

Convergence of Generative Artificial Intelligence and the Internet of Things in Smart City Development: Architecture, Challenges, and Applications

Samaneh Simaee

Technical and Support Expert, Information and
Communication Technology Organization,
Shiraz Municipality, Shiraz, Iran.

Ali Motevassel *

Deputy for Technical Affairs and Support,
Information and Communication Technology
Organization, Shiraz Municipality, Shiraz, Iran.

Abstract

Smart cities, as the next generation of urban ecosystems, have undergone a significant transformation in the management and utilization of urban resources through the integration of advanced Generative Artificial Intelligence (GenAI) and the Internet of Things (IoT). The convergence of these two technologies enables real-time data collection, advanced analytics, and the provision of intelligent solutions in areas such as traffic management, energy consumption, security, and citizen well-being. This paper examines a proposed architecture for the integration of GenAI and IoT in smart cities, exploring its practical applications as well as the challenges ahead. Findings indicate that this convergence can contribute to sustainable development and improved quality of urban life, although barriers such as data privacy preservation, technical complexities, and high infrastructure costs remain. Furthermore, analysis of case studies and a systematic review of recent research highlight the need for standardized frameworks, system interoperability, and the adoption of reliable generative models for successful implementation. Innovations in algorithms, integration with digital twins, and the use of green and energy-efficient architectures can play a pivotal role in overcoming challenges and enhancing performance. Ultimately, the future outlook for these technologies' points toward flexible architectures, standardization, and inclusive stakeholder participation, which could transform smart cities into more sustainable, secure, and user-centric environments.

Keywords: smart city, generative artificial intelligence, internet of things, smartification

Received: 18/April/2025

Accepted: 03/September/2025

eISSN: 3060-6144

ISSN: 2980-8936

همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء در هوشمندسازی شهرها: معماری، چالش‌ها و کاربردها

کارشناس فنی و پشتیبانی سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری شیراز،
شیراز، ایران.

سمانه سیمائی

معاون فنی و پشتیبانی سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری شیراز،
شیراز، ایران.

علی متوسل *

چکیده

شهرهای هوشمند به عنوان نسل نوین اکوسیستم‌های شهری، با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء، تحول عظیمی در مدیریت و بهره‌برداری از منابع شهری ایجاد کرده‌اند. همگرایی این دو فناوری، امکان جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای، تحلیل پیشرفته و ارائه راهکارهای هوشمندانه در حوزه‌هایی مانند مدیریت ترافیک، مصرف انرژی، امنیت و رفاه شهروندان را فراهم می‌آورد. این مقاله به بررسی معماری پیشنهادی برای همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء در شهرهای هوشمند، کاربردهای عملی آن و چالش‌های پیش‌رو می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که این همگرایی می‌تواند به توسعه پایدار و افزایش کیفیت زندگی در شهرها کمک کند، هرچند موانعی نظیر حفظ حریم خصوصی، پیچیدگی‌های فنی و هزینه‌های بالای زیرساختی همچنان باقی است. افزون بر این، تحلیل مطالعات موردی و مرور سیستماتیک پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که پیاده‌سازی موفق این رویکرد نیازمند ایجاد بسترهای استاندارد، تعامل پذیری میان سامانه‌ها و به کارگیری مدل‌های مولد قابل اعتماد است. همچنین، نوآوری در الگوریتم‌ها، یکپارچه‌سازی با دوقلوهای دیجیتال و استفاده از معماری‌های سبز و کم‌مصرف می‌تواند نقشی کلیدی در کاهش چالش‌ها و افزایش کارایی ایفا کند. در نهایت، چشم‌انداز آینده توسعه این فناوری‌ها به سمت معماری‌های انعطاف‌پذیر، استانداردسازی و مشارکت فراگیر تمامی ذی‌نفعان است که می‌تواند شهرهای هوشمند را به محیط‌هایی پایدارتر، ایمن‌تر و کاربرمحورتر تبدیل نماید.

کلیدواژه‌ها: شهر هوشمند، هوش مصنوعی مولد، اینترنت اشیاء، هوشمندسازی

مقدمه

شهرهای هوشمند به عنوان نسل نوین اکوسیستم‌های شهری، با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، تحولی بنیادین در مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع شهری ایجاد کرده‌اند. اینترنت اشیاء (IoT)^۱ به عنوان یکی از ارکان اصلی این تحول، با فراهم کردن حسگرهای گسترده و قابلیت جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای، امکان نظارت دقیق و خودکار بر بخش‌های مختلف شهر را فراهم ساخته است (Mangione et al., 2025). داده‌های به دست آمده از محیط‌های شهری، پایه و اساس توسعه سیستم‌های تصمیم‌گیر هوشمند را تشکیل می‌دهد.

هوش مصنوعی مولد^۲، به عنوان فناوری پیشرفته‌ای در حوزه هوش مصنوعی، با تحلیل داده‌های حجیم و پیچیده، مدل‌های نوآورانه و پیشرفته‌ای را برای بهبود فرآیندهای شهری ارائه می‌دهد (Xu et al., 2024). قابلیت تولید محتوا، شبیه‌سازی سناریوهای متنوع و مدل‌سازی سه بعدی محیط‌های شهری، این فناوری را به ابزاری کلیدی در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های استراتژیک تبدیل کرده است. ترکیب این دو فناوری، یعنی همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء، بستری قدرتمند برای ایجاد سیستم‌های هوشمند و خودتنظیم شهری فراهم می‌کند که می‌توانند به شکل پویا و خودکار به شرایط متغیر شهری پاسخ دهند و فرآیندهایی نظیر مدیریت ترافیک، بهینه‌سازی مصرف انرژی، ارتقاء امنیت و ارائه خدمات شهری را بهبود بخشند (Gomez & Khan, 2024).

معماری پیشنهادی برای این همگرایی معمولاً شامل لایه‌هایی است که از جمع‌آوری داده توسط سنسورها و دستگاه‌های IoT آغاز می‌شود، سپس داده‌ها به سامانه‌های پردازش ابری یا لبه منتقل شده و در نهایت توسط الگوریتم‌های هوش مصنوعی مولد تحلیل و به خروجی‌های کاربردی تبدیل می‌شوند (Rossi & Fernandez, 2025 a). چنین معماری‌هایی نیازمند هماهنگی پیچیده بین لایه‌ها و استانداردسازی دقیق برای تضمین کارایی و امنیت هستند (Xu et al., 2024).

یکی از کاربردهای مهم این همگرایی، بهبود مدیریت ترافیک شهری است؛ با استفاده از داده‌های لحظه‌ای حسگرهای ترافیکی و تحلیل آن‌ها توسط مدل‌های هوش مصنوعی مولد، مسیرهای بهینه در زمان واقعی پیشنهاد می‌شود که منجر به کاهش ازدحام و آلودگی هوا می‌گردد (Mangione, 2025). در زمینه مصرف انرژی نیز، سیستم‌های هوشمند قادرند با تحلیل الگوهای مصرف و پیش‌بینی نیازها، منابع را بهینه تخصیص دهند و از اتلاف انرژی جلوگیری کنند (Kim & Brown, 2023). امنیت شهری از دیگر حوزه‌های حیاتی است که با بهره‌گیری از حسگرهای امنیتی و تحلیل هوش مصنوعی مولد، می‌توان تهدیدات را پیشگیرانه شناسایی و مدیریت کرد (Patel & Green, 2024). این فناوری‌ها امکان ایجاد سیستم‌های نظارت هوشمند با قابلیت تشخیص رفتارهای غیرعادی و تهدیدات سایبری را فراهم می‌کنند. خدمات شهری و رفاه شهروندان نیز با تحلیل داده‌های مختلف شهری، بهبود یافته است؛ از مدیریت پسماند و کنترل کیفیت هوا گرفته تا ارائه اطلاعات به موقع و هوشمند به شهروندان (Rossi & Fernandez, 2025). این امر باعث افزایش رضایت و مشارکت اجتماعی می‌شود (Thompson & Wei, 2023). با وجود مزایای فراوان، این همگرایی با چالش‌های متعددی مواجه است؛ از جمله حفظ امنیت و حریم خصوصی داده‌های حساس که نیازمند راهکارهای حفاظتی پیشرفته و چارچوب‌های قانونی محکم است (Patel & Green, 2024 b). همچنین، مقیاس‌پذیری و مدیریت حجم عظیم داده‌ها، هماهنگی سیستم‌ها و پیچیدگی‌های فنی، موانعی مهم در مسیر توسعه هستند (Mangione et al., 2025). ملاحظات اخلاقی و اجتماعی، از جمله اثرات فناوری‌های هوشمند بر بازار کار، نابرابری دیجیتال و مسائل کنترل حکومتی، باید در توسعه این سامانه‌ها به دقت مدنظر قرار گیرند (Thompson &

1. internet of things

2. generative artificial intelligence

(Wei, 2023). هزینه‌های بالای زیرساختی نیز می‌تواند مانعی برای شهرهای در حال توسعه باشد (Rossi & Fernandez, 2025 b).

علاوه بر این، توسعه مدل‌های هوش مصنوعی مولد نیازمند داده‌های با کیفیت و حجم بالا است که در مناطق مختلف جهان به صورت به صورت برابر در دسترس نیست (Patel & Green, 2024 b). آینده پژوهش‌ها به سمت توسعه معماری‌های منعطف‌تر، الگوریتم‌های پیشرفته‌تر و ارتقاء امنیت داده‌ها حرکت می‌کند (Mangione et al., 2025). توسعه استانداردهای بین‌المللی و چارچوب‌های قانونی برای مدیریت داده‌ها و حفاظت از حریم خصوصی، امری حیاتی است (Xu et al., 2024). همچنین، توجه به راهکارهای مقرون به صرفه و مقیاس پذیر برای شهرهای کوچک و متوسط، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Gomez & Khan, 2024). افزایش همکاری بین بخش‌های دولتی، خصوصی و آکادمیک می‌تواند روند توسعه و به کارگیری این فناوری‌ها را تسریع کند (Rossi & Fernandez, 2025 a). به علاوه، آموزش و آگاهی بخشی به شهروندان برای پذیرش و مشارکت در پروژه‌های هوشمندسازی ضروری است (Patel & Green, 2024 b). از منظر کاربردهای نوظهور، ادغام هوش مصنوعی مولد با اینترنت اشیاء در حوزه‌هایی مانند دوقلوهای دیجیتال شهری، امکان شبیه‌سازی دقیق تر محیط‌های شهری و بهبود فرآیندهای طراحی و برنامه‌ریزی را فراهم آورده است (Xu et al., 2024). در ضمن، توسعه چارچوب‌های امنیتی و حفظ حریم خصوصی اختصاصی برای سامانه‌های ترکیبی هوش مصنوعی مولد و IoT، گامی اساسی در تضمین اعتماد عمومی به این فناوری‌ها محسوب می‌شود (Patel & Green, 2024 a). بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق معماری‌های هوشمند و کم مصرف، زمینه‌ساز توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست محیطی شهرهای هوشمند است (Kim & Brown, 2023). چشم‌انداز فناوری‌های نوین نشان می‌دهد که آینده شهرهای هوشمند، ترکیبی از فناوری‌های هوشمند و سازگار با نیازهای انسانی، امنیت بالا و توسعه پایدار خواهد بود (S&P Global, 2024). این مقاله با هدف ارائه یک نگاه جامع و تحلیلی به همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء، ضمن معرفی معماری پیشنهادی، کاربردهای عملی و چالش‌های پیش‌رو، راهکارهایی را برای توسعه پایدار این فناوری‌ها ارائه می‌دهد.

مبانی نظری

مروری بر فناوری هوش مصنوعی مولد

هوش مصنوعی مولد یکی از شاخه‌های پیشرفته و نوین هوش مصنوعی است که در سال‌های اخیر به دلیل توانایی‌های چشمگیر خود در تولید محتوا و داده‌های جدید، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. برخلاف مدل‌های سنتی که صرفاً بر تشخیص و تحلیل داده‌ها متمرکز بودند، مدل‌های مولد قادرند داده‌های جدیدی بسازند که از نظر ساختاری و محتوایی مشابه داده‌های واقعی باشند (Xu et al., 2024). این قابلیت باعث شده است هوش مصنوعی مولد به یکی از ابزارهای کلیدی در حوزه‌های متنوع علمی و صنعتی تبدیل شود. یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های مورد استفاده در هوش مصنوعی مولد، شبکه‌های مولد تخصصی^۱ (GAN) هستند. این شبکه‌ها با دو بخش مجزا یعنی مولد و تفکیک کننده، به صورت به صورت هم‌زمان آموزش می‌بینند؛ مولد تلاش می‌کند داده‌های واقعی را شبیه‌سازی کند و تفکیک کننده سعی دارد داده‌های واقعی را از داده‌های تولید شده تشخیص دهد (Gomez & Khan, 2024). این رقابت باعث بهبود مستمر کیفیت داده‌های تولید شده می‌شود و در نتیجه مدل قادر به خلق نمونه‌های بسیار واقعی می‌گردد. علاوه بر شبکه‌های مولد تخصصی، مدل‌های ترنسفورمر مولد مانند GPT نیز در هوش مصنوعی مولد نقش مهمی دارند. این مدل‌ها با ساختار لایه‌ای و مکانیسم توجه^۲، توانسته‌اند در تولید متن‌های طبیعی، ترجمه زبان، پاسخ به

1. generative adversarial networks
2. attention

پرسش و حتی خلق محتوای خلاقانه پیشرفت‌های چشمگیری داشته باشند (Thompson & Wei, 2023). هوش مصنوعی مولد در کاربردهای شهری نیز جایگاه ویژه‌ای یافته است. این فناوری می‌تواند بر اساس داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده از شهر، سناریوهای پیش‌بینی ترافیک، مصرف انرژی، شرایط محیطی و دیگر پارامترهای شهری را شبیه‌سازی کند (Mangione et al., 2025). چنین توانایی‌ای به مدیران شهری امکان می‌دهد تصمیمات استراتژیک و به موقع‌تری اتخاذ کنند و خدمات شهری را بهبود بخشند. یکی از مزایای هوش مصنوعی مولد، توانایی آن در خلق داده‌های آموزشی مصنوعی است. در حوزه‌هایی که داده‌های واقعی محدود یا حساس هستند، تولید داده‌های مصنوعی مشابه به داده‌های واقعی، امکان توسعه و آموزش مدل‌های هوش مصنوعی را تسهیل می‌کند (Patel & Green, 2024 b). این امر به‌خصوص در زمینه امنیت شهری و حفظ حریم خصوصی اهمیت زیادی دارد. به‌علاوه، هوش مصنوعی مولد در تولید محتوای تصویری و ویدئویی کاربرد فراوانی دارد. از بازسازی تصاویر ماهواره‌ای گرفته تا شبیه‌سازی محیط‌های شهری سه‌بعدی، این فناوری امکان خلق داده‌های بصری با کیفیت بالا را فراهم می‌کند که می‌تواند در برنامه‌ریزی شهری، مدل‌سازی محیط و تحلیل‌های فضایی مورد استفاده قرار گیرد (Rossi & Fernandez, 2025 a).

در زمینه بهبود تعامل انسان و ماشین، هوش مصنوعی مولد با تولید پاسخ‌های طبیعی‌تر و هوشمندتر در سیستم‌های گفت‌وگو و دستیارهای مجازی، تجربه کاربری را ارتقاء داده است (Thompson & Wei, 2023). این قابلیت در سیستم‌های اطلاع‌رسانی شهری و خدمات شهروندی می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. فناوری هوش مصنوعی مولد، قابلیت بهینه‌سازی الگوریتم‌های پیش‌بینی را نیز دارد. با خلق سناریوهای مختلف و بررسی نتایج احتمالی، این فناوری می‌تواند به مدیریت بحران‌های شهری مانند سیل، زلزله و حوادث غیرمترقبه کمک کند و پاسخ‌های مناسبی را ارائه دهد (Xu et al., 2024). یکی دیگر از کاربردهای مهم، استفاده از هوش مصنوعی مولد در طراحی معماری و توسعه زیرساخت‌های شهری است. این فناوری با شبیه‌سازی طرح‌های مختلف و ارزیابی عملکرد آن‌ها، می‌تواند در بهینه‌سازی استفاده از فضاها و منابع نقش مؤثری داشته باشد (Gomez & Khan, 2024). هوش مصنوعی مولد در حوزه سلامت شهری نیز کاربرد دارد؛ به‌طور مثال، با تحلیل داده‌های بهداشتی و محیطی، امکان پیش‌بینی شیوع بیماری‌ها و ارائه راهکارهای پیشگیرانه وجود دارد که می‌تواند به بهبود سلامت عمومی کمک کند (Patel & Green, 2024 b). با این حال، چالش‌هایی نیز در استفاده از هوش مصنوعی مولد وجود دارد. یکی از مهم‌ترین آن‌ها، نیاز به حجم بسیار بالایی از داده‌ها برای آموزش دقیق مدل‌ها است که در برخی شهرها ممکن است فراهم نباشد یا دسترسی به داده‌ها محدود باشد (Mangione et al., 2025). موضوع دیگری که باید مدنظر قرار گیرد، مسائل اخلاقی و حقوقی مرتبط با تولید داده‌های مصنوعی و محتوای تولیدشده توسط هوش مصنوعی است. حفظ حریم خصوصی، جلوگیری از سوءاستفاده و تضمین شفافیت در استفاده از این فناوری از جمله دغدغه‌های مهم است (Thompson & Wei, 2023). علاوه بر این، هزینه‌های محاسباتی بالا و نیاز به زیرساخت‌های قدرتمند برای آموزش و اجرای مدل‌های مولد می‌تواند مانعی برای پیاده‌سازی گسترده این فناوری در برخی شهرها باشد (Rossi & Fernandez, 2025 b). با پیشرفت فناوری و توسعه الگوریتم‌های بهینه‌تر، انتظار می‌رود این چالش‌ها به تدریج کاهش یافته و کاربردهای هوش مصنوعی مولد در شهرهای هوشمند گسترش یابد (Mangione et al., 2025). درنهایت، ترکیب هوش مصنوعی مولد با سایر فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء، داده‌های بزرگ و رایانش ابری، فرصت‌های جدید و بی‌سابقه‌ای برای مدیریت هوشمند شهرها فراهم کرده است که می‌تواند کیفیت زندگی شهروندان را به شکل قابل توجهی ارتقاء دهد (Xu et al., 2024).

مروری بر اینترنت اشیاء (IoT)

اینترنت اشیاء به شبکه گسترده‌ای از دستگاه‌ها، حسگرها و اشیاء فیزیکی اطلاق می‌شود که به اینترنت متصل هستند و قادر به جمع‌آوری، ارسال و دریافت داده‌ها هستند (Mangione et al., 2025). این فناوری، زیرساخت کلیدی در توسعه شهرهای هوشمند است که امکان نظارت و مدیریت دقیق‌تر منابع و خدمات شهری را فراهم می‌آورد. با افزایش تعداد دستگاه‌های متصل، اینترنت اشیاء توانسته است در حوزه‌های متنوعی همچون حمل‌ونقل، مدیریت انرژی، امنیت و محیط‌زیست کاربردهای گسترده‌ای پیدا کند (Rossi & Fernandez, 2025 b). این شبکه‌ها به صورت‌بندی صورت خودکار و بی‌وقفه داده‌های محیطی را ثبت می‌کنند که برای تحلیل و تصمیم‌گیری‌های هوشمند ضروری هستند. ساختار معماری اینترنت اشیاء معمولاً شامل چند لایه است؛ لایه حسگرها که داده‌ها را جمع‌آوری می‌کند، لایه شبکه که انتقال داده‌ها را مدیریت می‌کند، لایه پردازش که داده‌ها را تحلیل و ذخیره می‌کند و لایه کاربرد که خدمات مختلف را ارائه می‌دهد (Xu et al., 2024). یکی از چالش‌های مهم در اینترنت اشیاء، مدیریت حجم عظیم داده‌های تولیدشده توسط میلیون‌ها دستگاه متصل است. این موضوع نیازمند راهکارهای پیشرفته ذخیره‌سازی، پردازش لبه و رایانش ابری است تا بتوان داده‌ها را به صورت‌بندی بهینه تحلیل کرد (Patel & Green, 2024 b). امنیت در اینترنت اشیاء یکی دیگر از دغدغه‌های اساسی است. اتصال گسترده دستگاه‌ها به شبکه، آن‌ها را در معرض تهدیدات سایبری قرار می‌دهد که می‌تواند منجر به نفوذ، دست‌کاری داده‌ها و اختلال در خدمات شهری شود (Mangione et al., 2025). از سوی دیگر، محدودیت‌های انرژی و توان پردازشی دستگاه‌های IoT چالش فنی دیگری است که باید با طراحی بهینه سخت‌افزار و الگوریتم‌های سبک‌وزن حل شود (Gomez & Khan, 2024). اینترنت اشیاء در شهرهای هوشمند به عنوان بستر جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای از سنسورهای محیطی، دوربین‌ها، سیستم‌های حمل‌ونقل و سایر تجهیزات، نقش حیاتی دارد (Rossi & Fernandez, 2025 b). این داده‌ها پایه و اساس سیستم‌های هوشمند مدیریت ترافیک، نظارت بر کیفیت هوا، مدیریت انرژی و امنیت شهری هستند. علاوه بر کاربردهای فنی، اینترنت اشیاء موجب افزایش مشارکت شهروندان در فرآیندهای شهری شده است. به عنوان مثال، با ارائه اطلاعات زمان واقعی درباره وضعیت ترافیک یا کیفیت هوا، شهروندان می‌توانند تصمیمات بهتری اتخاذ کنند (Thompson & Wei, 2023). توسعه استانداردها و پروتکل‌های بین‌المللی برای ارتباط و امنیت دستگاه‌های IoT، از اهمیت بالایی برخوردار است تا هماهنگی و سازگاری میان انواع مختلف تجهیزات تضمین شود (Xu et al., 2024). همچنین، مسائل حریم خصوصی به دلیل حجم زیاد داده‌های شخصی و حساس که توسط IoT جمع‌آوری می‌شود، موضوعی حیاتی است که نیازمند سیاست‌ها و چارچوب‌های قانونی شفاف است (Patel & Green, 2024). فناوری‌های نوینی مانند پردازش لبه^۱ و محاسبات مه^۲ به منظور پاسخ‌گویی سریع‌تر و کاهش بار شبکه، در کنار اینترنت اشیاء مورد استفاده قرار می‌گیرند (Mangione et al., 2025). با رشد اینترنت اشیاء، توسعه راهکارهای مقیاس‌پذیر و انعطاف‌پذیر اهمیت بیشتری یافته است تا سیستم‌ها بتوانند به سرعت با تغییرات و افزایش دستگاه‌ها سازگار شوند (Gomez & Khan, 2024). ادغام اینترنت اشیاء با هوش مصنوعی، به‌ویژه هوش مصنوعی مولد، فرصت‌های جدیدی برای تحلیل پیشرفته داده‌ها و تصمیم‌گیری‌های هوشمند فراهم کرده است (Xu et al., 2024). این ترکیب امکان ایجاد سامانه‌های خودتنظیم، پیش‌بینی‌کننده و پاسخگو را فراهم کرده که می‌توانند به صورت خودکار به شرایط متغیر شهری واکنش نشان دهند (Rossi & Fernandez, 2025). چالش‌های توسعه زیرساخت‌های IoT در شهرهای در حال توسعه، به‌ویژه هزینه‌ها و دسترسی به فناوری، نیازمند راهکارهای مقرون‌به‌صرفه است (Thompson & Wei, 2023). نقش

1. edge computing

2. fog computing

دولت‌ها و بخش خصوصی در سرمایه‌گذاری و توسعه زیرساخت‌های IoT، عاملی کلیدی در موفقیت پروژه‌های شهر هوشمند محسوب می‌شود (Patel & Green, 2024 a). در نهایت، اینترنت اشیاء پایه و اساس تحول دیجیتال در شهرهای هوشمند است که با ترکیب داده‌های گسترده و فناوری‌های تحلیلی، امکان مدیریت بهتر، پاسخگوتر و پایدارتر شهرها را فراهم می‌کند (Mangione et al., 2025).

مفاهیم کلیدی در هوشمندسازی شهرها

هوشمندسازی شهرها، مفهومی فراتر از صرف استفاده از فناوری‌های نوین است که به کارگیری یکپارچه فناوری، داده‌ها، سیاست‌ها و مشارکت اجتماعی به منظور ارتقاء کیفیت زندگی، بهره‌وری منابع و توسعه پایدار شهری را شامل می‌شود (Batty et al., 2023). این رویکرد چندوجهی، چارچوبی جامع برای مدیریت و توسعه شهرها فراهم می‌کند. یکی از ارکان بنیادین شهرهای هوشمند، مدیریت داده‌های بزرگ^۱ است. با گسترش شبکه‌های حسگر و دستگاه‌های اینترنت اشیاء، حجم و وسیعی از داده‌های لحظه‌ای تولید می‌شود که نیازمند ذخیره‌سازی، پردازش و تحلیل پیشرفته برای استخراج اطلاعات کاربردی است (Kitchin, 2024). این داده‌ها از منابع متنوعی نظیر حمل‌ونقل، محیط‌زیست، امنیت و شبکه‌های اجتماعی جمع‌آوری می‌شوند و به تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر کمک می‌کنند. پایداری^۲ از اهداف محوری هوشمندسازی است. بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش آلودگی و حفظ منابع طبیعی، از طریق به کارگیری فناوری‌های هوشمند در مدیریت انرژی، آب و پسماند تحقق می‌یابد (Neirotti et al., 2023). شهرهای هوشمند باید ضمن پاسخگویی به نیازهای کنونی، آینده‌ای سبز و قابل دوام را برای نسل‌های بعد تضمین کنند. یکپارچگی سیستم‌ها^۳ به هماهنگی میان زیرساخت‌ها و سامانه‌های مختلف اشاره دارد که با ایجاد تعامل مؤثر، تبادل داده‌ها و اطلاعات را تسهیل می‌کند (Batty et al., 2023). این یکپارچگی باعث می‌شود تصمیمات مدیریتی جامع‌تر و کارآمدتر اتخاذ شود و خدمات شهری به شکل هماهنگ ارائه گردد. تعامل شهروندان^۴ نقش محوری در توسعه شهرهای هوشمند ایفا می‌کند. فناوری‌های مبتنی بر موبایل و شبکه‌های اجتماعی ابزارهایی کارآمد برای افزایش مشارکت مردمی در تصمیم‌گیری و نظارت بر خدمات شهری هستند (Nam & Pardo, 2024). این تعامل دوسویه، اعتماد عمومی را افزایش داده و زمینه‌ساز توسعه پایدار می‌شود. امنیت سایبری^۵ از دغدغه‌های اصلی در این حوزه است؛ چراکه گسترده‌گی اتصال دستگاه‌ها به شبکه، تهدیدات متنوع سایبری را به همراه دارد (Patel & Green, 2024 a). حفاظت از داده‌ها و تضمین امنیت زیرساخت‌ها برای حفظ اعتماد شهروندان و جلوگیری از اختلال در خدمات حیاتی ضروری است. انعطاف‌پذیری^۶ به توانایی شهر در مقابله با بحران‌ها و بازسازی سریع اشاره دارد. فناوری‌های هوشمند امکان پیش‌بینی و مدیریت بحران‌هایی مانند بلایای طبیعی و حملات سایبری را فراهم می‌آورند (Neirotti et al., 2023). معماری باز^۷ امکان توسعه آسان‌تر فناوری‌ها و سازگاری با نیازهای آینده را فراهم می‌کند. این رویکرد به تسهیل به‌روزرسانی و یکپارچگی سامانه‌ها کمک می‌کند (Kitchin, 2024). حاکمیت داده‌ها^۸ نیز اهمیت بالایی دارد؛ چارچوب‌های قانونی و سیاست‌گذاری مناسب برای مدیریت داده‌ها، کیفیت اطلاعات و حفظ حریم خصوصی را تضمین می‌کند (Nam & Pardo, 2024). هوش جمعی^۹ به بهره‌گیری از دانش و داده‌های جمعی

1. big data

2. sustainability

3. system integration

4. citizen engagement

5. cybersecurity

6. resilience

7. open architecture

8. data governance

9. collective intelligence

شهروندان برای بهبود خدمات و تصمیمات اشاره دارد که به ارتقای کارایی و رضایت منجر می‌شود (Batty et al., 2023). فناوری‌های موبایل و ارتباطی، به‌خصوص در قالب شبکه‌های نسل جدید، زیرساخت‌های حیاتی برای دسترسی سریع و بی‌وقفه به داده‌ها و خدمات شهری را فراهم می‌کنند (Neirotti et al., 2023). داده‌های بلادرنگ^۱ امکان واکنش سریع به تغییرات محیطی مانند ترافیک و شرایط آب و هوایی را ممکن ساخته‌اند و از اجزای حیاتی شهرهای هوشمند هستند (Patel & Green, 2024 b). هوشمندسازی خدمات شهری^۲ از طریق به کارگیری فناوری‌های نوین، به بهبود کیفیت و دسترسی به خدماتی مانند سلامت، آموزش، حمل‌ونقل و مدیریت پسماند می‌انجامد (Nam & Pardo, 2024). پلتفرم‌های دیجیتال یکپارچه^۳ به عنوان هسته مدیریت داده‌ها و خدمات، امکان تحلیل و ارائه هماهنگ خدمات را فراهم می‌آورند (Kitchin, 2024). محیط‌زیست هوشمند^۴ با استفاده از حسگرها و سامانه‌های پایش، کیفیت منابع طبیعی را رصد و حفظ می‌کند (Neirotti et al., 2023).

آموزش و توانمندسازی شهروندان^۵ برای افزایش پذیرش فناوری و مشارکت فعال مردم در توسعه شهر حیاتی است (Batty et al., 2023). هوش مصنوعی مولد با تحلیل داده‌های لحظه‌ای و تولید سناریوهای پیش‌بینی، به بهینه‌سازی مدیریت انرژی، ترافیک و امنیت در شهرها کمک می‌کند (Xu et al., 2024). معماری چندلایه که لایه‌های حسگر، انتقال داده، پردازش ابری و لبه را شامل می‌شود، کارایی سیستم‌های هوشمند را بهبود می‌بخشد و پاسخگویی به شرایط متغیر شهری را ممکن می‌سازد (Mangione et al., 2025). حفظ حریم خصوصی در مدیریت داده‌های شهری نیازمند رویکردهای امنیتی نوآورانه و سیاست‌های دقیق است تا تعادل میان بهره‌برداری از داده‌ها و حفاظت از حقوق شهروندان برقرار شود (S&P Global, 2024 b). پایداری اقتصادی و هزینه‌های بالای توسعه فناوری‌های هوشمند، چالش‌هایی برای شهرهای کوچک و مناطق در حال توسعه ایجاد کرده‌اند که نیازمند راهکارهای مقرون‌به‌صرفه است. مشارکت و همکاری بین‌بخشی میان دولت، بخش خصوصی و جامعه علمی، از عوامل کلیدی موفقیت در پروژه‌های هوشمندسازی به شمار می‌رود که نوآوری و کیفیت خدمات را افزایش می‌دهد (Patel & Green, 2024). درنهایت، توسعه هوشمندسازی شهرها باید با حفظ تعادل میان فناوری، امنیت، مشارکت اجتماعی و پایداری زیست‌محیطی، به بهبود جامع کیفیت زندگی شهروندان بینجامد (Nam & Pardo, 2024).

معماری همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء در شهرهای هوشمند

۱- معرفی کلی معماری و اهمیت آن

شهرهای هوشمند امروزی با افزایش پیچیدگی‌های شهری و نیاز به مدیریت بهینه منابع، به سیستم‌هایی نیاز دارند که بتوانند داده‌های حجیم و متنوع را به سرعت و دقت تحلیل کنند. همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء، یک چارچوب قدرتمند برای این منظور است که امکان جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای از محیط شهری و تولید مدل‌های تحلیلی پیشرفته را فراهم می‌کند (Mangione et al., 2025). معماری این همگرایی باید به گونه‌ای طراحی شود که ضمن پشتیبانی از مقیاس‌پذیری، امنیت و حریم خصوصی، انعطاف‌پذیری لازم برای پاسخ به نیازهای متغیر شهری را نیز داشته باشد. این معماری نقشی کلیدی در بهبود مدیریت ترافیک، مصرف انرژی، نظارت بر کیفیت هوا، امنیت عمومی و ارائه خدمات شهری هوشمند ایفا می‌کند. مثلاً شهر سئول با اجرای پروژه‌های هوشمندسازی مبتنی بر این معماری توانسته است مصرف انرژی در ساختمان‌های دولتی را تا ۳۰ درصد کاهش دهد و با تحلیل داده‌های IoT و

1. real-time data
2. smart public services
3. integrated digital platforms
4. smart environment
5. citizen empowerment and education

هوش مصنوعی، ترافیک شهری را به شکل مؤثری مدیریت کند (Kim & Brown., 2023). این نمونه نشان می‌دهد که معماری همگرایی چطور می‌تواند به توسعه پایدار و افزایش رفاه شهروندان کمک کند.

۲- لایه‌های مختلف سیستم

- لایه سنسورها و دستگاه‌های IoT: در این لایه، انواع حسگرهای محیطی مانند دما، رطوبت، کیفیت هوا، دوربین‌های مداربسته و حسگرهای ترافیکی نصب می‌شوند که به صورت پیوسته داده‌های محیطی را جمع‌آوری می‌کنند. به عنوان مثال، شهر آمستردام از هزاران حسگر IoT برای پایش کیفیت هوا و شرایط جوی استفاده می‌کند که این داده‌ها برای بهینه‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل و هشدار به شهروندان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rossi & Fernandez, 2025).
- لایه انتقال داده: داده‌های جمع‌آوری شده توسط شبکه‌های Wi-Fi، 5G و پروتکل‌های کم‌مصرف مانند LPWAN^۱ به مراکز پردازش منتقل می‌شوند. سرعت و قابلیت اطمینان در این لایه اهمیت ویژه‌ای دارد تا داده‌ها به موقع و بدون از دست رفتن به لایه‌های بعدی برسند (Xu et al., 2024).
- لایه پردازش و ذخیره‌سازی: پردازش اولیه داده‌ها در لبه شبکه^۲ انجام می‌شود تا سرعت پاسخ‌دهی افزایش یابد و بار انتقال داده به مرکز کاهش پیدا کند. سپس، داده‌های پردازش شده به فضای ابری برای تحلیل‌های عمیق‌تر و ذخیره‌سازی طولانی مدت ارسال می‌شوند. این رویکرد در پروژه‌های شهر هوشمند دبی موفق بوده و به کاهش تأخیر در سیستم‌های اضطراری کمک کرده است (Mangione et al., 2025).
- لایه هوش مصنوعی مولد: این لایه شامل الگوریتم‌های پیشرفته مانند شبکه‌های مولد تخاصمی (GAN)، ترنسفورمرها و مدل‌های زبانی است که داده‌های ورودی را تحلیل، پردازش و مدل‌های پیش‌بینی متنوعی تولید می‌کنند. برای نمونه، هوش مصنوعی مولد در توکیو برای تحلیل داده‌های ترافیکی و پیش‌بینی الگوهای شلوغی استفاده شده است که به بهبود برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی منجر شده است (Xu et al., 2024).
- لایه تعامل با کاربران: در این لایه، اطلاعات تحلیلی و پیشنهادهای هوشمند به صورت اپلیکیشن‌های موبایل، داشبوردهای مدیریتی یا سیستم‌های اطلاع‌رسانی در اختیار شهروندان و مدیران قرار می‌گیرد. این تعامل دوسویه، اعتماد به فناوری و مشارکت مردم در مدیریت شهر را افزایش می‌دهد (Thompson & Wei, 2023).

۳- نحوه تعامل هوش مصنوعی مولد با داده‌های اینترنت اشیاء

هوش مصنوعی مولد در بستر شهرهای هوشمند، با استفاده از داده‌های گسترده و لحظه‌ای که توسط شبکه‌های اینترنت اشیاء جمع‌آوری می‌شود، نقش بسیار مهمی در تحلیل، پیش‌بینی و تولید سناریوهای مختلف ایفا می‌کند. این فناوری، فراتر از تحلیل صرف داده‌های واقعی عمل کرده و با تولید داده‌های مصنوعی^۳ و مدل‌های پیشرفته، به بهبود عملکرد سامانه‌های شهری کمک می‌کند. برای نمونه، در شهر نیویورک، هوش مصنوعی مولد با بهره‌گیری از داده‌های جمع‌آوری شده توسط حسگرهای ترافیکی و دستگاه‌های IoT، مدل‌های پیش‌بینی ترافیک را توسعه داده است که امکان شناسایی نقاط شلوغ و ارائه مسیرهای بهینه را فراهم می‌کند. این فناوری باعث کاهش زمان سفر، بهبود کیفیت هوای شهری و افزایش رضایت شهروندان شده است (Patel & Green, 2024 b). هوش مصنوعی مولد، توانایی

1. low-power wide-area network
2. edge computing
3. synthetic data

خلق داده‌های مصنوعی را نیز دارد که این داده‌ها برای آموزش بهتر مدل‌های یادگیری ماشین بسیار حیاتی است، به‌ویژه در شرایطی که داده‌های واقعی ناکافی یا دارای نویز هستند. مثلاً در سنگاپور، این داده‌های مصنوعی در پروژه‌های امنیتی و پیش‌بینی حوادث غیرمنتظره به کار گرفته شده‌اند تا سیستم‌های نظارتی دقیق‌تر و پاسخگوتر شوند (Mangione et al., 2025). علاوه بر این، هوش مصنوعی مولد می‌تواند سناریوهای شبیه‌سازی شده برای شرایط مختلف شهری ایجاد کند، مثلاً واکنش به بحران‌های احتمالی مانند سیل یا قطعی برق که این موضوع به مدیران شهری امکان می‌دهد پیش‌پیش برنامه‌ریزی‌های لازم را انجام دهند و پاسخ‌های مؤثرتری ارائه کنند (Xu et al., 2024). در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی، هوش مصنوعی مولد می‌تواند الگوهای مصرف را تحلیل کرده و پیشنهادهای دقیقی ارائه دهد که به کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری کمک می‌کند. برای مثال، در شهر کپنهاگ، این فناوری در کنترل هوشمند سیستم‌های گرمایش و روشنایی عمومی به کار رفته است (Rossi & Fernandez, 2025 a). در حوزه سلامت شهری، هوش مصنوعی مولد با تحلیل داده‌های IoT مربوط به کیفیت هوا، شیوع بیماری‌ها و حرکت جمعیت، به پیش‌بینی و مدیریت بحران‌های بهداشتی کمک می‌کند. پروژه‌هایی در سان فرانسیسکو با استفاده از این فناوری توانسته‌اند الگوهای بیماری‌های واگیردار را پیش‌بینی و اقدامات پیشگیرانه را بهبود بخشند (Thompson & Wei, 2023).

۴- نمونه‌های عملی و مدل‌های موجود

- اسپانیا Smart Santander: این پروژه بزرگ‌ترین شبکه اینترنت اشیاء در محیط شهری را داراست که شامل بیش از ۲۰ هزار حسگر می‌شود. با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی مولد، این سیستم قادر است مصرف انرژی ساختمان‌ها را بهینه کرده، ترافیک را مدیریت کند و خدمات هوشمند نظیر اطلاع‌رسانی به شهروندان درباره کیفیت هوا را فراهم آورد. این پروژه نمونه‌ای بارز از معماری چندلایه همگرایی AI مولد و IoT است که قابلیت توسعه و انطباق با سایر شهرها را دارد (Rossi & Fernandez, 2025 a).
- شهر هوشمند دبی: دبی با سرمایه‌گذاری گسترده در فناوری‌های ابری، پردازش لبه و هوش مصنوعی مولد، سیستم‌هایی همچون مدیریت بحران، نظارت محیط‌زیست و حمل‌ونقل هوشمند را ایجاد کرده است. در این شهر، هوش مصنوعی مولد به تحلیل داده‌های شبکه حسگرهای گسترده کمک می‌کند تا پیشنهادهای دقیق‌تری برای مدیریت بهینه شهر ارائه شود (Mangione et al., 2025).
- توکیو، ژاپن: توکیو یکی از پیشروان استفاده از هوش مصنوعی مولد در مدیریت حمل‌ونقل شهری است. این شهر با تحلیل داده‌های IoT ترافیکی، مدل‌های پیش‌بینی برای شناسایی نقاط پرتراffic و بهبود زمان‌بندی وسایل نقلیه عمومی طراحی کرده است که منجر به کاهش چشمگیر زمان سفر و افزایش رضایت شهروندان شده است (Xu et al., 2024).
- سنگاپور: در پروژه‌های امنیتی و سلامت، هوش مصنوعی مولد با کمک داده‌های IoT به پیش‌بینی وقوع حوادث ناگهانی، مانند تجمعات غیرمجاز یا شیوع بیماری‌ها، پرداخته است. این مدل‌ها به بهبود واکنش‌های فوری و مدیریت بحران‌های شهری کمک کرده‌اند (Patel & Green, 2024 b).
- کپنهاگ، دانمارک: این شهر در زمینه مدیریت انرژی، از هوش مصنوعی مولد بهره برده تا الگوهای مصرف برق و گرمایش را تحلیل و بهینه‌سازی کند. این پروژه منجر به کاهش قابل توجه مصرف انرژی و ارتقاء پایداری شهری شده است (Rossi & Fernandez, 2025 b).

- سان فرانسیسکو، آمریکا: با بهره‌گیری از داده‌های IoT و هوش مصنوعی مولد، سیستم‌های پیشرفته‌ای برای پیش‌بینی الگوهای بیماری‌های واگیردار و کنترل بهداشت عمومی توسعه یافته‌اند که به تصمیم‌گیری‌های بهتر در زمینه سلامت عمومی منجر شده‌اند (Thompson & Wei, 2023).

کاربردهای همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء در شهرهای هوشمند

۱- مدیریت ترافیک و حمل‌ونقل

مدیریت ترافیک و حمل‌ونقل یکی از چالش‌های بزرگ شهرهای امروزی است که باعث افزایش آلودگی هوا، مصرف انرژی بالا و کاهش کیفیت زندگی شهروندان می‌شود. همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء با جمع‌آوری داده‌های دقیق و لحظه‌ای از حسگرهای نصب‌شده در معابر، وسایل نقلیه و ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، امکان پایش جامع و مستمر ترافیک را فراهم می‌کند.

هوش مصنوعی مولد پس از دریافت داده‌های IoT می‌تواند با تحلیل روندها و الگوهای ترافیکی، سناریوهای پیش‌بینی دقیق از ازدحام‌های احتمالی ارائه کند. این سناریوها به مدیران شهری کمک می‌کنند چراغ‌های راهنمایی را بهینه‌زمان‌بندی کرده، مسیرهای جایگزین را پیشنهاد دهند و حتی سرویس‌های حمل‌ونقل عمومی را به شکل پویا تغییر دهند تا پاسخگوی نیاز واقعی شهروندان باشند (Xu et al., 2024). مثلاً در شهر بارسلونا، استفاده از این فناوری‌ها باعث کاهش ۲۵ درصدی زمان سفر در مناطق پرترافیک شده است و همچنین، باعث بهبود هماهنگی بین وسایل نقلیه و حمل‌ونقل عمومی شده است. سیستم‌های هوشمند کنترل پارکینگ نیز به رانندگان اجازه می‌دهند با استفاده از اپلیکیشن‌ها جای پارک مناسب را به سرعت پیدا کنند که این موضوع ترافیک جست‌وجوی پارکینگ را کاهش داده است (Rossi & Fernandez, 2025 b).

۲- مدیریت انرژی و مصرف بهینه

مدیریت مصرف انرژی در شهرهای هوشمند اهمیت بسیار زیادی دارد؛ چراکه بخش بزرگی از هزینه‌های شهری صرف انرژی می‌شود و مصرف غیر بهینه باعث تخریب منابع طبیعی و افزایش آلودگی می‌گردد. اینترنت اشیاء با نصب حسگرهای هوشمند بر روی ساختمان‌ها، شبکه‌های برق، سیستم‌های گرمایش، سرمایش و روشنایی، داده‌های دقیق و بلادرنگ مصرف انرژی را فراهم می‌کند.

هوش مصنوعی مولد با تحلیل این داده‌ها می‌تواند الگوهای مصرف را شناسایی و پیش‌بینی کند. با ایجاد مدل‌های مولد، راهکارهای بهینه مصرف انرژی پیشنهاد می‌شود که ضمن کاهش هزینه‌ها، به پایداری محیط زیستی کمک می‌کند (Mangione et al., 2025). شهر کپنهاگ نمونه موفق است که با اجرای این فناوری‌ها، توانسته است مصرف انرژی خود را تا ۲۰ درصد کاهش داده و به هدف‌های زیست‌محیطی خود نزدیک‌تر شود. این سیستم‌ها به صورت خودکار روشنایی خیابان‌ها را بر اساس تردد افراد تنظیم کرده و در ساعت‌های کم ترافیک، مصرف انرژی را به حداقل می‌رسانند (Patel & Green, 2024 b).

۳- امنیت و نظارت شهری

امنیت شهری یکی از دغدغه‌های اصلی مدیریت شهری است و استفاده از فناوری‌های نوین در این حوزه می‌تواند به شکل قابل توجهی امنیت را افزایش دهد. اینترنت اشیاء با نصب حسگرهای مختلف، دوربین‌های هوشمند، دستگاه‌های شناسایی چهره و سنسورهای حرکت، داده‌های گسترده‌ای را از نقاط مختلف شهر جمع‌آوری می‌کند. هوش مصنوعی

مولد این داده‌ها را به‌طور عمیق تحلیل می‌کند و با خلق مدل‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی، توانایی شناسایی تهدیدات احتمالی، رفتارهای مشکوک و رخدادهای غیرعادی را دارد. این قابلیت به سیستم‌های نظارتی اجازه می‌دهد پیش از وقوع جرم یا حادثه، هشدارهای لازم را صادر کنند و واکنش سریع‌تری انجام شود (Thompson & Wei, 2023). برای مثال، در سنگاپور، این فناوری‌ها باعث کاهش چشمگیر نرخ جرم و جنایت شده و سیستم‌های هوشمند با استفاده از تحلیل داده‌ها، محل‌هایی که احتمال بروز حادثه در آن‌ها بیشتر است را شناسایی و تحت کنترل قرار می‌دهند (Mangione et al., 2025).

۴- خدمات شهری و رفاه شهروندان

هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء، بستر مناسبی برای بهبود خدمات شهری و افزایش رفاه شهروندان فراهم می‌کنند. از مدیریت هوشمند پسماند گرفته تا کنترل کیفیت هوا و خدمات پزشکی، این فناوری‌ها با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های متنوع، خدمات را شخصی‌سازی و بهینه‌سازی می‌کنند. به‌عنوان نمونه، در شهر آمستردام، سیستم هوشمند مدیریت زباله با تحلیل داده‌های حسگرهای قرار داده‌شده در مخازن، زمان‌بندی جمع‌آوری زباله را بهینه کرده و هزینه‌های عملیات را کاهش داده است. در ضمن، این سیستم آلودگی و بوی نامطبوع را کاهش می‌دهد و محیط‌زیست را سالم‌تر می‌کند (Rossi & Fernandez, 2025). در حوزه سلامت، با استفاده از داده‌های IoT مانند کیفیت هوا و داده‌های سلامت فردی، مدل‌های هوش مصنوعی مولد می‌توانند پیش‌بینی بیماری‌های تنفسی و ویروسی را انجام داده و راهکارهای پیشگیرانه پیشنهاد کنند (Thompson & Wei, 2023).

۵- کاربردهای خلاقانه: تولید محتوای مبتنی بر داده‌های شهری

هوش مصنوعی مولد فراتر از تحلیل داده‌ها، توانایی خلق محتوای خلاقانه را دارد که می‌تواند در حوزه‌های فرهنگی، هنری و آموزشی کاربرد داشته باشد. ترکیب داده‌های محیطی، اجتماعی و تاریخی با این فناوری، امکانات جدیدی برای تعامل شهروندان با محیط زندگی‌شان فراهم می‌کند. برای مثال، در ونکوور و استکهلم، با استفاده از هوش مصنوعی مولد و واقعیت افزوده (AR)، مدل‌های سه‌بعدی تعاملی از بناهای تاریخی و برنامه‌های فرهنگی تولید شده‌اند که به شهروندان امکان بازدید مجازی و شرکت در رویدادهای فرهنگی را می‌دهند (Patel & Green, 2024). همچنین، این فناوری‌ها در تولید گزارش‌های هوشمند و پیش‌بینی‌های مبتنی بر داده‌های زیست‌محیطی و اجتماعی نقش مهمی دارند که مدیران شهری را در اتخاذ تصمیمات راهبردی یاری می‌رسانند (Thompson & Wei, 2023).

چالش‌ها و موانع

۱- مسائل امنیتی و حریم خصوصی

در شهرهای هوشمند، حجم بسیار گسترده‌ای از داده‌های حساس و شخصی توسط دستگاه‌های اینترنت اشیاء جمع‌آوری می‌شود. این داده‌ها شامل اطلاعات موقعیت مکانی، الگوهای رفتاری، داده‌های سلامت و حتی اطلاعات مالی شهروندان است که در صورت عدم حفاظت مناسب، می‌تواند تهدیدات جدی امنیتی و نقض حریم خصوصی را به دنبال داشته باشد (Mangione et al., 2025). یکی از چالش‌های اساسی، مدیریت امنیت این حجم عظیم داده است. بسیاری از دستگاه‌های IoT محدودیت‌های پردازشی و ذخیره‌سازی دارند و نمی‌توانند از پروتکل‌های امنیتی پیچیده و رمزنگاری‌های قوی استفاده کنند. این موضوع موجب افزایش آسیب‌پذیری سیستم در برابر نفوذ و حملات سایبری می‌شود (Xu et al., 2024). حملات سایبری به زیرساخت‌های حیاتی شهری مانند حملات انکار سرویس،

نفوذ به شبکه‌های ارتباطی و بدافزارها می‌تواند منجر به اختلال جدی در خدمات حیاتی شود. برای مثال، نفوذ به سیستم‌های مدیریت ترافیک می‌تواند باعث ایجاد هرج و مرج و حتی مخاطرات جانی شود (S&P Global, 2024). حفظ حریم خصوصی شهروندان اهمیت بسیار بالایی دارد؛ زیرا داده‌های جمع‌آوری شده اغلب شامل اطلاعات شخصی و قابل شناسایی است که در صورت دسترسی برای افراد غیرمجاز می‌تواند زمینه سوءاستفاده‌هایی مانند سرقت هویت و رصد غیرقانونی را فراهم کند (Mangione et al., 2025). در عین حال، ایجاد تعادل میان دسترسی به داده‌ها برای بهبود خدمات شهری و حفاظت از حریم خصوصی، چالشی مدیریتی مهم به شمار می‌رود. سیستم‌های هوشمند باید بتوانند به داده‌های لازم برای تصمیم‌گیری دقیق دسترسی داشته باشند، بدون اینکه حقوق شهروندان نقض شود (Xu et al., 2024). رویکرد امنیت به صورت طراحی شده یکی از راهکارهای کلیدی برای مقابله با چالش‌های امنیتی است که از مرحله طراحی سیستم‌ها، اصول امنیتی را در نظر می‌گیرد تا آسیب‌پذیری‌ها در مراحل بعدی ایجاد نشوند (Mangione et al., 2025). به کارگیری تکنولوژی‌های رمزنگاری پیشرفته مانند رمزنگاری چندلایه، کلیدهای پویا و احراز هویت چندمرحله‌ای برای تضمین امنیت داده‌ها و جلوگیری از دسترسی غیرمجاز از دیگر الزامات اساسی است (Xu et al., 2024). استفاده از هوش مصنوعی برای شناسایی حملات سایبری به صورت خودکار و بلادرنگ، امکان واکنش سریع به تهدیدات را فراهم می‌کند و باعث افزایش سطح امنیت کل سیستم می‌شود (S&P Global, 2024). تدوین قوانین و مقررات جامع برای حفاظت از داده‌ها و حریم خصوصی شهروندان نیز ضروری است تا وظایف نهادهای مختلف، حقوق کاربران و نحوه مدیریت داده‌ها به طور شفاف مشخص شود (Mangione et al., 2025). در نهایت، آموزش و آگاهی‌بخشی به شهروندان درباره مخاطرات احتمالی و نحوه استفاده صحیح از فناوری‌های هوشمند، نقش مهمی در کاهش ریسک‌ها و افزایش اعتماد عمومی ایفا می‌کند (Xu et al., 2024).

۲- مقیاس‌پذیری و مدیریت داده‌ها

مقیاس‌پذیری و مدیریت داده‌ها یکی از چالش‌های کلیدی در همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء در شهرهای هوشمند است. با افزایش روزافزون دستگاه‌ها و حسگرهای متصل به شبکه، حجم داده‌های تولیدشده به صورت نمایی رشد می‌کند که مدیریت این حجم عظیم داده مستلزم زیرساخت‌های پردازشی و ذخیره‌سازی بسیار پیشرفته و بهینه است (Mangione et al., 2025). داده‌های جمع‌آوری شده از منابع متنوع شامل اطلاعات ترافیکی، مصرف انرژی، کیفیت هوا، امنیت و خدمات شهری، نیازمند سامانه‌هایی با قابلیت تحلیل سریع و دقیق هستند تا بتوانند تصمیم‌گیری‌های به موقع و کارآمد را در محیط شهری فراهم کنند (Xu et al., 2024). محدودیت‌های سخت‌افزاری در دستگاه‌های اینترنت اشیاء، مانند توان پردازشی و حافظه محدود، باعث می‌شود که بخشی از پردازش داده‌ها به مراکز ابری منتقل شود؛ اما این انتقال می‌تواند منجر به تأخیر در پاسخگویی و افزایش هزینه‌ها شود (S&P Global, 2024 a). به همین دلیل، رویکردهای پردازش لبه و پردازش مه برای انجام پردازش‌های محلی در نزدیکی دستگاه‌های جمع‌آوری داده توسعه یافته‌اند. این رویکردها باعث کاهش بار مراکز داده ابری، افزایش سرعت پاسخدهی و حفظ امنیت داده‌ها می‌شوند (Mangione et al., 2025). در پروژه Smart Santander، از معماری ترکیبی پردازش محلی و ابری استفاده شده که موجب بهینه‌سازی مصرف منابع و افزایش کارایی سیستم‌های هوشمند شهری شده است (Rossi & Fernandez, 2025 b). الگوریتم‌های هوش مصنوعی مولد که قابلیت پردازش توزیع‌شده و سازگاری با داده‌های ناقص و نویزی را دارند، به عنوان راهکاری برای مدیریت بهتر داده‌ها معرفی شده‌اند. این الگوریتم‌ها باید با سرعت و حجم بالای داده‌ها هماهنگ شوند تا دقت تحلیل‌ها حفظ گردد (Patel & Green, 2024 a). استانداردسازی داده‌ها و ایجاد چارچوب‌های یکپارچه برای تبادل داده‌ها از منابع مختلف، نقش مهمی در رفع مشکلات

ناسازگاری و افزایش قابلیت استفاده مجدد داده‌ها دارد (Mangione et al., 2025). فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین نیز به منظور افزایش شفافیت، امنیت و جلوگیری از دست‌کاری داده‌ها در شبکه‌های توزیع‌شده به کار گرفته شده‌اند که موجب بهبود اعتماد کاربران به سامانه‌های هوشمند می‌شوند (Xu et al., 2024). نیروی انسانی متخصص و آموزش‌های مستمر برای مدیریت داده‌های حجیم و پیچیده، از دیگر موارد حیاتی است که بهره‌وری سیستم‌ها را بهبود می‌بخشد و از هدررفت منابع جلوگیری می‌کند (S&P Global, 2024). تحقیقات آینده در این حوزه بر بهبود الگوریتم‌های پردازش توزیع‌شده، ارتقاء امنیت داده‌ها و طراحی معماری‌های مقیاس‌پذیر با مصرف انرژی بهینه تمرکز دارد تا امکان توسعه پایدار و کارآمد شهرهای هوشمند فراهم شود (Mangione et al., 2025).

۳- پیچیدگی‌های فنی و هماهنگی سیستم‌ها

پیچیدگی‌های فنی و هماهنگی سیستم‌ها در همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء در شهرهای هوشمند، از مهم‌ترین موانع اجرایی به شمار می‌روند. در واقع، تلفیق فناوری‌های متنوعی چون حسگرهای مختلف، شبکه‌های ارتباطی، پلتفرم‌های پردازش داده و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، نیازمند طراحی معماری‌های انعطاف‌پذیر و هماهنگ است که از تداخل عملکردها و ناسازگاری‌ها جلوگیری کند (Mangione et al., 2025). یکی از چالش‌های اصلی، تنوع بسیار زیاد دستگاه‌ها و پروتکل‌های ارتباطی است که هر کدام ویژگی‌ها و استانداردهای متفاوتی دارند. این تنوع باعث پیچیدگی در یکپارچه‌سازی سیستم‌ها و برقراری ارتباط بدون نقص بین اجزای مختلف می‌شود (Xu et al., 2024). تضمین کیفیت خدمات^۱ (QoS) در چنین سیستم‌های پیچیده، خصوصاً در زمینه‌های حیاتی مانند مدیریت ترافیک و امنیت شهری، اهمیت زیادی دارد و هرگونه اختلال در هماهنگی می‌تواند منجر به عملکرد نامناسب و خسارات جبران‌ناپذیر شود (S&P Global, 2024 a). پیچیدگی الگوریتم‌های هوش مصنوعی مولد نیز نیازمند منابع محاسباتی قوی است که این مسئله در محیط‌هایی با محدودیت‌های سخت‌افزاری مانند دستگاه‌های IoT، چالش برانگیز می‌شود (Rossi & Fernandez, 2025). علاوه بر این، بروز خطاها در هر یک از لایه‌های سیستم می‌تواند کل فرآیند را مختل کند و بازایی سیستم به حالت پایدار، زمان‌بر و پیچیده است (Patel & Green, 2024). مدیریت داده‌های توزیع‌شده و تضمین سازگاری داده‌ها در سراسر لایه‌های مختلف سیستم نیز از مواردی است که نیازمند راهکارهای نرم‌افزاری و معماری‌های نوین است تا بتوان داده‌ها را به صورت هماهنگ و بهینه تحلیل کرد (Mangione et al., 2025). استانداردسازی پروتکل‌های ارتباطی و فرمت‌های داده از دیگر موضوعات حیاتی است که باید به آن پرداخته شود تا امکان همکاری بدون نقص میان اجزای مختلف فراهم شود (Xu et al., 2024). علاوه بر مسائل فنی، هماهنگی بین بخش‌های مختلف توسعه‌دهنده و بهره‌بردار سیستم‌های هوشمند، از جمله سازمان‌های دولتی، شرکت‌های خصوصی و تیم‌های فنی، اهمیت زیادی دارد تا فرآیند توسعه و نگهداری به صورت یکپارچه و کارآمد انجام شود (S&P Global, 2024 a). کاربرد روش‌های معماری نرم‌افزاری مانند معماری میکروسرویس و استفاده از استانداردهای باز می‌تواند به کاهش پیچیدگی و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم کمک کند (Rossi & Fernandez, 2025 b). در نهایت، سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه فناوری‌های نوین برای کاهش پیچیدگی‌های فنی و بهبود هماهنگی سیستم‌ها، راهکار مؤثری برای پیشبرد شهرهای هوشمند پایدار محسوب می‌شود (Mangione et al., 2025).

1. quality of service

۴- ملاحظات اخلاقی و اجتماعی

ملاحظات اخلاقی و اجتماعی در پیاده‌سازی همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء در شهرهای هوشمند اهمیت ویژه‌ای دارند. استفاده گسترده از فناوری‌های نوین در جمع‌آوری و تحلیل داده‌های شخصی، نگرانی‌هایی در زمینه حفظ حقوق شهروندان و عدالت اجتماعی ایجاد کرده است (Mangione et al., 2025). یکی از دغدغه‌های اصلی، اثرات این فناوری‌ها بر اشتغال است. خودکارسازی فرآیندها و استفاده از هوش مصنوعی مولد ممکن است منجر به کاهش مشاغل سنتی در برخی بخش‌ها شود که این مسئله می‌تواند به نابرابری اقتصادی و اجتماعی دامن بزند (Xu et al., 2024). به علاوه، نابرابری دیجیتال یکی دیگر از چالش‌های اجتماعی است که به دلیل عدم دسترسی برابر به فناوری‌های هوشمند، شکاف میان گروه‌های مختلف جمعیتی افزایش می‌یابد و این موضوع می‌تواند به تفکیک اجتماعی و کاهش عدالت منجر شود (S&P Global, 2024 b). از طرفی، نظارت گسترده و جمع‌آوری داده‌های شخصی توسط سیستم‌های هوشمند ممکن است به نگرانی‌هایی در زمینه کنترل‌های دولتی و محدودیت آزادی‌های فردی منجر شود که این مسئله به مباحث حقوق بشری و سیاست‌های حاکمیتی مربوط می‌شود (Rossi & Fernandez, 2025). شفافیت در نحوه جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و استفاده از داده‌ها و همچنین، امکان اعتراض و کنترل شهروندان بر داده‌های خود، از اصول اساسی رعایت ملاحظات اخلاقی است که باید در طراحی سیستم‌های هوشمند لحاظ شود (Patel & Green, 2024 b). توسعه سیاست‌ها و چارچوب‌های قانونی که حقوق شهروندان را در برابر استفاده نادرست از داده‌ها حفظ کند، امری ضروری است و می‌تواند اعتماد عمومی به فناوری‌های هوشمند را افزایش دهد (Mangione et al., 2025). توجه به فرهنگ محلی و حساسیت‌های اجتماعی در پیاده‌سازی فناوری‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرد تا از بروز تضادهای فرهنگی و اجتماعی جلوگیری شود و پذیرش فناوری توسط جامعه تسهیل گردد (Xu et al., 2024). آموزش و آگاهی‌بخشی به شهروندان درباره مزایا و مخاطرات فناوری‌های هوشمند، نقش مهمی در افزایش پذیرش و مشارکت فعال آن‌ها در فرآیندهای هوشمندسازی ایفا می‌کند (S&P Global, 2024). همچنین، مشارکت شهروندان در طراحی و اجرای پروژه‌های هوشمندسازی می‌تواند به بهبود کیفیت خدمات و تضمین رعایت ملاحظات اخلاقی کمک کند (Rossi & Fernandez, 2025). درنهایت، پژوهش‌های آینده باید به بررسی تأثیرات بلندمدت اجتماعی و اخلاقی فناوری‌های همگرا در شهرهای هوشمند بپردازند تا توسعه پایدار و مسئولانه این فناوری‌ها تضمین شود (Mangione et al., 2025).

۵- هزینه‌ها و زیرساخت‌های موردنیاز

پیاده‌سازی همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء در شهرهای هوشمند نیازمند سرمایه‌گذاری‌های گسترده در زمینه زیرساخت‌های فناوری است. احداث شبکه‌های ارتباطی پرسرعت، نصب هزاران حسگر و تجهیز مراکز داده ابری و لبه، همگی هزینه‌های قابل توجهی را به دولت‌ها و نهادهای شهری تحمیل می‌کند (Mangione et al., 2025). از آنجا که بسیاری از شهرها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، محدودیت‌های بودجه‌ای دارند، تأمین منابع مالی برای توسعه این زیرساخت‌ها به چالشی اساسی تبدیل شده است (Xu et al., 2024). هزینه‌های نگهداری و به‌روزرسانی مداوم سیستم‌ها نیز باید در نظر گرفته شود؛ زیرا فناوری‌های هوشمند نیازمند پشتیبانی فنی مستمر و ارتقاء امنیتی هستند تا عملکرد قابل اعتماد و پایدار حفظ شود (S&P Global, 2024 b). سرمایه‌گذاری در نیروی انسانی متخصص برای طراحی، پیاده‌سازی و مدیریت این سیستم‌ها نیز بخشی از هزینه‌های کلی است که باید به آن توجه شود (Rossi & Fernandez, 2025). همچنین، هزینه‌های مربوط به آموزش و آگاه‌سازی شهروندان برای استفاده صحیح و ایمن از فناوری‌های هوشمند از دیگر بخش‌های مهم است که در بودجه‌ریزی‌ها باید لحاظ گردد (Patel & Green, 2024).

a). برای کاهش هزینه‌ها، برخی پروژه‌ها از رویکردهای مقیاس‌پذیر و تدریجی بهره می‌برند که به تدریج زیرساخت‌ها و خدمات را توسعه می‌دهند و از فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر استفاده می‌کنند (Mangione et al., 2025). استفاده از فناوری‌های باز و استانداردهای جهانی می‌تواند به کاهش هزینه‌های توسعه و افزایش امکان همکاری میان سیستم‌ها کمک کند (Xu et al., 2024). در بسیاری از پروژه‌ها، همکاری میان بخش دولتی و خصوصی^۱ (PPP) نقش کلیدی در تأمین مالی و اجرای زیرساخت‌ها داشته است که این مدل همکاری می‌تواند راهکاری مؤثر برای مواجهه با محدودیت‌های مالی باشد (S&P Global, 2024). به‌علاوه، فناوری‌های ابری و پردازش لبه باعث کاهش نیاز به تجهیزات فیزیکی و زیرساخت‌های سنگین در محل شده‌اند که در کاهش هزینه‌ها مؤثر است (Rossi & Fernandez, 2025 b). درنهایت، برنامه‌ریزی دقیق، مدیریت کارآمد منابع و بهره‌گیری از نوآوری‌های فناورانه، کلیدهای موفقیت در کنترل هزینه‌ها و تضمین پایداری مالی پروژه‌های هوشمندسازی شهری خواهند بود (Mangione et al., 2025).

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

تحولات اخیر در فناوری‌های هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء به‌عنوان دو نیروی محرک اصلی در توسعه شهرهای هوشمند مطرح شده‌اند و همگرایی این فناوری‌ها ظرفیت بی‌نظیری برای بهبود مدیریت و بهره‌برداری از منابع شهری فراهم می‌آورد. شبکه گسترده حسگرهای اینترنت اشیاء امکان جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای و متنوع از محیط‌های شهری را مهیا ساخته که زمینه لازم برای تحلیل‌های پیشرفته توسط هوش مصنوعی مولد را فراهم می‌کند (Mangione et al., 2025). به کمک این داده‌های حجیم، مدل‌های پیش‌بینی دقیق و سناریوسازی‌های مختلفی شکل گرفته‌اند که تأثیر بسزایی در بهینه‌سازی ترافیک، مدیریت مصرف انرژی و ارتقای امنیت شهری داشته‌اند؛ پروژه‌هایی نظیر سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند در نیویورک و برنامه‌های مدیریت انرژی در سنگاپور نمونه‌هایی از موفقیت‌های عملی این همگرایی فناوری‌ها به شمار می‌روند (Patel & Green, 2024; Xu et al., 2024 b). کاربردهای هوش مصنوعی مولد در حوزه مدیریت ترافیک، به شکل چشمگیری باعث کاهش ترافیک و بهبود کیفیت هوا شده است؛ چراکه امکان تحلیل لحظه‌ای داده‌های حسگرهای ترافیکی و بهبود مسیرهای حمل‌ونقل عمومی را فراهم کرده است (Rossi & Fernandez, 2025). همچنین در امنیت شهری، این فناوری با تولید داده‌های مصنوعی و تحلیل پیشگیرانه تهدیدات، امکان پاسخ سریع‌تر به رخداد‌های غیرمنتظره را ایجاد کرده و موجب افزایش امنیت و کاهش جرائم شده است (Mangione et al., 2025). با این حال، چالش‌های مهمی نیز در این مسیر وجود دارد. حفظ حریم خصوصی و امنیت داده‌ها به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین موانع پذیرش فناوری‌های هوشمند شناخته شده است؛ پژوهش‌های (Wang et al., 2021) و (Lee & Park, 2019) بر این نکته تأکید دارند که حفاظت از داده‌های حساس شهری باید در اولویت توسعه سیستم‌های هوشمند قرار گیرد تا اعتماد عمومی حفظ شود. پیچیدگی‌های فنی ناشی از تنوع دستگاه‌ها، پروتکل‌ها و الگوریتم‌ها نیز ضرورت توسعه معماری‌های منعطف و استانداردهای یکپارچه را برجسته می‌سازد تا هماهنگی میان اجزای مختلف سیستم تضمین شود (Xu et al., 2024). علاوه بر این، هزینه‌های بالا و نیاز به نیروی انسانی متخصص موانع اجرایی مهمی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شوند (S&P Global, 2024). از منظر اجتماعی و اخلاقی، نگرانی‌هایی همچون اثرات منفی بر اشتغال، افزایش نابرابری دیجیتال و مسائل مربوط به کنترل‌های دولتی وجود دارد که باید از طریق سیاست‌گذاری مسئولانه و مشارکت فعال شهروندان مدیریت شود (Rossi & Fernandez, 2025 b). با توجه به این چالش‌ها، راهکارهای فناورانه همراه با چارچوب‌های قانونی و

1. public-private partnership

سیاست‌های شفاف می‌توانند بستر توسعه پایدار و پذیرش گسترده این فناوری‌ها را فراهم کنند. آموزش و آگاهی‌بخشی به جامعه نیز نقش کلیدی در افزایش مشارکت و حمایت مردمی ایفا می‌کند (Mangione et al., 2025). بدین ترتیب، همگرایی هوش مصنوعی مولد و اینترنت اشیاء قادر است با ایجاد سیستم‌های هوشمند، پاسخگو و انعطاف‌پذیر، شهرها را به محیط‌هایی پایدار و باکیفیت زندگی بهتر تبدیل کند. در چشم‌انداز آینده، پیشرفت در حوزه پردازش لبه و رایانش ابری، مدیریت داده‌های حجیم و لحظه‌ای را با سرعت و دقت بیشتر امکان‌پذیر می‌سازد که موجب بهبود عملکرد سیستم‌های هوشمند خواهد شد (Mangione et al., 2025). توسعه الگوریتم‌های هوش مصنوعی مولد با قابلیت یادگیری خودکار، پیش‌بینی دقیق‌تر و واکنش‌های پویا به شرایط متغیر شهری را ممکن می‌سازد (Xu et al., 2024). همچنین، استانداردسازی و چارچوب‌های قانونی بین‌المللی برای حفظ امنیت و حریم خصوصی داده‌ها اهمیت بیشتری خواهند یافت و باعث ایجاد اعتماد عمومی و تسهیل همکاری‌های بین‌المللی می‌شوند (S&P Global, 2024). همکاری‌های میان دولت‌ها، بخش خصوصی و دانشگاه‌ها برای توسعه راهکارهای فناورانه و سیاست‌های جامع، روندی حیاتی برای تسریع نوآوری و به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند است (Rossi & Fernandez, 2025).

(b). تمرکز بر راهکارهای مقرون‌به‌صرفه و مقیاس‌پذیر به‌ویژه برای شهرهای کوچک و متوسط نیز موجب گسترش دامنه کاربرد فناوری‌ها و کاهش نابرابری دیجیتال خواهد شد (Patel & Green, 2024 a). علاوه بر این، توجه به ملاحظات اجتماعی، فرهنگی و اخلاقی در توسعه فناوری‌ها، همراه با افزایش آموزش و آگاهی شهروندان، به پذیرش گسترده‌تر فناوری‌های هوشمند کمک می‌کند (Mangione et al., 2025). پژوهش‌های آینده باید به اثرات بلندمدت فناوری‌های همگرا بر محیط‌زیست و توسعه پایدار شهری توجه ویژه‌ای داشته باشند؛ توسعه فناوری‌های سبز و کاهش مصرف انرژی در زیرساخت‌های هوشمند، از موضوعات حیاتی این حوزه است (S&P Global, 2024). همچنین، فناوری‌های نوین تولید داده‌های مصنوعی و شبیه‌سازی پیشرفته فرصت‌های جدیدی برای آزمایش و بهینه‌سازی سیستم‌ها بدون دخالت مستقیم در محیط واقعی فراهم می‌کنند (Rossi & Fernandez, 2025 b). درنهایت، موفقیت آینده شهرهای هوشمند متکی بر همگرایی فناوری، سیاست‌گذاری هوشمندانه و مشارکت فعال تمامی ذی‌نفعان است تا بتوان شهرهایی انعطاف‌پذیر، پایدار و پاسخگو به نیازهای انسانی ساخت (Mangione et al., 2025). از سوی دیگر، پژوهش‌های آینده باید بر توسعه معماری‌های مقیاس‌پذیر و منعطف برای مدیریت حجم گسترده داده‌ها، امنیت داده‌ها و حفظ حریم خصوصی با استفاده از الگوریتم‌ها و پروتکل‌های پیشرفته تمرکز کنند (Mangione et al., 2025; Xu et al., 2024). توسعه الگوریتم‌های هوش مصنوعی مولد با یادگیری خودکار و انعطاف‌پذیری بیشتر نیز باید مورد توجه قرار گیرد تا واکنش به شرایط مختلف شهری بهبود یابد (Patel & Green, 2024 b). همچنین، تحلیل اثرات اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی فناوری‌های هوشمند، ازجمله تأثیرات بر اشتغال و نابرابری دیجیتال، برای تضمین توسعه مسئولانه اهمیت دارد (S&P Global, 2024). به‌علاوه، لازم است روش‌های نوین تولید داده‌های مصنوعی و شبیه‌سازی پیشرفته توسعه یابد تا امکان آزمایش و بهینه‌سازی سیستم‌ها بدون دخالت محیط واقعی فراهم گردد (Rossi & Fernandez, 2025 b). تمرکز بر راهکارهای مقرون‌به‌صرفه برای شهرهای کوچک و متوسط و افزایش همکاری‌های بین‌بخشی میان دولت‌ها، شرکت‌ها و دانشگاه‌ها از دیگر اولویت‌هاست (Mangione et al., 2025; Xu et al., 2024). افزون بر این، تحقیقات درباره تأثیر فناوری‌های همگرا بر پایداری محیط‌زیست و آموزش شهروندان در جهت افزایش مشارکت نیز اهمیت ویژه دارد (S&P Global, 2024; Patel & Green, 2024 b). توسعه شهرهای هوشمند باید در چارچوبی پایدار و جامع انجام شود تا کیفیت زندگی شهروندان بهبود واقعی و بلندمدت یابد. توسعه پایدار به معنای تأمین نیازهای نسل کنونی بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده است و این موضوع در مدیریت منابع شهری و حفاظت از محیط‌زیست اهمیت ویژه‌ای دارد.

(Mangione et al., 2025). فناوری‌های هوشمند تأثیرات عمیقی بر محیط‌زیست و جوامع انسانی دارند؛ بنابراین، رویکردی جامع که ابعاد فنی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را در بر گیرد، ضروری است تا توسعه فناوری‌ها علاوه بر بهره‌وری اقتصادی، عدالت اجتماعی و حفظ منابع طبیعی را نیز تضمین کند (S&P Global, 2024). این امر مستلزم سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه و مدیریت یکپارچه با مشارکت همه ذی‌نفعان شامل دولت، بخش خصوصی، دانشگاه‌ها و شهروندان است تا از ایجاد نابرابری‌های دیجیتال جلوگیری شود و همه اقشار جامعه از مزایای فناوری‌های هوشمند بهره‌مند گردند (Rossi & Fernandez, 2025 b). ملاحظات اخلاقی و فرهنگی نیز در فرآیند توسعه فناوری‌ها باید مورد توجه قرار گیرد تا فناوری‌ها در راستای حفظ کرامت انسانی و احترام به تنوع فرهنگی و اجتماعی توسعه یابند (Xu et al., 2024). علاوه بر این، توسعه فناوری‌های سبز و کاهش مصرف انرژی در زیرساخت‌های هوشمند نقش مهمی در تحقق اهداف زیست‌محیطی ایفا می‌کند که بخشی جدایی‌ناپذیر از توسعه پایدار است (Patel & Green, 2024 b). درنهایت، تحقق توسعه پایدار و جامع در شهرهای هوشمند نیازمند چشم‌اندازی بلندمدت است که فناوری، سیاست، جامعه و محیط‌زیست را به‌صورت هماهنگ در نظر گرفته و مسیر توسعه‌ای متعادل و پاسخگو به نیازهای انسانی را ترسیم نماید (Mangione et al., 2025).

منابع

- Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2023). Smart cities of the future. *European Physical Journal Special Topics*, 222(14), 3123–3144.
- Gomez, M., & Khan, A. (2024). Integrating generative AI with IoT for next-generation smart city solutions. *IEEE Internet of Things Journal*.
- Kim, H., & Brown, M. (2023). Energy-efficient generative AI architectures for IoT-based smart city infrastructure. *Journal of Sustainable Computing*.
- Kitchin, R. (2024). Data-driven urbanism and the rise of smart cities: Opportunities and challenges. *Urban Studies*, 61(2), 345–367.
- Lee, J., & Park, Y. (2019). Smart city services and sustainable urban development: A systematic review. *Sustainable Cities and Society*, 45, 231–243.
- Mangione, F., Savaglio, C., & Fortino, G. (2025). Generative artificial intelligence for Internet of Things computing: A systematic survey. *arXiv*.
- Mangione, G. R., Savaglio, C., & Fortino, G. (2025). The convergence of generative AI and IoT in smart cities: Architectures, applications, and challenges. *Future Generation Computer Systems*, 152, 1–17.
- Nam, T., & Pardo, T. A. (2024). Smart city and citizen engagement: A framework for integrating mobile and social media tools. *Government Information Quarterly*, 41(1), 101738.
- Neirotti, P., De Marco, A., Cagliano, A. C., Mangano, G., & Scorrano, F. (2023). Current trends in smart city initiatives: A review of enabling technologies and sustainability issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112123.
- Patel, A., & Green, D. (2024,a). Secure and privacy-preserving generative AI frameworks for IoT smart cities. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*.
- Patel, R., & Green, M. (2024,b). Generative AI for smart city innovation: Use cases, opportunities, and risks. *AI in Society*, 39(4), 1123–1140.
- Rossi, L., & Fernandez, P. (2025,a). AI-driven traffic and safety management in next-generation cities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 161, 104372.
- Rossi, P., & Fernandez, E. (2025,b). A survey on generative models for smart city applications using IoT data. *ACM Computing Surveys*.
- S&P Global. (2024,a). *Smart city market trends and forecasts 2024–2030*. S&P Global Market Intelligence. <https://www.spglobal.com>
- S&P Global. (2024,b). *The rise of AI-powered smart cities*. <https://www.spglobal.com/en/research-insights/special-reports/ai-smart-cities>
- Thompson, S., & Li, W. (2023). Challenges and opportunities of generative AI in IoT-enabled smart cities. *Journal of Urban Computing and Smart City*.

- Wang, Y., Zhang, X., & Chen, L. (2021). Privacy and security in IoT-enabled smart cities: Challenges and solutions. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), 3772–3785.
- Xu, H., Li, Z., & Zhang, J. (2024). IoT and generative AI integration for urban infrastructure optimization. *Journal of Urban Technology*, 31(2), 55–75.
- Xu, H., Omitaomu, F., Sabri, S., Zlatanova, S., Li, X., & Song, Y. (2024). Leveraging generative AI for urban digital twins: A scoping review on the autonomous generation of urban data, scenarios, designs, and 3D city models for smart city advancement. *arXiv*.
- Xu, X., Li, Y., & Zhang, Z. (2024). Generative spatial artificial intelligence for sustainable smart cities. *Science Direct*.
- Zhang, Y., & Park, J. (2023). Energy-efficient generative AI architectures for IoT-based smart city infrastructure. *Journal of Sustainable Computing*.

