

## Land Use Change Analysis and Sustainability Assessment of Urban Landscape with Multitemporal Satellite Imagery Processing Approach (Case Study: Erbil City, Iraq)

Ebrahim Sami<sup>1</sup>, Omid Mobaraki<sup>2</sup>, Amer Shahazeh Lahib<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Geography and Urban Planning, Maragheh University, Maragheh, Iran. E-mail: [sami@maragheh.ac.ir](mailto:sami@maragheh.ac.ir)
2. Associate Professor, Department of Geography and Urban Planning, University of Maragheh, Maragheh, Iran. E-mail: [o.mobaraki@maragheh.ac.ir](mailto:o.mobaraki@maragheh.ac.ir)
3. Master's student, Department of Geography and Urban Planning, Maragheh University, Maragheh, Iran. E-mail: [a.sh.lahib@gmail.com](mailto:a.sh.lahib@gmail.com)

### Article Info

### ABSTRACT

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: 13 August 2025

Revised: 21 November 2025

Accepted: 29 December 2025

Published: 4 January 2026

#### Keywords:

landscape sustainability,  
object-oriented analysis,  
Erbil city,  
landscape metrics.

**Objective:** The city of Erbil, as one of the oldest and most historic human settlements in the world, has experienced significant changes in the last few decades, which has been mainly affected by rapid urban and economic developments caused by political and social factors. This research analyzes land use changes and assesses the sustainability of the urban landscape of Erbil using multitemporal satellite images, and specifically identifies the urban growth trend and its effects on spatial structure and land use in the period 2000 to 2024.

**Methods:** The research was conducted using Landsat 5, 8, and 9 satellite images, and after preprocessing the images with ENVI software, the object-oriented analysis (OBIA) method and eCognition software were used to classify different land uses. The classification results were transferred to Fragstats software and landscape analyses were performed based on different metrics. The classification accuracy was also evaluated using random reference points and calculating the overall accuracy and kappa coefficient indices.

**Results:** The results indicate significant changes in the spatial structure and land use of Erbil city during the period 2000 to 2024; the urban built-up areas increased from 89.12 km<sup>2</sup> (equivalent to 6.18% of the total area) in 2000 to 347.81 km<sup>2</sup> (equivalent to 24.11%) in 2024. In contrast, agricultural lands and forests decreased, such that agricultural lands decreased from 86.59 to 46.94 km<sup>2</sup> and forests decreased from 27.13 to 17.19 km<sup>2</sup>. Also, although green spaces have increased, they still constitute a small share of the spatial structure of the city. The analysis of landscape metrics shows that CLUMPY and COHESION indices have continuously increased in human uses, while a decrease has been observed in natural uses.

**Conclusions:** These changes indicate the trend of environmental instability and unplanned urban development, which highlights the need for smart land use management and restoration of natural covers.

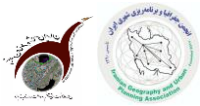
**Cite this article:** Sami, E., Mobaraki, O., & Shahazeh Lahib, A. (2026). Land Use Change Analysis and Sustainability Assessment of Urban Landscape with Multitemporal Satellite Imagery Processing Approach (Case Study: Erbil City, Iraq). *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 6 (18), 97-121. <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.68638.1145>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.68638.1145>

Publisher: University of Tabriz.



## Introduction

Erbil, one of the world's oldest continuously inhabited cities, has undergone significant transformations in its spatial structure in recent decades due to rapid economic, demographic, and political developments. The rapid urban expansion, often disregarding sustainable planning principles, has led to the loss of agricultural land, degradation of natural vegetation, and an increase in urban heat islands. Therefore, analyzing land-use changes and assessing urban landscape sustainability using remote sensing and GIS tools can provide valuable insights for optimal land-use planning and sustainable management of the region's natural resources. This study aims to examine the spatiotemporal changes in land use within Erbil city and evaluate landscape sustainability indicators between 2000 and 2024.

## Materials and Methods

This study utilized multi-temporal Landsat satellite imagery, including Landsat 5 (TM), Landsat 8 (OLI), and Landsat 9, for the years 2000, 2008, 2016, and 2024. After initial preprocessing steps, such as image subsetting and band compositing in ENVI software, the classification process was carried out using Object-Based Image Analysis (OBIA) in eCognition software. The land use classes extracted included built-up areas, cultivated and fallow agricultural land, forest, green spaces, and barren land. To assess classification accuracy, random control points were used, along with the calculation of Overall Accuracy and the Kappa Coefficient. Additionally, FRAGSTATS software was employed to quantify land use/land cover changes in Erbil City and its surrounding areas. Following the object-based classification of satellite imagery, 12 class-level metrics and 17 landscape-level metrics—such as CA, NP, LPI, CLUMPY, IJI, COHESION, MESH, and others—were selected. These metrics reflect the composition and configuration characteristics of the landscape.

## Results

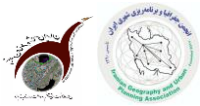
The classification results revealed that built-up urban areas in Erbil expanded from 89.12 km<sup>2</sup> (6.18% of the total area) in 2000 to 347.81 km<sup>2</sup> (24.11%) by 2024. During this period, agricultural land decreased from 86.59 km<sup>2</sup> to 46.94 km<sup>2</sup>, while forested areas shrank from 27.13 km<sup>2</sup> to 17.19 km<sup>2</sup>. Although green spaces saw a slight increase, they still occupy a marginal share of the city's spatial structure. Landscape metrics analysis indicates a steady rise in CLUMPY and COHESION indices for human-dominated land uses, contrasting with a decline in natural land covers. These shifts highlight unchecked urban sprawl and worsening ecological instability, underscoring the urgent need for smarter land-use management and natural habitat restoration. Changes in LSI, IJI, and AI metrics further suggest the city has transitioned from a highly fragmented landscape to a more regular—yet less diverse—spatial pattern. This trend has eroded urban resilience against environmental threats such as droughts, dust storms, and floods.

## Conclusion

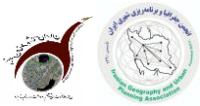
The results of this study indicate that Erbil's current urban expansion is heading toward spatial instability and environmental degradation due to its neglect of ecological, social, and even economic principles in land management. Future development patterns must shift toward an integrated approach to urban planning—one that prioritizes environmental sustainability. These spatial transformations reflect growing ecological instability in the city's landscape, signaling an urgent need for municipal authorities to intervene. Key measures should include restoring natural vegetation, controlling unchecked urban sprawl, and implementing smarter land-use management strategies. Analytical techniques such as landscape structure assessment and quantitative metrics can serve as valuable tools for monitoring and guiding future spatial planning in rapidly growing cities like Erbil. To ensure sustainable development, targeted use of vacant land for smart urban growth should be prioritized, alongside expanding green spaces, rehabilitating forested areas, and protecting agricultural land. Ultimately, achieving a balanced and sustainable future for Erbil will require close collaboration between local institutions, urban planners, and citizens—ensuring that growth, spatial equity, and ecological health are all properly addressed.

## References

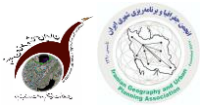
- Abebe, G., Getachew, D., & Ewunetu, A. (2022). Analysing land use/land cover changes and its dynamics using remote sensing and GIS in Gubalafito district, Northeastern Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 4(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04915-8>
- Anabastani, A. A., Anabastani, Z., and Akbari, A. (2021). Analysis of structural changes in the landscape and



- urban development patterns using multi-temporal satellite images - Case study: Mashhad metropolis. *Quarterly Scientific-Research Journal of Geographic Information "Sepehr"*, 30(119), 189-206. doi: [10.22131/sepehr.2021.247894](https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.247894). (In Persian).
- Arora, A., Pandey, M., Mishra, V. N., Kumar, R., Rai, P. K., Costache, R., ... & Di, L. (2021). Comparative evaluation of geospatial scenario-based land change simulation models using landscape metrics. *Ecological Indicators*, 128, 107810. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107810>
- Aslam, R. W., Naz, I., Quddoos, A., & Quddusi, M. R. (2024). Assessing climatic impacts on land use and land cover dynamics in Peshawar, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan: a remote sensing and GIS approach. *GeoJournal*, 89(5), 202. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10708-024-11203-6>
- Bokhari, S. A., Saqib, Z., Amir, S., Naseer, S., Shafiq, M., Ali, A., ... & Hamam, H. (2022). Assessing land cover transformation for urban environmental sustainability through satellite sensing. *Sustainability*, 14(5), 2810. <https://doi.org/10.3390/su14052810>
- Dhanaraj, K., & Angadi, D. P. (2021). Urban expansion quantification from remote sensing data for sustainable land-use planning in Mangaluru, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100602. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100602>
- Drăguț, L. & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81(3), 330-344. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013>
- Fassnacht, F. E., Hartig, F., Latifi, H., Berger, C., Hernández, J., Corvalán, P. & Koch, B. (2014). Importance of sample size, data type and prediction method for remote sensing-based estimations of aboveground forest biomass. *Remote Sensing of Environment*, 154, 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.028>
- Flamenco-Sandoval, A., Ramos, M. M., & Masera, O. R. (2007). Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological conservation*, 138(1-2), 131-145. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.04.022>
- Gardi, S. and Asfahani, J. 2019. Subsurface tectonic characterizations by the use of geo-electrical resistivity technique and their implications on environmental soil and groundwater at Erbil dumpsite, west of Erbil city–Iraqi Kurdistan region. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 49(3), 325-354. <https://doi.org/10.2478/congeo-2019-0017>
- Ghobadi, M., & Ahmadipari, M. (2023). Spatial analysis of land use/land cover (LULC) changes to support sustainable land management based on landscape metrics. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 7(1). Doi: [10.22059/eoge.2023.357777.1140](https://doi.org/10.22059/eoge.2023.357777.1140)
- Hosseiniabadi, S., and Akbari, A. (2023). Analysis of land use and landscape changes in urban areas and their surroundings: a case study: Shahrood city. *Sustainable City Journal*, 6(3), 79-98. Doi: [10.22034/jsc.2024.-367302.1663](https://doi.org/10.22034/jsc.2024.-367302.1663). (In Persian).
- Kadioğulları, A. İ. (2013). Assessing implications of land use and land cover changes in forest ecosystems of NE Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 2095-2106. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-012-2691-0>
- Kaviani, A., Farhodi, R., & Rajabi, A. (2015). Analysis of Tehran's urban growth pattern using a landscape ecology approach. *Urban Planning Geographical Research Journal*, 3(4), 407–429. Doi: [10.22059/jurban-geo.2015.57410](https://doi.org/10.22059/jurban-geo.2015.57410). (in Persian)
- Khoshnaw, R. (2023). Evaluating Mixed Land Use and Connectivity: A Case Study of Five Neighborhoods in Erbil City, Iraq. *Sustainability*, 15(19), 14265. <https://doi.org/10.3390/su151914265>.
- Leitão, A. B., Miller, J., Ahern, J., & McGarigal, K. (2012). *Measuring landscapes: A planner's handbook*. Island press.
- Mahiini, A. (2007). Landscape and erodibility criteria as two quantitative index categories for rapid assessment of the effects of development projects. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 14(1) 48-63 SID. <https://sid.ir/paper/433674/fa>. (In Persian).
- Mahmoodzadeh, H. and Masoudi, H. (2019). An analysis of structural changes in the landscape of Tabriz



- metropolis using the principles of landscape ecology and with an emphasis on the concept of continuity. *Scientific Journal of "Land Planning"*, 11(2), 179-204. doi: [10.22059/jtcp.2019.288093.670019](https://doi.org/10.22059/jtcp.2019.288093.670019). (In Persian).
- McGarigal K., SA Cushman, and E Ene. 2025. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors; available at the following web site: <https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., & Ene, E. (2002). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. *Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst*. Available at the following web site: [www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html](http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html),6.
- Memarzadeh Kiani, A., and Daneshvar Fattah, F. (2023). Investigating the trend of agricultural land use changes in Shahrriar County using remote sensing and GIS. *Journal of Natural Environment*, 76(4), 659-674. Doi: [10.22059/jne.2023.354658.2522](https://doi.org/10.22059/jne.2023.354658.2522). (In Persian).
- Mohammad, M. S., Elmastas, N., & Abdullah, H. (2021). *Temporal change of urban land use: the case of Erbil city*. Ecology, Environment and Conservation Paper, 27, 48-58.
- Mohammed, M. G. (2023). Land Use Land Cover Changes Detection of Erbil City Using GIS and Remote Sensing. *PTJ*, 13(1), 1044. <https://doi.org/10.25156/ptj.v13i1.1044>
- Navulur, K. (2006). *Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420043075>
- Nazmfar, H., and Shirzad, M. (2024). Monitoring changes in the landscape of the city and its surrounding environment based on the analysis of landscape metrics (case study: Ardabil City). *Environmental Science Studies*, 9(4), 9740-9729. doi: [10.22034/jess.2023.365413.1887](https://doi.org/10.22034/jess.2023.365413.1887). (In Persian).
- Norouzi Golekhalaei, S., Hatami, A. and S., Parvizi Marivani. (2022). Analysis of spatial growth patterns of Kermanshah city with a landscape ecology approach. *Scientific Journal of Physical Development Planning*, 7th year, No. 3 (new series), 27th series, pp. 64-49. Doi: [10.30473/psp.2022.62702.2573](https://doi.org/10.30473/psp.2022.62702.2573). (In Persian).
- Perregrini, D., & Casella, V. (2022). *Creation of Soil Permeability Maps Trough Obia Classification of Very High-Resolution Satellite Images*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 159-166. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-159-2022>
- Radin Majd, G., Jozi, S. A., Hejazi, R., Amiri, M. J. and H. R. Ghafarzadeh. (2022). Investigating the trend of changes in landscape indicators using the urban-rural gradient analysis method (case study: Tehran metropolis). *Land Planning*, 17th volume, autumn and winter 1400, No. 2 (serial 25). doi: [10.22059/jtcp.2021.326563.670236](https://doi.org/10.22059/jtcp.2021.326563.670236). (In Persian).
- Sarif, M. O., & Gupta, R. D. (2022). Spatiotemporal mapping of Land Use/Land Cover dynamics using Remote Sensing and GIS approach: a case study of Prayagraj City, India (1988–2018). *Environment, Development and Sustainability*, 24(1), 888-920. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-021-01475-0>
- Sattar, T., Mirza, N. F., Javed, M. A., Nasar-u-Minallah, M., & Malik, S. (2025). Changing pattern of urban landscape and its impact on thermal environment of Lahore; Implications for climate change and sustainable development. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(2), 151. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-024-13559-1>
- Schwarz, N. (2010). Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and urban planning*, 96(1), 29-47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.01.007>
- Talema, A. H., & Nigusie, W. B. (2024). Spatio-temporal analysis of urban expansion using remote sensing data and GIS for the sustainable management of urban land: the case of Burayu, Ethiopia. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 35(5), 1096-1117. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2023-0196>
- Varol, B., Szabo, S., Topaloğlu, R. H., Aksu, G. A., & Sertel, E. (2024). Analysis of the association between image resolution and landscape metrics using multi-sensor LULC maps. *Journal of Environmental Planning and Management*, 67(10), 2281-2302. <https://doi.org/10.1080/09640568.2023.2185507>



- Wiatkowska, B., Słodczyk, J., & Stokowska, A. (2021). Spatial-temporal land use and land cover changes in urban areas using remote sensing images and GIS analysis: The case study of Opole, Poland. *Geosciences*, 11(8), 312. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080312>
- Wijaya, A., Budiharto, R. S., Tosiani, A., Murdiyarso, D. & Verchot, L. V. (2015). Assessment of Large Scale Land Cover Change Classifications and Drivers of Deforestation in Indonesia. The International Archives of Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(7), 557-573. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-557-2015>
- Wu, J., Jenerette, G. D., Buyantuyev, A., & Redman, C. L. (2011). Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. *Ecological Complexity*, 8(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2010.03.002>
- Yaghoobi, M., Vafaenejad, A., Moradi, H., & Hashemi, H. (2022). Analysis of landscape composition and configuration based on LULC change modeling. *Sustainability*, 14(20), 13070. <https://doi.org/10.3390/su142013070>
- Yang, X., Blower, J. D., Bastin, L., Lush, V., Zabala, A., Masó, J., ... & Lumsden, J. (2013). An integrated view of data quality in Earth observation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1983), 20120072. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0072>
- Yazdanpanah, M., Yavari, A., Zavarat, L., Al-Mohammad, S. (2015). *Evaluation of urban green infrastructures for their gradual improvement in the landscape of Tehran*, Environment, Volume 41, No. 3 Doi; [10.22059/jes.2015.55900](https://doi.org/10.22059/jes.2015.55900) .(In Persian).

## تحلیل تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی پایداری سیمای سرزمین شهری با رویکرد پردازش تصاویر چندزمانه ماهواره ای (مطالعه موردی: شهر اربیل عراق)

ابراهیم سامی<sup>1</sup>✉، امید مبارکی<sup>2</sup>، عامر شحاذه لهیب<sup>3</sup>

1. نویسنده مسئول، استادیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: [sami@maragheh.ac.ir](mailto:sami@maragheh.ac.ir)
2. دانشیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: [o.mobaraki@maragheh.ac.ir](mailto:o.mobaraki@maragheh.ac.ir)
3. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: [a.sh.lahib@gmail.com](mailto:a.sh.lahib@gmail.com)


### اطلاعات مقاله چکیده

شهر اربیل، به عنوان یکی از قدیمی ترین و تاریخی ترین سکونتگاه های بشری در جهان، در چند دهه اخیر تغییرات قابل توجهی را تجربه کرده است که عمدتاً تحت تأثیر توسعه های سریع شهری و اقتصادی ناشی از عوامل سیاسی و اجتماعی قرار داشته است. این پژوهش به تحلیل تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی پایداری سیمای سرزمین شهری اربیل با استفاده از تصاویر چندزمانه ماهواره ای می پردازد و به طور خاص به شناسایی روند رشد شهری و تأثیرات آن بر ساختار فضایی و کاربری اراضی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ می پردازد. تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست ۵، ۸ و ۹ انجام شده و پس از پیش پردازش تصاویر با نرم افزار ENVI، از روش تحلیل شیء گرا (OBIA) و نرم افزار eCognition برای طبقه بندی کاربری های مختلف استفاده شده است. نتایج طبقه بندی به نرم افزار Fragstats منتقل و تحلیل های سیمای سرزمین بر اساس سنجه های مختلف انجام گردیده است. دقت طبقه بندی نیز با استفاده از نقاط مرجع تصادفی و محاسبه شاخص های دقت کلی و ضریب کاپا ارزیابی شده است. نتایج نشان دهنده تغییرات قابل توجهی در ساختار فضایی و کاربری اراضی شهر اربیل طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ است. مناطق ساخته شده شهری از ۸۹/۱۲ کیلومتر مربع (معادل ۶/۱۸٪ از کل منطقه مورد مطالعه) در سال ۲۰۰۰ به ۸۱/۳۴۷ کیلومتر مربع (معادل ۱۱٪/۲۴) در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است. در مقابل، اراضی کشاورزی و جنگل ها کاهش یافته اند، به طوری که اراضی کشاورزی از ۸۶/۵۹ به ۴۶/۹۴ کیلومتر مربع و جنگل ها از ۲۷/۱۳ به ۱۷/۱۹ کیلومتر مربع کاهش یافته اند. همچنین، فضاهای سبز اگرچه افزایش یافته، اما براساس نتایج بدست آمده همچنان سهم اندکی از ساختار فضایی شهر را تشکیل می دهند. تحلیل سنجه های سیمای سرزمین نشان می دهد که شاخص های تجانس لکه ها و شاخص انسجام فضایی در کاربری های انسانی به طور مستمر افزایش یافته اند، در حالی که در کاربری های طبیعی کاهش مشاهده شده است. این تغییرات نشان دهنده روند ناپایداری زیست محیطی و توسعه شهری	نوع مقاله: مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: 1404/05/22	
تاریخ بازنگری: 1404/08/30	
تاریخ پذیرش: 1404/10/08	
تاریخ انتشار: 1404/10/14	
کلیدواژه ها: پایداری سیمای سرزمین، تحلیل شیء گرا، شهر اربیل، سنجه های سیمای سرزمین.	

---

بی‌برنامه است که نیاز به مدیریت هوشمند کاربری زمین و احیای پوشش‌های طبیعی را برجسته می‌سازد.

---

**استناد:** سامی، ابراهیم؛ مبارکی، امید و شحاذه لهیب، عامر (1405). تحلیل تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی پایداری سیمای سرزمین شهری با رویکرد پردازش تصاویر چندزمانه ماهواره ای (مطالعه موردی: شهر اربیل عراق). کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، 6 (18).  
 <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.68638.1145>

تبریز.

دانشگاه

ناشر:

© نویسندگان.

---

## مقدمه

تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین (LULC) بر ساختار، عملکرد و ظرفیت‌های اکوسیستم‌های طبیعی تأثیر می‌گذارد. این تغییرات آثار غیرقابل انکاری بر محیط‌های طبیعی و اجتماعی در سطح محلی به جا می‌گذارد (بخارایی<sup>1</sup> و همکاران، 2022). بنابراین، ارزیابی‌های مبتنی بر تحولات پوشش زمین ضروری است تا جهت‌گیری مداخلات انسانی در محیط‌های زمینی تنظیم شود. فرآیند تغییرات پوشش/کلبری اراضی از زمانی آغاز شد که انسان‌ها تلاش کردند محیط خود را تنظیم کنند و تحولات اجتماعی-فرهنگی مرتبط مانند رشد جمعیت، سازمان اجتماعی و افزایش تمرکز بر تأمین نیازهای بقا، منجر به پدیده اسکان دائمی شد (ویاتکوسکا<sup>2</sup> و همکاران، 2021). رشد و گسترش بعدی این اسکان‌ها، تغییرات LULC را تحریک کرد. این تحولات فشارهایی بر تعادل اکولوژیک وارد کرده و برای محیط‌های طبیعی و اجتماعی استرسزا می‌باشد (آببه<sup>3</sup> و همکاران، 2022). تأثیرات ناشی از شهرنشینی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه بیشتر نمایان است (اسلام<sup>4</sup> و همکاران، 2024). مهاجرت از مناطق روستایی به شهری به دینامیک‌های تاریخی، اجتماعی، اقتصادی، محیطی و ژئو استراتژیک خاص مناطق شهری نسبت داده می‌شود. با این حال، شهرنشینی به سمت اسکان‌های بزرگ شهری متمایل است. این تمایلات در رشد اقتصادی متمرکز بر شهر، صنعتی‌سازی و تمرکز بیشتر بر توسعه زیرساخت‌ها در مناطق بزرگ شهری نهفته است (شریف و گوپتا<sup>5</sup>، 2022). در نتیجه، ورود مهاجران فشارهایی بر منابع زمین و محیط زیست در این زمینه‌ها وارد می‌کند. تقاضاهای همراه برای منابع زمین فشارهایی برای گسترش برنامه‌ریزی‌شده و غیر برنامه‌ریزی‌شده شهری و تغییرات همزمان در پوشش زمین مناطق شهری به وجود می‌آورد. آثار ناشی از این تغییرات به‌صورت گسترش غیرقابل کنترل شهری و رشد عمودی در ساختارهای شهری قابل مشاهده است. بنابراین، تمایل به ارزیابی تغییرات LULC در مناطق شهری در حال افزایش است. این وضعیت نیازمند شناسایی عواملی است که مسئول این تغییرات LULC عمدی و غیرعمدی هستند. همچنین، ارزیابی سرعت، مقیاس و جهت‌گیری‌های این تغییرات در مناطق شهری ضروری است (بخارایی و همکاران، 2022). برای دستیابی به این هدف، دقت در اندازه‌گیری برای استنتاج‌های واقعی الزامی است. پیشرفت‌های اخیر در سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزارهای قابل اعتمادی برای نشان دادن و شناسایی تغییرات فضایی-زمانی در LULC ارائه می‌دهند (دهناراج و آنگادی<sup>6</sup>، 2021). علاوه بر این، آرشیوهای دیجیتالی داده‌های سنجش از دور نیز امکان کمی‌سازی این

1. Bokhari
2. Wiatkowska
3. Abebe
4. Aslam
5. Gupta & Sarif
6. Dhanaraj & Angadi

تغییرات در *LULC* را فراهم می‌آورد. این ارزیابی‌ها برای سیاست‌گذاری منطقی به منظور کاهش تأثیرات شهرنشینی از طریق برنامه‌ریزی و ارزیابی کاربری زمین ضروری است. علاوه بر کاربری اراضی، استفاده از سنج‌های سیمای سرزمین در ارزیابی روند تغییرات کاربری، توانایی برای تشریح کمی ساختار سیمای سرزمین، پیش شرط مطالعه عملکرد و ترغیب ساختار در سیمای سرزمین است و سنج‌های مختلفی برای نیل به هدف، در اکولوژی سیمای سرزمین مورد استفاده قرار می‌گیرد (ام سی گاریگال<sup>1</sup> و همکاران، 2002). از سنج‌های سیمای سرزمین می‌توان در تعیین کاهش کیفیت وضعیت کلی محیط‌زیست در اثر توسعه انسانی سود جست. این سنج‌ها می‌توانند برآوردهایی کلی از نظر تغییرات کارکرد اکوسیستم‌ها نیز به عمل آورد (ماهینی، 1386: 48-63). این سنج‌ها ساختار را کمی می‌کنند و با برقراری ارتباط میان ساختار و کارکرد سیمای سرزمین، امکان مدلسازی را به برنامه‌ریزان می‌دهند، بنابراین امکان پیش‌بینی تأثیر اقدامات برنامه‌ریزی در سیستم‌های اکولوژیک را فراهم می‌کنند، به رغم اهمیت سنج‌ها در کمی کردن خصوصیات ساختار سیمای سرزمین، استفاده از آنها بیشتر در پژوهش‌های اکولوژی است و در برنامه‌ریزی کمتر استفاده شده‌اند (یزدان پناه و همکاران، 1394: 614).

تحقیق حاضر بر تغییرات *LULC* در اربیل، عراق تمرکز دارد. این شهر به عنوان یک مرکز شهری در حال رشد، چالش‌های خاصی را در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع زمین تجربه می‌کند. این مطالعه به دنبال ارزیابی تأثیرات شهرنشینی بر تغییرات *LULC* در اربیل از سال 2000 تا 2024 است و به بررسی پایداری سیمای سرزمین شهری با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و *GIS* می‌پردازد. این مطالعه به شناسایی و کمی‌سازی تغییرات در دسته‌های مختلف *LULC* در این بازه زمانی می‌پردازد و به درک بهتر چالش‌های موجود در مدیریت پایدار منابع زمین کمک می‌کند. با توجه به رشد سریع شهرنشینی و تغییرات گسترده کاربری اراضی در مناطق شهری، درک روندهای تغییرات و ارزیابی اثرات این تغییرات بر محیط زیست و پایداری شهری از اهمیت بالایی برخوردار است. تغییر کاربری اراضی به عنوان یک پدیده پیچیده و چندوجهی، به‌ویژه در دهه‌های اخیر و در پی روند سریع شهرنشینی و صنعتی‌سازی در کشورهای در حال توسعه تأثیرات عمیق و گسترده‌ای بر کیفیت محیط‌زیست و سیمای سرزمین دارد (دهناراج و آنگادی، 2021). با اینکه مناطق شهری تنها سه درصد از سطح زمین را اشغال می‌کنند (اسلام و همکاران، 2024)، اما آهنگ گسترش این مناطق بسیار شتابان است و فراتر از روند طبیعی توسعه فضایی رخ می‌دهد (هو و همکاران<sup>2</sup>، 2025)، که تأثیرات ملموسی بر کاربری زمین و اکوسیستم‌ها به دنبال دارد. جدول 1، پیشینه پژوهش‌های مختلفی را در زمینه تغییرات کاربری اراضی و تأثیرات آن بر سیمای سرزمین و محیط زیست ارائه می‌دهد. این

پژوهش‌ها به تحلیل روندهای تغییر کاربری اراضی در مناطق مختلف، از جمله شهرستان شهریار، شاهرود، اردبیل، و اربیل پرداخته و نتایج کلیدی آن‌ها نشان‌دهنده کاهش اراضی سبز، افزایش کاربری‌های ساخته‌شده، و تأثیرات اقلیمی بر دینامیک‌های کاربری اراضی است. به‌ویژه، پژوهش‌های اخیر به شناسایی الگوهای تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها و ضرورت حفظ فضاهای سبز و مدیریت پایدار اراضی توجه دارند. در مقایسه با این پژوهش‌ها، پژوهش ما با تمرکز بر تحلیل تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی پایداری سیمای سرزمین شهری در اربیل عراق، از رویکرد پردازش تصاویر چندزمانه ماهواره‌ای بهره می‌برد. این رویکرد این امکان را می‌دهد که تغییرات کاربری را با دقت بیشتری شناسایی و روندهای تاریخی را تحلیل کرده و در نهایت به مدیریت پایدارتر اراضی و حفظ کیفیت محیط‌زیست کمک کرد. خلاصه بررسی منابع در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1. پیشینه های پژوهش

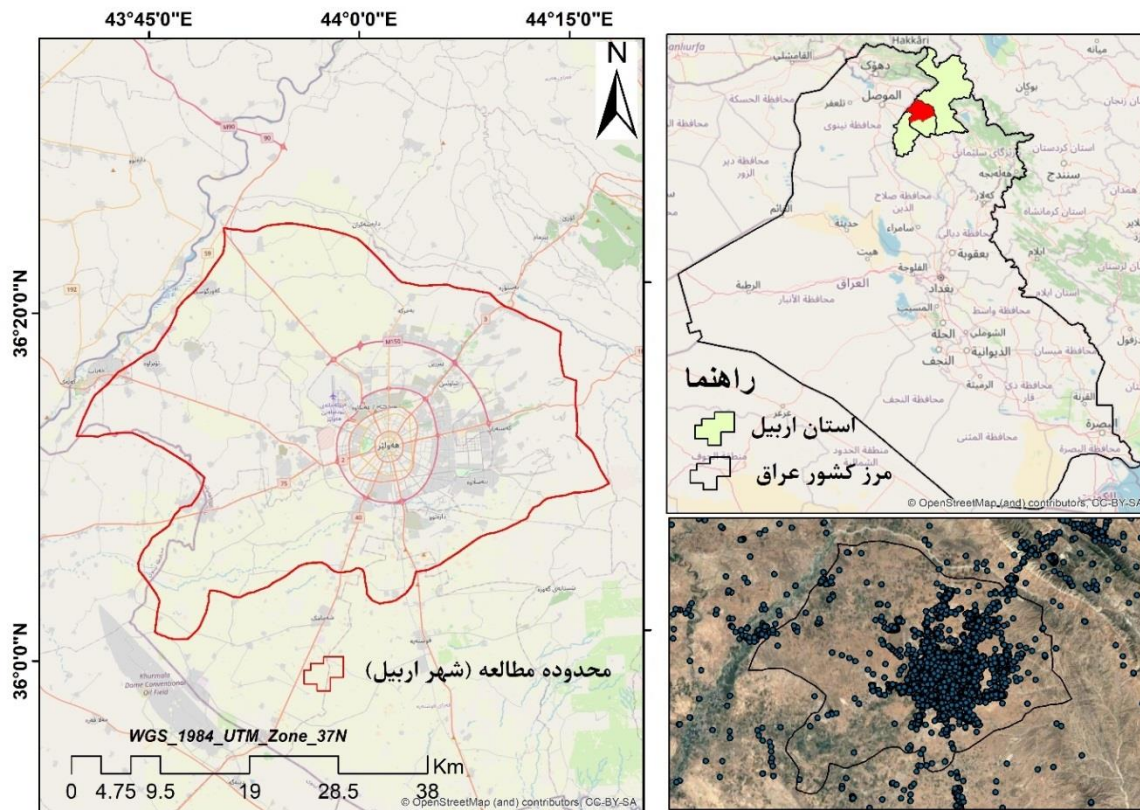
پژوهشگر (سال)	عنوان پژوهش	محتوا و نتایج کلیدی
معمارزاده کیانی و دانشور فتاح (1402)	بررسی روند تغییرات کاربری اراضی کشاورزی شهرستان شهریار با استفاده از سنجش از راه دور و GIS	تحلیل تغییرات کاربری اراضی کشاورزی طی 30 سال، کاهش اراضی باغی و افزایش اراضی زراعت آبی-دیمی. تأثیر تغییرات اقلیمی بر فعالیت‌های زراعی مورد بررسی قرار گرفته است.
حسین آبادی و اکبری (1403)	تحلیل تغییرات کاربری اراضی و سیمای سرزمین در مناطق شهری و پیرامون آن‌ها: مطالعه موردی شهر شاهرود	بررسی تغییرات کاربری اراضی در شاهرود از 1379 تا 1400 و پیش‌بینی برای 1410. افزایش کاربری‌های محیط ساخته‌شده و کشاورزی، کاهش اراضی بایر و تغییر در سنج‌های اکولوژی سرزمین.
نظم‌فر و شیرزاد (1403)	بررسی تغییرات سیمای شهر اردبیل و محیط پیرامون آن در یک دهه اخیر (2011-2021)	تحلیل تغییرات کاربری اراضی در اردبیل و تأثیرات آن بر سیمای سرزمین و پایداری محیط زیست. نتایج می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی‌های آینده باشد.
رباز خوشناو (2023)	ارزیابی اختلاط کاربری و پیوستگی: مطالعه موردی پنج محله در شهر اربیل، عراق	بررسی الگوی توسعه شهری در اربیل و تأثیر آن بر کیفیت زندگی. محلات قدیمی‌تر با ساختار نامنظم از پیوستگی بالاتری برخوردارند.
محمد جی (2023)	تشخیص تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین شهر اربیل با استفاده از GIS و سنجش از دور	تحلیل تغییرات پوشش و کاربری اراضی در اربیل طی دو دهه اخیر. بیشترین کاهش مربوط به بوته‌زارها و بیشترین افزایش به زمین‌های زراعی و مناطق شهری.
RW Aslam et al (2024)	بررسی تأثیرات اقلیمی بر دینامیک‌های کاربری اراضی و پوشش زمین در پیشاور، پاکستان	تحلیل تأثیرات اقلیمی بر کاربری اراضی و شناسایی تغییرات قابل توجه در منظر شهری. ادغام برنامه‌ریزی توسعه شهری با حفظ فضاهای سبز.
Nigusie و Talema (2024)	تحلیل فضایی-زمانی گسترش شهری با استفاده از داده‌های سنجش از دور و GIS برای مدیریت پایدار اراضی شهری	ارزیابی تغییرات کاربری اراضی و مدیریت پایدار در برآیو، اتیوپی. تأکید بر استفاده از داده‌های سنجش از دور در شناسایی الگوهای گسترش شهری.
Sattar et al (2025)	تغییر الگوی منظر شهری و تأثیر آن بر محیط حرارتی لاهور؛ پیامدهایی برای تغییرات اقلیمی و توسعه پایدار	تحلیل تغییرات منظر شهری لاهور و تأثیر آن بر محیط حرارتی. ضرورت حفظ فضاهای سبز و طراحی شهری پایدار.

## داده‌ها و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

اربیل شهری باستانی، سومین شهر بزرگ عراق و یکی از قدیمی‌ترین سکونتگاه‌های مسکونی در جهان است (Almukhtar, 2019). این شهر که هم‌اکنون پایتخت حکومت اقلیم کردستان می‌باشد، به گفته‌ی یونسکو، قدمت سکونت شهری در آن دستکم به ۶۰۰۰ سال قبل از میلاد بازمی‌گردد (Akram et al., 2016). شهر اربیل همراه با دو شهر دهوک و سلیمانیه، سه استان اصلی اقلیم کردستان را تشکیل می‌دهند که در شمال عراق قرار گرفته‌اند. شهر اربیل (عرض جغرافیایی " 35° 45' 00 شمالی - " 36° 24' 00 شمالی و طول جغرافیایی " 43° 35.9' 00 شرقی - " 44° 16' 00 شرقی) در شمال عراق واقع شده است. مرزهای اربیل از شرق به ایران و از شمال به ترکیه می‌رسد (قاردی و افشانی<sup>1</sup>، 2019)، استان اربیل با مساحتی بالغ بر ۱۴۵۴۷ کیلومتر مربع بین دو رودخانه به نام‌های زاب بزرگ در غرب و زاب کوچک در شرق قرار دارد. این استان شامل ۷ شهرستان (اربیل، چومان، کوسنجدق، مخمور، مرگسور، شقلاوه و سوران) است. بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی عراق و میانگین‌های بلندمدت ایستگاه اربیل (دوره آماری 1990-2020)، اقلیم منطقه از نوع مدیترانه‌ای نیمه‌خشک است. دمای هوا در تابستان به بیش از ۴۲٫۲ °C می‌رسد و در زمستان نسبتاً خنک و مرطوب است. میانگین حداکثر دمای سالانه حدود ۲۵٫۲ °C و میانگین حداقل دما ۱۳٫۹ °C گزارش شده است. میانگین بارندگی سالانه بین ۳۷۵ تا ۷۲۴ میلی‌متر متغیر بوده که عمدتاً در فصل زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد (سازمان هواشناسی عراق، 2025).

شکل (1) موقعیت جغرافیایی شهر اربیل را نشان می‌دهد.



شکل 1. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (شهر اربیل)  
Fig 1. Geographical location of the study area (Erbil city)

از نظر موقعیت جغرافیایی، شهر اربیل در میانه استان اربیل قرار دارد، در دامنه کوه‌های کردستان و مشرف به دشت وسیع اربیل. این شهر در نقطه تلاقی چند جاده اصلی در استان کردستان واقع شده و در موقعیتی مرکزی و جنوبی نسبت به عراق قرار دارد (محمد<sup>1</sup> و همکاران، 2021).

### روش تحقیق

#### • انتخاب داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای

جهت تحلیل تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی پایداری سیمای سرزمین شهری اربیل، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای از سری لندست (Landsat) برای بازه زمانی 2000 تا 2024 انتخاب شدند. این تصاویر شامل داده‌های لندست 5، 8 و 9 هستند که به‌طور خاص به‌منظور شناسایی تغییرات کاربری اراضی در مناطق شهری و ارزیابی سیمای سرزمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. فاصله زمانی بین هر تصویر، 8 سال در نظر گرفته شد. این بازه زمانی به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات بلندمدت کاربری اراضی و پایداری سیمای سرزمین انتخاب شده است (جدول 2).

جدول 2. مشخصات داده‌های تصاویر ماهواره‌ای

سیستم تصویر	ردیف و گذر	قدرت تفکیک مکانی	سنجنده	تاریخ	نوع تصویر
WGS_1984_UTM_Zone_38N	169/35	30 متر	TM	20000713	لندست 5
WGS_1984_UTM_Zone_38N	169/35	30 متر	TM	20080719	لندست 5
WGS_1984_UTM_Zone_38N	169/35	30 متر	OLI_TIRS	20160709	لندست 8
WGS_1984_UTM_Zone_38N	169/35	30 متر	OLI_TIRS	20240707	لندست 9

#### • پیش‌پردازش داده‌ها

در مرحله بعدی، پیش‌پردازش‌های اولیه برای داده‌های ماهواره‌ای انجام شد. این پیش‌پردازش‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

- **تلفیق باندهای تصاویر:** به منظور بهبود دقت و کیفیت تحلیل‌ها، باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای لندست برای ترکیب اطلاعات طیفی و ایجاد یک تصویر با کیفیت بالاتر تلفیق شدند.
- **برش محدوده مورد مطالعه:** در این مرحله، تصاویر ماهواره‌ای بر اساس مرزهای جغرافیایی و محدوده دقیق مطالعه (منطقه اربیل) برش داده شدند تا فقط داده‌های مرتبط با منطقه مورد نظر استخراج شوند.
- تمامی این عملیات‌ها در محیط نرم‌افزار **ENVI 5.3** انجام گردید که ابزاری قدرتمند برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای است.

#### • پردازش و استخراج کاربری اراضی

پس از پیش‌پردازش داده‌ها، تصاویر برای انجام طبقه‌بندی تصاویر و استخراج کاربری اراضی به نرم‌افزار *eCognition* وارد شدند. در این نرم‌افزار، از الگوریتم‌های طبقه‌بندی روش تعیین آستانه، برای تفکیک و شناسایی کلاس‌های مختلف کاربری اراضی استفاده گردید. *OBIA*<sup>1</sup> یا تحلیل شیء‌گرایکی از روش‌های رایج طبقه‌بندی در سنجش از دور است که به‌جای استفاده از پیکسل‌ها، از اشیاء تصویری حاصل از تقسیم‌بندی تصویر برای استخراج ویژگی‌ها استفاده می‌کند. در این روش، طبقه‌بندی بر اساس ویژگی‌های استخراج‌شده از هر شیء تصویری، با استفاده از روش‌های آماری یا الگوریتم‌های مختلف انجام می‌شود (Azeez et al., 2022; Rasouli et al., 2022). در روش تعیین آستانه، از شرط آستانه‌گذاری برای کلاس‌بندی اشیاء تصویر استفاده می‌کند و با تعریف شرایط خاصی، هر یک از سگمنت‌های تصویر را به کلاس متعلق به آن شیء تصویری اختصاص می‌دهد. در این پژوهش نیز با توجه به نقاط برداشت زمینی شرایط مربوط به هرکدام از کلاس‌های پوشش اراضی تعیین گشته و جهت استخراج کلاس‌های موردنظر به‌کل تصویر تعمیم داده شده است. آستانه‌هایی که در روش طبقه‌بندی آستانه‌ای (*Threshold Classification*) به‌کار رفتند،

به صورت تجربی و بر اساس دانش تخصصی تفسیرگر تصویر تعیین شدند. با فعال کردن گزینه‌ی "Feature view" در نرم افزار *eCognition*، تمام سگمنت‌ها (*segments*) با درجات مختلف خاکستری نمایش داده می‌شوند که با مقدار ویژگی انتخابی مطابقت دارند؛ در این حالت، آستانه‌ی مناسب از طریق روش آزمون و خطا تعیین می‌شود. (*Husson et al., 2016*).

#### • کارتوگرافی و تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از طبقه‌بندی و استخراج کلاس‌های کاربری مختلف، نتایج حاصل از فرآیند طبقه‌بندی به نرم افزار *ArcGIS* برای انجام عملیات کارتوگرافی و تحلیل‌های مکانی منتقل شدند. در این مرحله:

• ساخت نقشه‌های تغییرات کاربری اراضی: نقشه‌هایی تهیه شد که تغییرات کاربری در طول زمان (2000-2024) را نشان می‌دهند.

• تحلیل فضایی تغییرات کاربری: تحلیل‌های فضایی به منظور شبیه‌سازی روند تغییرات کاربری اراضی در آینده و بررسی اثرات آن بر پایداری سیمای سرزمین انجام شد.

#### • محاسبه سنج‌های سیمای سرزمین

سنج‌ها ابزاری کارآمد برای درک ساختار، کارکرد و پویای سیمای سرزمین هستند و در هدایت توسعه شهری پایدار نقش محوری دارند (کاوایی و همکاران، 1394). سنج‌های سرزمین برای کمی‌سازی خصوصیات فضایی لکه‌ها و کلاس‌ها به کار می‌روند و به شناسایی ناهمگنی‌های فضایی و تغییرات الگوهای رشد شهری کمک می‌کنند. در این مطالعه، با استفاده از نرم افزار *FRAGSTATS* و پس از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با رویکرد شیء‌گرا، 12 سنج در سطح کلاس و 17 سنج در سطح چشم انداز برای کمی‌سازی تغییرات کاربری/پوشش اراضی در شهر اربیل و نواحی پیرامون انتخاب شدند. این سنج‌ها نمایانگر خصوصیات ترکیب و شکل سیمای سرزمین بوده و جزئیات آن‌ها در جدول (3) ارائه شده است.

جدول 3. سنج‌های سیمای سرزمین مورد استفاده در روند پژوهش

ردیف	علامت اختصاری	نام فارسی سنج	فرمول	واحد	دامنه تغییرات
1	CA	مساحت کلاس	$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left( \frac{1}{10000} \right)$	هکتار	$CA > 0$
2	PLAND	درصد پوشش کلاس	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$	درصد	0 - 100
3	NP	تعداد لکه‌ها	$NP = N$	عدد	$NP \geq 1$
4	PD	تراکم لکه‌ها	$PD = \frac{ni}{A} (10000)(100)$	تعداد در هر 10000 هکتار	$PD > 0$
5	LPI	درصد بزرگترین لکه	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} (100)$	درصد	0 - 100
6	LSI	شاخص پیچیدگی لکه	$LSI = \frac{0.25 \sum_{k=1}^m e_{ik}}{\sqrt{A}}$	بدون واحد	$LSI \geq 1$
7	PAFRAC	شاخص فراکتال محیط	$PAFRAC = 2 \ln(p) / \ln(a)$	بدون واحد	1 - 2
8	CLUMPY	شاخص تجانس لکه‌ها	$CLUMPY = (g_{ii} - P_i) / (1 - P_i)$	بدون واحد	$-1 \leq CLUMPY \leq 1$

0 - 100	درصد	$IJI = -\sum \sum e_{ij} \ln(e_{ij})$	شاخص درهم تنیدگی لکه ها	IJI	9
0 - 100	درصد	$COHESION = (1 - \sum (P_{ij} / P_{max})) \times 100$	شاخص انسجام فضایی	COHESION	10
MESH > 0	هکتار	$MESH = \sum a_i^2 / A_t$	میانگین مساحت مؤثر لکه ها	MESH	11
0 - 100	درصد	$AI = (g_{ii} / g_{max}) \times 100$	شاخص یکنواختی	AI	12
0 - 100	درصد	ترکیب فراوانی و مجاورت کلاسها	شاخص پراکنندگی	CONTAG	13
0 - 100	درصد	مجموع مجاورت های داخلی	شاخص مجاورت اصلاح شده	PLADJ	14
0 - 1	بدون واحد	$DIVISION = 1 - \sum (a_i / A_t)^2$	شاخص تقسیم سرزمین	DIVISION	16
SPLIT $\geq 1$	بدون واحد	$SPLIT = A_t^2 / \sum a_i^2$	شاخص قطعه قطعه شدگی	SPLIT	17
SHDI $\geq 0$	بدون واحد	$SHDI = -\sum p_i \ln(p_i)$	شاخص تنوع شانون	SHDI	18
0 - 1	بدون واحد	$SIDI = 1 - \sum p_i^2$	شاخص تنوع سیمپسون	SIDI	19
0 - 1	بدون واحد	$MSDI = \sum SIDI_i / m$	میانگین تنوع سیمپسون	MSDI	20
0 - 1	بدون واحد	$SHEI = SHDI / \ln(m)$	شاخص یکنواختی شانون	SHEI	21
0 - 1	بدون واحد	$SIEI = SIDI / SIDI_{max}$	شاخص یکنواختی سیمپسون	SIEI	22
0 - 1	بدون واحد	$MSIEI = \sum SIEI_i / m$	میانگین یکنواختی سیمپسون	MSIEI	23

منبع : McGarigal et al., 2025

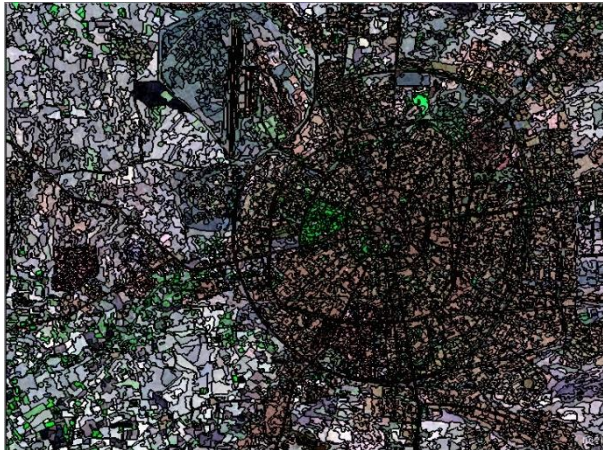


شکل 2. فلوجارت فرآیند تحقیق

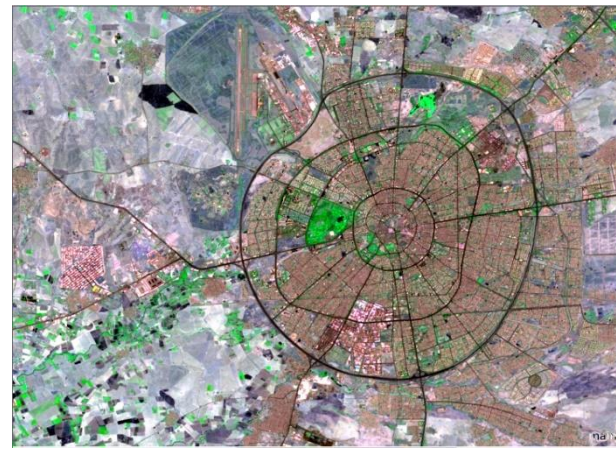
Fig 2. Research Process Flowchart

## نتایج و بحث

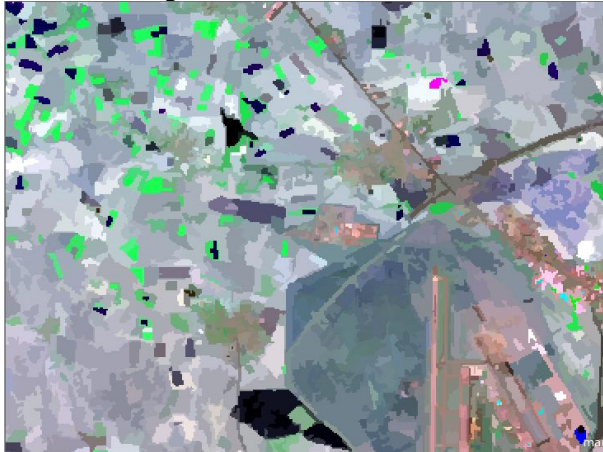
در این بخش نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش آستانه‌گذاری در محیط نرم افزار اکونیشن ارائه شده است و در ادامه به بررسی تغییرات مساحت کاربری اراضی در شهر اربیل در بازه‌های زمانی مختلف از سال 2000 تا 2024 پرداخته شده است جدول (2). جهت پردازش تصاویر، ابتدا ایجاد کوچکترین واحد پردازش (اشیای تصویر) ضروری هست که در پژوهش جاری از الگوریتم قطعه‌بندی چندتفکیکی جهت ایجاد اشیای تصویر استفاده شد (احمدی و همکاران، 1396، Rasouli et al., 2022). برای تصاویر لندست 8 و 9، مقیاس 130، ضریب شکل 0/4 و ضریب فشردگی 0/6 انتخاب شد و کل تصویر به 21718 شیء مختلف تقسیم شد؛ اندازه و شکل این اشیاء به‌خوبی توانسته‌اند عناصر خارج از ناحیه شهری را نیز از یکدیگر متمایز کنند. برای تصاویر لندست 5 سالهای 2000 و 2008 نیز از مقیاس 50 با ضریب شکل 0/5 و ضریب فشردگی 0/5 استفاده شده و تعداد 36631 شیء تصویر (آبجکت) ایجاد شد.



2. قطعه‌بندی تصویر با مقیاس 130، ضریب شکل 0/4 و ضریب فشردگی 0/6



1. تصویر خام لندست 9 سنجنده OLI شهر اربیل عراق



4. قطعات ایجاد شده پس از قطعه‌بندی تصویر

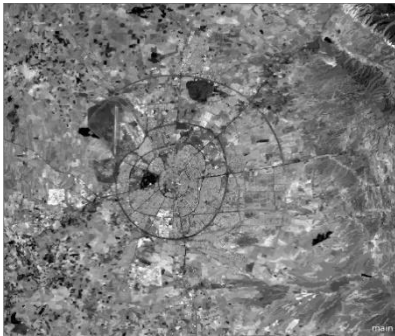


3. تصویر لندست بخشی از منطقه

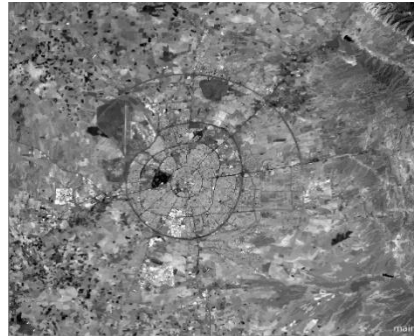
شکل 3. قطعه‌بندی تصویر و ایجاد اشیای پردازش

**Fig 3. Image segmentation and creating processing objects**

پس از ایجاد اشیای تصویر، به بررسی نحوه اعمال الگوریتم‌ها در چارچوب شیء‌گرا پرداخته شده است. هدف، ارائه روش‌هایی برای پیاده‌سازی مؤثر الگوریتم‌ها با استفاده از اصول طراحی شیء‌گرا است، به گونه‌ای که منجر به افزایش انسجام و کاهش وابستگی بین اجزای سیستم شود. در ادامه، چگونگی ادغام الگوریتم‌ها در ساختارهای شیء‌گرا مورد تحلیل قرار می‌گیرد شکل (4)، الگوریتم‌های شیء‌گرا را نشان می‌دهد.



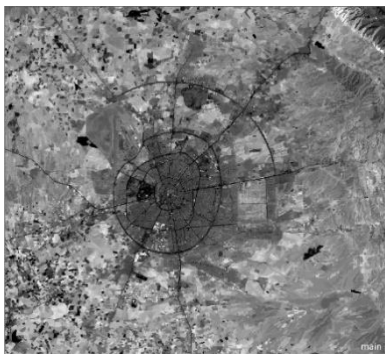
میانگین باند سبز



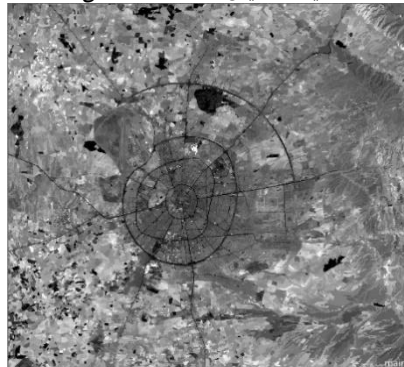
میانگین باند آبی



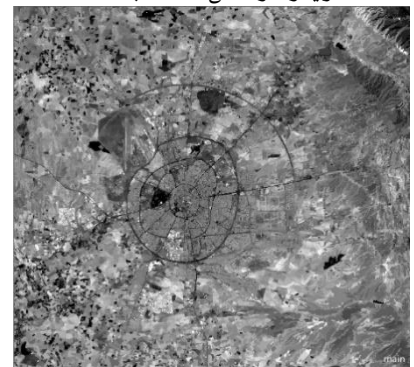
تصویر رنگی کاذب RGB



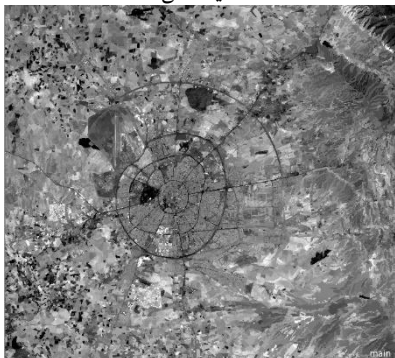
میانگین باند مادون قرمز  
میانی



میانگین باند مادون قرمز  
نزدیک



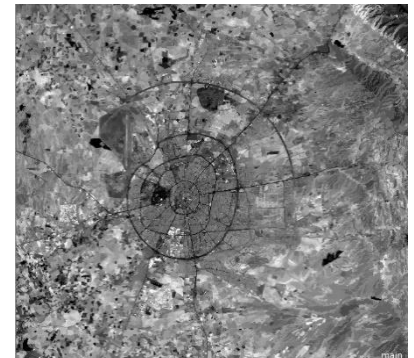
میانگین باند قرمز



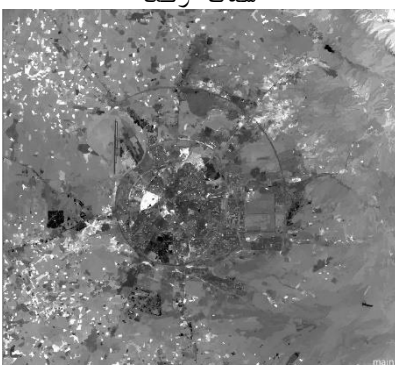
شدت رنگ



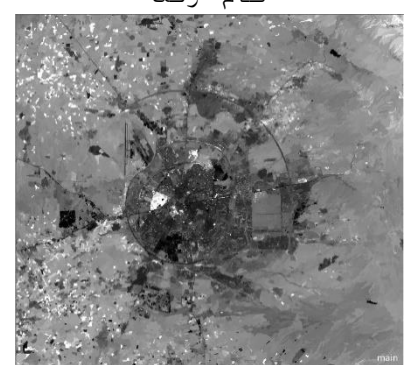
فام رنگ



شاخص روشنایی



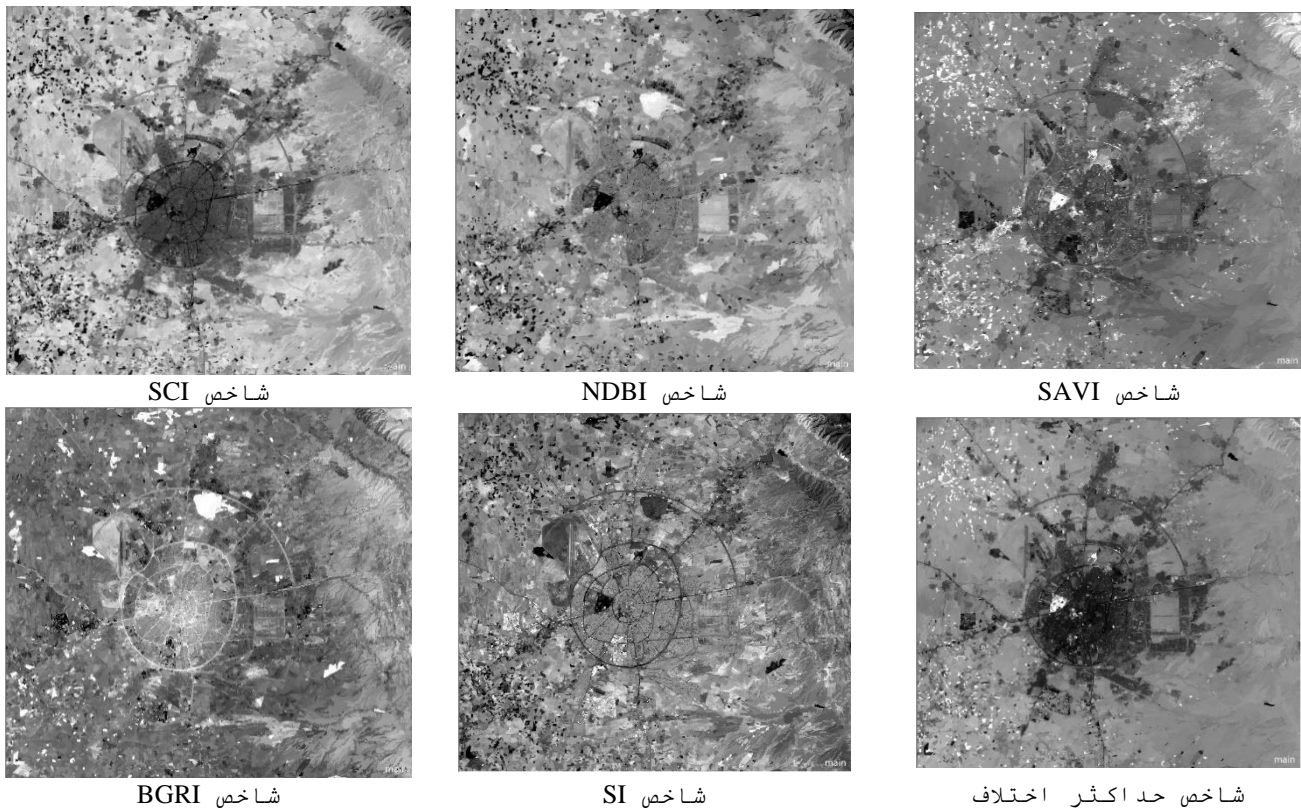
شاخص NDVI



شاخص BULI



اشباع رنگ



شکل 4. اعمال الگوریتم‌های پردازش

Fig 4. Applying Processing Algorithms

## - آستانه‌گذاری معیارهای طبقه‌بندی

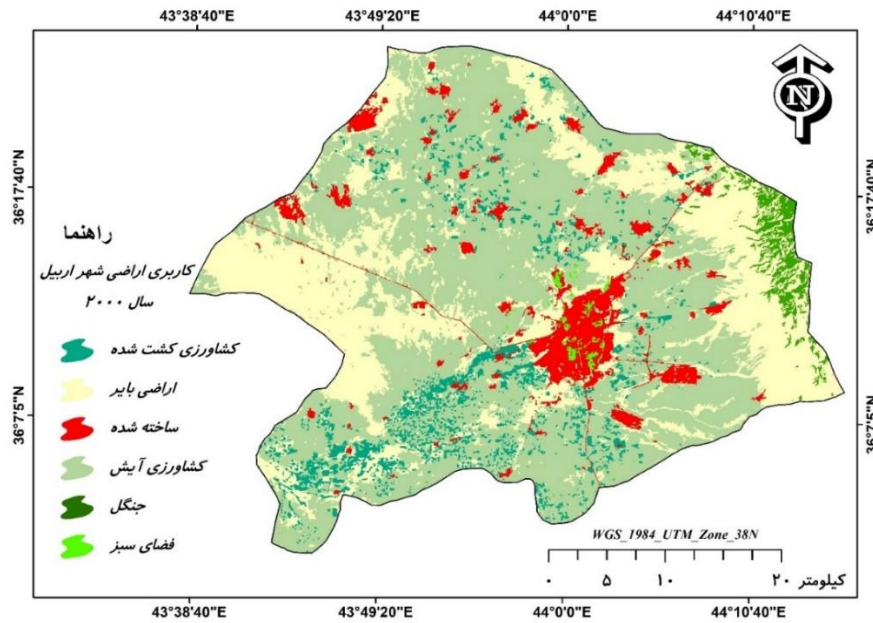
پس از اعمال الگوریتم‌های مختلف شیء‌گرایی بر روی تصاویر، آستانه‌های دقیق استخراج ویژگی‌های مختلف مطابق جدول (4) استخراج، و طبقات مختلف کاربری اراضی براساس این آستانه‌ها استخراج گردید.

جدول 4. آستانه ویژگی‌های مختلف در استخراج کاربری اراضی

آستانه	طبقه کاربری اراضی
$0.068 < \text{GLCM Correlation} < 0.761$ $285.65 < \text{GLCM CONTRAST} < 791.43$ $198 < \text{Brightness} < 318$ $\text{BLFEI} > 0.09$ ; $0.328 < \text{Rectangular Fit} < 1$ $\text{Mean BI} < 0.14$ ; $0 < \text{NDBI} < 0.19$	مناطق ساخته شده شهری
$85.806 < \text{Mean Blue} < 220.18$ ; $111.268 < \text{GLCM Mean} < 141.5$ $\text{Mean BSI} > 0.11$ ; $-0.05 < \text{Mean NDVI} < 0.035$ $\text{Brightness} \geq 135$	اراضی بایر
$0.23 < \text{Mean NDVI} < 0.34$ ; $\text{GNDVI} \geq 0.3$ $0.39 < \text{SAVI} < 0.51$ ; $758 < \text{Mean DEM} < 1087$	جنگل
$\text{GNDVI} \geq 0.15$ ; $\text{Mean Slope} < 6$ $180.546 < \text{Mean NIR} < 289.65$ ; $258 < \text{Mean DEM} < 461$ $-0.123 < \text{Mean NDVI} < 0.365$ ; $\text{Mean SAVI} > 0.27$	کشاورزی کشت شده
$0 < \text{Mean NDVI} < 0.1$ ; $\text{Mean Brightness} \geq 0.2$ $1.02 \leq \text{Shape Index} \leq 1.28$ ; $\text{Rectangular fit} \geq 0.87$ $2.5531 < \text{GLCM Contrast} < 9.642$ ; $\text{SCI} \leq 0.04$	کشاورزی آیش
$\text{Mean SAVI} \geq 0.36$ ; $\text{Mean NDVI} \geq 0.21$	فضای سبز

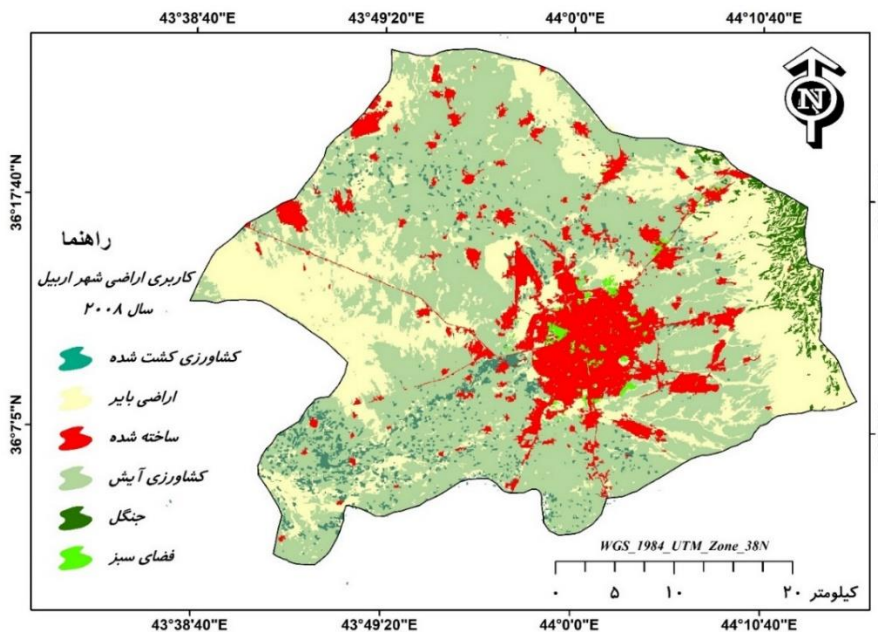
منبع: یافته‌های تحقیق

پس از تعیین آستانه‌ها و اعمال این شاخص‌ها، کلاس‌های طبقات اراضی مطابق اشکال 5 تا 8 بدست آمد.



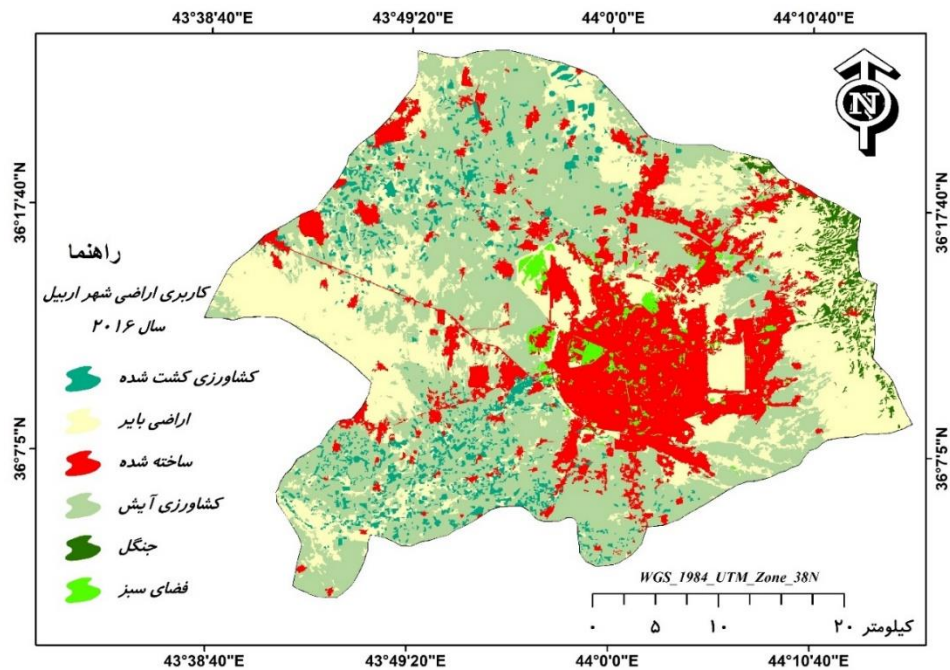
شکل 5. نقشه طبقات کاربری اراضی شهر اربیل در سال 2000

Fig 5. Land Use/Land Cover (LULC) Map of Erbil City in 2000



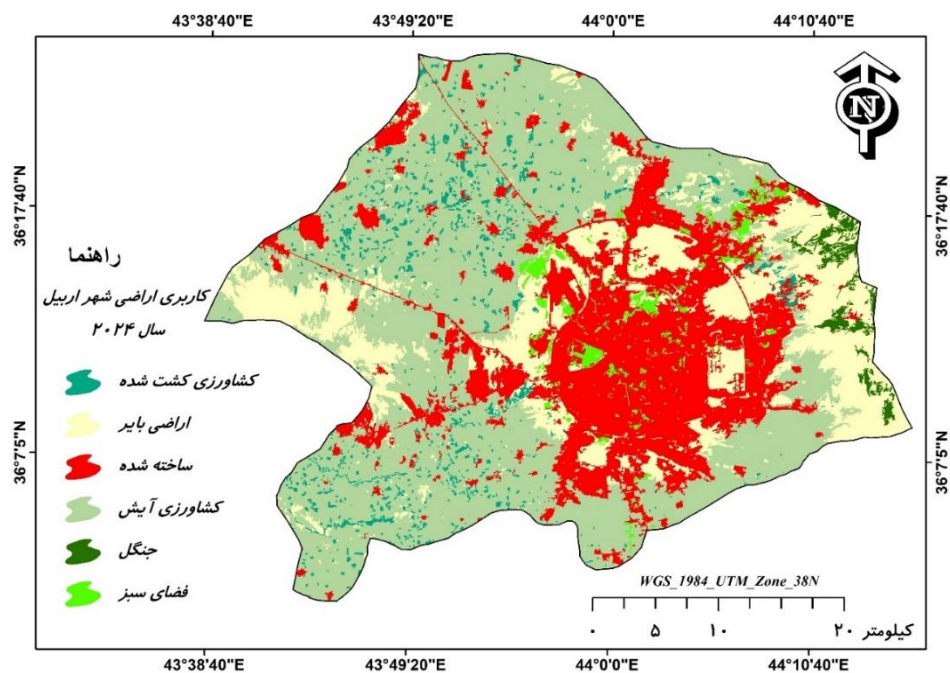
شکل 6. نقشه طبقات کاربری اراضی شهر اربیل در سال 2008

Fig 6. Land Use/Land Cover (LULC) Map of Erbil City in 2008



شکل 7. نقشه طبقات کاربری اراضی شهر اربیل در سال 2016

Fig 7. Land Use/Land Cover (LULC) Map of Erbil City in 2016



شکل 8. نقشه طبقات کاربری اراضی شهر اربیل در سال 2024

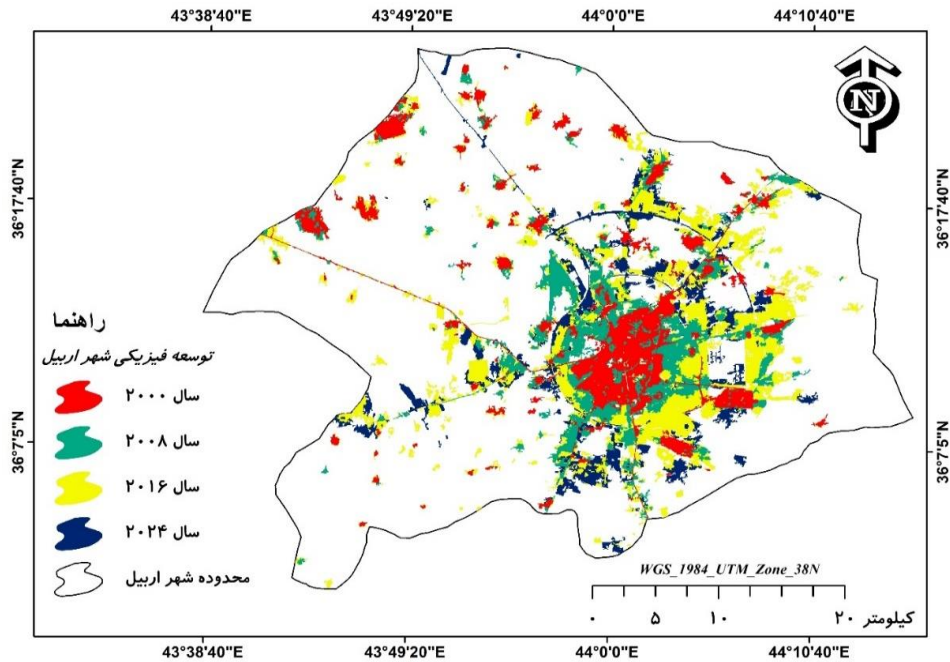
Fig 8. Land Use/Land Cover (LULC) Map of Erbil City in 2024

براساس نتایج، اراضی کشاورزی آیش با مساحت 771.254 کیلومتر مربع در سال 2000، بیشترین سهم را در میان سایر کاربری‌ها به خود اختصاص داده و 53.474 درصد از مساحت کل را شامل می‌شود. این نسبت در سال 2008 به 50.937 درصد کاهش یافته و در سال 2016

به 41.537 درصد می‌رسد، اما در سال 2024 دوباره به 49.676 درصد افزایش می‌یابد. در مقابل، اراضی بایر که در سال 2000 مساحتی برابر با 461.838 کیلومتر مربع و 32.021 درصد از کل مساحت را به خود اختصاص داده، در سال 2024 به 286.087 کیلومتر مربع و 19.836 درصد کاهش یافته است. این کاهش قابل توجه نشان‌دهنده تغییرات در استفاده از اراضی و ممکن است به افزایش توسعه شهری و تغییرات در کاربری‌های دیگر مرتبط باشد. کاربری‌های ساخته شده، که در سال 2000 تنها 6.180 درصد از کل مساحت را شامل می‌شد، به‌طور چشمگیری افزایش یافته و در سال 2024 به 24.115 درصد می‌رسد. این افزایش نشان‌دهنده رشد و توسعه زیرساخت‌ها و مناطق مسکونی در اربیل است. همچنین، اراضی کشاورزی کشت شده در طول این سال‌ها نوساناتی را تجربه کرده است. در سال 2000، این نوع کاربری 6.004 درصد از کل مساحت را شامل می‌شد، اما به‌تدریج در سال 2024 به 3.255 درصد کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند به تغییرات اقتصادی و افزایش نیاز به اراضی برای ساخت‌وسازها مرتبط باشد. در نهایت، فضای سبز و جنگل‌ها نیز تغییراتی را نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که فضای سبز از 0.439 درصد در سال 2000 به 1.926 درصد در سال 2024 افزایش یافته است، در حالی که جنگل‌ها به تدریج کاهش یافته‌اند.

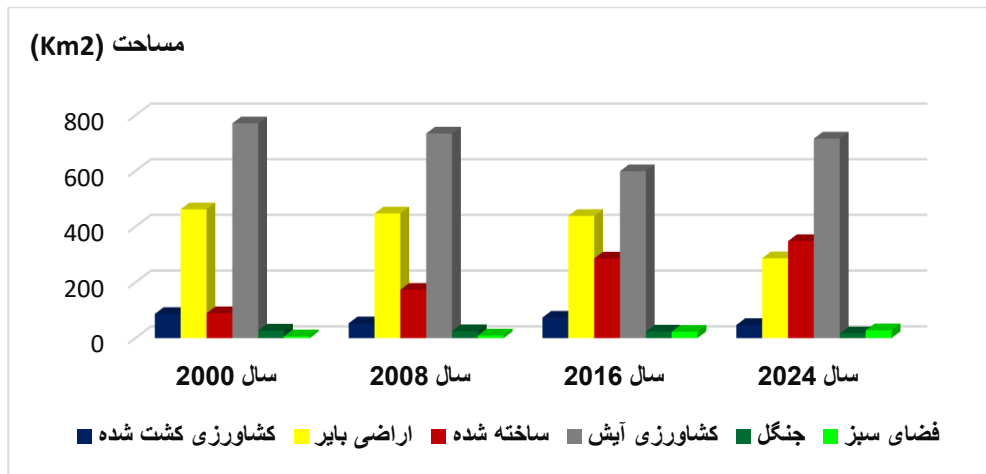
جدول 5. مساحت کاربری اراضی در شهر اربیل در بازه مطالعاتی مختلف

نوع کاربری اراضی	سال 2000		سال 2008		سال 2016		سال 2024	
	مساحت (Km2)	درصد مساحت	مساحت (Km2)	درصد مساحت	مساحت (Km2)	درصد مساحت	مساحت (Km2)	درصد مساحت
کشاورزی کشت شده	86/594	6/004	53/040	3/678	73/410	5/090	46/949	3/255
اراضی بایر	461/838	32/021	447/076	30/998	438/220	30/384	286/087	19/836
ساخته شده	89.126	6.180	173.089	12.001	285.183	19.773	347.812	24.115
کشاورزی آیش	771/254	53/474	734/657	50/937	599/085	41/537	716/463	49/676
جنگل	27/133	1/881	25/116	1/741	23/441	1/625	17/197	1/192
فضای سبز	6/339	0/439	9/306	0/645	22/946	1/591	27/776	1/926
مجموع	1442/284	100	1442/284	100	1442/284	100	1442/284	100



شکل 9. توسعه فیزیکی شهر اربیل در سالهای مختلف

Fig 9. Physical Expansion of Erbil City in Different Years



شکل 10. نمودار تغییرات کلاسهای کاربری اراضی

Fig 10. Change Detection Chart for Land Use Classes

### ارزیابی دقت طبقه بندی

دقت به عنوان میزان تطابق بین مقادیر طبقه بندی شده و نمونه های آموزشی تعریف می شود (یانگ<sup>1</sup> و همکاران، 2013). برای ارزیابی طبقه بندی ها، از شاخص های دقت کاربر، دقت تولیدکننده، دقت کلی و آماره کاپا استفاده شده است. صحت طبقه بندی با مقایسه نمونه های طبقه بندی شده با اطلاعات زمینی به عنوان معیاری برای کیفیت اطلاعات استخراج شده از داده های سنجنش از دور محاسبه می شود (پررگرینی و کاسلا<sup>2</sup>، 2022). ارزیابی صحت می تواند به صورت

1. Yang

2. Perregrini & Casella

کیفی یا کمی باشد و هدف آن مشخص کردن و اندازه‌گیری خطاهای نقشه است (ویجایا<sup>1</sup> و همکاران، 2015: 563). نقشه‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای از طریق ماتریس خطا، صحت تولیدکننده، صحت کاربر، صحت کل و ضریب کاپا ارزیابی می‌شوند (ناولور<sup>2</sup>، 2006). ماتریس خطا روابط بین داده‌های مرجع و نتایج طبقه‌بندی شده را به صورت کلاس به کلاس مقایسه می‌کند (دراگون و بلاشک<sup>3</sup>، 2006: 340). تحلیل کاپا اختلاف اساسی در ماتریس خطا را مشخص می‌کند (فسناچات<sup>4</sup> و همکاران، 2014: 111). در این تحقیق، دقت پارامترهای آماری شامل ضریب کاپا و دقت کلی با استفاده از 300 نمونه زمینی تصادفی محاسبه و نتایج در جدول شماره (6) ارائه شده است. بر اساس دستورالعمل معتبر (Congalton & Green (2019)، برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای لازم است برای هر کلاس کاربری حداقل 30 نمونه آموزشی (Training) و 50 نمونه اعتبارسنجی (Validation) انتخاب شود. با توجه به وجود 6 کلاس کاربری در این پژوهش، تعداد 180 نمونه آموزشی و 300 نمونه اعتبارسنجی مورد نیاز بوده و در مجموع 480 نمونه برای آموزش و ارزیابی دقت طبقه‌بندی به کار گرفته شد. این حجم نمونه مطابق استانداردهای بین‌المللی بوده و دقت شاخص‌هایی چون Overall Accuracy و Kappa را در نتایج این پژوهش تضمین می‌کند.

جدول 6. ماتریس خطای طبقه‌بندی

ماتریس خطا	ساخته شده	کشاورزی کشت شده	فضای سبز	جنگل	کشاورزی آیش	اراضی بایر	مجموع
ساخته شده	16384	32	663	0	252	1289	18620
کشاورزی کشت شده	0	3662	0	0	0	0	3662
فضای سبز	163	56	1815	0	0	0	2034
جنگل	0	0	0	1969	0	1090	3059
کشاورزی آیش	0	420	0	0	21580	3677	25687
اراضی بایر	65	30	41	493	146	51817	52592
مجموع	16612	4200	2519	2462	21988	57873	0
تولید کننده	0/9862	0/8720	0/7205	0/7997	0/9818	0/8953	
کاربر	0/88	1	0/8923	0/6436	0/8405	0/9852	
Helden ( هلدن )	0/93	0/9315	0/7972	0/7132	0/9057	0/9381	
short	0/8692	0/872	0/6628	0/5543	0/8276	0/8835	
کاپا برای هر کلاس	0/9833	0/8673	0/715	0/7937	0/976	0/7916	
دقت کلی	0/9203343						
کاپا	0/876777						

## استفاده از متریک‌های سیمای سرزمین در ارزیابی روند تغییرات کاربری

پس از طبقه بندی تصاویر ماهواره ای مورد بررسی در پژوهش جاری،

1. Wijaya  
2. Navulur  
3. Drăguț & Blaschke  
4. Fassnacht

به منظور درک صحیح سیمای سرزمین منطقه مورد مطالعه، از سنجه-های سیمای سرزمین که پیشتر در فصل سوم به تفصیل شرح آن داده شده است، استفاده شد. از سنجه‌های سیمای سرزمین می‌توان در برنامه‌ریزی برای منابع طبیعی و کاربری پایدار زمین استفاده کرد. در عمل سنجه‌های سیمای سرزمین به عنوان شاخص-های کمی‌ساز محیط زیست مطرح می‌شوند (لئیتائو<sup>1</sup> و همکاران، 2006). شناخته‌ترین نرم افزار در زمینه مطالعه الگوهای سیمای سرزمین نرم افزار FRAGSTATS است (اسچاورز<sup>2</sup>، 2010). این نرم-افزار در حقیقت یک برنامه تجزیه و تحلیل الگوی مکانی برای کمی سازی ساختار سیمای سرزمین است (وو<sup>3</sup> و همکاران، 2011). در این پژوهش نیز از این نرم افزار استفاده شده است. جدول (7) مقادیر سنجه‌های سیمای سرزمین محدوده مطالعه را که برای هر کدام از 4 سال محاسبه شده است نشان می‌دهد.

جدول 7. سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح کلاس سال 2000

سال	کلاس	CA	PLAND	NP	PD	LPI	LSI	PAFRAC	GLUMPY	LI	COHESION	MESH	AI
2000	کشت شده	8659/44	6/004	1088	0/754	0/672	44/357	1/405	0/850	43/065	95/45	9/634	85/962
	اراضی بایر	46183/77	32/021	648	0/449	11/965	42/247	1/492	0/915	64/256	99/54	3499/386	94/232
	ساخته شده	8912/61	6/179	156	0/108	2/647	26/115	1/476	0/914	70/382	98/784	106/900	91/985
	آیش	77125/41	53/474	346	0/239	23/738	37/003	1/446	0/916	59/547	99/853	14120/452	96/105
	جنگل	2713/32	1/881	78	0/054	0/770	21/692	1/576	0/877	7/607	98/309	10/839	87/987
	فضای سبز	633/87	0/439	86	0/059	0/066	14/148	1/457	0/840	45/628	94/220	0/1921	84/128

در سال 2000، سیمای سرزمین شهر اربیل تنوعی از کاربری‌های اراضی را نشان می‌دهد که از نظر ساختاری و اکولوژیکی تفاوت‌های معناداری با یکدیگر دارند. اراضی بایر با داشتن بیشترین مقدار سطح ( $CA=46183.8$  هکتار) و درصد پوشش ( $PLAND=32.02\%$ ) بیشترین گسترش فضایی را داشته‌اند، و همچنین با  $LPI=0.4493$  دارای لکه‌های بزرگتری هستند که به شکل غالب در چشم انداز حضور دارند. در مقابل، فضاهاى سبز کمترین وسعت (هکتار  $CA=633.87$ ) و درصد پوشش ( $PLAND=0.44$ ) را دارند که نشان‌دهنده سهم ناچیز این کاربری در ساختار اکولوژیکی منطقه است. از نظر تعداد لکه‌ها، کشاورزی با  $NP=1088$  بالاترین تعداد لکه را دارد که با  $PD=0.7544$  و  $LSI=44.35$  نشان‌دهنده پراکندگی بالا و پیچیدگی قابل توجه این کاربری است. کاربری‌های جنگل و فضاهاى سبز نیز با  $LSI$ ‌های نسبتاً بالا (21/69 و 14/15) و مقادیر PAFRAC نزدیک به 1/5 دارای لبه‌های پیچیده‌تری

1. Leitao  
2. Schwarz  
3. Wu

هستند که برای تحلیل پایداری زیستمحیطی اهمیت دارد. از نظر جمعیت فضایی، کاربری‌های شهری و کشاورزی دارای مقدار بالای *CLUMPY* (0/91 و 0/85)، هستند که حاکی از تجانس مکانی و پیوستگی مناسب لکه‌ها در این کاربری‌هاست. همچنین کاربری‌های شهری با  $IJI=70.38$  و  $COHESION=98.78$  دارای بیشترین هم‌پیوستگی فضایی بین لکه‌ها هستند که نشان‌دهنده انسجام بالا و گسترش فشرده توسعه شهری در این بازه زمانی است. مقدار بالای *AI* در کاربری‌های شهری ( $AI=91.98$ ) و لم‌یزرع ( $AI=94.32$ ) نیز نشان می‌دهد که الگوی توزیع این لکه‌ها از نظر انسجام هندسی منظم‌تر از سایر کاربری‌هاست.

جدول 8. سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح کلاس سال 2008

سال	کلاس	CA	PLAND	NP	PD	LPI	LSI	PAPRAC	CLUMPY	IJI	COHESION	MESH	AI
2008	کشت شده	5204/620	3/666	1078	0/748	0/185	/193 44	/355 1	/814 0	/965 38	91/765	1/431	/087 82
	اراضی بایر	/880 44687	/001 31	802	0/556	9/014	/547 44	/438 1	/910 0	/600 64	99/471	/363 2315	/809 93
	ساخته شده	/390 17295	/998 11	189	0/131	7/628	/431 26	/451 1	/934 0	/280 64	99/445	846/446	/104 94
	آیش	/820 72448	/954 50	473	0/328	/456 21	/393 39	/396 1	/912 0	/904 62	99/793	/046 9703	/694 95
	جنگل	2507/580	1/740	134	0/093	0/435	/302 27	/500 1	/939 0	6/549	96/968	3/420	/140 84
	فضای سبز	923/490	0/641	159	0/110	0/087	/537 16	/395 1	/844 0	/880 64	92/269	0/231	/478 84

در سال 2008 (جدول 8)، سیمای سرزمین شهر اربیل ترکیبی از سلطه‌های کاربری‌های طبیعی و کشاورزی است، که بیشترین سطح متعلق به کاربری کشاورزی آیش با مقدار *CA* برابر با 72448.8 هکتار و *PLAND* معادل 50/95 درصد بوده است. این مساحت بالا در کنار مقدار *LSI* برابر 59/22 نشان می‌دهد که این کاربری به صورت لکه‌هایی با لبه‌های بسیار پیچیده و گسترش یافته در سطح منطقه پراکنده است. با وجود  $NP=582$  و  $PD=0.409$ ، مشخص است که لکه‌های کشاورزی آیش نسبتاً بزرگتر و کمتر پراکنده‌اند. کاربری کشاورزی نیز با مساحت قابل توجه 5204.62 هکتار و *LPI* بالا (0/7478) به عنوان بزرگترین لکه‌ی منفرد ظاهر می‌شود، که نشان‌دهنده یکپارچگی و تمرکز مکانی این نوع کاربری در نقاط مشخصی از چشم‌انداز است. در مقابل، جنگل‌ها با تنها 1/73 درصد از کل سطح منطقه و مقدار پایین  $MESH(3.42)$  نشان‌دهنده تکه‌تکه بودن شدید هستند، به‌ویژه که  $NP=134$  و  $PD=0.093$ ، حاکی از تعداد کم و پراکندگی پایین لکه‌های جنگلی است. در این سال، کاربری‌های مصنوعی مانند مناطق ساخته شده شهری تنها 11/99 درصد از منطقه را پوشش داده‌اند، اما با شاخص‌های انسجام فضایی مانند *COHESION* برابر 99/44 و *CLUMPY* معادل 0/9393 نشان از پیوستگی بالای لکه‌های ساختمانی دارد، هرچند هنوز در مرحله رشد اولیه هستند. کاربری فضای سبز نیز

سهمی پایین و پراکندگی بالایی دارد ( $NP=159$ ،  $PD=0.1103$ ) اما مقدار  $IJI$  بالا ( $64/88$ ) حکایت از تعامل مکانی زیاد آن با سایر کلاسها دارد. در مجموع، ساختار سیمای سرزمین در سال 2008 بیشتر طبیعی، با الگوهای پراکنده و لکه‌های بزرگ طبیعی و نیمه‌طبیعی است و توسعه شهری هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد.

جدول 9. سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح کلاس سال 2016

سال	کلاس	CA	PLAND	NP	PD	LPI	LSI	PARRAC	CLUMPY	IJI	COHESION	MESH	AI
2016	کشت شده	7341/03	5/090	1019	0/707	0/251	44/217	1/393	0/840	42/932	93/068	2/252	84/794
	اراضی بایر	43821/99	30/384	933	0/647	7/280	47/196	1/405	0/905	75/209	99/320	1554/76	93/368
	ساخته شده	28518/30	19/773	295	0/205	15/103	33/356	1/394	0/928	71/234	99/743	3332/15	94/241
	آبش	59908/50	41/537	721	0/500	17/245	45/545	1/388	0/907	68/892	99/769	7025/26	94/533
	جنگل	2344/05	1/625	187	0/130	0/183	27/904	1/526	0/829	12/584	95/707	1/501	83/213
	فضای سبز	2294/55	1/591	289	0/200	0/209	26/088	1/482	0/839	55/703	96/203	1/584	84/156

در سال 2016 (جدول 9)، شهر اربیل شاهد تحولی ساختاری در نحوه توزیع و ترکیب کاربری‌های اراضی بوده است. رشد کاربری مناطق ساخته شده شهری چشم‌گیر بوده، به طوری که  $CA$  آن به  $28518.3$  هکتار رسیده و  $PLAND$  آن نیز به  $19/77$  درصد افزایش یافته که نسبت به سال 2008 رشد چشمگیری دارد. این رشد با  $NP=905$  و  $PD=0.628$  نشان از پراکندگی نسبتاً بالا دارد، اما شاخص‌های  $COHESION$ ،  $CLUMPY$  ( $0.9282$ )،  $IJI$  ( $71.23$ ) و  $(99.83)$  حکایت از انسجام ساختاری و تعامل بالای لکه‌های شهری با سایر کاربری‌ها دارد. این نشانه‌ای از توسعه پیوسته شهری است که در آن لکه‌های ساختمانی در حال گسترش و در عین حال متصل به یکدیگر هستند. کاربری کشاورزی آبش اگرچه در سطح کاهش یافته ( $PLAND$  از  $50/95$  به  $41/53$  رسیده)، اما همچنان با  $CA=59098.5$  و  $LSI=45.55$  درصد، مهم‌ترین کاربری از نظر وسعت است. رشد تعداد لکه‌ها ( $NP=721$ ) و  $PD=0.4999$  نشان‌دهنده خرد شدن نسبی این کاربری است که ممکن است ناشی از تبدیل بخشی از آن به کاربری‌های دیگر باشد. کاربری جنگل در این سال کاهش سطح داشته ( $2344.05$  هکتار) اما مقدار  $CLUMPY=0.9507$  و  $COHESION=98.7$  نشان می‌دهد که توده‌های باقی‌مانده، همچنان تا حد زیادی پیوسته‌اند. از سوی دیگر، فضای سبز رشد یافته و با افزایش  $NP$  و  $PD$ ، در حال توزیع وسیع‌تر در سطح شهر است. مقدار بالای  $AI$  برای اغلب کلاسها (بیش از  $84$  درصد) در این سال نشان‌دهنده توزیع به نسبت منظم و همسان لکه‌ها در چشم‌انداز بوده و این یکپارچگی فضایی می‌تواند نقش

کلیدی در توسعه پایدار ایفا کند. در مجموع، سال 2016 مرحله‌ی گذار از ساختار طبیعی به ساختاری نیمه‌شهری است که در آن سیمای سرزمین ترکیبی از لکه‌های طبیعی بزرگ و لکه‌های شهری در حال رشد دیده می‌شود.

جدول 10. سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح کلاس سال 2024

سال	کلاس	CA	PLAND	NP	PD	LPI	LSI	PAFRAC	CLUMPY	IJI	COHESION	MESH	AI
2024	کشت شده	4694/940	3/255	820	0/569	0/090	40/304	1/449	0/821	29/227	91/265	0/692	82/708
	اراضی بایر	28606/600	19/836	876	0/607	6/315	37/092	1/368	0/920	78/661	99/216	811/520	93/585
	ساخته شده	34781/220	24/115	225	0/156	20/273	31/223	1/395	0/936	68/535	99/829	5935/619	95/128
	آیش	71646/300	49/676	272	0/189	27/147	29/268	1/407	0/937	974/501	99/861	14012/771	96/827
	جنگل	1719/720	1/192	24	0/017	0/441	16/690	1/663	0/884	10/107	98/201	4/208	88/545
	فضای سبز	2777/580	1/925	233	0/162	0/163	26/747	1/484	0/849	60/003	94/929	1/569	85/233

در سال 2024 (جدول 10)، ساختار فضایی شهر اربیل بیشتر به سمت توسعه‌یافتگی شهری و تبدیل کاربری‌های طبیعی به کاربری‌های شهری میل پیدا کرده است، اما به شکل جالبی، برخی کاربری‌های طبیعی مانند کشاورزی آیش دوباره رشد قابل توجهی داشته‌اند. کشاورزی آیش با  $PLAND=49.67$  درصد و مساحت 71646.3 هکتار، مجدداً کاربری غالب منطقه شده است، اما این‌بار با  $NP=674$  و  $LSI=29.26$  که نسبت به سال‌های پیش کاهش یافته و حاکی از ساده‌تر شدن لکه‌های لکه‌ها و کاهش پیچیدگی آن‌هاست. این ممکن است نتیجه سیاست‌های اصلاح کاربری یا بازگردانی زمین‌ها به حالت طبیعی باشد. کاربری مناطق ساخته شده شهری تقریباً تثبیت شده و با مقدار  $CA=28416.2$  و  $PLAND=21.11$  درصد، بخش عمده‌ای از سطح شهر را اشغال کرده است. با این حال، افزایش  $NP$  به 1125 و کاهش نسبی  $CLUMPY$  و  $IJI$  نشان از افزایش پراکندگی لکه‌های شهری دارد، که می‌تواند ناشی از توسعه بی‌رویه و گسترش افقی سکونتگاه‌ها باشد. کاربری کشاورزی به شدت کاهش یافته و با مقدار  $PLAND=3.25$  و  $LPI$  بسیار پایین (0/09101) نشان می‌دهد که زمین‌های کشاورزی یا به مناطق کشاورزی آیش تبدیل شده‌اند یا در اثر توسعه شهری تخریب شده‌اند. جنگل‌ها بیش از پیش کاهش یافته‌اند ( $CA=1719.72$ ) و مقدار پایین  $AI$  و  $MESH$  نشان از تخریب ساختاری شدید آن‌ها دارد. فضای سبز اما با  $PLAND=1.92$  درصد و  $CLUMPY=0.8494$  به لحاظ فضایی ساختاری همگن‌تر شده و افزایش  $IJI$  (60.00) تعامل بالای آن را با سایر کاربری‌ها نشان می‌دهد، که می‌تواند نشانه خوبی از پراکندگی معنادار فضاهای سبز در سطح شهر باشد. به طور کلی در سال 2024، سیمای سرزمین اربیل ترکیبی از رشد ساخت‌وساز، کاهش تنوع اکولوژیکی و انسجام بیشتر در لکه‌های شهری را نشان می‌دهد، که در آن برخی شاخص‌ها مانند  $COHESION$ ،  $AI$  و  $CLUMPY$  برای کاربری‌های انسانی بالا رفته ولی برای

کاربري‌هاي طبيعي کاهش یافته اند؛ اين روند مي‌تواند نمايانگر چالشي بزرگ در زمينه پایداری محیطی و برنامه‌ریزی شهری آینده باشد.

به طور کلی بررسی روند تغییرات ساختار سیمای سرزمین شهر اربیل از سال 2000 تا 2024 بر اساس سنجه‌های فضایی نشان‌دهنده تحولات چشم‌گیر در ترکیب و الگوی فضایی کاربری‌های اراضی است که بیانگر تغییرات کاربری ناشی از عوامل انسانی و اکولوژیکی می‌باشد. در بازه زمانی مورد نظر، اراضی بایر از سال 2000 که دارای بیشترین سطح پوشش (PLAND=32.02%) (و انسجام فضایی بالا  $AI=94.32$ )،  $COHESION=98.85$  بودند، ابتدا در سال 2008 با رشد  $PLAND=38.01\%$  (و سپس در 2016  $(30/83\%)$  و 2024  $(19/83\%)$ ) با روند کاهشی مواجه شدند که نشان‌دهنده تبدیل تدریجی این اراضی به سایر کاربری‌ها به‌ویژه کاربری‌های شهری و کشاورزی آیش است. در مقابل، کاربری شهری با رشد پیوسته‌ای در تمامی سنجه‌ها از جمله افزایش مساحت (CA) از 8022 در 2000 به 28416/2 در 2024، درصد پوشش (از 5/56، به 21/11%)، و انسجام فضایی (COHESION) از 98/78 به 99/82 و  $IJI$  از 70/38 به 71/55 مواجه بوده که نشان‌دهنده گسترش فشرده و پایدار شهر در طی این مدت است. کاربری کشاورزی از سال 2000 تا 2024 کاهش قابل توجهی را تجربه کرده است. PLAND از 88/3% به 3/25 که همزمان با کاهش LPI و MESH، از پراکندگی بالا به سمت لکه‌های کوچکتر و پراکنده‌تر سوق یافته است کشاورزی آیش که در سال 2000 سهم اندکی داشت، به تدریج تا سال 2008 به بیش از 50% منطقه رسید و پس از کاهش در 2016، مجدداً در سال 2024 به جایگاه غالب خود بازگشت ( $PLAND=49.67\%$ )، این نوسانات در کنار LSI بالا و تعداد نسبتاً ثابت لکه‌ها (NP) نشان‌دهنده فرآیندهای پیچیده‌ای مانند مهاجرت روستایی، تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی و توسعه ناقص زیرساخت‌هاست. فضاها سبز در تمام سال‌ها دارای کمترین سهم در ساختار فضایی شهر بوده‌اند، اما روندی افزایشی داشته‌اند PLAND از 0/44% در سال 2000 به 1/92% در سال 2024، همراه با افزایش انسجام و تعامل با سایر لکه‌ها (افزایش CLUMPY و IJI)، که می‌تواند ناشی از سیاست‌های توسعه فضای سبز شهری باشد. از نظر سنجه‌های شکلی مانند LSI و PAFRAC، در اغلب کاربری‌ها روند ساده‌تر شدن لبه‌ها دیده می‌شود که با افزایش ساختوساز و برنامه‌ریزی‌های شهری مرتبط است.

### سیمای سرزمین در سطح چشم انداز (Landscape)

در سطح کل چشم انداز (Landscape Level)، (جدول 11)، ساختار فضایی سیمای سرزمین شهر اربیل طی سال‌های 2000 تا 2024 دچار تحولات چشمگیر و معناداری شده است که این تغییرات به‌وضوح در شاخص‌های کمی استخراج‌شده از نرم‌افزار FRAGSTATS منعکس شده‌اند. شاخص تراکم لکه‌ها (PD) از 1/66 در سال 2000 به بیشینه 2/38 در سال 2016 رسید و سپس در 2024 به 1/69 کاهش یافت؛ این نوسان حاکی از یک دوره پراکندگی شدید لکه‌ها و سپس تجمیع نسبی آن‌هاست. افزایش مستمر شاخص LPI از 23/73% به 27/14% نشان می‌دهد که

بزرگترین لکه در سیمای سرزمین - که به احتمال زیاد مناطق ساخته شده شهری است - به تدریج سلطه بیشتری بر کل ساختار یافته است. همزمان، کاهش LSI از 36/89 به 33/42 در سال 2024 بیانگر کاهش پیچیدگی هندسی لکه‌ها و ساده‌تر شدن مرزهای آنهاست، امری که معمولاً با توسعه ساخت و ساز منظم و یکنواخت شهری همراه است. شاخص‌های انسجام فضایی نیز روند افزایشی دارند؛ به ویژه COHESION که از 99/46 به 99/71 رسیده و حاکی از انسجام و پیوستگی بالای لکه‌ها در ساختار چشم انداز است. این انسجام، در کنار افزایش AI (از 94/43 به 94/99) و IJI (از 61/15 به 71/62)، نشان‌دهنده یکپارچگی بیشتر ساختار فضایی و افزایش تعامل میان لکه‌های مختلف است که البته بیشتر به نفع توسعه شهری رخ داده و نه پوشش‌های اکولوژیکی. از سوی دیگر، شاخص MESH با افزایش از 17747/4 به 20766/3 گویای آن است که لکه‌های بزرگ مقیاس - احتمالاً لکه‌های شهری - در حال تسلط بر ساختار کلی هستند، در حالی که کاهش تدریجی تنوع واقعی و افزایش یکنواختی لکه‌ها در شاخص‌هایی مانند SHEI و SHDI نمایانگر کاهش تنوع عملکردی سیمای سرزمین است. در مجموع، این تغییرات نشان می‌دهند که ساختار سیمای سرزمین اربیل به سمت الگویی با انسجام بالا، لکه‌های بزرگ، پیچیدگی کمتر و تنوع محدودتر حرکت کرده که همه‌ی این ویژگی‌ها معرف روندی ناپایدار از منظر زیست‌محیطی و توسعه‌ی شهری فشرده و بی‌برنامه‌اند. در میان شاخص‌های ساختاری سیمای سرزمین، شاخص تنوع شانون (SHDI: Shannon's Diversity Index) جایگاه ویژه‌ای دارد، زیرا بیانگر تنوع ترکیب کاربری‌ها در یک چشم انداز است. این شاخص، که از علم بوم‌شناسی وارد تحلیل‌های فضایی شده، میزان تنوع کاربری‌ها (از نظر تعداد و نسبت مساحت) را در یک منطقه مشخص می‌سازد؛ مقدار بالاتر SHDI نشان‌دهنده ترکیب متنوع‌تر و برابرتر کاربری‌ها است، در حالی که مقدار پایین‌تر آن نمایانگر غلبه‌ی یک یا دو کاربری بر کل چشم انداز می‌باشد.

بر اساس جدول (10) شاخص‌های Landscape، مقدار SHDI از 0/6356 در سال 2000 به 0/6986 در سال 2024 افزایش یافته است. در نگاه نخست، این افزایش ممکن است نشان‌دهنده‌ی تنوع بیشتر باشد، اما تفسیر دقیق‌تر در کنار سایر شاخص‌ها مانند SHEI و SIDI نشان می‌دهد که با وجود این افزایش عددی، ساختار تنوع همچنان نامتوازن باقی مانده است. دلیل آن است که در سال 2024، کاربری‌هایی مانند «ساخته شده» و «آیش» بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده‌اند و سایر کاربری‌ها مانند جنگل، کشاورزی کشت‌شده و فضای سبز سهم اندکی دارند. بنابراین، گرچه SHDI رشد کرده است، اما تنوع واقعی عملکردی کاهش یافته یا به سمت تک‌محوری شدن سوق یافته است. رشد SHDI در این چشم انداز خاص لزوماً به معنای بهبود اکولوژیکی نیست، بلکه نمایانگر گسترش کاربری‌های انسانی و خرد شدن سایر کاربری‌هاست که در نهایت به کاهش پایداری زیست‌محیطی منجر می‌شود. این نتایج با یافته‌های سطح کلاس هم‌راستا و تأییدکننده است. نتایج سطح Landscape به‌خوبی الگوهای مشاهده شده در سطح کلاس را تأیید می‌کند و این هم‌پوشانی نشان‌دهنده اعتبار بالای تحلیل‌ها و استنتاج‌های این پژوهش است.

جدول 11. سنج‌های سیمای سرزمین در سطح چشم انداز

MESH	DIVISION	COHESION	LI	PLADJ	CONTAG	LSI	LPI	PD	سال/سنج	Landscape
17747/4	0/8769	99/4622	61/153	94/2905	60/9285	36/8989	23/7386	1/6661	2000	
/88 12869	0/9107	99/5966	62/7951	94/0043	59/3407	38/8768	21/4532	1/9667	2008	
/52 11917	0/9174	99/5842	69/8705	93/1226	54/0792	44/2907	17/2453	2/3879	2016	
/38 20766	0/856	99/7116	71/622	94/84	58/2016	33/4206	27/1469	1/6987	2024	
	AI	MSIEI	SIEI	SHEI	MSDI	SIDI	SHDI	SPLIT	سال/ سنجه	
	94/4368	0/5166	0/7245	0/6356	0/9256	0/6037	1/1389	8/1267	2000	
	94/1519	0/5522	0/7538	0/6614	0/9893	0/6282	1/1851	11/2204	2008	
	93/2764	0/659	0/8315	0/7433	1/1807	0/6929	1/3318	12/1022	2016	
	94/9926	0/5926	0/785	0/6986	1/0618	0/6542	1/2518	6/9453	2024	

### نتیجه گیری

تحلیل روند تغییرات ساختار فضایی کاربری اراضی در شهر اربیل طی دوره 2000 تا 2024 بیانگر دگرگونی‌های قابل‌توجهی در الگوی سیمای سرزمین این شهر است. تغییراتی که ریشه در رشد شتابزدهی شهری، فشار جمعیتی، مهاجرت، و عدم موازنه در برنامه‌ریزی کاربری زمین دارند. افزایش مساحت مناطق ساخته‌شده و هم‌زمان کاهش جنگل‌ها و افت زمین‌های کشاورزی کشت‌شده، نشان‌دهندهی فشار شدید توسعه شهری بر منابع طبیعی است. چنین تغییراتی مشابه آن چیزی است که در پژوهش (وو و همکاران، 2011)، در خصوص الگوی توسعه کلان‌شهرهای ایالات متحده نیز گزارش شده، که رشد افقی بدون برنامه منجر به تخریب کاربری‌های طبیعی و تقلیل کیفیت زیستمحیطی شد. شاخص‌های سیمای سرزمین نیز این روند را تأیید می‌کنند؛ به‌ویژه افزایش شاخص‌های CLUMPY و COHESION در کاربری‌های ساخته‌شده، که نشان‌دهندهی افزایش انسجام فضایی و گسترش لکه‌های شهری به‌صورت فشرده و پیوسته است. در مقابل، کاربری‌هایی چون جنگل، کشاورزی و فضاهای سبز با کاهش مساحت، افزایش تکه‌تکه شدن (کاهش MESH) و افت شاخص‌های انسجام فضایی روبرو هستند که این وضعیت خطر تشدید پدیده‌هایی چون جزایر حرارتی شهری، کاهش کیفیت هوای تنفسی، و بی‌ثباتی خاک را افزایش می‌دهد (اسچاوز<sup>1</sup>، 2010؛ کادیقولاری<sup>2</sup>، 2013). این تغییرات از منظر اجتماعی نیز آثار قابل‌توجهی خواهند داشت؛ محدود شدن دسترسی عمومی به فضاهای سبز، تضعیف سلامت روانی شهروندان، و رشد نابرابری‌های فضایی از جمله پیامدهایی هستند که پژوهش‌های مختلف مانند Leitão et al. (2012) نیز به آن اشاره کرده‌اند. همچنین افزایش کاربری کشاورزی آیش، اگرچه می‌تواند نشان‌دهندهی برنامه‌هایی برای بازگردانی زمین‌ها به کاربری‌های نیمه‌طبیعی باشد، اما در صورت عدم مدیریت مؤثر، خطر تبدیل مجدد این اراضی به سکونتگاه‌های

1. Schwarz

2. Kadiogullari

غیررسمی یا اراضی بایر وجود دارد؛ سناریویی که در بسیاری از شهرهای در حال توسعه مشاهده شده است (فلامنکو-ساندوال<sup>1</sup> و همکاران، 2007). تغییر در *LSI*، *IJI* و *AI* طی دوره نیز بیانگر آن است که شهر از یک چشم انداز با پراکندگی بالا به سمت الگوی نسبتاً منظم تر اما با کاربری های کم تنوع تر حرکت کرده است؛ وضعیتی که با کاهش تاب آوری شهری در برابر تهدیدات محیطی مانند خشکسالی، گردوغبار و سیلاب همراه است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می دهد که روند فعلی توسعه کالبدی شهر اربیل با نادیده گرفتن اصول اکولوژیکی، اجتماعی و حتی اقتصادی در مدیریت سرزمین، به سمت ناپایداری فضایی و تخریب منابع پیش می رود. الگوی توسعه آتی باید بر پایه رویکردهای یکپارچه برنامه ریزی شهری مبتنی بر محیط زیست باشد. پیشنهاد می شود ضمن استفاده هدفمند از اراضی بایر برای توسعه هوشمند شهری، ارتقاء شبکه فضاهای سبز، احیای اراضی جنگلی، و حفاظت از زمین های کشاورزی در اولویت قرار گیرد. تحقق توسعه پایدار در اربیل مستلزم تعامل بین نهادهای محلی، برنامه ریزان و شهروندان است تا بتوان شهر را در مسیر تعادل بین رشد، عدالت فضایی و پایداری اکولوژیکی هدایت کرد. مطالعات داخلی در شهرهایی مانند تهران (رادین مجد و همکاران، 1401)، کرمانشاه (نوروزی گله کلایی و همکاران، 1401)، تبریز (محمودزاده و مسعودی، 1398) و مشهد (عنابستانی و همکاران، 1400) نیز روند مشابهی از گسترش مناطق ساخته شده به بهای از بین رفتن اراضی کشاورزی و منابع طبیعی را نشان می دهند. در سطح بین المللی، پژوهش هایی مانند تحقیق (Yaghoobi et al., 2022; Ghobadi, & Ahmadipari., 2023; Arora et al., 2021 و Varol et al., 2024) در بررسی جهانی توسعه شهری نیز تأکید کرده اند که در بیشتر مناطق شهری در حال توسعه، روند گسترش آیش محور، یکپارچه سازی لکه های شهری، و کاهش تنوع زیست محیطی از ویژگی های بارز تغییرات کاربری زمین هستند. این مطالعات نشان می دهند که روند مشاهده شده در اربیل بخشی از الگوی جهانی و منطقه ای شهرنشینی ناپایدار و فشرده محسوب می شود. در صورتی که روند کنونی بدون بازنگری ادامه یابد، می تواند شامل بحران های متعدد زیست محیطی و اجتماعی باشد. افزایش فشار بر منابع آب، افزایش آلودگی هوا و افزایش خطرپذیری در برابر پدیده هایی همچون سیلاب های ناگهانی یا خشکسالی از جمله چالش های پیش رو هستند. ایجاد تعادل میان توسعه شهری، حفاظت از منابع طبیعی و افزایش تاب آوری زیست محیطی باید اولویت اول برنامه ریزی فضایی و سیاست گذاری شهری در اربیل باشد.

## منابع

پیشنماز احمدی، مجید؛ محمدزاده، کیوان و حجازی، سید اسدالله (1396). ارزیابی الگوی تغییرات پوشش جنگلی با استفاده از تکنیک های فازی شیء گرا (مطالعه موردی: شهرستان کلیبر). *جغرافیا و پایداری محیط*، 7(4)، 95-111.

حسین آبادی، سعید و اکبری، ابراهیم (1402). تحلیل تغییرات کاربری اراضی و سیمای سرزمین در مناطق شهری و پیرامون آنها مطالعه موردی: شهر شاهرود. مجله شهر پایدار، 6 (3)، 79-98. doi: 10.22034/jsc.2024.367302.1663

رادین مجد، گل آذین؛ جوزی، سیدعلی؛ حجازی، رخشاد؛ محمدجواد، امیری و غفارزاده، حمیدرضا (1401). بررسی روند تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از روش تحلیل گرادیانت شهری- روستایی (مطالعه موردی: کلان شهر تهران). آمایش سرزمین، 13 (2)، 461-489. doi: 10.22059/jtcp.2021.326563.670236

سلمان ماهینی، عبدالرسول (1386). معیارهای سیمای سرزمین و فرسایش پذیری به عنوان دو دسته نمایه کمی برای ارزیابی سریع اثرات طرح های توسعه. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، 14 (1)، 0-0. SID. <https://sid.ir/paper/433674/fa>

عناستانی، علی اکبر، عناستانی، زهرا و اکبری، ابراهیم (1400). تحلیل تغییرات ساختاری سیمای سرزمین و الگوهای توسعه شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌های چندزمانه- مورد مطالعه: کلان شهر مشهد. فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، 30 (119)، 206-119. Doi: 10.22131/sepehr.2021.247894

کاویانی، آزاده؛ فرهودی، رحمت‌اله و رجبی، آزیتا (1394). تحلیل الگوی رشد شهر تهرانبا رویکرد بوم شناسی سیمای سرزمین. پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، 3 (4)، 429-407. Doi: 10.22059/jurbangeo.2015.57410.407

محمودزاده، حسن و مسعودی، حسن (1398). تحلیلی بر تغییرات ساختاری سیمای سرزمین کلان‌شهر تبریز با استفاده از مبانی اکولوژی سیمای سرزمین و با تأکید بر مفهوم پیوستگی. مجله علمی «آمایش سرزمین»، 11 (2)، 204-179. doi: 10.22059/jtcp.2019.288093.670019

معمارزاده کیانی، امیر و دانشور فتاح، فرزاد (1402). بررسی روند تغییرات کاربری اراضی کشاورزی شهرستان شهریار با استفاده از سنجش از راه دور و GIS. نشریه محیط زیست طبیعی، 76 (4)، 659-674. Doi: 10.22059/jne.2023.354658.2522

نظم فر، حسین و شیرزاد، منیر (1403). پایش تغییرات سیمای شهر و محیط پیرامون آن بر اساس تجزیه و تحلیل متریک‌های سیمای سرزمین (مطالعه موردی: شهر اردبیل). مطالعات علوم محیط زیست، 9 (4)، 9729-9740. doi: 10.22034/jess.2023.365413.1887

نوروزی گله کلایی، سمیه؛ حاتمی، احمد و پرویزی مریوانی، سمیه (1401). تحلیل الگوهای رشد فضایی شهر کرمانشاه با رویکرد بوم شناسی سیمای سرزمین. نشریه علمی برنامه‌ریزی توسعه کالبدی، 7 (3)، 49-64. Doi: 10.30473/psp.2022.62702.2573

یزدان پناه، مهسا، یاوری، احمدرضا؛ زبردست، لعبت و سیده، آل

محمد (1394). ارزیابی زیرساخت‌های سبز شهری به منظور اصلاح تدریجی آنها در سیمای سرزمینی تهران، محیط شناسی، 41(3)، 625-613  
Doi: 10.22059/jes.2015.55900

## References

- Abebe, G., Getachew, D., & Ewunetu, A. (2022). Analysing land use/land cover changes and its dynamics using remote sensing and GIS in Gubalafito district, Northeastern Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 4(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04915-8>
- Akram, O. K., Ismail, S., & Franco, D. J. (2016). The significant of urban form of Erbil city, Iraq. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 4(2), 96-101.
- Almukhtar, A. (2019). *Place-identity in historic cities; The case of post-war urban reconstruction in Erbil, Iraq. In Urban Heritage Along the Silk Roads: A Contemporary Reading of Urban Transformation of Historic Cities in the Middle East and Beyond* (pp. 121-136). Cham: Springer International Publishing.
- Anabastani, A. A., Anabastani, Z., and Akbari, A. (2021). Analysis of structural changes in the landscape and urban development patterns using multi-temporal satellite images - Case study: Mashhad metropolis. *Quarterly Scientific-Research Journal of Geographic Information "Sepehr"*, 30(119), 189-206. doi: 10.22131/sepehr.2021.247894.(In Persian).
- Arora, A., Pandey, M., Mishra, V. N., Kumar, R., Rai, P. K., Costache, R., ... & Di, L. (2021). Comparative evaluation of geospatial scenario-based land change simulation models using landscape metrics. *Ecological Indicators*, 128, 107810. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107810>
- Aslam, R. W., Naz, I., Quddoos, A., & Quddusi, M. R. (2024). Assessing climatic impacts on land use and land cover dynamics in Peshawar, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan: a remote sensing and GIS approach. *GeoJournal*, 89(5), 202. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10708-024-11203-6>
- Azeez, O. S., Shafri, H. Z., Alias, A. H., & Haron, N. A. (2022). Integration of object-based image analysis and convolutional neural network for the classification of high-resolution satellite image: a comparative assessment. *Applied Sciences*, 12(21), 10890.
- Bokhari, S. A., Saqib, Z., Amir, S., Naseer, S., Shafiq, M., Ali, A., ... & Hamam, H. (2022). Assessing land cover transformation for urban environmental sustainability through satellite sensing. *Sustainability*, 14(5), 2810. <https://doi.org/10.3390/su14052810>
- Bokhari, S. A., Saqib, Z., Amir, S., Naseer, S., Shafiq, M., Ali, A., ... & Hamam, H. (2022). Assessing land cover transformation for urban environmental sustainability through satellite sensing. *Sustainability*, 14(5), 2810. <https://doi.org/10.3390/su14052810>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. CRC press.
- Dhanaraj, K., & Angadi, D. P. (2021). Urban expansion quantification from remote sensing data for sustainable land-use planning in Mangaluru, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100602. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100602>
- Drăguț, L. & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81(3), 330-344. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013>
- Fassnacht, F. E., Hartig, F., Latifi, H., Berger, C., Hernández, J., Corvalán, P. & Koch, B. (2014). Importance of sample size, data type and prediction method for remote sensing-based estimations of aboveground forest biomass. *Remote Sensing of Environment*, 154, 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.028>

- Flamenco-Sandoval, A., Ramos, M. M., & Masera, O. R. (2007). Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological conservation*, 138(1-2), 131-145. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.04.022>
- Gardi, S. and Asfahani, J. 2019. Subsurface tectonic characterizations by the use of geo-electrical resistivity technique and their implications on environmental soil and groundwater at Erbil dumpsite, west of Erbil city–Iraqi Kurdistan region. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 49(3), 325-354. <https://doi.org/10.2478/congeo-2019-0017>
- Ghobadi, M., & Ahmadipari, M. (2023). Spatial analysis of land use/land cover (LULC) changes to support sustainable land management based on landscape metrics. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 7(1). Doi: [10.22059/eoge.2023.357777.1140](https://doi.org/10.22059/eoge.2023.357777.1140)
- Hosseinabadi, S., and Akbari, A. (2023). Analysis of land use and landscape changes in urban areas and their surroundings: a case study: Shahrood city. *Sustainable City Journal*, 6(3), 79-98. Doi: [10.22034/jsc.2024.367302.1663](https://doi.org/10.22034/jsc.2024.367302.1663).(In Persian).
- Hu, S., Yang, Z., Galindo Torres, S. A., Wang, Z., Han, H., Wada, Y., ... & Li, L. (2025). Statistical distribution of urban area reveals a converging trend of global urban land expansion. *Earth's Future*, 13(1), e2024EF005130.
- Husson, E., Ecke, F., & Reese, H. (2016). Comparison of manual mapping and automated object-based image analysis of non-submerged aquatic vegetation from very-high-resolution UAS images. *Remote Sensing*, 8(9), 724.
- Iraqi Meteorological Organization and Seismology. (2025). *National Member Service profile: Iraq. World Meteorological Organization*. Retrieved from <https://community.wmo.int/en/members/irq>
- Kadioğulları, A. İ. (2013). Assessing implications of land use and land cover changes in forest ecosystems of NE Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 2095-2106. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-012-2691-0>
- Kaviani, A., Farhodi, R., & Rajabi, A. (2015). Analysis of Tehran's urban growth pattern using a landscape ecology approach. *Urban Planning Geographical Research Journal*, 3(4), 407–429. Doi: [10.22059/jurbangeo.2015.57410](https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2015.57410). (in Persian)
- Kaviani, A., Farhodi, R., & Rajabi, A. (2015). Analysis of Tehran's urban growth pattern using a landscape ecology approach. *Urban Planning Geographical Research Journal*, 3(4), 407–429. Doi: [10.22059/jurbangeo.2015.57410](https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2015.57410). (in Persian)
- Khoshnaw, R. (2023). Evaluating Mixed Land Use and Connectivity: A Case Study of Five Neighborhoods in Erbil City, Iraq. *Sustainability*, 15(19), 14265. <https://doi.org/10.3390/su151914265>.
- Khoshnaw, R. (2023). Evaluating Mixed Land Use and Connectivity: A Case Study of Five Neighborhoods in Erbil City, Iraq. *Sustainability*, 15(19), 14265. <https://doi.org/10.3390/su151914265>.
- Leitão, A. B., Miller, J., Ahern, J., & McGarigal, K. (2012). *Measuring landscapes: A planner's handbook*. Island press.
- Mahiini, A. (2007). Landscape and erodibility criteria as two quantitative index categories for rapid assessment of the effects of development projects. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 14(1) 48-63 SID. <https://sid.ir/paper/433674/fa>.(In Persian).
- Mahmoodzadeh, H. and Masoudi, H. (2019). An analysis of structural changes in the landscape of Tabriz metropolis using the principles of landscape ecology and with an emphasis on the concept of continuity. *Scientific Journal of "Land Planning"*, 11(2), 179-204 . doi: [10.22059/jtcp.2019.288093.670019](https://doi.org/10.22059/jtcp.2019.288093.670019).(In Persian).

- McGarigal K., SA Cushman, and E Ene. 2025. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors; available at the following web site: <https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., & Ene, E. (2002). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. *Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst*. Available at the following web site: [www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html](http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html),6.
- Memarzadeh Kiani, A., and Daneshvar Fattah, F. (2023). Investigating the trend of agricultural land use changes in Shahriar County using remote sensing and GIS. *Journal of Natural Environment*, 76(4), 659-674. *Doi*: [10.22059/jne.2023.354658.2522](https://doi.org/10.22059/jne.2023.354658.2522).(In Persian).
- Mohammad, M. S., Elmastas, N., & Abdullah, H. (2021). *Temporal change of urban land use: the case of Erbil city*. Ecology, Environment and Conservation Paper, 27, 48-58.
- Mohammed, M. G. (2023). Land Use Land Cover Changes Detection of Erbil City Using GIS and Remote Sensing. *PTJ*, 13(1), 1044. <https://doi.org/10.25156/ptj.v13i1.1044>
- Navulur, K. (2006). *Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420043075>
- Nazmfar, H., and Shirzad, M. (2024). Monitoring changes in the landscape of the city and its surrounding environment based on the analysis of landscape metrics (case study: Ardabil City). *Environmental Science Studies*, 9(4), 9740-9729. *doi*: [10.22034/jess.2023.365413.1887](https://doi.org/10.22034/jess.2023.365413.1887).(In Persian).
- Norouzi Golekhalaei, S., Hatami, A. and S., Parvizi Marivani. (2022). Analysis of spatial growth patterns of Kermanshah city with a landscape ecology approach. *Scientific Journal of Physical Development Planning*, 7th year, No. 3 (new series), 27th series, pp. 64-49. *Doi*: [10.30473/psp.2022.62702.2573](https://doi.org/10.30473/psp.2022.62702.2573).(In Persian).
- Perregrini, D., & Casella, V. (2022). *Creation of Soil Permeability Maps Trough Obia Classification of Very High-Resolution Satellite Images*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 159-166. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-159-2022>
- Pishnamaz Ahmadi, M., Mohammadzadeh, K., & Hejazi, S. A. (2017). Assessment of forest cover change patterns using object-based fuzzy techniques (Case study: Kaleybar County). *Geography and Environmental Sustainability*, 7(4), 95–111.
- Radin Majd, G., Jozi, S. A., Hejazi, R., Amiri, M. J. and H. R. Ghafarzadeh. (2022). Investigating the trend of changes in landscape indicators using the urban-rural gradient analysis method (case study: Tehran metropolis). *Land Planning*, 17th volume, autumn and winter 1400, No. 2 (serial 25). *doi*: [10.22059/jtcp.2021.326563.670236](https://doi.org/10.22059/jtcp.2021.326563.670236).(In Persian).
- Rasouli, A. A., Cheung, K. K., Mohammadzadeh Alajujeh, K., & Ji, F. (2022). On the detection of snow cover changes over the Australian Snowy Mountains using a dynamic OBIA approach. *Atmosphere*, 13(5), 826.
- Sarif, M. O., & Gupta, R. D. (2022). Spatiotemporal mapping of Land Use/Land Cover dynamics using Remote Sensing and GIS approach: a case study of Prayagraj City, India (1988–2018). *Environment, Development and Sustainability*, 24(1), 888-920. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-021-01475-0>
- Sattar, T., Mirza, N. F., Javed, M. A., Nasar-u-Minallah, M., & Malik, S. (2025). Changing pattern of urban landscape and its impact on thermal environment of Lahore; Implications for climate change and sustainable development. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(2), 151. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-024-13559-1>

- Schwarz, N. (2010). Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and urban planning*, 96(1), 29-47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.01.007>
- Talema, A. H., & Nigusie, W. B. (2024). Spatio-temporal analysis of urban expansion using remote sensing data and GIS for the sustainable management of urban land: the case of Burayu, Ethiopia. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 35(5), 1096-1117. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2023-0196>
- Varol, B., Szabo, S., Topaloğlu, R. H., Aksu, G. A., & Sertel, E. (2024). Analysis of the association between image resolution and landscape metrics using multi-sensor LULC maps. *Journal of Environmental Planning and Management*, 67(10), 2281-2302. <https://doi.org/10.1080/09640568.2023.2185507>
- Wiatkowska, B., Słodczyk, J., & Stokowska, A. (2021). Spatial-temporal land use and land cover changes in urban areas using remote sensing images and GIS analysis: The case study of Opole, Poland. *Geosciences*, 11(8), 312. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080312>
- Wijaya, A., Budiharto, R. S., Tosiani, A., Murdiyarso, D. & Verchot, L. V. (2015). Assessment of Large Scale Land Cover Change Classifications and Drivers of Deforestation in Indonesia. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(7), 557-573. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-557-2015>
- Wu, J., Jenerette, G. D., Buyantuyev, A., & Redman, C. L. (2011). Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. *Ecological Complexity*, 8(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2010.03.002>
- Yaghoobi, M., Vafaenejad, A., Moradi, H., & Hashemi, H. (2022). Analysis of landscape composition and configuration based on LULC change modeling. *Sustainability*, 14(20), 13070. <https://doi.org/10.3390/su142013070>
- Yang, X., Blower, J. D., Bastin, L., Lush, V., Zabala, A., Masó, J., ... & Lumsden, J. (2013). An integrated view of data quality in Earth observation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1983), 20120072. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0072>
- Yazdanpanah, M., Yavari, A., Zavarat, L., Al-Mohammad, S. (2015). *Evaluation of urban green infrastructures for their gradual improvement in the landscape of Tehran*, Environment, Volume 41, No. 3 Doi; [10.22059/jes.2015.55900](https://doi.org/10.22059/jes.2015.55900) .(In Persian).