Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences
rsgi.tabrizu.ac.ir

Spatio-Temporal Analysis of Land-Use Dynamics and Urban Growth Forecasting in Western Tehran Using Multi-Temporal Satellite Data and Advanced Urban Growth Models

Sanaz Shiravand[1], Naser Ahmadi Sani[2]✉, Mehrdad Cheraghi[3], Soheil Sobhan Ardakani[4], Bahareh Lorestani [5]

1. PhD Candidate, Department of the Environment, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. E-mail: sa.shiravand@iau.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Professor, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Mah. C., Islamic Azad University, Mahabad, Iran. E-mail: na.ahmadisani@iau.ac.ir
3. Professor, Department of the Environment, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. E-mail: cheraghi_m@iau.ac.ir
4. Professor, Department of the Environment, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. E-mail: s_sobhan@iau.ac.ir
5. Professor, Department of the Environment, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. E-mail: lorestani_b@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 14 April 2026
Revised: 25 April 2026
Accepted: 8 June 2026
Published: 22 August 2026

Keywords:
Spatial entropy,
Land-use change,
Tehran urban development,
Cellular Automata Markov Chain model,
Remote sensing.

ABSTRACT

Introduction: The physical expansion of Tehran over the past two decades, particularly in its western districts (21 and 22), have occurred with accelerating pace and complex spatial patterns, leaving substantial impacts on the city's environmental structure. Due to their proximity to northern foothills and location along the main urban development axis, these areas represent the focal zones of contemporary spatial transformations in Tehran.

Objective: The present study aims to provide a multi-temporal and comprehensive analysis of land-use dynamics in these critical areas and to model their future development scenarios up to the horizon year 2035, employing remote sensing data and advanced urban growth models.

Methods: Accordingly, land-use changes were extracted using multi-temporal Landsat imagery, and spatial metrics such as Shannon entropy and concentration index were calculated to characterize spatial development patterns. Subsequently, a hybrid Cellular Automata–Markov Chain model was applied to simulate future urban expansion with high accuracy.

Conclusions: Results indicate a significant decline in barren and natural lands over the past twenty years, primarily converted into residential, service, and transportation uses. The spatial structure analysis revealed that District 21 follows a concentrated and near-saturation pattern, whereas District 22 exhibits a more dispersed, polycentric expansion. The 2035 scenario modeling further suggests that, if current trends persist, most of the remaining developable land will transition toward full urbanization. These findings highlight the urgent need to revise urban development policies and adopt an integrated approach to growth management and natural resource preservation. Understanding distinct spatial growth patterns can support more targeted planning, environmental risk mitigation, and optimized infrastructure allocation for the future.

Cite this article: Shiravand, S., Ahmadi Sani, N., Cheraghi, M. Sobhan Ardakani, S. & Lorestani, M. (2026). Spatio-Temporal Analysis of Land-Use Dynamics and Urban Growth Forecasting in Western Tehran Using Multi-Temporal Satellite Data and Advanced Urban Growth Models. *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 6 (20), 57-72. http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.71942.1159

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.71942.1159

Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences
rsgi.tabrizu.ac.ir

Introduction

Urban growth has transformed land-use patterns in major metropolitan areas, including Tehran. Districts 21 and 22, due to their particular geographical and developmental characteristics, have experienced substantial physical changes along with significant environmental consequences (Nasiri et al., 2025; Xu et al., 2025). Remote sensing and GIS constitute key tools for monitoring these transformations (Sani & Moradi, 2025). Markov chain and cellular automata models are also effective in predicting urban development (Jardón et al., 2025; Mirzakhani et al., 2025). Despite numerous studies, a comprehensive analysis of the past, present, and future dynamics of Districts 21 and 22 has yet to be provided. Using Landsat data (2005–2020) and projecting changes through 2035, this study addresses this knowledge gap.

Methodology

The research methodology integrates remote sensing, multi-temporal analyses, and urban modeling techniques. First, Landsat satellite imagery (2005, 2010, 2015, 2020) was acquired and pre-processed, including geometric, radiometric, and atmospheric corrections (Moradi Emam Gheysi & Bonyad, 2024). Subsequently, supervised classification was performed using three algorithms—ML, ANN, and MD—and its accuracy was assessed using 300 systematically sampled reference points (Jasim et al., 2024). Land-use change analysis was conducted through post-classification comparison (Onuegbu & Egbu, 2024), and class areas were calculated. The spatial dispersion pattern was examined using the Shannon entropy index (Mhangara et al., 2024). Finally, the Markov chain–cellular automata model (Azabdaftari & Sunar, 2024) was implemented by computing the transition matrix to predict land-use patterns through the year 2035.

Results

The results indicate that between 2005 and 2020, both Districts 21 and 22 of Tehran experienced a substantial increase in residential areas accompanied by a reduction in barren lands. In District 21, development followed a more compact and concentrated pattern, whereas in District 22 it exhibited a more dispersed and polycentric structure. Road networks expanded considerably in both districts, while vegetation cover remained stable in District 21 and increased in District 22, particularly around Chitgar Lake. Among the classification algorithms, the Maximum Likelihood method yielded the highest accuracy, exceeding 94%. Projections generated by the CA–Markov model suggest that these urban development trends will continue through 2035, though with distinct spatial patterns in the two districts.

Discussion

Transformations between 2005 and 2020 in Tehran's Districts 21 and 22 reveal that the increase in residential use, reduction of vacant lands, and expansion of the road network have led to an infrastructure-driven development pattern reliant on the consumption of released lands (Deng et al., 2015). The development pattern in District 21 is denser and more confined, while in District 22 it is more dispersed and based on large-scale projects (Tsai, 2005; Angel et al., 2011). The Shannon entropy index confirms this distinction: higher concentration in District 21 and greater dispersion in District 22. Environmental implications—particularly increased runoff and decreased soil permeability—are more severe in District 22, consistent with international studies (Nasiri et al., 2025; Wang & Wang, 2025). The Cellular Automata–Markov Chain model also indicates the continuation of these trends until 2035, similar to previous studies in Tehran and China (Arsanjani et al., 2013; Wan et al., 2024). However, as Batty (2007) notes, forecasting based on past trends is constrained when abrupt policy shifts occur. The high accuracy of Landsat classification enhances the credibility of results, though studies such as Maxwell et al. (2018) suggest that machine-learning algorithms can offer improved precision. Integrating multitemporal data, dispersion indices, and predictive modeling has provided a unified framework for analyzing both past and future urban growth, yet employing higher-resolution imagery and more advanced models represents a promising methodological direction for future research.

Conclusion

The 2005–2020 trend shows that both Districts 21 and 22 of Tehran expanded by converting vacant lands into residential areas, but their development patterns differ substantially. District 21 experienced compact, concentrated growth and has nearly reached its physical saturation point, whereas District 22 underwent scattered, multicentric expansion and still possesses growth capacity. Shannon entropy values corroborate this fundamental difference. The CA-Markov projection to 2035 indicates that District 21 will nearly complete its capacity, while development in District 22 will mainly continue toward the north and northeast. Therefore,

unified planning policies are not efficient for these two districts. District 21 requires regeneration, rehabilitation, and infrastructure enhancement within its existing fabric, whereas District 22 should prioritize controlling spatial dispersion and protecting natural lands. The decline in vacant areas also poses an environmental warning, suggesting that future urban planning must adopt an integrated, data-driven, and environmentally adaptive approach.

References

Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A., & Potere, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Progress in planning*, 75(2), 53-107. https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001

Arsanjani, J. J., Helbich, M., & de Noronha Vaz, E. (2013). Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran. *Cities*, 32, 33-42. https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.-01.005

Azabdaftari, A., & Sunar, F. (2024). Predicting urban tomorrow: CA-Markov modeling and district evolution. *Earth Science Informatics*, 17(4), 3215-3232. https://doi.org/10.1007/s12145-024-01340-4

Batty, M. (2007). *Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. The MIT press. https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2007.00523_1.x

Deng, X., Huang, J., Rozelle, S., Zhang, J., & Li, Z. (2015). Impact of urbanization on cultivated land changes in China. *Land use policy*, 45, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.007

Jardón, E., Romero, M., Marcial-Romero, J. R., & Zavala, A. (2025). Urban expansion modeling with a semi automated spatial Markov chain framework. *Discover Cities*, 2(1), 121. https://doi.org/10.1007/s44327-025-00162-3

Jasim, B. S., Jasim, O. Z., & AL-Hameedawi, A. N. (2024). Evaluating land use land cover classification based on machine learning algorithms. *Engineering and Technology Journal*, 42(5), 557-568. https://doi.org/10.30684/etj.2024.144585.1638

Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International journal of remote sensing*, 39(9), 2784-2817. https://doi.org/10.-1080/01431161.2018.1433343

Mhangara, P., Gidey, E., & Manjoo, R. (2024). Analysis of urban sprawl dynamics using machine learning, CA-Markov chain, and the Shannon entropy model: a case study in Mbombela City, South Africa. *Environmental Systems Research*, 13(1), 17. https://doi.org/10.1186/s40068-024-00348-5

Mirzakhani, A., Behzadfar, M., & Azizi Habashi, S. (2025). Simulating urban expansion dynamics in Tehran through satellite imagery and cellular automata Markov chain modelling. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(2), 145. https://doi.org/10.1007/s40808-025-02325-y

Moradi Emam Gheysi, I., & Bonyad, A. E. (2024). Investigating the effect of different atmospheric correction methods in forest biomass estimation using Vegetation indices. *Forest Research and Development*, 10(2), 205-222.

Nasiri, A., Salimi, E., Delfan Azari, M., Yazdi, J., & Shahsawandi, M. (2025). Urban Flood Zoning Using an Integrated Hydrological-Hydraulic Watershed Modeling Approach, Case Study: Districts 21 and 22 of Tehran. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, 14(4), 392-405. https://doi.org/10.-32598/dmkp.14.4.882.1

Onuegbu, F. E., & Egbu, A. U. (2024). Employing post classification comparison to detect land use cover change patterns and quantify conversions in Abakaliki LGA Nigeria from 2000 to 2022. *Scientific Reports*, 14(1), 9384. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59056-w

Sani, N. A., & Moradi, S. (2025). *Comparison and Evaluation of Different Machine Learning Algorithms in Land Use/Cover Classification Using Satellite Data (Case Study: South of Lake Urmia)*.

Tsai, Y. H. (2005). Quantifying urban form: compactness versus' sprawl'. *Urban studies*, 42(1), 141-161. https://doi.org/10.1080/0042098042000309748

Wan, J., Xie, Q., & Fan, X. (2024). The impact of transportation and information infrastructure on urban productivity: Evidence from 256 cities in China. *Structural Change and Economic Dynamics*, 68, 384-392. https://doi.org/10.1016/j.strueco.2023.11.008

Wang, T., & Wang, Y. (2025). Spatial–Temporal Response of Urban Flooding to Land Use Change: A Case Study of Wuhan's Main Urban Area. *Hydrology*, 13(1), 3. https://doi.org/10.3390/hydrology13010003

Xu, T., Li, E., Samat, A., Wang, S., & Yu, M. (2025). Evaluation of urban flood-prone regions in Chinese cities based on potential flood hazard assessment model. *Natural Hazards*, 121(16), 18743-18763. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07536-1

نشریه کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی
rsgi.tabrizu.ac.ir

تحلیل فضایی‌زمانی تحول کاربری اراضی و پیش‌بینی توسعه شهری در پهنه غربی تهران با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه و مدل‌های رشد شهری

ساناز شیراوند[۱]، ناصر احمدی ثانی[۲]✉، مهرداد چراغی[۳]، سهیل سبحان‌اردکانی[۴]، بهاره لرستانی[۵]

۱. دانشجوی دکتری، گروه محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: sa.shiravand@iau.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران. رایانامه: na.ahmadisani@iau.ac.ir
۳. استاد گروه محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: cheraghi_m@iau.ac.ir
۴. استاد گروه محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: s_sobhan@iau.ac.ir
۵. استاد گروه محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: lorestani_b@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱

کلیدواژه‌ها:
آنتروپی فضایی،
تغییرات کاربری اراضی،
توسعه شهری تهران،
سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف،
سنجش از دور.

چکیده

مقدمه: گسترش کالبدی شهر تهران در دو دهه اخیر، به‌ویژه در مناطق غربی (۲۱ و ۲۲)، با شتابی فزاینده و الگویی پیچیده همراه بوده و تأثیرات قابل‌توجهی بر ساختار محیطی شهر برجای گذاشته است. این پهنه‌ها به سبب مجاورت با دامنه‌های شمالی و قرارگیری در محور توسعه شهری، کانون اصلی تحولات فضایی معاصر تهران محسوب می‌شوند.

هدف: تحلیل چندزمانه و جامع پویایی کاربری اراضی در این مناطق و مدل‌سازی سناریوهای توسعه آتی تا افق ۲۰۳۵، با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور و مدل‌های پیشرفته رشد شهری است.

روش تحقیق: تغییرات کاربری با تصاویر چندزمانه‌ی لندست استخراج و شاخص‌هایی مانند آنتروپی شانون و تمرکز برای تشخیص الگوهای فضایی محاسبه شد. سپس مدل ترکیبی سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف برای شبیه‌سازی دقیق توسعه آتی به‌کار رفت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد طی بیست سال گذشته، کاهش عمده اراضی بایر و طبیعی و تبدیل آن‌ها به کاربری‌های مسکونی، خدماتی و حمل‌ونقل رخ داده است. الگوی فضایی منطقه ۲۱ روندی متمرکز و نزدیک به اشباع را دنبال کرده، در حالی که منطقه ۲۲ توسعه‌ای پراکنده و چندکانونی را تجربه نموده است. مدل‌سازی سناریوی ۲۰۳۵ نیز بیانگر آن است که در صورت تداوم روند موجود، بخش اعظم ظرفیت توسعه آزاد این مناطق به سطح کاملاً توسعه‌یافته تبدیل خواهد شد. یافته‌ها بر ضرورت بازنگری در سیاست‌های توسعه شهری و اتخاذ رویکردی یکپارچه در مدیریت رشد و حفاظت از منابع طبیعی تأکید دارند. شناخت الگوهای متفاوت توسعه، زمینه برنامه‌ریزی هدفمند، کاهش ریسک‌های محیطی و بهینه‌سازی زیرساخت‌های آینده را فراهم می‌کند.

استناد: شیراوند، ساناز؛ احمدی ثانی، ناصر؛ چراغی، مهرداد؛ سبحان‌اردکانی، سهیل و لرستانی، بهاره (۱۴۰۵). تحلیل فضایی‌زمانی تحول کاربری اراضی و پیش‌بینی توسعه شهری در پهنه غربی تهران با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه و مدل‌های رشد شهری. *کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی*، ۶ (۲۰)، ۵۷-۷۲.

http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.71942.1159

ناشر: دانشگاه تبریز.

© نویسندگان.

مقدمه

رشد سریع شهرنشینی در دهه‌های اخیر، الگوهای کاربری اراضی را در بسیاری از کلان‌شهرهای جهان دچار دگرگونی‌های اساسی کرده است. افزایش جمعیت، توسعه زیرساخت‌ها، گسترش فعالیت‌های انسانی و تغییرات اجتماعی و اقتصادی، موجب شده است شهرها با سرعتی چشمگیر به سمت توسعه افقی و عمودی گسترش یابند. این روند در کشورهای درحال‌توسعه، از جمله ایران، با شدت بیشتری بروز یافته و آثار عمیقی بر محیط‌زیست، منابع طبیعی و ساختار فضایی شهرها برجای گذاشته است (Ruben et al., 2015; Deng et al., 2020). کلان‌شهر تهران به‌عنوان بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران، طی دو دهه اخیر شاهد تغییرات کالبدی و فضایی قابل‌توجه بوده است. افزایش تقاضای مسکن، گسترش شبکه‌های حمل‌ونقل، اجرای پروژه‌های بزرگ‌مقیاس و توسعه زیرساخت‌های شهری، سبب تحول جدی در الگوهای کاربری اراضی، به‌ویژه در مناطق غربی شهر شده است. در این میان، مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران به دلیل موقعیت جغرافیایی ممتاز، مجاورت با ارتفاعات شمال‌غرب، دسترسی به شبکه‌های بزرگراه و وجود اراضی طبیعی، از مهم‌ترین پهنه‌های توسعه شهری پایتخت محسوب می‌شوند (نصیری و همکاران، ۱۴۰۴). تحولات رخ‌داده در این مناطق علاوه بر دگرگونی کالبدی، پیامدهای گسترده‌ای بر فرایندهای طبیعی چون الگوهای رواناب سطحی، خطرپذیری سیلاب، کیفیت محیط‌زیست، توزیع جمعیت و پایداری شهری به‌جا گذاشته است (Xu et al., 2025). کاهش اراضی طبیعی و بایر و افزایش کاربری‌های مسکونی، خدماتی و حمل‌ونقل، روندی است که در این نواحی به شکل بارزی مشاهده می‌شود. ازاین‌رو، تحلیل دقیق گذشته و مدل‌سازی سناریوهای آتی توسعه، لازمه برنامه‌ریزی و مدیریت آینده این مناطق است.

در دهه‌های اخیر، استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان ابزارهای توانمند تحلیل فضایی، نقش کلیدی در پایش تغییرات کاربری اراضی ایفا کرده است (ثانی و مرادی، ۱۴۰۴). تصاویر ماهواره‌ای لندست به دلیل پوشش زمانی گسترده، دقت مکانی مناسب و دسترسی آزاد، منابع داده ارزشمندی برای تحلیل‌های فضایی محسوب می‌شوند(Wulder et al., 2022). هم‌چنین، مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار از دقیق‌ترین ابزارهای مدل‌سازی تغییرات کاربری و سناریوسازی توسعه شهری به شمار می‌روند (Jardón et al., 2025 ;میرزاخانی و همکاران، ۱۴۰۴).

پژوهش‌های متعدد جهانی و ملی به‌کارگیری این ابزارها را تأیید کرده‌اند. مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که رشد سریع شهرنشینی عمدتاً موجب کاهش اراضی طبیعی و گسترش سطوح توسعه‌یافته شده است (Ruben et al.,2015; Deng et al.,2020). در ایران نیز، پژوهش‌هایی چون (زیاری و حمیدی‌کای، ۱۴۰۴)، (فصیحی و همکاران، ۱۴۰۱) و (روستا و همکاران، ۱۳۸۹) وقوع این روند را در شهرهایی چون ارومیه، کرج و شیراز اثبات کرده‌اند. در مورد تهران، (نصیری و همکاران، ۱۴۰۴) با بهره‌گیری از مدل‌های هیدرولوژیکی و داده‌های سنجش‌ازدور، نشان داده‌اند که توسعه فیزیکی شتابان موجب تغییر الگوی رواناب سطحی و افزایش خطر سیلاب شده است. از منظر روش‌شناسی، مطالعات انجام‌شده با استفاده از مدل‌های مختلف طبقه‌بندی نظیر MLC، ANN، NDVI و PCA تأکید دارند که الگوریتم MLC معمولاً دقت بالاتری در طبقه‌بندی کاربری اراضی دارد و مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار، بهترین کارایی را در شبیه‌سازی روند توسعه شهری ارائه می‌دهند (Khayat et al., 2025 ; سیرات و گمرکی، ۱۴۰۴).

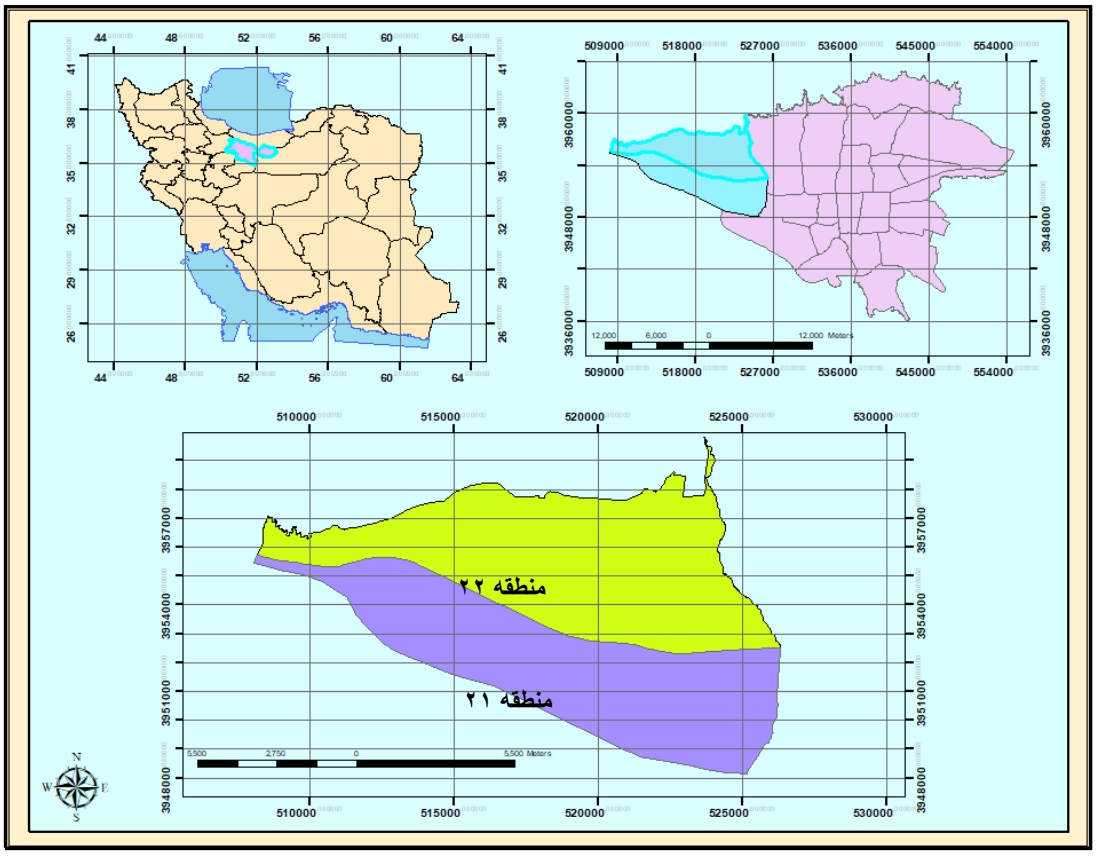
در هر صورت، با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه‌ی تغییرات فضایی مناطق شهری تهران، هنوز تحلیلی جامع و یکپارچه از روند گذشته، وضعیت کنونی و چشم‌انداز آینده مناطق ۲۱ و ۲۲ ارائه نشده است. پژوهش حاضر درصدد است با استفاده از داده‌های چندزمانه لندست طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ و مدل‌سازی توسعه آتی تا سال ۲۰۳۵، این خلأ دانشی را پر کند. بنابراین، نوآوری این پژوهش در تلفیق چهار محور کلیدی نهفته است: ۱) تحلیل بی‌سابقه تغییرات ۱۵ ساله مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران با تصاویر چندزمانه؛ ۲) ارائه چارچوب جامع یکپارچه (از طبقه‌بندی تا پیش‌بینی)؛ ۳) آشکارسازی تفاوت در الگوی توسعه دو منطقه؛ و ۴) ارائه خروجی‌های کمی دقیق به عنوان مبنای تصمیم‌گیری برای مدیران شهری. در مجموع، این پژوهش با رویکردی

داده‌محور و پیش‌نگر، می‌کوشد تا تصویری واقع‌گرایانه از چرخه تغییرات کاربری اراضی و مسیر آتی توسعه شهری ارائه دهد که مبنای مدیریت پایدار توسعه شهری پایتخت قرار گیرد.

روش پژوهش

مناطق مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه، منطقه ۲۱ شهر تهران در غرب تهران و در موقعیت عرض شمالی '۶۸ °۳۵ تا '۷۱ °۳۵ و '۱۱ °۵۱ تا '۳۱ °۵۱ طول غربی واقع شده است. این منطقه در امتداد جنوبی منطقه ۲۲ تهران و در معبر ورودی و خروجی شهر تهران به استان‌های همجوار قرار دارد. در گذشته تنها مسیرهای ورودی به شهر تهران از این منطقه عبور می‌کردند. منطقه ۲۱ تهران در میان مناطق ۵، ۲۲، ۹، ۱۸ و شهر شهریار محدود شده است و از شرق با منطقه ۹، از شمال با مناطق ۵ و ۲۲، از جنوب با منطقه ۱۸ و از غرب و جنوب غربی با شهریار مجاورت دارد. این منطقه نه تنها ورودی استان البرز به تهران است ، بلکه ورودی شهرستان شهریار به تهران نیز می‌باشد. مساحت آن بالغ بر ۵۱۵۶ هکتار است که ۸/۷ درصد مساحت کل مناطق شهر تهران بوده و چهارمین منطقه از نظر وسعت، درقیاس با مساحت سایر مناطق شهرداری تهران قرار دارد. امتداد جاده مخصوص کرج در جهت شرق به غرب و نیزامتداد بزرگراه آزادگان در جهت شمال به جنوب ، به صورت لبه‌های مشخص، محدوده منطقه را به چهار پهنه تقسیم کرده است. این پهنه‌ها در شمال شرقی (پهنه شماره ۱)، در جنوب شرقی (پهنه شماره ۲)، شمال غربی (پهنه شماره ۳) و جنوب غربی (پهنه شماره ۴) قرار گرفته است و مساحت پهنه شمال شرقی ۴۲۷/۷ هکتار، جنوب شرقی ۱۱۴۷/۲ هکتار، شمال غربی ۱۳۷۱/۵ هکتار و جنوب غربی ۲۲۳۵/۲ هکتار است و منطقه ۲۲ شهر تهران بین طولهای شرقی "۱۰ ’۵ ۵۱ تا "۴۰ ’۲۰ ۵۱ و عرضهای شمالی "۱۶ ’۳۲ ۳۵ تا "۱۹ ’۵۷ ۳۵ در قسمت شمال غربی شهر تهران و در پایین دست حوضه آبریز رودخانه کن و وردیج واقع شده است. این منطقه در شمال با کوهستان البرز مرکزی, در شرق با حریم رودخانه کن, در جنوب با آزاد راه تهران– کرج و در غرب با محدوده جنگل های دست کاشت وردآورد محدود می گردد و با مناطق ۵ و ۲۱ شهرداری تهران همجوار است. به این ترتیب مرز شمالی منطقه ۲۲ شهرداری تهران تا منتهی الیه دامنه های جنوبی البرز تا ارتفاع ۱۸۰۰ متری توسعه یافته است. در محدوده منطقه ۲۲ بلندترین منطقه ارتفاعی از سطح دریا در خط مستقیم حوزه آبریز شمالی در ارتفاعات البرز و در شرق روستای کیگا با ارتفاع ۳۸۴۰ و پست ترین آن در خروجی پیکان شهر به ارتفاع ۱۲۲۰متر می باشد (شکل ۱).



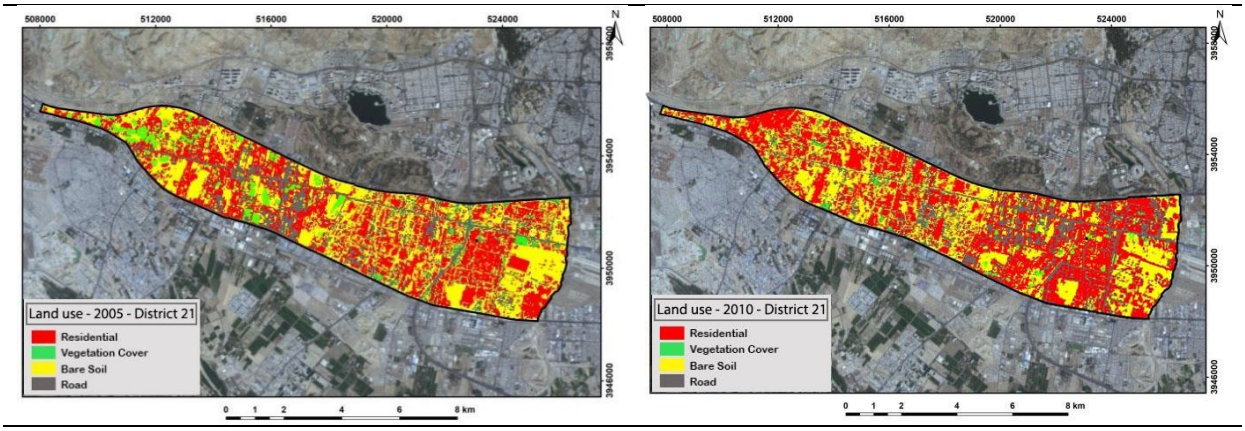
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه ۲۱ و ۲۲ شهر تهران
Fig. 1. Geographical location of Districts 21 and 22 of Tehran

روش تحقیق

روش تحقیق این پژوهش بر پایه استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، تحلیل‌های چندزمانه، طبقه‌بندی نظارت‌شده، ارزیابی صحت، تحلیل تغییرات و مدل‌سازی سناریوهای توسعه شهری استوار است. این روش‌شناسی با هدف ارائه یک تحلیل جامع از روند تغییرات کاربری اراضی مناطق ۲۱ و ۲۲ تهران طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ و پیش‌بینی توسعه آتی تا سال ۲۰۳۵ طراحی شده است. انتخاب این روش‌ها بر اساس مطالعات معتبر بین‌المللی و داخلی صورت گرفته است که نشان می‌دهند تصاویر ماهواره‌ای لندست و مدل مبتنی بر زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار از دقیق‌ترین ابزارها برای تحلیل و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی هستند (Jardón et al., 2025; میرزاخانی و همکاران، ۱۴۰۴).

پیش‌پردازش داده‌ها

در گام نخست، چهار تصویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ از پایگاه USGS دریافت شد. این تصاویر به دلیل قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، پوشش زمانی طولانی و دسترسی رایگان، یکی از معتبرترین منابع داده برای تحلیل تغییرات کاربری اراضی محسوب می‌شوند. تصاویر پس از دریافت، تحت مجموعه‌ای از پیش‌پردازش‌ها شامل تصحیح هندسی، تصحیح رادیومتریک و تصحیح اتمسفری قرار گرفتند تا اثرات ناشی از خطاهای سنجنده، شرایط جوی و خطاهای هندسی کاهش یابد. تصحیح اتمسفری با روش Dark Object Subtraction (DOS) صورت گرفت که یکی از روش‌های استاندارد در پردازش تصاویر لندست است (مرادی امام قیاسی و بنیاد، ۱۴۰۴).



طبقه‌بندی کاربری اراضی و ارزیابی صحت

طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر با استفاده از سه الگوریتم حداکثر تشابه (ML)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و حداقل فاصله از مرکز (MD) انجام شد. این سه الگوریتم به دلیل عملکرد متفاوت در تفکیک کلاس‌های کاربری اراضی انتخاب شدند تا امکان مقایسه دقت و انتخاب بهترین مدل فراهم شود. برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی، از ۳۰۰ نقطه نمونه به روش نمونه‌برداری تصادفی سیستماتیک استفاده شد (Jasim et al., 2024).

تحلیل تغییرات کاربری اراضی و پراکندگی فضایی

در این مرحله، تحلیل تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش مقایسه پس از طبقه‌بندی انجام شد. این روش به دلیل استقلال از شرایط جوی و سنجنده، دقیق‌ترین روش برای تحلیل تغییرات چندزمانه محسوب می‌شود (Onuegbu & Egbu, 2024). سپس، مساحت هر کلاس کاربری اراضی در چهار دوره زمانی استخراج شد و روند تغییرات در قالب نمودارهای تحلیلی بررسی گردید. برای تحلیل الگوی پراکندگی توسعه شهری، شاخص آنتروپی شانون محاسبه شد (Mhangara et al., 2024).

مدل‌سازی پیش‌بینی توسعه آتی

برای پیش‌بینی توسعه آتی، مدل مبتنی بر زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار به‌کار گرفته شد. این مدل با ترکیب زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار، امکان شبیه‌سازی تغییرات فضایی را فراهم می‌کند و یکی از معتبرترین مدل‌ها در مطالعات توسعه شهری است (Azabdaftari & Sunar, 2024). ابتدا، ماتریس انتقال مارکوف بین سال‌های ۲۰۰۵–۲۰۱۰ و ۲۰۱۰–۲۰۱۵ محاسبه شد و سپس مدل برای پیش‌بینی نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۳۵ اجرا گردید.

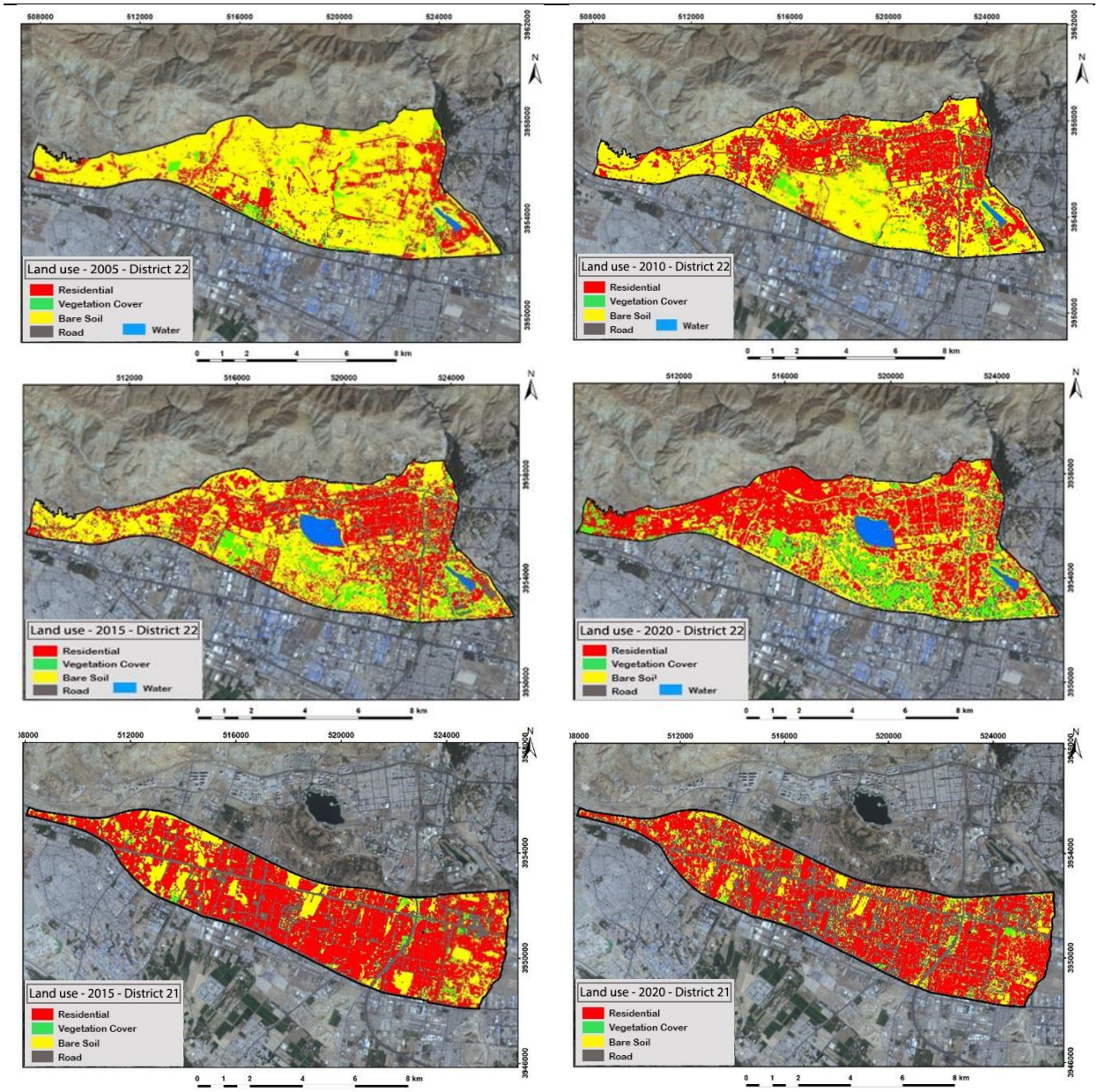
نتایج

این پژوهش با تکیه بر تحلیل تصاویر ماهواره‌ای لندست در چهار مقطع زمانی کلیدی (۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰) و با چشم‌انداز مدل‌سازی توسعه شهری تا سال ۲۰۳۵، یافته‌های خود را آشکار می‌سازد.

کاربری اراضی

تفکیک و طبقه‌بندی تصاویر چندزمانه لندست در منطقه ۲۱ چهار کلاس اصلی کاربری شامل مناطق مسکونی، اراضی بایر، پوشش‌های گیاهی و شبکه‌های ارتباطی را مشخص نمود. در منطقه ۲۲، به دلیل حضور پهنه آبی دریاچه چیتگر، پنج کلاس کاربری قابل تفکیک بود.

بررسی روند تغییرات طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ نشان داد که سهم نواحی مسکونی در هر دو منطقه افزایش یافته و همزمان از مساحت اراضی بایر کاسته شده است (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه های کاربری اراضی مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران در دوره های مختلف

Fig. 2. land use maps of Districts 21 and 22 of Tehran in different periods

صحت طبقه‌بندی

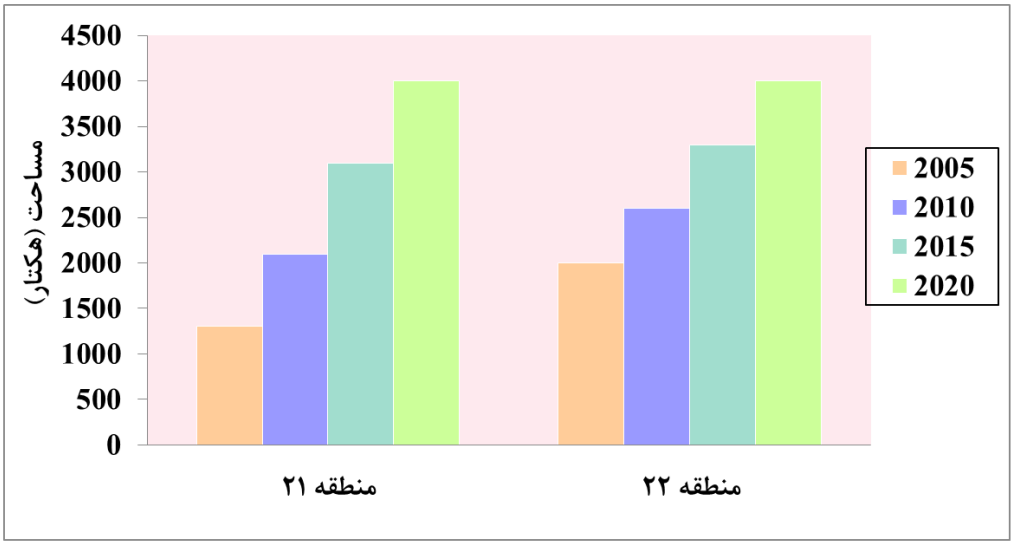
نتایج ارزیابی صحت نشان داد الگوریتم حداکثر احتمال در هر دو منطقه عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. در سال ۲۰۲۰، صحت کلی این الگوریتم در منطقه ۲۱ برابر با ۹۴/۱٪ و در منطقه ۲۲ معادل ۹۳/۸٪ به دست آمد. مقدار ضریب کاپا نیز به‌ترتیب ۰/۹۲۰ و ۰/۹۱۳ محاسبه شد که بیانگر توافق بسیار بالا میان داده‌های مرجع و نتایج طبقه‌بندی است (جدول ۱). الگوریتم شبکه عصبی دقتی متوسط اما قابل قبول ارائه داد، در حالی که الگوریتم حداقل فاصله پایین‌ترین میزان صحت را نشان داد.

جدول ۱. صحت طبقه‌بندی نهایی (حداکثر احتمال) در سال ۲۰۲۰

منطقه	صحت کلی (٪)	ضریب کاپا
۲۱	۹۴/۱	۰/۹۲۰
۲۲	۹۳/۸	۰/۹۱۳

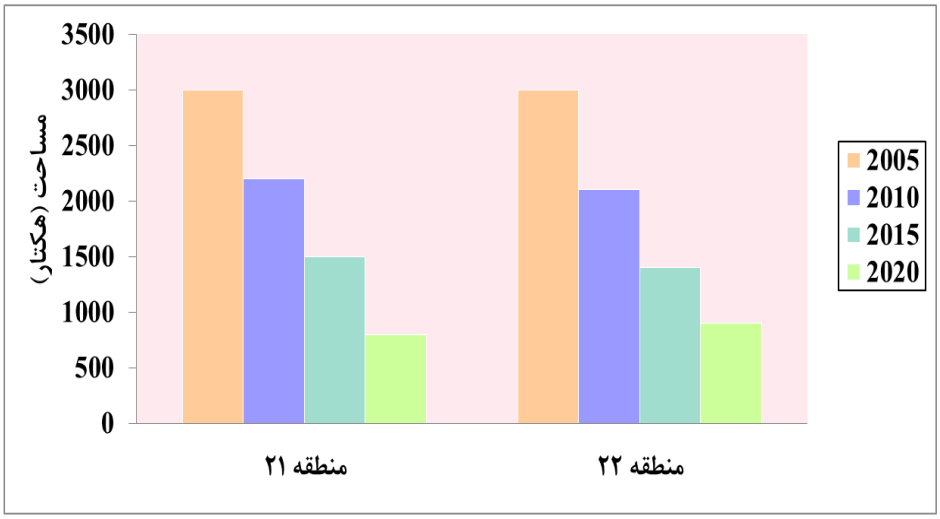
تغییرات کاربری اراضی

تحلیل کمی ماتریس انتقال کاربری اراضی، عمق و سرعت توسعه کالبدی در هر دو منطقه را به صورت ملموس آشکار می‌سازد. در منطقه ۲۱، رشد کاربری مسکونی چشمگیر بوده است؛ این سطح از حدود ۱۳۰۰ هکتار در سال ۲۰۰۵ به بیش از ۴۰۰۰ هکتار در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایشی فراتر از ۲۰۰ درصد است. همزمان، اراضی بایر تحت فشار توسعه، از بیش از ۳۰۰۰ هکتار به کمتر از ۱۰۰۰ هکتار کاهش یافته‌اند. در حوزه‌های غیرساختمانی، پوشش گیاهی تغییرات اندکی داشته و مساحت آن از ۳۰۰ هکتار به ۳۷۰ هکتار افزایش یافته است. توسعه زیرساخت‌ها نیز حائز اهمیت است؛ شبکه راه‌ها با رشدی بیش از دو برابر، مساحت خود را از ۱۵۰ هکتار به ۳۲۰ هکتار گسترش داده است. منطقه ۲۲ نیز روندی مشابه اما با شدت متفاوت در توسعه را تجربه کرده است. مناطق مسکونی تقریباً دو برابر شده و از حدود ۲۰۰۰ هکتار در سال ۲۰۰۵ به بیش از ۴۰۰۰ هکتار در سال ۲۰۲۰ رسیده‌اند. بخش اراضی بایر با کاهش شدید مواجه شده و از ۳۰۰۰ هکتار به ۹۰۰ هکتار تقلیل یافته است. در حوزه محیط زیست، پوشش گیاهی، در پیرامون دریاچه چیتگر، رشد قابل توجهی از ۴۰۰ هکتار به ۸۰۰ هکتار داشته است. شبکه راه‌ها نیز مانند منطقه ۲۱، توسعه زیادی داشته و از ۱۸۰ هکتار در ۲۰۰۵ به ۳۸۰ هکتار در ۲۰۲۰ رسیده است (شکل‌های ۳-۶).



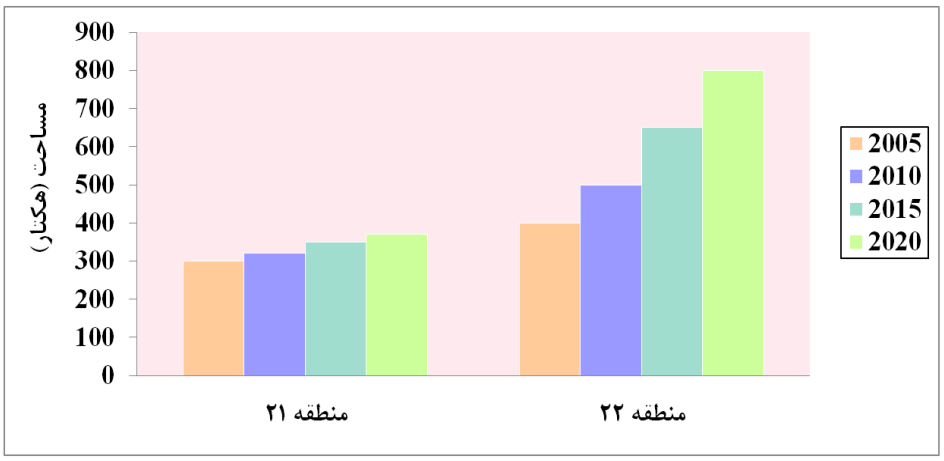
شکل ۳. نمودار روند تغییرات مساحت مناطق مسکونی (۲۰۰۵-۲۰۲۰)

Fig. 3. Plot of changes in the area of residential areas (2005 - 2020)



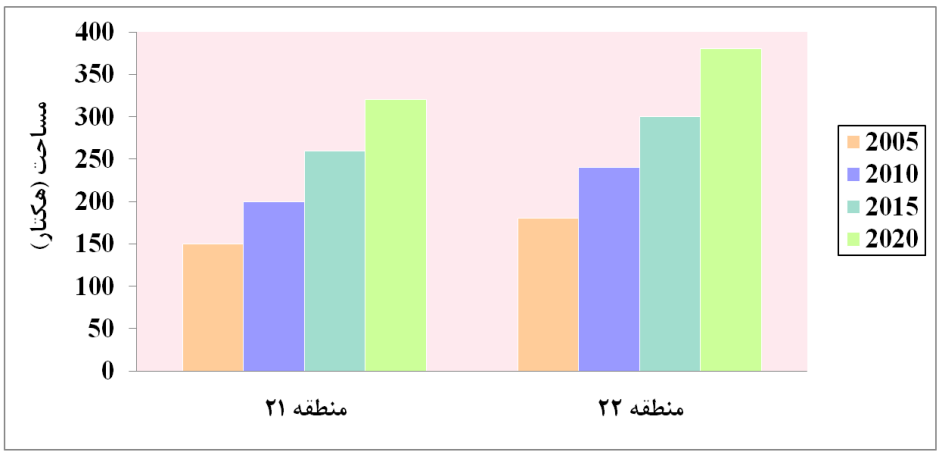
شکل ٤. نمودار روند تغییرات اراضی بایر(۲۰۰۵-۲۰۲۰)

Fig. 4. Plot of changes in the area of residential areas (2005 - 2020)



شکل ۵. نمودار روند تغییرات پوشش گیاهی (۲۰۰۵-۲۰۲۰)

Fig. 5. Plot of changes in the area of residential areas (2005 - 2020)



شکل ٦. نمودار روند تغییرات شبکه راه‌ها (۲۰۰۵-۲۰۲۰)

Fig. 6. Plot of changes in the area of residential areas (2005 - 2020)

روندهای تغییر کاربری اراضی

تحلیل همزمان چهار مؤلفه اصلی شامل تغییرات مساحت کاربری مسکونی، اراضی بایر، پوشش گیاهی و شبکه راه‌ها بیانگر تداوم روند توسعه شهری در هر دو منطقه طی بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ است. افزایش نواحی مسکونی در هر دو منطقه مشاهده شد؛ در منطقه ۲۱ این رشد بیشتر حالت متمرکز داشت، در حالی که در منطقه ۲۲ گسترش فضایی به صورت پراکنده‌تر و چندکانونی رخ داده استا. همزمان، کاهش مساحت اراضی بایر در هر دو منطقه ثبت شده است. شبکه راه‌ها نیز طی دوره مطالعه به صورت تدریجی توسعه یافته است. در خصوص پوشش گیاهی، منطقه ۲۱ تغییرات چشمگیری را تجربه نکرده و روندی نسبتاً ثابت داشته است، اما در منطقه ۲۲ افزایش مساحت پوشش گیاهی، به‌ویژه در پیرامون دریاچه چیتگر، مشاهده شد.

الگوی ساختار فضایی و توسعه شهری

برای سنجش الگوی گسترش فضایی از شاخص آنتروپی شانون استفاده شد. مقدار این شاخص در منطقه ۲۱ برابر با ۰/۲۷۲ و در منطقه ۲۲ معادل ۰/۴۶۷ محاسبه گردید که بیانگر تفاوت در میزان پراکندگی توسعه فضایی میان دو منطقه است (جدول ۲).

به منظور شبیه‌سازی روند آتی توسعه، از مدل ترکیبی سلول‌های خودکار–زنجیره مارکوف استفاده شد. این مدل با تحلیل داده‌های سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰، الگوی توسعه تا سال ۲۰۳۵ را پیش‌بینی نمود. در منطقه ۲۱ پیش‌بینی می‌شود بخش عمده اراضی بایر تا سال ۲۰۳۵ به مسکونی تبدیل شود. شاخص تمرکز در این منطقه ۰/۳۲۳ محاسبه شد. در منطقه ۲۲ شاخص تمرکز ۰/۷۳۰ به دست آمد. نتایج مدل نشان‌دهنده تداوم توسعه شهری در دو منطقه با الگوی فضایی متفاوت است (جدول ۳).

جدول ۲. شاخص آنتروپی توسعه شهری

منطقه	شاخص آنتروپی (H)	شاخص تمرکز (G)	نوع توسعه
۲۱	۰/۲۷۲	۰/۳۲۳	پراکنده
۲۲	۰/۴۶۷	۰/۷۳۰	متمرکز

جدول ۳. مقایسه نهایی توسعه مناطق ۲۱ و ۲۲

شاخص/ ویژگی	منطقه ۲۱	منطقه ۲۲	تفسیر مقایسه‌ای
شاخص آنتروپی	۰/۲۷۲	۰/۴۶۷	منطقه ۲۲ پراکندگی توسعه بیشتری دارد. منطقه ۲۱ متمرکزتر است.
شاخص تمرکز	۰/۳۲۳	۰/۷۳۰	منطقه ۲۲ دارای هسته‌های متراکم توسعه است. منطقه ۲۱ تمرکز فضایی کمتری دارد.
روند توسعه مسکونی (۲۰۲۰–۲۰۰۵)	رشد سریع و یکنواخت	رشد ترکیبی (پراکنده + هسته‌ای)	منطقه ۲۱ توسعه خطی و یکنواخت. منطقه ۲۲ توسعه پیچیده‌تر و چندکانونی.
روند کاهش اراضی بایر	کاهش شدید و نزدیک به اتمام	کاهش قابل توجه	منطقه ۲۱ تا سال ۲۰۳۵ تقریباً اشباع. منطقه ۲۲ هنوز ظرفیت توسعه دارد.
روند پوشش گیاهی	تقریباً ثابت	افزایش محسوس	منطقه۲۲ توسعه سبز برنامه‌ریزی‌شده دارد. منطقه۲۱ فاقد رشد سبز قابل توجه است.
روند توسعه راه‌ها	افزایش تدریجی	افزایش سریع‌تر و ساختاریافته	منطقه۲۲ زیرساخت‌محورتر توسعه یافته است.

بحث

تحلیل چندزمانه تحولات فضایی مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بیانگر دگرگونی عمیق و شتابان در ساختار کاربری اراضی این پهنه‌های راهبردی شهری است. روند افزایش مساحت کاربری مسکونی در کنار کاهش معنادار اراضی بایر، نشان‌دهنده شدت فشار توسعه شهری و اتکای مستقیم گسترش کالبدی به ذخایر زمین‌های آزاد در غرب تهران است. این وضعیت بازتابی از برهم‌کنش میان رشد جمعیت، افزایش تقاضای مسکن، توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل و اجرای پروژه‌های بزرگ‌مقیاس شهری در این بخش از شهر به شمار می‌آید. همسویی این یافته با نتایج پژوهش‌های بین‌المللی از جمله (Deng et al.,2015) که توسعه شهری را با کاهش پهنه‌های طبیعی مرتبط دانسته‌اند، نشان می‌دهد که الگوی مشاهده‌شده در این مناطق بخشی از روندی گسترده‌تر در شهرهای در حال رشد است.

با این حال، برخی مطالعات در شهرهایی با سیاست‌های مهار گسترش افقی، نتایجی متفاوت گزارش کرده‌اند. برای مثال، پژوهش (Long et al.,2013) درباره کلان‌شهر پکن نشان می‌دهد که اعمال سیاست‌های کنترلی توانسته روند تبدیل اراضی باز به کاربری‌های ساخته‌شده را تا حدی مهار کند. این تفاوت می‌تواند ناشی از چارچوب‌های سیاست‌گذاری سخت‌گیرانه‌تر و نظام کنترل زمین متمرکزتر در برخی کشورها باشد که در مقایسه با الگوی توسعه غرب تهران، شدت مداخله تنظیمی بیشتری دارند.

همزمانی افزایش کاربری مسکونی و کاهش اراضی بایر آشکار می‌سازد که اراضی بایر به عنوان منبع اصلی تأمین زمین برای توسعه عمل کرده‌اند. این وابستگی ساختاری به زمین‌های آزاد، بیانگر فقدان مکانیسم‌های بازدارنده مؤثر برای حفاظت از اراضی طبیعی و همچنین اولویت یافتن توسعه افقی در فرآیند برنامه‌ریزی شهری است. چنین الگویی نه‌تنها ماهیت رشد کالبدی را توضیح می‌دهد، بلکه نشان‌دهنده جهت‌گیری سیاستی ضمنی در بهره‌برداری از اراضی حاشیه‌ای به عنوان موتور توسعه شهری است.

در مقایسه، پژوهش (Seto et al.,2011) در سطح جهانی نشان می‌دهد که در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، توسعه شهری عمدتاً بر پایه مصرف اراضی پیرامونی و بایر شکل می‌گیرد؛ در حالی که در شهرهای اروپایی، روند بازتوسعه درونی سهم بیشتری از رشد را به خود اختصاص داده است (Kabisch & Hasse,2013). این تفاوت ساختاری بیانگر نقش سیاست‌های احیای بافت‌های درونی و محدودسازی توسعه افقی در کاهش وابستگی به زمین‌های بکر است؛ امری که در الگوی مشاهده‌شده در مناطق ۲۱ و ۲۲ کمتر به چشم می‌خورد.

در کنار این تحولات، توسعه تدریجی شبکه راه‌ها بعد مهم دیگری از سازمان فضایی رشد را آشکار می‌کند. تمرکز ساخت‌وسازها در امتداد محورهای دسترسی بیانگر آن است که زیرساخت‌های حمل‌ونقل نقشی فراتر از پشتیبانی خدماتی داشته و به عنوان عامل محرک و جهت‌دهنده توسعه کالبدی عمل کرده‌اند. شکل‌گیری الگوی شبکه‌محور و خطی توسعه، تأییدکننده نقش ساختاری شبکه‌های ارتباطی در تعیین جهت و دامنه گسترش شهری است؛ به‌گونه‌ای که مسیرهای ارتباطی جدید عملاً به کانون‌های جذب سرمایه‌گذاری ساختمانی تبدیل شده‌اند. این یافته با نتایج پژوهش (Wan et al.,2024) در چین هم‌خوانی دارد که نشان داد توسعه بزرگراه‌ها الگوی رشد خطی و پراکنده شهری را تقویت می‌کند. با این حال، در برخی شهرهای اروپایی مانند کپنهاگ، توسعه مبتنی بر حمل‌ونقل عمومی منجر به تمرکزگرایی بیشتر و کاهش پراکندگی فضایی شده است (Knowles, 2012). بنابراین، نوع زیرساخت حمل‌ونقل (بزرگراه‌محور در مقابل حمل‌ونقل عمومی‌محور) می‌تواند به نتایج فضایی متفاوتی منجر شود؛ عاملی که در تحلیل توسعه غرب تهران نیز قابل توجه است.

یکی از ابعاد تحلیلی مهم این پژوهش، بررسی تفاوت‌های بنیادی در الگوهای پراکندگی فضایی دو منطقه بر اساس شاخص آنتروپی شانون است. مقدار پایین‌تر آنتروپی در منطقه ۲۱ (۰/۲۷۲) نشان می‌دهد که رشد کالبدی در این منطقه بیشتر در قالب تمرکز در خوشه‌های مشخص و نواحی از پیش توسعه‌یافته رخ داده و پراکندگی افقی محدودتری داشته است. در مقابل، مقدار بالاتر آنتروپی در منطقه ۲۲ (۰/۴۶۷) حاکی از پراکندگی فضایی بیشتر و گسترش توسعه در بخش‌های متنوع‌تری از سطح منطقه

است. این تفاوت نه‌تنها بیانگر تمایز در شدت گسترش افقی است، بلکه نشان‌دهنده تفاوت در منطق فضایی توسعه میان دو منطقه نیز می‌باشد. برای مثال، پژوهشی در ووهان چین نشان داده است که توسعه شبکه راه‌ها و زیرساخت‌های حمل‌ونقل به تشدید توسعه پراکنده شهری منجر شده است (Zeng et al., 2015).

استفاده از شاخص آنتروپی برای سنجش پراکندگی، پیش‌تر در مطالعاتی نظیر (Yeh & Li, 2001) در هنگ‌کنگ و (Bhatta et al., 2010) در کلکته به کار رفته است. نتایج آن مطالعات نشان می‌دهد که مقادیر بالاتر آنتروپی با رشد پراکنده‌تر و مصرف بیشتر زمین همراه است. با این حال، برخی پژوهش‌ها مانند (Tsai, 2005) استدلال می‌کنند که اتکای صرف به آنتروپی ممکن است پیچیدگی چندبعدی پراکندگی شهری را به‌طور کامل منعکس نکند و ترکیب آن با شاخص‌های تمرکز یا فشردگی ضروری است؛ موضوعی که در این پژوهش با استفاده همزمان از شاخص تمرکز (۰/۷۳۰ در منطقه ۲۲) تا حدی مورد توجه قرار گرفته است.

تبیین این تمایز را می‌توان در ویژگی‌های کالبدی و مدیریتی هر منطقه جست‌وجو کرد. منطقه ۲۱ به دلیل محدودیت نسبی اراضی مستعد توسعه و همجواری با پهنه‌های صنعتی و زیرساختی، به سمت تراکم و تمرکز بیشتر حرکت کرده است. در مقابل، منطقه ۲۲ با برخورداری از اراضی وسیع‌تر، فضاهای سبز برنامه‌ریزی‌شده نظیر پهنه آبی چیتگر و اجرای پروژه‌های هدایت‌شده شهری، بستر مناسبی برای گسترش افقی و شکل‌گیری کانون‌های جدید توسعه فراهم آورده است. این تفسیر با یافته‌های (عزیزی و دهقانی، ۱۳۹۴). درباره عوامل موثر بر تغییرات کاربری اراضی در توسعه کلانشهرها هم‌راستا بوده و نشان می‌دهد که تفاوت در سیاست‌های توسعه و ظرفیت‌های فضایی، به الگوهای متمایز رشد انجامیده است.

در مطالعات تطبیقی درباره استانبول (Terzi & Kaya, 2009) نیز نشان داده شده که وجود پروژه‌های بزرگ‌مقیاس و پهنه‌های باز برنامه‌ریزی‌شده می‌تواند به شکل‌گیری کانون‌های جدید رشد در حاشیه شهر منجر شود؛ الگویی که با تجربه منطقه ۲۲ قابل مقایسه است. در مقابل، پژوهش (Angel et al., 2011) نشان می‌دهد که در برخی کلان‌شهرها، حتی با وجود زمین‌های وسیع پیرامونی، محدودیت‌های حقوقی و هزینه‌های زیرساختی موجب تمرکزگرایی بیشتر می‌شود؛ امری که در منطقه ۲۱ بیشتر مشاهده می‌شود.

تحلیل دقیق‌تر روندها نشان می‌دهد که شدت مسکونی‌شدن در منطقه ۲۲ چشمگیرتر بوده و کاهش اراضی بایر در این منطقه ابعاد گسترده‌تری داشته است. این تحول می‌تواند پیامدهای محیط‌زیستی قابل توجهی به همراه داشته باشد، زیرا تبدیل اراضی باز به سطوح ساخته‌شده، موجب تغییر در چرخه هیدرولوژیک، کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب سطحی می‌شود. نتایج (نصیری و همکاران، ۱۴۰۴)، که تغییرات الگوهای رواناب سطحی ناشی از توسعه غرب تهران را تأیید کرده‌اند، مؤید این نگرانی است و نشان می‌دهد که روند کالبدی مشاهده‌شده دارای بازتاب‌های بوم شناختی ملموس است.

مطالعات (Brueckner, 2000) نشان می‌دهد که توسعه افقی سریع معمولاً با افزایش هزینه‌های زیرساختی و پیامدهای محیط زیستی همراه است. همچنین، پژوهش (Wang & Wang, 2025) در شهرهای چین نشان داد که تبدیل اراضی باز به سطوح ساخته‌شده ارتباط مستقیمی با افزایش رواناب سطحی و تشدید سیلاب شهری دارد. این یافته‌ها از منظر تطبیقی، پیامدهای محیط‌زیستی احتمالی روند مشاهده‌شده در منطقه ۲۲ را تقویت می‌کند. در مقابل، برخی مطالعات در شهرهایی با زیرساخت سبز گسترده (مانند سنگاپور) نشان داده‌اند که ادغام همزمان توسعه کالبدی و شبکه‌های سبز می‌تواند اثرات منفی هیدرولوژیکی را تعدیل کند (Tan et al., 2013)، که نشان‌دهنده نقش سیاست‌های مکمل محیط‌زیستی در کاهش پیامدهای منفی توسعه است.

بررسی نتایج مدل ترکیبی سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف، تداوم همین الگوهای فضایی را در افق ۲۰۳۵ نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که در منطقه ۲۱، توسعه آتی عمدتاً در قالب تکمیل و تراکم‌بخشی در پهنه‌های موجود ادامه خواهد یافت و ظرفیت اراضی بایر به میزان قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت. در منطقه ۲۲، توسعه پیش‌بینی‌شده گرچه نسبتاً

کنترل‌شده‌تر است، اما تمرکز آن بر بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی خواهد بود. ترکیب آنتروپی بالا (۰/۴۶۷) و شاخص تمرکز بالا (۰/۷۳۰) در این منطقه نشان‌دهنده نوعی الگوی دوگانه است؛ از یک‌سو پراکندگی کلی در سطح منطقه و از سوی دیگر تمرکز موضعی در پیرامون دریاچه چیتگر و محورهای اصلی دسترسی. این وضعیت بیانگر شکل‌گیری کانون‌های جدید شهری در کنار تداوم پراکنش فضایی است.

مدل‌های زنجیره مارکوف پیش‌تر در مطالعاتی نظیر (ارسنجانی و همکاران، ۱۳۹۲)، برای پیش‌بینی رشد شهری تهران و (Wan et al.,2024) در چین به کار رفته‌اند. نتایج آن پژوهش‌ها نیز نشان داد که در صورت تداوم روندهای تاریخی، الگوهای پراکندگی تقویت می‌شوند. با این حال، برخی پژوهشگران مانند (Batty, 2007) تأکید می‌کنند که مدل‌های مبتنی بر روند گذشته در برابر تغییرات ساختاری ناگهانی (نظیر اصلاحات سیاست زمین یا بحران‌های اقتصادی) قدرت پیش‌بینی محدودی دارند؛ موضوعی که در محدودیت‌های این پژوهش نیز مورد اشاره قرار گرفته است.

در مجموع، همگرایی چهار روند اصلی شامل افزایش مساحت مسکونی، کاهش اراضی بایر، تغییرات پوشش گیاهی و گسترش شبکه راه‌ها، تصویری از توسعه‌ای شتابان، زیرساخت‌محور و متکی بر مصرف زمین‌های آزاد را ترسیم می‌کند. تفاوت در شدت پراکندگی و پایداری پوشش گیاهی میان دو منطقه نیز بازتابی از تفاوت در ظرفیت‌های فضایی و نحوه مداخله‌های مدیریتی است و نشان می‌دهد که فرآیند توسعه در این دو پهنه از منطق فضایی یکسانی تبعیت نکرده است.

از منظر روش‌شناسی، سطوح بالای صحت کلی و ضریب کاپا نشان می‌دهد که طبقه‌بندی مبتنی بر الگوریتم حداکثر احتمال مبنای قابل اعتمادی برای تحلیل تغییرات فراهم کرده است. اتکای تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌ها به نقشه‌هایی با صحت بالا، اعتبار نتایج فضایی به‌دست‌آمده را تقویت می‌کند و امکان تفسیر مطمئن‌تر روندهای مشاهده‌شده را فراهم می‌آورد.

مقایسه با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که صحت های گزارش‌شده در این پژوهش در محدوده قابل قبول مطالعات سنجش‌ازدور شهری قرار دارد (Foody, 2002). با این حال، پژوهش (Maxwell et al., 2018) نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر جنگل تصادفی در بسیاری از موارد صحت بالاتری نسبت به طبقه‌بندی حداکثر احتمال فراهم می‌کند؛ موضوعی که می‌تواند مسیر توسعه روش‌شناختی آینده را مشخص سازد.

نوآوری این مطالعه در ارائه چارچوبی یکپارچه برای تحلیل تحولات فضایی طی یک بازه ۱۵ ساله با استفاده از داده‌های چندزمانه لندست نهفته است. ترکیب روش‌های طبقه‌بندی پیشرفته، ارزیابی صحت، سنجش پراکندگی فضایی از طریق آنتروپی و مدل‌سازی پیش‌بین سلول‌های خودکار–زنجیره مارکوف، امکان تحلیل هم‌زمان گذشته، حال و آینده توسعه شهری را فراهم ساخته است. این رویکرد تحلیلی جامع، زمینه‌ای کمّی برای درک تفاوت‌های ساختاری توسعه در دو منطقه و بررسی سناریوهای احتمالی آینده فراهم می‌کند. با وجود این، محدودیت‌هایی نیز باید مدنظر قرار گیرد. استفاده از تصاویر لندست با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر امکان تفکیک کاربری‌های جزئی را محدود کرده و ممکن است برخی جزئیات کالبدی در فرآیند طبقه‌بندی بازتاب نیافته باشد. افزون بر این، مدل سلول‌های خودکار–زنجیره مارکوف مبتنی بر تداوم روندهای تاریخی است و در برابر تغییرات ناگهانی ناشی از سیاست‌های جدید یا شوک‌های اقتصادی–اجتماعی حساسیت محدودی دارد. همچنین، ارزیابی دقت طبقه‌بندی صرفاً بر داده‌های مرجع سنجش‌ازدوری متکی بوده و اعتبارسنجی میدانی مستقیم در این مطالعه انجام نشده است.

بر این اساس، پژوهش‌های آتی می‌توانند با بهره‌گیری از تصاویر با قدرت تفکیک بالاتر مانند Sentinel-2 یا داده‌های ماهواره‌ای تجاری، دقت فضایی تحلیل‌ها را افزایش دهند. همچنین، ادغام مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف با مدل‌هایی نظیر SLEUTH، ANN–CA یا چارچوب‌های مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند توان پیش‌بینی را ارتقاء بخشد. استفاده از داده‌های مکمل همچون نقشه‌های طرح تفصیلی و اطلاعات جمعیت نیز امکان تحلیل عمیق‌تر عوامل محرک تغییرات را فراهم می‌سازد. افزون بر این، بررسی اثرات توسعه فضایی بر شاخص‌هایی نظیر دمای سطح زمین، کیفیت هوا و مدیریت ریسک سیلاب می‌تواند پیوند میان تحلیل‌های کالبدی و ارزیابی پایداری محیط‌زیست را تقویت کند.

نتیجه‌گیری

تحلیل چندزمانه تحولات فضایی مناطق ۲۱ و ۲۲ شهر تهران طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ نشان داد که توسعه شهری در هر دو منطقه با شتاب قابل‌توجهی عمدتاً از طریق تبدیل اراضی بایر به کاربری مسکونی تحقق یافته است. با این حال ساختار فضایی این رشد در دو منطقه ماهیتی متفاوت داشته است. منطقه ۲۱ الگویی متمرکزتر و متراکم‌تر را تجربه کرده و به سمت اشباع کالبدی حرکت کرده است، در حالی که منطقه ۲۲ توسعه‌ای پراکنده‌تر و چندکانونی را نشان می‌دهد که همچنان ظرفیت گسترش فضایی در آن وجود دارد. مقادیر متفاوت آنتروپی شانون بیانگر تمایز بنیادین در سازمان فضایی توسعه این دو پهنه شهری است؛ به‌گونه‌ای که منطقه ۲۱ به دلیل محدودیت اراضی مستعد توسعه و تمرکز ساخت‌وسازها به مرحله تراکم بالا نزدیک شده، اما منطقه ۲۲ به واسطه وجود فضاهای باز گسترده و پروژه‌های شهری هدایت‌شده، الگویی بازتر و پراکنش‌پذیرتر را تجربه کرده است.

پیش‌بینی‌های مدل سلول‌های خودکار–زنجیره مارکوف تا افق ۲۰۳۵ نشان می‌دهد که روندهای گذشته در صورت تداوم، منطقه ۲۱ را به سمت تکمیل ظرفیت کالبدی و کاهش شدید اراضی بایر سوق خواهد داد، در حالی که توسعه در منطقه ۲۲ بیشتر در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی متمرکز خواهد شد و همچنان امکان گسترش فضایی در آن باقی می‌ماند. این وضعیت بیانگر آن است که سیاست‌های توسعه‌ای یکسان برای این دو منطقه کارآمد نخواهد بود و هر یک نیازمند رویکرد مدیریتی متمایز و متناسب با ساختار فضایی خود هستند. در منطقه ۲۱، تمرکز سیاستی باید بر نوسازی، بهسازی بافت موجود، ارتقاء زیرساخت‌ها و افزایش کیفیت محیط شهری استوار باشد، زیرا ظرفیت توسعه افقی آن محدود شده است. در مقابل، در منطقه ۲۲ ضروری است سیاست‌های کنترل پراکنش و حفاظت اراضی طبیعی با جدیت بیشتری اعمال شود تا از گسترش نامتوازن و پیامدهای محیط زیستی ناشی از آن جلوگیری شود.

کاهش چشمگیر اراضی بایر در هر دو منطقه هشداری جدی در زمینه پایداری محیط‌زیست به شمار می‌آید، زیرا تداوم این روند می‌تواند منجر به افزایش رواناب سطحی، کاهش نفوذپذیری خاک، تشدید خطر سیلاب و تغییر در تعادل بوم شناختی شود. از این‌رو، برنامه‌ریزی آتی توسعه شهری در این مناطق باید مبتنی بر رویکردی یکپارچه و مبتنی بر داده‌های فضایی دقیق باشد که ضمن پاسخگویی به تقاضای مسکن و توسعه زیرساختی، حفاظت از پهنه‌های طبیعی و مدیریت ریسک‌های محیط‌زیست را نیز تضمین کند. در مجموع، این پژوهش با ارائه چارچوبی تحلیلی مبتنی بر داده‌های چندزمانه و مدل‌سازی پیش‌بین، نشان می‌دهد که درک تفاوت‌های ساختاری در الگوی توسعه مناطق شهری می‌تواند مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های هدفمند، کنترل پراکنش شهری و هدایت توسعه به سوی پایداری بلندمدت فراهم آورد.

منابع

Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A., & Potere, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Progress in planning*, 75(2), 53-107. https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001

Arsanjani, J. J., Helbich, M., & de Noronha Vaz, E. (2013). Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran. *Cities*, 32, 33-42. https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.01.005

Azabdaftari, A., & Sunar, F. (2024). Predicting urban tomorrow: CA-Markov modeling and district evolution. *Earth Science Informatics*, 17(4), 3215-3232. https://doi.org/10.1007/-s12145-024-01340-4

Azizi, M. M., & Dehghani, M. D. (2015). Assessment of Influencing Factors on Land Use Changes in UrbanExpansion of Metropolis, Case Study: District 22 of Municipality of Tehran. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 7(13), 343-359.

Batty, M. (2007). Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. *The MIT press*. https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2007.00523_-1.x

Bhatta, B., Saraswati, S., & Bandyopadhyay, D. (2010). Urban sprawl measurement from remote sensing data. *Applied geography*, 30(4), 731-740. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.-2010.02.002

Brueckner, J. K. (2000). Urban sprawl: Diagnosis and remedies. *International regional science review*, 23(2), 160-171. https://doi.org/10.1177/016001700761012710

Deng, X., Huang, J., Rozelle, S., Zhang, J., & Li, Z. (2015). Impact of urbanization on cultivated land changes in China. *Land use policy*, 45, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.-landusepol.2015.01.007

Fasihi, H., Karami, T., & Kazemi, S. (2021). Analysis of Urban Growth Pattern and its Compatibility with Smart Growth Criteria Case Study: District 1 of Karaj Municipality. *Spatial Planning*, 11(4), 47-66.

Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment*, 80(1), 185-201. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00295-4

Jardón, E., Romero, M., Marcial-Romero, J. R., & Zavala, A. (2025). Urban expansion modeling with a semi automated spatial Markov chain framework. *Discover Cities*, 2(1), 121. https://doi.org/10.1007/s44327-025-00162-3

Jasim, B. S., Jasim, O. Z., & AL-Hameedawi, A. N. (2024). Evaluating land use land cover classification based on machine learning algorithms. *Engineering and Technology Journal*, 42(5), 557-568. https://doi.org/10.30684/etj.2024.144585.1638

Kabisch, N., & Haase, D. (2013). Green spaces of European cities revisited for 1990–2006. *Landscape and urban planning*, 110, 113-122. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.-2012.10.017

Khayat, G., Mavromoustakis, C. X., Mastorakis, G., Bourdena, A., & Markakis, E. (2025). On the characteristics of next generation for redundant clustered reliable data transmission scheme in critical IoT infrastructures. *Discover Internet of Things*, 5(1), 62. https://doi.org/10.1007/s43926-025-00160-2

Knowles, R. D. (2012). Transit oriented development in Copenhagen, Denmark: from the finger plan to restad. *Journal of transport geography*, 22, 251-261. https://doi.org/10.1016/-j.jtrangeo.2012.01.009

Long, Y., Han, H., Lai, S. K., & Mao, Q. (2013). Urban growth boundaries of the Beijing Metropolitan Area: Comparison of simulation and artwork. *Cities*, 31, 337-348.

Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International journal of remote sensing*, 39(9), 2784-2817. https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343

Mhangara, P., Gidey, E., & Manjoo, R. (2024). Analysis of urban sprawl dynamics using machine learning, CA-Markov chain, and the Shannon entropy model: a case study in Mbombela City, South Africa. *Environmental Systems Research*, 13(1), 17. https://doi.org/-10.1186/s40068-024-00348-5

Mirzakhani, A., Behzadfar, M., & Azizi Habashi, S. (2025). Simulating urban expansion dynamics in Tehran through satellite imagery and cellular automata Markov chain modelling. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(2), 145. https://doi.org/10.1007/-s40808-025-02325-y

Moradi Emam Gheysi, I., & Bonyad, A. E. (2024). Investigating the effect of different atmospheric correction methods in forest biomass estimation using Vegetation indices. *Forest Research and Development*, 10(2), 205-222.

Nasiri, A., Salimi, E., Delfan Azari, M., Yazdi, J., & Shahsawandi, M. (2025). Urban Flood Zoning Using an Integrated Hydrological-Hydraulic Watershed Modeling Approach, Case Study: Districts 21 and 22 of Tehran. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, 14(4), 392-405. https://doi.org/10.32598/dmkp.14.4.882.1

Onuegbu, F. E., & Egbu, A. U. (2024). Employing post classification comparison to detect land use cover change patterns and quantify conversions in Abakaliki LGA Nigeria from 2000 to 2022. *Scientific Reports*, 14(1), 9384. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59056-w

Pijanowski, B. C., Brown, D. G., Shellito, B. A., & Manik, G. A. (2002). Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a land transformation model. *Computers, environment and urban systems*, 26(6), 553-575. https://doi.org/10.1016/s0198-9715(01)-00015-1

Rousta, Z., Monavari, S. M., Darvishi, M., Falahati, F., & Morovati, M. (2013). Evaluating Trend of Physical Urban Expansion of Shiraz City and physiographic conditions effect on land use changes. *Geography and Environmental Planning*, 24(1), 183-200.

Ruben, Gebdang B., et al. "Analysis and projection of land-use/land-cover dynamics through scenario-based simulations using the CA-Markov model: A case study in guanting reservoir basin, China." *Sustainability*, 12.9 (2020): 3747. https://doi.org/10.3390/su12093747

Sani, N. A., & Moradi, S. (2025). *Comparison and Evaluation of Different Machine Learning Algorithms in Land Use/Cover Classification Using Satellite Data (Case Study: South of Lake Urmia)*.

Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PloS one*, 6(8), e23777. https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.10.013

Sirat, M. K., & Masoomeh, G. (2025). Investigating Land Use Changes in Herat City Using Satellite Images during 2015 and 2022. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 17(2), 21-39.

Tan, P. Y., Wang, J., & Sia, A. (2013). Perspectives on five decades of the urban greening of Singapore. *Cities*, 32, 24-32. https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.02.001

Terzi, F., & Bolen, F. (2009). Urban sprawl measurement of Istanbul. *European Planning Studies*, 17(10), 1559-1570. https://doi.org/10.1080/09654310903141797

Tsai, Y. H. (2005). Quantifying urban form: compactness versus' sprawl'. *Urban studies*, 42(1), 141-161. https://doi.org/10.1080/0042098042000309748

Wan, J., Xie, Q., & Fan, X. (2024). The impact of transportation and information infrastructure on urban productivity: Evidence from 256 cities in China. *Structural Change and Economic Dynamics*, 68, 384-392. https://doi.org/10.1016/j.strueco.2023.11.008

Wang, T., & Wang, Y. (2025). Spatial–Temporal Response of Urban Flooding to Land Use Change: A Case Study of Wuhan's Main Urban Area. *Hydrology*, 13(1), 3. https://doi.org/10.3390/hydrology13010003

Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., ... & Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113195.

Xu, T., Li, E., Samat, A., Wang, S., & Yu, M. (2025). Evaluation of urban flood-prone

regions in Chinese cities based on potential flood hazard assessment model. *Natural Hazards*, 121(16), 18743-18763. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07536-1

Yeh, A. G. O., & Li, X. (2001). *Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy*. Photogrammetric engineering and remote sensing.

Zeng, C., Liu, Y., Stein, A., & Jiao, L. (2015). Characterization and spatial modeling of urban sprawl in the Wuhan Metropolitan Area, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 10-24. https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.06.012

Ziari, K., & Hamidy Kay, S. (2025). Analysis of Effective Factors on Urban Land Use Changes (Case Study: Urmia city). *Journal of Geography and Planning*, 29(92), 355-333.