



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper
Vol. 37, Issue 2, No.102, 2026, pp. 61- 92
Received: 08/06/2026 Accepted: 16/08/2026

Spatial Evaluation and Modeling of Suitable Locations for High-Rise Buildings in Bandar Abbas Using FAHP, Machine Learning, and Spatial Stability Analysis

Payam Rezaee

M.A. student, Department of Civil Engineering, Qe.C., Islamic Azad University, Qeshm, Iran
payam.rezaei358@gmail.com

Mohsen Dadras  *

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Ba.C., Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran
mohsen.dadras@iau.ac.ir

Mahdi Ajdani

Assistant professor, Department of Computer Engineering, Qe.C., Islamic Azad University, Qeshm, Iran
mahdi.ajdani@iau.ac.ir

Shahla Paslar

Assistant professor, Department of Industrial Engineering, Ba.C., Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran
shahlapaslar@iau.ac.ir

Abstract

Spatial assessment and modeling of suitable locations for high-rise buildings play a crucial role in environmental planning and controlling urban sprawl. This study aimed to identify suitable areas for high-rise building development in Bandar Abbas, Iran, through an integrated approach combining Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), machine learning, and uncertainty analysis. Initially, 37 sub-criteria grouped into 4 categories—physical, infrastructural, socio-economic, and environmental—were defined and weighted by using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). Subsequently, Random Forest (RF) and Extreme Gradient Boosting (XGBoost, XGB) algorithms were employed to re-evaluate the importance of criteria and generate spatial suitability maps. To assess model sensitivity, a tornado analysis was conducted, while uncertainty and stability were evaluated by using Monte Carlo simulation and a coefficient-of-variation-based spatial stability index. Additionally, Cohen's Kappa coefficient was calculated to measure the spatial agreement among the final outputs of the three approaches. The results indicated that physical criteria had the highest influence on high-rise building suitability with a fuzzy weight of 0.646. The RF model identified larger suitable areas, whereas FAHP and XGB provided more conservative estimations. Stability and uncertainty analyses demonstrated that the XGB model exhibited higher spatial robustness and reliability compared to RF. Moreover, a substantial agreement was observed between XGB and FAHP results (Kappa=0.83), indicating strong spatial consistency. Overall, the findings suggested that integrating MCDM methods, machine learning algorithms, and uncertainty analysis provided a robust and reliable framework for high-rise building site selection and urban decision-making.

*Corresponding Author

Rezaee, P. , Dadras, M. , Ajdaee, M. and Paslar, S. (2026). Spatial Evaluation and Modeling of Suitable Locations for High-Rise Buildings in Bandar Abbas Using FAHP, Machine Learning, and Spatial Stability Analysis. *Geography and Environmental Planning*, 37 (2), 61 - 92 .



2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/gep.2026.149230.1792

support. The results of the three models indicated that the northwestern and central-eastern parts of Bandar Abbas were most suitable for high-rise development. Furthermore, the spatial stability index confirmed that XGB performed more consistently than RF, making it a more reliable model for urban planning applications related to high-rise development suitability mapping.

Keywords: High-Rise Development, Sensitivity Analysis, Machine Learning, Monte Carlo, Bandar Abbas.

Introduction

Rapid urbanization and the increasing demand for land in large cities have intensified the need for vertical development and construction of high-rise buildings. In this context, the appropriate siting of such land uses plays a crucial role in reducing pressure on urban land, preventing horizontal urban sprawl, and improving spatial efficiency. Bandar Abbas, due to its geographical location, specific climatic conditions, infrastructural limitations, and environmental sensitivities, requires careful planning for high-rise development. Considering the complexity of factors influencing site selection, the use of integrated approaches combining Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), machine learning, and uncertainty analysis can enhance the accuracy and reliability of results. This study aimed to provide a comprehensive framework for evaluating and modeling suitable locations for high-rise buildings in Bandar Abbas.

Materials & Methods

In this study, 37 sub-criteria were identified and structured into 4 main criteria: accessibility to infrastructure and physical, environmental, and socio-economic factors. The criteria weights were determined by using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). After weighting, all spatial layers were standardized and normalized and a Weighted Linear Combination (WLC) method was applied to generate the initial land suitability map. Subsequently, to validate and compare FAHP results, machine learning algorithms, including Random Forest (RF) and Extreme Gradient Boosting (XGB), were employed to re-estimate the importance of criteria. Three final suitability maps were produced based on the FAHP, RF, and XGB models. Sensitivity analysis was performed by using the tornado method. In addition, uncertainty and stability were assessed by using Monte Carlo simulation and a coefficient-of-variation-based spatial stability index. Furthermore, the spatial agreement between the models was evaluated by using the Kappa coefficient.

Research Findings

The results indicated that in all three methods (FAHP, RF, and XGB), the physical criterion had the highest importance in high-rise building site selection. However, its weight in machine learning models (approximately 0.80) was significantly higher than that of FAHP (0.469). This suggested that data-driven models were more sensitive to the physical characteristics of the urban environment and assigned greater importance to these factors in determining land suitability. In contrast, FAHP allocated higher importance to infrastructural and socio-economic criteria, reflecting a more comprehensive expert-based perspective compared to machine learning algorithms. The similarity between RF and XGB results indicated strong convergence and stability of these two models in spatial analysis, while FAHP provided a more balanced distribution of weights among the criteria. Sensitivity analysis revealed that the physical criterion has the greatest impact on the final output, where small changes in its weight significantly altered the spatial suitability pattern. The other criteria showed lower sensitivity and contributed more stable effects within the model. Regarding uncertainty analysis, Monte Carlo simulation results demonstrated that the XGB model exhibited higher spatial stability compared to RF as random changes in criterion weights had less influence on its outputs. Moreover, the high Kappa coefficient (0.83) between XGB and FAHP indicated a strong agreement between these two approaches. Spatially, the northwestern and central-eastern parts of Bandar Abbas were identified as the most suitable areas for high-rise development.

Discussion of Results & Conclusion

The findings of this study demonstrated that integrating multi-criteria decision-making methods, machine learning techniques, and uncertainty analysis provides a comprehensive, accurate, and reliable framework for high-rise building site selection. Model comparison showed that FAHP offers a more expert-driven and balanced perspective, while RF and XGB rely more on spatial data patterns and observed relationships. However, the XGB model is recommended as the most robust approach due to its higher stability, better consistency with FAHP, and more balanced performance in identifying suitable areas. Overall, this integrated framework can serve as an effective tool for urban planners to control urban sprawl, optimize land use, and guide high-rise development in Bandar Abbas. Future studies are recommended to incorporate climatic variables, population growth scenarios, and temporal datasets to enable more dynamic urban modeling.

مقاله پژوهشی

ارزیابی و مدل‌سازی فضایی مکان‌های مناسب برای ساختمان‌های بلندمرتبه در بندرعباس با بهره‌گیری از FAHP، یادگیری ماشین و پایداری مکانی

پیام رضایی، دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

payam.rezaei358@gmail.com

محسن دادرس*، استادیار گروه مهندسی عمران، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

mohsen.dadras@iau.ac.ir

مهدی آجدانی، استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

mahdi.ajdani@iau.ac.ir

شاهلا پاسلار، استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

shahlapaslar@iau.ac.ir

چکیده

مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه، نقش مهمی در برنامه‌ریزی محیطی و کنترل گسترش افقی شهرها دارد. پژوهش حاضر با هدف مکان‌یابی این ساختمان‌ها در شهر بندرعباس با استفاده از تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، یادگیری ماشین و تحلیل عدم قطعیت انجام شد. در این راستا، ابتدا ۳۷ زیرمعیار در قالب چهار معیار کالبدی، زیرساختی، اقتصادی - اجتماعی و فیزیکی تنظیم و با روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) وزن‌دهی شدند. سپس الگوریتم‌های RF و XGBoost به‌منظور وزن‌دهی مجدد معیارها و تولید نقشه‌های مطلوبیت مکانی به کار گرفته شدند. برای ارزیابی حساسیت مدل‌های یادگیری، از تحلیل تورنادو استفاده شد و عدم قطعیت و پایداری نتایج با مونت کارلو و شاخص پایداری مبتنی بر ضریب تغییرات انجام گرفت. همچنین، ضریب کاپا برای سنجش میزان توافق فضایی بین نقشه‌های نهایی سه روش محاسبه شد. نتایج نشان داد که معیارهای کالبدی با وزن فازی ۰/۶۴۶ بیشترین تأثیر را در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه دارند. مدل RF پهنه‌های مناسب بیشتری را شناسایی کرد؛ درحالی‌که XGB و FAHP دیدگاه محافظه‌کارانه‌تری ارائه دادند. نتایج تحلیل پایداری و عدم قطعیت بیان‌کننده آن بود که مدل XGB از ثبات فضایی و قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به RF برخوردار است. همچنین ضریب کاپای بالا بین XGB و FAHP (۰/۸۳) نشان‌دهنده توافق قابل توجه این دو روش بود. در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، یادگیری ماشین و تحلیل عدم قطعیت می‌تواند چارچوبی کارآمد و قابل اعتماد برای مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های شهری فراهم سازد. نتایج مدل‌های سه‌گانه بیان‌کننده این است که اراضی واقع در شمال‌غربی و بخش‌های شرقی - مرکزی بندرعباس برای بلندمرتبه‌سازی ساختمانی مناسب‌اند. نتایج شاخص پایداری بیان‌کننده آن است که مدل XGB در مقایسه با RF عملکرد قابل اعتمادتر و سازگارتری در تولید نقشه مطلوبیت مکانی داشته و می‌تواند به‌عنوان مدل پایدارتر برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های شهری در زمینه توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: بلندمرتبه‌سازی، تحلیل حساسیت، یادگیری ماشین، مونت کارلو، بندرعباس

*نویسنده مسئول

رضایی، پیام، دادرس، محسن، آجدانی، مهدی و پاسلار، شاهلا. (۱۴۰۵). ارزیابی و مدل‌سازی فضایی مکان‌های مناسب برای ساختمان‌های بلندمرتبه در بندرعباس با بهره‌گیری از FAHP، یادگیری ماشین و پایداری مکانی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۷ (۲)، ۹۲-۶۱.



مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و افزایش جمعیت شهری در دهه‌های اخیر، موجب گسترش توسعه فیزیکی شهرها و افزایش تقاضا برای زمین شهری شده است (Guneralp et al., 2020, p. 1). در بسیاری از شهرهای در حال توسعه، از جمله شهر بندرعباس، محدودیت اراضی مناسب، افزایش قیمت زمین و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی سبب گرایش به توسعه عمودی و احداث ساختمان‌های بلندمرتبه شده است. توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه، اگر بدون برنامه‌ریزی فضایی و ارزیابی علمی انجام شود، می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی نظیر فشار بر زیرساخت‌ها، اختلال در شبکه حمل‌ونقل، افزایش آسیب‌پذیری محیطی و ناهماهنگی کالبدی شهر شود (Veretennikov et al., 2023, p. 163). در این راستا، مکان‌یابی مناسب ساختمان‌های بلندمرتبه به عنوان یکی از مهم‌ترین مباحث برنامه‌ریزی شهری مطرح می‌شود (Zhao et al., 2024, p. 1). فرایند مکان‌یابی نیازمند تحلیل همزمان معیارهای متعدد کالبدی، زیرساختی، اجتماعی و محیطی است (Taleai et al., 2014, p. 2). سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) از جمله ابزارهای متداول در تحلیل تناسب اراضی شهری محسوب می‌شوند؛ با این حال، بسیاری از روش‌های سنتی نظیر AHP و Weighted Overlay وابستگی زیادی به قضاوت کارشناسی دارند و دارای درجه‌ای از ذهنیت در تعیین وزن معیارها هستند (Zio, 1996, p. 127). در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در تحلیل تناسب مکانی و برنامه‌ریزی شهری گسترش یافته است. الگوریتم‌هایی نظیر RF، SVM و XGB به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط غیرخطی، مدیریت داده‌های پیچیده فضایی و کاهش خطای انسانی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها قادرند الگوهای پنهان میان متغیرهای مکانی و تناسب توسعه شهری را استخراج کنند و دقت پیش‌بینی را افزایش دهند (Sahin, 2023, p. 1067; Hasanuzzaman & Shit, 2025, p. 37).

یکی از محدود مطالعاتی که مستقیماً به مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه پرداخته، پژوهش اولیا و همکاران است که در شهر سورابایا اندونزی انجام شد. آنها تناسب اراضی برای احداث ساختمان‌های بلند با استفاده از GIS و روش AHP ارزیابی کردند و نشان دادند که برخی از مناطق دارای جذابیت اقتصادی، از نظر شرایط ژئوتکنیکی برای ساخت برج‌ها مناسب نیستند و تلفیق معیارهای فیزیکی و اقتصادی برای توسعه بلندمرتبه ضروری است (Aulia et al., 2014, p. 147). همچنین در شهرهای شانگهای و تیانجین در چین، سوی و همکاران اثر متقابل ساختمان‌های بلندمرتبه و خاک‌های نرم بر پدیده فرونشست زمین را بررسی کردند و نشان دادند تمرکز ساختمان‌های مرتفع در مناطق دارای خاک نرم می‌تواند موجب افزایش نشست زمین و تغییر رفتار ژئوتکنیکی بستر شود. نتایج تحقیق بر ضرورت ارزیابی دقیق شرایط زمین و مطالعات ژئوتکنیک پیش از توسعه بلندمرتبه‌سازی تأکید دارد (Cui et al., 2015, p. 1199).

پژوهشگران در هند رویکردی مبتنی بر GIS برای انتخاب ایمن محل احداث ساختمان ارائه کردند. آنها عوامل توپوگرافی، شیب، پایداری زمین و مخاطرات طبیعی در فرایند مکان‌یابی لحاظ کردند و نتایج آنها نشان داد تحلیل فضایی در محیط GIS می‌تواند مناطق ایمن‌تر برای توسعه ساختمان‌ها را شناسایی کند و خطرات ساخت‌وساز را کاهش دهد (Kumar & Bansal, 2016, p. 39).

منصوری و همکاران تناسب اراضی برای ساختمان‌های بلندمرتبه در مشهد را با بهره‌گیری از GIS و فرایند تحلیل شبکه (ANP) شناسایی کرده و نشان دادند که مناطق ۵ و ۱۰ مشهد به دلیل خطرپذیری کمتر و شرایط محیطی مناسب، بیشترین قابلیت توسعه بلندمرتبه را دارند؛ درحالی‌که مناطق ۸ و ۹ به علت وجود گسل، شیب زیاد و خطر سیلاب، از تناسب پایینی برخوردارند (Mansouri et al., 2017, p. 16).

میزان پذیرش اجتماعی ساختمان‌های بلندمرتبه در راستای توسعه پایدار شهری یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در ساختمان‌سازی است که در یکی از شهرهای غنا توسط آگیمنگ و همکاران بررسی شد و نشان دادند که عواملی مانند بهبود استفاده از زمین، کاهش گسترش افقی شهر، دسترسی بهتر به خدمات و توسعه زیرساخت‌ها موجب افزایش پذیرش اجتماعی ساختمان‌های بلند می‌شود؛ درمقابل نگرانی‌هایی مانند تراکم جمعیت، فشار بر خدمات شهری و تغییر سیمای شهری از مهم‌ترین چالش‌های مطرح‌شده بودند (Agyemang et al., 2018, p. 1317).

حسین و همکاران چالش‌های ناشی از تراکم در توسعه مجتمع‌های مسکونی بلندمرتبه در مالزی را بررسی کردند و نشان دادند که توسعه بلندمرتبه بدون برنامه‌ریزی مناسب می‌تواند موجب فشار بر زیرساخت‌های شهری، کاهش کیفیت محیط زندگی، کمبود فضاهای باز و افزایش ازدحام جمعیتی شود (Husin et al., 2021, p. 1).

ما و همکاران با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و ارزیابی چرخه نشان دادند که ساختمان‌های بلند می‌توانند سهم قابل توجهی در تولید کربن و مصرف انرژی داشته باشند و انتخاب نوع سازه و مصالح نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی دارد (Ma et al., 2024, p. 1). همچنین لین و همکاران تأثیر شاخص‌های برنامه‌ریزی شهری بر پدیده جزیره حرارتی شهری در محیط‌های متراکم و بلندمرتبه را با تمرکز بر نقش پارک‌های کوچک شهری بررسی کردند و نشان دادند که شاخص‌هایی مانند تراکم ساختمانی، ارتفاع ساختمان‌ها، نسبت سطح اشغال و میزان فضای سبز تأثیر مستقیمی بر شدت جزیره حرارتی دارند (Lin et al., 2017, p. 48). پژوهشگران با بهره‌گیری از مدل‌های ANP و VIKOR، مناسب‌ترین پهنه‌های بلندمرتبه‌سازی در شهر اردبیل را شناسایی کرد. نتایج نشان داد که پهنه‌های شرقی، غربی و شمال‌شرقی شهر از بیشترین قابلیت برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه برخوردارند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۶، ص ۱۹).

به همین دلایل، اهداف اصلی این پژوهش شامل: (۱) ارائه یک روش جدید شامل دو تکنیک یادگیری ماشین - جنگل تصادفی (RF)، تقویت گرادیان شدید (XGB) برای استخراج وزن معیارها برای GIS-MCE برای کمک به یک مسئله تصمیم‌گیری درباره مناسب بودن شهر برای بلندمرتبه‌سازی و (۲) مقایسه نمرات مناسب بودن حاصل از روش ML-MCE با نمرات به دست آمده از رویکرد Fuzzy AHP. روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده‌های مکانی - فضایی شهر بندرعباس اعمال شد. نوآوری اصلی این پژوهش استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای تولید وزن معیارها برای GIS-MCE در تحلیل مناسب بودن اراضی برای بلندمرتبه‌سازی ساختمان‌های شهر است. روش ارائه‌شده را می‌توان در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت کاربری زمین به کار برد.

مبانی نظری

روش ارزیابی چندمعیاره (MCE) اغلب در تصمیم‌گیری برای حل مسائل مربوط به تحلیل تناسب استفاده می‌شود که در آن چندین معیار، که اغلب متناقض هستند، به‌طور همزمان در نظر گرفته می‌شوند (Malczewski & Jankowski, 2020, p. 1257). هنگامی که MCE با GIS ادغام شود، می‌تواند با داده‌های مکانی طیف گسترده‌ای از مسائل مکانی، مانند تحلیل تناسب زمین (Chen, 2014, p. 14)، مدیریت محیط زیست (Gelan, 2021, p. 1)، ارزیابی ظرفیت اکولوژیکی (Masoudi et al., 2023, p. 1) یا ارزیابی ریسک بلایا (Abid et al., 2021, p. 1) و موارد دیگر، را حل کند. این ترکیب با تسهیل تحلیل ساختاریافته از مسائل مکانی پیچیده، از تصمیم‌گیری آگاهانه مربوط به توسعه کاربری زمین شهری پشتیبانی می‌کند (Masoudi et al., 2021 p. 457). با گنجاندن چندین معیار، مانند پهنه‌بندی کاربری زمین، کیفیت محیط زیست، دسترسی به زیرساخت‌ها یا جمعیت‌شناسی، GIS-MCE می‌تواند برای به دست آوردن تناسب مکان‌ها برای کاربری‌های مختلف زمین استفاده شود و در نتیجه به فرآیندهای برنامه‌ریزی شهری کمک کند. مطالعات، GIS-MCE را در تحلیل تناسب کاربری اراضی شهری، با کاربردهای مؤثر برای شناسایی مکان‌های مناطق صنعتی جدید (Dai et al., 2008, p. 378)، فضاهای سبز (Abebe & Megento, 2017, p. 247)، مدیریت توسعه شهری (Liu et al., 2014, p. 170) و برنامه‌ریزی استقرار زیرساخت‌ها (Caprioli & Bottero, 2021, p. 1) استفاده کرده‌اند.

یک روش GIS-MCE عموماً شامل شش مرحله اصلی است: (۱) تعریف مسئله تصمیم‌گیری مکانی؛ (۲) انتخاب معیارها؛ (۳) جمع‌آوری داده‌های مکانی مرتبط؛ (۴) طراحی و اعمال توابع مناسب برای نرمال‌سازی لایه‌های داده معیارها؛ (۵) اختصاص وزن معیارها برای انعکاس اهمیت نسبی آنها در مسئله کلی تصمیم‌گیری؛ و (۶) محاسبه امتیازهای مناسب‌سازی تجمیعی که می‌توانند به‌عنوان نقشه مناسب‌سازی ارائه شوند. یکی از مراحل کلیدی GIS-MCE استخراج وزن معیارها است؛ زیرا آنها مستقیماً بر امتیازهای خروجی تأثیر می‌گذارند (Chen et al., 2010, p. 1582). وزن معیارها در GIS-MCE معمولاً با استفاده از نظر کارشناسان و ذی‌نفعان یا از طریق رویکردهای ریاضی مانند فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی (AHP)، تکنیک TOPSIS یا روش آنتروپی (Shannon, 1948, p. 379) تعیین می‌شود (Saaty, 1977, p. 234). با وجود مفیدبودن GIS-MCE، تعیین وزن معیارها همچنان چالش برانگیز است؛ برای مثال، اخذ نظر متخصصان و ذی‌نفعان پُرهزینه و زمان‌بر است (Greene et al., 2010, p. 2102). درمقابل، رویکردهای ریاضی روشی ساختاریافته‌تر و کارآمدتر برای استخراج وزن معیارها ارائه می‌دهند؛ با این حال، این روش‌ها تا حدی به نظر ذهنی تحلیلگران فضایی، ذی‌نفعان یا تصمیم‌گیرندگان وابسته هستند که در نتیجه باعث ایجاد سوگیری می‌شود (Saaty, 1984, p. 285).

رویکرد AHP که ساعتی در سال ۱۹۷۷ پیشنهاد داد، رایج‌ترین تکنیک وزن‌دهی معیارهای MCE است که در نرم‌افزارهای GIS مانند ArcMap و TerrSet استفاده می‌شود. AHP شامل مقایسه‌های زوجی همه معیارها برای ایجاد سلسله‌مراتب معیارها است. به این ترتیب، وزن‌های به‌دست‌آمده، اهمیت نسبی هر معیار را برای مسئله تناسب نشان می‌دهند؛ برای مثال، تناسب بلندمرتبه‌سازی ساختمان‌های شهری ممکن است معیارهایی مانند کاربری زمین، تراکم ساختمانی یا دسترسی به زیرساخت‌ها و ساختار فیزیکی شهر را در نظر بگیرد. تصمیم‌گیرنده می‌تواند وزن این

معیارها را از طریق مقایسه‌های زوجی تعیین کند و در نتیجه اهمیت نسبی هر معیار را کمی کند؛ با این حال، رویکرد AHP به قضاوت‌های ذهنی کسانی که اهمیت نسبی معیارها را تعیین می‌کنند، متکی است. این قضاوت‌ها می‌تواند در بین افراد متفاوت باشد و ممکن است تحت تأثیر سوگیری‌ها یا اطلاعات ناقص قرار گیرد و به‌طور بالقوه منجر به خروجی‌های تناسب MCE متناقض یا غیرقابل اعتماد شود (Liu et al., 2020, p. 1). علاوه بر این، فرآیند مقایسه زوجی که در AHP ذاتی است، وقتی تعداد بیشتری از معیارها در نظر گرفته می‌شوند، پیچیده‌تر و مدیریت آن دشوارتر می‌شود (Dodevska et al., 2023, p. 1). برای مدیریت این چالش‌ها، به‌تازگی پتانسیل تکنیک‌های یادگیری ماشین (ML) به دلیل ظرفیت آنها در مدیریت و تجزیه و تحلیل مقادیر زیادی از داده‌ها بررسی شده است.

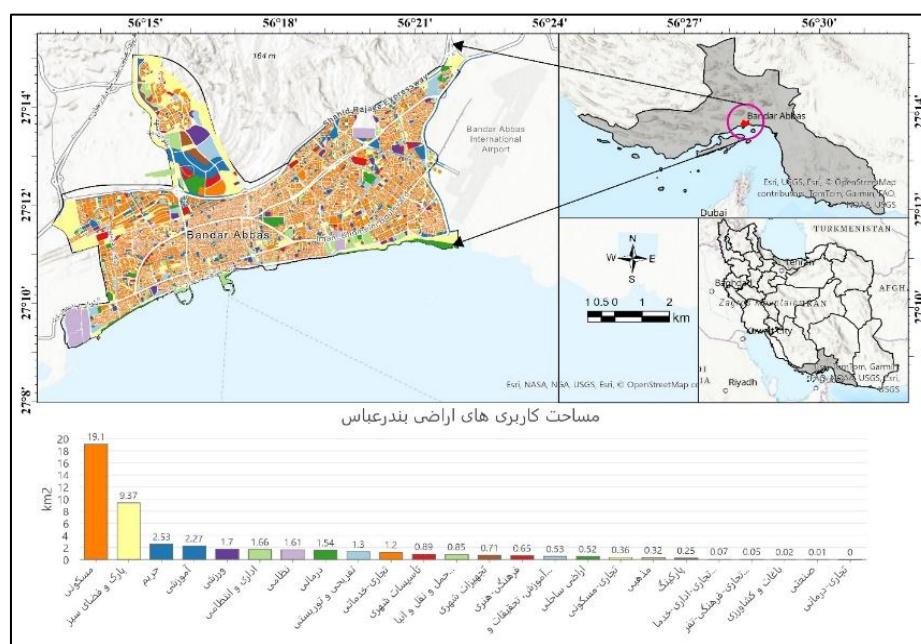
در کاربردهای مکانی، یادگیری ماشین (ML) عمدتاً برای طبقه‌بندی داده‌های سنجش از دور یا داده‌های مکانی یا برای تخمین حالت‌های جدید پدیده‌های مکانی استفاده می‌شود (Chang et al., 2020, p. 1)؛ برای مثال، یادگیری ماشینی در کاربردهای مختلف مکانی مانند تخمین زیستگاه (Garzon et al., 2006) یا مناسب‌بودن کشاورزی (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2020, p. 1)، مکان‌یابی زیرساخت‌ها (Al-Ruzouq et al., 2019, p. 1)، پیش‌بینی اراضی مناسب برای رشد شهری (Gharaibeh et al., 2023, p. 1) یا محاسبه حساسیت به (Ali et al., 2021, p. 857) به کار گرفته شده است. این مطالعات مستقیماً از مقادیر خروجی تکنیک‌های یادگیری ماشین برای تعیین ضریب مناسب‌بودن یا حساسیت استفاده کرده‌اند. به‌جای استفاده از خروجی‌های مستقیم تکنیک‌های یادگیری ماشین، سایر مطالعات استفاده از تحلیل‌های اهمیت ویژگی را برای استخراج وزن معیارها در روش‌های GIS-MCE بررسی کرده‌اند؛ برای مثال، سینگ و همکاران از تحلیل‌های اهمیت ویژگی مرتبط با یک طبقه‌بندی‌کننده جنگل تصادفی (RF) برای استخراج وزن معیارها در یک روش GIS-MCE در ارزیابی مناسب‌بودن جنگل زراعی استفاده کردند. در آن مطالعه، از اهمیت نسبی هر عامل دخیل در آموزش طبقه‌بندی‌کننده برای استخراج اهمیت عامل به‌طور مستقیم از داده‌های مکانی موجود استفاده می‌شود. مقادیر اهمیت نسبی استانداردسازی شدند تا به وزن معیارها برای یک روش سنتی GIS-MCE تبدیل شوند (Singh et al., 2022, p. 1)؛ درحالی‌که این مطالعه تکنیک‌های یادگیری ماشین را با GIS-MCE ادغام کرده است، نیاز به بررسی بیشتر ظرفیت تکنیک‌های مختلف یادگیری ماشین برای استخراج وزن معیارها وجود دارد که در زمینه‌های مکانی مختلف، از جمله تغییر کاربری اراضی شهری و تحلیل‌های مناسب‌بودن بلندمرتبه‌سازی ساختمان‌های شهری، ناشناخته مانده است.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه

بندرعباس، به‌عنوان مهم‌ترین کلان‌شهر ساحلی جنوب ایران و مرکز سیاسی - اداری استان هرمزگان، در حاشیه شمالی خلیج فارس و در موقعیتی راهبردی در کریدورهای ملی و بین‌المللی حمل‌ونقل دریایی قرار گرفته است که به‌عنوان محدوده مورد مطالعه در این پژوهش برای مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در نظر گرفته شد (شکل ۱). این شهر، بر بستر ترم از رسوبات شور و آهکی ساحلی گسترده شده است و عمق تراز ایستابی در نقاط مختلف این شهر، کمتر

از ۱۰ متر است که عملیات ساختمان‌سازی را در آن دشوار کرده است. از طرفی، موانع طبیعی (صخره‌های تیز شمالی و دریا در جنوب) و موانع انسانی (فرودگاه در شرق، صنایع و مراکز نظامی در غرب)، منجر به گنبد شدن روند رشد فیزیکی شهر در بُعد افقی شده است (Dadras et al., 2014, p. 1)؛ حتی در مواردی که شهرک‌سازی در بُعد افقی در شمال‌غربی شهر انجام شده است، با بحران فرونشست بستر زمین مواجه شده‌اند؛ بنابراین، طرح بلندمرتبه‌سازی با در نظر گرفتن ملاحظات کالبدی، محیط‌زیست شهری، آسایش حرارتی و سیمای سرزمین شهری، می‌تواند بخشی از مشکلات مسکن و ساخت‌وساز در بندرعباس را کاهش دهد.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه: شهر بندرعباس در استان هرمزگان - جنوب ایران (منبع: نویسندگان)

Figure 1: Location of the study area: Bandar Abbas City, Hormozgan Province, southern Iran.

چارچوب کلی پژوهش

این مطالعه به مسئله یافتن مکان‌های مناسب برای ساختمان‌های بلندمرتبه شهری در بندرعباس می‌پردازد. برای شروع تجزیه و تحلیل MCE، ابتدا ۳۷ زیرمعیار در چهار معیار (دسترسی به زیرساخت‌ها، کالبدی، فیزیکی، اجتماعی - اقتصادی) دسته‌بندی شدند. زیرمعیارها با روش FAHP وزن‌دهی شده و معیارهای خود را ساختند. در مرحله بعد، لایه‌های معیار با استفاده از توابع مناسب، قبل از ادغام معیارهای مکانی، نرمال‌سازی شدند. انتخاب معیارها و تعیین توابع مناسب بودن براساس ادبیات علمی و نظر ذی‌نفعان و متخصصان انجام شد. وزن معیارها ابتدا با استفاده از رویکرد AHP فازی، محاسبه شد (Mohammadi, 2019, p. 25). سپس با روش همپوشانی وزنی خطی (WLC)، چهار معیار وزن‌دار همپوشانی شد (Ezeh et al., 2022, p. 1) و نقشه نهایی از مطلوبیت اراضی برای احداث ساختمان‌های بلندمرتبه در محدوده شهر بندرعباس به دست آمد. برای ارزیابی وزن به‌دست آمده از FAHP، از تکنیک‌های یادگیری ماشین شامل الگوریتم‌های RF و XGB استفاده شد و وزن چهار معیار اصلی با این تکنیک‌ها هم

به‌دست آمد و باهم مقایسه شدند. پس سه نقشه نهایی از همپوشانی معیارها، حاصل از سه روش FAHP، RF و XGB به دست آمد. رایج‌ترین روش تجمیع معیارها (روی هم گذاری یا همپوشانی) در GIS-MCE، روش WLC، شامل ضرب هر لایه معیار نرمال‌شده در وزن اختصاص‌یافته به آن و جمع‌بندی نتایج برای به دست آوردن امتیاز مناسب‌بودن نهایی برای هر سلول رستری در منطقه مورد مطالعه است (Malczewski, 2000, p. 5). درنهایت، امتیازات مناسب‌بودن حاصل به سه کلاس طبقه‌بندی شدند و نقشه‌های مناسب‌بودن برای مقایسه و به‌عنوان نقطه شروع برای فرآیند تصمیم‌گیری ایجاد شد. در ادامه بخش‌های روش پژوهش به تفصیل تشریح شده است.

در این پژوهش، مجموعه‌ای از داده‌های مکانی و توصیفی برای تحلیل مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس استفاده شد. این داده‌ها شامل لایه‌های مختلف طبیعی و انسانی بوده و از منابع معتبر داخلی و بین‌المللی گردآوری شده‌اند. داده‌های ارتفاعی شامل مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت مکانی ۳۰ متر است. تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با دقت مکانی ۱۰ متر برای استخراج برخی شاخص‌های محیطی استفاده شد. همچنین داده‌های کاربری زمین و شبکه معابر از سازمان‌های شهری و پایگاه داده OpenStreetMap استخراج شد. کلیه داده‌ها مربوط به بازه زمانی ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۵ بوده و پس از جمع‌آوری، به یک سیستم مختصات مشترک، تبدیل و به‌صورت رستری و وکتوری برای تحلیل‌های مکانی آماده‌سازی شدند. همچنین برای هم‌مقیاس‌سازی لایه‌ها از نرمال‌سازی خطی در بازه ۰ تا ۱ استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱- معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در پژوهش، منبع داده، تابع استانداردسازی و وزن‌های حاصل از روش FAHP

Table 1- Criteria and sub-criteria used in the study, data sources, standardization functions, and FAHP weights

معیار اصلی	زیرمعیار	منبع داده	تابع استانداردسازی	وزن FAHP
دسترسی و زیرساخت‌ها	فاصله از شبکه سوخت	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۱۳۳
	فاصله از بنادر و فرودگاه	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۲۱۶
	فاصله از مسیر اتوبوس	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۳۴۳
	فاصله از ایستگاه اتوبوس	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۵۱۴
	فاصله از مراکز آتشنشانی	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۷۳۰
	فاصله از شبکه تاسیسات شهری	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۹۸۹
	فاصله از شبکه ارتباطات	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۱۲۹
	فاصله از شبکه برق	شرکت توزیع برق بندرعباس	خطی نزولی	۰/۱۵۹
	فاصله از شبکه آب	شرکت آب منطقه‌ای	خطی نزولی	۰/۱۹۳
	فاصله از شبکه معابر	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۲۲۶
فیزیکی	زمین شناسی	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۰۱۲
	خاک شناسی	سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۰۱۹

معیار اصلی	زیرمعیار	منبع داده	تابع استانداردسازی	وزن FAHP
	هیدرولوژی	شبکه آبراهه استخراج شده از DEM	خطی نزولی	۰/۰۲۹
	فرم زمین	استخراج شده از DEM SRTM 30 m	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۰۳۹
	پوشش زمین	تصاویر Sentinel-2	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۰۵۲
	فرسایش	مدل RUSLE	خطی نزولی	۰/۰۶۵
	روانگرایی	مطالعات پهنه‌بندی روانگرایی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	خطی نزولی	۰/۰۸۲
	فاصله از ساحل	استخراج شده از خط ساحلی OpenStreetMap	خطی صعودی	۰/۰۹۸
	جهات شیب	استخراج شده از DEM SRTM 30 m	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۱۱۸
	طبقات شیب	استخراج شده از DEM SRTM 30 m	خطی نزولی	۰/۱۳۸
	طبقات ارتفاعی	استخراج شده از DEM SRTM 30 m	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۱۶۱
	فاصله از گسل	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران	خطی صعودی	۰/۱۸۳
اقتصادی - اجتماعی	فاصله از مراکز توریستی	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۲۱
	فاصله از مراکز اداری	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۳۵
	فاصله از مراکز تجاری	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۰۵۸
	فاصله از مراکز آموزشی	آموزش پرورش	خطی نزولی	۰/۰۸۷
	فاصله از فضای سبز	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۱۲۵
	فاصله از مراکز درمانی	شهرداری بندرعباس	خطی نزولی	۰/۱۷۰
	پراکنش جمعیت	مرکز آمار ایران	خطی صعودی	۰/۲۲۱
	ارزش زمین	اداره کل راه و شهرسازی هرمزگان	خطی صعودی	۰/۲۸۰
کالبدی	شبکه معابر	شهرداری بندرعباس	خطی صعودی	۰/۰۲۸
	جمعیت	مرکز آمار ایران	خطی صعودی	۰/۰۴۹
	سرانه اراضی	طرح جامع و طرح تفصیلی شهر بندرعباس	خطی صعودی	۰/۰۸۰
	تراکم	طرح تفصیلی شهر بندرعباس	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۱۲۲
	عملکرد اراضی	طرح جامع و طرح تفصیلی شهر بندرعباس	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۱۷۴
	مساحت اراضی مسکونی	طرح تفصیلی شهر بندرعباس	خطی صعودی	۰/۲۳۶
	کاربری اراضی	نقشه کاربری اراضی شهرداری بندرعباس	طبقه‌بندی مبتنی بر مطلوبیت	۰/۳۰۸

در انتخاب معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه، علاوه بر مرور ادبیات علمی و اخذ نظر خبرگان، الزامات و ضوابط برنامه‌ریزی شهری نیز مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور، اسناد بالادستی شامل طرح جامع شهر بندرعباس، طرح تفصیلی شهر بندرعباس، ضوابط و مقررات شهرسازی مرتبط با بلندمرتبه‌سازی و مصوبات شورای عالی شهرسازی و معماری ایران به‌عنوان مبنای شناسایی محدودیت‌ها و فرصت‌های توسعه شهری بررسی شدند؛ به همین دلیل، معیارهایی نظیر کاربری اراضی، تراکم ساختمانی، عملکرد اراضی، سرانه اراضی، شبکه معابر و ارزش زمین با استناد به این اسناد وارد فرآیند تحلیل شدند. بخشی از داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، شامل لایه‌های کاربری اراضی، عملکرد اراضی، تراکم ساختمانی و سرانه اراضی مستقیماً از طرح جامع و طرح تفصیلی شهر بندرعباس، استخراج و در فرآیند ارزیابی چندمعیاره استفاده شدند.

همخطی چندگانه معیارها

قبل از ادامه مراحل بعدی تحلیل GIS-MCE، بررسی روابط متقابل بین معیارها و شناسایی همبستگی‌ها مهم است. یک تحلیل همخطی چندگانه شامل محاسبه عوامل تورم واریانس (VIFs) با استفاده از فرمول زیر اعمال شد (Daoud, 2017, p. 1):

$$VIF = \frac{1}{1-R^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن R^2 میزان دقت تخمین معیار با استفاده از سایر معیارها را اندازه‌گیری می‌کند. VIF برابر با یک باشد، نشان‌دهنده عدم همبستگی یا همخطی بین یک معیار معین و سایر معیارها است؛ درحالی‌که VIF بیش از پنج باشد، بیان‌کننده سطح بالای همخطی است. نتایج تحلیل VIF با استفاده از داده‌های لایه‌های معیار نرمال شده در **جدول (۲)** ارائه شده است. از آنجایی که هیچ معیاری از مقدار پنج تجاوز نکرد، نتیجه گرفته شد که هیچ همخطی چندگانه‌ای وجود ندارد؛ بنابراین همه معیارها در تحلیل GIS-MCE گنجانده شدند.

جدول ۲- مقدار VIF در معیارهای نرمال شده (منبع: نویسندگان)

Table 2: Variance Inflation Factor (VIF) values of the normalized criteria

ردیف	معیار	VIF
۱	دسترسی و زیرساخت‌ها	۲/۳۷
۲	کالبدی	۱/۰۴۹
۳	فیزیکی	۲/۷۲۱
۴	اجتماعی - اقتصادی	۱/۱۳۲

رویکرد وزن‌دهی معیارها

در این پژوهش، برای وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در بندرعباس از روش FAHP استفاده شد. بدین منظور، از نظر ۱۲ نفر از خبرگان در حوزه‌های برنامه‌ریزی شهری، GIS،

معماری و مدیریت شهری با میانگین سابقه کاری ۸ سال بهره گرفته شد. انتخاب خبرگان به صورت هدفمند و براساس تخصص مرتبط انجام شد.

جمع‌آوری داده‌ها از طریق پرسشنامه‌های مقایسه زوجی مبتنی بر مقیاس فازی مثلثی و براساس مقیاس ساعتی انجام گرفت (Tamošaitienė et al., 2013). هر خبره به صورت مستقل به مقایسه زوجی معیارها در سطوح مختلف پرداخته است. برای تجمع قضاوت‌های خبرگان، از میانگین هندسی استفاده شد تا اثر قضاوت‌های فردی به یک قضاوت گروهی تبدیل شود. ماتریس‌های مقایسه زوجی برای تمامی معیارهای اصلی و زیرمعیارها تشکیل شد. همچنین سازگاری قضاوت‌ها با استفاده از شاخص‌های CI و CR محاسبه شد.

رویکرد AHP شامل انجام مقایسه‌های زوجی تمام معیارهایی است که به یک مسئله مکانی مربوط می‌شوند و آنها را در یک ساختار سلسله‌مراتبی سازماندهی می‌کنند (Darko et al., 2019, p. 440). در AHP، معیارها به صورت زوجی با استفاده از مقیاسی از یک تا نه مقایسه می‌شوند که در آن مقادیر، اهمیت نسبی یک عنصر نسبت به دیگری را نشان می‌دهند. مقایسه زوجی برای همه ترکیبات معیار تکرار می‌شود تا یک ماتریس مقایسه ایجاد شود. سپس مجموع هر ستون ماتریس حاصل، محاسبه و به عنوان مقسوم علیه برای هر سلول در ماتریس استفاده می‌شود تا مقادیر جدیدی برای هر سلول ماتریس ایجاد شود. سپس وزن هر معیار با گرفتن میانگین هر ردیف در ماتریس محاسبه می‌شود. علاوه بر این، شاخص سازگاری (CI) در رویکرد AHP، سازگاری قضاوت‌های مقایسه زوجی انجام‌شده توسط تحلیلگر یا تصمیم‌گیرنده فضایی را اندازه‌گیری می‌کند (Satty, 1977, p. 262). معمولاً، مقدار CI کمتر از ۰/۱ نشان دهنده سطح قابل قبولی از سازگاری در مقایسه‌های زوجی است که نشان می‌دهد قضاوت‌ها قابل اعتماد هستند؛ اما، در این پژوهش از روش AHP فازی استفاده شد. در این روش، مقایسات زوجی براساس اعداد فازی مثلثی انجام می‌شود. عدد فازی مثلثی به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (Chang, 1996, p. 652):

$$\tilde{A} = (l, m, u) \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، l حد پایین، m مقدار محتمل و u حد بالای عدد فازی است. در این پژوهش، برای انجام مقایسات زوجی از مقیاس فازی ساعتی استفاده شد. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها، ماتریس مقایسات زوجی فازی به صورت رابطه (۳) تشکیل شد:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در ادامه، مجموع مقادیر فازی هر سطر محاسبه شد (رابطه (۴)):

$$\tilde{M}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{M}_{ji}^j \quad \text{رابطه (۴)}$$

سپس مقدار توسعه فازی برای هر معیار براساس روش چانگ از رابطه زیر به دست آمد:

$$S_i = \tilde{M}_i \otimes (\sum_{i=1}^n \tilde{M}_i)^{-1} \quad \text{رابطه (۵)}$$

برای مقایسه اعداد فازی و تعیین درجه امکان‌پذیری، از رابطه زیر استفاده شد:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1 & m_2 \geq m_1 \\ 0 & l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{رابطه (۶)} \end{cases}$$

پس از محاسبه درجه امکان‌پذیری، بردار وزن‌های اولیه به‌صورت زیر استخراج شد:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad \text{رابطه (۷)}$$

در نهایت، وزن نهایی معیارها از طریق نرمال‌سازی بردار وزن‌ها به دست آمد:

$$W' = \left(\frac{d'(A_1)}{\sum d'(A_1)}, \frac{d'(A_2)}{\sum d'(A_2)}, \dots, \frac{d'(A_n)}{\sum d'(A_n)} \right)^T \quad \text{رابطه (۸)}$$

به‌منظور بررسی میزان سازگاری قضاوت‌های خبرگان، نرخ ناسازگاری ماتریس‌ها محاسبه شد. ابتدا شاخص ناسازگاری از رابطه (۹) محاسبه شد:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad \text{رابطه (۹)}$$

سپس نرخ ناسازگاری به‌صورت زیر تعیین شد:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن، CI شاخص ناسازگاری، CR نرخ ناسازگاری و RI شاخص تصادفی و λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس است. در صورتی که مقدار ($CR < 0.1$) باشد، سازگاری ماتریس مقایسات زوجی قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.

رویکرد پیشنهادی یادگیری ماشین

رویکرد پیشنهادی یادگیری ماشین شامل استخراج وزن معیارها براساس مقادیر اهمیت ویژگی‌ها از دو تکنیک یادگیری ماشین، یعنی RF و XGB است. هر تکنیک برای یک کار طبقه‌بندی تعریف شده که در آن هدف آموزشی یک برچسب دودویی است که صفر نشان‌دهنده مکان‌های غیرمناسب و یک نشان‌دهنده مکان‌های مناسب برای بلندمرتبه‌سازی است.

پس از آموزش هر تکنیک یادگیری ماشین، یک تحلیل اهمیت ویژگی انجام می‌شود و مقادیر حاصل به وزن معیارها تبدیل می‌شوند. پس از اینکه مقادیر اهمیت ویژگی‌ها از تکنیک‌های یادگیری ماشین به دست آمد، هر مجموعه از مقادیر اهمیت ویژگی‌ها نرمال‌سازی می‌شود تا مجموع اهمیت همه ویژگی‌ها برابر با یک شود. مقادیر اهمیت ویژگی نرمال‌سازی می‌شوند و سپس می‌توانند مستقیماً به جای وزن معیارها استفاده شوند و در تحلیل MCE ادغام شوند.

به منظور ارزیابی و مقایسه وزن معیارهای اصلی حاصل از روش FAHP، از دو الگوریتم یادگیری ماشین شامل RF و XGBoost استفاده شد. در این پژوهش، هدف از به کارگیری این الگوریتم‌ها، پیش‌بینی مستقل مکان‌های مناسب برای احداث ساختمان‌های بلندمرتبه نبود؛ بلکه استخراج اهمیت نسبی معیارها براساس الگوی مکانی حاصل از مدل FAHP و مقایسه آن با وزن‌های حاصل از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بود. بدین منظور، چهار لایه معیار اصلی شامل دسترسی و زیرساخت‌ها، کالبدی، فیزیکی و اجتماعی - اقتصادی به همراه نقشه نهایی تناسب اراضی حاصل از مدل FAHP در قالب یک مجموعه داده مکانی تجمیع شدند. سپس با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی، تعداد ۳۰.۰۰۰ نمونه از کل محدوده مطالعه استخراج شد. در هر نمونه، مقادیر چهار معیار اصلی به‌عنوان متغیرهای ورودی و مقدار نقشه تناسب حاصل از FAHP به‌عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شد.

از آنجا که مقدار خروجی FAHP به‌صورت پیوسته بود، به‌منظور آموزش مدل‌های طبقه‌بندی، مقادیر تناسب به سه کلاس مناسب‌بودن تبدیل شد؛ به‌گونه‌ای که مقادیر کمتر از ۳ در کلاس Low، مقادیر بین ۳ تا ۴/۵ در کلاس Medium و مقادیر بزرگ‌تر یا مساوی ۴/۵ در کلاس High قرار گرفتند؛ بنابراین، داده‌های آموزشی مستقیماً از نقشه تناسب حاصل از مدل FAHP، استخراج و به‌عنوان داده مرجع برای آموزش الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شدند.

در ادامه، داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو بخش آموزش و تست تقسیم شدند؛ به‌طوری‌که ۷۰ درصد داده‌ها (۲۱۰۰۰ نمونه) برای آموزش مدل و ۳۰ درصد داده‌ها (۹۰۰۰ نمونه) برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها استفاده شد. پس از آموزش مدل‌های RF و XGBoost، اهمیت نسبی هر یک از معیارها با استفاده از شاخص Feature Importance استخراج شد. سپس مقادیر اهمیت ویژگی‌ها نرمال‌سازی شد تا مجموع وزن‌ها برابر یک شود و از این مقادیر به‌عنوان وزن معیارها در فرآیند همپوشانی وزنی (WLC) استفاده شد. درنهایت، نقشه‌های تناسب اراضی براساس وزن‌های حاصل از هر یک از دو الگوریتم تولید و با نتایج حاصل از روش FAHP مقایسه شدند. جزئیات انجام تکنیک‌ها و ارزیابی‌های یادگیری ماشین در بخش‌های زیر ارائه شده است.

الگوریتم جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی (RF) یکی از الگوریتم‌های یادگیری گروهی (Ensemble Learning) است که با استفاده از مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم، پیش‌بینی نهایی را انجام می‌دهد. الگوریتم RF یک تکنیک یادگیری ماشین، مجموعه‌ای است که براساس الگوریتم درخت تصمیم طبقه‌بندی و درخت رگرسیون (CART) توسعه یافته است. چندین درخت تصمیم را با استفاده از نمونه‌گیری تصادفی زیرمجموعه از یک مجموعه داده اصلی حاوی متغیرهای پاسخ و توضیحی می‌سازد. به‌طور خاص، مدل RF از یک تکنیک بسته‌بندی استفاده می‌کند که امکان نمونه‌گیری تکراری را فراهم می‌کند، تقریباً ۷۵ درصد از نمونه‌ها برای ساخت درخت‌های تصمیم انتخاب می‌شوند؛ درحالی‌که یک‌سوم باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های خارج (OOB) حفظ می‌شوند. هر درخت تا حداکثر عمق خود بدون هرس رشد می‌کند و برای پیش‌بینی داده‌های OOB استفاده می‌شود و نسبت طبقه‌بندی اشتباه (خطای OOB) را ایجاد می‌کند. این

خطای OOB تخمین بی‌طرفانه‌ای از دقت مدل ارائه می‌دهد، به بهینه‌سازی ساختار مدل کمک می‌کند و اهمیت متغیر را ارزیابی می‌کند. مدل RF مجموعه داده‌های جدید را براساس اکثریت آرا از درختان تصمیم خود پیش‌بینی می‌کند. این روش را می‌توان به صورت رابطه (۱۱) بیان کرد.

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(x) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که در آن $\hat{f}(x)$ پیش‌بینی جمع‌آوری شده از مجموعه N درخت تصمیم f_i است، و هر درخت تصمیم f_i براساس مجموعه داده‌های تولید شده از طریق فرآیند بسته‌بندی ساخته می‌شود. «mtree» و «mtry» دو پارامتر ضروری در مدل سازی RF هستند. «mtry» تعداد معیارهای نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد و «mtree» مخفف تعداد درخت‌های تصمیم‌گیری است. این پارامترها به کاهش خطاهای تعمیم در استقرار مدل RF کمک می‌کنند. با توجه به عملکرد پیش‌بینی دقیق و قابلیت پردازش داده‌های چندبُعدی، مدل RF در زمینه‌های تحقیقاتی مختلف محبوبیت پیدا کرده است تا تأثیرات پیچیده عوامل مربوطه را آشکار کند و پیش‌بینی‌های آینده را انجام دهد.

رگرسیون XGBoost

XGBoost ابزاری کارآمد است که از سازگاری قابل توجه، مصونیت در برابر غیرخطی بودن و توانایی شناسایی سریع اهمیت متغیرهای ضمنی با دقت پیش‌بینی و قابلیت تفسیر بالا برخوردار است (Zhou et al., 2022, p. 1). این مدل برای رمزگشایی رابطه پیچیده بین مجموعه متغیر وابسته و متغیرهای توضیحی (معیارها) استفاده شد. تابع هدف XGBoost به صورت رابطه (۱۲) توصیف می‌شود:

$$L = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\Omega(f_k) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda |w|^2 \quad \#$$

که در آن، n مقدار داده‌هایی است که به درخت k-ام وارد می‌شوند. به منظور بهبود دقت پیش‌بینی، تلفات آموزش $l(y_i, \hat{y}_i)$ با هدف y_i و پیش‌بینی $\hat{y}_i$ که معمولاً با جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) تعریف می‌شود، باید به حداقل برسد. در درخت تقویتی، هر f_k در تکرار k-ام توسط یک درخت مستقل نمایش داده می‌شود که یک فضای R^m را به نواحی T مجزا تقسیم می‌کند یا $\{R_{ik}\}_{i=1}^T$ را با وزن‌های w_{ik} ($w \in R^T$) باقی می‌گذارد.

برای افزایش قدرت پیش‌بینی مدل، از روش‌های اعتبارسنجی متقابل استفاده می‌شود. این امر باعث ایجاد تغییراتی در ابرپارامترها از طریق ابزار GridSearchCV می‌شود. انتخاب ابرپارامترهای محوری - حداکثر عمق، نرخ یادگیری، گاما و حداقل وزن، از روشی که ریو و همکاران بیان کردند، پیروی می‌کند (Ryu et al., 2020, p. 177710). در نهایت، عملکرد مدل XGB و RF با استفاده از مقدار AUC ارزیابی شد.

تجميع معيارها

پس از اينکه با سه روش FAHP، RF و XGB، وزن معيارها به دست آمد، نقشه‌های نهایی معيارهای اصلی، براساس وزن نهایی، معيارها همپوشانی شدند و نقشه نهایی تناسب اراضي برای ساختمان‌های بلندمرتبه با سه تکنیک یادشده تهیه شد (رابطه (۱۳):

$$LSM = \sum_{j=1}^m W_j \times S_j \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

که در آن، LSM نقشه نهایی تناسب اراضي، W_j وزن هر معيار اصلی، S_j نقشه تناسب هر معيار و m تعداد معيارهای اصلی است.

تحليل حساسيت معيارها

به منظور ارزیابی حساسیت نتایج نسبت به تغییرات وزن معيارها، از تحليل حساسیت تورنادو^۱ استفاده شد. در این روش، وزن هر معيار به صورت جداگانه در بازه مشخص تغییر داده شد و اثر آن بر نتایج نهایی بررسی شد؛ درحالی‌که سایر معيارها ثابت نگه داشته شدند. دامنه تغییرات خروجی مدل به عنوان شاخص حساسیت در نظر گرفته شد و نتایج در قالب نمودار تورنادو ارائه شدند. معيارهایی با بیشترین دامنه تغییرات، به عنوان عوامل حساس و اثرگذار بر نتایج شناسایی شدند.

عدم قطعیت با مونت کارلو

به منظور ارزیابی میزان عدم قطعیت و بررسی پایداری نتایج مدل‌های RF و XGBoost در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس، از شبیه‌سازی مونت کارلو بر روی وزن معيارهای به دست آمده از این دو روش یادگیری ماشین استفاده شد. در این مطالعه، وزن معيارهای اصلی شامل معيارهای دسترسی و زیرساخت‌ها، کالبدی، اقتصادی - اجتماعی، فیزیکی که از دو روش مذکور به دست آمده بود، به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال حول مقادیر اولیه مدل‌سازی شدند. در هر تکرار، وزن‌ها با استفاده از رابطه زیر دچار تغییرات تصادفی شدند:

$$W_i^{(k)} = W_i \times \epsilon_i \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در آن W_i وزن اولیه معيار i ، ϵ_i مقدار تصادفی با توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معيار مشخص است. سپس وزن‌ها در هر تکرار نرمال‌سازی شدند؛ به گونه‌ای که مجموع آنها برابر یک شود (Metropolis & Ulam, 1949, p. 339):

$$\sum_{i=1}^n W_i^{(k)} = 1 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در ادامه، مدل مکان‌یابی براساس ترکیب خطی وزنی (WLC) برای هر تکرار اجرا شد:

$$LSM^{(K)} = \sum_{i=1}^n W_i^{(k)} X_i \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

¹ Tornado sensitive analysis

که در آن X_i نقشه‌های رستری استاندارد شده معیارها هستند. این فرآیند برای $N = 250$ تکرار انجام شد تا توزیع فضایی نتایج مدل تحت شرایط عدم قطعیت وزن‌ها به دست آید. در نهایت، دو خروجی اصلی شامل: نقشه میانگین تناسب اراضی و نقشه ضریب تغییرات CV (به عنوان شاخص عدم قطعیت مکانی)، تهیه شد. این رویکرد امکان ارزیابی حساسیت مدل نسبت به تغییرات احتمالی در وزن معیارها را فراهم کرد و موجب افزایش قابلیت اعتماد نتایج مکان‌یابی شد. شبیه‌سازی مونت کارلو در محیط MATLAB اجرا شد؛ به گونه‌ای که رسترها به صورت Tiff وارد نرم‌افزار شد و با کدنویسی، عدم قطعیت بر نتیجه نهایی اجرا شد.

شاخص پایداری مکانی

به منظور ارزیابی میزان پایداری نتایج مکانیابی در برابر تغییرات وزن معیارها، از شاخص پایداری مکانی^۱ استفاده شد. این شاخص نشان می‌دهد که نتایج حاصل تا چه اندازه نسبت به تغییرات سناریوهای وزنی پایدار یا حساس هستند. مبنای محاسبه شاخص، ضریب تغییرات (CV^2) است که میزان پراکندگی نسبی نتایج را نشان می‌دهد (Selmi et al., 2016, p. 169). یکی از نتایج عدم قطعیت مونت کارلو، تهیه نقشه رستری CV است. سپس برای محاسبه شاخص پایداری مکانی، از رابطه (۱۷) استفاده شد.

$$SI = 1 - CV \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

که در آن CV نسبت انحراف معیار به میانگین امتیازات هر واحد مکانی در سناریوهای مختلف است. مقادیر بالاتر شاخص بیان‌کننده ثبات بیشتر و حساسیت کمتر نتایج نسبت به تغییرات وزن معیارها است. این شاخص پایداری برای رستر فایل‌های RF و XGBoost اجرا شد و برای هر یک، نقشه پایداری مکانی تهیه شد.

ضریب کاپا

به منظور ارزیابی میزان توافق و همخوانی بین نتایج حاصل از مدل‌های FAHP، RF و XGB از ضریب کاپا^۳ استفاده شد. این شاخص میزان تطابق بین نقشه‌های طبقه‌بندی شده را با لحاظ کردن توافق ناشی از شانس اندازه‌گیری می‌کند و یکی از معیارهای متداول برای ارزیابی سازگاری نتایج مدل‌های مکانی به شمار می‌رود (Foody, 2020, p. 1). برای محاسبه ضریب کاپا، ابتدا نقشه‌های خروجی مدل‌ها به طبقات یکسان تبدیل شدند. سپس ماتریس توافق بین هر دو مدل تشکیل و میزان توافق مشاهده شده و توافق مورد انتظار محاسبه شد. ضریب کاپا از رابطه (۱۸) به دست آمد:

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

که در آن، K ضریب کاپا، P_o نسبت توافق مشاهده شده بین دو مدل و P_e نسبت توافق مورد انتظار ناشی از شانس است. مقادیر ضریب کاپا در بازه ۱- تا ۱ قرار دارند؛ به طوری که مقادیر نزدیک به ۱ بیان‌کننده توافق و تطابق بسیار

¹ Spatial Robustness Index

² Coefficient of Variation

³ Kappa Coefficient

بالا، مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده توافق تصادفی، و مقادیر منفی بیان‌کننده عدم توافق بین مدل‌ها هستند. در این پژوهش، ضریب کاپا به صورت زوجی بین نتایج مدل‌های RF، XGB و FAHP محاسبه شد تا میزان همگرایی و سازگاری فضایی نتایج حاصل از روش‌های مختلف ارزیابی شود.

یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل آنها

وزن معیارها

نتایج وزن‌دهی معیارهای اصلی با استفاده از AHP فازی نشان داد که معیار کالبدی با وزن فازی ۰/۴۹۶ مهم‌ترین عامل در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در بندرعباس است. این نتیجه بیان‌کننده نقش محوری ویژگی‌های کالبدی شهر، شامل کاربری اراضی، ظرفیت توسعه فیزیکی و ساختار فضایی، در تعیین تناسب اراضی برای توسعه عمودی است. پس از آن، معیار زیرساخت با وزن ۰/۳۰۰ در رتبه دوم قرار گرفت که اهمیت دسترسی به شبکه‌های معابر، آب، برق، فاضلاب و ارتباطات را در استقرار ساختمان‌های بلندمرتبه نشان می‌دهد. معیار اقتصادی - اجتماعی در رتبه سوم قرار گرفت و بیان‌کننده تأثیر عواملی همچون ارزش زمین، تراکم جمعیت و دسترسی به خدمات شهری در فرآیند مکان‌یابی است. در مقابل، معیار فیزیکی کمترین اهمیت را داشت که نشان می‌دهد عوامل طبیعی و محیطی، در مقایسه با ملاحظات کالبدی و زیرساختی، نقش کمتری در تصمیم‌گیری نهایی ایفا کرده‌اند. همچنین نرخ ناسازگاری برابر با ۰/۰۶۸ به دست آمد که کمتر از حد استاندارد ۰/۱ است و بیان‌کننده سازگاری پذیرفتنی قضاوت‌های کارشناسی و اعتبار مناسب نتایج وزن‌دهی است (جدول ۳ و ۴).

جدول ۳- ماتریس مقایسات زوجی معیارها در تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

Table 3. Fuzzy Pairwise Comparison Matrix of the Criteria in the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

کالبدی			زیرساخت			اقتصادی و اجتماعی			فیزیکی		
۱	۱	۱	۲	۳	۴	۳	۴	۵	۴	۵	۶
۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۵۰	۱	۱	۱	۲	۳	۴	۳	۴	۵
۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۵۰	۱	۱	۱	۲	۳	۴
۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۵۰	۱	۱	۱

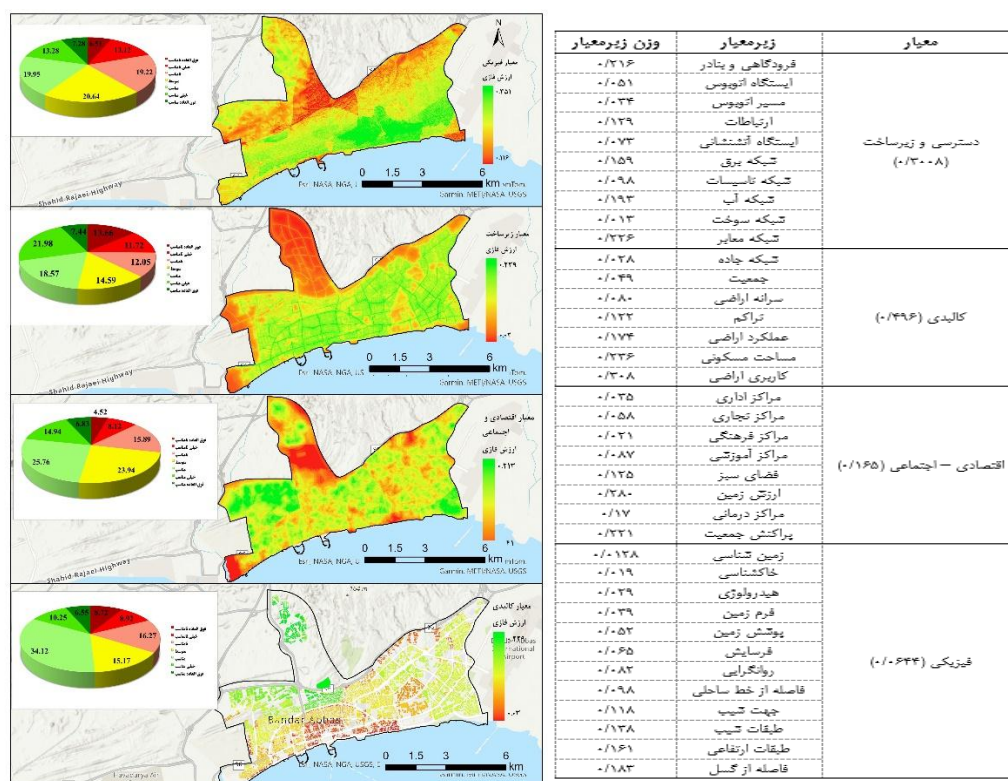
جدول ۴- وزن به دست آمده معیارها در بلندمرتبه‌سازی ساختمان‌ها در بندرعباس با تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

Table 4. Weights of the Criteria for High-Rise Building Development in Bandar Abbas Obtained Using the FAHP

معیار	وزن AHP	وزن FAHP	نرخ ناسازگاری (CR)
کالبدی	۰/۵۲	۰/۴۶۹	۰/۰۶۸
زیرساخت	۰/۲۶۸	۰/۳۰۰	
اقتصادی و اجتماعی	۰/۱۴	۰/۱۶۵	
فیزیکی	۰/۰۷۰	۰/۰۶۴	

براساس نتایج وزن‌دهی به‌دست‌آمده از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP)، معیار فیزیکی با وزن ۰/۴۹۶ بیشترین اهمیت را در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس دارد که نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده شرایط زمین و کاربری‌های آن و عملکرد بلوک‌های شهری در انتخاب مکان‌های مناسب است. در معیار کالبدی، کاربری اراضی، مساحت مسکونی و عملکرد اراضی به‌ترتیب بیشترین تأثیر را داشته‌اند که نشان می‌دهد هماهنگی با ساختار فضایی شهر و ظرفیت توسعه اراضی از عوامل کلیدی در استقرار ساختمان‌های بلندمرتبه محسوب می‌شوند.

معیار دسترسی و زیرساخت در رتبه دوم اهمیت قرار دارد و در آن شبکه معابر، فرودگاهی و بنادر و شبکه آب بیشترین وزن را کسب کرده‌اند که بیان‌کننده اهمیت دسترسی مناسب و تأمین زیرساخت‌های شهری است. از سوی دیگر، معیار اقتصادی - اجتماعی و فیزیکی کمترین وزن را داشته‌اند؛ هرچند زیرمعیارهای ارزش زمین، پراکنش جمعیت و فضای سبز نشان می‌دهند که ملاحظات اقتصادی و کیفیت محیط شهری نیز در کنار عوامل فیزیکی و کالبدی در فرآیند تصمیم‌گیری نقش مکمل و تأثیرگذار دارند. در معیار فیزیکی نیز، زیرمعیارهای فاصله از گسل، طبقات ارتفاعی و طبقات شیب بالاترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند که بیان‌کننده ضرورت توجه به پایداری زمین، ایمنی سازه‌ای و ویژگی‌های توپوگرافی در توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه است. همچنین عواملی مانند جهت شیب، فاصله از خط ساحلی و روانگرایی نیز از اهمیت چشمگیری برخوردارند که با توجه به شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی بندرعباس، تأثیر مستقیمی بر ایمنی و بهره‌برداری از این ساختمان‌ها دارند (شکل ۲).



شکل ۲- نتایج وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارهای پژوهش و نقشه نهایی از معیارهای پژوهش (منبع: نویسندگان)

Figure 2- Weighting results of criteria and sub-criteria, and the final suitability map based on the research criteria

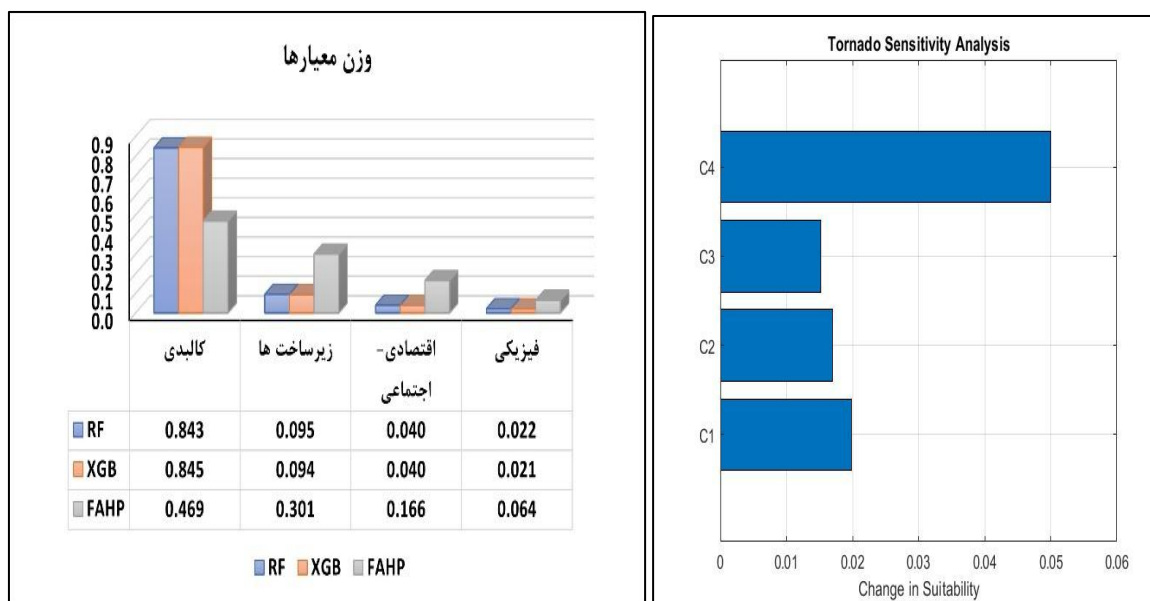
نتایج وزن‌دهی معیارهای مکانیابی ساختمان‌های بلندمرتبه نشان می‌دهد که در هر سه روش FAHP، RF و XGGB، معیار کالبدی بیشترین اهمیت را در فرآیند مکان‌یابی داشته است؛ با این حال میزان اهمیت اختصاص یافته به این معیار در مدل‌های یادگیری ماشین به مراتب بیشتر از روش FAHP بوده است؛ به طوری که وزن این معیار در مدل RF برابر با ۰/۸۴۳ و در XGB برابر با ۰/۸۴۵ به دست آمده است؛ در حالی که در روش FAHP مقدار آن ۰/۴۶۹ است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر داده، تأثیر عوامل کالبدی را در تعیین مناسب‌ترین مکان برای ساختمان‌های بلندمرتبه بسیار تعیین‌کننده‌تر از رویکرد قضاوت‌محور FAHP ارزیابی کرده‌اند. درمقابل، روش FAHP توزیع متعادل‌تری از وزن‌ها میان معیارها ارائه داده است. در این روش، زیرساخت‌ها با وزن ۰/۳۰۰۸ در رتبه دوم اهمیت قرار گرفته‌اند؛ در حالی که همین معیار در مدل‌های RF و XGB وزن بسیار کمتری (حدود ۰/۰۹) دریافت کرده است. این اختلاف نشان می‌دهد که در ارزیابی کارشناسانه، زیرساخت‌های شهری نقش مهمی در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه دارند؛ اما مدل‌های یادگیری ماشین به دلیل وابستگی به الگوهای موجود در داده‌ها، تأثیر این معیار را کمتر تشخیص داده‌اند.

همچنین معیار اقتصادی - اجتماعی در مدل FAHP وزن ۰/۱۶۶ را کسب کرد که نسبت به RF و XGB (هر دو حدود ۰/۰۴) اختلاف درخور توجهی دارد. این نتیجه بیان‌کننده آن است که متخصصان، ملاحظات اقتصادی و اجتماعی را در توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه مهم تلقی می‌کنند؛ در حالی که الگوریتم‌های یادگیری ماشین بیشتر بر معیارهای عینی و فیزیکی تمرکز داشته‌اند. معیار فیزیکی نیز در هر سه روش کمترین وزن را به خود اختصاص داده است؛ اگرچه مقدار آن در FAHP (۰/۰۶۴) همچنان بیشتر از RF و XGB است.

به طور کلی، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های RF و XGB رفتار بسیار مشابهی داشته و الگوی وزن‌دهی تقریباً یکسانی ارائه کرده‌اند؛ این موضوع بیان‌کننده پایداری و همگرایی دو الگوریتم یادگیری ماشین در تشخیص اهمیت معیارها است. از سوی دیگر، تفاوت محسوس نتایج FAHP با مدل‌های داده‌محور نشان می‌دهد که رویکردهای کارشناسی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، هر یک از منظر متفاوتی به مسئله مکان‌یابی نگاه می‌کنند؛ در نتیجه، ترکیب این دو رویکرد می‌تواند به تصمیم‌گیری جامع‌تر و واقع‌بینانه‌تر در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه منجر شود.

نتایج تحلیل حساسیت به روش تورنادو نشان می‌دهد که معیارها دارای میزان تأثیر متفاوتی بر نقشه نهایی مطلوبیت مکانیابی ساختمان‌های بلندمرتبه هستند. براساس نمودار، معیار C4 (معیار کالبدی) بیشترین حساسیت را داشته و با مقدار تغییرپذیری حدود ۰/۰۵، بیشترین تأثیر را بر تغییرات نقشه نهایی مطلوبیت ایجاد کرده است. این نتیجه بیان‌کننده آن است که تغییر در وزن این معیار می‌تواند به طور درخور توجهی الگوی پهنه‌های مناسب برای استقرار ساختمان‌های بلندمرتبه را دگرگون کند؛ بنابراین معیار کالبدی به عنوان بحرانی‌ترین و اثرگذارترین معیار در مدل شناخته می‌شود. درمقابل، معیارهای C1، C2 و C3 (معیارهای دسترسی به زیرساخت‌ها، فیزیکی، اجتماعی - اقتصادی) حساسیت بسیار کمتری را نشان داده‌اند و میزان تغییرات آنها در محدوده ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۲ قرار دارد. نزدیکی مقادیر این سه معیار بیان‌کننده آن است که تغییر وزن آنها اثر نسبتاً محدودی بر نتایج نهایی داشته و نقشه مطلوبیت در برابر نوسانات این معیارها از پایداری بیشتری برخوردار است. به بیان دیگر، مدل مکان‌یابی نسبت به تغییرات وزن این معیارها حساسیت پایین‌تری دارد.

به‌طور کلی، نتایج تحلیل تورنادو نشان می‌دهد که ساختار مدل از نظر اغلب معیارها دارای ثبات نسبی است و تنها برخی معیارهای کلیدی نقش تعیین‌کننده در خروجی نهایی دارند. این موضوع بیان‌کننده پایداری پذیرفتنی مدل تصمیم‌گیری و قابلیت اعتماد نتایج حاصل از وزن‌دهی معیارها است. همچنین، شناسایی معیارهای حساس می‌تواند در فرآیند تصمیم‌سازی و بازنگری سیاست‌های توسعه شهری اهمیت زیادی داشته باشد؛ زیرا هرگونه تغییر در این معیارها می‌تواند مستقیماً بر مکان‌های پیشنهادی توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه اثر بگذارد (شکل ۳).



شکل ۳- سمت راست: نتایج تحلیل حساسیت تورنادو در تأثیرگذاری معیارهای پژوهش: (C1: دسترسی به زیرساخت‌ها، C2: فیزیکی،

C3: اقتصادی - اجتماعی، C4: کالبدی). تصویر سمت چپ: وزن معیارها حاصل از سه روش RF، FAHP و XGB

Figure 3- Right: Results of Tornado sensitivity analysis on the impact of research criteria: (C1: Access to infrastructure, C2: Physical, C3: Socio-economic, C4: Physical). Left image: Weights of criteria resulting from the three methods FAHP, RF and XGB

نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین نشان داد که مدل RF عملکرد بسیار بهتری نسبت به مدل XGBoost در پیش‌بینی مناسب بودن مکان ساختمان‌های بلندمرتبه داشته است. درواقع نتایج آن به نتایج مدل FAHP نزدیک‌تر بود. این مدل با استفاده از ۳۰۰۰۰ نمونه آموزشی و تست (۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون)، مقدار AUC برابر با ۰/۹۵۵، Accuracy برابر با ۰/۹۶۴ و ضریب کاپا برابر با ۰/۸۹۸ را به دست آورد که بیان‌کننده توان تفکیک بسیار بالا و توافق پذیرفتنی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر حاصل از تکنیک FAHP است. مدل XGBoost عملکرد ضعیف‌تری نسبت به RF از خود نشان داد؛ اما نتایج آن نیز پذیرفتنی است. درواقع، نتایج مدل RF به مقادیر FANP شبیه است؛ اما مدل XGBoost سخت‌گیرانه‌تر عمل می‌کند (جدول ۵).

جدول ۵- نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌های RF و XGB براساس شاخص‌های AUC، Accuracy و Kappa

Table 5. Performance comparison of the RF and XGB based on AUC, Accuracy, and Kappa

Model	تعداد نمونه	Train	Test	AUC	Accuracy	Kappa
مدل RF	۳۰.۰۰۰	۲۱.۰۰۰	۹.۰۰۰	۰/۹۵۵	۰/۹۶۴	۰/۸۹۸
XGBoost	۳۰.۰۰۰	۲۱.۰۰۰	۹.۰۰۰	۰/۷۹	۰/۸۳۳	۰/۷۵۶

نقشه همپوشانی معیارها

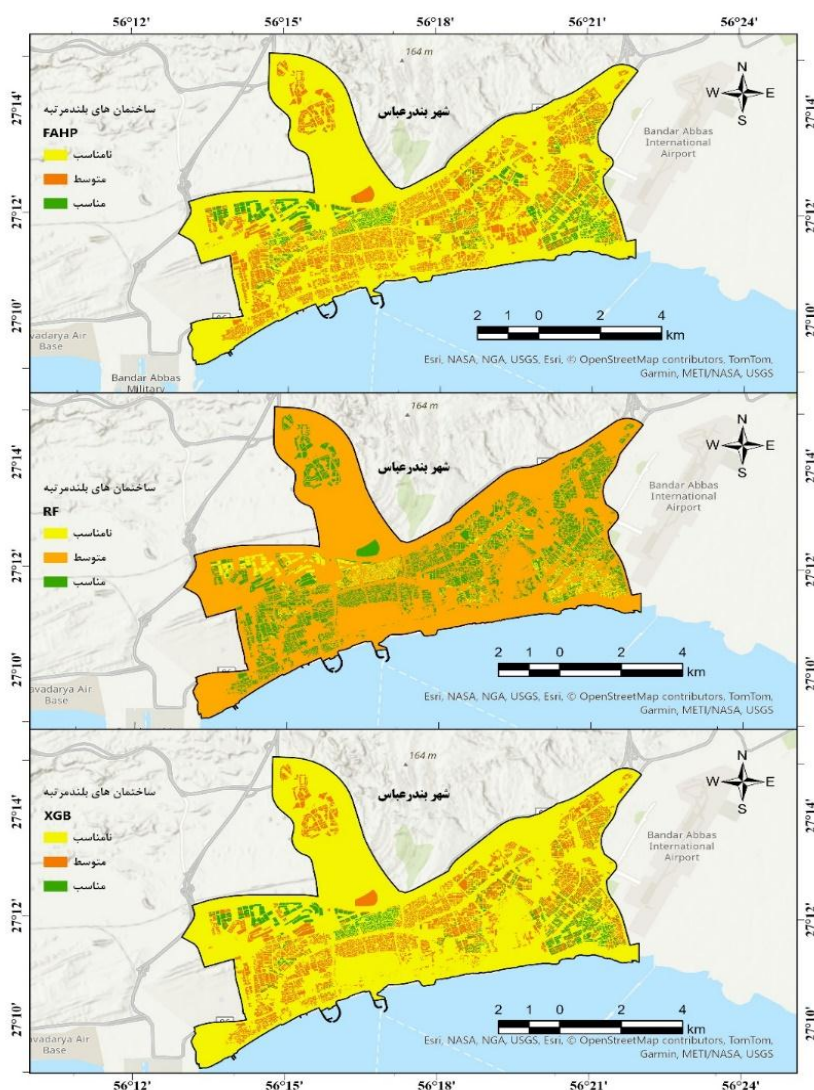
نتایج نهایی حاصل از همپوشانی معیارهای کالبدی، زیرساختی، اقتصادی - اجتماعی و فیزیکی نشان داد که الگوی تناسب اراضی برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس دارای توزیع فضایی ناهمگن و خوشه‌ای است. به‌طور کلی، پهنه‌های با تناسب بالا عمدتاً در بخش‌های مرکزی، شمال‌غربی و بخش شرقی - مرکزی شهر متمرکز شده‌اند؛ درحالی‌که بخش‌هایی از نوار ساحلی مرکزی، جنوب‌شرق و برخی نواحی حاشیه‌ای در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار گرفته‌اند (شکل ۴).

بررسی نقشه نهایی تناسب اراضی نشان می‌دهد که مناطق دارای وضعیت مناسب عمدتاً در پهنه‌هایی قرار دارند که از نظر ساختار کالبدی، دسترسی به زیرساخت‌های شهری و شرایط اقتصادی - اجتماعی در وضعیت مطلوب‌تری قرار دارند. این نواحی علاوه بر برخورداری از شبکه ارتباطی مناسب، دارای کاربری‌های سازگار، ظرفیت توسعه فیزیکی و دسترسی مطلوب به خدمات شهری می‌باشند. همچنین تمرکز بخشی از پهنه‌های مناسب در نواحی شمال‌غربی شهر نشان‌دهنده ظرفیت توسعه آینده و امکان گسترش توسعه عمودی در این محدوده‌ها است. درمقابل، پهنه‌های خیلی نامناسب و فوق‌العاده نامناسب عمدتاً در بخش‌های جنوبی و نوار ساحلی مرکزی شهر مشاهده می‌شوند. این وضعیت می‌تواند ناشی از تراکم بالای بافت موجود، محدودیت‌های کالبدی، کمبود اراضی قابل توسعه، فشار کاربری‌ها و برخی محدودیت‌های محیطی و زیرساختی باشد. همچنین در برخی نواحی حاشیه‌ای شمال‌شرقی، وجود محدودیت‌های طبیعی و فاصله از زیرساخت‌های اصلی شهری سبب کاهش تناسب اراضی برای توسعه بلندمرتبه شده است.

نتایج حاصل از نقشه‌های نهایی مطلوبیت مکانیابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه عملکرد سه مدل RF، XGB و FAHP در پهنه‌بندی اراضی مناسب، متوسط و نامناسب است (جدول ۶). براساس نتایج، مدل XGB حدود ۳/۵۳ کیلومترمربع از محدوده مورد مطالعه (۴/۸ درصد) را در طبقه مناسب قرار داده است؛ درحالی‌که بخش عمده محدوده (۷۸/۹ درصد)، در طبقه نامناسب قرار گرفته است. این موضوع بیان‌کننده سخت‌گیری بیشتر مدل XGB در انتخاب پهنه‌های مناسب و تمرکز آن بر نواحی دارای شرایط بهینه برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه است.

درمقابل، مدل RF بیشترین وسعت پهنه‌های مناسب را شناسایی کرده است؛ به‌گونه‌ای که ۱۵/۸ درصد از محدوده در طبقه مناسب و ۴/۷ درصد به‌عنوان نامناسب تعیین شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل RF در مقایسه با سایر روش‌ها، انعطاف‌پذیری بیشتری در شناسایی اراضی مستعد توسعه داشته و بخش وسیع‌تری از شهر را دارای قابلیت توسعه بلندمرتبه‌سازی ارزیابی کرده است.

نتایج مدل FAHP نیز الگوی نسبتاً مشابهی با XGB نشان می‌دهد و این بیان‌کننده آن است که رویکرد FAHP نیز مانند XGB، دیدگاه محافظه‌کارانه‌تری نسبت به توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه داشته و تنها بخش محدودی از شهر را برای این نوع توسعه مناسب ارزیابی کرده است. به‌طور کلی، مقایسه سه مدل نشان می‌دهد که RF بیشترین میزان اراضی مستعد توسعه را معرفی کرده است؛ درحالی‌که XGB و FAHP محدودیت بیشتری در تعیین پهنه‌های مناسب اعمال کرده‌اند. شباهت نسبی نتایج XGB و FAHP می‌تواند نشان‌دهنده همگرایی این دو روش در تشخیص محدودیت‌های محیطی و شهری باشد؛ درحالی‌که RF با شناسایی گسترده‌تر پهنه‌های متوسط و مناسب، ظرفیت بالقوه بیشتری برای توسعه شهری ارائه می‌دهد. این تفاوت‌ها بیان‌کننده آن است که انتخاب مدل می‌تواند تأثیر درخور توجهی بر الگوی نهایی مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه داشته باشد و استفاده تلفیقی از روش‌های داده‌محور و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به دستیابی به نتایج واقع‌بینانه‌تر و قابل اتکاتر کمک کند.



شکل ۴: نقشه همپوشانی‌شده معیارها با سه روش FAHP، RF و XGB (منبع: نویسندگان)

Figure 4: Integrated overlay maps of the criteria using the FAHP, RF, and XGB

جدول ۶- مساحت و درصد فراوانی کلاس‌بندی اراضی شهر بندرعباس برای بلندمرتبه‌سازی ساختمان‌ها (منبع: نویسندگان)

Table 6. Area and percentage of land suitability classes for high-rise building development in Bandar Abbas City

FAHP		RF		XGB		مدل
درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	
۵/۷	۴/۱۶	۱۵/۸	۱۱/۵۸	۴/۸	۳/۵۳	مناسب
۱۹/۲	۱۴/۱۱	۷۹/۵	۵۸/۳۳	۱۶/۳	۱۱/۹۳	متوسط
۷۵/۱	۵۵/۱۵	۴/۷	۳/۴۷	۷۸/۹	۵۷/۹۶	نامناسب

ضریب کاپا

نتایج ضریب کاپا بین مدل RF، XGB و FAHP نشان‌دهنده میزان توافق و شباهت فضایی میان نقشه‌های حاصل از این روش‌ها در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه است (جدول ۷). براساس نتایج، بیشترین میزان توافق مربوط به مدل‌های XGB و FAHP با مقدار کاپای ۰/۸۳ است که بیان‌کننده توافق بسیار بالا و همخوانی قابل توجه این دو روش در شناسایی پهنه‌های مناسب، متوسط و نامناسب است. این نتیجه نشان می‌دهد که الگوی فضایی تولیدشده توسط XGB تا حد زیادی با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره FAHP منطبق است و هر دو روش در تعیین مناطق دارای محدودیت یا قابلیت توسعه، رفتار مشابهی داشته‌اند. این همگرایی می‌تواند بیان‌کننده آن باشد که مدل XGB توانسته است منطق تصمیم‌گیری کارشناسانه موجود در FAHP را به‌خوبی از داده‌ها استخراج و بازتولید کند.

جدول ۷- نتایج ضریب کاپا در تطابق نتایج سه مدل RF، XGB و FAHP (منبع: نویسندگان)

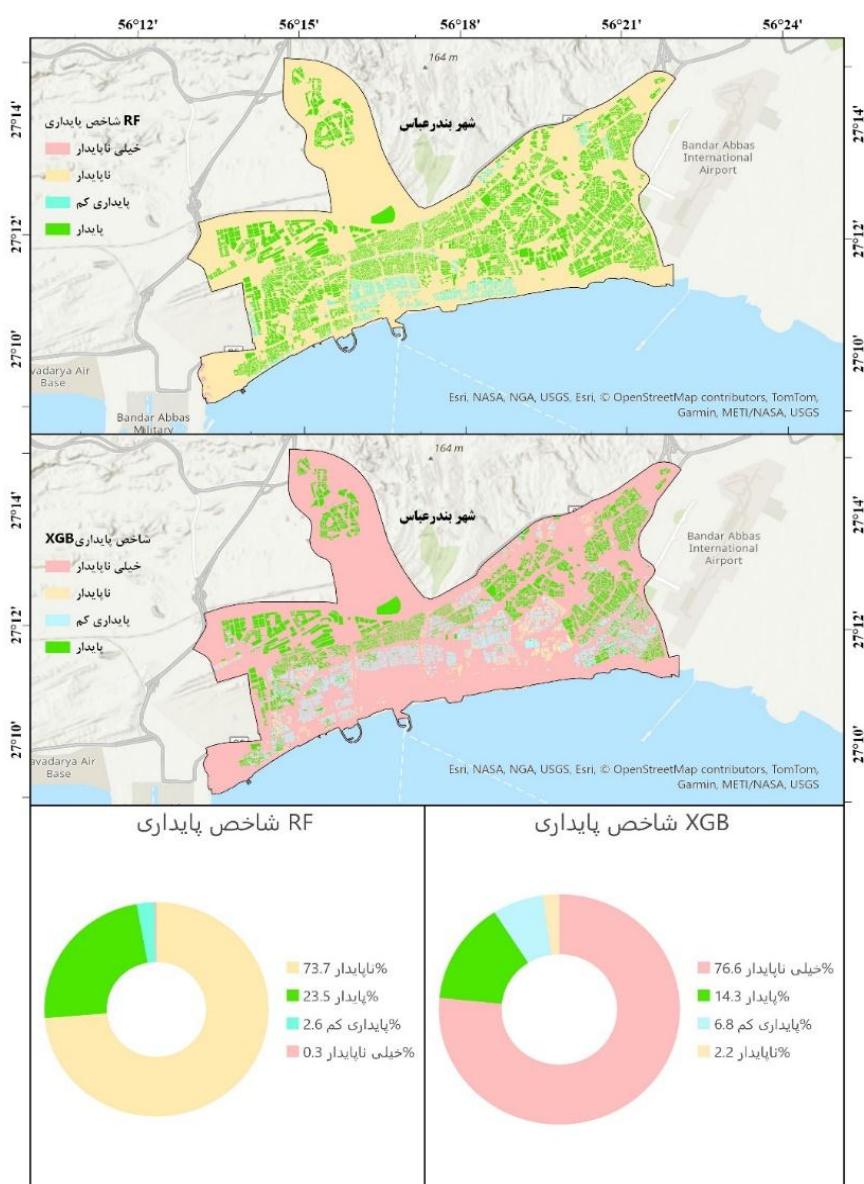
Table 7. Kappa coefficient values indicating the agreement between the results of the XGB, RF, and FAHP

مدل	RF	XGB	FAHP
RF	-	-۰/۲۰	-۰/۱۷
XGB	-۰/۲۰	-	۰/۸۳
FAHP	-۰/۱۷	۰/۸۳	-

عدم قطعیت در پایداری مکانی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بیان‌کننده رفتار کلی مدل در مواجهه با عدم قطعیت وزن معیارها و میزان پایداری فضایی نتایج است. شاخص پایداری نشان می‌دهد که میزان قابلیت اعتماد و ثبات نتایج در دو مدل RF و XGB متفاوت است. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، ضریب کاپا و الگوی توزیع کلاس‌های مطلوبیت، مدل XGB از پایداری بیشتری برخوردار بوده و تغییرات وزن معیارها تأثیر محدودتری بر ساختار کلی نقشه نهایی داشته است. همخوانی بالای این مدل با نتایج FAHP نیز بیان‌کننده آن است که XGB توانسته الگوی تصمیم‌گیری نسبتاً پایدار و سازگاری در شناسایی پهنه‌های مناسب و نامناسب ارائه دهد؛ بنابراین، نقشه نهایی حاصل از XGB را می‌توان دارای ثبات مکانی بالاتر و قابلیت اعتماد بیشتر در فرآیند مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه دانست.

درمقابل، مدل RF اگرچه پهنه‌های بیشتری را در طبقات مناسب و متوسط شناسایی کرده است، اختلاف قابل توجه آن با نتایج XGB و FAHP و همچنین حساسیت بیشتر به تغییرات برخی معیارها نشان می‌دهد که این مدل از پایداری کمتری برخوردار است. درواقع، RF تمایل بیشتری به گسترش پهنه‌های مستعد توسعه دارد و همین موضوع می‌تواند موجب افزایش عدم قطعیت در نتایج نهایی شود؛ بنابراین، نقشه تولیدشده توسط RF در مقایسه با XGB انعطاف‌پذیرتر اما کم‌ثبات‌تر ارزیابی می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه شاخص پایداری مکانی با دو الگوریتم RF و XGB (منبع: نویسندگان)

Figure 5: Spatial stability index mapping based on the RF and XGB

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، برخی پژوهشگران از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند ANN، SVM، Random Forest و XGBoost در مطالعات مکانیابی و ارزیابی تناسب زمین استفاده کرده‌اند (Aljanabi Badola et al., 2025, p. 2331; Dedeoğlu, 2025, p. 375). مزیت اصلی این روش‌ها، توانایی استخراج روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرها و کاهش وابستگی به قضاوت انسانی است (Ismaili et al., 2023, p. 1)؛ با این حال، در بسیاری از این مطالعات، الگوریتم‌های یادگیری ماشین به صورت مستقل استفاده شده‌اند و ارتباط آنها با مدل‌های تصمیم‌گیری کارشناسی بررسی نشده است. همچنین، بیشتر پژوهش‌ها تنها به تولید نقشه مطلوبیت بسنده کرده و ارزیابی جامعی از پایداری و عدم قطعیت نتایج ارائه نکرده‌اند (Singh & Rawat, 2023, p. 66).

پژوهش حاضر از این منظر دارای تمایز مهمی است که رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره FAHP را با الگوریتم‌های داده‌محور RF و XGB به صورت تلفیقی مقایسه و ارزیابی کرده است. درواقع، این پژوهش تنها به مقایسه خروجی مدل‌ها محدود نشده است؛ بلکه تلاش کرده است میزان همگرایی و اختلاف میان منطق کارشناسی و یادگیری ماشین را نیز تحلیل کند. استفاده از ضریب کاپا برای سنجش میزان توافق فضایی بین نقشه‌های نهایی، یکی از جنبه‌های نوآورانه این پژوهش محسوب می‌شود که در بسیاری از مطالعات مشابه کمتر به آن توجه شده است.

از سوی دیگر، بخش شایان توجهی از پژوهش‌های پیشین فاقد تحلیل حساسیت و ارزیابی عدم قطعیت بوده‌اند (Zhao et al., 2024; Sahin, 2020, p. 1)؛ درحالی‌که در این پژوهش، تحلیل حساسیت تورنادو برای شناسایی معیارهای بحرانی و اثرگذار بر نقشه نهایی به کار گرفته شد و سپس با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، رفتار مدل در شرایط تغییرات تصادفی وزن معیارها بررسی شد. این موضوع باعث شد که نتایج تنها مبتنی بر یک سناریوی وزن‌دهی ثابت نباشد و قابلیت اعتماد مدل در شرایط مختلف نیز ارزیابی شود. همچنین، استفاده از شاخص پایداری مبتنی بر ضریب تغییرات برای سنجش ثبات فضایی مدل‌ها، بعد دیگری از ارزیابی کیفیت نتایج را فراهم ساخت که در مطالعات مشابه کمتر دیده می‌شود.

در مقایسه با پژوهشگران پیشین که عمدتاً تنها یک مدل یا یک رویکرد را به کار برده‌اند، این پژوهش چارچوبی چندلایه و جامع ارائه می‌دهد که شامل وزن‌دهی کارشناسی، یادگیری ماشین، تحلیل حساسیت، تحلیل عدم قطعیت، ارزیابی پایداری و سنجش توافق فضایی است (Khan et al., 2026, p. 956; Sathiyamurthi et al., 2024, p. 1). این رویکرد جامع سبب شده است که نتایج حاصل از مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس از پشتوانه تحلیلی قوی‌تری برخوردار باشد و قابلیت اعتماد آن برای کاربردهای برنامه‌ریزی شهری افزایش یابد.

این پژوهش با هدف مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس، سه رویکرد Random Forest، FAHP و XGBoost را به صورت مقایسه‌ای و تلفیقی به کار گرفت. نتایج نشان داد که در هر سه مدل، معیارهای کالبدی مهم‌ترین نقش را در تعیین مطلوبیت مکانی دارند؛ هرچند شدت تأثیر آنها در مدل‌های یادگیری ماشین (به‌ویژه RF و XGB) بیشتر از FAHP برآورد شد. مقایسه نقشه‌های نهایی نشان داد که مدل Random Forest پهنه‌های بیشتری را در طبقات مناسب و متوسط طبقه‌بندی کرده است؛ درحالی‌که XGBoost و FAHP رویکرد محافظه‌کارانه‌تری داشته و

بخش وسیع‌تری از محدوده را نامناسب ارزیابی کرده‌اند. این اختلاف بیان‌کننده تفاوت در منطق تصمیم‌گیری داده‌محور و کارشناسی است.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که برخی معیارها نقش تعیین‌کننده‌تری در تغییر الگوی مکانی دارند؛ درحالی‌که سایر معیارها اثر پایداری بر نتایج دارند. همچنین تحلیل عدم قطعیت مبتنی بر مونت‌کارلو نشان داد که پهنه‌های با مطلوبیت بالا از پایداری بیشتری برخوردارند و در برابر تغییرات وزن معیارها حساسیت کمتری دارند. درمجموع، نتایج نشان می‌دهد که تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت و قابلیت اعتماد در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه را افزایش دهد. از میان مدل‌های بررسی‌شده، XGBoost به دلیل تعادل مناسب بین پایداری نتایج و همسویی با چارچوب کارشناسی، عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان داد. از منظر کاربردی، یافته‌های این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی توسعه عمودی شهر بندرعباس، کنترل گسترش افقی شهر و بهینه‌سازی استفاده از زمین شهری استفاده شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، متغیرهای اقلیمی، مخاطرات طبیعی و سناریوهای رشد شهری نیز به مدل افزوده شوند تا تحلیل جامع‌تری از توسعه شهری حاصل شود. نتایج حاصل از مدل پیشنهادی نشان داد که پهنه‌های دارای مطلوبیت بیشتر، علاوه بر برخورداری از شرایط مناسب از نظر معیارهای فیزیکی، زیرساختی و اجتماعی - اقتصادی، با پهنه‌های توسعه پیش‌بینی‌شده در اسناد برنامه‌ریزی شهری نیز همخوانی قابل قبولی دارند؛ ازاین‌رو، نقشه نهایی مناسب‌بودن می‌تواند به‌عنوان ابزاری کمکی در کنار ضوابط طرح جامع، طرح تفصیلی و مقررات بلندمرتبه‌سازی برای تصمیم‌گیری مدیران شهری استفاده شود.

با توجه به نتایج پژوهش، پیشنهاد می‌شود مدیریت شهری و نهادهای برنامه‌ریزی از نقشه پهنه‌های مناسب به‌عنوان مبنایی برای هدایت توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه در طرح‌های جامع و تفصیلی استفاده کنند. همچنین، صدور مجوز ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه در پهنه‌های دارای اولویت بالا همراه با تأمین هم‌زمان زیرساخت‌های حمل‌ونقل، تأسیسات شهری و خدمات عمومی در دستور کار قرار گیرد. بازنگری ضوابط و مقررات بلندمرتبه‌سازی متناسب با ویژگی‌های هر پهنه، بهره‌گیری از مشوق‌های سرمایه‌گذاری در مناطق مستعد و پرهیز از استقرار ساختمان‌های بلند در پهنه‌های نامناسب نیز می‌تواند به توزیع متعادل‌تر جمعیت و فعالیت‌ها، کاهش فشار بر بافت‌های متراکم و ارتقای پایداری توسعه شهری کمک کند.

منابع

محمدی، علیرضا، حسینی، میلاد، و ارژنگی، حجت (۱۳۹۷). شناسایی پهنه‌های مناسب برای استقرار ساختمان‌های بلندمرتبه شهری (مطالعه موردی: شهر اردبیل). *برنامه‌ریزی فضایی*، ۷(۴)، ۱۹-۴۰.

<https://doi.org/10.22108/sppl.2018.101700.1021>

References

Abebe, M. T., & Megento, T. L. (2017). Urban green space development using GIS-based multi-criteria analysis in Addis Ababa metropolis. *Applied Geomatics*, 9(4), 247-261.
<https://doi.org/10.1007/s12518-017-0198-7>

- Abid, S. K., Sulaiman, N., Chan, S. W., Nazir, U., Abid, M., Han, H., ... & Vega-Munoz, A. (2021). Toward an integrated disaster management approach: how artificial intelligence can boost disaster management. *Sustainability*, 13(22), 12560. <https://doi.org/10.3390/su132212560>
- Agyemang, F. S., Silva, E., & Anokye, P. A. (2018). Towards sustainable urban development: the social acceptability of high-rise buildings in a Ghanaian city. *Geo Journal*, 83(6), 1317-1329. <https://doi.org/10.1007/s10708-017-9837-0>
- Ali, S. A., Parvin, F., Vojteková, J., Costache, R., Linh, N. T. T., Pham, Q. B., ... & Ghorbani, M. A. (2021). GIS-based landslide susceptibility modeling: A comparison between fuzzy multi-criteria and machine learning algorithms. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 857-876. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.004>
- Aljanabi, F. K., & Dedeoğlu, M. (2025). Machine learning algorithms and geographic information system techniques to predict land suitability maps for wheat cultivation in the Central Anatolia Region. *Journal of Ecological Engineering*, 26(1), 373-387. <https://B2n.ir/et6164>
- Al-Ruzouq, R., Shanableh, A., Yilmaz, A. G., Idris, A., Mukherjee, S., Khalil, M. A., & Gibril, M. B. A. (2019). Dam site suitability mapping and analysis using an integrated GIS and machine learning approach. *Water*, 11(9), 1880. <https://doi.org/10.3390/w11091880>
- Aulia, B. U., Rahmawati, D., & Ariastita, P. G. (2014). Land Suitability for High Rise Building Based on Land Developers' Preference and Soil Vulnerability Index. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 135, 147-151. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.339>
- Badola, S., Pandey, M., Mishra, V. N., Parkash, S., & Zhran, M. (2025). Landslide susceptibility mapping in complex topoclimatic Himalayan terrain, India using machine learning models: a comparative study of XGBoost, RF and ANN. *Geological Journal*, 60(10), 2331-2350. <https://doi.org/10.1002/gj.5175>
- Caprioli, C., & Bottero, M. (2021). Addressing complex challenges in transformations and planning: A fuzzy spatial multicriteria analysis for identifying suitable locations for urban infrastructures. *Land use policy*, 102, 105147. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105147>
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3), 649-655. [10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Chang, Z., Du, Z., Zhang, F., Huang, F., Chen, J., Li, W., & Guo, Z. (2020). Landslide susceptibility prediction based on remote sensing images and GIS: Comparisons of supervised and unsupervised machine learning models. *Remote Sensing*, 12(3), 502. <https://doi.org/10.3390/rs12030502>
- Chen, J. (2014). GIS-based multi-criteria analysis for land use suitability assessment in City of Regina. *Environmental Systems Research*, 3(1), 13. <https://doi.org/10.1186/2193-2697-3-13>
- Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental modelling & software*, 25(12), 1582-1591. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001>
- Cui, Z. D., Yang, J. Q., & Yuan, L. (2015). Land subsidence caused by the interaction of high-rise buildings in soft soil areas. *Natural Hazards*, 79(2), 1199-1217. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1902-8>
- Dadras, M., Mohd Shafri, H. Z., Ahmad, N., Pradhan, B., & Safarpour, S. (2014). Land use/cover change detection and urban sprawl analysis in Bandar Abbas City, Iran. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 690872. <https://doi.org/10.1155/2014/690872>
- Dai, L., Zhao, X., He, H. S., Deng, H., Yu, D., Zhou, L., & Wu, S. (2008). Evaluating land-use suitability of an industrial city in northeast China. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15(4), 378-382. <https://doi.org/10.3843/SusDev.15.4:14>
- Daoud, J. I. (2017). Multicollinearity and regression analysis. In *journal of physics: Conference series* (Vol. 949, No. 1, p. 012009). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/949/1/012009/meta>

- Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., Owusu, E. K., Pärn, E., & Edwards, D. J. (2019). Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. *International journal of construction management*, 19(5), 436-452. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452098>
- Dodevska, Z., Radovanović, S., Petrović, A., & Delibašić, B. (2023). When fairness meets consistency in AHP pairwise comparisons. *Mathematics*, 11(3), 604. <https://doi.org/10.3390/math11030604>
- Ezeh, C. I., Hong, Y., Deng, W., & Zhao, H. (2022). High rise office building makeovers—Exploiting architectural and engineering factors in designing sustainable buildings in different climate zones. *Energy Reports*, 8, 6396-6410. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.075>
- Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote sensing of environment*, 239, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>
- Garzon, M. B., Blazek, R., Neteler, M., De Dios, R. S., Ollero, H. S., & Furlanello, C. (2006). Predicting habitat suitability with machine learning models: the potential area of *Pinus sylvestris* L. in the Iberian Peninsula. *Ecological modelling*, 197(3-4), 383-393. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.015>
- Gelan, E. (2021). GIS-based multi-criteria analysis for sustainable urban green spaces planning in emerging towns of Ethiopia: the case of Sululta town. *Environmental Systems Research*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s40068-021-00220-w>
- Gharaibeh, A. A., Jaradat, M. A., & Kanaan, L. M. (2023). A machine learning framework for assessing urban growth of cities and suitability analysis. *Land*, 12(1), 214. <https://doi.org/10.3390/land12010214>
- Greene, R., Luther, J. E., Devillers, R., & Eddy, B. (2010). An approach to GIS-based multiple criteria decision analysis that integrates exploration and evaluation phases: Case study in a forest-dominated landscape. *Forest Ecology and Management*, 260(12), 2102-2114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.052>
- Guneralp, B., Reba, M., Hales, B. U., Wentz, E. A., & Seto, K. C. (2020). Trends in urban land expansion, density, and land transitions from 1970 to 2010: A global synthesis. *Environmental Research Letters*, 15(4), 044015. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab6669/meta>
- Hasanuzzaman, M., & Shit, P. (2025). Assessment of gully erosion susceptibility using four data-driven models AHP, FR, RF and XGBoosting machine learning algorithms. *Natural Hazards Research*, 5(1), 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.05.001>
- Husin, M. Z., Usman, I. M., & Suratman, R. (2021). Density challenges of high-rise residential development in Malaysia. *Planning Malaysia*, 19. <https://doi.org/10.21837/pm.v19i18.1036>
- Ismaili, M., Krimissa, S., Namous, M., Htitiou, A., Abdelrahman, K., Fnais, M. S., ... & Benabdelouahab, T. (2023). Assessment of soil suitability using machine learning in arid and semi-arid regions. *Agronomy*, 13(1), 165. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010165>
- Khan, I., Khan, K., Becek, K., & Bilal, M. F. (2026). Evaluating WaterInduced Soil Erosion Using Machine Learning: XGBoost as the Most Effective Model. *Land Degradation & Development*, 37(3), 946-960. <https://doi.org/10.1002/ldr.70152>
- Kumar, S., & Bansal, V. K. (2016). A GIS-based methodology for safe site selection of a building in a hilly region. *Frontiers of architectural research*, 5(1), 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.01.001>
- Lin, P., Lau, S. S. Y., Qin, H., & Gou, Z. (2017). Effects of urban planning indicators on urban heat island: a case study of pocket parks in high-rise high-density environment. *Landscape and urban planning*, 168, 48-60. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.024>
- Liu, R., Zhang, K., Zhang, Z., & Borthwick, A. G. (2014). Land-use suitability analysis for urban development in Beijing. *Journal of environmental management*, 145, 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.06.020>
- Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. (2020). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert systems with applications*, 161, 113738. [10.1016/j.eswa.2020.113738](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113738)

- Ma, L., Azari, R., & Elnimeiri, M. (2024). A building information modeling-based life cycle assessment of the embodied carbon and environmental impacts of high-rise building structures: A case study. *Sustainability*, 16(2), 569. <https://doi.org/10.3390/su16020569>
- Malczewski, J. (2000). On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches. *Transactions in GIS*, 4(1), 5-22. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>
- Malczewski, J., & Jankowski, P. (2020). Emerging trends and research frontiers in spatial multicriteria analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(7), 1257-1282. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1712403>
- Mansouri Daneshvar, M. R., Khatami, F., & Shirvani, S. (2017). GIS-based land suitability evaluation for building height construction using an analytical process in the Mashhad city, NE Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0286-z>
- Masoudi, M., Aboutalebi, M., Asrari, E., & Cerdà, A. (2023). Land suitability of urban and industrial development using multi-criteria evaluation (MCE) and a new model by GIS in Fasa County, Iran. *Land*, 12(10), 1898. <https://www.mdpi.com/2073-445X/12/10/1898>
- Masoudi, M., Centeri, C., Jakab, G., Nel, L., & Mojtahedi, M. (2021). GIS-based multi-criteria and multi-objective evaluation for sustainable land-use planning (case study: Qaleh Ganj County, Iran) “landuse planning using mce and mola”. *International Journal of Environmental Research*, 15(3), 457-474. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00326-0>
- Metropolis, N., & Ulam, S. (1949). The monte carlo method. *Journal of the American statistical association*, 44(247), 335-341. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1949.10483310>
- Mohammadi, A. (2019). Determining appropriate zones for knowledge intensive firms site selection using Gis: case study of Tehran metropolitan area. *International Journal of Applied Geospatial Research (IJAGR)*, 10(1), 1-30. <https://B2n.ir/mx3377>
- Mohammadi, A., Hosseini, M., & Arzhang, H. (2018). Identification of Appropriate Zones for Establishing Urban High-Rise Buildings (Case Study: City of Ardabil). *Spatial Planning*, 7(4), 19-40. <https://doi.org/10.22108/sppl.2018.101700.1021> [In Persian]
- Ryu, S. E., Shin, D. H., & Chung, K. (2020). Prediction model of dementia risk based on XGBoost using derived variable extraction and hyper parameter optimization. *IEEE Access* 8, 177708–177720. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025553>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1984). The analytic hierarchy process: Decision making in complex environments. In *Quantitative assessment in arms control: mathematical modeling and simulation in the analysis of arms control problems* (pp. 285-308). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2805-6_12
- Sahin, E. K. (2020). Assessing the predictive capability of ensemble tree methods for landslide susceptibility mapping using XGBoost, gradient boosting machine, and random forest. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1308. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3060-1>
- Sahin, E. K. (2023). Implementation of free and open-source semi-automatic feature engineering tool in landslide susceptibility mapping using the machine-learning algorithms RF, SVM, and XGBoost. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(3), 1067-1092. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02330-y>
- Sathiyamurthi, S., Subbarayan, S., Ramya, M., Sivasakthi, M., Gobi, R., Qaysi, S., ... & M. Youssef, Y. (2024). Advancing agricultural land suitability in urbanized semi-arid environments: Insights from geospatial and machine learning approaches. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(12), 436. <https://doi.org/10.3390/ijgi13120436>
- Selmi, M., Kormi, T., & Ali, N. B. H. (2016). Comparison of multi-criteria decision methods through a ranking stability index. *International Journal of Operational Research*, 27(1-2), 165-183. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2016.078462>

- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379-423. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/584091.584093>
- Singh, D. K., & Rawat, N. (2023). Machine learning for weather forecasting: XGBoost vs SVM vs random forest in predicting temperature for visakhapatnam. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 15, 57-69. <https://B2n.ir/gm2254>
- Singh, R. K., Behera, M. D., Das, P., Rizvi, J., Dhyani, S. K., & Biradar, Ç. M. (2022). Agroforestry suitability for planning site-specific interventions using machine learning approaches. *Sustainability*, 14(9), 5189. <https://doi.org/10.3390/su14095189>
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Nabiollahi, K., Rasoli, L., Kerry, R., & Scholten, T. (2020). Land suitability assessment and agricultural production sustainability using machine learning models. *Agronomy*, 10(4), 573. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040573>
- Taleai, M., Sliuzas, R., & Flacke, J. (2014). An integrated framework to evaluate the equity of urban public facilities using spatial multi-criteria analysis. *Cities*, 40, 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.04.006>
- Tamošaitienė, J., Šipalis, J., Banaitis, A., & Gaudutis, E. (2013). Complex model for the assessment of the location of high-rise buildings in the city urban structure. *International Journal of Strategic Property Management*, 17(1), 93-109. <https://doi.org/10.3846/1648715X.2013.781968>
- Veretennikov, D. B. (2023). Technologies of planning and construction of high-rise complexes within the concept of development of «vertical city». *Urban construction and architecture*, 13(2), 163-171. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2023.02.22>
- Zhao, L. Q., van Duynhoven, A., & Dragičević, S. (2024). Machine Learning for Criteria Weighting in GIS-Based Multi-Criteria Evaluation: A Case Study of Urban Suitability Analysis. *Land*, 13(8), 1288. <https://doi.org/10.3390/land13081288>
- Zhou, S., Liu, Z., Wang, M., Gan, W., Zhao, Z., & Wu, Z. (2022). Impacts of building configurations on urban stormwater management at a block scale using XGBoost. *Sustainable Cities and Society*, 87, 104235. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104235>
- Zio, E. (1996). On the use of the analytic hierarchy process in the aggregation of expert judgments. *Reliability Engineering & System Safety*, 53(2), 127-138. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(96\)00060-9](https://doi.org/10.1016/0951-8320(96)00060-9)

