

Meta-Analysis of Artificial Intelligence Applications in the Development of Mixed Land Uses in Tehran

Original Article

Navid Ahangari^{1*}

1- Ph.D. in Geography and Urban Planning, Kharazmi University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 2025-07-28

Revised: 2025-08-26

Accepted: 2025-09-18

Keywords

Artificial Intelligence

Meta-Analysis

Mixed Land Uses

Sustainable Development

Tehran

ABSTRACT

Introduction

In recent decades, the diversification of urban land use has emerged as a key pillar of urban sustainability, as traditional planning models based on segregated land uses have proven inadequate in addressing the complex spatial and social needs of contemporary cities. This inadequacy manifests as spatial fragmentation, weakened social interactions, and increased dependence on motorized transportation. In contrast, development based on mixed land use—emphasizing the coexistence of diverse functions within a shared context—enables improved accessibility and spatial efficiency, reduces energy consumption, strengthens social ties, and enhances infrastructure productivity. However, realizing this approach requires precise and multilayered analyses of the city's physical, social, and economic structures, which are unattainable without leveraging advanced technologies such as artificial intelligence (AI). AI, through machine learning algorithms, can simultaneously process spatial and social data to identify hidden patterns and complex correlations. This capability enables data-driven urban planning to design targeted and adaptable frameworks for mixed land use, steering urban policies toward resilience and sustainability. Moreover, mixed land use is not merely a physical solution but a multidimensional tool to enhance social, economic, and cultural resilience in urban spaces, reducing vulnerabilities by boosting regional economies and social interactions. Nonetheless, this vision requires accurate spatial data, advanced analytical tools, and institutionalized participatory mechanisms based on data—elements that are often constrained by technical and institutional limitations in many developing cities. Although smart technologies hold high potential for analyzing spatial complexities, their practical application at large scales remains limited and insufficiently responsive to contextual needs. Therefore, bridging the gap between theoretical capacity and practical application demands structural reforms in legal and administrative systems to establish coordinated, participatory, and future-oriented decision-making and to design sustainable, flexible, and resilient land-use patterns. Finally, given Tehran's demographic and physical challenges, as well as current planning limitations, this research investigates the application of AI in developing mixed land use, with a focus on creating data-driven, multidimensional, and adaptive patterns that address contemporary spatial complexities.

Materials and Methods

This study employs a meta-analytic and systematic review approach to explore the applications of AI in analyzing urban land-use mixtures. It employs path analysis to examine the impact of in-

* Corresponding author: std_navid.ahangari@alumni.khu.ac.ir

dependent variables on mixed land-use development. In the systematic review phase, using PRISMA software and a three-step process, an extensive search was conducted across reputable databases, including Scopus, SpringerLink, Google Scholar, and Semantic Scholar, resulting in the identification of 2,107 articles. After excluding irrelevant studies and applying stricter inclusion/exclusion criteria, the corpus was reduced to 187 and finally to 65 high-quality articles. Data analysis and visual mapping were conducted using VOSviewer software. In the second phase, seven AI application components were identified as independent variables, and five components of mixed land-use development were designated as dependent variables. Their impacts were examined by a purposive sample of 96 experts and specialists. The questionnaire employed a five-point Likert scale, and data were analyzed using structural equation modeling (SEM) with the partial least squares approach (PLS3). Measurement and structural model analyses were performed via SMARTPLS software, confirming the reliability, validity, and significance of the models.

Findings

Descriptive findings reveal that studies on AI applications in mixed urban land use primarily cluster into three domains: land-use and spatial analysis (29 articles), development strategies and management of mixed use (30 articles), and land-use decision-making (7 articles). Geographically, China leads with 40 articles, followed by the United States (12), Europe (9), and Iran (3), reflecting both the global academic focus and existing gaps in AI application for land-use planning. The temporal trend indicates a sharp increase in publications since 2020, peaking in 2024, underscoring the growing scientific interest in smart technologies for addressing urban planning complexities. Keyword co-occurrence analysis underscores the significance of integrated AI approaches in connecting concepts such as anticipatory planning, demographic shifts, and environmental transformations, thereby playing a crucial role in fostering dynamic and adaptable urban systems. AI techniques, including deep learning, genetic algorithms, ensemble learning, and big data analytics, are widely applied in land-use classification and prediction, spatial layout simulation, and land-use allocation optimization. In SEM analysis, seven AI application components and five mixed land-use development components were identified, with measurement models exhibiting factor loadings above 0.4 and acceptable reliability and validity. Structural model fit indices (GoF = 0.739,

$R^2 = 0.716$, $Q^2 = 0.506$) indicate strong explanatory power and predictive accuracy. All paths between independent and dependent variables were significant at the 95% confidence level. The most influential factors were spatial layout modeling and simulation, stakeholder participation and negotiation modeling, and synergy among intelligent algorithms. Other significant paths included land-use prediction and classification, overall AI application, data fusion and ensemble learning, big data and urban trends analysis, and land-use allocation optimization—collectively demonstrating AI's critical role in enhancing mixed urban land use.

Conclusion

Artificial intelligence, through advanced analysis and integration of geographic, social, and environmental data, has created significant capacities for understanding and managing the complexities of mixed urban land uses. Systematic review findings indicate that AI applications are concentrated in spatial and land-use analysis, development strategies, and urban planning decision-making, with notable growth since 2020. Keyword co-occurrence reveals AI as a transformative agent linking environmental, demographic, and anticipatory planning concepts, enabling the transition from traditional to dynamic and forward-looking models. Advanced AI techniques, leveraging multi-source data such as satellite imagery, transportation data, and social networks, have played essential roles in land-use classification, optimization, and simulation, enhancing urban system resilience to environmental and social challenges. Research highlights the importance of socio-cultural dimensions, transparent governance, and algorithmic fairness, advocating for ethical frameworks and interdisciplinary collaboration. Technological constraints, including high computational demands and data challenges, underscore the need for cloud computing and federated learning solutions. Structural equation modeling confirms significant effects of AI components on mixed land-use development in Tehran, notably spatial layout modeling, participatory decision-making facilitation, and intelligent algorithm integration. Overall, AI offers an efficient platform for modeling, prediction, participation, and optimization, substantially improving decision quality and sustainable mixed land-use development in Tehran, while future research must focus on advancing technical infrastructure, ensuring algorithmic justice, and fostering interdisciplinary collaboration.

COPYRIGHTS

©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ahangari N. Meta-Analysis of Artificial Intelligence Applications in the Development of Mixed Land Uses in Tehran. Urban Economics and Planning Vol 6(4):176-191. [In Persian]

DOI: 10.22034/UEP.2025.537527.1680



فرا تحلیل کاربرد هوش مصنوعی در توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی شهر تهران

مقاله پژوهشی

نوید آهانگری^{۱*}

۱- دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تنوع کاربری اراضی شهری به عنوان یکی از ارکان کلیدی پایداری شهری اهمیت یافته است، چرا که مدل‌های سنتی برنامه‌ریزی مبتنی بر تفکیک کاربری‌ها قادر به پاسخ‌گویی به پیچیدگی‌ها و نیازهای فضایی-اجتماعی شهرهای معاصر نبوده‌اند، که این ناکارآمدی به صورت گسست‌های فضایی، تضعیف تعاملات اجتماعی و افزایش وابستگی به حمل‌ونقل موتوری بروز یافته است. در مقابل، توسعه مبتنی بر کاربری ترکیبی با تأکید بر هم‌زیستی عملکردهای گوناگون در یک بستر مشترک، امکان بهبود دسترسی‌پذیری و بهره‌وری فضایی را فراهم می‌آورد و می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد و پیوندهای اجتماعی را تقویت کند و بهره‌وری زیرساخت‌ها را ارتقا دهد؛ ولی تحقق این رویکرد مستلزم تحلیل‌های دقیق و چندلایه از ساختارهای کالبدی، اجتماعی و اقتصادی شهر است، امری که بدون بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی ممکن نیست. هوش مصنوعی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادر است داده‌های مکانی و اجتماعی را به صورت هم‌زمان پردازش کرده و الگوهای پنهان و همبستگی‌های پیچیده را شناسایی کند، که این قابلیت به برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر داده امکان می‌دهد تا ساختارهای هدفمند و انطباق‌پذیر برای کاربری ترکیبی طراحی کند و سیاست‌های شهری را به سوی تاب‌آوری و پایداری سوق دهد. افزون بر این، کاربری ترکیبی نه تنها یک راهکار کالبدی، بلکه ابزاری چندبعدی برای ارتقای تاب‌آوری اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی فضاهای شهری محسوب می‌شود که با تقویت اقتصاد منطقه‌ای و افزایش تعاملات اجتماعی، آسیب‌پذیری‌های شهری را کاهش می‌دهد؛ اما تحقق این چشم‌انداز نیازمند داده‌های دقیق مکانی، ابزارهای تحلیل پیشرفته و نهادینه‌سازی سازوکارهای مشارکتی مبتنی بر داده است که در بسیاری از شهرهای در حال توسعه با محدودیت‌هایی همچون ضعف زیرساخت‌های فنی و نهادی مواجه است. اگرچه فناوری‌های هوشمند پتانسیل بالایی در تحلیل پیچیدگی‌های فضایی دارند، استفاده عملی از آن‌ها در مقیاس‌های کلان محدود و کمتر به نیازهای زمینه‌ای پاسخ‌گو بوده است؛ از این رو، شکاف میان ظرفیت نظری فناوری و کاربرد عملی آن به تحول ساختاری در نظام‌های قانونی و مدیریتی نیاز دارد تا بتوان نظام تصمیم‌سازی هماهنگ، مشارکتی و آینده‌نگر را پایه‌گذاری کرد و الگوهای پایدار، منعطف و تاب‌آور کاربری زمین را طراحی و اجرا کرد. در نهایت، با توجه به چالش‌های جمعیتی و کالبدی شهر تهران و محدودیت‌های برنامه‌ریزی موجود، این پژوهش به بررسی کاربرد هوش مصنوعی در توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی با تمرکز بر ایجاد الگوهای داده‌محور، چندبعدی و انطباق‌پذیر می‌پردازد تا پاسخ‌گویی پیچیدگی‌های فضایی معاصر باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

کلمات کلیدی

توسعه پایدار
شهر تهران
فرا تحلیل
کاربری‌های ترکیبی اراضی
هوش مصنوعی

مواد و روش‌ها

پیش‌بینی مناسب متغیر وابسته است. تمامی مسیرهای اثرگذاری میان متغیرهای مستقل و وابسته در سطح معناداری ۹۵ درصد تأیید شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها مدل‌سازی و شبیه‌سازی چیدمان فضایی ($t=1۵/۸۵۸$)، مدل‌سازی مشارکت و مذاکره ذی‌نفعان ($t=۵/۷۶۵$) و هم‌افزایی الگوریتم‌های هوشمند ($t=۴/۳۳۹$) بوده‌اند؛ همچنین مسیر پیش‌بینی و طبقه‌بندی کاربری زمین ($t=۲/۶۵۲$)، کاربرد هوش مصنوعی ($t=۲/۸۶۸$)، ترکیب داده‌ها و یادگیری ترکیبی ($t=۲/۵۱۰$)، تحلیل کلان‌داده و روندهای شهری ($t=۲/۰۹$) و تحلیل و بهینه‌سازی تخصیص کاربری ($t=۲/۰۲۳$) نیز به طور معنادار بر توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی تأثیرگذار شناخته شده‌اند که در مجموع اهمیت هوش مصنوعی را در بهبود کاربری‌های ترکیبی اراضی شهری به روشنی نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

هوش مصنوعی با بهره‌گیری از تحلیل‌های عمیق و تلفیق داده‌های جغرافیایی، اجتماعی و محیط زیستی، ظرفیت‌های چشمگیری در درک و مدیریت پیچیدگی‌های کاربری‌های ترکیبی اراضی شهری ایجاد کرده است. مرور نظام‌مند پژوهش‌ها نشان می‌دهد که کاربردهای هوش مصنوعی عمدتاً در سه حوزه تحلیل فضایی و کاربری اراضی، استراتژی‌های توسعه و تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی شهری متمرکز شده و از سال ۲۰۲۰ رشد قابل توجهی داشته است. تحلیل هم‌زمانی کلیدواژه‌ها، هوش مصنوعی را به عنوان عاملی تحول‌آفرین معرفی می‌کند که پیوند مفاهیم زیست‌محیطی، جمعیتی و برنامه‌ریزی پیشگیرانه را تسهیل کرده و گذار از مدل‌های سنتی به الگوهای پویا و آینده‌نگر را ممکن ساخته است. تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند یادگیری عمیق، یادگیری ماشین، الگوریتم‌های ژنتیک و مدل‌های عامل‌محور، با بهره‌گیری از داده‌های چندمنبعی شامل تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های حمل‌ونقل و شبکه‌های اجتماعی، نقش مهمی در طبقه‌بندی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی کاربری زمین شهری ایفا کرده و انعطاف‌پذیری سیستم‌های شهری را در مواجهه با چالش‌های محیطی و اجتماعی افزایش داده‌اند. پژوهش‌ها بر اهمیت ابعاد اجتماعی-فرهنگی، حکمرانی شفاف و عدالت الگوریتمی تأکید دارند و توسعه چارچوب‌های اخلاقی و همکاری‌های میان‌رشته‌ای را ضروری می‌دانند. همچنین، محدودیت‌های فناورانه مانند نیاز به منابع پردازشی بالا و چالش‌های داده‌ای، ضرورت استفاده از رایانش ابری و یادگیری فدرال را برجسته می‌کند. تحلیل معادلات ساختاری نشان داد تمامی مسیرهای اثرگذاری هوش مصنوعی بر توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی شهر تهران در سطح اطمینان معنادار هستند؛ مهم‌ترین مؤلفه‌ها شامل مدل‌سازی و شبیه‌سازی چیدمان فضایی، مدل‌سازی مشارکت و مذاکره ذی‌نفعان و هم‌افزایی الگوریتم‌های هوشمند هستند. دیگر مسیرهای معنادار شامل پیش‌بینی و طبقه‌بندی کاربری زمین، کاربرد هوش مصنوعی، ترکیب داده‌ها و یادگیری ترکیبی، تحلیل کلان‌داده و روندهای شهری و تحلیل و بهینه‌سازی تخصیص کاربری نیز در مدل تأیید شده‌اند. در مجموع، هوش مصنوعی با فراهم آوردن بستری کارآمد برای مدل‌سازی، پیش‌بینی، مشارکت‌پذیری و بهینه‌سازی، به ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری و تحقق توسعه پایدار کاربری‌های ترکیبی در تهران کمک شایانی می‌کند، هرچند نیاز به توسعه زیرساخت‌های فنی، تضمین عدالت الگوریتمی و همکاری‌های میان‌رشته‌ای در پژوهش‌های آینده حیاتی است.

پژوهش حاضر با رویکرد فراتحلیل و مرور نظام‌مند به بررسی کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل ترکیب کاربری اراضی شهری می‌پردازد و از روش تحلیل مسیر برای بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر توسعه کاربری‌های ترکیبی استفاده کرده است. در بخش مرور نظام‌مند، با بهره‌گیری از نرم‌افزار PRISMA و طی فرایندی سه‌مرحله‌ای، ابتدا جست‌وجوی گسترده‌ای در پایگاه‌های معتبر اسکاپوس، اسپرینگر لینک، گوگل اسکالر و سمتمتیک اسکالر انجام شده و ۲۱۰۷ مقاله شناسایی شد. پس از حذف مطالعات نامرتبط و کاهش تعداد مقالات به ۶۵۴، با استفاده از معیارهای دقیق‌تری بر اساس ورود و خروج، تعداد به ۱۸۷ و در نهایت، به ۶۵ مقاله باکیفیت رسید. داده‌ها با نرم‌افزار VOSviewer تحلیل و نقشه‌های بصری آن تهیه شدند. در بخش دوم، هفت مؤلفه کاربری هوش مصنوعی به عنوان متغیرهای مستقل و پنج مؤلفه توسعه کاربری ترکیبی به عنوان متغیرهای وابسته تعیین شدند و تأثیرات آن‌ها توسط جامعه‌های شامل ۹۶ خیره و متخصص با نمونه‌گیری هدفمند بررسی شد. مقیاس پرسشنامه بر اساس طیف لیکرت پنج‌سطحی طراحی و تحلیل داده‌ها با مدل‌سازی معادلات ساختاری و رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS3) انجام گرفت. تحلیل مدل‌های اندازه‌گیری و ساختاری با نرم‌افزار SMARTPLS انجام شد که پایایی، روایی و معناداری مدل‌ها را تأیید کرد.

یافته‌ها

یافته‌های توصیفی پژوهش نشان می‌دهد مطالعات مرتبط با کاربرد هوش مصنوعی در توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی شهری بیشتر در سه حوزه تحلیل کاربری اراضی و تحلیل فضایی شهری، استراتژی‌های توسعه و مدیریت کاربری ترکیبی و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با کاربری اراضی دسته‌بندی می‌شوند که به ترتیب شامل ۲۹، ۳۰ و ۷ مقاله هستند. از نظر توزیع جغرافیایی، چین با ۴۰ مقاله پیشرو بوده و پس از آن آمریکا، اروپا و ایران به ترتیب با ۱۲، ۹ و ۳ مقاله قرار دارند؛ این ترکیب نشان‌دهنده تمرکز علمی جهانی و همچنین، شکاف‌های موجود در کاربرد هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی کاربری زمین است. روند زمانی مطالعات نیز حاکی از افزایش چشمگیر انتشارات از سال ۲۰۲۰ به بعد و اوج آن در سال ۲۰۲۴ است که این موضوع بیانگر توجه روزافزون جامعه علمی به فناوری‌های هوشمند در مواجهه با پیچیدگی‌های برنامه‌ریزی شهری است. تحلیل هم‌زمانی کلیدواژه‌ها نیز تأکید می‌کند که رویکردهای یکپارچه هوش مصنوعی با مفاهیمی همچون برنامه‌ریزی پیشگیرانه، تغییرات جمعیتی و تحولات زیست‌محیطی پیوند خورده و نقش مهمی در ایجاد الگوهای پویا و انعطاف‌پذیری سیستم‌های شهری دارد. بررسی کاربرد تکنیک‌های هوش مصنوعی نشان می‌دهد روش‌هایی مانند یادگیری عمیق، الگوریتم‌های ژنتیک، یادگیری ترکیبی و تحلیل کلان‌داده در حوزه‌هایی نظیر طبقه‌بندی و پیش‌بینی کاربری زمین، شبیه‌سازی چیدمان فضایی و بهینه‌سازی تخصیص کاربری زمین کاربرد گسترده دارند. در تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری، متغیرهای پژوهش مشتمل بر هفت مؤلفه برای کاربرد هوش مصنوعی و پنج مؤلفه برای توسعه کاربری‌های ترکیبی شناسایی شدند و مدل اندازه‌گیری با بارهای عاملی بالاتر از ۰/۴، پایایی و روایی مطلوب تأیید شد. شاخص‌های برازش مدل ساختاری نیز حاکی از کیفیت بالای مدل است؛ معیار GOF برابر ۰/۷۳۹، R^2 معادل ۰/۷۱۶ و Q^2 برابر ۰/۵۰۶ نشان‌دهنده تبیین قوی و

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تنوع کاربری اراضی شهری به عنوان یکی از ارکان پایداری شهری مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌های سنتی برنامه‌ریزی که بر پایه تفکیک کاربری‌ها طراحی شده بودند، در پاسخ‌گویی به نیازهای فضایی و اجتماعی شهرهای معاصر ناکارآمد بوده‌اند. این ناکارآمدی در قالب گسست‌های فضایی، تضعیف تعاملات اجتماعی و افزایش وابستگی به حمل‌ونقل موتوری نمایان شده است (Bramiana et al., 2017). از این‌رو، رویکردهایی همچون توسعه مبتنی بر کاربری ترکیبی به عنوان جایگزینی برای ساختارهای تک‌منظوره مطرح شده‌اند. در این رویکرد، بر هم‌زیستی عملکردهای گوناگون در بستری مشترک تأکید می‌شود؛ به گونه‌ای که دسترسی‌پذیری و بهره‌وری فضایی ارتقا یابد (He, 2022). این نوع توسعه با کاهش جاه‌جویی‌های بین عملکردی، می‌تواند مصرف انرژی را کاهش داده و پیوندهای اجتماعی را تقویت و بهره‌وری زیرساخت‌ها را افزایش دهد. با این حال، تحقق این چشم‌انداز نیازمند تحلیل‌های دقیق و چندلایه از ساختارهای کالبدی، اجتماعی و اقتصادی محیط شهری است (Görgün and Çubukçu, 2022). به‌ویژه در شرایطی که ضعف ابزارهای تحلیلی و ناکارآمدی نظام‌های سنتی برنامه‌ریزی، مانع کاربردی‌سازی این مفاهیم شده است (Lyu et al., 2014). از همین‌رو، تحول در گفتمان‌های برنامه‌ریزی شهری، نقطه آغاز ورود به فناوری‌های نوین خواهد بود.

این ضرورت، زمینه را برای بهره‌گیری از فناوری‌هایی همچون هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی شهری و تحلیل تنوع کاربری فراهم کرده است. برنامه‌ریزی سنتی مبتنی بر الگوهای ایستا، توان پاسخ‌گویی به پیچیدگی فضاهای معاصر را ندارد؛ زیرا با رشد شهرنشینی، فشردگی فضایی و رقابت عملکردها، تحلیل بهینه‌فضا نیازمند ابزارهای داده‌محورتر است (Jinollo et al., 2024). در این میان، هوش مصنوعی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان پردازش هم‌زمان داده‌های مکانی و اجتماعی را فراهم کرده و قابلیت شناسایی الگوهای پنهان و همبستگی‌های چندمتغیره را ایجاد کرده است (Anwar and Sakti, 2024). این مزیت موجب شده برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر داده و هوش مصنوعی، به عنوان راهبردی نوین در تحقق کاربری ترکیبی، مورد توجه قرار گیرد. به‌ویژه در مقیاس‌هایی که تنوع عملکردی و نیازهای خدماتی پویاترند، بهره‌گیری از هوش مصنوعی می‌تواند به طراحی ساختارهایی هدفمند و انطباق‌پذیر کمک کند (Wang et al., 2023). این تحول فناورانه نه تنها به بهبود تصمیم‌گیری منجر می‌شود، بلکه سیاست‌های شهری را در جهت تاب‌آوری و پایداری ساختاری تقویت می‌کند.

در این چارچوب، کاربری ترکیبی تنها یک راهکار کالبدی نیست، بلکه کارکردی چندبعدی در ارتقای تاب‌آوری اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی فضاهای شهری دارد. پیوند میان عملکردهای متنوع در بستری یکپارچه می‌تواند اقتصاد منطقه‌ای را تقویت، تعاملات اجتماعی را افزایش و آسیب‌پذیری شهری را کاهش دهد (Cheshmehzangi and Li, 2020). تحقق چنین چشم‌اندازی مستلزم شناسایی دقیق الگوهای فضایی و نیازهای عملکردی در سطوح خرد شهری است؛ امری که بدون داده‌های مکانی و ابزارهای تحلیل پیشرفته ممکن نیست. در این میان، فناوری‌های تحلیل داده، به‌ویژه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، بستری مناسب برای تحلیل ابعاد مختلف کاربری اراضی فراهم کرده‌اند (Crosas et al., 2024). با این حال، در بسیاری از مناطق شهری، به‌ویژه شهرهای در حال توسعه، نبود سازوکارهای مشارکتی مبتنی بر داده، محدودیت دسترسی به داده‌های دقیق و ضعف زیرساخت‌های نهادی، مانعی جدی ایجاد کرده است (Hara et al., 2010). این موانع، ضرورت ایجاد نظام‌های اطلاعاتی مشارکتی و نهادینه‌سازی ابزارهای فناورانه را دوچندان کرده است.

اگرچه ظرفیت‌های بالقوه فناوری‌های هوشمند در تحلیل پیچیدگی‌های فضایی در حال افزایش است، اما کاربرد آن‌ها اغلب در مقیاس کلان باقی مانده و کمتر به نیازهای زمینه‌ای و چندبعدی توجه شده است. بسیاری از

مدل‌های موجود مبتنی بر الگوریتم‌های ایستا یا بهینه‌سازی ریاضی هستند که توان تحلیل تعاملات عملکردی و پویایی‌های زمینه‌ای را ندارند (Lebedeva, 2024). در مقابل، مدل‌های پیشرفته‌تری مبتنی بر یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی و سامانه‌های چندعامله، توانایی شناسایی الگوهای پیچیده در تخصیص عملکردی فضا را دارند؛ با این حال، تحقق آن‌ها با چالش‌هایی همچون فقدان زیرساخت‌های فنی، کمبود داده‌های دقیق و محدودیت نهادی روبه‌رو است (Wang and Yorke-Smith, 2025). از این‌رو، شکاف میان پتانسیل نظری فناوری و تحقق عملی آن محسوس باقی مانده است. غلبه بر این شکاف، مستلزم تحول در ساختارهای قانونی و مدیریتی است تا بستری مناسب برای بهره‌گیری از ابزارهای هوشمند در برنامه‌ریزی تنوع کاربری فراهم شود؛ بنابراین، آنچه تحقق الگوهای مختلط و منعطف را ممکن می‌سازد، نه فقط دسترسی به فناوری، بلکه ایجاد نظام تصمیم‌سازی هماهنگ، مشارکتی و آینده‌نگر خواهد بود. نظامی که با تکیه بر داده و مشارکت نهادی، بتواند الگوهای پایدار، منعطف و تاب‌آور را طراحی و اجرا کند (Hadiyana and Ji-hoon, 2024).

در پاسخ به چالش‌های چندوجهی توسعه شهری، از جمله گسترش بی‌رویه شهرها، ترافیک، آلودگی و عدم تعادل کاربری‌ها، رویکردهای نوین برنامه‌ریزی فضایی به‌ویژه در دهه اخیر، به سوی کاربری ترکیبی، چگالی هوشمند و توزیع متوازن عملکردها متمایل شده‌اند. در این چارچوب، دیدگاه شهر به‌مثابه سامانه پیچیده تطبیقی (Complex Adaptive System) بر تعامل پویای اجزای شهری با فناوری‌های نوین تأکید دارد و زمینه نظری مناسبی برای استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل و تصمیم‌سازی شهری فراهم می‌سازد (Goodspeed, 2020). همچنین، نظریه تصمیم‌سازی داده‌محور (Data-Driven Urban Planning) بر این اصل استوار است که یادگیری ماشین می‌تواند الگوهای پنهان در داده‌های مکانی-زمانی را آشکار و به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی کمک کند (Koumetio Tekouabou et al., 2022). کاربری ترکیبی به عنوان مدلی برای یکپارچه‌سازی فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در فضاهای شهری، می‌تواند هم‌زمان کیفیت زندگی، تعاملات اجتماعی و بهره‌وری زیرساختی را ارتقا دهد. در این راستا، برنامه‌ریزی منعطف و چندمنظوره مبتنی بر تحلیل داده‌های محیطی، مکانی و عملکردی، نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی شهرهای پایدار ایفا می‌کند (Sanchez et al., 2022). هم‌زمان با این تحولات مفهومی، رشد فناوری‌های داده‌محور از جمله هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، امکان تحلیل دقیق، چندبعدی و هم‌زمان رفتارهای فضایی و عملکردی شهرها را فراهم کرده است. الگوریتم‌های پیشرفته‌ای مانند شبکه‌های عصبی، یادگیری ژرف، سامانه‌های چندعامله، توانایی شبیه‌سازی و پیش‌بینی سناریوهای رشد و تغییرات کاربری اراضی را در سطح بسیار جزئی و محلی ممکن کرده‌اند (Castro et al., 2022). افزون بر این، ادغام هوش مصنوعی با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، بستری نوینی برای تصمیم‌سازی سریع، انطباق‌پذیر و مبتنی بر سناریوهای واقع‌گرایانه را فراهم کرده است (Anwar and Sakti, 2024). با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچون ضعف نهادینه‌سازی مدل‌های هوشمند در سطح محلی، کمبود داده‌های بومی و عدم انطباق میان ابزارهای فناورانه با ساختارهای سیاست‌گذاری شهری، همچنان به عنوان موانع اصلی در پیاده‌سازی کاربری ترکیبی باقی مانده‌اند. تحلیل‌ها نشان می‌دهند مدل‌سازی موفق تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته، قابلیت بازنمایی دقیق‌تر الگوهای پیچیده فضایی را فراهم می‌سازد (Wu et al., 2022). همچنین، رویکردهای نوین مانند مدل‌های هدف‌محور در برنامه‌ریزی دموکراتیک اراضی شهری، با ترکیب تحلیل‌های چندمعیاره و شبیه‌سازی‌های اجتماعی، به دنبال ایجاد نظام‌های تصمیم‌سازی سازگار با واقعیت‌های متغیر شهری هستند (Chen et al., 2020).

در بستری پیچیده و چندلایه شهری تهران، تحولات سریع جمعیتی، گسترش کالبدی ناپایدار و فشارهای فزاینده بر منابع و خدمات شهری، مدیریت کاربری اراضی را به یکی از مسائل راهبردی در سیاست‌گذاری فضایی بدل کرده است.

طبقه‌بندی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی متمرکز بوده‌اند، از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، زنجیره مارکوف، اتوماتای سلولی و مدل‌های عامل‌منا که عمدتاً در مقیاس ناحیه‌ای یا موردی و با تمرکز بر یک نوع خاص از کاربری به کار گرفته شده‌اند. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که هوش مصنوعی توانسته دقت زیادی در شناسایی و پیش‌بینی تغییرات کاربری ارائه دهد و در برخی موارد، ارتباط میان توزیع کاربری‌ها و الگوهای رفتاری جمعیت شهری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، مرور این پژوهش‌ها نشان می‌دهد در برخی جنبه‌ها توجه کافی به جامعیت تحلیل‌ها، تعامل میان داده‌ها و کارکردهای شهری و همچنین، ابعاد راهبردی و سیاست‌گذاری فضایی وجود ندارد و غالب مطالعات بر جنبه‌های فنی الگوریتم‌ها تمرکز داشته‌اند. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مرور نظام‌مند و تحلیل مسیر، در صدد ارائه تصویری جامع و عمیق از کاربرد هوش مصنوعی در توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی شهر تهران است. مسیر پژوهش به گونه‌ای طراحی شده که علاوه بر تحلیل فنی مدل‌ها، رابطه میان داده‌های مکانی، کارکردهای شهری و تأثیر سیاست‌گذاری فضایی بر الگوهای کاربری نیز مورد بررسی قرار گیرد. به این ترتیب، پژوهش حاضر فراتر از محدودیت‌های مطالعات پیشین حرکت می‌کند و با ایجاد چارچوبی یکپارچه، امکان تحلیل و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی شهری را فراهم می‌سازد و هم‌زمان جنبه‌های کلان و راهبردی شهر را نیز لحاظ می‌کند.

ساختارهای برنامه‌ریزی موجود به دلیل وابستگی به رویکردهای ایستا، در تحلیل و هماهنگ‌سازی میان عملکردهای متنوع شهری با شکست مواجه شده‌اند و توان پاسخ‌گویی به نیازهای نوظهور فضاهای شهری را ندارند (Ghasemi, 2024). از سوی دیگر، نبود سامانه‌های یکپارچه برای تحلیل هوشمند داده‌های مکانی، ضعف در نهادینه‌سازی ابزارهای فناورانه و چالش‌های مربوط به کیفیت و در دسترس بودن داده‌ها، از موانع مهم در تحقق سیاست‌های انعطاف‌پذیر و پایدار کاربری اراضی محسوب می‌شوند (Tayebi et al., 2023). در چنین بستری، نبود چارچوب‌های تحلیلی انطباق‌پذیر که بتوانند هم‌زمان ابعاد فضایی، عملکردی و اجتماعی شهر را مد نظر قرار دهند، شکاف میان ساختار مدیریتی و نیازهای واقعی محیط شهری را تعمیق کرده است (Borhani and Ghaseemloo, 2020). بر این اساس، هدف این پژوهش، کاربرد هوش مصنوعی در توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی شهر تهران با تأکید بر ایجاد الگوهایی داده‌محور، انطباق‌پذیر و چندبعدی در پاسخ به پیچیدگی‌های فضایی معاصر است.

پیشینه پژوهش

با توجه به تحولات نظری و پیشرفت‌های فناوری، استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل و پیش‌بینی کاربری اراضی شهری طی دهه اخیر رشد چشمگیری داشته است. اغلب مطالعات پیشین بر کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در

جدول ۱. پیشینه پژوهش

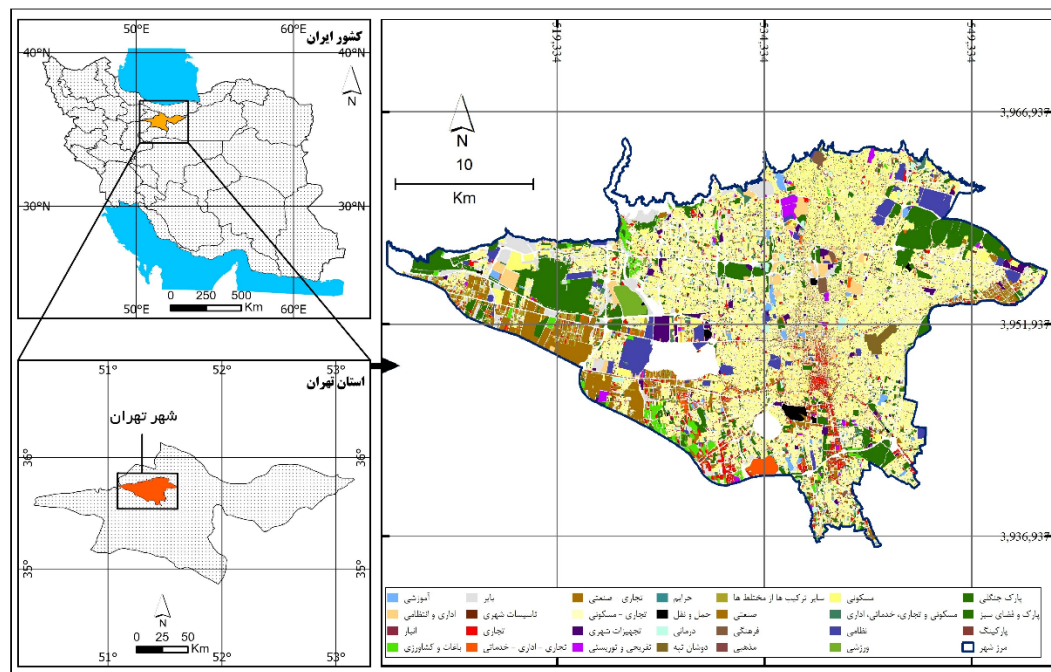
عنوان	نویسندگان (سال)	نتایج
هوش مصنوعی برای برنامه‌ریزی منظر	Chen et al (2025)	هوش مصنوعی توانست جزئیات و وضوح طرح‌های فضاهای سبز را به طور قابل توجهی افزایش دهد.
ادغام فنون داده‌های مکانی و یادگیری ماشین در پیش‌بینی قطعات زمین	Kasahun and Legesse (2025)	ترکیب داده‌های مکانی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین توانست تغییرات قطعات زمین را پیش‌بینی کند
یادگیری ماشین برای نقشه‌برداری کاربری/پوشش اراضی شهری	Kasahun and Legesse (2024)	الگوریتم جنگل تصادفی بهترین عملکرد را در طبقه‌بندی کاربری/پوشش اراضی شهری داشت
هوش مصنوعی برای شناسایی انواع کاربری اراضی شهری	Li and Zhu (2024)	هوش مصنوعی توانست انواع کاربری اراضی شهری را با دقت بالا، به‌ویژه در مناطق صنعتی، مسکونی و تحقیقاتی شناسایی کند
پیش‌بینی استفاده از مترو با الگوریتم‌های یادگیری ماشین	Alkhereibi et al (2023)	تراکم کاربری‌های دولتی، آموزشی و مختلط بیشترین تأثیر را بر استفاده از مترو دارند
طبقه‌بندی کاربری و پوشش اراضی با استفاده از هوش مصنوعی	Alshari et al (2023)	مدل ترکیبی هوش مصنوعی دقت بالاتری در طبقه‌بندی کاربری اراضی نسبت به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی سنتی ارائه داد
هوش مصنوعی برای توسعه پایدار شهرهای هوشمند و مدیریت کاربری اراضی شهری	Masoumi and van Genderen (2023)	الگوریتم‌های هوش مصنوعی به بهینه‌سازی و پایدارسازی کاربری اراضی شهری با توجه به معیارهای مختلف کمک می‌کنند
مروری بر هوش مصنوعی در شبیه‌سازی کاربری اراضی شهری	Castro et al (2022)	مدل‌های ترکیبی زنجیره مارکوف و اتوماتای سلولی برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و رشد شهری کاربرد اصلی دارند
یادگیری ماشین در مدل‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی	Wang et al (2022)	یادگیری ماشین پتانسیل بالایی برای مدل‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی دارد
کاربرد هوش مصنوعی برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در یک اکوسیستم خشک	Yu et al (2022)	مدل ترکیبی مبتنی بر هوش مصنوعی توانست الگوهای پیچیده تغییرات کاربری اراضی در مناطق خشک را با دقت شبیه‌سازی کند
الگوریتم‌های یادگیری ماشین در برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری	Chaturvedi and de Vries (2021)	الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی عمیق و ماشین بردار پشتیبان بهترین عملکرد را در تحلیل تغییرات کاربری اراضی دارند
نقشه‌برداری دسته‌های اساسی کاربری اراضی شهری با داده‌های بزرگ باز	Chen et al (2021)	استفاده از داده‌های الگوریتم‌های یادگیری ماشین ترکیبی دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی شهری را افزایش داد
ساخت و کاربرد داده‌های آموزشی هوش مصنوعی برای کاربری/پوشش زمین	Lee and Lee (2021)	داده‌های هوش مصنوعی با دقت بالا از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای ساخته شد که امکان طبقه‌بندی و شناسایی تغییرات کاربری اراضی را فراهم می‌کند

عنوان	نویسندگان (سال)	نتایج
استفاده از هوش مصنوعی در داده‌های داوطلبانه کاربری اراضی	Sadidi et al (2024)	هوش مصنوعی در کاربری‌های زمین‌های کشاورزی و درختان میوه نسبتاً کامل‌تر و در کاربری‌های بلوک‌های ساختمانی نقص بیشتری دارند
کاربرد روش‌های یادگیری ماشین و عامل‌مبنا در برنامه‌ریزی کاربری اراضی	Mirzakhossein et al (2021)	الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های عامل‌مبنا در تحلیل و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی کاربرد گسترده دارند

محدوده مطالعه شده

رشد سریع و بی‌برنامه، گسترش پراکنده، تنوع بالای کاربری‌ها و فشار مضاعف بر منابع و زیرساخت‌ها مواجه شده است. از آنجا که توسعه کاربری‌های ترکیبی با هدف ایجاد فضاهای شهری پویا، قابل دسترس و چندمنظوره، یکی از اصول کلیدی در توسعه پایدار شهری به شمار می‌رود، شهر تهران بستر مناسبی برای بررسی و اجرای چنین سیاست‌هایی با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی است (Motieyan and Azmoodeh, 2021).

شهر تهران به عنوان پایتخت و بزرگ‌ترین کلان‌شهر ایران، در ۵۱ درجه، ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی، ۳۵ درجه، ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). جمعیت آن بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ بیش از ۷۰۶۶۹۳۸ نفر و مساحت آن، ۷۳۰ کیلومترمربع است (Meshkini et al., 2019). شهر تهران دارای ساختاری پیچیده و چندلایه از نظر کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی است که در دهه‌های اخیر با



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهر تهران

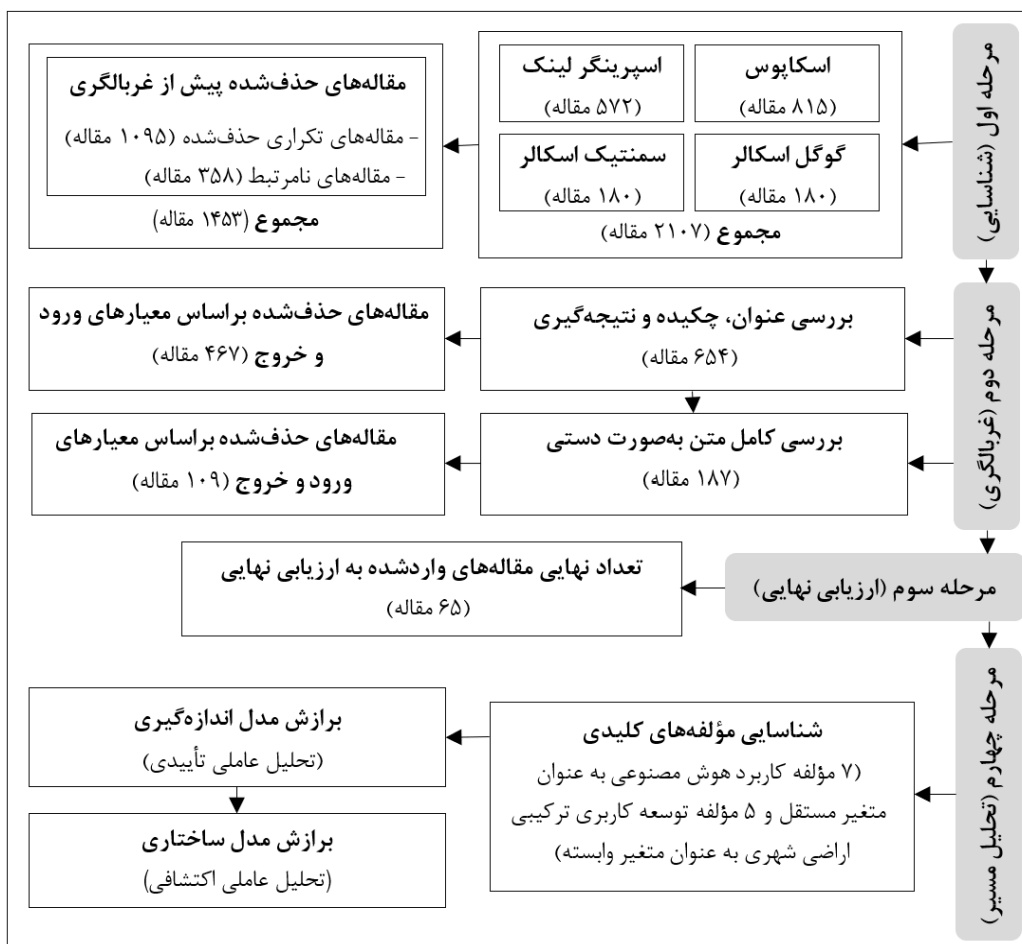
مواد و روش‌ها

کار گرفته شد که تعداد مقالات به ۱۸۷ کاهش یافت. در نهایت، با ارزیابی‌های دقیق‌تر و حذف مطالعات فاقد کیفیت لازم، ۶۵ مطالعه مرتبط برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. در پایان این بخش از نرم‌افزار VOSviewer نسخه ۱،۱۶،۲۰ برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و ایجاد نقشه‌های تجسمی استفاده شد. در بخش دوم، با استفاده از تحلیل مسیر و با توجه خروجی نهایی مرور نظام‌مند، ۷ مؤلفه کاربرد هوش مصنوعی به عنوان متغیر مستقل شناسایی شد تا اثرات آن روی توسعه کاربری ترکیبی اراضی شهری با ۵ مؤلفه به عنوان متغیر وابسته تحلیل شود (جدول ۱). جامعه آماری شامل اساتید دانشگاه (۳۴ درصد)، مدیران و کارشناسان شهرداری (۲۷ درصد)، مشاوران شرکت‌های مشاور شهرداری (۲۱ درصد) و پژوهشگران حوزه سیاست‌گذاری شهری (۱۸ درصد) است که خبرگان و متخصصان فعال در حوزه هوش مصنوعی و توسعه کاربری‌های اراضی شهری را شامل می‌شوند. با توجه به نبود یک پایگاه داده جامع برای فهرست افراد حرفه‌ای، از روش نمونه‌گیری هدفمند به روش

پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد فراتحلیل مرور نظام‌مند و تحلیل مسیر است و روش پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از لحاظ نوع، توصیفی-تحلیلی است. در بخش مرور نظام‌مند با بهره‌گیری از نرم‌افزار PRISMA نسخه ۲۰۲۰، فرایند سه مرحله‌ای برای شناسایی و انتخاب مقالات مرتبط با کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل دقیق ترکیب کاربری اراضی شهری انجام شده است. در مرحله اول، جست‌وجوی گسترده در چهار پایگاه علمی معتبر اسکاپوس، اسپرینگر لینک، گوگل اسکالر و سمتیک اسکالر با استفاده از کلیدواژه‌های هدفمند شامل هوش مصنوعی، کاربری اراضی شهری، کاربری ترکیبی اراضی، یادگیری ماشین، برنامه‌ریزی فضایی و عملکرد شهری انجام شد که به یافتن ۲۱۰۷ مقاله انجامید. در مرحله دوم، مطالعات نامرتبط و خارج از دامنه موضوعی توسط نرم‌افزار مدیریت منابع حذف شدند و تعداد مقاله‌ها به ۶۵۴ رسید. سپس، غربالگری دقیق‌تری بر اساس معیارهای ورود و خروج برای ارزیابی کیفیت به

شده است. رویکرد SMARTPLS در دو مرحله انجام شده است: مدل‌های اندازه‌گیری شامل ضرایب بارهای عاملی، ضریب آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی و روایی همگرا و مدل‌های ساختاری شامل ضرایب معیار (R^2) ، معیار استون-گیزر (Q^2) ، معیار GOF، معیار VIF و ضرایب معناداری (t) (Hair et al., 2022). نمودار فرایند گام به گام پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

کوکران بدون N، ۹۶ نمونه انتخاب شده است که تنوع و پوشش مناسبی از طیف فعالان حرفه‌ای و دانشگاهی را فراهم می‌کند (رابطه ۱). مقیاس تحلیل بر اساس طیف لیکرت پنج‌سطحی کاملاً مخالف، مخالف، تا حدودی موافق، موافق و کاملاً موافق تنظیم شده است. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری و رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS3) استفاده

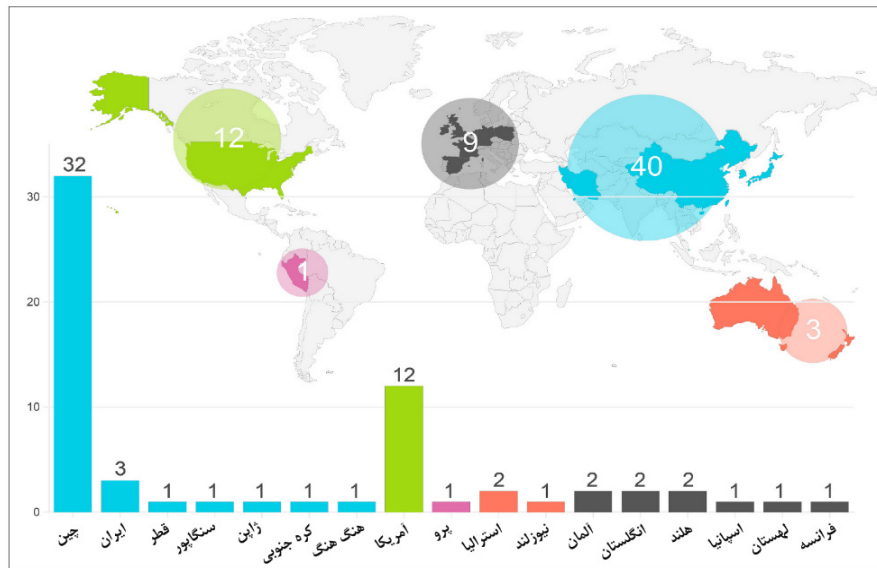


شکل ۲. فرایند اجرایی پژوهش

اراضی شهری با ۷ مقاله. از نظر توزیع جغرافیایی، چین با ۴۰ مقاله پیش‌تاز است. پس از آن، آمریکا با ۱۲ مقاله، اروپا با ۹ مقاله و ایران با ۳ مقاله قرار دارند. این ترکیب محتوایی و جغرافیایی، تصویری جامع از روندهای پژوهشی و شکاف‌های موجود در کاربرد هوش مصنوعی در حوزه کاربری اراضی شهری ارائه می‌دهد (شکل ۳).

یافته‌های توصیفی

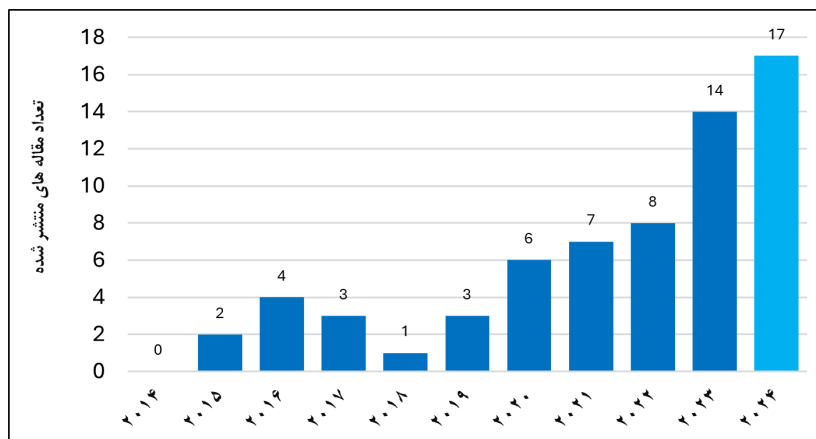
توزیع جغرافیایی مطالعات: پژوهش‌ها درباره کاربردهای هوش مصنوعی در کاربری ترکیبی اراضی شهری به سه دسته تقسیم شدند: (۱) تحلیل کاربری اراضی و تحلیل فضایی شهری با ۲۹ مقاله؛ (۲) استراتژی‌های توسعه و مدیریت کاربری ترکیبی با ۳۰ مقاله و (۳) تصمیم‌گیری‌های مرتبط با کاربری



شکل ۳. توزیع جغرافیایی مطالعات بررسی شده

مورد بررسی به ثبت رسیده است. این روند افزایشی، بیانگر توجه روزافزون جامعه علمی جهانی به بهره‌گیری از ظرفیت‌های هوش مصنوعی در حل مسائل پیچیده برنامه‌ریزی شهری و توسعه رویکردهای پاسخ‌گو، پایدار و مبتنی بر داده در طراحی کاربری‌های ترکیبی است (شکل ۴).

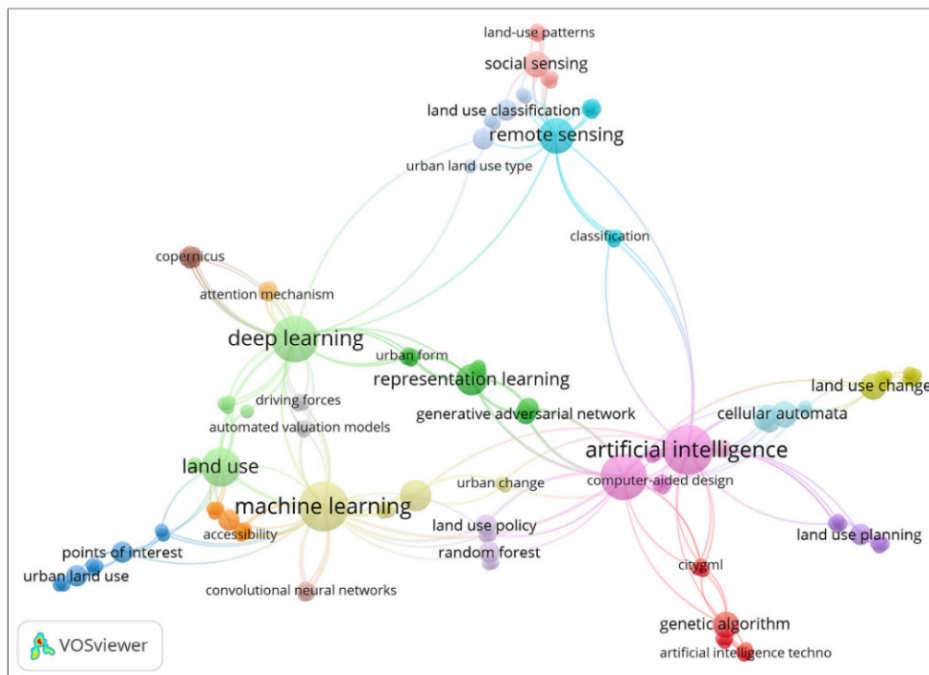
توزیع زمانی مطالعات: روند زمانی مقالات نشان می‌دهد طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹، تعداد مطالعات منتشر شده محدود و با نوسان همراه بوده است. با این حال، از سال ۲۰۲۰ به بعد، رشد قابل توجهی در تعداد انتشارات مشاهده می‌شود؛ به‌ویژه در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ که این رشد به اوج خود رسیده است. در سال ۲۰۲۴، با ثبت ۱۷ مقاله، بیشترین تعداد انتشارات در بازه زمانی



شکل ۴. توزیع زمانی مقالات مرور شده بر اساس سال انتشار

ماشین، حسگرهای از راه دور و الگوریتم‌های هوشمند، نقش کلیدی در تبیین پویایی‌های فضایی دارند. این هم‌رخدادی‌ها نشان می‌دهند فناوری‌های نوین می‌توانند با افزایش دقت پیش‌بینی و تصمیم‌سازی، به انعطاف‌پذیری بیشتر سیستم‌های شهری در برابر چالش‌های محیطی و اجتماعی کمک کنند (شکل ۵).

تحلیل هم‌زمانی کلیدواژه‌ها: تحلیل هم‌زمانی کلیدواژه‌ها نشان داد استفاده از رویکردهای یکپارچه هوش مصنوعی، چارچوب‌های نظری مرتبط با کاربری اراضی شهری را تقویت کرده و زمینه‌ساز گذار از مدل‌های سنتی به الگوهای پویا و آینده‌نگر شده است. مفاهیمی مانند برنامه‌ریزی پیشگیرانه، تغییرات جمعیتی، تحولات زیست‌محیطی و الگوهای حرکتی، در پیوند با یادگیری



شکل ۵. نمودار تحلیل هم‌زمانی کلیدواژه‌ها

رویه‌ای و مدل‌های عامل‌محور هستند. هر یک از این روش‌ها با بهره‌گیری از داده‌های متنوع مانند تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های حمل‌ونقل، شبکه‌های اجتماعی و حسگرها، به کاربردهایی همچون طبقه‌بندی و پیش‌بینی کاربری اراضی، بهینه‌سازی اختلاط، شبیه‌سازی چیدمان، تحلیل سرزندگی و تعاملات فضایی، مدل‌سازی رشد شهری و مذاکره‌ی ذی‌نفعان کمک می‌کنند (جدول ۲).

کاربرد تکنیک‌های هوش مصنوعی در توسعه کاربری ترکیبی اراضی: نتایج مرور نظام‌مند تکنیک‌های هوش مصنوعی را در ۱۱ دسته اصلی طبقه‌بندی می‌کند و کاربردهای آن‌ها را در مدیریت و تحلیل اختلاط کاربری اراضی شهری نشان می‌دهد. این تکنیک‌ها شامل یادگیری عمیق، یادگیری ماشین، یادگیری تقویتی، الگوریتم‌های ژنتیک، روش‌های گراف‌محور، یادگیری ترکیبی، مدل‌های ترکیبی، خوشه‌بندی و آنتروپی، تحلیل کلان‌داده، مدل‌سازی

جدول ۲. کاربردهای تکنیک‌های هوش مصنوعی در توسعه کاربری ترکیبی اراضی شهری

کاربردهای هوش مصنوعی	کاربردهای بالقوه روی توسعه کاربری ترکیبی اراضی شهری
یادگیری عمیق	طبقه‌بندی کاربری اراضی شهری، تولید خودکار چیدمان شهری، پیش‌بینی فرم و عملکرد شهری، نقشه‌برداری از کاربری‌های ترکیبی، تولید چیدمان شهری، شبیه‌سازی پیکربندی‌های کاربری اراضی
یادگیری ماشین	طبقه‌بندی کاربری اراضی، پیش‌بینی منطقه‌بندی، تحلیل سرزندگی شهری، استخراج متن از داده‌های جمع‌سپاری شده (رسانه‌های اجتماعی)، شناسایی الگوهای اجتماعی-اقتصادی در کاربری اراضی
یادگیری تقویتی	بهینه‌سازی تخصیص کاربری اراضی، حل تعارض‌ها میان ذی‌نفعان، شبیه‌سازی فرایند مذاکره
الگوریتم‌های ژنتیک	بهینه‌سازی تخصیص چندهدفه کاربری اراضی، کاهش اثر جزیره گرمایی شهری، تعادل میان تقاضاهای متضاد (مانند تراکم در برابر پایداری)
روش‌های مبتنی بر گراف	مدل‌سازی تعاملات فضایی (مانند شبکه‌های ترافیکی)، شبیه‌سازی روابط کاربری اراضی، افزایش سرزندگی شهری
یادگیری ترکیبی	طبقه‌بندی دقیق‌تر کاربری اراضی، تلفیق داده‌های چند منبع (داده‌های سنجش‌ازدور + حس‌گرهای اجتماعی)
مدل‌های ترکیبی	پیش‌بینی رشد شهری، افزایش دقت شبیه‌سازی با ترکیب رویکردهای مکمل هوش مصنوعی
خوشه‌بندی و روش آنتروپی	ارزیابی ترکیب کاربری اراضی، شناسایی الگوهای اجتماعی-اقتصادی، طبقه‌بندی عملکردهای شهری
تحلیل کلان‌داده	تحلیل تعاملات فضایی، پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی، بررسی پویایی‌های بلندمدت شهری
مدل‌سازی رویه‌ای	شبیه‌سازی چیدمان شهری برای تحلیل رفتارهای سفر، بهینه‌سازی تنوع کاربری اراضی و قابلیت تحرک‌پذیری
مدل‌های مبتنی بر عامل	شبیه‌سازی مذاکرات میان ذی‌نفعان، مدل‌سازی گسترش افقی شهری

سوی دیگر، محدودیت‌های فناوریانه مانند نیاز به توان پردازشی بالا، مقیاس‌پذیری و چالش‌های داده‌ای، لزوم استفاده از فناوری‌های نوین مانند رایانش ابری، یادگیری فدرال و پلتفرم‌های کم‌کد را برجسته می‌کند. این نتایج مسیر روشنی برای پژوهش‌های آتی در حوزه برنامه‌ریزی کاربری‌های ترکیبی اراضی فراهم می‌سازد (جدول ۳).

فرصت‌های آینده در برنامه‌ریزی کاربری‌های ترکیبی اراضی مبتنی بر هوش مصنوعی: نتایج نشان داد پژوهش‌های آینده باید بر توسعه چارچوب‌های چندتکنیکی و بهبود همکاری‌پذیری الگوریتم‌ها متمرکز شوند تا بتوانند تصمیم‌گیری راهبردی و بهینه‌سازی کاربری اراضی را تسهیل کنند. همچنین، توجه به ابعاد اجتماعی - فرهنگی و تحلیل عوامل فرهنگی و حکمرانی در پذیرش هوش مصنوعی برای تحقق توسعه پایدار شهری ضروری است. از

جدول ۳. فرصت‌های آینده پژوهش در برنامه‌ریزی کاربری‌های ترکیبی اراضی مبتنی بر هوش مصنوعی

شکاف‌های پژوهشی شناسایی شده	جهت‌گیری‌های پیشنهادی پژوهش	کاربرد در برنامه‌ریزی شهری	محدودیت‌های فناوریانه و عملیاتی
کمبود چارچوب‌های چندتکنیکی	ادغام مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی	تصمیم‌گیری راهبردی شهری	نیاز به توان پردازشی بالا
نیاز به همکاری‌پذیری میان الگوریتم‌ها	یادگیری تقویتی برای سازگاری بالاتر	بهینه‌سازی ترکیب کاربری اراضی	مقیاس‌پذیری مبتنی بر رایانش ابری
تمرکز بیش از حد بر شهرهای پیشرفته	مطالعات تطبیقی میان مناطق مختلف	ادغام اهداف ذی‌نفعان	شکاف در تخصص فنی
بی‌توجهی به تأثیرات اجتماعی - فرهنگی	تحلیل عوامل فرهنگی و حکمرانی در پذیرش هوش مصنوعی	توسعه پایدار	رابطه‌های ساده‌شده برای کاربران غیرمتخصص
چالش‌های داده‌ای پویا و آنلاین	اشتراک‌گذاری داده میان شهرها	سنجش شاخص‌های محیط زیستی، اجتماعی، اقتصادی	پلتفرم‌های کم‌کد
پراکندگی داده‌ها و نگرانی‌های حریم خصوصی	استفاده از داده‌های ناشناس و یادگیری فدرال	تعاملات آنی با شهروندان	نیاز به داده‌های منصفانه
ترجیح‌های قطعی در برابر ذهنی	به‌روزرسانی و تجسم آنلاین، ابزار مشارکت شهری	طراحی شهری مشارکتی	داده‌های نماینده برای حمل‌اقتدار جامعه
عدم یکپارچگی بازخورد ذی‌نفعان	ابزارهای سازگار با بازخورد ذی‌نفعان	داده‌های منصفانه و فراگیر	حذف سوگیری‌های الگوریتمی

شامل متغیر مستقل کاربرد هوش مصنوعی با ۷ مؤلفه و ۲۱ گویه و متغیر وابسته توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی با ۵ مؤلفه و ۱۵ گویه شناسایی شدند (جدول ۴).

تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری
شناسایی متغیرهای پژوهش: با توجه به نتایج مرور نظام‌مند و در جهت تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری، متغیرها، مؤلفه‌ها و گویه‌های پژوهش

جدول ۴. شناسایی متغیرهای پژوهش

متغیر	مؤلفه	گویه
کاربرد هوش مصنوعی	پیش‌بینی و طبقه‌بندی کاربری اراضی	دقت پیش‌بینی کاربری‌ها، توانایی طبقه‌بندی کاربری‌ها، تحلیل دقیق فرم و عملکرد
	تحلیل و بهینه‌سازی تخصیص کاربری	حل تعارض‌های تخصیص، بهینه‌سازی چندهدفه، تخصیص کاربری بهینه
	مدل‌سازی مشارکت و مذاکره ذی‌نفعان	مدل‌سازی تصمیم‌گیری، شبیه‌سازی مذاکره، تحلیل تصمیم‌گیری گروهی
	تحلیل کلان‌داده و روندهای شهری	شناسایی روند تغییرات، تجمیع داده‌های شهری، تحلیل فضایی داده‌محور
	مدل‌سازی و شبیه‌سازی چیدمان فضایی	تحلیل الگوی سفر، بهینه‌سازی طراحی فضایی، پیش‌بینی سناریوهای فضایی
	ترکیب داده‌ها و یادگیری ترکیبی	ادغام منابع داده متنوع، افزایش دقت مدل‌ها، تحلیل جامع کاربری
توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی	هم‌افزایی الگوریتم‌های هوشمند	افزایش کارایی مدل‌ها، تقویت تحلیل الگوریتمی، بهبود تصمیم‌گیری هوشمند
	کاربری عملکردی	بهره‌وری اراضی شهری، تنوع عملکرد شهری، هماهنگی فعالیت‌های شهری
	کاربری فضایی	سازماندهی فضایی بهینه، دسترسی فضایی مناسب، کاهش پراکندگی مکانی
	کاربری اجتماعی	تعاملات اجتماعی فعال، حس تعلق اجتماعی، بهبود کیفیت زندگی
	کاربری زیست‌محیطی	کاهش آسیب زیست‌محیطی، بهبود کیفیت محیط، بهره‌برداری منابع طبیعی
	کاربری حکمرانی	تصمیم‌گیری شهری مؤثر، هماهنگی نهادهای ذی‌نفع، شفافیت و مشارکت نهادی

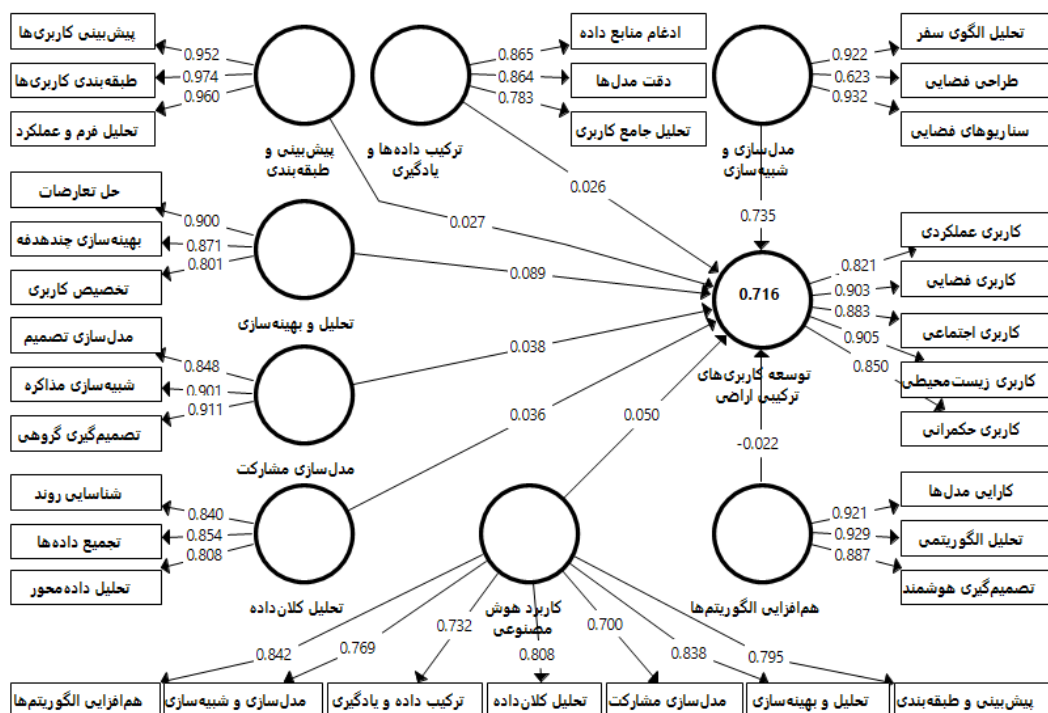
که بیانگر قابلیت اطمینان و انسجام درونی مناسب شاخص‌ها است. همچنین، شاخص روایی همگرا برای همه متغیرها بالاتر از ۰/۵ بوده و دلالت بر روایی قابل قبول و واریانس توضیح داده‌شده کافی دارد. بنابراین، مدل اندازه‌گیری از نظر پایایی و روایی در سطح قابل قبولی قرار دارد و می‌تواند پایه مناسبی برای

مدل اندازه‌گیری: برآزش مدل اندازه‌گیری بر اساس تحلیل عاملی تأییدی نشان داد بارهای عاملی تمامی شاخص‌ها بالاتر از حد آستانه ۰/۴ بوده و هر سازه حداقل ۵۰ درصد از واریانس شاخص‌های مربوط را توضیح می‌دهد. پایایی ترکیبی و ضریب آلفای کرونباخ برای تمامی متغیرها بالاتر از ۰/۷ است

تحلیل مدل ساختاری باشد (جدول ۵ و شکل ۶).

جدول ۵. برآورد نتایج برازش مدل اندازه گیری و مدل ساختاری

مؤلفه	بار عاملی	پایایی ترکیبی (CR)	آلفای کرونباخ (Alpha)	روایی همگرا (AVE)
پیش بینی و طبقه بندی کاربری اراضی	۰/۷۹۵	۰/۹۶۰	۰/۹۷۴	۰/۹۲۵
تحلیل و بهینه سازی تخصیص کاربری	۰/۸۳۸	۰/۸۹۳	۰/۸۲۱	۰/۷۳۷
مدل سازی مشارکت و مذاکره ذی نفعان	۰/۷۰۰	۰/۸۶۴	۰/۹۱۷	۰/۷۶۲
تحلیل کلان داده و روندهای شهری	۰/۸۰۸	۰/۷۸۲	۰/۸۷۳	۰/۶۹۶
مدل سازی و شبیه سازی چیدمان فضایی	۰/۷۳۲	۰/۷۷۹	۰/۸۷۳	۰/۷۰۲
ترکیب داده ها و یادگیری ترکیبی	۰/۷۶۹	۰/۷۸۹	۰/۸۷۶	۰/۷۰۲
هم افزایی الگوریتم های هوشمند	۰/۸۴۲	۰/۸۹۹	۰/۹۳۷	۰/۸۳۳
کاربرد هوش مصنوعی	-	۰/۸۹۵	۰/۹۱۸	۰/۶۱۶
توسعه کاربری های ترکیبی اراضی	-	۰/۹۲۲	۰/۹۴۱	۰/۷۶۳۲



شکل ۶. مدل معادلات ساختاری پژوهش همراه با ضرایب مسیر (بارهای عاملی)

بودن برآورد ضرایب است. همچنین، مقدار R^2 برابر با ۰/۷۱۷ نشان می دهد متغیرهای مستقل توان بالایی در تبیین واریانس متغیر وابسته دارند. در نهایت، مقدار Q^2 برابر با ۰/۵۰۶ قدرت پیش بینی مطلوب مدل را تأیید می کند (جدول ۶).

مدل ساختاری: نتایج تحلیل مدل ساختاری برای متغیر وابسته توسعه کاربری های ترکیبی اراضی نشان می دهد معیار GOF برای برابر با ۰/۳۳۹ است که از حداقل استاندارد ۰/۳۶ فراتر رفته و نشان دهنده برازش کلی قوی و قابل قبول مدل است. مقدار VIF معادل ۳/۷۰ است که کمتر از آستانه مجاز ۵ بوده و بیانگر نبود هم خطی شدید میان متغیرهای مستقل و قابل اعتماد

جدول ۶. برآورد نتایج برازش مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری

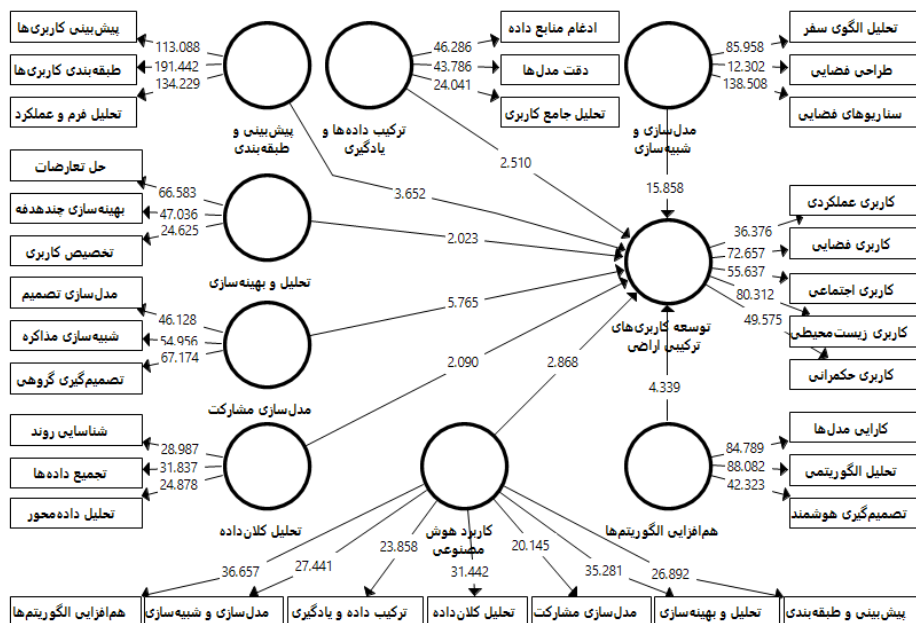
مؤلفه	معیار GoF	معیار VIF	معیار R ²	معیار Q ²
توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی	۰/۷۳۹	۳/۷۰	۰/۷۱۶	۰/۵۰۶

بر اساس نتایج جدول ۷، کلیه مسیرهای اثرگذاری بین متغیرهای مستقل و توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار و تأیید شده‌اند. در این میان، مسیر مدل‌سازی و شبیه‌سازی چیدمان فضایی با مقدار t برابر با ۱۵/۸۵۸ و سطح معناداری ۰/۰۰۰، بیشترین تأثیر را داشته است. مسیر مدل‌سازی مشارکت و مذاکره ذی‌نفعان با مقدار t برابر با ۵/۷۶۵ و سطح معناداری ۰/۰۰۰ و مسیر هم‌افزایی الگوریتم‌های هوشمند با مقدار t برابر با ۴/۳۳۹ و سطح معناداری ۰/۰۰۰ نیز تأثیر معناداری داشته‌اند. همچنین، مسیر پیش‌بینی و طبقه‌بندی کاربری اراضی با مقدار t برابر با ۳/۶۵۲ و سطح معناداری ۰/۰۰۰ و مسیر کاربرد هوش مصنوعی با مقدار t برابر با ۲/۰۲۳ و سطح معناداری ۰/۰۰۰ نیز در سطح آماری معنادار مورد تأیید قرار گرفته‌اند (شکل ۷).

بر اساس نتایج جدول ۷، کلیه مسیرهای اثرگذاری بین متغیرهای مستقل و توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار و تأیید شده‌اند. در این میان، مسیر مدل‌سازی و شبیه‌سازی چیدمان فضایی با مقدار t برابر با ۱۵/۸۵۸ و سطح معناداری ۰/۰۰۰، بیشترین تأثیر را داشته است. مسیر مدل‌سازی مشارکت و مذاکره ذی‌نفعان با مقدار t برابر با ۵/۷۶۵ و سطح معناداری ۰/۰۰۰ و مسیر هم‌افزایی الگوریتم‌های هوشمند با مقدار t برابر با ۴/۳۳۹ و سطح معناداری ۰/۰۰۰ نیز تأثیر معناداری داشته‌اند. همچنین، مسیر پیش‌بینی و طبقه‌بندی کاربری اراضی با مقدار t برابر با ۳/۶۵۲ و سطح معناداری ۰/۰۰۰ و مسیر کاربرد هوش مصنوعی با مقدار t برابر با ۲/۰۲۳ و سطح معناداری ۰/۰۰۰ نیز در سطح آماری معنادار مورد تأیید قرار گرفته‌اند (شکل ۷).

جدول ۷. برآورد نتایج برازش مدل ساختاری (ضریب معناداری t)

نتیجه	سطح معناداری	ضرایب معناداری	ضریب مسیر	مسیر اثرگذاری	
				وابسته	مستقل
تأیید و معنادار	۰/۰۰۰	۳/۶۵۲	۰/۰۲۷	توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی	پیش‌بینی و طبقه‌بندی کاربری اراضی
تأیید و معنادار	۰/۰۴۴	۲/۰۲۳	۰/۰۸۹		تحلیل و بهینه‌سازی تخصیص کاربری
تأیید و معنادار	۰/۰۰۰	۵/۷۶۵	۰/۰۳۸		مدل‌سازی مشارکت و مذاکره ذی‌نفعان
تأیید و معنادار	۰/۰۰۸	۲/۰۰۹	۰/۰۳۶		تحلیل کلان‌داده و روندهای شهری
تأیید و معنادار	۰/۰۰۰	۱۵/۸۵۸	۰/۷۳۵		مدل‌سازی و شبیه‌سازی چیدمان فضایی
تأیید و معنادار	۰/۰۵۰	۲/۵۱۰	۰/۰۲۶		ترکیب داده‌ها و یادگیری ترکیبی
تأیید و معنادار	۰/۰۰۰	۴/۳۳۹	۰/۰۲۲		هم‌افزایی الگوریتم‌های هوشمند
تأیید و معنادار	۰/۰۰۰	۲/۸۶۸	۰/۰۵۰		کاربرد هوش مصنوعی



شکل ۷. مدل معادلات ساختاری پژوهش همراه با ضرایب معناداری (آماره t) برای مدل پژوهش

■ بحث و نتیجه‌گیری

یادگیری ترکیبی با t معادل $۲/۵۱۰$ ، اهمیت استفاده از داده‌های چندمنبعه و یادگیری عمیق را در مدل‌سازی‌های پیچیده فضایی نشان می‌دهد، مطابق با یافته‌های چن و همکاران (۲۰۲۱) است. همچنین، مسیر تحلیل کلان‌داده و روندهای شهری با t معادل $۲/۰۹$ ، نقش کلان‌داده در شناسایی نواحی مستعد توسعه ترکیبی را تأیید می‌کند، مشابه نتایج پژوهش ونگ و همکاران (۲۰۲۲) است. در نهایت، مسیر تحلیل و بهینه‌سازی تخصیص کاربری با t برابر $۲/۰۲۳$ ، اهمیت بهینه‌سازی هوشمند در ارتقای عملکرد فضایی شهری را نمایان می‌سازد که این موضوع با نتایج مطالعات میرزاحسین و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. به طور کلی، هوش مصنوعی در قالب مدل‌سازی، پیش‌بینی، مشارکت‌پذیری و بهینه‌سازی، بستری کارآمد برای ارتقای کیفیت تصمیم‌سازی و تحقق توسعه پایدار کاربری‌های ترکیبی در کلان‌شهر تهران فراهم می‌کند.

به طور کلی، هوش مصنوعی در قالب مدل‌سازی، پیش‌بینی، مشارکت‌پذیری و بهینه‌سازی، بستری کارآمد برای ارتقای کیفیت تصمیم‌سازی و تحقق توسعه پایدار کاربری‌های ترکیبی در کلان‌شهر تهران فراهم می‌کند. با توجه به نتایج تحلیل‌ها و مرور ادبیات، هوش مصنوعی با تلفیق داده‌های متنوع و توانمندی در مدل‌سازی پیچیدگی‌های فضایی و اجتماعی، ظرفیت‌های بی‌نظیری برای توسعه پایدار کاربری‌های ترکیبی اراضی شهری در شهر تهران فراهم کرده است. با این حال، محدودیت‌هایی مانند نیاز به زیرساخت‌های پردازشی قوی، چالش‌های کیفیت داده‌ها و ضرورت تضمین عدالت الگوریتمی همچنان وجود دارد که باید در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر توسعه چارچوب‌های اخلاقی، تقویت همکاری‌های میان‌رشته‌ای و استفاده از فناوری‌هایی مانند یادگیری فدرال و رایانش ابری تمرکز کنند تا هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری مکمل و اثرگذار در برنامه‌ریزی شهری پایدار و فراگیر تهران به کار گرفته شود.

هوش مصنوعی با تحلیل‌های عمیق و تلفیق داده‌های جغرافیایی، اجتماعی و محیط زیستی، ظرفیت‌های قابل توجهی در درک و مدیریت پیچیدگی‌های کاربری‌های ترکیبی اراضی شهری ایجاد کرده است؛ مرور نظام‌مند پژوهش‌ها کاربردهای آن را در سه حوزه تحلیل فضایی و کاربری اراضی، استراتژی‌های توسعه و تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی شهری نشان می‌دهد و رشد قابل توجهی از سال ۲۰۲۰ داشته است. تحلیل کلیدواژه‌ها، هوش مصنوعی را عاملی تحول‌آفرین در پیوند مفاهیم زیست‌محیطی، جمعیتی و برنامه‌ریزی پیشگیرانه معرفی می‌کند که گذار از مدل‌های سنتی به الگوهای پویا و آینده‌نگر را ممکن ساخته است؛ تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند یادگیری عمیق، یادگیری ماشین، الگوریتم‌های ژنتیک و مدل‌سازی عامل‌محور که داده‌های چندمنبعی شامل تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های حمل‌ونقل و شبکه‌های اجتماعی را به کار می‌گیرند، در طبقه‌بندی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی کاربری اراضی شهری نقش مهمی داشته و انعطاف‌پذیری سیستم‌های شهری را در مقابله با چالش‌های محیطی و اجتماعی افزایش داده‌اند. پژوهش‌ها به اهمیت ابعاد اجتماعی-فرهنگی، حکمرانی شفاف و عدالت الگوریتمی اشاره کرده و توسعه چارچوب‌های اخلاقی و همکاری‌های میان‌رشته‌ای را ضروری می‌دانند تا از تبعیض و نابرابری جلوگیری شود. همچنین، محدودیت‌های فناورانه مانند نیاز به منابع پردازشی بالا و چالش‌های داده‌ای، ضرورت استفاده از رایانش ابری و یادگیری فدرال را برجسته کرده است. بنابراین، هوش مصنوعی جایگزین قضاوت انسانی نیست، بلکه ابزاری مکمل است که با مشارکت ذی‌نفعان، زمینه‌ساز شکل‌گیری شهرهای پایدار، مقاوم و فراگیر و توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی در برنامه‌ریزی شهری است.

تحلیل معادلات ساختاری به منظور ارزیابی نقش هوش مصنوعی در توسعه کاربری‌های ترکیبی اراضی شهر تهران نشان داد تمامی مسیرهای اثرگذاری با سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار هستند. مؤلفه مدل‌سازی و شبیه‌سازی چیدمان فضایی با t برابر $۱۵/۸۵۸$ بیشترین تأثیر را داشته است که نقش الگوریتم‌هایی همچون زنجیره مارکوف، شبکه‌های عصبی و اتوماتای سلولی در بازآرایی ساختار فضایی شهری را تأیید می‌کند؛ یافته‌ای که با نتایج پژوهش‌های کاسترو و همکاران (۲۰۲۲) در پیش‌بینی رشد شهری و تأکید یانگ و ژانگ (۲۰۲۰) بر دقت این الگوریتم‌ها همخوانی دارد. مسیر مدل‌سازی مشارکت و مذاکره ذی‌نفعان با t برابر $۵/۷۶۵$ ، توان هوش مصنوعی در تحلیل تصمیم‌گیری چندعاملی و تسهیل فرایندهای مشارکتی را نشان می‌دهد؛ موضوعی که در مطالعات معصومی و وانگندرن (۲۰۲۳) و فنگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز تأیید شده است. مسیر هم‌افزایی الگوریتم‌های هوشمند با t معادل $۴/۳۳۹$ ، اهمیت ترکیب الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی و منطق فازی در بهبود دقت مدل‌های مکانیابی را نمایان می‌سازد، مطابق چاتورودی و دوریس (۲۰۲۱) است. مسیر پیش‌بینی و طبقه‌بندی کاربری اراضی با t برابر $۳/۶۵۲$ ، قابلیت الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی را در طبقه‌بندی دقیق کاربری‌ها تأیید می‌کند؛ هم‌راستا با نتایج پژوهش‌های شارلی و همکاران (۲۰۲۳) و چن و چن (۲۰۲۱) است. مسیر کاربرد هوش مصنوعی با t برابر $۲/۸۶۸$ ، نشان می‌دهد هوش مصنوعی تنها ابزار تحلیلی نیست، بلکه بستری برای سیاست‌گذاری و توسعه تلفیقی فراهم می‌آورد؛ که این موضوع در مطالعات لی و ژو (۲۰۲۴) نیز برجسته شده است. مسیر ترکیب داده‌ها و

■ مشارکت نویسندگان

نوید آهنگری (۱۰۰٪ درصد).

■ تشکر و قدردانی

از کلیه کسانی که در این پژوهش نویسنده مقاله را یاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. این پژوهش منافع تجاری برای نویسنده نداشته و ایشان در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت نشده و مقاله حامی مادی و معنوی نداشته است.

■ تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع در این مقاله وجود ندارد.

منابع

- AlKhereibi, A. H., Wakjira, T. G., Kucukvar, M., and Onat, N. C. (2023). Predictive machine learning algorithms for metro ridership based on urban land use policies in support of transit-oriented development. *Sustainability*, 15(2), 1718. <https://doi.org/10.3390/su15021718>.
- Alshari, E. A., Abdulkareem, M. B., and Gawali, B. W. (2023). Classification of land use/land cover using artificial intelligence (ANN-RF). *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5, Article 964279. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.964279>.
- Anwar, M. R., and Sakti, L. D. (2024). Integrating Artificial Intelligence and Environmental Science for Sustainable Urban Planning. *IAC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI)*. <https://doi.org/10.34306/itsdi.v5i2.666>.
- Borhani, M., and Ghasemloo, N. (2020). Soft computing modelling of urban evolution: Tehran metropolis. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 6(1), 7–15. <https://doi.org/10.9781/IJIMAI.2019.03.001>.
- Castro, M. L., Machado, P., Santos, I., Rodriguez-Fernandez, N., Torrente-Patiño, A., and Carballal, A. (2022). State of the art on artificial intelligence in land use simulation. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, Article ID 2291508. <https://doi.org/10.1155/2022/2291508>.
- Chaturvedi, V., and de Vries, W. T. (2021). Machine learning algorithms for urban land use planning: A review. *Urban Science*, 5(3), 68. <https://doi.org/10.3390/urbansci5030068>.
- Chen, B., Tu, Y., Song, Y., Theobald, D. M., Zhang, T., Ren, Z., Li, X., Yang, J., Wang, J., Wang, X., Gong, P., Bai, Y., and Xu, B. (2021). Mapping essential urban land use categories with open big data: Results for five metropolitan areas in the United States of America. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 203–218. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.010>.
- Chen, R., Yi, X., Zhao, J., He, Y., Chen, B., Liu, F., Yao, X., Jiang, X., Lian, Z., and Li, H. (2025). AI for landscape planning: Assessing surrounding contextual impact on GAN-generated green land layouts. *Cities*, 166, 106181. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106181>.
- Chen, W., Zhao, L., Kang, Q., and Di, F. (2020). Systematizing heterogeneous expert knowledge, scenarios and goals via a goal-reasoning artificial intelligence agent for democratic urban land use planning. *Cities*, 101, 102703. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102703>.
- Cheshmehzangi, A., and Li, H. M. A. (2020). Innovation through urban diversity and achieving comprehensive sustainable urbanism from a community-oriented approach. *Current Urban Studies*, 8(2), 222–240. <https://doi.org/10.4236/cus.2020.82012>.
- Crosas, C., Gómez-Escoda, E., and Villavieja, E. (2024). Interplay between land use planning and functional mix dimensions: An assemblage approach for Metropolitan Barcelona. *Sustainability*, 16(17), 7734. <https://doi.org/10.3390/su16177734>.
- Ghasemi, K. (2024). Enhancing urban livability: Analyzing Tehran through equitable land use distribution. *Journal of Urban Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.06.005>.
- Goodspeed, R. (2020). Smart cities: Moving beyond urban cybernetics to tackle wicked problems. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 13(1), 95–112. <https://doi.org/10.1093/cjres/rsz023>.
- Görgün, E. K., and Çubukçu, K. (2022). Mixed land-use and measuring diversity of land-use. *Ege Coğrafya Dergisi*. <https://doi.org/10.51800/eccd.1014773>.
- Hadiyana, T., and Ji-hoon, S. (2024). AI-driven urban planning: Enhancing efficiency and sustainability in smart cities. *ITEJ (Information Technology Engineering Journals)*, 9(2). <https://doi.org/10.24235/itej.v9i2.124>.
- Hair, J. F., Jr., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., and Sarstedt, M. (2022). A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7>.
- Hara, Y., Hiramatsu, A., Honda, R., Sekiyama, M., and Matsuda, H. (2010). Mixed land-use planning on the periphery of large Asian cities: The case of Nonthaburi Province, Thailand. *Sustainability Science*, 5(2), 237–248. <https://doi.org/10.1007/s11625-010-0104-2>.
- He, X. (2022). Energy effect of urban diversity: An empirical study from a land-use perspective. *Energy Economics*, 109, 105892. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105892>.
- Jinollo, G. T., Workalemahu, L., and Adugna, D. (2024). Impact assessment of mixed land-use planning in Ethiopia: The case of Addis Ababa. *Heliyon*, 10, e40814. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40814>.
- Kasahun, M., and Legesse, A. (2024). Machine learning for urban land use/cover mapping: Comparison of artificial neural network, random forest and support vector machine, a case study of Dilla town. *Heliyon*, 10(20), e39146. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39146>.
- Koumetio Tekouabou, S. C., Diop, E. B., Azmi, R., and Chenal, J. (2023). Artificial intelligence-based methods for smart and sustainable urban planning: A systematic survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(2), 1421–1438. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09844-2>.
- Lebedeva, O. (2024). Study of characteristics of mixed land use in the urban environment. *Bulletin of the Angarsk State Technical University*, 1(18), 257–261. <https://doi.org/10.36629/2686-777x-2024-1-18-257-261>.
- Lee, S., and Lee, M. (2021). A study of establishment and application algorithm of artificial intelligence training data on land use/cover using aerial photograph and satellite images. *Korean Journal of Remote Sensing*, 37(5_1), 871–884. <https://doi.org/10.1234/xyz1234/>.
- Li, J., and Zhu, Y. (2024). An AI-based method for identifying urban land use types based on areas of interest (AOI) and multi-source data. *Land*, 13(2), Article 2040. <https://doi.org/10.3390/land1302040>.
- Lyu, X., Han, Q., and de Vries, B. (2022). A hypothetical urban layout generation model for exploring land use impacts on travel behavior. *Travel Behaviour and Society*, 28, 317–329. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.04.009>.
- Masoumi, Z., and van Genderen, J. (2023). Artificial intelligence for sustainable development of smart cities and urban land-use management. *Geo-spatial Information Science*, 27(4), 1212–1236. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2184729>.
- Mirzahosein, H., Zamani, A., and Hajiseyedrazi, N. S. (2021). Review of applications of machine learning and agent-based methods in land use planning. *Surveying Sciences and Techniques*, 11(2), 129–152. <http://jgst.issgeac.ir/article-1-1017-fa.html> [In Persian].
- Meshkini, A., Rabani, T., Eftekhari, R., and Rafiei, M. (2019). Futures studies of governance: Expanding the concept and future of metropolitan governance in Tehran. *Urban Planning Geographical Research*, 7(3), 431–453. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2019.241191.778> [In Persian].
- Motieyan, H., and Azmoodeh, M. (2021). Mixed-use distribution index: A novel bilevel measure to address urban land-use mix pattern (A case study in Tehran, Iran). *Land Use Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105724>.

- Nekkanti, H., Dey, S., and Chimakurthi, H. M. C. (2025). Integration of geospatial techniques and machine learning in land parcel prediction. *Geosystems and Geoenvironment*, 4(2), 100371. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100371>.
- Ramiana, C. N., Widiastuti, R., and Harsritanto, B. I. R. (2017). Implementing Mixed Land Use: Rooting Jane Jacobs' Concept of Diversity in Urban Sustainability. *Majalah Ilmiah Globe*, 17(1), 27–35. <https://doi.org/10.14710/mdl.17.1.2017.27-35>
- Sadidi, J., Tamnia, F., and Rezaian, H. (2024). Evaluation of artificial intelligence use in completing volunteered geographic information data: Case study of OSM land use data. *Environmental Hazards Spatial Analysis*, 11(1), 1–15. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3398-fa.html> [In Persian].
- Tayebi, S., Alavi, S., Esfandi, S., Meshkani, L., and Shamsipour, A. (2023). Evaluation of land use efficiency in Tehran's expansion between 1986 and 2021: Developing an assessment framework using DEMATEL and interpretive structural modeling methods. *Sustainability*, 15(4), 3824. <https://doi.org/10.3390/su15043824>.
- Wang, D., Fu, Y., Liu, K., Chen, F., Wang, P., and Lu, C. T. (2023). Automated urban planning for Reimagining City configuration via adversarial learning: Quantification, generation, and evaluation. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems*, 9(1). <https://doi.org/10.1145/3524302>.
- Wang, J., Bretz, M., Dewan, M. A. A., and Aghajani Delavar, M. (2022). Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects. *Science of The Total Environment*, 822, 153559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153559>.
- Wang, T., and Yorke-Smith, N. (2025). Introduction: AI for and in urban planning. *Urban Planning*. <https://doi.org/10.17645/up.9417>.
- Wu, X., Liu, X., Zhang, D., Zhang, J., He, J., and Xu, X. (2022). Simulating mixed land-use change under multi-label concept by integrating a convolutional neural network and cellular automata: A case study of Huizhou, China. *GIScience and Remote Sensing*, 59, 609–632. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2049493>.
- Yu, Y., Cao, Y., Hou, D., Disse, M., Brieden, A., Zhang, H., and Yu, R. (2022). The study of artificial intelligence for predicting land use changes in an arid ecosystem. *Journal of Geographical Sciences*, 32, 717–734. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-1969-6>.