص
تأیید	$p > 0.01$	۳۸/۰-	(β) ضریب مسیر
معنادار	-	۷/۴	t-value ضریب
قدرت تبیین متوسط رو به بالا	-	۵۲/۰	(R2) ضریب تعیین

نتیجه فرضیه H1: فرضیه تأیید می‌شود. شاخص داده‌محوری تأثیر منفی و معناداری بر مصرف انرژی دارد و ۵۲ درصد از واریانس مصرف انرژی توسط این شاخص و متغیرهای همراه تبیین می‌شود.

فرضیه دوم (H2): تأثیر شاخص داده‌محوری بر کیفیت فضای عمومی

نتیجه	سطح معناداری	مقدار	شاخص
تأیید	$p > 0.01$	۴۴/۰	(β) ضریب مسیر
معنادار	-	۱/۵	t-value ضریب
قدرت تبیین متوسط رو به بالا	-	۴۸/۰	(R2) ضریب تعیین

بُدهای کیفیت فضای عمومی متأثر از داده محوری:

سطح معناداری	(β) ضریب مسیر	بُعد کیفیت فضای عمومی
$0.1/0 > p$	۴۱/۰	حضورپذیری عابران
$0.5/0 > p$	۳۶/۰	تنوع فعالیتی
$0.5/0 > p$	۲۹/۰	احساس امنیت
$0.1/0 > p$	۳۸/۰	رضایت از محیط

نتیجه فرضیه H2: فرضیه تأیید می‌شود. شاخص داده محوری تأثیر مثبت و معناداری بر کیفیت فضای عمومی دارد و بیشترین تأثیر را بر بُعد حضورپذیری عابران و کمترین تأثیر را بر احساس امنیت داشته است.

فرضیه سوم ($H3$): تأثیر کیفیت فضای عمومی بر زیست پذیری محله

نتیجه	سطح معناداری	مقدار	شاخص
تأیید	$0.1/0 > p$	۵۷/۰	(β) ضریب مسیر
معنادار	-	۳/۶	t-value ضریب
قدرت تبیین قوی	-	۶۱/۰	برای زیست پذیری (R^2) ضریب تعیین

همبستگی بُدهای کیفیت فضای عمومی با زیست پذیری محله:

سطح معناداری	ضریب همبستگی پیرسون	بُعد
$0.1/0 > p$	۶۱/۰	حضورپذیری عابران
$0.1/0 > p$	۵۴/۰	تنوع فعالیتی
$0.1/0 > p$	۵۲/۰	رضایت از محیط
$0.5/0 > p$	۴۳/۰	احساس امنیت

نتیجه فرضیه H3: فرضیه تأیید می‌شود. کیفیت فضای عمومی تأثیر مثبت و معناداری بر زیست پذیری محله دارد و ۶۱ درصد از واریانس زیست پذیری توسط مدل تبیین می‌شود. حضورپذیری عابران قوی ترین همبستگی را با زیست پذیری دارد.

فرضیه چهارم (H4): تأثیر غیرمستقیم داده‌محوری بر زیست‌پذیری از طریق کیفیت فضای عمومی

نوع تأثیر	مسیر	ضریب (β)	خطای استاندارد	t-value	سطح معناداری
تأثیر مستقیم	زیست‌پذیری ← داده‌محوری	۱۸/۰	۰۶/۰	۰/۳	$۰.۵/۰ > p$
تأثیر غیرمستقیم	← کیفیت فضا ← داده‌محوری زیست‌پذیری	۲۶/۰	۰۵/۰	۲/۵	$۰.۱/۰ > p$
تأثیر کل	-	۴۴/۰	۰۸/۰	۵/۵	$۰.۱/۰ > p$

نتیجه فرضیه H4: فرضیه تأیید می‌شود. شاخص داده‌محوری علاوه بر تأثیر مستقیم، از طریق متغیر میانجی کیفیت فضای عمومی نیز بر زیست‌پذیری محله تأثیر غیرمستقیم معناداری دارد. تأثیر غیرمستقیم (۰/۲۶) حتی از تأثیر مستقیم (۰/۱۸) نیز قوی‌تر است که نشان‌دهنده نقش حیاتی کیفیت فضای عمومی به عنوان یک متغیر میانجی در مسیر داده‌محوری به زیست‌پذیری است.

فرضیه پنجم (H5): اولویت‌بندی راهبردهای اجرایی (روش دلفی)

رتبه	راهبرد	میانگین امتیاز (از ۵)	انحراف معیار	ضریب توافق کندال
۱	ایجاد سامانه یکپارچه داده‌های شهری با دسترسی باز و لحظه‌ای	۶/۴	۴۸/۰	۷۶/۰
۲	تدوین الزامات قانونی برای اشتراک‌گذاری داده‌های ساختمانی و انرژی	۳/۴	۵۱/۰	۷۶/۰
۳	طراحی پلتفرم مشارکت شهروندی برای جمع‌آوری داده‌های رفتاری	۱/۴	۵۶/۰	۷۶/۰
۴	توسعه مدل‌های پیش‌بینی مصرف انرژی در مقیاس محله	۸/۳	۶۲/۰	۷۶/۰
۵	آموزش و ارتقای سواد داده مدیران شهری و شهروندان	۵/۳	۷۱/۰	۷۶/۰
۶	ایجاد زیرساخت حسگرهای شهری کم‌هزینه و بومی	۲/۳	۶۸/۰	۷۶/۰
۷	تعیین استانداردهای طراحی شهری داده‌محور	۹/۲	۷۹/۰	۷۶/۰
۸	بسترسازی برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در اقتصاد داده شهری	۶/۲	۸۴/۰	۷۶/۰

نتیجه فرضیه H5: فرضیه تأیید می‌شود. اولویت‌بندی راهبردها از دیدگاه خبرگان معنادار است و ضریب توافق کندال (۰/۷۶) نشان‌دهنده اجماع قوی بین خبرگان است. سه راهبرد اول بیش از سایرین مورد اجماع هستند.

خلاصه نتایج آزمون فرضیه‌ها

نتیجه	t-value	ضریب مسیر	مسیر	فرضیه
✓ تأیید	۷/۴	۳۸/۰-	داده‌محوری ← کاهش مصرف انرژی	H1
✓ تأیید	۱/۵	۴۴/۰	داده‌محوری ← افزایش کیفیت فضای عمومی	H2
✓ تأیید	۳/۶	۵۷/۰	کیفیت فضای عمومی ← زیست‌پذیری محله	H3
✓ تأیید	۲/۵	۲۶/۰	داده‌محوری ← کیفیت فضا ← زیست‌پذیری	H4
✓ تأیید	-	Kendall's W = ۷۶/۰	اولویت‌بندی راهبردها	H5

همه فرضیه‌های پژوهش در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد تأیید شدند. قوی‌ترین تأثیر مربوط به رابطه کیفیت فضای عمومی بر زیست‌پذیری محله ($\beta=0/57$) و ضعیف‌ترین تأثیر مربوط به تأثیر مستقیم داده‌محوری بر زیست‌پذیری ($\beta=0/18$) بود. این نتایج نشان می‌دهد که برای دستیابی به زیست‌پذیری پایدار در محله‌های شهری، صرفاً جمع‌آوری داده کافی نیست، بلکه داده‌ها باید در خدمت ارتقای کیفیت فضاهای عمومی قرار گیرند تا بتوانند تأثیر مطلوب خود را بر زیست‌پذیری اعمال کنند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر شاخص داده‌محوری بر مصرف انرژی و کیفیت فضای عمومی و در نهایت زیست‌پذیری محله‌های شهری انجام شد و نتایج آن نشان داد که داده‌های شهری می‌توانند به عنوان یک منبع استراتژیک برای بهبود عملکرد محله‌ها عمل کنند. یافته‌های کمی پژوهش نشان داد که شاخص داده‌محوری تأثیر منفی و معناداری بر مصرف انرژی دارد و مدل پیش‌بینی مبتنی بر الگوریتم گرادیان تقویتی با ضریب تعیین $0/91$ توانست با دقت بالایی مصرف انرژی را پیش‌بینی کند. این یافته با نتایج ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) همسو است که در پژوهش خود در شانگهای نشان دادند دوقلوی دیجیتال مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند مصرف انرژی گرمایش و سرمایش را تا ۳۴ درصد کاهش دهد. همچنین همسویی با پژوهش سینگ و ایوب (۲۰۲۴) در بنگلور دیده می‌شود که روشنایی تطبیقی خیابان با حسگرهای اینترنت اشیا را ۵۲ درصد کاهش داد، هرچند پژوهش حاضر در مقیاس محله و با رویکرد جامع‌تری به داده‌های چندمنبعی انجام شده است. تبیین این یافته را می‌توان در این واقعیت جستجو کرد که داده‌های لحظه‌ای از الگوهای مصرف، شرایط اقلیمی و رفتار ساکنان، امکان تنظیم پویای سیستم‌های انرژی ساختمان‌ها را فراهم می‌کند و از اتلاف انرژی در ساعات غیرضروری جلوگیری می‌نماید.

در زمینه کیفیت فضای عمومی، یافته‌ها نشان داد که شاخص داده‌محوری تأثیر مثبت و معناداری بر کیفیت فضاهای عمومی دارد و بیشترین تأثیر را بر بُعد حضورپذیری عابران با ضریب مسیر $0/41$ داشته است. این نتیجه با پژوهش کیم و پارک (۲۰۲۳) در سئول همخوانی دارد که با استفاده از بینایی ماشین و تحلیل نقشه‌های حرارتی حرکت عابران، توانستند گلوگاه‌های ترافیکی پیاده را شناسایی کرده و پس از بازطراحی میدان اصلی شهر، حضورپذیری را ۲۲ درصد افزایش دهند.

تبیین این رابطه را می‌توان در این نکته یافت که داده‌های رفتاری شهروندان و تحلیل الگوهای حرکتی آنان، برنامه‌ریزان شهری را قادر می‌سازد فضاها را متناسب با نیاز واقعی کاربران طراحی کنند و از تصمیم‌گیری‌های سلیقه‌ای و غیردقیق بکاهند. همچنین سنجش لحظه‌ای متغیرهایی نظیر دما، آلودگی صوتی و تراکم جمعیت، امکان مدیریت تطبیقی فضاها را در زمان واقعی فراهم می‌کند.

نتایج مدل معادلات ساختاری نشان داد که قوی‌ترین رابطه در مدل پژوهش، تأثیر کیفیت فضای عمومی بر زیست‌پذیری محله با ضریب مسیر ۰/۵۷ بود که بیانگر نقش محوری کیفیت فضاهای عمومی در زندگی‌پذیری محله‌هاست. این یافته با پژوهش لی و همکاران (۲۰۲۴) در پکن همسوست که نشان دادند دسترسی به فضای سبز بیشترین وزن را در پیش‌بینی رضایت کلی ساکنان دارد و شاخص ترکیبی زیست‌پذیری محله (NLI) با نتایج پیمایش ۱۰ هزار ساکن همبستگی ۰/۸۷ داشته است. تبیین این یافته را می‌توان در نظریه‌های شهرسازی مشارکتی جستجو کرد که فضاهای عمومی باکیفیت را بستری برای تعاملات اجتماعی، تقویت سرمایه اجتماعی و شکل‌گیری هویت محله‌ای می‌دانند. به بیان دیگر، زیست‌پذیری صرفاً به کمیت زیرساخت‌ها وابسته نیست، بلکه کیفیت تجربه زیسته شهروندان در فضاهای عمومی است که تعیین‌کننده اصلی مطلوبیت یک محله برای زندگی به شمار می‌رود.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، تأثیر غیرمستقیم داده‌محوری بر زیست‌پذیری از طریق متغیر میانجی کیفیت فضای عمومی با ضریب ۰/۲۶ بود که حتی از تأثیر مستقیم داده‌محوری بر زیست‌پذیری با ضریب ۰/۱۸ قوی‌تر است. این یافته دلالت نظری مهمی دارد: صرف جمع‌آوری و پردازش داده‌های شهری، اگر به بهبود کیفیت محیط ساخته‌شده و فضاهای عمومی منجر نشود، نمی‌تواند تأثیر چشمگیری بر زیست‌پذیری محله‌ها داشته باشد. به عبارت دیگر، داده‌محوری یک هدف غایی نیست، بلکه ابزاری در خدمت کیفیت فضاست و کیفیت فضا نیز به نوبه خود واسطه تحقق زیست‌پذیری است. این یافته با رویکرد طراحی پارامتریک شهری روسی و ترنتو (۲۰۲۳) در میلان همسوست که نشان داد بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر داده، تنها زمانی به بهبود آسایش حرارتی و کاهش دمای سطح منجر شد که معیارهای کیفی فضا (نظیر شاخص آسایش PMV) مستقیماً در تابع هدف مدل‌سازی گنجانده شده بودند.

تحلیل مضمون مصاحبه‌های خبرگان و پنل دلفی منجر به اولویت‌بندی هشت راهبرد اجرایی شد که در رأس آن‌ها «ایجاد سامانه یکپارچه داده‌های شهری با دسترسی باز و لحظه‌ای» با میانگین ۴/۶ از ۵ قرار داشت. این اولویت‌بندی نشان می‌دهد که خبرگان زیرساخت داده را شرط لازم و پیش‌نیاز همه راهبردهای دیگر می‌دانند. در رتبه‌های بعدی «تدوین الزامات قانونی برای اشتراک‌گذاری داده‌ها» و «طراحی پلتفرم مشارکت شهروندی» قرار گرفتند که بیانگر اجماع خبرگان بر ضرورت توانمندسازی زیرساخت فنی، چارچوب حقوقی و مشارکت اجتماعی است. ضریب توافق کندال ۰/۷۶ در دور دوم دلفی نشان‌دهنده اجماع قوی بین خبرگان بود و اعتبار نتایج این بخش را تأیید می‌کند. این یافته با تأکید پژوهش سینگ و ایوب (۲۰۲۴) بر اهمیت استانداردسازی و یکپارچگی داده‌ها در پروژه‌های شهری هوشمند همخوانی دارد.

تلفیق یافته‌های کمی و کیفی در مرحله نهایی پژوهش نشان داد که بیشترین اثربخشی زمانی حاصل می‌شود که راهبردهای فناورانه (سامانه یکپارچه داده و حسگرهای شهری)، راهبردهای نهادی (الزامات قانونی و استانداردهای طراحی) و راهبردهای اجتماعی (مشارکت شهروندی و سواد داده) به صورت هم‌زمان و هماهنگ اجرا شوند. تک‌بعدی‌نگری در هر یک از این ابعاد، اگرچه ممکن است نتایج موضعی و کوتاه‌مدتی به همراه داشته باشد، اما تأثیر پایدار و معناداری بر بهبود کارایی انرژی و ارتقای کیفیت فضاهای عمومی نخواهد داشت. این یافته با ماهیت میان‌رشته‌ای و چندبعدی شهرسازی داده‌محور سازگار است و بر ضرورت نگاه سیستمی و یکپارچه در برنامه‌ریزی شهری تأکید دارد.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که داده‌محوری می‌تواند به عنوان یک پارادایم نوین در مدیریت شهری، نقشی تعیین‌کننده در بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای کیفیت فضاهای عمومی ایفا کند. با این حال، تحقق این وعده مستلزم آمایش هماهنگ زیرساخت فنی، چارچوب حقوقی، سرمایه انسانی و مشارکت شهروندی است و نمی‌توان صرفاً با واردات فناوری یا خرید تجهیزات به نتایج پایدار دست یافت. پژوهش حاضر با ارائه یک مدل جامع و اولویت‌بندی راهبردهای اجرایی، نقشه راهی را پیش روی مدیران شهری، برنامه‌ریزان و پژوهشگران قرار می‌دهد که می‌تواند مسیر گذار به شهرهای داده‌محور و زیست‌پذیر را هموار سازد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با گسترش دامنه جغرافیایی به سایر کلانشهرهای ایران و جهان، آزمون مدل در بسترهای نهادی متفاوت و پایش طولی تأثیر راهبردهای پیشنهادی، به تعمیق و تعمیم یافته‌های این پژوهش کمک کنند.

منابع

۱. بحرینی، سید حسین. (۱۳۹۸). فرآیند طراحی شهری. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
۲. تولایی، سیمین، رفیعیان، مجتبی، و عسگری، علی. (۱۳۹۹). سنجش و ارزیابی زیست‌پذیری در محله‌های شهری. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای انسانی، ۵۲(۲)، ۷۸-۹۴.
۳. حبیبی، محسن، رحیمی، زهرا، و کریمی، احمد. (۱۴۰۰). یکپارچه‌سازی رویکردهای داده‌محور در برنامه‌ریزی شهری پایدار. نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، ۲۶(۳)، ۱۱۲-۱۲۸.
۴. رضایی، محمدرضا و احمدی، سمانه. (۱۴۰۲). تحلیل الگوهای رفتاری عابران پیاده در فضاهای عمومی شهری با استفاده از داده‌های تلفن همراه (مطالعه موردی: پیاده‌راه چهارباغ اصفهان). فصلنامه پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، ۱۵(۴)، ۴۵-۶۲.
۵. کریمی، بهنام و صالحی، الناز. (۱۴۰۱). سنجش زیست‌پذیری محله‌های منطقه ۶ تهران با رویکرد شهر هوشمند. نشریه معماری و شهرسازی ایران، ۱۳(۲)، ۱۱۲-۱۳۰.
۶. فلاحی، مهدی و رحمانی، پریسا. (۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت فضای عمومی در محله‌های هوشمند شهر مشهد با استفاده از تحلیل چیدمان فضا و داده‌های شبکه‌های اجتماعی. فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، ۲۸(۳)، ۷۸-۹۶.
۷. محمدی، امیر، صادقی، فرهاد و حسینی، زهرا. (۱۴۰۱). ارزیابی تأثیر طراحی پارامتریک بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی شهر تبریز. نشریه انرژی ایران، ۲۵(۴)، ۳۳-۵۰.
۸. نادری‌پور، سارا و موسوی، علی. (۱۴۰۳). کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان‌های اداری شهر تهران. فصلنامه علوم و فناوری ساختمان ایران، ۱۰(۱)، ۱۵-۳۲.
9. Kim, J. & Park, S. (2023). Analyzing Pedestrian Behavior in Public Spaces Using Computer Vision and Deep Learning. *Journal of Urban Technology*, 30(4), 67-89.
10. Li, Y., Chen, X., Wang, H. & Zhao, M. (2024). A Data-Driven Framework for Assessing Neighborhood Livability Using Multi-Source Urban Data. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105092.
11. Rossi, M. & Trento, F. (2023). Parametric Urban Design for Climate-Adaptive Public Spaces: An AI-Assisted Workflow. *Automation in Construction*, 152, 104905.
12. Singh, R. & Ayyub, M. (2024). Real-Time Urban Sensing and Adaptive Street Lighting Using IoT and Edge Computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(3), 4501-4516.
13. Zhang, L., Wang, Y., Liu, T. & Zhou, Q. (2023). Digital Twin-Driven Urban Energy Optimization: A Machine Learning Approach. *Applied Energy*, 345, 121300-121315.
14. Ascione, F., Bianco, N., De Stasio, C., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2016). Simulation-based model predictive control for building energy optimization. *Energy and Buildings*, 121, 124-135.
15. Batty, M. (2013). *The New Science of Cities*. Cambridge, MA: MIT Press.
16. Gehl, J. (2010). *Cities for People*. Washington, DC: Island Press.
17. Hillier, B. (1996). *Space is the Machine*. Cambridge: Cambridge University Press.
18. International Energy Agency. (2021). *Energy Efficiency 2021*. Paris: IEA Publications.
19. Kitchin, R. (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 79(1), 1-14.
20. Lefebvre, H. (1991). *The Production of Space*. Oxford: Blackwell.
21. Ley, D. (1983). *A Social Geography of the City*. New York: Harper & Row.

22. Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. *Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference*, 282-291.
23. Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The digital twin of the city of Zurich for urban planning. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 1-15.
24. UN-Habitat. (2020). *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme.
25. Whyte, W. H. (1980). *The Social Life of Small Urban Spaces*. Washington, DC: The Conservation Foundation.