



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 33, Issue 2, No.86, Summer 2022, pp. 1- 6
Received: 15/09/2021 Accepted: 29/01/2022

Evaluation and Prediction of Land-Use Changes using the CA_Markov Model

Zeynab Karimzadeh Motlagh¹, Ali Lotfi^{2*}, Saeid Pourmanafi³, Saeed Reza Ahmadizadeh⁴

1- PhD Candidate of Environment Sciences, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

z.karimzadeh@na.iut.ac.ir

2- Assistant Professor of Environmental Sciences, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

lotfi@cc.iut.ac.ir

3-

3-Assistant Professor of Environmental Sciences, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

spourmanafi@cc.iut.ac.ir

4-Associate Professor of Environmental Sciences, Department of Natural Resources, Birjand University, Birjand, Iran

sahmadi@birjand.ac.ir

Abstract

The purpose of this study was to model and predict temporal and spatial patterns of land-use change in the Zayandehrud basin. In this research, the CA-Markov prediction model was used to simulate and predict land-use change. First, the land-use changes from 1996 to 2018 were studied and then the future changes for 2030 and 2050 were simulated. Afterward, the future land-use scenarios were designed. The model was validated by comparing the simulated map of 2018 with the real map, and the kappa coefficient of 94 % was utilized to evaluate the model. Based on the results, the Built-up land-use was altered from 13016 hectares in 1996 to 154194 hectares in 2050. This outcome necessitates the management of the future development of the city. Furthermore, the amount of agricultural land was varied from 177067 hectares in 1996 to 40,000 hectares in 2050. Among all the changes, agricultural lands attracted the most attention and concerns. The results indicated the land-use changes in the form of urban areas and reducing area of agricultural lands. Such alterations were taken place in two distinct stages: urban lands have been developing since 2013, with a direct impact on the reduction of vegetation due to the conversion of agricultural lands into other land-uses. The

*Corresponding Author

Karimzadeh Motlagh, Z., Lotfi, A., Pourmanafi, S., Ahmadizadeh, S. (2022). Evaluation and Prediction of Land-Use Changes using CA_Markov Model. *Geography and Environmental Planning*, 33 (2), 1-6.

2252- 0910/ © 2022 The Authors. Published by University of Isfahan

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



<http://dx.doi.org/10.22108/gep.2022.130601.1458>



[20.1001.1.20085362.1401.33.2.1.1](https://doi.org/10.22108/gep.2022.130601.1458)



dynamic trend of changes has also been confirmed and intensified since 1996. In 2018, a significant area of agricultural lands was converted into urban and industrial areas. In addition, the agricultural and orchard lands were 74057 hectares in 2018 and can be reduced to 40,000 hectares by 2050. It revealed 34057 hectares lost as compared to the agricultural and orchard lands in 2018. The present study depicts that the expansion of urban and industrial activities and reducing the level of agricultural land in the region requires more attention and care in land management.

Extended Abstract:

Introduction: Land use/Land cover (LULC) change is one of the main issues of sustainable development. To provide a rational science for regional planning decisions and sustainable development, land use pattern prediction models based on past preliminary information can be used to construct future scenarios of land-use changes. Modeling and predicting land use changes provide an interesting perspective for applications in planning units such as river basins and make it an effective tool for analyzing the causal dynamics of the future landscape under different scenarios. Land-use models are considered a powerful tool for understanding the spatio-temporal pattern of land-use changes, such as the Markov chain, cellular automation, and hybrid models based on these methods, which are widely used to simulate the spatial and temporal dimensions of land use. In the present study, land use changes prediction was performed using a combined model of cellular automation and the Markov chain (CA-Markov) to simulate temporal and spatial land-use patterns. The present study tries to predict land-use changes in the Zayandehrood river basin. The Zayandehrud basin is currently facing major environmental problems (such as water resources scarcity, population growth, urban development, and agricultural land degradation). Therefore, it is essential to evaluate land-use changes for this sensitive basin. In particular, the objectives of the research include two stages: 1) patial modeling of land-use change, and 2) predicting spatio-temporal patterns of land-use changes in the Zayandehrud river basin.

Therefore, in the present research, land-use changes from 1996 to 2018 were investigated and future changes for 2030 and 2050 were simulated.

Methodology: In this research, land-use changes modeling was performed in three time periods 1996 to 2013 (17-year period), 2013 to 2018 (5-year period), and 2018 to 2030 and 2050. The purpose of modeling is to determine the capabilities of the Markov chain model and integrate it with cellular automation to detect land-use changes. The images were classified into 4 classes: agriculture and gardens, built-up (urban areas, airport, and road), industrial towns, and other land uses (abandoned lands and fallow, rangeland, water areas). Finally, land-use changes modeling was performed in the period 1996 to 2050 (54-year period). The steps of the research method are as follows:

Step 1: Pre-processing of satellite images: Radiometric correction was applied to the images. Next, the images were processed using the FLAASH module in ENVI5.3 software to reduce atmospheric interference. Then, by synthesizing the name and wavelength of the bands, image storage, mosaic, and mask clipping, a preprocessed remote sensing image was generated. Finally, the preprocessed remote sensing image was obtained.

Step 2: Processing satellite images: Types of land use images in the area in ENVI 5.3 were extracted using visual interpretation and supervised classification methods. Land use classification algorithms were used to estimate the three main land-use classes (agriculture, urban, and industrial development). The principal component analysis method was performed on the images and was identified agricultural by high resolution. Land use classification for 1996, 2013, and 2018 was done with a classification approach based on the decision tree. To classify the images, maximum likelihood methods, artificial neural networks, and support vector machines were used. The final classification was performed using decision tree analysis. Finally, prediction of land-use changes was performed on images by performing the CA_Markov analysis in TerrSet software.

Step 3: Post-processing of satellite images: Using Google Earth and cross-tab analysis, TerrSet software evaluated the accuracy of classifying land-use thematic maps. Using the existing database, a validation process was performed to ensure the accuracy of the model in predicting land-use changes for the forecasted 2018 map. The accuracy of the simulated model of land-use change in 2018 was validated and then compared with the actual map of the same year. The validation process was performed by generating the kappa coefficient.

Discussion: In this study, land-use changes in the Zayandehrood basin were identified and investigated. The results showed that land-use changes are in the form of urban development and reduction of agricultural land use. Such changes have occurred in two distinct stages. First, urban land expansion has prevailed since 2013, with a direct impact on declining vegetation as a result of the conversion of agricultural land to other land uses. The dynamic trend of changes has also been confirmed and intensified since 1996. Because in 2018, a significant area of agricultural lands was converted into urban and industrial areas. Future scenarios based on the CA-Markov model provide valuable information about future land use and land cover changes in the study area. This study can identify land-use changes in different periods and depict the increase or decrease of important land uses in the region. According to the study of Motlagh et al. (2020), land-use changes were studied based on three possible scenarios (i.e. the current trend of land use growth, conservation of agricultural lands, and urban development forecast). Future scenarios for 2030 and 2050 estimate that there will be a significant reduction in vegetation and agricultural lands and orchards and continued urban and industrial development in areas along the Zayandehrood basin. Expansion of the agricultural sector along with the conservation of natural resources is not only one of the most important challenges of sustainable development in the Zayandehrud basin but is also essential for future strategic land use plans. Compilation of instructions for sustainable agricultural development can be a way to strike a balance between nature conservation and economic development in the region.

Conclusion: In summary, this study demonstrates how the proposed CA-Markov model is used to better simulate land use complex and dynamic changes over time. Of all the land-use changes, the most worrying is the situation in the region for agricultural lands. If the current trend of land use continues, we estimate that by 2050, its area will be halved, and such changes in the landscape will undoubtedly change the entire ecosystem of the basin, emphasizing that the negative effects on the

vegetation of the basin have a direct impact on the economic sector of the region because maintaining the quality of the environment of the Zayandehrood river basin is essential for ecotourism. Therefore, the management and planning of the basin are highly recommended to preserve its unique ecosystem, as well as to protect the vegetation in the area. The methods and results of this study will be useful for policymakers and urban planners for precise planning of the region to be able to manage the city using farms and conserving water resources and urban infrastructure development planning for environmentally sustainable development.

Keywords: Land-Use Changes, Cellular Automation, the Markov Chain, Zayandehrud River Basin.

References

- Asgarian, A., Soffianian, A., Pourmanafi, S., & Bagheri, M. (2018). Evaluating the spatial effectiveness of alternative urban growth scenarios in protecting cropland resources: A case of mixed agricultural-urbanized landscape in central Iran. *Journal of Sustainable Cities and Society*, 43, 197-207.
- Assaf, C., Adamsa, C., Ferreira, F. F., & Françac, H. (2021). Land use and cover modeling as a tool for analyzing nature conservation policies – A case study of Juréia-Itatins. *Journal of Land Use Policy*, 100, 104895.
- Aung, T. S., Fischer, T. B., & Buchanan, J. (2020). Land use and land cover changes along the China-Myanmar oil and gas pipelines-Monitoring infrastructure development in remote conflict-prone regions. *PloS one*, 15(8), e0237806.
- Baqa, M. F., Chen, F., Lu, L., Qureshi, S., Tariq, A., Wang, S., ... & Li, Q. (2021). Monitoring and modeling the patterns and trends of urban growth using urban sprawl matrix and CA-Markov model: A case study of Karachi, Pakistan. *Land*, 10(7), 700.
- Cunha, E. R. D., Santos, C. A. G., da Silva, R. M., Bacani, V. M., & Pott, A. (2021). Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil. *Journal of Land Use Policy*, 101, 105141.
- Dey, N. N., Al Rakib, A., Kafy, A. A., & Raikwar, V. (2021). Geospatial modelling of changes in land use/land cover dynamics using Multi-layer perception Markov chain model in Rajshahi City, Bangladesh. *Journal of Environmental Challenges*, 4, 100148.
- Gharaibeh, A., Shaamala, A., Obeidat, R., & Al-Kofahi, S. (2020). Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model. *Heliyon*, 6(9), e05092.
- Ghosh, S., Chatterjee, N. D., & Dinda, S. (2021). Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models: A case study on Kolkata Metropolitan Area, India. *Journal of Sustainable Cities and Society*, 68, 102773.
- Huang, Y., Yang, B., Wang, M., Liu, B., & Yang, X. (2020). Analysis of the future land cover change in Beijing using CA-Markov chain model. *Journal of Environmental Earth Sciences*, 79(2), 1-12.
- Ji, G., Lai, Z., Xia, H., Liu, H., & Wang, Z. (2021). Future runoff variation and flood disaster prediction of the yellow river basin based on CA-Markov and SWAT. *Land*, 10(4), 421.

- Khwarahm, N. R., Qader, S., Ararat, K., & Al-Quraishi, A. M. F. (2021). Predicting and mapping land cover/land use changes in Erbil /Iraq using CA-Markov synergy model. *Journal of Earth Science Informatics*, 14(1), 393–406.
- Li, Q., Wang, L., Gul, H. N., & Li, D. (2021). Simulation and optimization of land use pattern to embed ecological suitability in an oasis region: A case study of Ganzhou district, Gansu province, China. *Journal of Environmental Management*, 287, 112321.
- Matlhodi, B., Kenabatho, P. K., Parida, B. P., & Maphanyane, J. G. (2021). Analysis of the future land use land cover changes in the gaborone dam catchment using ca-markov model: Implications on water resources. *Journal of Remote Sensing*, 13(13), 2427.
- Mitsova, D., Shuster, W., & Wang, X. (2011). A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Journal of Landscape and Urban Planning*, 99(2), 141–153.
- Motlagh, Z. K., Lotfi, A., Pourmanafi, S., Ahmadizadeh, S., & Soffianian, A. (2020). Spatial modeling of land-use change in a rapidly urbanizing landscape in central Iran: Integration of remote sensing, CA Markov, and landscape metrics. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11), 1-19.
- Munthali, M. G., Mustak, S., Adeola, A., Botai, J., Singh, S. K., & Davis, N. (2020). Modelling land use and land cover dynamics of Dedza district of Malawi using hybrid Cellular Automata and Markov model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100276.
- Nath, B., Wang, Z., Ge, Y., Islam, K., Singh, R. P., & Niu, Z. (2020). Land use and land cover change modeling and future potential landscape risk assessment using Markov-CA model and analytical hierarchy process. *International Journal of Geo-Information*, 9(2), 134.
- Rahnama, M. R. (2021). Forecasting land-use changes in Mashhad metropolitan area using cellular Automata and Markov chain model for 2016-2030. *Journal of Sustainable Cities and Society*, 64, 102548.
- Ruben, G. B., Zhang, K., Dong, Z., & Xia, J. (2020). Analysis and projection of land-use/land-cover dynamics through scenario-based simulations using the CA-Markov model: A case study in guanting reservoir basin, China. *Sustainability*, 12(9), 3747.
- Sibanda, S., & Ahmed, F. (2021). Modelling historic and future land use/land cover changes and their impact on wetland area in Shashe sub-catchment, Zimbabwe. *Journal of Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1), 57–70.
- Silver, D., & Silva, T. H. (2021). A Markov model of urban evolution: Neighbourhood change as a complex process. *Plos One*, 16(1), e0245357.
- Tang, F., Fu, M., Wang, L., Song, W., Yu, J., & Wu, Y. (2021). Dynamic evolution and scenario simulation of habitat quality under the impact of land-use change in the Huaihe river economic belt, China. *Plos One*, 16(4), e0249566.
- Tariq, A., & Shu, H. (2020). CA-Markov chain analysis of seasonal land surface temperature and land use land cover change using optical multi-temporal satellite data of Faisalabad, Pakistan Aqil Tariq and Hong Shu. *Remote Sensing*, 12(20), 3402.

- Tavangar, Sh., Moradi, H., Massah Bavani, A., & Gholamalifard, M. (2019). A futuristic survey of the effects of LU/LC change on stream flow by CA–Markov model: A case of the Nekarood watershed, Iran. *Geocarto International*, 36(10), 1100-1116.
- Vinayak, B., Lee, H. S., & Gedem, S. (2021). Prediction of land use and land cover changes in Mumbai city, India, using remote sensing data and a multilayer perceptron neural network-based markov chain model. *Sustainability*, 13(2), 471.
- Wang, Q., Guan, Q., Lin, J., Luo, H., Tan, Z., & Ma, Y. (2021). Simulating land use/land cover change in an arid region with the coupling models. *Journal of Ecological Indicators*, 122, 107231.
- Wang, H., & Hu, Y. (2021). Simulation of biocapacity and spatial-temporal evolution analysis of Loess Plateau in northern shaanxi based on the CA–Markov model. *Sustainability*, 13(11), 5901.
- Wang, S. W., Munkhnasan, L., & Lee, W. (2021). Land use and land cover change detection and rr iii tt inn in Bttt ’’ s ii gh-altitude city of Thimphu, using cellular automata and Markov chain. *Journal of Environmental Challenges*, 2, 100017.
- Zhou, L., Dang, X., Sun, Q., & Wang, S. (2020). Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Journal of Sustainable Cities and Society*, 55, 102045.





ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA_Markov

زینب کریم‌زاده مطلق، دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست (آمایش محیط‌زیست)، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

z.karimzadeh@na.iut.ac.ir

علی لطفی*، استادیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

lotfi@cc.iut.ac.ir

سعید پورمنافی، استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

spourmanafi@cc.iut.ac.ir

سید سعیدرضا احمدی‌زاده، دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

sahmadi@birjand.ac.ir

چکیده

تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین، یکی از موضوعات اصلی توسعه پایدار است. به منظور ارائه علمی منطقی برای تصمیمات برنامه‌ریزی منطقه‌ای و توسعه پایدار می‌توان از مدل‌های پیش‌بینی الگوهای کاربری اراضی استفاده کرد. بر این اساس هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی و پیش‌بینی الگوهای زمانی و مکانی تغییر کاربری اراضی حوضه زاینده‌رود است. در این پژوهش از مدل اتوماتای سلولی و زنجیره مارکوف برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی استفاده شد. تغییرات کاربری اراضی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۸ بررسی و تغییرات آینده برای سال ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ شبیه‌سازی و سناریوهای آینده کاربری اراضی طراحی شد. اعتبارسنجی مدل با مقایسه نقشه شبیه‌سازی شده سال ۲۰۱۸ با نقشه واقعی آن انجام و از ضریب کاپا برای ارزیابی مدل استفاده و ضریب کاپای ۹۴٪ حاصل شد. براساس نتایج، کاربری انسان‌ساخت از ۱۳۰۱۶ هکتار در سال ۱۹۹۶ به ۱۵۴۱۹۴ هکتار در سال ۲۰۵۰ تغییر می‌یابد و مدیریت توسعه آبی شهر را می‌طلبد. میزان اراضی کشاورزی از ۱۷۷۰۶۷ هکتار در سال ۱۹۹۶ به ۴۰۰۰۰ هکتار در سال ۲۰۵۰ تغییر می‌یابد. در میان تمام تغییرات، نگران‌کننده‌ترین وضعیت برای اراضی کشاورزی است. نتایج نشان می‌دهد تغییرات کاربری اراضی به صورت گسترش مناطق شهری و کاهش مساحت کاربری کشاورزی است. چنین تغییراتی در دو مرحله مشخص رخ داده است. اراضی شهری از سال ۲۰۱۳ با تأثیر مستقیم در کاهش پوشش گیاهی به مثابه یک نتیجه از تبدیل اراضی کشاورزی به سایر کاربری‌ها توسعه می‌یابد. همچنین تأیید شده است که روند تغییرات پس از سال ۱۹۹۶ پویا بوده و شدت یافته است؛ زیرا در سال ۲۰۱۸ منطقه وسیعی از اراضی کشاورزی به مناطق شهری و صنعتی تبدیل شده است. اراضی کشاورزی و باغ‌ها در سال ۲۰۱۸ شامل ۷۴۰۵۷ هکتار است و تا سال ۲۰۵۰ می‌تواند به ۴۰۰۰۰ هکتار کاهش یابد که به معنی از دست دادن ۳۴۰۵۷ هکتار نسبت به پوشش اراضی کشاورزی و باغ‌ها در سال ۲۰۱۸ است. نتایج پژوهش حاضر مبنی بر گسترش فعالیت‌های شهری و صنعتی و کاهش سطح اراضی کشاورزی در منطقه، توجه بیشتر برنامه‌ریزان محیط‌زیست را برای تصمیم‌گیری و مدیریت بهتر می‌طلبد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات کاربری اراضی، اتوماتای سلولی، زنجیره مارکوف، حوضه رودخانه زاینده‌رود

1. Land use/Land cover (LULC)

2. CA_Markov

*نویسنده مسئول

کریم زاده مطلق، زینب، لطفی، علی، پور منافی، سعید، احمدی زاده، سید سعیدرضا. (۱۴۰۰). ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل

CA_Markov. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۳ (۲)، ۸۰-۶۳.



مقدمه

تغییرات کاربری و پوشش زمین^۱، از موضوعات اصلی بررسی تأثیرات زیست‌محیطی جهانی و توسعه پایدار است. توسعه شهری تأثیر زیادی بر کاربری و پوشش زمین می‌گذارد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ کریم‌زاده مطلق و همکاران، ۱۳۹۹؛ Dey et al., 2021; Aung et al., 2020). تأثیرات تغییر کاربری اراضی ناشی از شهرنشینی سریع، پایداری محیط را مختل می‌کند. رشد جمعیت و توسعه اقتصادی، عامل محرک و تحول در پوشش‌های مختلف زمین مانند پوشش گیاهی و آب است. این تحول مداوم تغییر کاربری اراضی باعث تخریب محیط‌زیست می‌شود. شدت این تغییرات در پاسخ به رشد جمعیت جهان و پیامدهای آن بر محیط‌زیست، ضرورت انجام مطالعات دقیق را درباره تغییرات دوچندان می‌کند. تجزیه و تحلیل پویایی تغییرات کاربری اراضی در درازمدت برای درک و ارزیابی تغییرات مختلف در محیط مهم است که به دستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک می‌کند (Ruben et al., 2020; Dey et al., 2021)؛ بنابراین به‌منظور ارائه علمی منطقی برای تصمیمات برنامه‌ریزی منطقه‌ای و توسعه پایدار می‌توان از مدل‌های پیش‌بینی الگوهای کاربری اراضی براساس اطلاعات مقدماتی گذشته برای ساخت سناریوهای آینده تغییرات کاربری و پوشش زمین استفاده کرد.

مدل‌سازی پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش زمین چشم‌انداز جالبی برای برنامه‌های کاربردی در واحدهای برنامه‌ریزی مانند حوضه‌های رودخانه ایجاد و آن را به ابزاری مؤثر برای تجزیه و تحلیل علیت پویایی چشم‌انداز آینده تحت سناریوهای مختلف تبدیل می‌کند (Wang et al., 2021). مدل‌های استفاده از زمین به‌مثابه ابزاری قدرتمند برای درک الگوی مکانی‌زمانی تغییرات کاربری زمین در نظر گرفته می‌شوند؛ مانند زنجیره مارکوف (کیانی سلمی و ابراهیمی، ۱۳۹۷؛ سارلی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Silver and Silva, 2021; Vinayak et al., 2021)، اتوماتای سلولی (Motlagh et al., 2020) و مدل‌های ترکیبی مبتنی بر این روش‌ها (Wang and Hu, 2021; Rahnama, 2021; Matlhodi et al., 2021; Wang et al., 2021; Ghosh et al., 2021; Baqa et al., 2021; Ji et al., 2021; Tang et al., 2021) که به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی ابعاد مکانی و زمانی کاربری اراضی استفاده می‌شوند.

توانایی مدل اتوماتای سلولی^۲ در شبیه‌سازی توزیع فضایی واحدهای زمین و مزیت زنجیره مارکوف در پیش‌بینی تنوع زمانی در بین انواع کاربری اراضی است (Li et al., 2021). اگرچه مدل‌های مارکوف قادرند تعداد تغییرات کاربری و پوشش زمین را از طریق یک ماتریس احتمال انتقال شبیه‌سازی کنند، ظرفیت شبیه‌سازی تغییرات در روند فضایی را ندارند؛ بنابراین ترکیبی از مدل‌های اتوماتای سلولی و مارکوف به دلیل توانایی استفاده از مجموعه داده‌های

1. Land use/Land cover (LULC)
2. Cellular Automata (CA)

سنجش از دور^۱ در یک محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS)، مدل‌سازی پویایی فضایی زمانی را بهبود می‌بخشد (Khwarahm et al., 2020; Tariq and Shu, 2020; Zhou et al., 2020; Munthali et al., 2020). همچنین بسیاری از داده‌های سنجش از دور مانند تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنتینل که شامل یک رکورد طولانی مدت از مشاهدات سطح زمین است، یک مجموعه تقریباً جهانی از داده‌ها و اطلاعات قابل اعتماد را برای تشخیص، نظارت و نقشه‌برداری از پویایی تغییرات کاربری اراضی در اختیار برنامه‌ریزان محیط‌زیست قرار می‌دهد.

برای مطالعه این تغییرات، پیشرفت‌های تکنولوژیکی در سنجش از دور، GIS، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و روش‌های کمی، یک چهارچوب امیدوارکننده برای ارزیابی و پایش تغییرات کاربری اراضی ارائه می‌دهند (Sibanda and Ahmed, 2020; Nath et al., 2020; Tavangar et al., 2019). یکپارچه‌سازی GIS و فناوری سنجش از دور، از ابزارها و الگوریتم‌های قدرتمندی برای پیش‌بینی آینده تغییرات کاربری و پوشش زمین استفاده می‌کند (حاجی‌بیگللو و همکاران، ۱۳۹۹؛ حیدری مظفر و جونقانی، ۱۴۰۰).

پژوهشگران در سراسر جهان رویکردهای مختلفی را به منظور پیش‌بینی الگوی تغییرات کاربری اراضی برای مناطق مطالعه‌شده خود در پیش گرفتند. بعضی از مدل‌های پیش‌بینی برای شبیه‌سازی پویایی تغییرات کاربری اراضی استفاده می‌شود (صالحی و همکاران، ۱۳۹۸؛ شفیع‌ی ثابت و همکاران، ۱۳۹۸؛ سعادت نوین و همکاران، ۱۳۹۸)؛ همچنین می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد:

علی‌محمدی سراب و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی توسعه مناطق مسکونی در حومه جنوب غرب تهران را با استفاده از مدل اتوماتای سلولی شبیه‌سازی کردند. آنها با استفاده از مدل وزن‌های شاهد، همبستگی توسعه اراضی مسکونی با داده‌های مکانی مختلف را بررسی کردند که از نتایج آن در شبیه‌سازی استفاده شد؛ همچنین برای پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات کاربری در مدل اتوماتای سلولی از سه مدل Direct, WoE, Hybrid با پارامترهای مختلف استفاده کردند.

در پژوهش ضیایان فیروزآبادی و همکاران (۱۳۸۸) به منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی رشد فیزیکی شهرکرد از تکنولوژی سنجش از دور و اتوماتای سلولی و مدل‌های آماری رگرسیون لجستیک استفاده شد. آنها به این نتایج رسیدند که استخراج قوانین انتقال در مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی و اتوماتای سلولی شهری، امری ضروری است؛ همچنین نحوه استفاده از این قوانین بسیار مهم است و بر نتایج در مدل‌های شبیه‌سازی تأثیر می‌گذارد.

در مطالعه حاضر مدل‌سازی پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش زمین با استفاده از مدل ترکیبی اتوماتای سلولی و زنجیره مارکوف^۳ (CA-Markov) و با توجه به مزایای مدل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی الگوهای زمانی و مکانی کاربری اراضی انجام شده است (Wang et al., 2021; Cunha et al., 2021). این مطالعه سعی در پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش زمین در حوضه رودخانه زاینده‌رود دارد. حوضه زاینده‌رود در حال حاضر با مشکلات اساسی زیست‌محیطی روبه‌روست (مانند کمبود منابع آب، رشد جمعیت، توسعه شهری و تخریب اراضی کشاورزی)؛ بنابراین

1. Remote Sensing (RS)
2. Geographic Information System (GIS)
3. CA-Markov

انجام ارزیابی تغییرات کاربری و پوشش زمین برای این حوضه حساس ضروری است. در این پژوهش از مدل CA-Markov برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش زمین به منظور برنامه‌ریزی مکانی استفاده می‌شود. به‌طور خاص اهداف پژوهش، مدل‌سازی فضایی تغییر کاربری اراضی و پیش‌بینی الگوهای زمانی و مکانی تغییر کاربری اراضی در منطقه مطالعه شده است؛ بنابراین در پژوهش حاضر، تغییرات کاربری و پوشش زمین از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۸ بررسی و تغییرات آینده برای سال ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ شبیه‌سازی شد.

روش‌شناسی پژوهش

معرفی محدوده پژوهش

حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود با مساحت حدود ۲۲۶۷۸۸۵ هکتار در استان اصفهان واقع شده است و بیش از ۳ میلیون نفر جمعیت دارد. این حوضه ناحیه تقریباً وسیعی را شامل می‌شود که قسمت عمده‌ای از جمعیت، صنعت و کشاورزی در آن واقع شده است. بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در حوضه است. شکل ۱ موقعیت مکانی منطقه مطالعه شده را در استان اصفهان و ایران نشان می‌دهد.

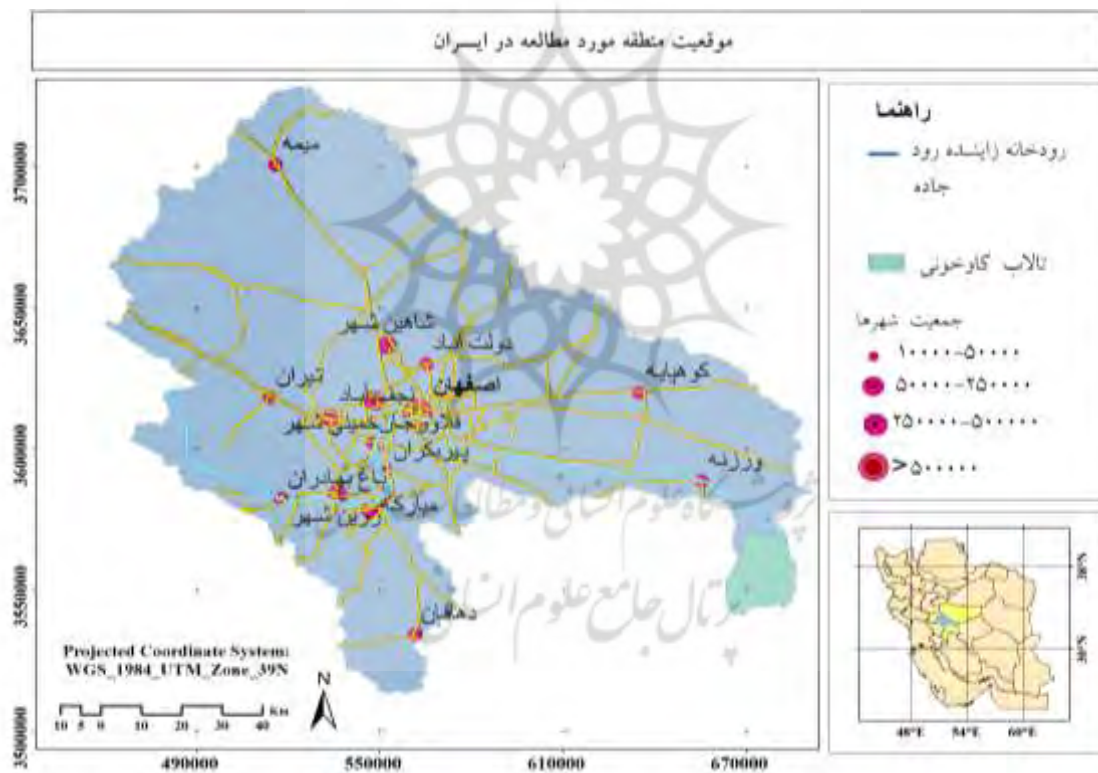


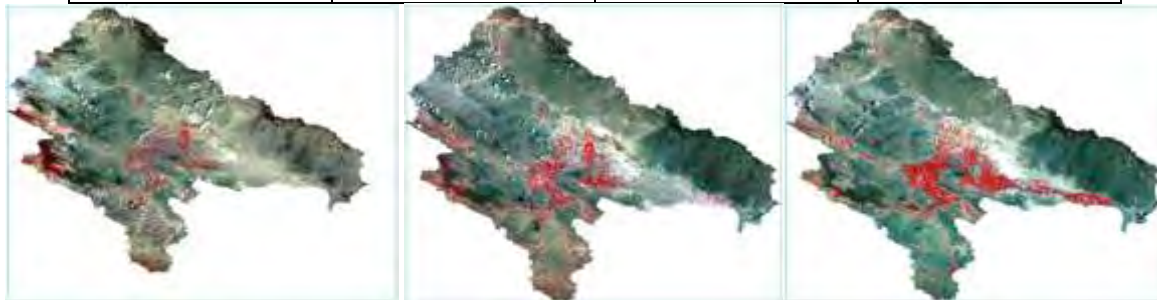
Figure 1. Location of the study area

در این پژوهش از سنجنده‌های TM و OLI لندست و تصویر ماهواره‌ای سنتینل استفاده (جدول ۱) و تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سری‌های زمانی ۱۹۹۶، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸ از سایت USGS تهیه شد (شکل ۲). برای بهبود دقت در تفسیر بصری، تصاویر عمدتاً براساس داده‌های سنجنش از دور از آوریل تا مه (برای تفکیک بهتر کشاورزی با سایر کاربری‌ها) انتخاب شده‌اند و ابر در تصاویر کمتر از ۱۰٪ است.

جدول ۱. اطلاعات داده‌های سنجش از دور

Table 1. Remote sensing data information

سال	نوع داده	شماره گذر و ردیف	دوره دریافت تصاویر
۱۹۹۶	TM لندست	۱۶۳-۱۶۴/۳۷-۳۸	۱۹۹۶/۴/۲۰ - ۱۹۹۶/۵/۷
۲۰۱۳	OLI لندست	۱۶۳-۱۶۴/۳۷-۳۸	۲۰۱۳/۴/۲۰ - ۲۰۱۳/۵/۷
۲۰۱۸	ستینل	۱۶۳-۱۶۴/۳۷-۳۸	۲۰۱۸/۴/۲۰ - ۲۰۱۸/۵/۷



شکل ۲. تصاویر ماهواره‌ای حوضه آبریز زاینده‌رود با ترکیب باندهای ۴، ۳ و ۲ در سال‌های الف) ۱۹۹۶، ب) ۲۰۱۳ و ج) ۲۰۱۸


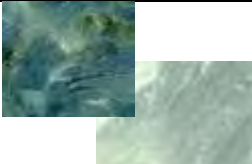
Figure 2. Satellite images of Zayandehrood basin with the combination of bands 4, 3 and 2 in years a) 1996, b) 2013 and c) 2018

در این پژوهش مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی در دو بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳ (دوره زمانی ۱۷ ساله) و ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ (دوره زمانی ۵ ساله) و ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ انجام شد. هدف از مدل‌سازی، تعیین میزان توانایی‌های مدل زنجیره مارکوف و تلفیق آن با اتوماتای سلولی به منظور آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی است. تصاویر در ۴ کلاس کشاورزی و باغ‌ها، انسان‌ساخت (مناطق شهری، فرودگاه، جاده)، شهرک صنعتی و سایر کاربری‌ها (اراضی رهاشده و آیش، مرتع، پهنه‌های آبی) طبقه‌بندی شدند (جدول ۲). در نهایت مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۵۰ (دوره زمانی ۵۴ ساله) انجام شد. فلوچارت روش پژوهش در شکل ۳ ارائه شده است.

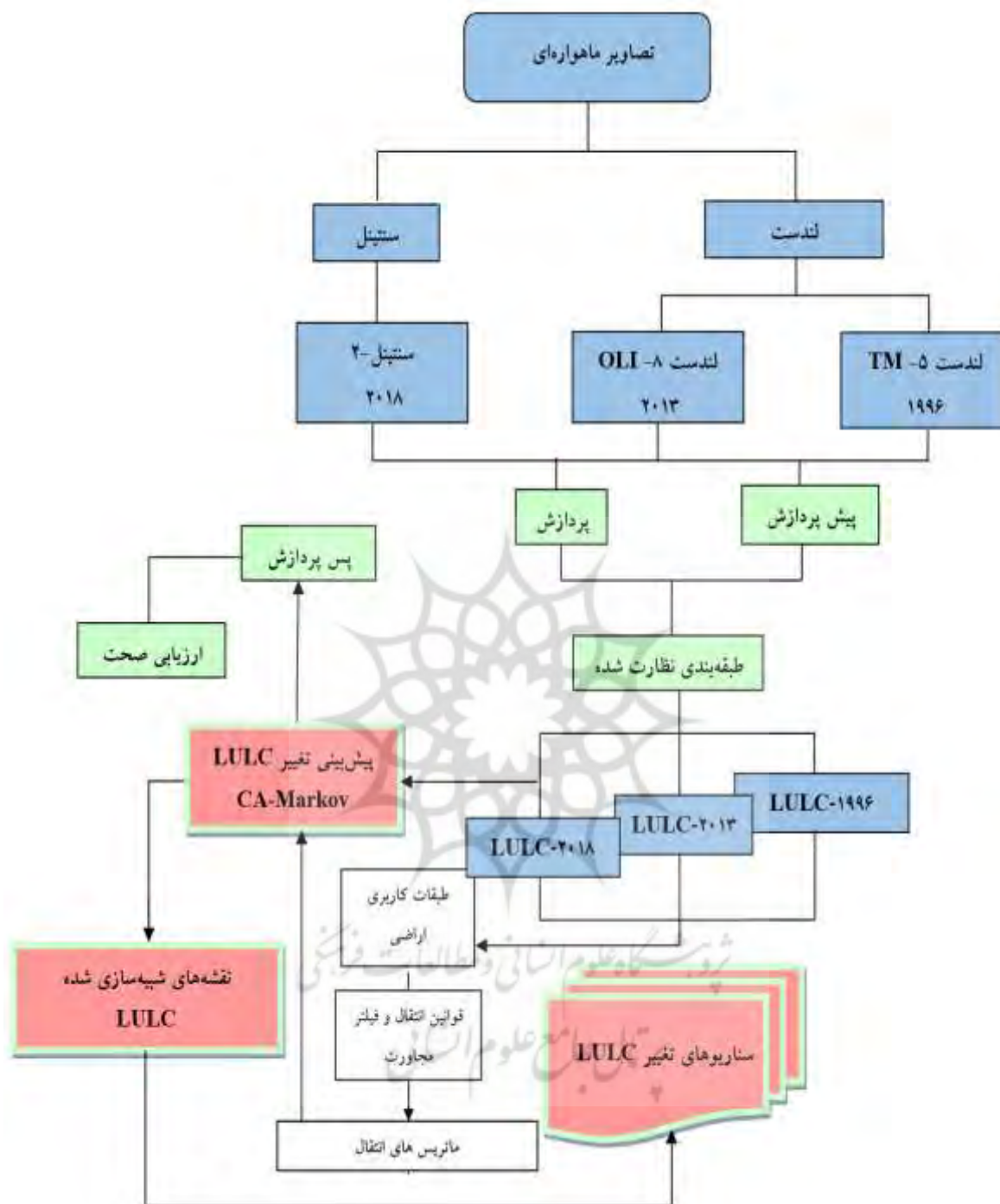
جدول ۲. تفسیر بصری علائم استفاده از کاربری اراضی

Table 2. Visual interpretation of land use signs

کاربری اراضی	مشخصات تصویر	تصویر کلاس‌ها
کشاورزی و باغ‌ها	اراضی کشاورزی (فاریاب و کشت دیم) و باغ‌ها	
انسان‌ساخت	مناطق شهری و مسکونی، جاده، فرودگاه	

<p>صنعت</p>	<p>شهرک‌های صنعتی، کارخانه‌ها، نیروگاه و پالایشگاه</p>	
<p>سایر کاربری‌ها</p>	<p>زمین‌های بدون پوشش سبز و بیرون‌زدگی سنگی، مرتع، آیش و پهنه‌های آبی</p>	





شکل ۳. فلوجارت روش پژوهش

Figure 3. Flowchart of research method

گام اول: پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

تصحیح رادیومتریک روی تصاویر اعمال شد. در مرحله بعدی، تصاویر با استفاده از ماژول FLAASH در نرم‌افزار ENVI5.3 با هدف کاهش تداخل‌های جوّی پردازش شدند؛ سپس با استفاده از سنتز نام و طول موج باندها،

ذخیره‌سازی تصویر، موزاییک و برش ماسک، تصویر سنجش از دور پیش‌پردازش شده تولید شد؛ بدین ترتیب که اطلاعات هندسی به صورت ثابت برای دیتاهای سنتینل اعمال شد. دیتاست باندهای ۱۰ متری و ۲۰ متری سنتینل به دست آمد (این کار برای ۱۲ فریم انجام شد). تمام باندها به ۲۰ متر ریسامپل شد و اسم و طول موج هریک از باندها به درستی تعیین شد. برای موزاییک هر کدام از این ۱۲ باند با یکدیگر به روش آزمون و خطای عددی در نظر گرفته و اجرا شد تا در نهایت عدد صحیح نتیجه خوبی داد و خط موزاییک در تصویر دیده نشد. در نهایت تصویر سنجش از دور پیش‌پردازش شده به دست آمد.

گام دوم: پردازش تصاویر ماهواره‌ای

مدل‌سازی، طبقه‌بندی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی

انواع تصاویر کاربری اراضی در منطقه در ENVI 5.3 با استفاده از روش‌های تفسیر بصری و طبقه‌بندی نظارت‌شده استخراج شد. الگوریتم‌های طبقه‌بندی کاربری و پوشش زمین برای برآورد سه کلاس اصلی کاربری زمین (کشاورزی - توسعه شهری و صنعتی) به کار گرفته شد. کلاس‌های کاربری براساس اطلاعات قبلی از منطقه مطالعاتی و اهداف این پژوهش، با توجه به سطح جزئیات مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل بعدی انتخاب شدند. روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۱ روی تصاویر اجرا و به تفکیک کاربری کشاورزی با وضوح زیاد مشخص شد. طبقه‌بندی کاربری و پوشش زمین برای سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸ با رویکرد طبقه‌بندی مبتنی بر درخت تصمیم^۲ انجام شد. به منظور طبقه‌بندی تصاویر از روش‌های حداکثر احتمال، شبکه عصبی مصنوعی^۳ و ماشین بردار پشتیبان^۴ استفاده شد. با استفاده از تحلیل درخت تصمیم، طبقه‌بندی نهایی انجام شد. در نهایت پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با اجرای آنالیز CA_Markov در نرم‌افزار TerrSet روی تصاویر اعمال شد.

مدل مارکوف و اتوماتای سلولی

مدل مارکوف

مدل‌های مارکوف اساساً مدل‌هایی هستند که حرکات احتمالی یک عنصر منفرد را در یک سیستم متشکل از حالت‌های گسسته توصیف می‌کنند. مدل‌های مارکوف بیشتر در مدل‌سازی تغییرات و روندهای استفاده از زمین و پوشش استفاده می‌شوند و در هنگام تحلیل روندها با گذشت زمان بسیار مطلوب هستند، اما زمینه مکانی ندارند و تأثیر همسایگی بر هر سلول را در نظر نمی‌گیرند. با در نظر گرفتن این موضوع، با استفاده از اتوماتای سلولی مدل‌های مارکوف تکمیل می‌شوند (Gharaibeh et al., 2020).

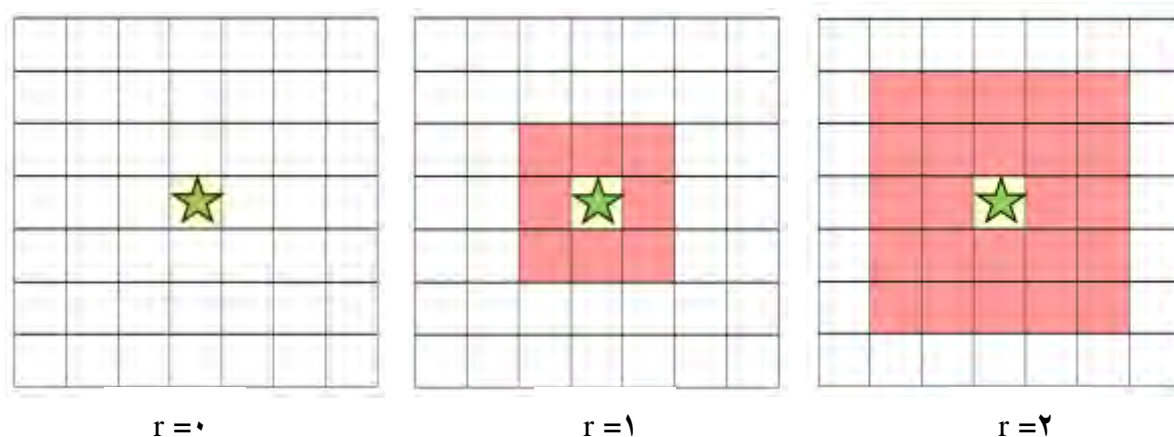
1. Principal Component Analysis (PCA)
2. Decision tree
3. Neural Network
4. Support Vector Machin (SVM)

اتوماتای سلولی

اتوماتای سلولی، سیستم‌های دینامیکی گسسته‌ای هستند که انواع رفتارهای پویا را در شبیه‌سازی سیستم‌های شهری از خود نشان می‌دهند. اتوماتای سلولی شامل مجموعه‌ای از حالت‌ها، فضای سلول و قوانین انتقال^۱ است. در اتوماتای سلولی، منطقه به شبکه‌ای از سلول‌ها تقسیم شده است. هر سلول معادل یک پیکسل در نقشه منطقه است. فضای سلولی، شبکه‌ای منظم از سلول‌های N است که در یک فضای n بعدی مرتب شده است. هر سلول براساس قوانین انتقال که وضعیت بعدی سلول را براساس وضعیت فعلی سلول و سلول‌های همسایگی خود تعیین می‌کند، با همسایگی خود تعامل دارد (Huang et al., 2020). وضعیت سلول در مرحله بعدی با توجه به مجموعه‌ای از قوانین انتقال به وضعیت فعلی سلول و همچنین حالات سلول‌های اطراف (همسایگی سلول) بستگی دارد. همسایگی مور، نوع متداول در اتوماتای سلولی است. در پژوهش حاضر، قوانین انتقال برای مازول CA_MARKOV در نرم‌افزار Terrset در قالب نقشه‌های تناسب براساس ارزیابی چندمعیاره و توابع عضویت فازی تنظیم شد که عوامل مختلف استفاده‌شده در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری کاربری زمین را در نظر می‌گیرد (Mitsova et al., 2011). از چندین عامل (شیب، فاصله از مراکز شهری، فاصله از راه‌های ارتباطی، همسایگی و...) به روش فازی استفاده شد. هر سلول در فضای مور، احتمال تبدیل کاربری خود را از این عوامل می‌گیرد. برای نرمال‌کردن مقادیر ارزشی کلاس‌ها از منطق فازی استفاده شد؛ سپس با توجه به نوع پارامترها، توابع فازی مدنظر به آنها اعمال شد. پارامترهای فازی شده برای آنالیز CA_Markov به کار گرفته شدند. در نهایت فیلتر همسایگی ۵ در ۵ مور به منظور ایجاد قوانین انتقال برای پیش‌بینی تغییرات آینده استفاده از زمین به کار رفت (Gharaibeh et al., 2020). در مقایسه با سایر مدل‌های پویا، اتوماتای سلولی از بعضی قوانین تشکیل شده است و ماهیت و امکان شبیه‌سازی یک سیستم پیچیده را دارد؛ بنابراین می‌تواند پدیده‌های طبیعی پیچیده را با وضوح، دقیق و کامل شبیه‌سازی کند (Huang et al., 2020).

محبوبیت اتوماتای سلولی از توانایی آن در مدل‌سازی مجاورت ناشی می‌شود که یک عنصر اساسی در بازتاب پویایی تغییرات کاربری زمین در نظر گرفته می‌شود. اتوماتای سلولی فرض می‌کند که اگر مناطق همسایه به آن دسته تعلق داشته باشند، تمایل بیشتری برای تغییر به یک گروه استفاده از زمین دارند. اصل اساسی رویکرد اتوماتای سلولی این است که الگوی توسعه شهری گذشته از طریق تعاملات محلی بر روند توسعه آینده تأثیر می‌گذارد (Gharaibeh et al., 2020).

در این پژوهش از توپولوژی همسایگی مور به شعاع ۱ استفاده شد که رایج‌ترین انتخاب در مدل‌های اتوماتای سلولی برای کاربری و پوشش زمین است. در این مدل، سلول هدف هشت همسایه دارد. در شکل ۴ توپولوژی اتوماتای سلولی دو بعدی برای سه مقدار شعاع ۲ مشاهده می‌شود (Assaf et al., 2021).



شکل ۴. توپولوژی اتوماتای سلولی دو بعدی، همسایگی مور (Assaf et al., 2021)

Figure 4. Topology of two-dimensional cellular automata, Moore neighborhood (Assaf et al., 2021)

گام سوم: پس پردازش تصاویر ماهواره‌ای

ارزیابی دقت تصاویر طبقه‌بندی شده

ارزیابی دقت تصویر طبقه‌بندی شده برای ارزیابی قابلیت اطمینان، اطلاعات اساسی است. برای این منظور با استفاده از گوگل ارث^۱ و آنالیز کراس‌تاب^۲ در نرم‌افزار TerrSet دقت طبقه‌بندی نقشه‌های موضوعی کاربری و پوشش زمین ارزیابی شد. با استفاده از پایگاه داده موجود، یک فرایند اعتبارسنجی برای اطمینان از صحت مدل در پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش زمین برای نقشه پیش‌بینی شده سال ۲۰۱۸ انجام شد. صحت مدل شبیه‌سازی شده تغییر کاربری اراضی سال ۲۰۱۸ اعتبارسنجی و سپس با نقشه واقعی همان سال مقایسه شد. فرایند اعتبارسنجی با تولید ضریب کاپا انجام شد.

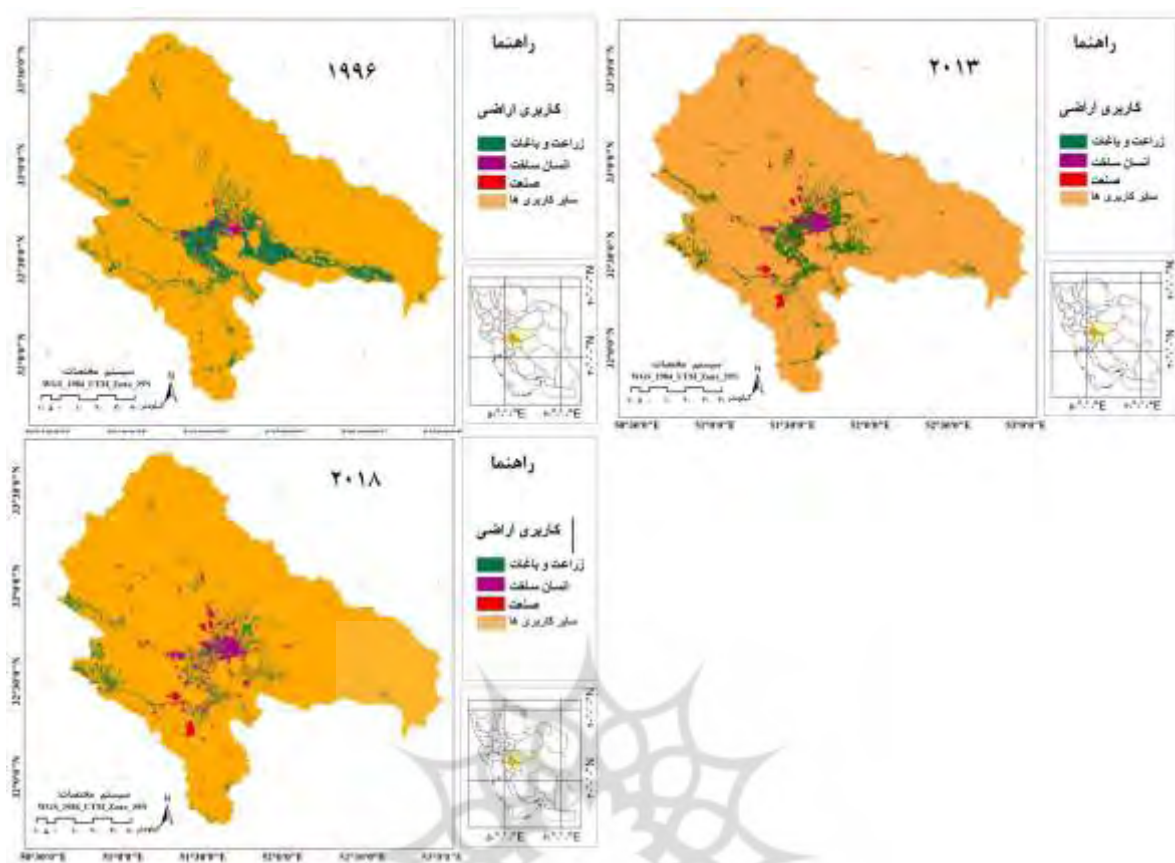
در مدل CA-Markov از نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۳ به‌مثابه نقشه پایه و داده‌های احتمال انتقال از دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳ برای شبیه‌سازی نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۸ (نقشه مرجع) استفاده شد؛ علاوه بر این مدل سال ۲۰۱۸ با استفاده از نقشه‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۱۳ ارزیابی شد. برای ارزیابی درجه توافق مکانی و صحت مدل از ضریب کاپا استفاده شد. سرانجام با استفاده از مدل CA-Markov و نقشه ۲۰۱۸، سناریوهای آینده تغییر کاربری و پوشش زمین برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ شبیه‌سازی شد.

یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل آنها

ارزیابی طبقه‌بندی کاربری و پوشش زمین

توزیع فضایی کلاس‌های کاربری اراضی طی سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸ در شکل ۵ نشان داده شده است.

1. Google Earth
2. CrossTab



شکل ۵. نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده کاربری اراضی حوضه آبریز زاینده‌رود در سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸

Figure 5. land-use Classified maps of Zayandehrood basin in years 1996, 2013 and 2018

براساس شکل ۵، نقشه‌های کاربری اراضی در ۴ کلاس زراعت و باغ‌ها، انسان‌ساخت، صنعت و سایر کاربری‌ها تهیه

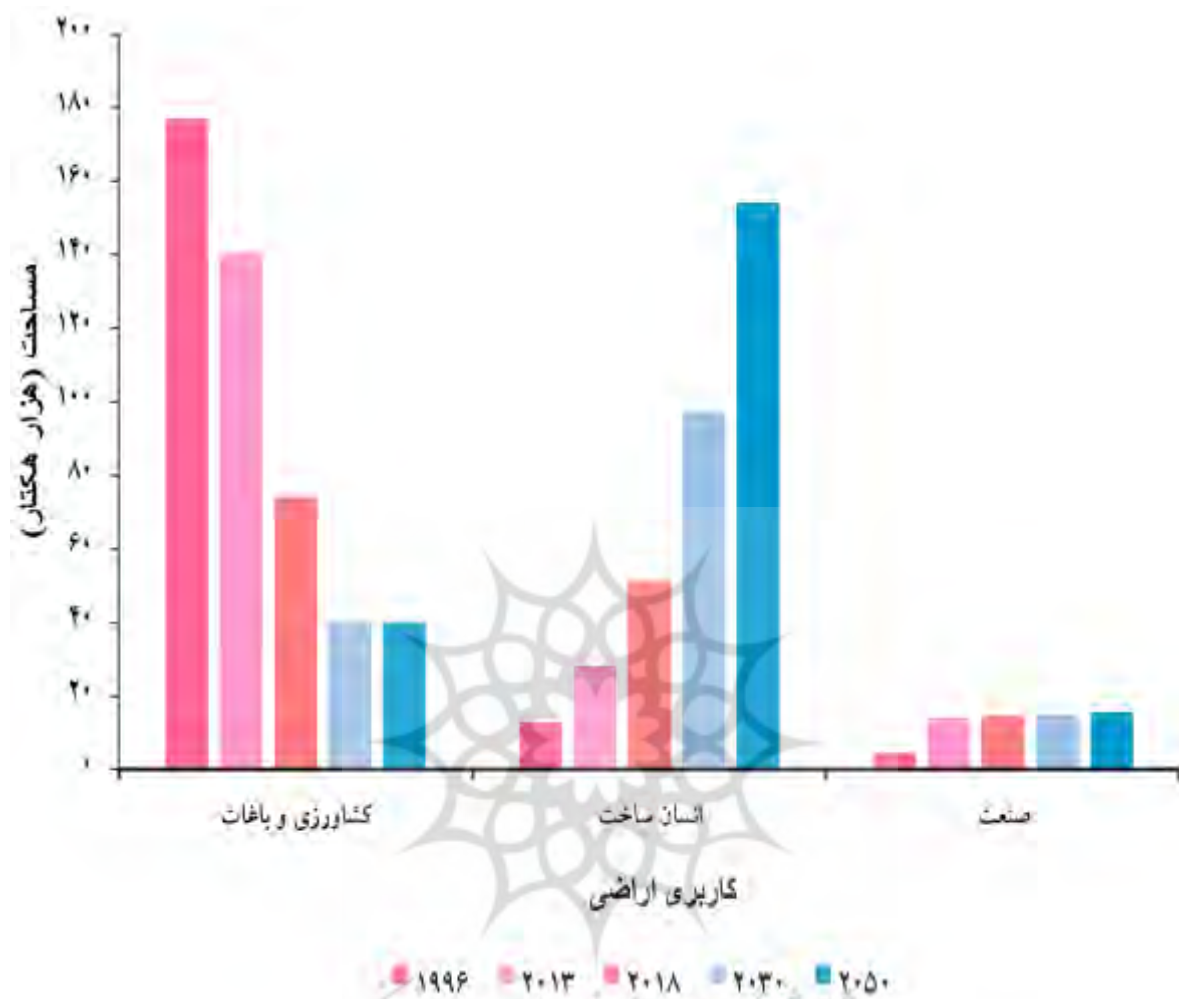
شد. مساحت طبقات نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. مساحت، میزان و درصد تغییرات طبقات نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های مختلف

Table 3. Area, amount and percentage of classes changes of land use maps in different years

طبقات	مساحت (هکتار)، میزان و درصد تغییرات				۱۹۹۶	۲۰۱۳	میزان تغییرات (۲۰۱۳-۱۹۹۶)	درصد تغییرات (۲۰۱۳-۱۹۹۶)	۲۰۱۸	میزان تغییرات (۲۰۱۸-۲۰۱۳)	درصد تغییرات (۲۰۱۸-۲۰۱۳)
	۱۹۹۶	۲۰۱۳	۲۰۱۸								
کلاس ۱: زراعت و باغ‌ها	۱۷۷۰۶۷/۶	۱۴۰۵۲۷/۴	-۲۱۴۹/۴۲	-۲/۶۴	۷۴۰۵۶/۹	-۱۳۲۹۴/۱۰	-۱۷/۳				
کلاس ۲: انسان‌ساخت	۱۳۰۱۵/۸	۲۸۲۷۹/۷	۸۹۷/۸۸	۱۱۷/۲۷	۵۱۲۶۳/۷	۴۵۹۶/۸	۸۱/۲۷				
کلاس ۳: صنعت	۴۳۷۴/۸	۱۳۸۹۵/۶	۵۶۰/۰۵	۲۱۷/۶۳	۱۴۶۴۴/۷	۱۴۹/۸۲	۵/۳۹				
کلاس ۴: سایر کاربری‌ها	۲۰۷۳۱۳۷/۹	۲۰۸۴۹۰۳/۳	۶۹۲/۰۸	۰/۵۷	۲۱۲۷۳۴۷/۱	۸۴۸۸۷/۶	۲/۰۴				

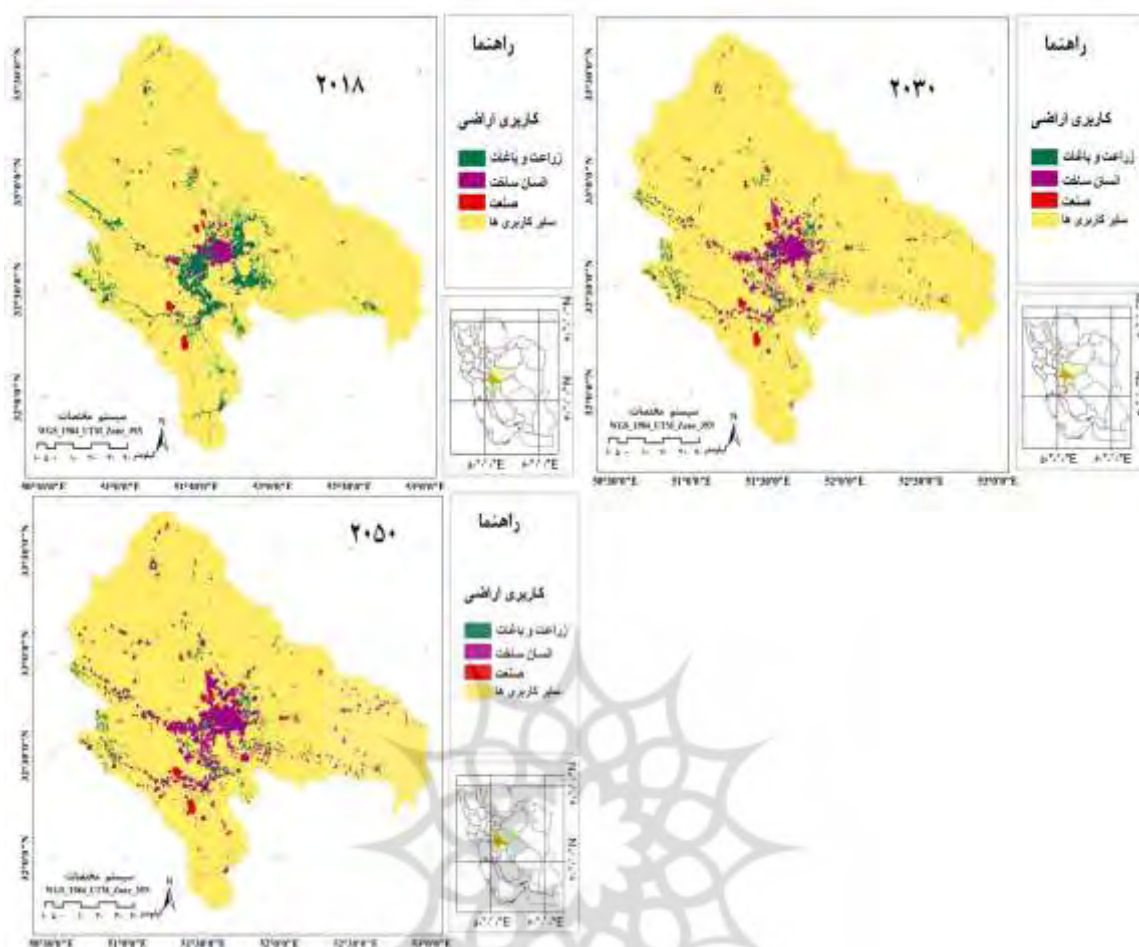
شکل ۶، تغییرات کاربری اراضی را در سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۵۰ و شکل ۷، نقشه‌های پیش‌بینی شده کاربری اراضی به‌دست‌آمده از اجرای مدل برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ را نشان می‌دهند.



شکل ۶. تغییرات کاربری اراضی در سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۵۰

Figure 6. Land use changes in years 1996-2050

براساس شکل ۶، روند افزایشی تغییرات کاربری اراضی توسعه شهری برای سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۵۰ مشاهده می‌شود؛ به طوری که مساحت کاربری اشاره شده از ۱۳۰۱۶ هکتار در سال ۱۹۹۶ به ۱۵۴۱۹۴ هکتار در سال ۲۰۵۰ افزایش یافته است. برای اراضی کشاورزی از ۱۷۷۰۶۷ هکتار به ۴۰۰۰۰ هکتار کاهش یافته است. گسترش توسعه و کاهش اراضی کشاورزی، روند فعلی تغییر کاربری و پوشش زمین را در منطقه دنبال کرده است. همچنین پیش‌بینی می‌شود که کاربری صنعت طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳ از ۴۳۷۵ هکتار به ۱۳۸۹۵ هکتار افزایش یابد. طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۵۰ تغییر چندانی در مساحت کاربری صنعت مشاهده نمی‌شود.



شکل ۷. نقشه‌های کاربری اراضی پیش‌بینی شده با مدل CA-Markov

Figure 7. The predicted land-use maps with the CA-Markov model

نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۸ با استفاده از تغییراتی تهیه شد که در دوره‌های ۱۹۹۶-۲۰۱۳ و ۲۰۱۳-۲۰۱۸ رخ داده است. نقشه خروجی پیش‌بینی شده تغییر کاربری و پوشش زمین برای سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ در شکل ۷ نشان داده شده است. نقشه پیش‌بینی شده سال ۲۰۱۸، افزایش مناطق انسان‌ساخت و کاهش مساحت اراضی کشاورزی را نشان می‌دهد.

اعتبارسنجی مدل CA-Markov

نتایج ارزیابی طبقه‌بندی کاربری اراضی بین نقشه شبیه‌سازی شده و مرجع، ضریب کاپای ۹۴٪ را در تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش زمین نشان داد. تغییرات کاربری و پوشش زمین مبنایی سازگار و قابل اعتماد برای شبیه‌سازی سناریوهای آینده است و ظرفیت مدل CA-Markov را برای شبیه‌سازی سناریوهای آینده تغییر کاربری اراضی اثبات می‌کند؛ بنابراین می‌توان از این دو مدل برای شبیه‌سازی تغییر کاربری اراضی منطقه مطالعه‌شده برای ۳۰ سال آینده استفاده کرد.

تجزیه و تحلیل پتانسیل انتقال تغییرات کاربری و پوشش زمین

ماتریس احتمال انتقال، احتمال انتقال هرکدام از کاربری‌ها را به یکدیگر نشان می‌دهد. این ماتریس نتیجه جدول‌های حاصل از تطابق نقشه‌های دو تصویر است که با استفاده از روش مارکوف به دست می‌آید. در این ماتریس مجموع هر ردیف ۱ است. احتمال انتقال کلاس‌های تغییر کاربری و پوشش زمین برای دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۸ در جدول ۴ نشان داده شده است. برای تفسیر جدول، به‌عنوان مثال می‌توان بیان کرد که براساس روالی که از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳ بوده و با توجه به ماتریس مارکوف، احتمال اینکه کلاس ۱ (کشاورزی) به کلاس ۱ تبدیل شود، ۰/۷۴۷۹ است. احتمال اینکه کلاس ۲ (انسان ساخت) به کلاس ۲ تبدیل شود، ۰/۹۳ است. احتمال اینکه کلاس ۳ (صنعت) به کلاس ۳ تبدیل شود، ۰/۶۴۴۴ است. همچنین احتمال تغییر کاربری کشاورزی به انسان ساخت و کشاورزی به صنعت به ترتیب ۰/۰۰۷۳ و ۰ است. احتمال تغییر کاربری انسان ساخت به کشاورزی و صنعت به ترتیب ۰/۰۳۱۶ و ۰ است. احتمال تغییر کاربری انسان ساخت به کشاورزی و صنعت به ترتیب ۰/۰۰۷۳ و ۰ است. احتمال تغییر کاربری انسان ساخت به کشاورزی و صنعت به ترتیب ۰ و ۰/۱۶۲۳ است.

جدول ۴. احتمال انتقال کلاس‌های تغییر کاربری و پوشش زمین برای دوره‌های ۱۹۹۶-۲۰۱۳ و ۲۰۱۳-۲۰۱۸

Table 4. Transition probability of land-use/land cover change classes for the periods 1996-2013 and 2013-2018

کلاس کاربری اراضی	سال	احتمال تبدیل			
		کشاورزی و باغ‌ها	انسان ساخت	صنعت	سایر کاربری‌ها
کشاورزی و باغ‌ها	۱۹۹۶-۲۰۱۳	۰/۷۴۷۹	۰/۰۰۷۳	۰	۰/۲۴۴۸
	۲۰۱۳-۲۰۱۸	۰/۰۲۲۷	۰/۰۸۶۲	۰/۰۰۳۲	۰/۸۸۸۰
انسان ساخت	۱۹۹۶-۲۰۱۳	۰/۰۳۱۶	۰/۹۳۰۰	۰	۰/۰۳۸۴
	۲۰۱۳-۲۰۱۸	۰/۰۲۱۲	۰/۶۲۲۴	۰/۰۰۲۶	۰/۳۵۳۷
صنعت	۱۹۹۶-۲۰۱۳	۰/۰۰۰۰	۰/۱۶۲۳	۰/۶۴۴۴	۰/۱۹۳۴
	۲۰۱۳-۲۰۱۸	۰/۰۱۶۴	۰/۱۱۸۸	۰/۱۷۳۰	۰/۶۹۱۸
سایر کاربری‌ها	۱۹۹۶-۲۰۱۳	۰/۰۱۶۱	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۱۲	۰/۹۷۹۸
	۲۰۱۳-۲۰۱۸	۰/۰۲۱۶	۰/۰۷۴۰	۰/۰۰۳۶	۰/۹۰۰۸

در مشاهده کلاس‌های کاربری اراضی می‌توان توجه داشت که کشاورزی می‌تواند در اطراف رودخانه زاینده‌رود گسترش یابد. این گسترش کنونی کشاورزی محصولات زراعی یک سناریوی بالقوه نگران‌کننده در آینده برای حوضه آبریز زاینده‌رود است. تخمین زده‌ایم که اراضی کشاورزی و باغ‌ها در سال ۲۰۱۸ می‌تواند ۷۴۰۵۷ هکتار باشد و تا سال ۲۰۵۰ می‌تواند به ۴۰۰۰۰ هکتار کاهش یابد (شکل ۶) که به معنی از دست دادن ۳۴۰۵۷ هکتار نسبت به پوشش اراضی کشاورزی و باغ‌ها در سال ۲۰۱۸ است. این نتایج نیاز به توجه بیشتر برنامه‌ریزان محیط‌زیست در منطقه را در زمینه گسترش فعالیت‌های شهری و صنعتی و کاهش اراضی کشاورزی و باغ‌ها نشان می‌دهد.

جمع‌بندی یافته‌های پژوهش

در این مطالعه تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود شناسایی و بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییرات کاربری و پوشش زمین به صورت گسترش مناطق شهری و کاهش مساحت کاربری کشاورزی است. چنین تغییراتی در دو مرحله مشخص رخ داده است؛ اول، گسترش اراضی شهری از سال ۲۰۱۳ غالب است، با تأثیر مستقیم در کاهش پوشش گیاهی به مثابه یک نتیجه از تبدیل اراضی کشاورزی به سایر کاربری‌ها. همچنین تأیید شده است که روند تغییر پس از سال ۱۹۹۶ پویا بوده و شدت یافته است؛ زیرا در سال ۲۰۱۸، منطقه وسیعی از اراضی کشاورزی به مناطق شهری و صنعتی تبدیل شده است. این نتیجه با نتایج پژوهش حیدری مظفر و صالح جونقانی (۱۴۰۰) همخوانی دارد. نتایج آنها گویای توسعه مناطق شهری اصفهان است. با توجه به نتایج حاصل از مطالعه آنها، اراضی شهری اصفهان طی سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۱۷ افزایش یافته است. آنها پیش‌بینی کردند که این روند صعودی در آینده نیز ادامه خواهد داشت. همچنین براساس مدل زنجیره مارکوف، تغییر اراضی شهری اصفهان را تا سال ۲۰۲۱ پیش‌بینی کردند.

جلوگیری از تخریب اراضی کشاورزی، آشکارسازی تغییرات کاربری و پوشش زمین از اولویت‌های اصلی در برنامه‌ریزی کاربری اراضی در حوضه مطالعه شده است. در سناریوهای تغییر کاربری و پوشش زمین باید بین رشد اقتصادی و فعالیت‌های کشاورزی تعادل ایجاد شود. ارزیابی قابلیت توسعه کاربری انسان‌ساخت و کشاورزی در مطالعه حاضر براساس روند تاریخی رشد شهری به کار گرفته شده است. افزایش تخریب اراضی همراه با رشد سریع جمعیت، و شناخت بیشتر هزینه‌های زیست‌محیطی مربوط به تبدیل اراضی کشاورزی به توسعه شهری و صنعتی، برای افزایش میل به دستیابی به توسعه پایدار در محصولات کشاورزی بسیار ضروری است (al., Asgarian et 2018). سناریوهای آینده براساس مدل CA-Markov، اطلاعات ارزشمندی را درباره تغییرات آینده کاربری و پوشش زمین در منطقه مطالعه شده ارائه می‌دهند. این مطالعه قادر به شناسایی تغییرات کاربری و پوشش زمین در دوره‌های مختلف و به تصویر کشیدن افزایش یا کاهش کاربری‌های اراضی مهم در منطقه است. براساس پژوهش (2020) Motlagh et al. تغییر کاربری و پوشش زمین براساس سه سناریوی ممکن (روند فعلی رشد کاربری اراضی، حفاظت از زمین‌های کشاورزی و پیش‌بینی توسعه شهری) بررسی شد. سناریوهای آینده برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ تخمین می‌زند که کاهش چشمگیری در پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی و باغ‌ها، و ادامه توسعه شهری و صنعتی در مناطقی در حوضه رودخانه زاینده‌رود مشاهده شود.

گسترش بخش کشاورزی همزمان با حفاظت از منابع طبیعی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه پایدار در حوضه رودخانه زاینده‌رود است و برای برنامه‌های راهبردی آینده کاربری و پوشش زمین ضروری است. برای مدیران دولتی حفاظت محیط‌زیست و تولیدکنندگان روستایی این مسئله، مسئله‌ای پیچیده است؛ زیرا از منظر زراعت، بوم‌شناسی و اقتصادی منافع مختلفی دارد؛ با این حال نتایج حاضر نشان می‌دهد اتخاذ شیوه‌های حفاظت از محیط‌زیست در مناطق کشاورزی و بازرسی مؤثرتر از مقررات زیست‌محیطی توسط آژانس‌های عمومی برای جلوگیری از تأثیرات احتمالی منفی آینده با رشد اراضی کشاورزی در منطقه ضروری است.

در محدوده مطالعه شده، توانمندی‌های فراوانی برای توسعه گردشگری وجود دارد. با توجه به خشکسالی و

وضعیت رودخانه زاینده‌رود در سال‌های اخیر و کاهش سطح درآمد کشاورزان، اکوتوریسم و کشاورزی می‌تواند یک منبع درآمد باشد و با تجزیه و تحلیل تأثیرات بخش کشاورزی بر اقتصاد، اهمیت اکوتوریسم برای این منطقه قابل مشاهده است (زیلابی، ۱۳۹۷: ۴). حفظ منابع آب، جانوران، گیاهان و تنوع جغرافیایی برای حفظ این فعالیت ضروری است. تدوین دستورکارها برای توسعه کشاورزی پایدار می‌تواند راهی برای دستیابی به تعادل بین حفاظت از طبیعت و توسعه اقتصادی در منطقه باشد (Asgarian et al., 2018).

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه حوضه رودخانه زاینده‌رود یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های کشور محسوب می‌شود و از آنجا که نقش اساسی محیطی دارد و وظایف ذخیره آب را انجام می‌دهد، نگهداری آن برای یکپارچگی اکولوژیکی منبع آب و حفظ اکوتوریسم بسیار مهم است. از سویی با توجه به اینکه تالاب گاوخونی در این حوضه واقع شده، بررسی تغییرات کاربری اراضی برای حفظ خدمات اکوسیستمی گونه‌های گیاهی و جانوری در منطقه ضروری است؛ بنابراین نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه می‌تواند ابزاری مفید در برنامه‌ریزی و ایجاد سیاست‌های محلی برای توسعه پایدار اقتصادی در حوضه رودخانه زاینده‌رود باشد. این نتایج همچنین می‌تواند به بحث در زمینه آثار تخریب اراضی کشاورزی کمک و توجهات را به کنترل بیشتر حفظ پوشش گیاهی در منطقه جلب کند.

این مطالعه مناطقی را در حوضه نشان می‌دهد که متحمل خسارات پوشش گیاهی می‌شوند و به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تغییرات در کاربری و پوشش زمین را پیش‌بینی کنند. اثربخشی سیاست‌های عمومی در افزایش اراضی کشاورزی به‌مثابه شاخص کمی اصلی اثربخشی اقدامات حفاظت از اراضی گزارش شده است؛ بنابراین مدل ترکیبی CA-Markov می‌تواند ابزاری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیرندگان به‌منظور بهبود برنامه‌های مدیریت کاربری و پوشش زمین برای ایجاد تعادل در توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست باشد. مدل CA-Markov به‌مثابه ابزاری قوی و مؤثر در پیش‌بینی کاربری و پوشش زمین با شبیه‌سازی موفقیت‌آمیز اراضی کشاورزی و توسعه شهری صنعتی در حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود ارائه شده است؛ بنابراین استفاده از یک پایگاه ثابت نقشه‌های کاربری و پوشش زمین برای مطالعات آینده در حوضه‌های آبریز کشور با ویژگی‌های مشابه پیشنهاد می‌شود.

به طور خلاصه این پژوهش نشان داد که چگونه مدل پیشنهادی CA-Markov برای شبیه‌سازی بهتر تغییرات پیچیده و پویای کاربری اراضی در طول زمان به کار می‌رود. در میان تمام تغییرات کاربری و پوشش زمین، نگران‌کننده‌ترین وضعیت در منطقه برای اراضی کشاورزی است. اگر روند فعلی استفاده از زمین ادامه یابد، تخمین می‌زنیم که تا سال ۲۰۵۰، مساحت آن به نصف کاهش یابد و چنین تغییراتی در چشم‌انداز بدون شک همه اکوسیستم حوضه را تغییر خواهد داد، با تأکید بر اینکه تأثیرات منفی بر پوشش گیاهی حوضه تأثیر مستقیم بر بخش اقتصادی منطقه دارد؛ زیرا حفظ کیفیت محیط‌زیست حوضه رودخانه زاینده‌رود برای اکوتوریسم ضروری است؛ بنابراین مدیریت و برنامه‌ریزی حوضه برای حفظ اکوسیستم منحصر به فرد آن و همچنین برای محافظت از

پوشش گیاهی در منطقه بسیار توصیه می‌شود. روش‌ها و یافته‌های این مطالعه برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری مفید خواهد بود. آنها می‌توانند از یافته‌های این مطالعه برای برنامه‌ریزی دقیق منطقه استفاده کنند تا بتوانند شهر را با استفاده از مزارع و با حفظ منابع آب مدیریت کنند و توسعه زیرساخت‌های شهری را در راستای توسعه پایدار زیست‌محیطی انجام دهند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری (شماره گزنت: ۹۸۰۱۲۹۹۶) تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- حاجی‌بیگللو، محبوبه، شیخ، واحد، معماریان، هادی، بایرام‌کمکی، چوقی، (۱۳۹۹). کالیبراسیون سه‌بعدی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل تلفیقی سلول اتومای زنجیره مارکوف در حوضه آبخیز گرگان‌رود، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال ۱۱، شماره ۲، ۱-۲۶.
- حیدری مظفر، مرتضی، صالح جونقانی، احسان، (۱۴۰۰). مدل‌سازی رشد و توسعه شهر اصفهان با استفاده از داده‌های سنجش از دور در مدل LCM، نشریه علمی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱۰، شماره ۴، ۱۷۹-۱۹۰.
- زیلابی، الهه، (۱۳۹۷). امکان‌سنجی جایگزینی اکوتوریسم در راستای کشاورزی در محدوده تالاب بین‌المللی گاوخونی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع طبیعی - محیط‌زیست (ارزیابی و آمایش سرزمین)، استاد راهنما: سفیانیان، علیرضا، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده منابع طبیعی، ۱۲۱ ص.
- سارلی، رضا، روشن، غلامرضا، گرب، استفان، (۱۳۹۸). سنجش و پیش‌بینی تغییرات پوشش گیاهی حوزه استان مازندران طی بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۱۷ با استفاده از زنجیره مارکوف و GIS، فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۸، شماره ۱۱۱، ۱۴۹-۱۶۲.
- سعادت‌نوبین، مهدی، ابراهیمی‌پور، احمدرضا، خسروی، فرزام، (۱۳۹۸). شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات زمانی مکانی کاربری‌های شهری با استفاده از مدل CA_Markov؛ مطالعه موردی: شهر بجنورد، فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی، سال ۱۹، شماره ۶۵، ۷۱-۹۰.
- شفیعی ثابت، ناصر، شکیبیا، علیرضا، محمدی، اشکان، (۱۳۹۸). آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA_Markov؛ مطالعه موردی: محور کلان‌شهر تهران دماوند، فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۸، شماره ۱۱۱، ۱۷۵-۱۹۰.
- صالحی، ناهید، اختصاصی، محمدرضا، طالبی، علی، (۱۳۹۸). پیش‌بینی روند تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف CA_Markov؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز صفارود رامسر، سنجش از دور و سامانه

- اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال ۱۰، شماره ۱، ۱۰۶-۱۲۰.
- ضیایان فیروزآبادی، پرویز، شکبیا، علیرضا، متکان، علی‌اکبر، صادقی، علی، (۱۳۸۸). سنجش از دور (RS)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل سلول‌های خودکار (CA) به‌عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی شهری؛ مطالعه موردی: شهر شهرکرد، علوم محیطی، سال ۷، شماره ۱، ۱۳۳-۱۴۸.
- علی‌محمدی سراب، عباس، متکان، علی‌اکبر، میرباقری، بابک، (۱۳۸۹). ارزیابی کارایی مدل سلول‌های خودکار در شبیه‌سازی گسترش اراضی شهری در حومه جنوب غرب تهران، فصلنامه مدرس علوم انسانی - برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره ۱۴، شماره ۲، ۸۱-۱۰۲.
- کریم‌زاده مطلق، زینب، لطفی، علی، پورمنافی، سعید، (۱۳۹۹). مدل‌سازی تخصیص کاربری اراضی پایدار در اصفهان بزرگ با استفاده از ارزیابی چندمعیاره در محیط GIS، جغرافیا و پایداری محیط، سال ۱۰، شماره ۲، ۲۱-۳۵.
- محمدی، شاهین، حبشی، خلیل، پورمنافی، سعید، (۱۳۹۷). پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری/ پوشش اراضی و ارتباط آن با خشکسالی؛ مطالعه موردی: زیرحوضه پارسل B₂ حوضه آبخیز زاینده‌رود، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال ۹، شماره ۱، ۲۴-۳۹.
- کیانی سلمی، الهام، ابراهیمی، عطاءالله، (۱۳۹۷). ارزیابی تغییرات پوشش اراضی شهرکرد و پیش‌بینی آینده آن با بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی و مدل CA-Markov، فصلنامه علمی پژوهشی برنامه‌ریزی فضایی، سال ۸، شماره ۱، اصفهان، ۷۱-۸۸.
- Asgarian, A., Soffianian, A., Pourmanafi, S., & Bagheri, M., (2018). **Evaluating the spatial effectiveness of alternative urban growth scenarios in protecting cropland resources: A case of mixed agricultural-urbanized landscape in central Iran**, *Sustainable Cities and Society*, 43, 197- 207.
- Assaf, C., Adamsa, C., Ferreira, F.F., & Françac, H., (2021). **Land use and cover modeling as a tool for analyzing nature conservation policies – A case study of Juréia-Itatins**, *Land Use Policy*, 100, 104895.
- Aung, TS., Fischer, T.B., & Buchanan, J., (2020). **Land use and land cover changes along the China-Myanmar Oil and Gas pipelines**, *Monitoring infrastructure development in remote conflictprone regions*, 15 (8), e0237806.
- Baqa, M.F., Chen, F., Lu, L., Qureshi, S., Tariq, A., Wang, S., Jing, L., Hamza, S., & Li, Q., (2021). **Monitoring and Modeling the Patterns and Trends of Urban Growth Using Urban Sprawl Matrix and CA-Markov Model: A Case Study of Karachi, Pakistan**, *Land* 10, 700.
- Cunha, E.R.D., Santos, C.A.G., da Silva, R.M., Bacani, V.M., & Pott, A., (2021). **Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil**, *Land Use Policy*, 101, 105141.
- Dey, N.N., Al Rakib, A., Al Kafy, A., & Raikwar, V., (2021). **Geospatial modelling of changes in land use/land cover dynamics using Multi-layer perception Markov chain model in Rajshahi City, Bangladesh**, *Environmental Challenges*, 4, 100148.
- Gharaibeh, A., Shaamala, A., Obeidat, R., & Al-Kofahi, S., (2020). **Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model**, *Heliyon*, 6, e05092.
- Ghosh, S., Das Chatterjee, N., & Dinda, S., (2021). **Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models: A case study on Kolkata Metropolitan Area, India**, *Sustainable Cities and Society*, 68, 102773.
- Huang, Y., Yang, B., Wang, M., Liu, B., & Yang, X., (2020). **Analysis of the future land cover change in Beijing using CA-Markov chain model**, *Environmental Earth Sciences*, 79, 60.

- Ji, G., Lai, Z., Xia, H., Liu, H., & Wang, Z., (2021). **Future Runoff Variation and Flood Disaster Prediction of the Yellow River Basin Based on CA-Markov and SWAT**, *Land*, 10, 421.
- Khwarahm, N.R. Qader, S., Ararat, K., & Al-Quraishi, A.M.F., (2020). **Predicting and mapping land cover/land use changes in Erbil /Iraq using CA-Markov synergy model**, *Earth Science Informatics*, 14, 393- 406.
- Li, Q., Wang, L., Gul, H.N., & Li, D., (2021). **Simulation and optimization of land use pattern to embed ecological suitability in an oasis region: A case study of Ganzhou district, Gansu province, China**, *Journal of Environmental Management*, 287, 112321.
- Matlhodi, B., Kenabatho, P.K., Parida, B.P., & Maphanyane, J.G., (2021). **Analysis of the Future Land Use Land Cover Changes in the Gaborone Dam Catchment Using CA-Markov Model: Implications on Water Resources**, *remote sensing*, 13, 2427.
- Mitsova, D., Shuster, W., & Wang, X., (2011). **A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation**, *Landscape and Urban Planning*, 99, 141- 153.
- Motlagh, Z.K., Lotfi, A., Pourmanafi, S., Ahmadizadeh, S., & Soffianian, A., (2020). **Spatial modeling of land-use changes in a rapidly urbanizing landscape in central Iran: integration of remote sensing, CA Markov, and landscape metrics**, *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 695.
- Munthali, M.G., Mustak, S., Adeola, A., Botai, J., Singh, S.K., & Davis, N., (2020). **Modelling land use and land cover dynamics of Dedza district of Malawi using hybrid Cellular Automata and Markov model**, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100276.
- Nath, B., Wang, Z., Ge, Y., Islam, K., Singh, R.P., & Niu, Z., (2020). **Land Use and Land Cover Change Modeling and Future Potential Landscape Risk Assessment Using Markov-CA Model and Analytical Hierarchy Process**, *International Journal of Geo-Information*, 9, 134.
- Rahnama, M.R., (2021). **Forecasting land-use changes in Mashhad Metropolitan area using Cellular Automata and Markov chain model for 2016-2030**, *Sustainable Cities and Society*, 64, 102548.
- Ruben, G.B., Zhang, K., Dong, Z., & Xia, J., (2020). **Analysis and Projection of Land-Use/Land-Cover Dynamics through Scenario-Based Simulations Using the CA-Markov Model: A Case Study in Guanting Reservoir Basin, China**, *Sustainability*, 12 (9), 3747.
- Sibanda, S., & Ahmed, F., (2021). **Modelling historic and future land use/land cover changes and their impact on wetland area in Shashe sub-catchment, Zimbabwe**, *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 57- 70.
- Silver, D., & Silva, TH., (2021). **A Markov model of urban evolution: Neighbourhood change as a complex process**, *PLoS ONE*, 16 (1), e0245357.
- Tang, F., Fu, M., Wang, L., Song, W., Yu, J., & Wu, Y., (2021). **Dynamic evolution and scenario simulation of habitat quality under the impact of land-use change in the Huaihe River Economic Belt, China**, *PLoS ONE*, 16 (4), e0249566.
- Tariq, A., & Shu, H., (2020). **CA-Markov Chain Analysis of Seasonal Land Surface Temperature and Land Use Land Cover Change Using Optical Multi-Temporal Satellite Data of Faisalabad, Pakistan Aqil Tariq and Hong Shu**, *remote sensing*, 12, 3402.
- Tavangar, Sh., Moradi, H., Massah Bavani, A., & Gholamalifard, M., (2019). **A futuristic survey of the effects of LU/LC change on stream flow by CA-Markov model: a case of the Nekarood watershed, Iran**, *Geocarto International*, 36 (10), 1100-1116.
- Vinayak, B., Lee, H.S., & Gedom, S., (2021). **Prediction of Land Use and Land Cover Changes in Mumbai City, India, Using Remote Sensing Data and a Multilayer Perceptron Neural Network-Based Markov Chain Model**, *Sustainability*, 13 (2), 471.
- Wang, Q., Guan, Q., Lin, J., Luo, H., Tan, Z., & Ma, Y., (2021). **Simulating land use/land cover change in an arid region with the coupling models**, *Ecological Indicators*, 122, 107231.
- Wang, H., & Hu, Y., (2021). **Simulation of Biocapacity and Spatial-Temporal Evolution Analysis of Loess Plateau in Northern Shaanxi Based on the CA-Markov Model**, *Sustainability*, 13, 5901.
- Wang, S.W., Munkhnasan, L., & Lee, W., (2021). **Land use and land cover change detection and prediction in Bhutan's high-altitude city of Thimphu, using cellular automata and Markov chain**, *Environmental Challenges*, 2, 100017.

Zhou, L., Dang, X., Sun, Q., & Wang, S., (2020). **Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model**, *Sustainable Cities and Society*, 55, 102045.

