نوع مقاله: مروری
DOI: 10.22034/ats.2026.2094020.1051

فصلنامه پژوهش‌های معماری نوین
دوره ۶، شماره ۲، پیاپی ۲۰
تابستان ۱۴۰۵
صص ۴۸-۲۹

Architectural Technologies
Studies Journal
Vol. 6, Issue. 2, Serial No. 20
Autumn 2026
Pages 29-48

تدوین چارچوب مفهومی معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی با رویکرد پایداری زیست‌محیطی

مرضیه شاهرودی‌کلور*[۱]، حجت‌الله رشید کلویر[۲]

۱- استادیار گروه معماری، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران (نویسنده مسئول).
M.shahroudi.k@gmail.com
۲- دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
hrashid@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۴۰۵/۲/۲۰] تاریخ پذیرش: [۱۴۰۵/۴/۳۱]

چکیده

تحولات سریع فناوری‌های دیجیتال و گسترش هوش مصنوعی، موجب شکل‌گیری رویکردهای نوینی در معماری و مدیریت محیط‌های شهری شده است. در این میان، معماری داده‌محور به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارادایم‌های نوظهور، ظرفیت بالایی در بهینه‌سازی مصرف منابع، ارتقای بهره‌وری انرژی و افزایش تاب‌آوری زیست‌محیطی دارد. هدف پژوهش حاضر، تدوین چارچوب مفهومی معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی با رویکرد پایداری زیست‌محیطی است. این پژوهش از نظر ماهیت، کیفی بوده و با استفاده از مرور نظام‌مند ادبیات و روش تحلیل مضمون انجام شده است. داده‌های پژوهش از طریق بررسی منابع علمی معتبر داخلی و بین‌المللی در حوزه‌های معماری هوشمند، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، دوقلوهای دیجیتال و پایداری زیست‌محیطی گردآوری شد. تحلیل داده‌ها بر اساس رویکرد براون و کلارک انجام گرفت و در فرایند کدگذاری، بیش از ۱۵۰ کد اولیه استخراج و در قالب مضامین سازمان‌دهی شد. یافته‌های پژوهش نشان داد که معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی بر چهار مضمون اصلی شامل «زیرساخت داده‌محور و هوشمندسازی معماری»، «تحلیل هوشمند و تصمیم‌گیری تطبیقی»، «پایداری و تاب‌آوری زیست‌محیطی» و «حکمرانی، تعامل و بستر اجرایی» استوار است. نتایج همچنین نشان داد که عملکرد این رویکرد بر پایه چرخه‌ای پویا شامل جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ، تحلیل هوشمند، تصمیم‌گیری تطبیقی و یادگیری مستمر شکل می‌گیرد. چارچوب مفهومی ارائه‌شده بیانگر آن است که تلفیق فناوری‌های داده‌محور و هوش مصنوعی با اصول پایداری می‌تواند زمینه‌ساز توسعه ساختمان‌ها و شهرهای هوشمند، پایدار و تاب‌آور شود. این پژوهش ضمن توسعه ادبیات نظری معماری داده‌محور، می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری و طراحی محیط‌های شهری هوشمند در آینده باشد.

واژگان کلیدی: معماری داده‌محور، پایداری، تحلیل مضمون، دوقلوی دیجیتال، اینترنت اشیا، معماری هوشمند.

۱-مقدمه

بحران‌های زیست‌محیطی معاصر، از جمله تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی، آلودگی هوا، کمبود منابع طبیعی به‌ویژه آب، و افزایش بلایای طبیعی، به یکی از جدی‌ترین چالش‌های جوامع شهری تبدیل شده‌اند (Barrico & Castro, 2018). این چالش‌ها نیازمند رویکردهای نوآورانه و پایدار در مدیریت شهری هستند تا بتوانند به بهبود تاب‌آوری و کیفیت زندگی در شهرها کمک کنند. این رویکردها می‌توانند شامل ارزیابی ریسک، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و ترویج همبستگی اجتماعی باشند .با اجرای این اقدامات، شهرها قادر خواهند بود به چالش‌ها پاسخ دهند و توسعه پایدار و فراگیر را ترویج کنند. (Allam, Jones, & Thondoo, 2020).

صنعت ساختمان به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع، سهم قابل‌توجهی در این بحران دارد. این صنعت نیازمند تغییرات اساسی در فرآیندهای ساخت و بهره‌برداری است تا به بهره‌وری منابع و کاهش مصرف انرژی کمک کند.(Professner & Rhomberg, 2020) تحقیقات نشان می‌دهد که صنعت ساختمان بین ۳۰ تا ٤٠ درصد از منابع طبیعی و ۵۰ درصد از انرژی را به خود اختصاص می‌دهد و نیاز به بازنگری در فرآیندهای آن وجود دارد. تحقق این تغییرات مستلزم استفاده از فناوری‌های نوین و رویکردهای پایدار است که می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی این صنعت کمک کند (Martin & Perry, 2019).

در این میان، فناوری‌های نوین به‌ویژه هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء[1]، حسگرها، تحلیل داده‌های بزرگ[2] و سیستم‌های دوقلوی دیجیتال[3]، فرصتی بی‌نظیر برای مدیریت هوشمند بحران‌های زیست‌محیطی فراهم کرده‌اند. معماری هوشمند به‌عنوان رویکردی میان‌رشته‌ای، قابلیت ترکیب اصول پایداری، فناوری، اقتصاد و ابعاد اجتماعی-فرهنگی را در یک چارچوب منسجم دارد. این رویکرد فراتر از اتوماسیون ساده، بر ایجاد فضاهای پویا، خودتنظیم و پاسخگو به تغییرات محیطی تأکید دارد (Umoh, Nwasike, Tula, Adekoya, & Gidiagba, 2024).

علاوه بر این، گذار از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[4] به دوقلوهای دیجیتال، امکان پایش بلادرنگ عملکرد ساختمان‌ها را فراهم کرده است (Tahmasebinia, Lin, Wu, Kang, & Sepasgozar, 2023)، اما کاربرد عملی آن در مدیریت بحران‌ها هنوز محدود است. پژوهشگرهایی مانند دنگ، مناسا و کمات[5] (۲۰۲۱) بر این تکامل تأکید دارند، اما نشان می‌دهند که چالش‌های فنی، اقتصادی و فرهنگی مانع بهره‌برداری کامل از پتانسیل این فناوری‌ها شده است. ازسوی‌دیگر، استفاده گسترده از هوش مصنوعی خود می‌تواند هزینه‌های زیست‌محیطی جدیدی ایجاد کند؛ برای مثال، افزایش تقاضای برق و مصرف آب در مراکز داده که می‌تواند چندین برابر فرآیندهای سنتی باشد (Chen, Despeisse, & Johansson, 2020).

در کشورهای درحال‌توسعه از جمله ایران، این چالش‌ها دوچندان است. کمبود زیرساخت‌های ارتباطی، هزینه‌های اولیه بالای پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند، نبود نیروی متخصص کافی، مسائل امنیت داده و حریم خصوصی، و موانع فرهنگی پذیرش فناوری، اجرای معماری داده‌محور را با دشواری مواجه کرده است. همچنین، عدم توجه کافی به بومی‌سازی فناوری‌ها با شرایط اقلیمی، فرهنگی و اقتصادی محلی، یکی از مهم‌ترین خلأهای موجود است.

معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی، با تمرکز بر جمع‌آوری مداوم داده از طریق حسگرها، تحلیل هوشمند آن با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تصمیم‌گیری خودکار و ایجاد حلقه بازخورد یادگیری، می‌تواند این شکاف‌ها را پر کند (Farzaneh, Malehmirchegini, Bejan, Afolabi, Mulumba, & Daka, 2021). این رویکرد نه‌تنها مصرف انرژی و منابع را بهینه می‌سازد، بلکه

1 IoT
2 Big Data Analytics
3 Digital Twin
4 BIM
5 Deng ، Menassa و Kamat

امکان پیش‌بینی و مدیریت ریسک بحران‌ها، کاهش ردپای کربن، و افزایش تاب‌آوری شهری را فراهم می‌آورد. بااین‌حال، فقدان چارچوب مفهومی یکپارچه که به طور خاص بر بعد داده‌محور معماری هوشمند و ارتباط آن با پایداری در مواجهه با بحران‌های زیست‌محیطی تمرکز داشته باشد، همچنان احساس می‌شود (Sunguroğlu Hensel, Tyc, & Hensel, 2022).

هدف اصلی پژوهش حاضر، تدوین چارچوب مفهومی معماری داده‌محور برای دستیابی به پایداری در عصر هوش مصنوعی است. این چارچوب با ادغام فناوری‌های اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، دیجیتال توئین و اصول طراحی پایدار، تلاش می‌کند ساختمان‌ها و فضاهای شهری را به سیستم‌های هوشمند، خودتنظیم و تاب‌آور تبدیل کند. چنین رویکردی می‌تواند به کاهش آلودگی، بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی، ارتقای کیفیت زندگی شهروندان و افزایش تاب‌آوری در برابر بلایای طبیعی کمک شایانی کند.

پیاده‌سازی موفق این چارچوب نیازمند غلبه بر چالش‌هایی نظیر هزینه‌های اولیه، نیاز به زیرساخت‌های ارتباطی قوی، آموزش نیروی انسانی و همکاری بین‌رشته‌ای است. بدون وجود یک مدل مفهومی منسجم، تلاش‌ها برای هوشمندسازی معماری ممکن است پراکنده و ناکارآمد باقی بمانند؛ بنابراین، تدوین چنین چارچوبی نه‌تنها ضرورتی علمی، بلکه الزامی عملی برای حرکت به‌سوی شهرهای پایدار و تاب‌آور در برابر بحران‌های زیست‌محیطی به شمار می‌رود.

۲-مرور مبانی نظری و پیشینه

صنعت ساختمان به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تشدید بحران‌های زیست‌محیطی است. این واقعیت، لزوم گذار از رویکردهای سنتی به مدل‌های داده‌محور و هوشمند را در عصر هوش مصنوعی ضروری ساخته است. مبانی نظری پژوهش حاضر بر این فرض استوار است که معماری داده‌محور می‌تواند با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، ساختمان‌ها و شهرها را به سامانه‌های هوشمند، خودتنظیم و پایدار تبدیل کند.

۲-۱- مفهوم معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی

معماری داده‌محور رویکردی است که در آن تصمیم‌گیری‌های طراحی، ساخت و بهره‌برداری بر پایه جمع‌آوری، تحلیل و کاربرد هوشمند داده‌های واقعی و برخط قرار دارد. این مفهوم فراتر از اتوماسیون ساده است و بر یکپارچگی فناوری‌های اینترنت اشیاء، شبکه‌های حسگر، تحلیل داده‌های بزرگ و الگوریتم‌های هوش مصنوعی تأکید دارد. هدف اصلی، ایجاد فضاهای پویا که قادر به پاسخگویی هوشمند به تغییرات محیطی و نیازهای کاربران باشند (Pedersen, Hughes, & Cannaerts, 2018).

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که گذار از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان به دوقلوهای دیجیتال، نقطه عطفی در این حوزه بوده است. دوقلوهای دیجیتال با ایجاد نسخه‌ای مجازی و پویا از ساختمان، امکان پایش، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد بلادرنگ را فراهم می‌کنند و پایه‌ای محکم برای مدیریت چرخه حیات ساختمان در مواجهه با بحران‌های زیست‌محیطی ایجاد می‌نمایند (Al-Sehrawy & Kumar, 2020).

۲-۲- هوش مصنوعی و پایداری در معماری

هوش مصنوعی به‌عنوان موتور محرک معماری داده‌محور، نقش کلیدی در پیش‌بینی مصرف انرژی، بهینه‌سازی سیستم‌های تهویه‌مطبوع، تشخیص الگوهای ناکارآمد و مدیریت بحران ایفا می‌کند. مفهوم هوش مصنوعی سبز[1] که توسط هیدالگو[2] و همکاران (۲۰۲۳) و بولون-کاندو، موران-فرناندز، کانسلا و آلونسو-بتانتسوس[3] (۲۰۲٤) توسعه‌یافته، بر کاهش ردپای کربن خود سیستم‌های هوشمند تأکید دارد و تلاش می‌کند تا هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از پردازش داده و آموزش مدل‌ها را به حداقل برساند.

1 Green AI
2 Hidalgo
3 Bolón-Canedo, Morán-Fernández, Cancela & Alonso-Betanzos

۳-۲- ارتباط معماری داده‌محور با پایداری

معماری داده‌محور از طریق جمع‌آوری مداوم داده‌های محیطی (دما، کیفیت هوا، مصرف انرژی، رطوبت) و تحلیل آنها با هوش مصنوعی، امکان مدیریت هوشمند منابع، کاهش اتلاف انرژی و افزایش تاب‌آوری در برابر بلایای اقلیمی را فراهم می‌آورد. این رویکرد با اصول طراحی مبتنی بر طبیعت، مصالح کم‌کربن و سیستم‌های تطبیقی ترکیب شده و ساختمان را از یک سازه ایستا به یک اکوسیستم هوشمند و پاسخگو تبدیل می‌کند.

نظریه‌های پشتیبان مانند نظریه اکوسیتی و گفتمان زیست‌محیطی نیز بر لزوم هم‌افزایی فناوری داده‌محور با اصول پایداری تأکید دارند. پژوهش‌هایی مانند سارکر[1] (۲۰۲۲)، اولاه[2] و همکاران (۲۰۲٤) و بیبری[3]، الکساندر[4]، شریفی[5] و کروگستی[6] (۲۰۲۳) نشان می‌دهند که ادغام اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و کلان‌داده‌ها، می‌تواند به ایجاد شهرهای داده‌محور پایدار منجر شود که قادر به مقابله مؤثر با بحران‌هایی همچون کمبود آب، آلودگی هوا و گرمایش جهانی هستند.

مبانی نظری حاضر بر این فرضیه استوار است که معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی نه‌تنها ابزاری برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و منابع است، بلکه چارچوبی جامع برای تبدیل چالش‌های زیست‌محیطی به فرصت‌های توسعه پایدار محسوب می‌شود. این پژوهش با تکیه بر مدل‌های پیشین و پر کردن شکاف‌های موجود در ادغام عمیق داده، هوش مصنوعی و طراحی معماری، چارچوب مفهومی جدیدی ارائه خواهد داد.

۳-روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی - توسعه‌ای و از نظر ماهیت، کیفی است و با هدف تدوین چارچوب مفهومی معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی با رویکرد پایداری زیست‌محیطی انجام شده است. راهبرد اصلی پژوهش، مرور نظام‌مند ادبیات همراه با تحلیل مضمون بوده و تلاش شده است تا از طریق بررسی و تحلیل مطالعات معتبر داخلی و خارجی، ابعاد مفهومی و مؤلفه‌های کلیدی معماری داده‌محور در ارتباط با پایداری و مدیریت بحران‌های زیست‌محیطی استخراج و تبیین شود. در این راستا، داده‌های پژوهش از طریق جستجوی نظام‌مند منابع علمی در پایگاه‌های معتبر علمی داخلی و بین‌المللی گردآوری شد. برای جستجوی منابع از کلیدواژه‌هایی نظیر «معماری داده‌محور»، «هوش مصنوعی»، «اینترنت اشیا»، «دوقلوی دیجیتال»، «ساختمان هوشمند»، «پایداری شهری» استفاده گردید. انتخاب منابع به‌صورت هدفمند و بر اساس معیارهایی همچون ارتباط مستقیم با موضوع پژوهش، اعتبار علمی، به‌روز بودن منابع و تمرکز بر فناوری‌های داده‌محور و پایداری انجام شد و فرآیند گردآوری داده‌ها تا دستیابی به اشباع نظری ادامه یافت.

تحلیل داده‌ها با استفاده از روش تحلیل مضمون بر مبنای رویکرد براون و کلارک (۲۰۰٦) انجام گرفت. در این فرایند، ابتدا متون علمی منتخب به‌صورت مکرر مطالعه و مفاهیم اولیه استخراج شد، سپس کدگذاری باز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار مکس کیودآ[7] صورت گرفت. در ادامه، کدهای اولیه بر اساس شباهت‌های مفهومی دسته‌بندی و مضامین محوری شناسایی شدند. مراحل تحلیل شامل آشنایی با داده‌ها، تولید کدهای اولیه، جستجو و بازبینی مضامین، تعریف و نام‌گذاری مضامین و در نهایت تدوین گزارش نهایی بود. در مجموع بیش از ۱۵۰ کد اولیه استخراج شد. در نهایت، بر پایه روابط مفهومی میان مضامین استخراج‌شده، چارچوب مفهومی

1 Sarker
2 Ullah
3 Bibri
4 Alexandre
5 Sharifi
6 Krogstie
7 MAXQDA

پژوهش تدوین شد که نحوه تعامل فناوری‌های داده‌محور، هوش مصنوعی و اصول پایداری را در معماری و مدیریت هوشمند محیط‌های شهری تبیین می‌کند.

٤-یافته‌ها

٤-۱- مرور زمانی مضامین ادبیات تحقیق

ادبیات مرتبط با معماری داده‌محور و پایداری در عصر هوش مصنوعی در طول زمان تکامل قابل‌توجهی یافته و نشان‌دهنده پیشرفت‌های چشمگیر فناوری و تعمیق ادغام میان‌رشته‌ای است.

آثار اولیه عمدتاً بر تدوین چارچوب‌های مفهومی متمرکز بودند که علوم شهری، معماری و اصول پایداری را با رویکردهای داده‌محور پیوند می‌زدند. با بلوغ فناوری‌های هوش مصنوعی، جهت‌گیری تحقیقات به سمت پیاده‌سازی‌های عملی تغییر یافت و بر ابزارهایی همچون دوقلوهای دیجیتال مبتنی بر هوش مصنوعی، چارچوب‌های شهر هوشمند و سیستم‌های ساختمانی تطبیقی تأکید شد.

مطالعات اخیر نیز بر جنبه‌های پیشرفته‌تری همچون حاکمیت اخلاقی داده، چارچوب‌های سیاستی و مدل‌های جامع یکپارچه تمرکز دارند که ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌صورت هم‌افزا در نظر می‌گیرند. هدف این مدل‌ها، حل بحران‌های پیچیده محیطی از طریق طراحی پایدار هوشمند و برنامه‌ریزی شهری داده‌محور است (جدول ۱).

جدول ۱: مرور زمانی ادبیات تحقیق

محدوده زمانی	تمرکز تحقیقات	توضیحات
۲۰۲۰-۲۰۲۲	مفاهیم بنیادین و چارچوب‌های بین‌رشته‌ای	تحقیقات اولیه با کاوش در ادغام علم پایداری، علوم شهری و معماری با رویکردهای داده‌محور و هوش مصنوعی، زمینه را برای تحول این حوزه فراهم کرد. این مطالعات عمدتاً بر توسعه چارچوب‌های نظری و مدل‌های مفهومی تمرکز داشتند تا سیستم‌های پیچیده شهری و چالش‌های زیست‌محیطی را از طریق راهبُردهای میان‌رشته‌ای و بهره‌گیری از داده‌های یکپارچه بهتر درک و مدیریت کنند. در این دوره، تأکید ویژه‌ای بر پیشرفت روش‌های برنامه‌ریزی شهری قرار گرفت که بتوانند به طور مؤثر به‌سرعت شهرنشینی و تغییرات آب‌وهوایی پاسخ دهند.
۲۰۲۳-۲۰۲٤	ظهور ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی و ملاحظات سیاستی	در این دوره، کاربردهای عملی هوش مصنوعی در طراحی زیستگاه‌های پایدار، ادغام ارزیابی چرخه حیات با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، مدل‌های زبان بزرگ و چارچوب‌های اولیه اخلاقی و حکمرانی ظاهر شد. تحقیقات بر بهره‌وری انرژی، کاهش ردپای کربن و استقرار هوش مصنوعی در شهرهای هوشمند با بهره‌گیری از اینترنت اشیا و دوقلوی دیجیتال تمرکز کردند. همچنین، اهمیت چارچوب‌های سیاستی، حاکمیت داده و ملاحظات اخلاقی برای پذیرش عادلانه و شفاف هوش مصنوعی برجسته گردید.
۲۰۲۵	پیشرفت در شهرهای هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی و تاب‌آوری اقلیمی	در این دوره، تحقیقات بر دوقلوی دیجیتال هوش مصنوعی، تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده و چارچوب‌های بهینه‌سازی پایدار چندلایه تمرکز یافت که از اقتصاد چرخشی به سمت ادغام هوش مصنوعی با سیستم‌های فیزیکی-سایبری برای دستیابی به انتشار خالص صفر، ساختمان‌های سبز و زیرساخت‌های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی گسترش پیدا کرد. این ادبیات بر حکمرانی، عدالت و مسائل مالی تأکید کرده و چالش‌هایی مانند تعامل‌پذیری سیستم‌ها، استانداردسازی داده‌ها و بار محاسباتی را نیز برجسته کرده است.
۲۰۲٦	پارادایم‌های طراحی پیشرفته هوش مصنوعی و چارچوب‌های یکپارچه	مطالعات اخیر بر روش‌های نوآورانه طراحی معماری مبتنی بر هوش مصنوعی با ترکیب هوش مصنوعی مولد، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و ادغام داده‌ها برای بهینه‌سازی پایداری تمرکز دارند. این تحقیقات تحول فرآیند طراحی، ساختمان‌های هوشمند و شهرسازی انسان‌محور را برجسته کرده و بر ملاحظات اخلاقی و مسئولیت طراحان تأکید می‌کنند. این عصر، بلوغ چارچوب‌های مفهومی و مدل‌های مقیاس‌پذیر برای ادغام جامع هوش مصنوعی در توسعه پایدار معماری و شهری را نشان می‌دهد.

٤-۲- مرور موضوعی ادبیات تحقیق

ادبیات مرتبط با معماری داده‌محور و پایداری در عصر هوش مصنوعی، مجموعه‌ای از موضوعات به‌هم‌پیوسته را نشان می‌دهد که عمدتاً حول ادغام فناوری‌های پیشرفته برای مقابله با بحران‌های زیست‌محیطی شکل گرفته‌اند (جدول ۲). موضوعات اصلی شامل کاربرد هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال در طراحی پایدار شهری و ساختمان است که بر افزایش بهره‌وری انرژی، انعطاف‌پذیری و تصمیم‌گیری بلادرنگ تأکید دارند. تمرکز مهم دیگر بر چارچوب‌های اخلاقی، حکمرانی و سیاست‌گذاری است که برای پذیرش مسئولانه هوش مصنوعی در حوزه پایداری شهری ضروری هستند. تم‌های نوظهور نیز بر پتانسیل‌ها و چالش‌های هوش مصنوعی مولد، گردش کارهای طراحی میان‌رشته‌ای و مدل‌های سیستمی یکپارچه با ترکیب هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و داده‌های بزرگ برای ایجاد محیط‌های ساختمانی عادلانه و پاسخگو به اقلیم تمرکز دارند.

جدول ۲: مرور موضوعی ادبیات تحقیق

مضامین کلی	توضیحات
هوش مصنوعی و دوقلوهای دیجیتال در معماری پایدار و طراحی شهری	دوقلوهای دیجیتال مبتنی بر هوش مصنوعی، نظارت محیطی، تحلیل پیش‌بینی‌کننده و کنترل تطبیقی را در ساختمان‌ها و سیستم‌های شهری ممکن می‌سازند و بهره‌وری انرژی، خنثی‌سازی کربن و انعطاف‌پذیری اقلیمی را در مقیاس‌های مختلف افزایش می‌دهند. مطالعات نشان می‌دهد که ادغام این دوقلوها با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، اینترنت اشیا و شبکه‌های حسگر، بهینه‌سازی ساختمان‌های هوشمند، سبز و انرژی صفر و همچنین تسهیل استراتژی‌های پایداری در سطح شهری را امکان‌پذیر می‌کند (Bibri & Huang, 2025; Li, Shirowzhan, S., Pignatta, G., & Sepasgozar, 2024; Bibri, Huang, Jagatheesaperumal, & Krogstie, 2024; Soni & Taneja, 2025; Zhu & Jin, 2025; Saheer, Garbagna, & Sasidharan, 2025; Ali, Mansour, Abdelkader, Elshaboury, & Zayed, 2025).
شهرهای پایدار هوشمند مبتنی بر داده و هوش شهری	مفهوم شهرهای هوشمند پایدار مبتنی بر داده، پارادایم‌های شهر فشرده، شهر زیست‌محیطی و شهرسازی هوشمند را با بهره‌گیری از داده‌های بزرگ، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی تلفیق می‌کند تا نتایج پایداری را بهبود بخشد. تحقیقات بر تحولات نهادی، حکمرانی و اثرات هم‌افزایی حاصل از ترکیب شهرسازی پایدار با فناوری‌های هوشمند تأکید دارند که هدف آن تعادل هم‌زمان بین اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی است (Bibri, 2020, 2021; Bibri & Krogstie, 2020).
ملاحظات اخلاقی، حکمرانی و سیاست در پایداری مبتنی بر هوش مصنوعی	الزامات اخلاقی مانند کاهش سوگیری الگوریتمی، حاکمیت داده‌ها، شفافیت و مشارکت عادلانه ذی‌نفعان، در یکپارچه‌سازی مسئولانه هوش مصنوعی در شهرسازی پایدار نقش محوری دارند. چارچوب‌های سیاستی نیز بر حاکمیت داده‌ها، مشارکت‌های دولتی–خصوصی و استانداردهای لازم تأکید دارند تا طراحی مبتنی بر هوش مصنوعی و سیستم‌های شهری را هدایت کنند و زیرساخت‌های فراگیر، عادلانه و پاسخگو به اقلیم را تقویت نمایند (Choi, 2026; Amen, 2024; Parlapalli, Ganeeb, Bidkar, Veerapaneni, Sankiti, & Harve, 2025; Islam, 2025; Air & Fahim, 2025; Erifeta, 2025).
بهره‌وری انرژی مبتنی بر هوش مصنوعی و سیستم‌های ساختمان پاسخگو به اقلیم	مدل‌های هوش مصنوعی، از جمله یادگیری ماشین و شبکه‌های یادگیری عمیق، بهینه‌سازی مصرف انرژی، انتخاب مواد و کنترل محیطی در ساختمان‌ها را فراهم می‌کنند. سیستم‌های تطبیقی مبتنی بر تحلیل پیش‌بینی‌کننده و یادگیری تقویتی، راحتی حرارتی، ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش ردپای کربن را بهبود می‌بخشند و از شیوه‌های معماری سبز و اقتصاد چرخشی پشتیبانی می‌کنند (Xu, 2025; Płoszaj-Mazurek & Ryńska, 2024; He, Xu, Li, & Meng, 2024; Gao & Hu, 2025; Guzmán, Tobón, Andrés, & Requena Torres, 2025; Ali, 2026).
گردش کار طراحی داده‌محور بین‌رشته‌ای و چارچوب‌های محاسباتی	گردش کار محاسباتی یکپارچه با ترکیب تحلیل داده‌ها، هوش مصنوعی مولد، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و مدل‌سازی محیطی، همگرایی بین فرم معماری و عملکرد اکولوژیکی را تسهیل می‌کند. این رویکردهای میان‌رشته‌ای، معماری‌های هوشمند را قادر می‌سازد تا چالش‌های پایداری چندبعدی را از طریق فرآیندهای تحلیلی و تولیدی ترکیبی به طور مؤثر برطرف کنند (Li, Yang, Liu, & Deng, 2026; Talebian, Golkarieh, Eshraghi, Naseri, & Naseri, 2025; Aziz, Sharun, Wagiman, & Moorapun, 2024; Hensel, Tyc, & Hensel, 2022).
هوش مصنوعی مولد در طراحی پایدار و برنامه‌ریزی شهری	هوش مصنوعی مولد با تولید سناریو، افزایش داده‌ها و نمونه‌سازی طراحی، خلاقیت و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد را در مراحل اولیه طراحی پایدار تقویت می‌کند. با وجود کاربردهای امیدوارکننده، چالش‌هایی مانند هزینه‌های زیست‌محیطی، خطرات اخلاقی و نیاز به چارچوب‌های حاکمیتی برای تضمین استفاده قابل‌اعتماد و مسئولانه همچنان پابرجاست (Li et al., 2026; Air & Fahim, 2025; Figliola, Barberio, Kantún Montiel, & Rienzo, 2025; Figliola & Barberio, 2025).
اقتصاد چرخشی و معماری هوش مصنوعی سبز برای	معماری‌های نوآورانه سبز مبتنی بر هوش مصنوعی، مدل‌های یادگیری ماشین آگاه از انرژی و مدل‌های بهینه‌سازی را برای پشتیبانی از اصول اقتصاد چرخشی در ساخت‌وساز و مدیریت پسماند ادغام می‌کنند. این چارچوب‌ها کاهش قابل‌توجه مصرف

بهینه‌سازی منابع	انرژی و بهبود بهره‌وری بازیابی منابع را نشان می‌دهند و با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد همخوانی دارند (Ranpara, 2025; Guzmán et al., 2025).
تاب‌آوری شهری مبتنی بر هوش مصنوعی و چارچوب‌های سازگار با اقلیم	چارچوب‌های هوش مصنوعی با بهره‌گیری از داده‌های زیست‌محیطی چند منبع و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری را در برابر خطرات اقلیمی مانند سیل و امواج گرما افزایش می‌دهند. مطالعات نقش هوش مصنوعی را در نقشه‌برداری ریسک، تکامل مشترک زیرساخت‌ها و حمایت از حکمرانی سازگار برجسته کرده و بر پرورش شهرهای پایدار و مقاوم در برابر تغییرات آب و هوایی تأکید دارند (Velasquez-Mendez, Lozoya-Santos, & Jiménez, 2025; Bushuyev, Murzabekova, Khussainova, Saidullayev, Бушуев, & Kolesnikova, 2025; Mahadeva, 2025; Erifeta, 2025).

۳-٤- تلفیق و تحلیل انتقادی مضامین محوری موجود در ادبیات تحقیق

ادبیات پژوهش بررسی‌شده به طور جمعی بر ظرفیت تحول‌آفرین هوش مصنوعی و فناوری‌های داده‌محور در ارتقای معماری پایدار و طراحی شهری، به‌ویژه در مواجهه با پیچیدگی‌های ناشی از بحران‌های زیست‌محیطی، تأکید دارد. مرور مطالعات نشان می‌دهد که یک جریان غالب در ادبیات، بر ضرورت ادغام هوش مصنوعی با فناوری‌هایی نظیر دوقلوهای دیجیتال، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، اینترنت اشیا، کلان‌داده و سامانه‌های تحلیل پیش‌بینانه برای ایجاد محیط‌های ساخته‌شده هوشمند، سازگار و کم‌کربن تمرکز دارد. این رویکردها با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی، ارتقای بهره‌وری منابع، افزایش تاب‌آوری اقلیمی و بهبود فرایندهای تصمیم‌گیری در مقیاس ساختمان و شهر توسعه یافته‌اند. باوجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در این حوزه، تحلیل انتقادی ادبیات نشان می‌دهد که همچنان چالش‌هایی اساسی در زمینه یکپارچه‌سازی فناوری‌ها، حکمرانی اخلاقی، قابلیت تعامل داده‌ها، مقیاس‌پذیری راهکارها و ایجاد چارچوب‌های میان‌رشته‌ای منسجم وجود دارد. همچنین، تنوع رویکردهای روش‌شناختی اگرچه موجب غنای ادبیات شده است، اما هم‌زمان به پراکندگی مفهومی و دشواری در مقایسه و تعمیم یافته‌های پژوهش‌ها منجر شده است.

یکی از مضامین اصلی در ادبیات پژوهش، ادغام فناوری و نوآوری در معماری و شهرسازی پایدار است. مطالعات متعدد بر نقش کلیدی ترکیب هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و دوقلوهای دیجیتال در فعال‌سازی طراحی پایدار پویا و داده‌محور تأکید کرده‌اند. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تلفیق این فناوری‌ها می‌تواند امکان پایش لحظه‌ای شرایط محیطی، شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، پیش‌بینی عملکرد ساختمان و بهینه‌سازی مصرف انرژی را فراهم کند (Li et al., 2026; Bibri & Huang, 2025; Athas & Nawari, 2026; Parlapalli et al., 2025; Bibri et al., 2024; Soni & Taneja, 2025) . در همین راستا، برخی مطالعات چارچوب‌های نوآورانه‌ای مانند گردش کارهای چندعاملی «مولد – ارزیاب» را برای طراحی پایدار منظر و سامانه‌های ساختمانی هوشمند پیشنهاد کرده‌اند که با بهره‌گیری از ظرفیت‌های هوش مصنوعی، امکان بهبود عملکرد زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری انرژی را فراهم می‌سازند.(Li et al., 2026; Xu, 2025; Bibri & Huang, 2025) همچنین، ترکیب هوش مصنوعی با دوقلوهای دیجیتال، قابلیت تحلیل پیش‌بینانه و مدیریت تطبیقی را در مقیاس‌های مختلف افزایش داده و زمینه را برای توسعه سیستم‌های شهری تاب‌آور فراهم کرده است (Bibri et al., 2024; Zhu & Jin, 2025; Ali et al., 2025).

بااین‌حال، تحلیل انتقادی مطالعات نشان می‌دهد که علی‌رغم این پیشرفت‌ها، کاربردهای هوش مصنوعی در بسیاری از موارد همچنان پراکنده و محدود به عملکردهای خاص یا نمونه‌های موردی هستند و هنوز فاصله قابل‌توجهی میان توسعه فناوری و استقرار یکپارچه آن در مقیاس سیستم‌های شهری وجود دارد (Bibri & Huang, 2025). یکی از مهم‌ترین موانع در این زمینه، نبود استانداردهای مشترک برای داده‌ها، ضعف قابلیت همکاری میان سامانه‌های مختلف و پیچیدگی محاسباتی فرآیندهای مبتنی بر هوش مصنوعی است که مانع از همگرایی کامل فناوری‌ها می‌شود (Xu, 2025; Mazzetto, 2024; Cordeiro, Braghetto, Kon, & Amblard, 2025). علاوه بر این، اگرچه مطالعات متعددی ظرفیت هوش مصنوعی را برای بهینه‌سازی طراحی و مدیریت شهری مطرح کرده‌اند، اما مقیاس‌پذیری این راهکارها در زمینه‌های جغرافیایی، اجتماعی و اقتصادی متفاوت هنوز به‌طور کامل بررسی نشده است و شواهد تجربی موجود عمدتاً به مطالعات موردی محدود باقی مانده‌اند (Mazzetto, 2024; Mahadeva, 2025).

در کنار ادغام فناوری، رویکردهای روش‌شناختی و توسعه چارچوب‌های مفهومی یکی دیگر از محورهای مهم ادبیات پژوهش محسوب می‌شود. مطالعات مختلف با استفاده از روش‌هایی همچون مرور نظام‌مند، مطالعات موردی، تحلیل‌های ترکیبی و رویکردهای آینده‌نگر، تلاش کرده‌اند نقش هوش مصنوعی را در تحقق اهداف معماری و شهرسازی پایدار تبیین کنند (Amen, 2024; Płoszaj-Mazurek & Ryńska, 2024; Talebian et al., 2025). برخی پژوهش‌ها چارچوب‌های مفهومی و عملیاتی جدیدی، از جمله مدل‌های «سه‌گانه پایداری» و چارچوب‌های چندلایه برای بهینه‌سازی منابع، ارائه کرده‌اند که تلاش دارند ابعاد فناورانه، زیست‌محیطی و مدیریتی پایداری را در یک ساختار منسجم ترکیب کنند (Guzmán et al., 2025; Ranpara, 2025). همچنین، استفاده از روش‌هایی مانند پس‌نگری[1] و مثلث‌سازی موضوعی، به‌عنوان ابزارهایی برای برنامه‌ریزی راهبردی آینده و توسعه سناریوهای پایدار شهری مورد توجه قرار گرفته است (Bibri & Krogstie, 2020; Erifeta, 2025).

باوجود این تلاش‌ها، یکی از محدودیت‌های اساسی ادبیات موجود، ناهمگونی روش‌شناختی و نبود چارچوب‌های ارزیابی مشترک است. تفاوت در شاخص‌ها، معیارهای عملکرد و روش‌های اندازه‌گیری، مقایسه و تلفیق نتایج مطالعات را دشوار کرده است (Bibri & Huang, 2025; Li et al., 2024). بسیاری از چارچوب‌های ارائه‌شده همچنان بر مدل‌های نظری، داده‌های محدود یا آزمایش‌های کوتاه‌مدت استوار هستند و فاقد اعتبارسنجی تجربی بلندمدت در مقیاس‌های بزرگ شهری‌اند (Gao & Hu, 2025; Bushuyev et al., 2025). همچنین، نبود شاخص‌های استاندارد عملکرد و پروتکل‌های بنچمارک برای ارزیابی معماری پایدار مبتنی بر هوش مصنوعی، همچنان یکی از خلأهای مهم این حوزه محسوب می‌شود (Li et al., 2024; Mazzetto, 2024). افزون بر این، در بسیاری از چارچوب‌های موجود، ابعاد اخلاقی و حکمرانی یا به‌صورت محدود مورد توجه قرار گرفته‌اند یا در حاشیه مباحث فناورانه باقی مانده‌اند (Choi, 2026; Amen, 2024).

یکی دیگر از محورهای اصلی در ادبیات پژوهش، پیامدهای زیست‌محیطی و عملکرد انرژی سامانه‌های مبتنی بر هوش مصنوعی است. بخش قابل توجهی از مطالعات بر این توافق دارند که هوش مصنوعی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار کربن، بهبود بهره‌وری منابع و ارتقای تاب‌آوری اقلیمی در مقیاس ساختمان و شهر ایفا کند (Bibri & Huang, 2025; He et al., 2024; Hemalatha et al., 2025). شواهد تجربی ارائه‌شده در برخی مطالعات نشان می‌دهد که سیستم‌های تطبیقی مبتنی بر هوش مصنوعی، با بهره‌گیری از داده‌های محیطی و الگوریتم‌های پیش‌بینانه، قادر به بهینه‌سازی مصرف انرژی، تسهیل ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و افزایش انعطاف‌پذیری زیرساخت‌های شهری در برابر تغییرات اقلیمی هستند (Xu, 2025; Erifeta, 2025). همچنین، مطالعات موردی در زمینه شهرهای هوشمند، کاهش تراکم ترافیکی، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و افزایش کارایی زیرساخت‌های حیاتی مانند شبکه‌های آب را به‌عنوان پیامدهای مثبت استفاده از فناوری‌های هوشمند گزارش کرده‌اند (Addad & Al-Taani, 2024; Singh, 2025). در همین راستا، ترکیب اصول اقتصاد چرخشی با قابلیت‌های هوش مصنوعی نیز به‌عنوان رویکردی نوظهور برای مدیریت پایدار منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی مطرح شده است (Ranpara, 2025; Guzmán et al., 2025).

با وجود این مزایا، تحلیل انتقادی ادبیات نشان می‌دهد که بسیاری از ادعاهای مرتبط با عملکرد زیست‌محیطی هوش مصنوعی هنوز بر شبیه‌سازی‌ها، مدل‌های نظری یا پروژه‌های آزمایشی استوار هستند و داده‌های تجربی بلندمدت برای اثبات اثرات پایدار آن‌ها در شرایط واقعی محدود است (Bibri & Huang, 2025; He et al., 2024). علاوه بر این، در بسیاری از مطالعات، هزینه‌های زیست‌محیطی خود فناوری هوش مصنوعی، به‌ویژه مصرف انرژی ناشی از آموزش و اجرای مدل‌های پیچیده و پردازش حجم بالای داده‌ها، کمتر مورد توجه قرار گرفته یا به طور کامل اندازه‌گیری نشده است (Zavaleta, 2025; Fahim, 2025). همچنین، ارزیابی‌های جامع که بتوانند هم‌زمان ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی پایداری را در کنار یکدیگر بررسی کنند، همچنان ناکافی هستند

1 Backcasting

(Guzmán et al., 2025). بنابراین، اگرچه هوش مصنوعی ظرفیت قابل‌توجهی برای بهبود عملکرد محیطی دارد، اما ارزیابی پایدار بودن خود فناوری و پیامدهای بلندمدت آن همچنان نیازمند مطالعات دقیق‌تر است.

در حوزه ملاحظات اخلاقی، حکمرانی و سیاست‌گذاری، ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که پذیرش گسترده هوش مصنوعی در معماری و شهرسازی پایدار تنها به توسعه فنی وابسته نیست، بلکه نیازمند ایجاد سازوکارهای اخلاقی و نهادی مناسب است. مطالعات متعددی بر اهمیت موضوعاتی مانند کاهش سوگیری الگوریتمی، حکمرانی داده، شفافیت تصمیم‌گیری، حفظ حریم خصوصی و استفاده از رویکرد «انسان در حلقه» برای تضمین کاربرد مسئولانه هوش مصنوعی تأکید کرده‌اند (Choi, 2026; Amen, 2024; Air & Fahim, 2025). این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که طراحی سیستم‌های هوشمند باید به‌گونه‌ای باشد که امکان نظارت انسانی، پاسخگویی و مشارکت ذی‌نفعان را فراهم کند. همچنین، مطالعات سیاستی بر ضرورت ایجاد چارچوب‌های قوی حکمرانی داده، توسعه همکاری‌های دولتی – خصوصی و ارائه مشوق‌های مالی برای حمایت از نوآوری مسئولانه تأکید دارند(Amen, 2024; Islam, 2025). افزون بر این، ادغام ملاحظات اخلاقی با افزایش اعتماد عمومی و تقویت حکمرانی دموکراتیک شهری مرتبط دانسته شده است (Islam, 2025; Fahim, 2025).

بااین‌حال، فاصله قابل توجهی میان شناسایی چالش‌های اخلاقی و ارائه راهکارهای اجرایی وجود دارد. اگرچه بسیاری از پژوهش‌ها بر اهمیت حکمرانی مسئولانه تأکید می‌کنند، تعداد محدودی از آن‌ها چارچوب‌های عملیاتی، دستورالعمل‌های اجرایی یا مدل‌های نظارتی مشخص برای پیاده‌سازی این اصول ارائه داده‌اند (Amen, 2024; Parlapalli et al., 2025). همچنین، ایجاد تعادل میان الزامات متعارضی مانند حفظ حریم خصوصی، شفافیت الگوریتمی و شمول‌پذیری اجتماعی، به‌ویژه در شهرهایی با رشد سریع جمعیت و محدودیت منابع، هنوز به اندازه کافی بررسی نشده است (Islam, 2025; Mahadeva, 2025). این مسئله می‌تواند خطر بازتولید نابرابری‌های موجود را افزایش دهد؛ زیرا سوگیری الگوریتمی، نابرابری در دسترسی به داده و تفاوت در ظرفیت‌های فناورانه ممکن است موجب حذف یا به حاشیه رانده شدن گروه‌های آسیب‌پذیر در فرآیندهای تصمیم‌گیری شهری شود (Choi, 2026; Air & Fahim, 2025).

یکی دیگر از موضوعات مهم در ادبیات، همکاری میان‌رشته‌ای و ادغام دانش است. مطالعات مختلف بر این نکته تأکید دارند که پیچیدگی مسائل زیست‌محیطی و شهری، نیازمند عبور از مرزهای سنتی میان رشته‌ها و ایجاد تعامل میان معماری، علوم شهری، بوم‌شناسی، علم داده، مهندسی و مطالعات سیاستی است (Hensel, 2022; Hensel et al., 2022). در این چارچوب، برخی پژوهش‌ها مدل‌های مفهومی یکپارچه‌ای ارائه کرده‌اند که تلاش می‌کنند ابعاد اکولوژیکی، فناورانه و اجتماعی پایداری را در کنار یکدیگر قرار دهند (Bibri, 2021). همچنین، مطالعات مرتبط با آزمایش‌های «زندگی شهری مشارکتی» نشان داده‌اند که ترکیب فناوری، حکمرانی و مشارکت اجتماعی می‌تواند مسیر توسعه شهرهای هوشمند و مبتنی بر اقتصاد چرخشی را تقویت کند (Velasquez-Mendez et al., 2025).

باوجود این تأکید نظری بر میان‌رشته‌ای بودن، شواهد نشان می‌دهد که همکاری عملی میان حوزه‌های مختلف همچنان محدود است. بسیاری از جوامع پژوهشی همچنان به‌صورت جزیره‌ای فعالیت می‌کنند و پایگاه‌های دانشی پراکنده، مانع شکل‌گیری چارچوب‌های جامع و قابل‌تعمیم شده‌اند (Hensel, 2022; Bibri et al., 2024). علاوه بر این، تعامل ناکافی میان توسعه‌دهندگان فناوری، سیاست‌گذاران، متخصصان طراحی و کاربران نهایی، فرآیند تبدیل نوآوری‌های هوش مصنوعی به راهکارهای شهری مقیاس‌پذیر را با مشکل مواجه کرده است (Mazzetto, 2024; Mahadeva, 2025). پیچیدگی ادغام داده‌های چندمقیاسی و چنددامنه‌ای نیز همچنان یکی از موانع اصلی تحقق رویکردهای یکپارچه در این حوزه محسوب می‌شود (Hensel et al., 2022).

یکی از چالش‌های بنیادین در مسیر توسعه و استقرار گسترده سامانه‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در معماری و شهرسازی پایدار، کیفیت داده‌ها، قابلیت همکاری و مقیاس‌پذیری فناوری‌ها است. ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که پیشرفت فناوری‌های حسگر، اینترنت

اشیا و کلان‌داده، ظرفیت قابل توجهی برای تولید مجموعه‌های داده غنی و چندلایه فراهم کرده است؛ داده‌هایی که امکان پایش دقیق شرایط محیطی، تحلیل الگوهای پیچیده و توسعه مدل‌های پیش‌بینانه را در مقیاس‌های مختلف ایجاد می‌کنند (Parlapalli et al., 2025; Goel & Gupta, 2024; Mohammed et al., 2023). در همین راستا، بسیاری از مطالعات بر اهمیت توسعه پلتفرم‌های قابل همکاری، معماری‌های داده استاندارد و زیرساخت‌های یکپارچه برای پشتیبانی از استقرار مقیاس‌پذیر هوش مصنوعی تأکید کرده‌اند (Morkunaite et al., 2025; Cordeiro et al., 2025). همچنین، رویکردهایی مانند یادگیری مشارکتی و روش‌های حفظ حریم خصوصی داده‌ها، به‌عنوان راهکارهایی برای کاهش محدودیت‌های ناشی از حکمرانی داده و افزایش امکان استفاده مشترک از اطلاعات مطرح شده‌اند (Islam, 2025).

با وجود این ظرفیت‌ها، تحلیل انتقادی مطالعات نشان می‌دهد که مسئله داده همچنان یکی از مهم‌ترین موانع تحقق معماری و شهرسازی هوشمند پایدار محسوب می‌شود. ناهمگونی داده‌ها، تفاوت در کیفیت اطلاعات، نبود استانداردهای جهانی و محدودیت در قابلیت انتقال داده میان سامانه‌های مختلف، امکان ادغام و استفاده مجدد مؤثر از داده‌ها را کاهش داده است (Mazzetto, 2024; Zhu & Jin, 2025). علاوه بر این، بسیاری از مدل‌های هوش مصنوعی به حجم بالایی از داده‌های دقیق و باکیفیت وابسته هستند؛ در حالی که چنین زیرساخت‌هایی در بسیاری از مناطق، به‌ویژه کشورهای درحال‌توسعه، به‌صورت برابر در دسترس نیستند (Islam, 2025; Mahadeva, 2025). این مسئله، همراه با نیازهای بالای محاسباتی و مصرف انرژی ناشی از توسعه و اجرای مدل‌های پیچیده، چالش‌هایی جدی برای مقیاس‌پذیری و پایداری خود فناوری هوش مصنوعی ایجاد می‌کند (Zavaleta, 2025; Ranpara, 2025). همچنین، شکاف دیجیتال و تفاوت در ظرفیت‌های فناورانه میان مناطق مختلف می‌تواند موجب تشدید نابرابری در پذیرش و بهره‌برداری از راهکارهای مبتنی بر هوش مصنوعی شود (Erifeta, 2025).

در سال‌های اخیر، ظهور ابزارهای نوین هوش مصنوعی، به‌ویژه هوش مصنوعی مولد و مدل‌های زبانی بزرگ، مسیرهای جدیدی را برای تحول فرآیندهای طراحی معماری و برنامه‌ریزی شهری ایجاد کرده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که این فناوری‌ها می‌توانند در مراحل اولیه طراحی، تولید سناریوهای جایگزین، ارزیابی گزینه‌های طراحی و افزایش مشارکت شهروندان نقش مؤثری ایفا کنند (Li et al., 2026; Figliola et al., 2025; Figliola & Barberio, 2025). هوش مصنوعی مولد با فراهم‌کردن امکان ایجاد جریان‌های کاری خلاق و داده‌محور، ظرفیت ترکیب هم‌زمان ملاحظات عملکردی، زیست‌محیطی و زیبایی‌شناختی را افزایش داده است (Li et al., 2026; Figliola et al., 2025). همچنین، توانایی این فناوری‌ها در تقویت خلاقیت انسانی و بهبود فرآیند تصمیم‌گیری، به‌عنوان تغییری پارادایمی در مفهوم هوش معماری مطرح شده است (Zavaleta, 2025).

بااین‌حال، ادغام هوش مصنوعی مولد در حوزه معماری پایدار با مجموعه‌ای از چالش‌های جدید همراه است. نگرانی‌هایی مانند وابستگی بیش از حد به اتوماسیون، کاهش نقش قضاوت انسانی، عدم شفافیت فرآیندهای تولید محتوا و امکان بازتولید سوگیری‌های موجود در داده‌های آموزشی، از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های مطرح‌شده در مطالعات اخیر هستند (Zavaleta, 2025; Air & Fahim, 2025; Figliola & Barberio, 2025). افزون بر این، حوزه کاربرد هوش مصنوعی مولد در پایداری هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارد و از نظر اعتبارسنجی تجربی، چارچوب‌های اجرایی و ارزیابی بلندمدت، محدودیت‌های قابل توجهی دارد (Figliola et al., 2025; Figliola & Barberio, 2025). همچنین، ردپای زیست‌محیطی ناشی از آموزش و استقرار مدل‌های بزرگ هوش مصنوعی، به‌ویژه مصرف انرژی و منابع محاسباتی بالا، یکی از موضوعات مهمی است که نیازمند توجه بیشتر در پژوهش‌های آینده است (Air & Fahim, 2025).

در مجموع، تلفیق و تحلیل انتقادی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات موجود در یک نقطه مشترک بر ظرفیت بالای هوش مصنوعی و فناوری‌های داده‌محور برای تحول معماری پایدار و طراحی شهری توافق دارند. این همگرایی عمدتاً در زمینه‌هایی مانند بهینه‌سازی انرژی، افزایش تاب‌آوری، بهبود تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و توسعه سیستم‌های شهری هوشمند مشاهده می‌شود (Li et

al., 2026; Bibri & Huang, 2025; Athas & Nawari, 2026; Parlapalli et al., 2025; Bibri et al., 2024). بااین‌حال، واگرایی‌های قابل توجهی نیز در ادبیات وجود دارد که عمدتاً ناشی از تفاوت در مقیاس مطالعات، اهداف پژوهش، رویکردهای روش‌شناختی و میزان بلوغ فناوری در زمینه‌های مختلف است. درحالی‌که برخی مطالعات بر توسعه ابزارهای فناورانه و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تمرکز دارند، برخی دیگر بر ضرورت ایجاد چارچوب‌های جامع‌تر تأکید می‌کنند که ابعاد اجتماعی، اخلاقی، حکمرانی و زیست‌محیطی را هم‌زمان در نظر بگیرد (Islam, 2025; Air & Fahim, 2025; Bibri, 2021).

براین‌اساس، مهم‌ترین شکاف موجود در ادبیات را می‌توان فقدان یک چارچوب یکپارچه و میان‌رشته‌ای دانست که بتواند ارتباط میان قابلیت‌های فناورانه هوش مصنوعی، الزامات پایداری، سازوکارهای حکمرانی و زمینه‌های اجتماعی – فضایی را در مقیاس‌های مختلف معماری و شهری تبیین کند. اگرچه چارچوب‌های متعددی برای استفاده از هوش مصنوعی در طراحی پایدار پیشنهاد شده‌اند، بسیاری از آن‌ها یا بر ابعاد فنی تمرکز دارند یا در سطح مفهومی باقی مانده‌اند و کمتر به نحوه تعامل میان فناوری، انسان، محیط و ساختارهای تصمیم‌گیری شهری پرداخته‌اند (Bibri et al., 2024; Bibri, 2021; Bibri & Krogstie, 2020)؛ بنابراین، مسیر آینده پژوهش نیازمند توسعه رویکردهایی است که ضمن بهره‌گیری از ظرفیت‌های محاسباتی و پیش‌بینانه هوش مصنوعی، اصول انسان‌محوری، عدالت، شفافیت، مقیاس‌پذیری و پایداری بلندمدت را نیز در فرآیند طراحی و مدیریت محیط ساخته‌شده ادغام کنند.

٤-٤- شناسایی محورهای اصلی مطالعات

تحلیل مضمون انجام‌شده بر روی منابع علمی منتخب نشان داد که معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی صرفاً یک رویکرد فناورانه نیست، بلکه چارچوبی چندلایه و میان‌رشته‌ای است که ابعاد فنی، زیست‌محیطی، مدیریتی و اجتماعی را به‌صورت هم‌زمان در بر می‌گیرد. در فرایند کدگذاری باز، بیش از ۱۵۰ کد اولیه استخراج شد که پس از بازبینی، ادغام و مقایسه مداوم، در قالب چهار مضمون اصلی و مجموعه‌ای از مضامین فرعی سازمان‌دهی گردید (جدول ۳).

جدول ۳: مضامین اصلی، مضامین فرعی و نمونه کدهای استخراج‌شده از تحلیل مضمون

مضامین اصلی	مضامین فرعی	نمونه کدهای باز استخراج‌شده
زیرساخت داده‌محور و هوشمندسازی معماری	جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ	داده‌های بلادرنگ، پایش لحظه‌ای، مانیتورینگ محیطی، جمع‌آوری مداوم داده
	اینترنت اشیا و شبکه حسگرها	اینترنت اشیا، شبکه حسگر، سنسور دما، سنسور رطوبت، سنسور کیفیت هوا
	سیستم‌های مدیریت هوشمند ساختمان	اتوماسیون ساختمان، کنترل هوشمند، رابط برنامه‌نویسی کاربردی هوشمند
	یکپارچه‌سازی داده و مدل‌سازی دیجیتال	مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، دوقلوی دیجیتال، یکپارچه‌سازی داده‌ها، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان
تحلیل هوشمند و تصمیم‌گیری تطبیقی	تحلیل داده‌های بزرگ	تحلیل داده‌های بزرگ، تحلیل پیش‌بینانه، پردازش داده
	الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین	یادگیری عمیق، یادگیری ماشین، تحلیل الگو
	پیش‌بینی و سناریوسازی بحران	پیش‌بینی مصرف انرژی، سناریوهای اقلیمی، تحلیل ریسک، تشخیص ناهنجاری
	کنترل تطبیقی و تصمیم‌گیری هوشمند	کنترل تطبیقی، تهویه مطبوع هوشمند، تصمیم‌گیری خودکار، سیستم‌های پاسخگو
	یادگیری و بازخورد مستمر	نگهداری پیش‌بینانه، حلقه بازخورد، یادگیری مستمر، بهینه‌سازی عملکرد
پایداری و تاب‌آوری زیست‌محیطی	بهینه‌سازی مصرف انرژی و منابع	بهره‌وری انرژی، کاهش مصرف آب، بهینه‌سازی منابع، انرژی هوشمند
	کاهش آلودگی و ردپای کربن	کاهش کربن‌دی‌اکسید، هوش مصنوعی سبز، معماری سبز، کاهش آلاینده‌ها
	تاب‌آوری اقلیمی و مدیریت بحران	تاب‌آوری شهری، سازگاری اقلیمی، مدیریت بحران، پاسخ به بلایا

حکمرانی، تعامل و بستر اجرایی	اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار	اقتصاد چرخشی، مصالح پایدار، چرخه عمر ساختمان، توسعه پایدار
	حکمرانی داده و سیاست‌گذاری	حکمرانی داده، سیاست‌گذاری هوشمند، استانداردسازی، مدیریت داده
	امنیت و حریم خصوصی	امنیت سایبری، حریم خصوصی، حفاظت داده، اعتماد دیجیتال
	پذیرش اجتماعی و مشارکت ذی‌نفعان	تعامل اجتماعی، مشارکت کاربران، طراحی انسان‌محور، پذیرش فناوری
	چالش‌های اقتصادی و اجرایی	هزینه پیاده‌سازی، زیرساخت ارتباطی، کمبود نیروی متخصص، شکاف دیجیتال
	همکاری بین‌رشته‌ای	همکاری تخصصی، یکپارچگی میان‌رشته‌ای، مدیریت دانش، هماهنگی نهادی

شکل ۱: مدل مفهومی از مضامین استخراج شده

یافته‌ها نشان می‌دهد که نخستین لایه مفهومی، «زیرساخت داده‌محور و هوشمندسازی معماری» است که بستر اصلی عملکرد سیستم‌های هوشمند را تشکیل می‌دهد. این مضمون بر نقش اینترنت اشیا، شبکه‌های حسگر، داده‌های بلادرنگ، سیستم‌های مدیریت هوشمند ساختمان و دوقلوهای دیجیتال در پایش و یکپارچه‌سازی اطلاعات محیطی تأکید دارد. در این چارچوب، ساختمان از یک کالبد ایستا به یک سامانه پویا و داده‌محور تبدیل می‌شود که قابلیت دریافت و پردازش مستمر داده‌های محیطی را دارد.

دومین مضمون اصلی، «تحلیل هوشمند و تصمیم‌گیری تطبیقی» است که به نقش هوش مصنوعی، تحلیل داده‌های بزرگ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در استخراج الگوها، پیش‌بینی بحران‌ها و کنترل هوشمند سیستم‌های ساختمانی اشاره دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که تحلیل هوشمند داده‌ها امکان مدیریت پیش‌فعال بحران‌های زیست‌محیطی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود عملکرد ساختمان را فراهم می‌سازد. همچنین، وجود حلقه‌های بازخورد و یادگیری مستمر موجب می‌شود سیستم به‌مرور زمان هوشمندتر و کارآمدتر شود.

سومین مضمون، «پایداری و تاب‌آوری زیست‌محیطی» است که به‌عنوان هدف نهایی معماری داده‌محور شناسایی شد. این مضمون شامل بهینه‌سازی مصرف انرژی و منابع، کاهش ردپای کربن، ارتقای تاب‌آوری اقلیمی و حرکت به سمت اقتصاد چرخشی است. تحلیل منابع نشان داد که فناوری‌های هوشمند در صورت یکپارچگی با اصول پایداری می‌توانند نقش مؤثری در کاهش آلودگی، مدیریت مصرف آب و انرژی، و افزایش آمادگی شهرها در برابر بحران‌های اقلیمی ایفا کنند.

چهارمین مضمون اصلی، «حکمرانی، تعامل و بستر اجرایی» است که ابعاد مدیریتی، اجتماعی و سیاستی معماری داده‌محور را پوشش می‌دهد. یافته‌ها نشان داد که تحقق معماری هوشمند پایدار بدون وجود چارچوب‌های حکمرانی داده، امنیت اطلاعات، مشارکت ذی‌نفعان، زیرساخت‌های ارتباطی مناسب و همکاری‌های میان‌رشته‌ای امکان‌پذیر نیست. همچنین چالش‌هایی نظیر هزینه‌های اولیه بالا، شکاف دیجیتال، کمبود نیروی متخصص و مسائل مربوط به حریم خصوصی از مهم‌ترین موانع اجرایی این رویکرد محسوب می‌شوند.

بر اساس مضامین استخراج‌شده، چارچوب مفهومی پژوهش نشان می‌دهد که معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی از طریق یک چرخه عملکردی شامل «جمع‌آوری داده ← تحلیل هوشمند ← تصمیم‌گیری تطبیقی ← بازخورد و یادگیری مستمر» عمل می‌کند. این چرخه در بستر زیرساخت‌های فناورانه، اهداف پایداری زیست‌محیطی و الزامات حکمرانی هوشمند شکل گرفته و زمینه‌ساز توسعه ساختمان‌ها و شهرهای هوشمند، پایدار و تاب‌آور خواهد بود.

۵-بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تبیین ابعاد معماری داده‌محور در عصر هوش مصنوعی و ارائه چارچوبی مفهومی برای پایداری زیست‌محیطی انجام شد. تحلیل نظام‌مند ادبیات و تحلیل مضمون نشان داد که معماری داده‌محور صرفاً یک تحول فناورانه در حوزه طراحی و مدیریت ساختمان نیست، بلکه بیانگر تغییری پارادایمی در نحوه طراحی، مدیریت و تعامل با محیط‌های ساخته‌شده است. در این رویکرد، داده، هوش مصنوعی و فناوری‌های هوشمند به عناصر بنیادینی تبدیل می‌شوند که امکان پایش، تحلیل، تصمیم‌گیری و انطباق مستمر با شرایط محیطی را فراهم می‌کنند. برخلاف الگوهای سنتی معماری که تصمیم‌گیری در آن‌ها عمدتاً مبتنی بر تجربه، الگوهای ثابت و واکنش‌های پسینی بود، معماری داده‌محور با اتکا بر داده‌های بلادرنگ و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، ظرفیت پیش‌بینی، تحلیل و مداخله پیش‌فعال در شرایط محیطی را فراهم می‌آورد و ساختمان را از یک کالبد منفعل به سامانه‌ای هوشمند، پاسخگو و یادگیرنده تبدیل می‌کند.

یافته‌های پژوهش در قالب چهار مضمون اصلی شامل «زیرساخت داده‌محور و هوشمندسازی معماری»، «تحلیل هوشمند و تصمیم‌گیری تطبیقی»، «پایداری و تاب‌آوری زیست‌محیطی» و «حکمرانی، تعامل و بستر اجرایی» سازمان‌دهی شد. بررسی این مضامین نشان داد که تحقق معماری داده‌محور پایدار مستلزم تعامل هم‌زمان زیرساخت‌های فناورانه، تحلیل هوشمند داده‌ها، اهداف پایداری و سازوکارهای مدیریتی و اجتماعی است. در این چارچوب، فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، حسگرهای محیطی، سامانه‌های مدیریت هوشمند ساختمان، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و دوقلوهای دیجیتال، بستر لازم برای گردآوری و یکپارچه‌سازی مستمر داده‌های محیطی و عملکردی را فراهم می‌کنند؛ درحالی‌که تحلیل داده‌های بزرگ، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و سامانه‌های کنترل تطبیقی این داده‌ها را به دانش قابل استفاده برای تصمیم‌گیری تبدیل می‌کنند. نتیجه این فرایند، شکل‌گیری چرخه‌ای پویا شامل پایش، تحلیل، تصمیم‌گیری، بازخورد و یادگیری مستمر است که امکان بهینه‌سازی عملکرد ساختمان‌ها و انطباق آن‌ها با شرایط متغیر محیطی را فراهم می‌سازد.

تحلیل مضامین نشان داد که نقش هوش مصنوعی در معماری آینده فراتر از اتوماسیون فرایندها است و در ایجاد ظرفیت یادگیری، پیش‌بینی و تصمیم‌سازی هوشمند تجلی می‌یابد. بهره‌گیری از تحلیل داده‌های بزرگ، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، امکان شناسایی الگوهای مصرف، پیش‌بینی مخاطرات زیست‌محیطی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت کارآمد منابع

را فراهم می‌کند. ازاین‌رو، معماری آینده را می‌توان معماری شناختی و خودتنظیم‌گری دانست که قادر است بر اساس داده‌های واقعی، عملکرد خود را به طور مستمر اصلاح کرده و در برابر تغییرات محیطی و نیازهای کاربران واکنش هوشمندانه نشان دهد. وجود حلقه‌های بازخورد و یادگیری مستمر نیز موجب می‌شود این سامانه‌ها به‌مرور زمان کارآمدتر، دقیق‌تر و پایدارتر شوند.

یکی دیگر از یافته‌های کلیدی پژوهش، جایگاه محوری پایداری و تاب‌آوری زیست‌محیطی در چارچوب معماری داده‌محور بود. یافته‌ها نشان دادند که ارزش واقعی فناوری‌های هوشمند زمانی آشکار می‌شود که در خدمت کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار کربن، مدیریت بهینه منابع، افزایش تاب‌آوری اقلیمی و ارتقای کیفیت محیط ساخته‌شده قرار گیرند. از این منظر، داده و هوش مصنوعی هدف نهایی نیستند، بلکه ابزارهایی برای تحقق توسعه پایدار محسوب می‌شوند؛ بنابراین، پیوند میان فناوری و پایداری باید از رویکردی صرفاً ابزارگرایانه فراتر رفته و به بخشی از منطق طراحی، بهره‌برداری و مدیریت معماری تبدیل شود. چنین رویکردی می‌تواند زمینه تحقق اقتصاد چرخشی، بهینه‌سازی چرخه عمر ساختمان و توسعه شهرهای کم‌کربن و تاب‌آور را فراهم آورد.

موفقیت معماری داده‌محور، با وجود اتکای گسترده به فناوری، صرفاً به توسعه ابزارهای هوشمند وابسته نیست، بلکه مستلزم فراهم بودن بسترهای نهادی، مدیریتی و اجتماعی مناسب است. تحلیل مضامین نشان داد که حکمرانی داده، امنیت اطلاعات، حفظ حریم خصوصی، استانداردسازی، سیاست‌گذاری هوشمند، مشارکت ذی‌نفعان و همکاری‌های میان‌رشته‌ای از مهم‌ترین پیش‌نیازهای استقرار این رویکرد به شمار می‌روند. این یافته بیانگر آن است که تحقق معماری داده‌محور نیازمند نگاهی فرابخشی است؛ زیرا حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌ها نیز بدون وجود زیرساخت‌های ارتباطی مناسب، چارچوب‌های حکمرانی کارآمد و پذیرش اجتماعی، نمی‌توانند به طور مؤثر در محیط‌های واقعی به کار گرفته شوند. افزون بر این، هزینه‌های اولیه استقرار سامانه‌های هوشمند، شکاف دیجیتال، پراکندگی و ناهمگونی داده‌ها و کمبود نیروی انسانی متخصص همچنان از مهم‌ترین چالش‌های توسعه این رویکرد به شمار می‌روند و ضرورت برنامه‌ریزی راهبردی، سرمایه‌گذاری هدفمند و تقویت آموزش‌های تخصصی را بیش از پیش آشکار می‌سازند.

از منظر نظری، پژوهش حاضر کوشید با تلفیق ادبیات معماری هوشمند، هوش مصنوعی و پایداری زیست‌محیطی، چارچوبی مفهومی برای تبیین روابط میان این حوزه‌ها ارائه دهد. درحالی‌که بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین، معماری هوشمند را عمدتاً از منظر فناوری، دیجیتالی‌سازی یا مدیریت انرژی بررسی کرده‌اند، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که معماری داده‌محور پدیده‌ای چندبعدی است که ابعاد فنی، زیست‌محیطی، مدیریتی و اجتماعی آن به‌صورت درهم‌تنیده بر یکدیگر اثر می‌گذارند. چارچوب مفهومی ارائه‌شده، این تعاملات را در قالب یک نظام پویا تبیین می‌کند و می‌تواند مبنایی نظری برای توسعه پژوهش‌های آینده در حوزه معماری هوشمند، شهرهای داده‌محور، دوقلوهای دیجیتال و طراحی پایدار باشد.

از منظر کاربردی نیز نتایج این پژوهش می‌تواند برای معماران، برنامه‌ریزان شهری، مدیران شهری و سیاست‌گذاران در طراحی، اجرا و مدیریت ساختمان‌ها و شهرهای هوشمند پایدار راهگشا باشد. بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، دوقلوهای دیجیتال، تحلیل کلان‌داده‌ها و سامانه‌های هوش مصنوعی، ظرفیت بهینه‌سازی مصرف انرژی، مدیریت هوشمند منابع، پایش مستمر عملکرد ساختمان‌ها، پیش‌بینی مخاطرات زیست‌محیطی و ارتقای تاب‌آوری شهری را فراهم می‌کند. همچنین، چارچوب پیشنهادی این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای تدوین سیاست‌های توسعه شهرهای هوشمند، تدوین استانداردهای حکمرانی داده و هدایت سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد.

در مجموع، سنتز نظام‌مند مطالعات نشان می‌دهد که معماری داده‌محور پایدار، حاصل هم‌افزایی میان زیرساخت‌های داده‌محور، قابلیت‌های هوش مصنوعی، اهداف پایداری و سازوکارهای حکمرانی است و آینده معماری و شهرسازی بیش از هر زمان دیگری به توانایی بهره‌گیری هوشمندانه از این تعامل وابسته خواهد بود. از این منظر، معماری آینده نه‌تنها باید هوشمند و متصل باشد، بلکه لازم است توانایی یادگیری، سازگاری و پاسخ‌گویی مستمر به تغییرات محیطی، بحران‌های اقلیمی و نیازهای متغیر کاربران را نیز داشته

باشد. براین‌اساس، مفهوم «معماری داده‌محور پایدار» را می‌توان یکی از مهم‌ترین مسیرهای تحول معماری و شهرسازی در عصر هوش مصنوعی دانست.

باوجود جامعیت نسبی چارچوب ارائه‌شده، این پژوهش مانند هر مطالعه مروری دیگری با محدودیت‌هایی همراه است. اتکای آن به تحلیل مفهومی و منابع کتابخانه‌ای، امکان ارزیابی تجربی روابط میان مؤلفه‌های چارچوب را فراهم نکرده است. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده، چارچوب مفهومی ارائه‌شده را در پروژه‌های واقعی معماری و شهرسازی آزمون و اعتبارسنجی کنند و نقش فناوری‌های نوظهور، از جمله هوش مصنوعی مولد، رایانش لبه‌ای، بلاکچین و سایر فناوری‌های هوشمند را در توسعه معماری داده‌محور پایدار و ارتقای عملکرد زیست‌محیطی محیط‌های ساخته‌شده مورد بررسی قرار دهند.

۶-تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

۷-مشارکت نویسندگان

نویسنده اول مسئول ایده‌پردازی پژوهش، طراحی مطالعه، جست‌وجو و غربالگری منابع، تحلیل و تفسیر یافته‌ها، نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله و بازنگری و ویرایش متن بوده است. نویسنده دوم در طراحی مطالعه، نظارت و راهنمایی علمی، بازنگری انتقادی و اصلاح محتوای مقاله مشارکت داشته است. هر دو نویسنده در تدوین نهایی مقاله مشارکت داشته، مسئولیت کامل محتوای علمی آن را پذیرفته‌اند و نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

۹-بیانیه استفاده از هوش مصنوعی

در تهیه این مقاله از چت جی‌پی‌تی[1] برای ترجمه و ویرایش نگارشی چکیده انگلیسی و کمک به تهیه شکل ۱ بر اساس محتوای تدوین‌شده توسط نویسندگان استفاده شده است. همچنین، از سای‌اسپیس[2] برای کمک به جست‌وجو، شناسایی و پایش منابع علمی مرتبط استفاده شده است. تمامی مراحل انتخاب، ارزیابی انتقادی، تحلیل و تفسیر منابع، تدوین محتوای علمی، نتیجه‌گیری‌ها و تأیید نهایی مقاله توسط نویسندگان انجام شده است. از هیچ ابزار هوش مصنوعی به‌عنوان نویسنده مقاله استفاده نشده و مسئولیت کامل محتوای علمی مقاله بر عهده نویسندگان است.

۱۰-منابع

1- Addad, M., & Al-Taani, S. (2024). Leveraging AI for Energy-Efficient Smart Cities: Architectural and Urban Planning Solutions for Sustainable Growth—A Comparative Case Study of Amman City and International Examples. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, *18*(12), 620-632. https://doi.org/10.17265/1934-7359/2024.12.006

2- Air, D. K., & Fahim, M. R. (2025). The Role of Generative AI in Sustainable Smart Cities: Opportunities and Ethical Challenges1. https://doi.org/10.5281/zenodo.17150519

3- Ali, E., Mansour, A., Abdelkader, E. M., Elshaboury, N., & Zayed, T. (2025). Digital twin for climate resilience: Transforming smart cities for a sustainable future. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLVIII-G-2025*, 139-145. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlviii-g-2025-139-2025

4- Ali, K. (2026). AI and green architecture: The new skillset for climate-smart buildings. 1st Global Talk: Eco-Leaders of Tomorrow, Green Horizons & Future Skills. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.18176872

5- Allam, Z., Jones, D., & Thondoo, M. (2020). *Urban Resilience and Climate Change*. Palgrave Studies in Climate Resilient Societies. Palgrave Macmillan, Cham. 1–32. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40727-8_1

6- Al-Sehrawy, R., & Kumar, B. (2020). Digital Twins in Architecture, Engineering, Construction and Operations. A Brief

1 ChatGPT (OpenAI)
2 SciSpace

Review and Analysis. *In International conference on computing in civil and building engineering (pp. 924-939)*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_64

7- Amen, M. A. (2024). Ai-driven sustainable habitat design: Key policy frameworks and ethical safeguards. *Smart Design Policies Journal*, *1*(1), 23-32. https://doi.org/10.38027/smart-v1n1-4

8- Athas, S. I. A., & Nawari, N. O. (2026). Ai-bim-driven sustainable architectural design: A systematic literature review. *Computing in Civil Engineering 2025: Computational and Intelligent Technologies*, 529-537. https://doi.org/10.1061/9780784486436.056

9- Aziz, S., Sharun, S. M., Wagiman, K. R., & Moorapun, C. (2024). Architectural intelligence (arcai) evolution and progress on sustainable smartscapes planning for the cities of tomorrow. *Environment-behaviour proceedings journal, 9* (29), 107-114. https://doi.org/10.21834/e-bpj.v9i29.6023

10- Barrico, L., & Castro, P. (2018). *Sustainable Urban Expansion to Make Climate-Resilient Cities: The 21st Century Challenge*. In *Urban resilience for risk and adaptation governance: Theory and practice* (pp. 75-91). Cham: Springer International Publishing. 75–91. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76944-8_6

11- Bibri, S. E. (2020). *Data-Driven Smart Sustainable Cities: A Conceptual Framework for Urban Intelligence Functions and Related Processes, Systems, and Sciences* In *Advances in the Leading Paradigms of Urbanism and their Amalgamation: Compact Cities, Eco–Cities, and Data–Driven Smart Cities* (pp. 143-173). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41746-8_6

12- Bibri, S. E. (2021). A novel model for data-driven smart sustainable cities of the future: the institutional transformations required for balancing and advancing the three goals of sustainability. *Energy Informatics*, *4*(1), 1–37. https://doi.org/10.1186/S42162-021-00138-8

13- Bibri, S. E. (2021). The underlying components of data-driven smart sustainable cities of the future: a case study approach to an applied theoretical framework. *European Journal of Futures Research*, *9*(1), 1–14. https://doi.org/10.1186/S40309-021-00182-3

14- Bibri, S. E., & Huang, J. (2025). AI and AI-powered digital twins for smart, green, and zero-energy buildings: A systematic review of leading-edge solutions for advancing environmental sustainability goals. *Environmental Science & Ecotechnology*, *28*, 100628. https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100628

15- Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2020). Data-driven smart sustainable cities of the future: A novel model of urbanism and its core dimensions, strategies, and solutions. *Journal of Futures Studies, 25(2). 77-94*. https://doi.org/10.6531/JFS.202012_25(2).0009

16- Bibri, S. E., Alexandre, A., Sharifi, A., & Krogstie, J. (2023). Environmentally sustainable smart cities and their converging AI, IoT, and big data technologies and solutions: An integrated approach to an extensive literature review. *Energy Informatics*, *6*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s42162-023-00259-2

17- Bibri, S. E., Huang, J., Jagatheesaperumal, S. K., & Krogstie, J. (2024). The Synergistic Interplay of Artificial Intelligence and Digital Twin in Environmentally Planning Sustainable Smart Cities: A Comprehensive Systematic Review. *Environmental Science & Ecotechnology, 20, 100433.*. https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100433

18- Bolón-Canedo, V., Morán-Fernández, L., Cancela, B., & Alonso-Betanzos, A. (2024). A review of green artificial intelligence: Towards a more sustainable future. *Neurocomputing*, *599*, 128096. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128096

19- Bushuyev, S., Murzabekova, S., Khussainova, M., Saidullayev, R., Бушуєв, Д., & Kolesnikova, K. (2025). Conceptual framework for sustainable development projects in a bani environment using AI tools. *Procedia Computer Science, 272* , 514-521. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.10.240

20- Chen, X., Despeisse, M., & Johansson, B. (2020). Environmental Sustainability of Digitalization in Manufacturing: A Review. *Sustainability*, *12*(24), 10298. https://doi.org/10.3390/su122410298

21- Choi, H. S. (2026). AI and Urban Design: Fostering Human-Centred and Sustainable Cities: AI and Urban Design: Fostering Human-Centred and Sustainable Cities. *Urbanie & Urbanus*, *14*(1). https://doi.org/10.55412/13.05

22- Cordeiro, D., Song, J., Braghetto, K. R., Kon, F., & Amblard, F. (2025). *Urban Digital Twins for Megalopolises: Requirements, Challenges and Opportunities*. In *Workshop em Engenharia de Software para Gêmeos Digitais (SEDT)* (pp. 7-16). SBC. https://doi.org/10.5753/sedt.2025.14274

23- Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, *26*, 58–83. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005

24- Erifeta, K. (2025). Climate-resilient urban energy: Integrating governance, finance, digital twins, circular water–energy, and nature-based solution. *International journal of environmental sciences, 8* (2), 1-11. https://doi.org/10.47604/ijes.3506

25- Farzaneh, H., Malehmirchegini, L., Bejan, A., Afolabi, T., Mulumba, A., & Daka, P. P. (2021). Artificial intelligence evolution in smart buildings for energy efficiency. *Applied Sciences*, *11*(2), 763. https://doi.org/10.3390/APP11020763

26- Figliola, A., & Barberio, M. (2025). Post-decarbonisation and generative artificial intelligence. Towards a possible methodology. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment, 29* (1), 127-136. https://doi.org/10.36253/techne-16538

27- Figliola, A., Barberio, M., Kantún Montiel, A. L., & Rienzo, P. (2025). *Generative Artificial Intelligence (AI) and Sustainable-Aided Design: Opportunities and Challenges*. In: Berkouk, D., Chatterjee, U., Bouzir, T.A.K., Dhaou, I.B. (eds) Proceedings of the 1st International Conference on Creativity, Technology, and Sustainability . CCTS 2024. Proceedings in Technology Transfer. Springer, Singapore. 409–419. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8588-9_39

28- Gao, M., & Hu, C. (2025). Development of an optimized computer-aided design model with ecological sustainability. *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence, 19* (1), 1-25. https://doi.org/10.4018/ijcini.386842

29- Goel, P. K., & Gupta, V. (2024). Data Symphony: The Role of Big Data and AI in Sustainability. In *Achieving Sustainability with AI Technologies* (pp. 85-106). IGI Global Scientific Publishing, 85-106. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3410-2.ch005

30- Guzmán, E., Tobón, S., Andrés, B., & Requena Torres, M. A. (2025). *AI-Driven Circular Construction: Integrating Social, Economic, and Environmental Dimensions through a Holistic Triple-Bottom-Line Model. In 2025 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC) (pp. 1-10). IEEE.* https://doi.org/10.1109/ice/itmc65658.2025.11106619

31- He, J., Xu, H., Li, X., & Meng, Q. (2024). Research on innovative applications of AI in sustainable architecture: Blueprint for future building technology. Preprints. https://doi.org/10.20944/preprints202412.2175.v1

32- Hemalatha, S., Sridevi, S., Shaik, V. H., Pragadeswaran, S., Garg, P., & Bansal, S. (2025). *Integrating Green Urban Infrastructure With Cyber-Physical System Architectures for Net-Zero, Sustainable Smart City Development* In *2025 IEEE 5th International Conference on ICT in Business Industry & Government (ICTBIG)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ictbig68706.2025.11323838

33- Hensel, D. S., Tyc, J., & Hensel, M. (2022). Data-driven design for architecture and environment integration. *Spool, 9* (1), 19-34. https://doi.org/10.47982/spool.2022.1.02

34- Hensel, M. (2022). The Bigger Picture en Route to Informed Urban Environments: Initiating Linkages Between Sustainability Science, Urban Science, and Architectural Science Through an Inter-and Transdisciplinary Data-Integrated Approach. In *Informed Urban Environments: Data-Integrated Design for Human and Ecology-Centred Perspectives* (pp. 11-25). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03803-7_2

35- Hidalgo, I., Fenández-de_Vega, F., Ceberio, J., Garnica, O., Velasco, J. M., Cortés, J. C., Villanueva, R., & Díaz, J. (2023). Sustainable Artificial Intelligence Systems: An Energy Efficiency Approach. *Authorea Preprints*. https://doi.org/10.36227/techrxiv.24610899.v1

36- Islam, F. A. S. (2025). Artificial intelligence-powered carbon market intelligence and blockchain-enabled governance for climate-responsive urban infrastructure in the global south. *Journal of Engineering Research and Reports, 27* (7), 440-472. https://doi.org/10.9734/jerr/2025/v27i71585

37- Li, J., Shirowzhan, S., Pignatta, G., & Sepasgozar, S. M. E. (2024). Data-driven net-zero carbon monitoring: Applications of geographic information systems, building information modelling, remote sensing, and artificial intelligence for sustainable and resilient cities. *Sustainability, 16* (15), 6285-6285. https://doi.org/10.3390/su16156285

38- Li, L., Yang, X., Liu, S., & Deng, F. (2026). AI-Enabled Sustainable Landscape Design: A Decision-Support Framework Based on "Generative-Critical" Multi-Agent. *Urban Science*, *10*(1), 56. https://doi.org/10.3390/urbansci10010056

39- Mahadeva, M. (2025). Artificial Intelligence-driven Framework for Enhancing Climate Resilience in Urban Infrastructure. *Journal of Recent Activities in Infrastructure Science*, *10*(3), 19–27. https://doi.org/10.46610/jorais.2025.v010i03.003

40- Martin, L., & Perry, F. (2019). *Sustainable Construction Technology Adoption* (pp. 299–316). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00009-2

41- Mazzetto, S. (2024). A Review of Urban Digital Twins Integration, Challenges, and Future Directions in Smart City Development. *Sustainability*, *16*(19), 8337. https://doi.org/10.3390/su16198337

42- Mohammed, M. A., Ahmed, M. A., & Hacimahmud, A. V. (2023). Data-driven sustainability: leveraging big data and machine learning to build a greener future. *Babylonian Journal of Artificial Intelligence*, 2023, 17-23. https://doi.org/10.58496/bjai/2023/005

43- Morkunaite, L., Pupeikis, D., Bocullo, V., Klumbytė, E., Conserva, A., Farinea, C., Bazzica, A., Barmann, P., & Csala, F. (2025). Urban Digital Twin Data Requirements and Reference Architecture for Green Spaces and Ecosystems. In: Jurelionis, A., Fokaides, P.A., Mazzarella, L., Hartmann, T. (eds) Building Digital Twins. BDTIC 2025. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 775. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-09040-9_5

44- Parlapalli, V., Ganeeb, K. K., Bidkar, D. M., Veerapaneni, P. K., Sankiti, S. R., & Harve, B. M. (2025). AI-Powered Smart Cities: Data-Driven Approaches for Urban Innovation and Sustainability. In *2025 International Conference on Communication, Computing, Networking, and Control in Cyber-Physical Systems (CCNCPS)* (pp. 232-237). IEEE. https://doi.org/10.1109/ccncps66785.2025.11135701

45- Pedersen, J., Hughes, R., & Cannaerts, C. (2018). Navigating the Intangible Spatial-Data-Driven Design Modelling in Architecture. In *Humanizing Digital Reality: Design Modelling Symposium Paris 2017* (pp. 431-439). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6611-5_37

46- Płoszaj-Mazurek, M., & Ryńska, E. (2024). Artificial intelligence and digital tools for assisting low-carbon architectural design: Merging the use of machine learning, large language models, and building information modeling for life cycle assessment tool development. *Energies, 17* (12), 2997-2997. https://doi.org/10.3390/en17122997
47- Professner, H., & Rhomberg, H. (2020). *Bauen mit weniger Ressourcen: Mehr Nutzen für mehr Menschen*. In: Sihn-Weber, A., Fischler, F. (eds) CSR und Klimawandel. Management-Reihe Corporate Social Responsibility. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.441–457. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59748-4_31
48- Ranpara, R. (2025). Energy-efficient green AI architectures for circular economies through multi-layered sustainable resource optimization framework. *Discover Sustainability*, *6*(1), 1031,. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01846-x
49- Saheer, L. B., Garbagna, L., & Sasidharan, M. (2025). Systematic review of air quality modeling in digital twins for sustainable green cities. *Discover environment, 3* (1), 199. https://doi.org/10.1007/s44274-025-00412-6
50- Sarker, I. H. (2022). Smart City Data Science: Towards Data-Driven Smart Cities with Open Research Issues. Internet of Things, 19, 100528. https://doi.org/10.20944/preprints202204.0044.v1
51- Singh, A. (2025). Smart Cities in 2025: Creating Sustainable Urban Ecosystems with Predictive Analytics. *Journal of Research and Innovation in Technology, Commerce and Management*, 2(5), 2513-2519 https://doi.org/10.5281/zenodo.15321143
52- Soni, D. K., & Taneja, A. (2025). Building sustainable urban futures with AI and digital twins. *Driving Innovation through AI and Digital Twin for 6G Powered Sustainable Ultra Smart Cities*, 119-137. https://doi.org/10.1002/9781394411320.ch5
53- Sunguroğlu Hensel, D., Tyc, J., & Hensel, M. (2022). Data-driven design for Architecture and Environment Integration. *Spool*, *9*(1), 19–34. https://doi.org/10.47982/spool.2022.1.02
54- Tahmasebinia, F., Lin, L., Wu, S., Kang, Y., & Sepasgozar, S. M. E. (2023). Exploring the Benefits and Limitations of Digital Twin Technology in Building Energy. *Applied Sciences*. *13*(15), 8814. https://doi.org/10.3390/app13158814
55- Talebian, S., Golkarieh, A., Eshraghi, S., Naseri, M., & Naseri, S. (2025). Artificial intelligence impacts on architecture and smart built environments: a comprehensive review. *Advances in Civil Engineering and Environmental Science*, *2*(1), 45-56. https://doi.org/10.22034/acees.2025.488106.1013
56- Ullah, A., Anwar, S. M., Li, J., Nadeem, L., Mahmood, T., Rehman, A., & Saba, T. (2024). Smart cities: The role of Internet of Things and machine learning in realizing a data-centric smart environment. *Complex & Intelligent Systems*, *10*(1), 1607–1637. https://doi.org/10.1007/s40747-023-01175-4
57- Umoh, A. A., Nwasike, C. N., Tula, O. A., Adekoya, O. O., & Gidiagba, J. O. (2024). A review of smart green building technologies: Investigating the integration and impact of AI and IoT in sustainable building designs. *Computer Science & IT Research Journal*, *5*(1), 141-165. https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i1.715
58- Velasquez-Mendez, A., Lozoya-Santos, J. de J., & Jiménez, F. (2025). Validating a Sustainable, Smart, and Circular City Architecture Through Urban Living Lab Experiments. *Urban Science*, *9*(9), 377. https://doi.org/10.3390/urbansci9090377
59- Xu, Y. (2025). AI-Driven Eco-Responsive Building Systems: Machine Learning-Based Adaptive Building Environment and Ecological. *Community Co-evolution Research*. *11*(11s), 1263–1289. https://doi.org/10.64252/vyj20756
60- Zavaleta, J. P. A. (2025). Architectural Intelligence the New Paradigm of Architecture. *International Journal of Bioinformatics and Intelligent Computing*, *4*(2), 123-133. https://doi.org/10.61797/ijbic.v4i2.510
61- Zhu, M., & Jin, J. (2025). Data- Driven Urban Digital Twins and Critical Infrastructure Under Climate Change: A Review of Frameworks and Applications. *Urban Planning*, *10*. https://doi.org/10.17645/up.10109

Research Paper

Development of a Conceptual Framework for Data-Driven Architecture in the Era of Artificial Intelligence with a Focus on Environmental Sustainability

Marziyeh Shahroudi-Kolour *[1], Hojjatollah Rashid-Kolvir [2]

1- Assistant Professor, Department of Architecture, Apadana Institute of Higher Education, Shiraz, Iran. (corresponding author)

M.shahroudi.k@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture & Art, University of Guilan, Rasht, Iran.

hrashid@guilan.ac.ir

Extended Abstract

Aims: Contemporary environmental crises, including climate change, global warming, air pollution, water scarcity, and the increasing frequency of natural disasters, have become among the most serious challenges facing urban societies. The construction industry, as one of the largest consumers of natural resources and energy (accounting for 30–40% of natural resources and approximately 50% of energy consumption), plays a significant role in exacerbating these crises. Traditional architectural and urban management approaches are no longer sufficient to address these complex challenges. In response, emerging technologies such as Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), Big Data Analytics, and Digital Twins offer unprecedented opportunities for intelligent environmental crisis management and the creation of adaptive, self-regulating built environments. However, there remains a lack of a comprehensive conceptual framework that specifically integrates the data-driven dimension of smart architecture with environmental sustainability principles, particularly in the context of developing countries like Iran, where infrastructural, economic, cultural, and technical barriers are more pronounced. This study aims to develop a conceptual framework for data-driven architecture in the AI era, with a strong emphasis on environmental sustainability, to transform buildings and cities into intelligent, resilient, and sustainable systems.

Materials & Methods: This research is qualitative, applied-developmental in purpose, and employs a systematic literature review combined with thematic analysis. Data were collected from credible national and international scientific sources in the domains of smart architecture, AI, IoT, Digital Twins, and environmental sustainability. Keyword searches were conducted in reputable databases, and sources were selected purposively based on relevance, scientific credibility, recency, and focus on data-driven technologies and sustainability. The analysis followed Braun and Clarke's thematic analysis approach. More than 150 initial codes were extracted using MAXQDA software, which were then organized into coherent themes through iterative coding, comparison, and refinement. The process continued until theoretical saturation was reached. Finally, based on the relationships between the identified themes, a conceptual framework was developed illustrating the interaction between data-driven technologies, AI, and sustainability principles in architecture and urban management.

Findings: The findings indicate that data-driven architecture in the AI era is structured around four main themes:

1. Data-driven infrastructure and architectural digitalization (IoT, sensor networks, real-time data, BIM, and Digital Twins);

2. Intelligent analysis and adaptive decision-making (Big Data Analytics, machine learning algorithms, predictive modeling, and feedback loops);
3. Sustainability and environmental resilience (energy and resource optimization, carbon footprint reduction, climate resilience, and circular economy);
4. Governance, interaction, and implementation context (data governance, security, privacy, stakeholder participation, and cross-disciplinary collaboration).

The proposed framework operates through a dynamic cycle of real-time data collection → intelligent analysis → adaptive decision-making → continuous learning. This approach shifts architecture from static, reactive systems to dynamic, cognitive, and self-regulating ecosystems. Critical analysis of the literature reveals significant progress in technological integration (AI + Digital Twins + IoT), yet persistent challenges remain in standardization, scalability, ethical governance, and equitable implementation — particularly in developing contexts. The framework addresses these gaps by emphasizing the synergy between technology and sustainability principles.

Conclusion: This study presents a comprehensive conceptual framework for data-driven architecture in the AI era that integrates technological, environmental, managerial, and social dimensions. By combining IoT, AI, Digital Twins, and sustainability principles, the framework enables the development of smart, sustainable, and resilient buildings and cities. The results demonstrate that successful implementation requires overcoming barriers such as high initial costs, infrastructure limitations, skill gaps, and cultural resistance through strategic policymaking, capacity building, and interdisciplinary collaboration. Future research should focus on empirical testing of the proposed framework in real-world projects and exploring the role of emerging technologies such as Generative AI, edge computing, and blockchain in advancing sustainable data-driven architecture.

Key words: Data-driven architecture; Sustainability; Thematic analysis; Digital twin; Internet of Things; Smart architecture.

This Journal is an open access Journal Licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License

(CC BY 4.0)