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

Analysis of Shiraz Urban Expansion Using LEI Index and Landscape Metrics (1999-2025) with RS & GIS with Validation Based on ML Machine Learning

Sajjad Tabe Bardbar[1]✉, **Mohammad Ebrahim Afifi**[2], **Abdolrasoul Ghanbari**[3]

1. Corresponding Author, PhD in Geography and Urban Planning, Larestan Branch, Islamic Azad University, Larestan, Iran. E-mail: Rsgis66@yahoo.com
2. Associate Professor, Department of Geography, Larestan Branch, Islamic Azad University, Larestan, Iran. E-mail: afifi.ebrahim6353@gmail.com
3. Assistant Professor, Department of Geography, Larestan Branch, Islamic Azad University, Larestan, Iran. E-mail: dr.ghanbari121@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 6 December 2025
Revised: 27 May 2026
Accepted: 23 June 2026
Published: 22 August 2026

Keywords:
Urban expansion,
Metric map,
ML,
LEI,
LM.

ABSTRACT

Objective: The rapid expansion of cities in Iran, particularly in metropolitan areas such as Shiraz, has led to significant impacts on land use, the environment, and spatial planning. This research aims to analyze the physical growth of Shiraz between 1999 and 2025 by employing the Landscape Expansion Index (LEI) alongside Landscape Metrics (CA, ND, NT, LPI, ED, LSI). Land use data were derived from multi-temporal Landsat imagery and processed within a GIS environment using remote sensing techniques.

Methods: The study utilized quantitative spatial analysis techniques to measure urban expansion and land use changes over a 26-year period. Multi-temporal Landsat images (path/row covering Shiraz) were pre-processed for geometric and radiometric corrections before classification. Classification was conducted using supervised methods enhanced by Machine Learning (ML) algorithms, specifically Random Forest and Support Vector Machine (SVM), to increase accuracy in distinguishing urban, agricultural, and natural land classes. Landscape Metrics were computed for each time step to quantify patch size, shape, edge density, and largest patch dominance. LEI calculations identified three growth modes: Edge-Expansion, Infilling, and Outlying. The accuracy of classifications was validated using a Confusion Matrix, yielding overall accuracy and Kappa values.

Results: The LEI analysis revealed Edge-Expansion as the dominant growth type, covering approximately 138.374 km² (over 99% of expansion). Infilling accounted for 0.1667 km², and Outlying 0.1005 km², mainly in peripheral zones. Urban land area expanded from about 72.5 million m² in 1999 to more than 146 million m² in 2025. Agricultural land decreased from 79 million m² to under 4 million m², while natural areas dropped from 41 million m² to around 11 million m². The LPI reached 100%, indicating complete urban patch integration. ML-based classification achieved an overall accuracy > 90% and Kappa ≈ 0.85, validating the reliability of LEI outputs.

Conclusions: This spatial-temporal analysis clearly demonstrates Shiraz's rapid horizontal expansion, driven predominantly by edge-oriented development. Such growth patterns have significantly reduced agricultural and natural land, posing long-term challenges to sustainability and food security. The findings underscore the necessity for smart land management, targeted policies to limit edge-expansion, and the promotion of infill development and urban regeneration in vacant or deteriorated zones.

Cite this article: Tabe Bardbar, S., Afifi, M.E., & Ghanbari, A.R. (2026). Analysis of Shiraz Urban Expansion Using LEI Index and Landscape Metrics (1999-2025) with RS & GIS with Validation Based on ML Machine Learning. *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 6 (20), 41-56. http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.69581.1149

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.69581.1149

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

Introduction

The methodology of any research constitutes the main foundation of its scientific validity and determines how to achieve the research objectives. In this study, considering the nature of the subject, namely the study of land use changes and the analysis of urban expansion in Shiraz, a quantitative approach based on spatial analysis has been used. In order to measure spatial patterns and changes in the landscape, land use data were extracted in two time periods of 1999 and 1404.

To analyze these changes, a set of landscape metrics including: CA, ND&NT, LPI, ED, LSI were used. The calculation of these metrics allowed for the quantitative study of the horizontal expansion trend, the integration of urban spots, and the impact of development on work.

The physical expansion of cities in recent decades has brought with it numerous challenges in land management, environment and spatial planning, and the Shiraz metropolis, as one of the main population and economic centers of the country, has experienced significant growth during the period from 1999 to 2025. Examining the pattern of this growth can play an important role in policy-making and sustainable urban development.

Methodology

Urban growth and expansion is a complex and multidimensional phenomenon that cannot be analyzed simply by examining quantitative changes in land use area. For this reason, in modern studies of urban geography and land planning, the use of landscape metrics has become common as an efficient tool for analyzing the structure of land use change patterns (Forman, 1995; Bhatta, 2010). These metrics allow for the measurement of characteristics such as size, number, dispersion, complexity, and integration of land use patches and can provide a more accurate picture of the spatial change process of cities. In the present study, the aim is to analyze land use changes in Shiraz between 1999 and 1404 using quantitative landscape indices including CA, ND, NT, ED, LPI, and LSI. In addition to revealing the trend of horizontal expansion and the degree of integration of the city, the use of these metrics also allows for the assessment of the consequences of urban development on surrounding agricultural and natural lands.

Results and discussion

The urban green space as an animate part of the urban environment complements the inanimate part of the city, i.e. the physical structure of the city. Today, sociologists, psychologists and doctors believe that in addition to ensuring the health of the atmosphere and environment of residential places, they are responsible for a positive role in the health of citizens, the most important of which is its effects on the lives of citizens who spend hours every day to spend They spend their free time in such spaces. The role of urban green spaces in creating green cities and providing social services is quite clear. Therefore, urban green spaces are the only areas that provide the possibility of creating peace, reducing stress, comforting city dwellers and attracting tourists for leisure time, and this need to pay attention to It increases these areas and makes it one of the key elements in tourism development and sustainable urban development. Most of the people feel happy to be in nature and this shows that these spaces play an important role in improving the quality of human life. and also lack of basic planning And in terms of the status of urban green space in order to attract tourists and tourism, the development of sustainable development is not very desirable, although the high capacity and potential of this city requires that using the weaknesses to create a favorable situation in this city.

Conclusion

It can be concluded that the view that northern areas such as Noor have good urban green spaces due to having forested areas such as Changli Noor Park, agricultural lands and gardens next to the parks, and concluded that urban green spaces should attract tourists based on development. The environment was achieved only with proper planning, principles and the use of other city capacities such as reducing the volume of waste production, increasing urban parks in the city, increasing historical gardens and gardens for tourism, creating roofs and green walls, etc.

References

Alimohammadi, Shayan; Mosivand, Ahmad; Jafari, Abbas. (2010). Prediction of land use and land cover changes using satellite imagery and the Markov chain model. *Modares Human Sciences Quarterly*, 14(3), 117–130. (in Persian)

Akbari, Ebrahim. (2018). GIS-based modeling of urban quality of life: A case study of Districts 9 and 11 of Mashhad. *Master's thesis, University of Tabriz, Iran*. (in Persian)

Fathizad, Nohehgar; Faramerzi, Tazeh; Hasan, Ahmad; Marzban, Mahdi. (2013). Investigation of land use changes based on landscape metrics analysis using remote sensing and GIS in the arid and semi-arid region of Dehloran. *Scientific Journal of Land Use Planning*, 5(1), 79–99. (in Persian)

Herold, M., Couclelis, H., & Clarke, K.C.(2005). The role spatial metrics in the analysis and modeling of urban and Land use change. *Computers, Enviroonment and Urban Systems*, 29(4), 369-399.

McGarigal, K., Cushman, S. A., & Ene, E.(2012). Fragstates v4: Spatial pattern analysis program for categorical and continuse maps. *University of Massachusetts*.

Li, J., Fang, W., Wang, T., Qureshi, S., Alatalo, J. M., & Bai, Y. (2017). Correlations between socioeconomic drivers and indicators of urban expansion: Evidence from the heavily urbanised Shanghai metropolitan area China Sustainability (*Switzerland*), 9(7). https://doi.org/10.3390/su9071199

Heidarinejad, N. (2017). The effects of urban expansion on spatial and socioeconomic patterns of the periurban areas: a case study of Isfahan city, Iran http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-19799

Lotfi, S., & Alizadeh, T. (2024). Identifying and monitoring urban growth and expansion changes using spectral-unmixing of remote sensing imagery and geographic information systems techniques at the micro level, (A case study of Amol city). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 16(3), 147-164. (In Persian). doi: 10.48308/gisj.2023.10372710.48308/GISJ.2023.103727

Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., & Blei, A. M. (2012). *Atlas of urban expansion*. Lincoln Institute of Land Policy.

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), 107–153. https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001

Ahmadi, F., Yarahmadi, D., & Mirhashemi, H. (2023). Revealing the impact of Khorramabad urban expansion on urban temperature changes using Landsat satellite thermal images. *Climate Change Research*, 4(15), 23–38. (In Persian).

Akbari, A., Eskandari Sani, M., & Esmaeilnezhad, M. (2022). Effective indicators on the realization of land use pattern and future expansion of Zahedan urban areas in its comprehensive development plan. *GeoResearch*, 37(4), 517–527. (In Persian). https://georesearch.ir/article-1-1393-fa.html

Ali, S. A., Khan, N. U., & Hussain, M. (2020). Assessment of bare land dynamics using geospatial techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 256.

Anindea, A. (2024). Transferring UAVs to Russia: Navigating strategic implications for Iran.

Bahhata, B. (2010). Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data. *Springer*.

Baker, J., Van Der Leeuw, S., & Van Os, B. (2015). Landscape metrics for assessing ecological connectivity and fragmentation. *Ecological Indicators*, 58, 192–198.

Bagheri Dolatabadi, A., & Kamrava, M. (2024). Iran's changing naval strategy in the Persian Gulf: Motives and features. *British Journal of Middle Eastern Studies*, 51(1), 131–148.

Cheng, J., Wang, S., & Song, W. (2014). A new index for assessing landscape fragmentation based on the concept of nearest neighbor distance. *Ecological Indicators*, 45, 253–257.

Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). Loose coupling of geographic information systems and cellular automata for modeling land use change. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699–714.

Cornthwaite, J. L. (2019). Can we shoot down that drone? An examination of international law issues associated with the use of territorially intrusive aerial and maritime surveillance drones in peacetime. *Cornell International Law Journal*, 52, 475.

Elhakeem, A., & Wrigley, N. (2012). Measuring the spatial distribution of land use categories: A case study of the Greater Cairo urban area, Egypt. *Landscape and Urban Planning*, 106(1–2), 134–141.

Forman, R. T. T. (1995). *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press.

Gong, J., Hu, Z., Chen, W., Liu, Y., & Wang, J. (2018). Urban expansion dynamics and modes in metropolitan Guangzhou, China. *Land Use Policy*, 72, 100–109. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.025

Hakimi, H., & Mostafaei Journi, F. (2024). A temporal–spatial analysis of the expansion of Urmia city during the past two decades with an emphasis on identifying its influential components. *Urban Space and Social Life*, 3(8), 62–75. (In Persian). https://doi.org/10.22034/jprd.2024.59661.1071

He, C., Liu, Z., Gou, S., Zhang, Q., Zhang, J., & Xu, L. (2019). Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network. *Environmental Research Letters*, 14(3). https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf936

Herold, M., Goldston, N. C., & Clark, C. (2003). The spatiotemporal form of environment, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 286–302.

Huang, B., Zhao, B., Song, Y., Zhang, J., Wang, S., Liu, Z. Z., & Huang, J. (2019). Urban land use mapping using a combination of spectral, spatial, and temporal information of Landsat 8 OLI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 251–264.

Huang, S. L., Lee, Y. C., Budd, W. W., & Yang, M. C. (2012). Analysis of changes in farm pond network connectivity in the peri-urban landscape of the Taoyuan area, Taiwan. *Environmental Management*, 49, 915–928.

Jokar Arsanjani, J., Helbich, M., Kainz, W., & Darvishi Boloorani, A. (2015). Integration of logistic regression, GIS, and remote sensing for land-use change modeling. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(3), 406–423.

Li, J., Fang, W., Wang, T., Qureshi, S., Alatalo, J. M., & Bai, Y. (2017). Correlations between socio-economic drivers and indicators of urban expansion: Evidence from the heavily urbanised Shanghai metropolitan area, China. *Sustainability*, 9(7). https://doi.org/10.3390/su9071199

Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tan, Z., Li, S., & Ai, B. (2010). A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 25(5), 671–682.

Lotfi, S., & Alizadeh, T. (2024). Identifying and monitoring urban growth and expansion changes using spectral-unmixing of remote sensing imagery and geographical information systems techniques at the micro level (A case study of Amol city). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 16(3), 147–164. (In Persian). https://doi.org/10.48308/gisj.2023.103727

Mansouri, M., Roradeh, H., & Safarrad, T. (2024). Analyzing the impact of urban development on the spatial changes of the thermal island of Sari City. *Urban Structure and Function Studies*, 11(38), 215–240. (In Persian). https://doi.org/10.22080/usfs.2023.25957.2383

Mitra Ansari, M., Vali Shareeat Panahi, M., Malek Hoseini, A., & Modiri, M. (2019). Analysis of the pattern of urban expansion in mid-range cities using quantitative models: Case study of Malayer City. *Amayesh Journal*, 11(43), 147–182. (In Persian).

Movahed, A., Mostafavi, S., & Ahmadi, M. (2014). Explaining the pattern of spatial–physical expansion of Saqqez from sustainable urban perspective. *Urban Structure and Function Studies*, 2(5), 55–75. (In Persian).

National Development and Reform Commission (NDRE). (2022). Key tasks of new urbanization and urban-rural integration development in 2022. *NDRE: Beijing, China*. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/-22/content_5680416.htm

Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2021). Application of change detection techniques for land-use/land-cover mapping in urban environments. *Remote Sensing*, 13(3), 412.

Rawat, J. S., & Kumar, M. (2015). Monitoring land-use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh Block, District Almora, Uttarakhand, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 77–84.

Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PLOS ONE*, 6(8), e23777.

Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083–16088.

Shi, Y. Q., Sun, X., Zhu, X. D., Li, Y. F., & Mei, L. Y. (2012). Characterizing growth types and analyzing growth density distribution in response to urban growth patterns in peri-urban areas of Lianyungang City. *Landscape and Urban Planning*, 105, 425–433. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.01.017

Woldesemayat, E. M., & Genovese, P. V. (2021). Monitoring urban expansion and urban green spaces change in Addis Ababa: Directional and zonal analysis integrated with landscape expansion index. *Forests*, 12(4), 389. https://doi.org/10.3390/f12040389

Yuan, F., Sawya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. (2020). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98(2–3), 317–328.

Zho, H., Hung, X., & Zhung, Q. (2019). Agricultural land-use change and its driving forces in China. *Land Use Policy*, 85, 135–143.

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

تحلیل گسترش شهری شیراز با استفاده از شاخص LEI و متریک‌های سیمای سرزمین(۱۳۷۸–۱۴۰۴) با RS و GIS با اعتبارسنجی مبتنی بر یادگیری ماشین ML

سجاد تابع بردبار[۱]✉، محمدابراهیم عفیفی[۲]، عبدالرسول قنبری[۳]

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری جغرافیا، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران. رایانامه: Rsgis66@yahoo.com
۲. دانشیار، گروه جغرافیا، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران. رایانامه: ebrahim6353@gmail.com
۳. استادیار گروه جغرافیا، واحد لارستان، دانشگاه آزاد اسلامی، لارستان، ایران. رایانامه: dr.ghanbari121@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱

کلیدواژه‌ها:
گسترش شهری،
سیمای متریک،
ML،
LEI،
LM.

چکیده

گسترش شتابان شهرها در ایران، به‌ویژه در کلان‌شهرهایی مانند شیراز، پیامدهای عمیقی بر کاربری اراضی، محیط‌زیست و برنامه‌ریزی فضایی برجای گذاشته است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل گسترش کالبدی شیراز در بازه ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۵، از شاخص LEI (Landscape Expansion Index) و مجموعه‌ای از متریک‌های سیمای سرزمین (CA، ND، NT، LPI، ED، LSI) بهره گرفته است. داده‌های کاربری زمین از تصاویر چندزمانه ماهواره‌های لندست در محیط GIS و تکنیک‌های سنجش از دور استخراج و پردازش شده‌اند. نتایج شاخص LEI نشان داد که گسترش لبه‌ای (Edge-Expansion) الگوی غالب توسعه شهری شیراز بوده و با مساحتی حدود ۱۳۸/۳۷۴ کیلومتر مربع معادل بیش از ۹۹٪ کل توسعه را دربر می‌گیرد. در مقابل، گسترش درونی (Infilling) تنها ۰/۱۶۶۷ کیلومتر مربع و گسترش پراکنده (Outlying) حدود ۰/۱۰۰۵ کیلومتر مربع سهم داشته و عمدتاً در حاشیه‌های دورافتاده مشاهده شده است. تحلیل متریک‌های سیمای سرزمین نشان داد طی این دوره، مساحت کاربری شهری از حدود ۷۲٫۵ میلیون مترمربع به بیش از ۱۴۶ میلیون مترمربع افزایش یافته؛ اراضی کشاورزی از ۷۹ میلیون مترمربع به کمتر از ۴ میلیون مترمربع و اراضی طبیعی از ۴۱ میلیون مترمربع به حدود ۱۱ میلیون مترمربع کاهش یافته‌اند. همچنین شاخص LPI شهری به ۱۰۰٪ رسیده که بیانگر یکپارچگی کامل لکه‌های شهری و حذف پراکندگی قبلی است. برای ارتقاء دقت نتایج، از رویکرد یادگیری ماشین (ML) با الگوریتم‌های Random Forest و SVM استفاده و طبقه‌بندی کاربری‌ها با ماتریس اغتشاش (Confusion Matrix) اعتبارسنجی شد. نتایج حاکی از دقت کلی بالای ۹۰٪ و ضریب کاپای حدود ۰/۸۵ بود که اعتمادپذیری بالای شاخص LEI را تأیید می‌کند. این تحلیل کمی و مکانی، تصویری شفاف از سرعت و شدت گسترش افقی شیراز ارائه کرده و بر ضرورت مدیریت هوشمند زمین، کنترل گسترش حاشیه‌ای و استفاده از سیاست‌های بازآفرینی شهری در بافت‌های خالی و فرسوده تأکید دارد. یافته‌های این پژوهش می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری در راستای توسعه پایدار و کاهش فشار بر اراضی کشاورزی و طبیعی پیرامونی قرار گیرند.

استناد: تابع بردبار، سجاد؛ عفیفی، محمدابراهیم و قنبری، عبدالرسول (۱۴۰۵). تحلیل گسترش شهری شیراز با استفاده از شاخص LEI و متریک‌های سیمای سرزمین(۱۳۷۸–۱۴۰۴) با RS و GIS با اعتبارسنجی مبتنی بر یادگیری ماشین ML. *کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی*، ۶ (۲۰)، ۴۱–۵۶.

http//doi.org/10.22034/rsgi.2026.69581.1149

ناشر: دانشگاه تبریز.

© نویسندگان.

مقدمه

روش‌شناسی هر پژوهش، بنیان اصلی اعتبار علمی آن را تشکیل می‌دهد و تعیین‌کننده چگونگی دستیابی به اهداف تحقیق است. در این مطالعه با توجه به ماهیت موضوع، یعنی بررسی تغییرات کاربری زمین و تحلیل گسترش شهری شیراز، از رویکرد کمّی و مبتنی بر تحلیل فضایی استفاده شده است. به منظور سنجش الگوهای فضایی و تغییرات سیمای سرزمین، داده‌های کاربر ی زمین در دو بازه زمانی ۱۹۹۹ و ۱۴۰۴ استخراج گردید. برای تحلیل این تغییرات، مجموعه‌ای از متریک‌های سیمای سرزمین شامل: CA, ND&NT, LPI, ED, LSI مورد استفاده قرار گرفتند.

شاخص LEI ابزاری قدرتمند در تحلل الگوهای گسترش شهری است که امکان تفکیک سه نوع توسعه شامل گسترش لبه‌ای (Edge-Expansion) ، گسترش درونی یا پرکننده (Infilling) و گسترش پراکنده یا بیرونی (Outlying) را فراهم می‌سازد. نتایج داده‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در شهر شیراز، رشد لبه‌ای (Edge-Expansion) با وسعت ۱۳۸/۳۷۴ کیلومترمربع نقش غالب را در گسترش شهری بر عهده دارد. در حالی که توسعه‌های پراکنده و پرکننده سهم بسیار اندکی از کل گسترش را تشکیل داده‌اند.

از سوی دیگر، برای افزایش دقت و اعتماد به نقشه‌های تولیدی، استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین Machine Learning ضروری است. الگوریتم‌های طبقه‌بندی همچون Random Forest & SVM به عنوان ابارهای هوشمند، قادر به استخراج دقیق الگوهای تغییرات کاربری اراضی هستند. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از ماتریس اغتشاش Confusion Matrix و محاسبه شاخص‌هایی نظیر Overall Accuarcy و ضریب کاپا Kappa Coefficient ، نشان‌دهنده دقت بالا و صحت نتایج این پژوهش است.

پیشینه و مبانی نظری تحقیق

کابیش و همکاران[1] در سال ۲۰۱۶ با روش مصاحبه‌ای تحقیق علمی تحت عنوان ارزیابی دسترسی به فضای سبز شهری در شهرهای اروپا را مورد ارزیابی قرار دادند.

مک گارگال و کوشمن (۲۰۰۲) متریک های سیمای سرزمین الگوریتم‌هایی برای کمّی‌کردن خصوصیات مکانی خاص لکه ها، کلاس‌ها و یا کل سیمای سرزمین می‌باشد. متریک‌های سیمای سرزمین ابزاری مناسب برای تجزیه وتحلیل ساختار و ترکیب سیمای سرزمین است. متریک‌های مناسب به هدف مطالعه و خصوصیات سیمای سرزمین و ویژگی فرآیندهای اکولوژیک وابسته می‌باشد. مناطق مختلف دارای وضعیت ساختاری گوناگونی هستند که در نتیجه متریک‌های مناسب برای بررسی آنها متفاوت می‌باشد و تغییر می‌کند. از طرفی نقشه هایی که برای تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد از لحاظ مقیاس، نوع طبقه‌بندی و درجه وضوح متفاوت می‌باشد.

در ارتباط با الگوهای رشد شهری، شای (۲۰۱۲) مطالعه‌ای انجام داده که بر اساس آن رشد شهری را در سه گونه اصلی رشد بیرونی، گسترش لبه‌ای و رشد درونی، دسته‌بندی نموده است. نیز در تحقیق همزمان با تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، اتومای سلولی، زنجیره مارکوف، سنجش از دور و تحلیل سلسه مراتبی در تحقیق استفاده نموده است.

تحلیل نتایج قنبری و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد که در بازه ۱۲ سال اراضی انسان ساخت ۳۷/۲۸ کیلومتر و باغات ۶۱/۱۴۳ کیلومتر به همراه شوره‌زارها ۵۳/۲ کیلومتر در منطقه مورد مطالعه افزایش داشته و سایر کاربری ها کاهش دارند و متریک CA نیز همین تغییرات را نشان می‌دهد. بررسی متریک تعداد لکه نیز نشان داد که کاربریهای موجود در شهرستان در حالت ناپایدار می‌باشند، به‌طوری که اراضی باغی از ۱۶۱۱ لکه در سال ۲۰۰۵ به ۴۹۱۲ لکه در سال ۲۰۱۷ افزایش داشته است. سایر کاربریها

1. Kabisch et al

نیز افزایش مشابهی داشته‌اند. با مقایسه و بررسی یافته ها و متریک‌های به دست آمده می‌توان گفت که وضعیت ساختار سیمای سرزمی نشهرستان میاندوآب در شرایط فعلی، به دلیل تخریب و استفاده نادرست از منابع به صورت اختلالی بوده و بیانگر روند توسعه تخریب در این منطقه می‌باشد. یافته‌های این تحقیق بر لزوم توجه بیشتر به بهره برداری پایدار از سرزمین و جلوگیری از تخریب آن در این شهرستان تأکید دارد.

ابراهیم عفیفی، محمد؛ خیاط، میلاد (۱۳۹۵) در کتاب «مدلسازی توسعه شهری با استفاده از سنجش از دور و GIS» که یک مطالعه موردی بر مدل‌سازی توسعه شهری در شوشتر است که با تلفیق این دو دانش از تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های رقومی و روش‌های هوشمند مدلی مناسب جهت مدل‌سازی فرایند رشد شهری شوشتر در سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۳ و پیش‌بینی برای سال ۲۰۲۴ ارائه کردند که می‌توان گفت برای پیش‌بینی آینده نیز می‌شود از این مدل‌سازی استفاده نمود.

شاخص LEI یا Landscape Expansion Index یکی از شاخص‌های نوین در تحلیل گسترش فضایی شهرهاست که نوع رشد شهری را (درونی، کناری یا پراکنده) مشخص می‌کند .این شاخص بر اساس رابطه هر لکه جدید توسعه‌یافته با لکه‌های قدیمی‌تر در نقشه‌های کاربری اراضی چندزمانه محاسبه می‌شود و می‌تواند بینش دقیقی از کیفیت رشد شهری در طول زمان ارائه دهد .سلیمانی و محمدی (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای در شهر تبریز، با تحلیل نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده کاربری اراضی و استفاده از شاخص LEI، مشخص شد که رشد شهری به‌ویژه در نواحی پیرامونی عمدتاً از نوع پراکنده است که نشان‌دهنده ضعف در سیاست گذاری فضایی می‌باشد.

اصغر تیموری و ابوالفضل مشکینی (۱۳۹۳): سنجش گستردگی شهری و تأثیر آن بر تغییرات کاربری اراضی (نمونه موردی: شهر کرج طی دوره ۱۳۶۳–۱۲۹۱) در شهر کرج به یافته‌های زیر دست یافتند که مساحت اراضی ساخته‌شده از ۴،۹۰۴ هکتار در ۱۳۶۳ به ۱۱،۳۰۵ هکتار در سال ۱۳۹۱ رسیده است. نتیجه‌گیری: گستردگی بی‌برنامه باعث از بین رفتن اراضی کشاورزی و افزایش هزینه خدمات شهری می‌شود.

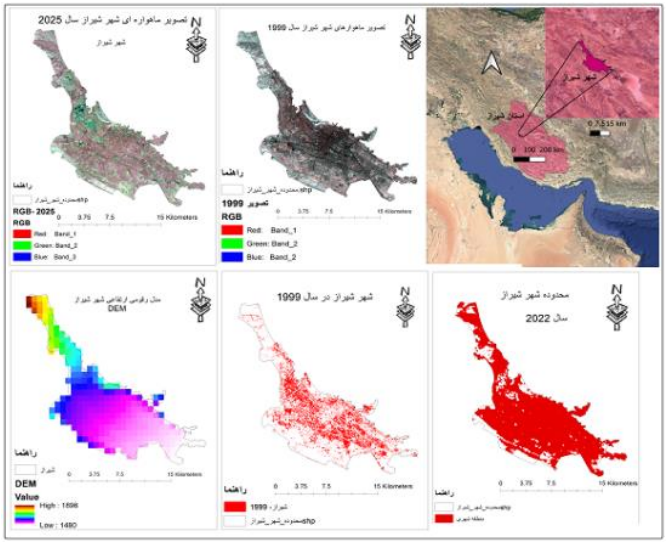
Liu et al. (2010): در مطالعه‌ای روی گسترش شهری پکن، شاخص LEI برای تحلیل تغییرات در بازه ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ استفاده شد. تحلیل‌ها نشان داد که رشد اولیه درونی و کناری بوده ولی در دهه‌های اخیر به سمت رشد پراکنده حرکت کرده است. Torrens (2008): در پژوهشی در مورد چند کلان‌شهر در آسیای شرقی، با استفاده از شاخص LEI و داده‌های Landsat، روند گسترش فضایی بررسی شد .نتایج بیانگر آن بود که توسعه شهری با سیاست‌های برنامه‌ریزی فضایی همخوانی نداشته و بیشتر به سمت رشد پراکنده تمایل دارد. Zhang et al. (2014) تحلیل روند گسترش در شهر شانگهای با بهره‌گیری از LEI نشان داد که رشد حاشیه‌ای در اطراف مسیرهای حمل‌ونقل و بزرگراه‌ها بیشتر رخ داده و رشد پراکنده در دهه اخیر کاهش یافته است.

مواد و روش تحقیق

رشد و گسترش شهری، پدیده‌ای پیچیده است که تحلیل آن صرفاً با بررسی تغییرات کمّی مساحت کاربری‌ها قابل درک نیست. به همین دلیل، در مطالعات نوین جغرافیای شهری و برنامه‌ریزی سرزمین، استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین Landscape Metrics به عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل ساختار الگوی تغییرات کاربری زمین رایج شده است (Forman, 1995; Bhatta, 2010). در پژوهش حاضر، هدف آن است که با بهره‌گیری از شاخص‌های کمّی سیمای سرزمین شامل CA, ND, NT, ED, LPI, LSI.

کلانشهر شیراز در ایران و مرکز استان فارس در جنوب ایران است. جمعیت کلانشهر بر اساس سرشماری سال ۱۴۰۰ بالغ بر ۱۹۵۵۵۰۰ نفر بوده است که بر این اساس، شیراز پنجمین شهر بزرگ پرجمعیت ایران و پرجمعیت‌ترین شهر جنب کشور است. دارای مختصات جغرافیایی ´۳۷ °۲۹ شمالی ´۳۲ °۵۲ شرقی و مساحتی بالغ بر ۲۴۰ کیلومتر مربع می‌باشد. ارتفاع از دریا ۱۵۰۰ متر و دارای آب و هوای اقلیم مدیترانه‌ای Csa است. شیراز در بخش مرکزی استان فارس، در ارتفاع ۱۴۸۶ متر از سطح دریا و

در منطقه کوهستانی زاگرس وافع شده و آب و هوای معتدلی دارد. این شهر از سمت غرب به کوه دراک، از سمت شمال به کوه-های بمو، سبزپوشان، چهل مقام و باباکوهی (از رشته کوه‌های زاگرس) محدود شده است. رودخانه فصلی با نام رودخانه خشک شیراز به سمت جنوب شرقی حوضه خود متمایل شده و به دریاچه مهارلو می‌ریزد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه کلانشهر شیراز

Fig. 1. Geographical location of the study area of Shiraz metropolis

تحقیق نظری

روش این تحقیق بحث پیرامون تحلیل تغییرات سیمای سرزمین با تحلیل الگوهای توسعه شهری با الگوهای چشم‌انداز شهری LEI[1] است که نوع گسترش شهری را برای کلانشهر شیراز بیان می‌کند.

نوع گسترش شهری با الگوی گسترش شهری LEI: گسترش شهری infilling: در این نوع گسترش شهری infilling که شاخص چشم‌انداز شهری بین ۵۰ ≤LEI≥ ۱۰۰ است، کاربری‌هایی که LEI بین این دو رقم محاسبه می‌گردد شامل نوع گسترش شهری درونی می‌باشد. گسترش شهری edge-expansion: در این نوع گسترش شهری edge-expansion که شاخص چشم‌انداز شهری بین ۵۰ ≤LEI≥ ۰ است، کاربری‌هایی که LEI بین این دو رقم قرار دارد شامل نوع گسترش شهری حاشیه‌ای می‌باشد. گسترش شهری outlying : در این نوع گسترش شهری outlying که شاخص چشم‌انداز شهری LEI = 0 است، این کاربری‌ها از نوع گسترش شهری بیرونی است. مراحل پیش‌پردازش تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ با کالیبراسیون رادیومتریک و بازتابندگی انجام گرفت. شاخص‌های استخراج مناطق مسکونی در ArcGIS برای شناسایی و استخراج مناطق مسکونی از تصاویر ماهواره‌ای ، از شاخص‌های طیفی متنوعی مانند NDBI, BI, IBI و سایر شاخص‌های ترکیبی استفاده شد.

روش تحقیق عملی

تحقیق حاضر از نظر ماهیت توصیفی – تحلیلی می‌باشد. داده‌ها از طریق تصاویر ماهواره لندست ۵ سطح ۲[2] با قدرت تفکیک ۳۰ متر، سنجنده TM سال ۲۰۰۸– ۲۰۰۲– ۱۹۹۹ و تصاویر ماهواره لندست ۸ سطح ۱ با قدرت تفکیک ۳۰ متر، سنجنده OLI[3] سال ۲۰۲۵– ۲۰۲۴– ۲۰۲۰ از سایت USGE[4] دانلود گردیده است.

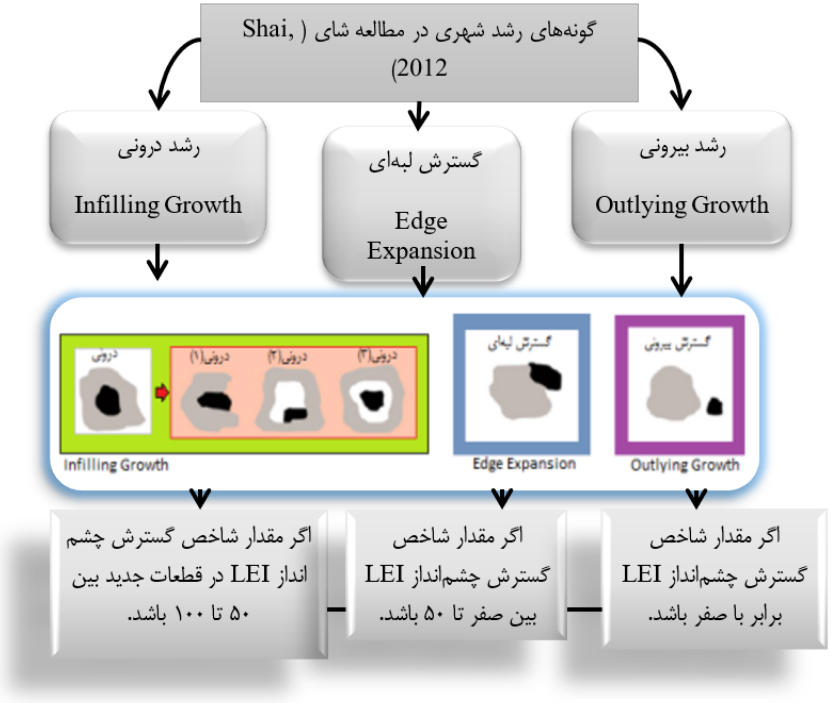
1. LEI(Landscape Expansion Index)
2. LANDSAT_PRODUCT_ID = "LT05_L2SP_163039_19991208_20200907_02_T1"
۳. تصویرگر زمین عملیاتی OLI که دارای ۹ باند طیفی (باند ۱ تا باند ۹)
4. USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/)

فرمول الگوریتم گسترش شهری LEI

$$LEI_{box} = \begin{cases} 100 \times \frac{A_0}{A_E - A_N} & \text{new path is not rectangular} \\ 100 \times \frac{A_0}{A_{LE} - A_N} & \text{new patch is rectangular} \end{cases}$$

تحلیل متریک در سطح سیمای سرزمین برای افق ۱۴۱۰

سیمای متریک سرزمین (Landscape Metrics) LM: عبارت سیمای متریک سرزمین به شاخص‌ها و معیارهایی اشاره دارد که برای کمّی‌سازی و تحلیل الگوهای فضایی سیمای سرزمین Landscape به کار می‌روند. یک تعریف دقیق از سیمای متریک، ابزارهایی هستند برای اندازه‌گیری ویژگی‌های کمّی یک سیمای سرزمین بر اساس ساختار ماتریس‌ها Matrix، مرزها Edge، فضایی لکه‌ها Patches و الگوهای مکانی در یک چشم‌انداز.



شکل ۲. فلوچارت الگوی گسترش شهری با LEI[۱]

Fig. 2. Flowchart of urban expansion pattern with LEI

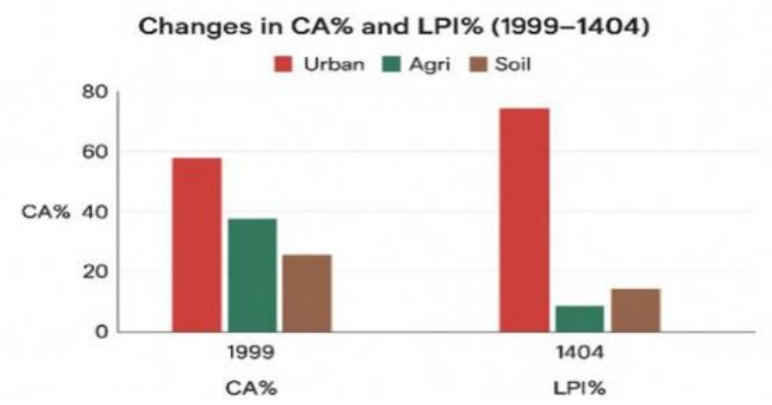
بحث و یافته‌ها

تحلیل سیمای سرزمین در منطقه مورد مطالعه انجام شده و متریک CA، متریک Pland، متریک NT، متریک LPI، متریک ED، متریک LSI در منطقه مورد مطالعه برای کاربری شهر روند افزایشی یا کاهشی دارد را با ایجاد یک جدول با نام شاخص CA مساحت هر طبقه و Pland درصد هر طبقه در سال‌های مورد مطالعه برآورد و استخراج می‌گردد. جدول شاخص NP تعداد لکه‌های هر کلاس و LPI بزرگ‌ترین لکه به درصد در سال‌های مورد مطالعه بدست می‌آید.

۱. منبع: تلخیص و استنتاج از Shai., et al, 2012 فلوچارت طبقه بندی شش نوع فضایی از سه گونه رشد شهری و نحوه تشخیص آن از نظر شایچ

جدول ۱. جدول نهایی متریک شهری سیمای سرزمین
Table 1. Final table of urban landscape metrics

Year	LU Class	CA(m^2)	CA(%)	ND	NT	Large Patch (%)	LPI (%)	ED(m/h)	LSI	Edge-Length(m)
1999	Urban	72,560,700	58.6	1	1	72,560,700	100	250	1.5	1,814,000
1999	Agri	78,965,620	63.8	2	1	50,000,000	63.3	180	1.3	1,421,380
1999	Soil	41,411,140	33.5	3	1	25,000,000	60.3	150	1.2	621,170
1999	Sum	123,746,460	100							
1404	Urban	146,152,800	74.1	1	1	146,152,000	100	30	1.6	438,426
1404	Agri	40,444,960	2.05	2	1	2,500,000	61.8	200	1.35	80,895
1404	Soil	11,322,290	5.74	3	1	6,000,000	53	12	1.2	13,587
1404	Sum	197,230,050	100							



شکل ۳. Change CA% & LPI% (1999-1404)
Fig. 3. Change CA% & LPI% (1999-1404)

بحث و یافته‌های تحقیق

بحث و تحلیل نتایج اعتبارسنجی ماتریس اغتشاش برای شهر شیراز

غلبه الگوی گسترش لبه‌ای Edge-Expansion در شهر شیراز در بازه زمانی مورد مطالعه نشان‌دهنده توسعه افقی شهر شیراز و تمرکز بر گسترش پیرامونی به جای توسعه درونی است. این روند علاوه بر افزایش هزینه‌های زیرساختی، به مصرف بی‌رویه زمین‌های کشاورزی و منابع طبیعی پیرامون شهر منجر می‌شود. در مقابل، سهم بسیار اندک پرکنندگی بیانگر ضعف سیاست‌های بازآفرینی شهری و بهره‌برداری مجدد از بافت‌های فرسوده و زمین‌های خالی درون‌شهری است. نتایج شاخص LEI نشان داد توسعه‌ی لبه‌ای Edge-Expansion بیشترین سهم در گسترش شهری را داشته است (حدود ۹۹٪ مساحت توسعه). سهم پراکنده و پر کننده بسیار محدود بوده و تنها در نقاطی از پیرامون شهر مشاهده شده است. نقشه‌های طبقه‌بندی تولیدشده توسط Random Actuarcy بیش از ۹۰٪ و ضریب کاپا حدود ۰/۸۵ به دست امدند که نشان‌دهنده اعتبار بالای نتایج است. تحلیل نقشه‌های نمایشی بیانگر آن است که رشد شهری شیراز در امتداد محورهای جاده‌ای و نواحی پیرامون حاشیه‌های شمالی و غربی متمرکز است. توسعه شهری شیراز از سال ۱۹۹۹ تا ۱۴۰۴ عمدتاً بر اساس الگوی گسترش لبه‌ای Edge-Expansion رخ داده و سهم الگوهای پرکننده Infilling و پراکنده Outluing بسیار ناچیز بوده است. این الگو پیامدهای مهمی در زمینه مصرف زمین-های کشاورزی، افزایش هزینه‌های خدمات‌رسانی و گسترش نامتوازن شهر به همراه دارد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود: سیاست‌های تشویقی برای توسعه درونی و پرکنندگی در بافت‌های خالی و فرسوده در دستور کار قرار گیرد.

بحث ماتریس اغتشاش در اعتبارسنجی نتایج شیراز

ماتریس اغتشاش Confusion Matrix یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین ML[1] و مقایسه ان با نتایج واقعی است. در این پژوهش، برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شاخص LEI[2] در شهر شیراز (۱۹۹۹–۱۴۰۴)، یک مدل یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی انواع گسترش شهری (Edge-Expansion, Infilling, Outluing) طراحی شد و نتایج آن با خروجی واقعی LEI مقایسه گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، ماتریس اغتشاش نشان داد که مدل در شناسایی گسترش لبه‌ای Edge-Expansion عملکرد بسیار مناسبی داشته و درصد بالایی از لکه‌های شناسایی شده توسط LEI به درستی توسط مدل یادگیری ماشین نیز تشخیص داده شده‌اند. این موضوع با توجه به سهم بالای این نوع گسترش در شهر شیراز (بیش از ۹۹٪ از کل مساحت توسعه) منطقی به نظر می‌رسد. در مقابل، یادگیری ماشین در شناسایی پرکنندگی Infilling و پراکنده Outluing، عملکرد مدل با خطا همراه بود و بخشی از لکه‌ها به اشتباه در کلاس‌های دیگر قرار گرفتند.

بحث و یافته‌ها: تحلیل متریک در سطح سیمای سرزمین (Landscape Metrics)LM برای افق ۱۴۱۰

پتجزیه و تحلیل سنجه‌های مساحت سیمای سرزمین، تعداد لکه، شاخص برگ‌ترین لکه، تراکم حاشیه، شاخص شکل سیما انجام مپذیرد. متریک مساحت سیمای سرزمین در سال‌های معین دارای چه تغییراتی است را به نمایش می‌گذارد. کدام لکه دارای روند افزایشی یا کاهشی است نیز در این محاسبه متریک نمایان می‌شود. تحلیل سیمای سرزمین در منطقه مورد مطالعه انجام شده و متریک CA، متریک Pland، متریک NT، متریک LPI، متریک ED، متریک LSI در منطقه مورد مطالعه برای کاربری شهر روند افزایشی یا کاهشی دارد را با ایجاد یک جدول با نام شاخص CA مساحت هر طبقه و Pland درصد هر طبقه در سال‌های مورد مطالعه برآورد و استخراج می‌گردد. جدول شاخص NP تعداد لکه‌های هر کلاس و LPI بزرگ‌ترین لکه به درصد در سال‌های مورد مطالعه بدست می‌آید.

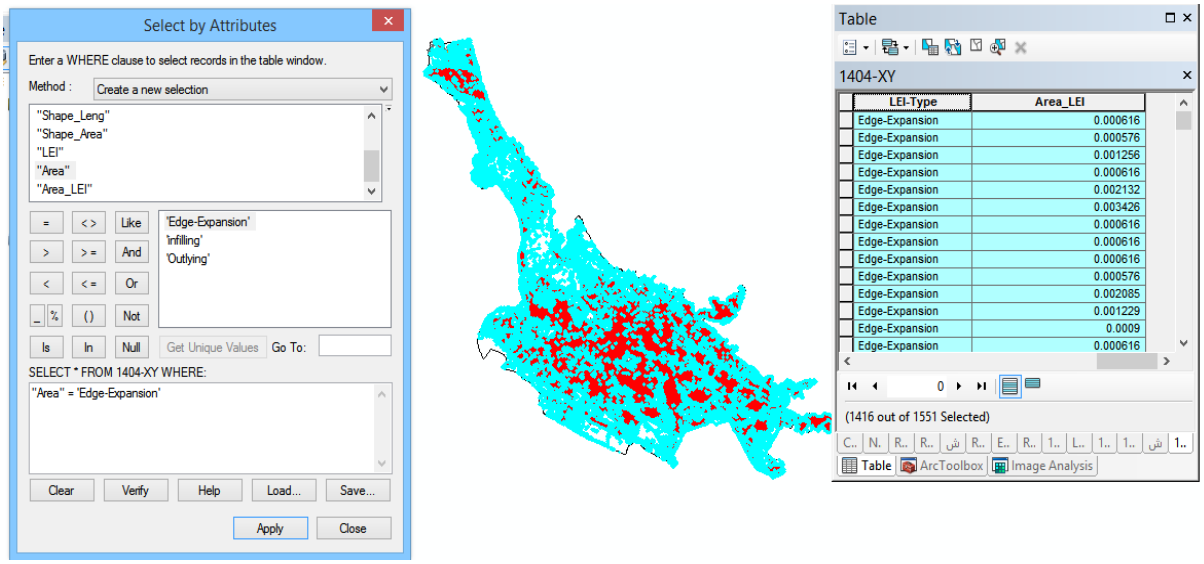
بحث و نتیجه‌گیری برای سیمای متریک سرزمین شیراز

- ✓ رشد سریع و یکپارچه شهر: یافته‌ها نشان می‌دهند که مساحت کاربری شهری شیراز بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۱۴۰۴ تقریباً دو برابر شده و شاخص LPI شهری به ۱۰۰ ٪ رسیده است. این امر بیانگر آن است که شیراز از یک شهر با لکه‌های پراکنده و حاشیه‌ای، به یک شهر یکپارچه و متصل تبدیل شده است. مساحت کاربری شهری (Urban) از ۷۲۵۶۷۰۰ متر مربع در سال ۱۹۹۹ به ۱۴۶۱۵۲۸۰۰ مترمربع در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است. شاخص LPI شهری از کمتر از ۱۰۰٪ به ۱۰۰٪ تبدیل شده است. چنین الگویی به طور مستقیم با پدیده گسترش افقی Urban Sprawel و ادغام سکونتگاه‌های پیرامونی در بدنه اصلی شهر مرتبط است (Bhatta, 2010).
- ✓ نابودی اراضی کشاورزی: کاهش چشمگیر کاربری کشاورزی (از حدود ۷۹ میلیون مترمربع به تنها ۴ میلیون مترمربع) نشان‌دهنده تبدیل باغ‌ها و مزارع اطراف شیراز به کاربری شهری است. مساحت اراضی کشاورزی Agri از ۷۸۹۶۵۶۲۰ مترمربع در سال ۱۹۹۹ به تنها ۴۰۴۴۹۶۰ مترمربع در سال ۱۴۰۴ کاهش یافته است. این روند به ویژه در مناطق قصرالدشت و محور صدرا مشهود است. مشابه این وضعیت در بسیاری از شهرهای ایران و جهان گزارش شده که در آن رشد شهرها به قیممت نابودی اراضی کشاورزی و تهدید امنیت غذایی رخ داده است (Seto et al., 2011).
- ✓ فشار بر اراضی طبیعی: کاهش اراضی طبیعی (از ۴۱ میلیون مترمربع به حدود ۱۱ میلیون مترمربع) نشان می‌دهد که توسعه شهری به سمت ارتفاعات و عرصه‌های طبیعی نیز پیشروی کرده است. این موضوع می‌تواند منجر به تجزیه زیستگاه‌ها، تخریب تنوع زیستی و افزایش خطر سیلاب‌ها و فرسایش خاک شود (Forman, 1995). اراضی طبیعی و

1. ML (Machine Learning)
2. LEI (Landscape Expansion Index)

خاک Soil نیز از ۴۱۴۱۱۱۴۰ مترمربع به حدود ۱۱۳۲۲۲۹۰ مترمربع کاهش یافته است. برای شهری مانند شیراز که در دشت و در مجاورت کوه‌های اطراف قرار دارد، این روند یک تهدید جدی محیط‌زیستی محسوب می‌شود.

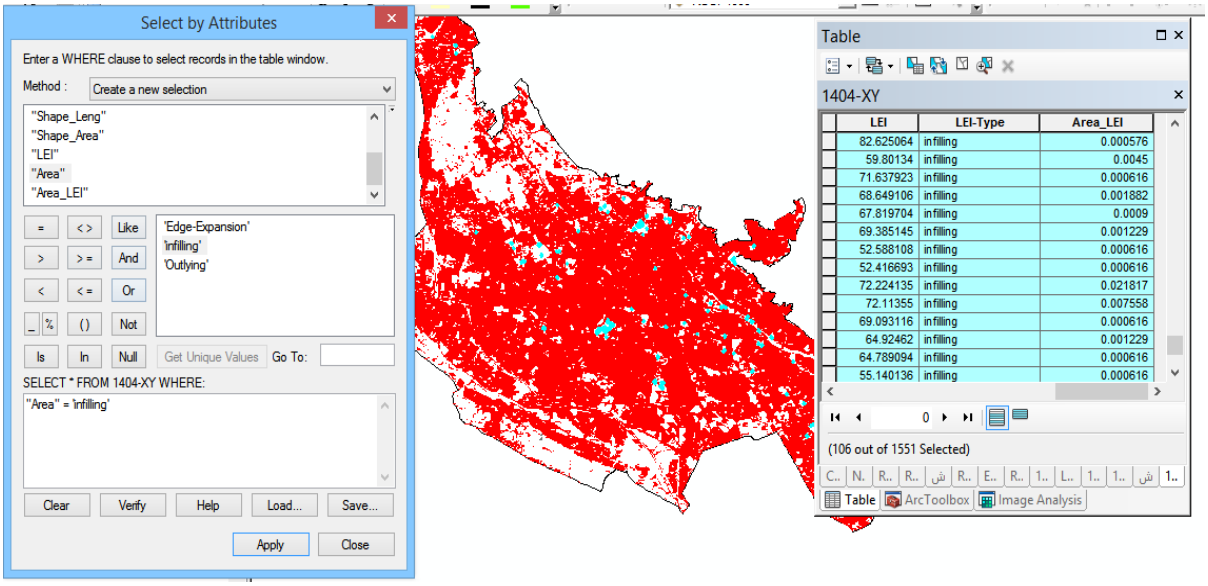
✓ تغییر شکل و مرزهای شهر: شاخص‌های ED, LSI نشان دادند که مرزهای شهری در شیراز پیچیده‌تر و نامنظم‌تر شده‌اند، نشان‌دهنده کاهش تراکم لبه‌ها و افزایش پیچیدگی مرزهای شهر است. این امر بازتابی از گسترش سریع و بدون برنامه‌ریزی در جهت‌های مختلف است. مطالعات مشابه نیز نشان داده‌اند که افزایش LSI, ED در شهرها اغلب نشانه‌ای از عدم وجود الگوی رشد متوازن و فشار بر کاربری‌های اطراف است (Herold et al., 2003).



شکل ٤. مساحت گسترش لبه‌ها با جدول و محاسبه

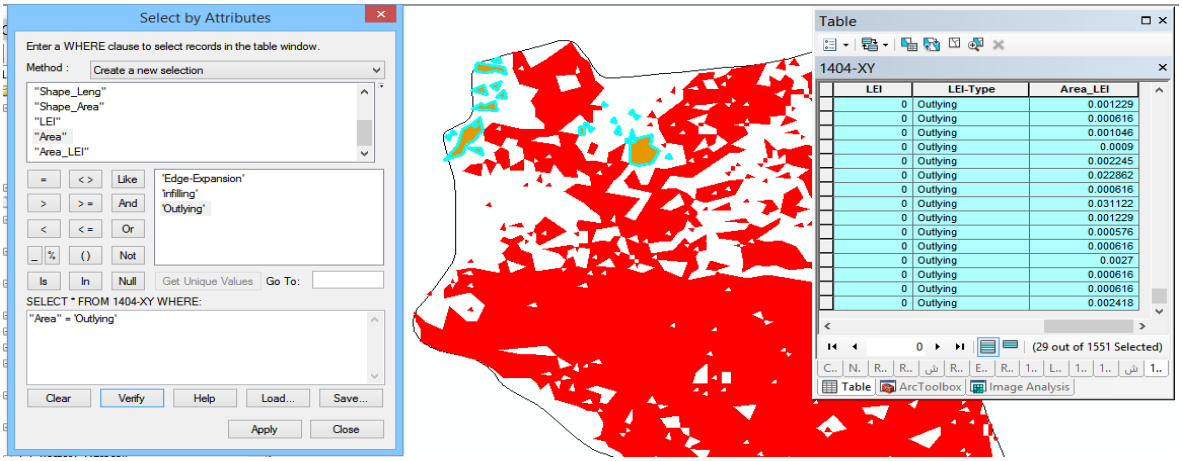
Fig. 4. Edge expansion area with table and calculation

Edge-expansion SUM = 138.374636, infilling Sum: 0.166744, Outlying SUM: 0.160479



شکل ٥. مساحت گسترش درونی با جدول و محاسبه

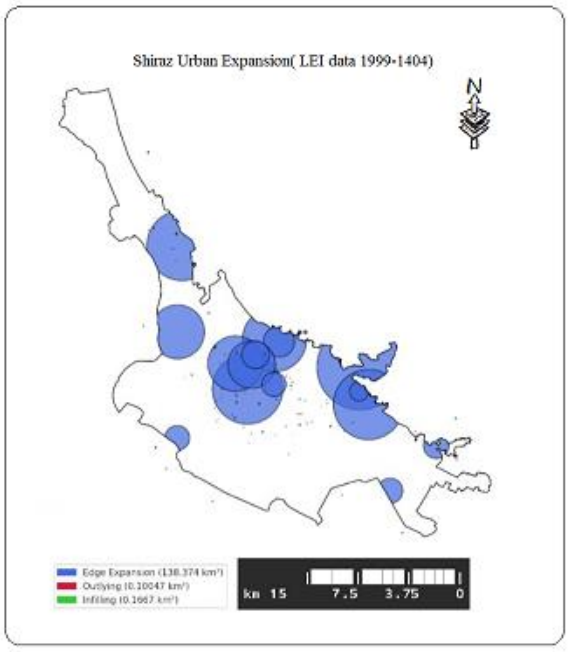
Fig. 5. Internal expansion area with table and calculation



شکل ٦. مساحت گسترش بیرونی با جدول و محاسبه

Fig. 6. External expansion area with table and calculation

بالاترین نوع گسترش شهری در کلانشهر شیراز، نوع گسترش شهری لبه‌ای یا Edge-expansion بوده که برابر با ۱۳۸/۳۷۴ بوده است. در ردیف دوم نوع گسترش شهری درونی infilling که مساحتی برابر با ۰/۱۶۶ و در ردیف سوم نوع گسترش شهری Outlying مساحتی برابر با ۰/۱۶۰ می‌باشد.



شکل ۷. گسترش شهری شیراز با LEI – با ML

Fig. 7. Urban expansion of Shiraz with LEI - with ML

لکه‌های با رنگ آبی گسترش لبه‌ای Edge-Expansion را بیان می‌کند. نمایانگر سهم بزرگی از لکه‌های گسترش شهری است. لکه‌های سبز Infilling در نزدیک مرکز قرار گرفتند و کوچک‌ترین لکه‌ها هستند. لکه‌های قرمز Outlying در حاشیه بیرون از محدوده در ناحیه بافر قرار دارند و کوچک‌تر هستند. بیانگر وجود خطا در طبقه‌بندی هست که در اعتبارسنجی بحث شده است.

تحلیل سیمای سرزمین: شاخص‌های متریک تمام متریک‌های سیمای سرزمین مانند: CA,[1] PLAND,[2] NT,[3] LPI,[4] ED[5], LSI[6] اجرا گردید.

احتمال توسعه شهری بررسی توسعه شهری با شاخص LEI

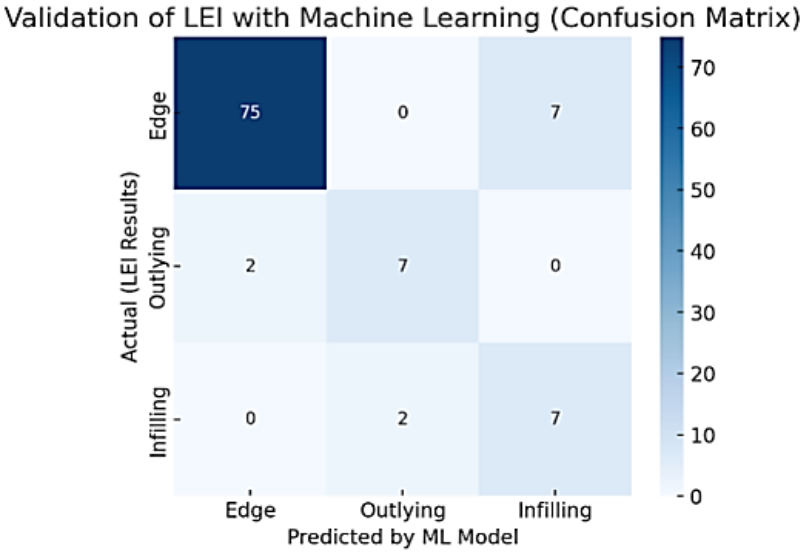
برای تحلیل الگوی رشد شهری از شاخص LEI استفاده شد. این شاخص نسبت بین مساحت اراضی شهری جدید در یک دوره به کل مساحت شهری در آغاز دوره را نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر LEI نشان‌دهنده گسترش سریع‌تر و پویایی بیشتر در توسعه افقی می‌باشد. برای تحلیل الگوی رشد شهری از شاخص LEI استفاده شد. این شاخص نسبت بین مساحت اراضی شهری جدید در یک دوره به کل مساحت شهری در آغاز دوره را نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر LEI نشان‌دهنده گسترش سریع‌تر و پویایی بیشتر در توسعه افقی می‌باشد.

Area-Expansion(Edge-Expansion) =138.374, Outlying=0.10047, infilling=0.1667

تفسیر: تشریح یافته‌های تحقیق

یافته‌های حاصل از محاسبه شاخص LEI نشان داد که الگوی گسترش کالبدی شهر شیراز در سه حالت infilling, Outlying, Edge-Expansion قابل تفکیک است. گسترش لبه‌ای یا گسترش کناری Edge-Expansion : الگوی غالب در شیراز است. این نوع توسعه بیانگر گسترش افقی شهر در امتداد مرزهای موجود بوده و موجب مصرف وسیع زمین‌های پیرامونی شده است. الگوی غالب گسترش شهری شیراز، گسترش لبه‌ای Edge-Expansion بوده است. بیشترین تغییرات در نواحی شمالی و غربی شهر شیراز مشاهده گردید که نشان‌دهنده تصرف گسترده اراضی کشاورزی و طبیعی است. این نوع توسعه بیشترین سهم را با Edge-Expansion = 1380374 Km^2 که حدود ۹۹/۸ ٪ از کل توسعه شهری را شامل می‌شود را به خود اختصاص داده است. این الگو نشان‌دهنده رشد پیوسته در امتداد مرزهای موجود شهر شیراز بوده و دلالت بر گسترش افقی وسیع شهر در جهات پیرامونی دارد. در این الگو، بزرگ‌ترین لکه شهری با مساحت ۱۲۸/۸۳۲ کیلومتر مربع و کوچک‌ترین لکه با ۰/۰۰۰۵۷۶ کیلومترمربع شناسایی گردید. مقدار سطح آن infilling = 0.1667 Km^2 بوده است که نشان‌دهنده‌ی سهم کمتر از ۰/۲٪ در مقایسه با سایر انواع توسعه هست. بزرگ‌ترین لکه پرکنندگی ۰/۰۲۱۸۱۷ کیلومترمربع و کوچکترین لکه برابر با ۰/۰۰۰۵۷۶ کیلومترمربع بوده است. این نوع توسعه بیانگر پرشدن فضاهای خالی در میان بافت‌های ساخته‌شده است. سهم محدود این نوع گسترش نشان می‌دهد که فرایند درون‌زا و متراکم دراین شهر چندان قوی نبوده و بیشتر تمرکز بر رشد افقی در حاشیه‌ها قرار داشته است. گسترش بیرونی یا پراکنده Outlying با وجود این که سطح اندکی را دربر می‌گیرد، اما بیانگر ظهور لکه‌های پراکنده در حاشیه شهر است. سهم محدود در توسعه شهری شیراز داشته است.

1. CA: (Contagion Index)
2. PLAND: (Percentage of Landscape)
3. NT: (Number of Patches)
4. LPI: (Edge Density)
5. ED: (Edge Density)

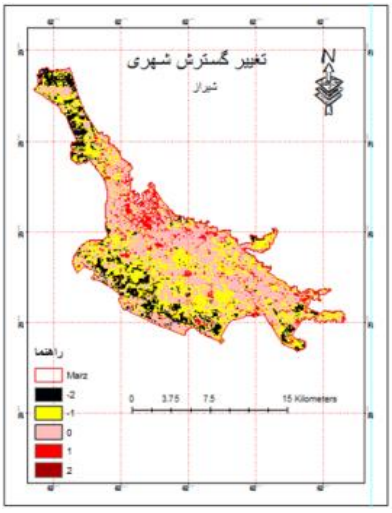


شکل ۸. ماتریس اغتشاش اعتبارسنجی مدل - شاخص LEI با ML

Fig. 8. Model validation confusion matrix - LEI index with ML

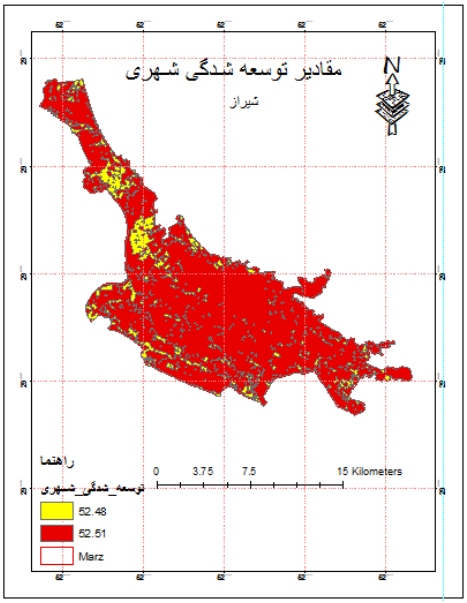
تفسیر نمودار ماتریس اغتشاش Confusion Matrix

این نمودار نشان می‌دهد که: مدل ML در تشخیص Edge-Expansion دقت بالایی داشته است. در مورد Outlying & Infilling کمی خطا دیده می‌شود(بخشی از این کلاس‌ها به اشتباه در کلاس دیگر پیش‌بینی شده‌اند). ماتریس اغتشاش Confusion Matrix یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و مقایسه آن با نتایج واقعی است. در این پژوهش، برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شاخص LEI در شهر شیراز (۱۹۹۹– ۱۴۰۴)، یک مدل یادگیری ماشین ML برای طبقه‌بندی انواع گسترش شهری (Edge-Expansion, Outlying, infilling) طراحی شد. نتایج آن با خروجی واقعی LEI مقایسه گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، ماتریس اغتشاش نشان داد که مدل در شناسایی گستره لبه‌ای Edge-Expansion عملکرد بسیار مناسبی داشته و درصد بالایی از لکه‌های شناسایی شده توسط LEI به درستی توسط مدل یادگیری ماشین نیز تشخیص داده شده‌اند. این موضوع با توجه به سهم بالای این نوع گسترش در شیراز (بیش از ۹۹٪ از کل مساحت توسعه) منطقی به نظر می‌رسد.



شکل ۹. تغییر گسترش شهری

Fig. 9. Urban Expansion Change



شکل ۱۰. توسعه‌شدگی شهری و غیرشهری
Fig. 10. Urban and Non-Urban Development

تحلیل تغییرات (۱۹۹۹–۲۰۲۵)

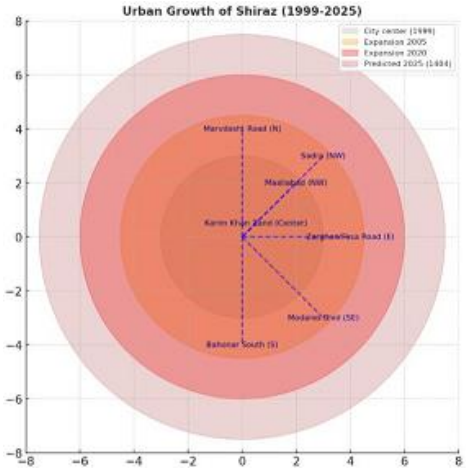
جدول ۲. تغییر تغییرات کاربری‌ها
Table 2. Land Use Change Change

N	LU-1999	Area	LU_1404	Area_1	Change	Area_Change
1	Urban	77560704	Urban	146152992	Urban-Urban	6342.006105
2	Urban	77560704	Agri	40448000	Urban-Agri	1344.165407
3	Urban	77560704	Soil	11322300	Urban-Soil	61.80413456
4	Agri	78965600	Urban	146152992	Agri-Urban	5823.217505
5	Agri	78965600	Agri	40448000	Agri-Agri	1756.704202
6	Agri	78965600	Soil	11322300	Agri-Soil	305.1312234
7	Soil	41411100	Urban	146152992	Soil-Urban	2431.124905
8	Soil	41411100	Agri	40448000	Soil-Agri	935.4681861
9	Soil	41411100	Soil	11322300	Soil-Soil	760.2152987

داده‌ها نشان می‌دهد که در بازه‌ی ۱۹۹۹ تا ۱۴۰۴، رشد شهری قابل توجهی اتفاق افتاده است، بزرگ‌ترین تغییر، تبدیل زمین‌های کشاورزی به شهر (5823.217) است که هشدار مهمی در زمینه از دست رفتن اراضی تولیدی و تهدید امنیت غذایی به شمار می‌رود، در عین حال، تبدیل بخشی از زمین‌های بایر می‌تواند به عنوان یک رویکرد جایگزین برای کاهش فشار بر اراضی کشاورزی تلقی شود، البته به شرط آن‌که برنامه‌ریزی فضایی منسجم وجود داشته باشد. نتیجه‌گیری: روند تغییرات نشان-دهنده گسترش سریع شهرنشینی است و لزوم سیاست‌گذاری در جهت مدیریت توسعه شهری، حفظ زمین‌های کشاورزی و استفاده بهینه از اراضی بایر بیش از پیش احساس می‌شود. داده‌های حاصل از تحلیل تغییر کاربری زمین نشان دادند که در بازه‌ی زمانی ۱۹۹۹ تا ۱۴۰۴، رشد شهری قابل توجهی رخ داده است. بیشترین تغییر مربوط به تبدیل اراضی کشاورزی به مناطق شهری بوده است که نشان‌دهنده‌ی فشار بالای شهرنشینی بر منابع طبیعی و کشاورزی است.

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

یافته‌های پژوهش نشان داد که بخش عمده‌ای از محدوده‌های مورد بررسی در شیراز در معرض رشد جدید شهری قرار دارند. مقایسه‌ی دو مقدار مناطق شهری فعلی (۶۹/۸۲۰) و مناطق با احتمال بالای تبدیل (۶۹/۱۷۳) نشان داد که ویژگی‌های مکانی و فضایی ین دو دسته تقریباً مشابه است. این نزدیکی عددی بیانگر ان است که مناطق پیرامونی شیراز از هم‌اکنون پتانسیل بالایی برای تبدیل به بافت شهری دارند و توسعه کالبدی در آینده به سمت آن‌ها اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.



شکل ۱۱. رشد شهری شیراز با Sprawel در پایتون Python
Fig. 11- Urban growth of Shiraz with Sprawel in Python

بحث و نتیجه‌گیری برای سیمای متریک سرزمین شیراز

رشد سریع و یکپارچه شهر: یافته‌ها نشان می‌دهند که مساحت کاربری شهری شیراز بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۱۴۰۴ تقریباً دو برابر شده و شاخص LPI شهری به ۱۰۰ ٪ رسیده است. این امر بیانگر آن است که شیراز از یک شهر با لکه‌های پراکنده و حاشیه‌ای، به یک شهر یکپارچه و متصل تبدیل شده است. چنین الگویی به طور مستقیم با پدیده گسترش افقی Urban Sprawel و ادغام سکونتگاه‌های پیرامونی در بدنه اصلی شهر مرتبط است (Bhatta, 2010).

نابودی اراضی کشاورزی: کاهش چشمگیر کاربری کشاورزی (از حدود ۷۹ میلیون مترمربع به تنها ۴ میلیون مترمربع) نشان‌دهنده تبدیل باغ‌ها و مزارع اطراف شیراز به کاربری شهری است. این روند به ویژه در مناطق قصرالدشت و محور صدرا مشهود است. مشابه این وضعیت در بسیاری از شهرهای ایران و جهان گزارش شده که در آن رشد شهرها به قیممت نابودی اراضی کشاورزی و تهدید امنیت غذایی رخ داده است (Seto et al., 2011).

فشار بر اراضی طبیعی: کاهش اراضی طبیعی (از ۴۱ میلیون مترمربع به حدود ۱۱ میلیون مترمربع) نشان می‌دهد که توسعه شهری به سمت ارتفاعات و عرصه‌های طبیعی نیز پیشروی کرده است. این موضوع می‌تواند منجر به تجزیه زیستگاه‌ها، تخریب تنوع زیستی و افزایش خطر سیلاب‌ها و فرسایش خاک شود (Forman, 1995). برای شهری مانند شیراز که در دشت و در مجاورت کوه‌های اطراف قرار دارد، این روند یک تهدید جدی محیط‌زیستی محسوب می‌شود.

تغییر شکل و مرزهای شهر: شاخص‌های ED, LSI نشان دادند که مرزهای شهری در شیراز پیچیده‌تر و نامنظم‌تر شداند. این امر بازتابی از گسترش سریع و بدون برنامه‌ریزی در جهت‌های مختلف است. مطالعات مشابه نیز نشان داده‌اند که افزایش LSI, ED در شهرها اغلب نشانه‌ای از عدم وجود الگوی رشد متوازن و فشار بر کاربری‌های اطراف است (Herold et al., 2003).

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

Alimohammadi, Shayan; Mosivand, Ahmad; Jafari, Abbas. (2010). Prediction of land use and land cover changes using satellite imagery and the Markov chain model. *Modares Human Sciences Quarterly*, 14(3), 117–130. (in Persian)

Akbari, Ebrahim. (2018). GIS-based modeling of urban quality of life: A case study of Districts 9 and 11 of Mashhad. *Master's thesis, University of Tabriz, Iran*. (in Persian)

Fathizad, Nohehgar; Faramerzi, Tazeh; Hasan, Ahmad; Marzban, Mahdi. (2013). Investigation of land use changes based on landscape metrics analysis using remote sensing and GIS in the arid and semi-arid region of Dehloran. *Scientific Journal of Land Use Planning*, 5(1), 79–99. (in Persian)

Herold, M., Couclelis, H., & Clarke, K.C.(2005). The role spatial metrics in the analysis and modeling of urban and Land use change. *Computers, Enviroonment and Urban Systems*, 29(4), 369-399.

McGarigal, K., Cushman, S. A., & Ene, E.(2012). Fragstates v4: Spatial pattern analysis program for categorical and continuse maps. *University of Massachusetts*.

Li, J., Fang, W., Wang, T., Qureshi, S., Alatalo, J. M., & Bai, Y. (2017). Correlations between socioeconomic drivers and indicators of urban expansion: Evidence from the heavily urbanised Shanghai metropolitan area China Sustainability (*Switzerland*), 9(7). https://doi.org/10.3390/su907-1199

Heidarinejad, N. (2017). The effects of urban expansion on spatial and socioeconomic patterns of the periurban areas: a case study of Isfahan city, Iran http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-19799

Lotfi, S., & Alizadeh, T. (2024). Identifying and monitoring urban growth and expansion changes using spectral-unmixing of remote sensing imagery and geographic information systems techniques at the micro level, (A case study of Amol city). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 16(3), 147-164. (In Persian). doi: 10.48308/gisj.2023.10372710.48308/GISJ.2023.103727

Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., & Blei, A. M. (2012). *Atlas of urban expansion*. Lincoln Institute of Land Policy.

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), 107–153. https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001

Ahmadi, F., Yarahmadi, D., & Mirhashemi, H. (2023). Revealing the impact of Khorramabad urban expansion on urban temperature changes using Landsat satellite thermal images. *Climate Change Research*, 4(15), 23–38. (In Persian).

Akbari, A., Eskandari Sani, M., & Esmaeilnezhad, M. (2022). Effective indicators on the realization of land use pattern and future expansion of Zahedan urban areas in its comprehensive development plan. *GeoResearch*, 37(4), 517–527. (In Persian). https://georesearch.ir/article-1-1393-fa.html

Ali, S. A., Khan, N. U., & Hussain, M. (2020). Assessment of bare land dynamics using geospatial techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 256.

Anindea, A. (2024). Transferring UAVs to Russia: Navigating strategic implications for Iran.

Bahhata, B. (2010). Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data. *Springer*.

Baker, J., Van Der Leeuw, S., & Van Os, B. (2015). Landscape metrics for assessing ecological connectivity and fragmentation. *Ecological Indicators*, 58, 192–198.

Bagheri Dolatabadi, A., & Kamrava, M. (2024). Iran's changing naval strategy in the Persian Gulf: Motives and features. *British Journal of Middle Eastern Studies*, 51(1), 131–148.

Cheng, J., Wang, S., & Song, W. (2014). A new index for assessing landscape fragmentation based on the concept of nearest neighbor distance. *Ecological Indicators*, 45, 253–257.

Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). Loose coupling of geographic information systems and cellular automata for modeling land use change. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699–714.

Cornthwaite, J. L. (2019). Can we shoot down that drone? An examination of international law issues associated with the use of territorially intrusive aerial and maritime surveillance drones in peacetime. *Cornell International Law Journal*, 52, 475.

Elhakeem, A., & Wrigley, N. (2012). Measuring the spatial distribution of land use categories: A case study of the Greater Cairo urban area, Egypt. *Landscape and Urban Planning*, 106(1–2), 134–141.

Forman, R. T. T. (1995). *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press.

Gong, J., Hu, Z., Chen, W., Liu, Y., & Wang, J. (2018). Urban expansion dynamics and modes in metropolitan Guangzhou, China. *Land Use Policy*, 72, 100–109. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.025

Hakimi, H., & Mostafaei Journi, F. (2024). A temporal–spatial analysis of the expansion of Urmia city during the past two decades with an emphasis on identifying its influential components. *Urban Space and Social Life*, 3(8), 62–75. (In Persian). https://doi.org/10.22034/jprd.2024.59661.1071

He, C., Liu, Z., Gou, S., Zhang, Q., Zhang, J., & Xu, L. (2019). Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network. *Environmental Research Letters*, 14(3). https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf936

Herold, M., Goldston, N. C., & Clark, C. (2003). The spatiotemporal form of environment, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 286–302.

Huang, B., Zhao, B., Song, Y., Zhang, J., Wang, S., Liu, Z. Z., & Huang, J. (2019). Urban land use mapping using a combination of spectral, spatial, and temporal information of Landsat 8 OLI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 251–264.

Huang, S. L., Lee, Y. C., Budd, W. W., & Yang, M. C. (2012). Analysis of changes in farm pond network connectivity in the peri-urban landscape of the Taoyuan area, Taiwan. *Environmental Management*, 49, 915–928.

Jokar Arsanjani, J., Helbich, M., Kainz, W., & Darvishi Boloorani, A. (2015). Integration of logistic regression, GIS, and remote sensing for land-use change modeling. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(3), 406–423.

Li, J., Fang, W., Wang, T., Qureshi, S., Alatalo, J. M., & Bai, Y. (2017). Correlations between socio-economic drivers and indicators of urban expansion: Evidence from the heavily urbanised Shanghai metropolitan area, China. *Sustainability*, 9(7). https://doi.org/10.3390/su9071199

Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tan, Z., Li, S., & Ai, B. (2010). A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 25(5), 671–682.

Lotfi, S., & Alizadeh, T. (2024). Identifying and monitoring urban growth and expansion changes using spectral-unmixing of remote sensing imagery and geographical information systems techniques at the micro level (A case study of Amol city). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 16(3), 147–164. (In Persian). https://doi.org/10.48308/gisj.2023.103727

Mansouri, M., Roradeh, H., & Safarrad, T. (2024). Analyzing the impact of urban development on the spatial changes of the thermal island of Sari City. *Urban Structure and Function Studies*, 11(38), 215–240. (In Persian). https://doi.org/10.22080/usfs.2023.25957.2383

Mitra Ansari, M., Vali Shareeat Panahi, M., Malek Hoseini, A., & Modiri, M. (2019). Analysis of the pattern of urban expansion in mid-range cities using quantitative models: Case study of Malayer City. *Amayesh Journal*, 11(43), 147–182. (In Persian).

Movahed, A., Mostafavi, S., & Ahmadi, M. (2014). Explaining the pattern of spatial–physical expansion of Saqqez from sustainable urban perspective. *Urban Structure and Function Studies*, 2(5), 55–75. (In Persian).

National Development and Reform Commission (NDRE). (2022). Key tasks of new urbanization and urban-rural integration development in 2022. *NDRE: Beijing, China*. http://www.gov.cn/zhengce/-zhengceku/2022-03/22/content_5680416.htm

Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2021). Application of change detection techniques for land-use/land-cover mapping in urban environments. *Remote Sensing*, 13(3), 412.

Rawat, J. S., & Kumar, M. (2015). Monitoring land-use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh Block, District Almora, Uttarakhand, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 77–84.

Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PLOS ONE*, 6(8), e23777.

Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083–16088.

Shi, Y. Q., Sun, X., Zhu, X. D., Li, Y. F., & Mei, L. Y. (2012). Characterizing growth types and analyzing growth density distribution in response to urban growth patterns in peri-urban areas of Lianyungang City. *Landscape and Urban Planning*, 105, 425–433. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.01.017

Woldesemayat, E. M., & Genovese, P. V. (2021). Monitoring urban expansion and urban green spaces change in Addis Ababa: Directional and zonal analysis integrated with landscape expansion index. *Forests*, 12(4), 389. https://doi.org/10.3390/f12040389

Yuan, F., Sawya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. (2020). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98(2–3), 317–328.

Zho, H., Hung, X., & Zhung, Q. (2019). Agricultural land-use change and its driving forces in China. *Land Use Policy*, 85, 135–143.