



University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: <https://ije.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6101

Using CA-Markov Model in Zayandeh Rood Manderjan Watershed for Land Use Change Prediction

Ali Najafi, ¹, Afshin Honarbakhsh, *², Mahdi Pajuhesh, ³, Khodayar Abdollahi, ⁴

1. Ph.D. candidate of Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, shahrekord, Iran, [E-mail: Estedadyabi.esf@gmail.com](mailto:Estedadyabi.esf@gmail.com)
2. Corresponding Author, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, shahrekord, Iran. [E-mail: afshin.honarbaksh@gmail.com](mailto:afshin.honarbaksh@gmail.com)
3. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, shahrekord, Iran. [E-mail: drpajooesh@gmail.com](mailto:drpajooesh@gmail.com)
4. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, shahrekord, Iran. [E-mail: Abdollahikh@gmail.com](mailto:Abdollahikh@gmail.com)

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Article history : Received 25 March 2026 Revised 27 April 2026 Accepted 17 June 2026 Available online 22 June 2026 Keywords: Landsat images, CA-Markov model, land use, Manderjan watershed.	The Manderjan watershed has not been immune to drastic changes in land use. In general; the aim of this study is to predict land use changes using the CA-Markov model in Manderjan watershed area, Isfahan province. For this purpose, Landsat satellite images from 1991, 2001, 2011, and 2021 (in 10-year time intervals) were used. a land cover map was prepared in 4 land use classes (including agricultural land, mountainous land, pasture, and residential land). The kappa coefficient obtained from the land use map of 2011 and the forecast was 0.96 and for 2021 it was 0.969. The results show that the differences between different classes are different and their magnitude is generally less than 9% in 2011, and less than 15% in 2021. The study of the trend of land use changes in 2031 and 2041 compared to 2021 showed that the largest increase in terms of area is agricultural land. Among the decreasing changes, pasture will be seen with 315 and 868 hectares, respectively, in 2031 and 2041. The increase in agricultural and residential land has caused the area of pasture land to decrease by the same amount in 2031 and 2041.
Cite this article: Najafi, A., Honarbakhsh, A., Pajuhesh, M., Abdollahi, Kh. (2026). Using CA-Markov Model in Zayandeh Rood Manderjan Watershed for Land Use Change Prediction. <i>Journal of Ecohydrology</i>, 13(2), 1388-1403 http://doi.org/10.22059/ije.2026.408768.1902 © Ali Najafi, Afshin Honarbakhsh, Mahdi Pajuhesh, Khodayar Abdollahi. Publisher: University of Tehran Press. DOI: http://doi.org/10.22059/ije.2026.408768.1902	



Introduction

Land use and land cover (LULC) change is one of the most critical environmental challenges of the 21st century, driven largely by human interaction with natural resources. Such changes lead to significant ecological and socio-economic impacts, including water and air pollution, soil erosion, loss of biodiversity, altered hydrological regimes, and increased flood risks. The Manderjan watershed, located in the Zayandeh Rood basin of Isfahan Province, Iran, has experienced substantial LULC transformations over recent decades, primarily through the conversion of rangelands and natural covers to agricultural and residential uses. These changes not only threaten local ecosystem stability but also exacerbate water management challenges in an already water-stressed region.

Accurate prediction of future land use patterns is essential for sustainable watershed management and planning. Remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS), combined with predictive modeling, offer powerful tools for monitoring and projecting LULC changes. Among various modeling approaches, integrated models such as the Cellular Automata-Markov (CA-Markov) model have gained prominence for their ability to combine spatial dynamics (through cellular automata) with temporal transition probabilities (through Markov chains). This hybrid model is particularly effective in simulating complex spatio-temporal land use changes, as demonstrated in numerous studies worldwide (e.g., Hyandye and Martz, 2017; Memarian et al., 2012).

This study aims to simulate and predict LULC changes in the Manderjan watershed using the CA-Markov model, based on historical Landsat imagery from 1991 to 2021. The specific research questions addressed are: (1) What have been the historical patterns of LULC change in the Manderjan watershed? (2) What is the projected future trend of LULC change under a business-as-usual scenario? (3) What are the potential environmental threats and consequences associated with these projected changes? The findings are expected to provide actionable insights for sustainable land use planning and natural resource management in the region.

Materials and Methods

The study area, the Manderjan watershed, covers approximately 228 km² within the Zayandeh Rood basin, located about 150 km west of Isfahan. Its geographical coordinates range from 50°27'16" to 50°40'34" E and 32°45'12" to 32°57'07" N, with an average elevation of 2401 m above sea level and an average slope of 12.67%.

Landsat satellite images (Path 37, Row 164) for the years 1991, 2001, 2011, and 2021 were acquired and preprocessed through geometric, radiometric, and atmospheric corrections. Supervised classification with the maximum likelihood algorithm was applied to categorize land use into four classes: agricultural land, mountainous land, rangeland, and residential land. Classification accuracy was assessed using error matrices, overall accuracy, producer's accuracy, user's accuracy, and the Kappa coefficient.

The CA-Markov model, implemented in the IDRISI TerrSet software, was used for change analysis and future projection. Transition probability matrices were generated from the 1991–2021 LULC maps to quantify changes between classes. The model was validated by simulating the 2011 and 2021 LULC maps based on earlier data and comparing them with the actual classified maps. After validation, future LULC maps for 2031 and 2041 were projected under a scenario of continued current trends, using a 10-year time step.

Results and Discussion

The classification of historical images yielded high accuracy, with overall Kappa coefficients exceeding 0.80 for all years, confirming the reliability of the extracted LULC maps. The validation of the CA-Markov model showed excellent performance, with Kappa values of 0.96 for 2011 and 0.969 for 2021, indicating a strong agreement between simulated and observed LULC patterns.

Analysis of historical changes revealed a consistent decline in rangeland areas and an expansion of agricultural and residential lands. Between 1991 and 2021, rangeland decreased significantly, while

agricultural land increased due to ongoing conversion. The transition probability matrices indicated a high likelihood of rangeland being converted to agricultural use.

Future projections for 2031 and 2041 suggest a continuation of these trends. By 2031, agricultural land is expected to expand further, with rangeland decreasing by approximately 315 hectares. By 2041, rangeland loss is projected to reach about 868 hectares. Residential areas also show a gradual increase, contributing to the reduction of natural covers. The total change magnitude between classes remained below 9% in 2011 and below 15% in 2021, reflecting systematic and directional transformations rather than random shifts.

These predicted changes carry serious environmental implications. The replacement of permeable rangelands with agricultural and impervious residential surfaces reduces infiltration capacity, increases surface runoff and curve numbers, elevates flood risks, and diminishes base flow in streams. Soil erosion is likely to intensify, and groundwater recharge may decline, exacerbating water scarcity in the region. The trends align with findings from similar studies in Iran and other semi-arid regions, such as those by Gholizadeh et al. (2023) in Ghal'eh Joq, Iran, and El Haj et al. (2023) in Morocco, highlighting a global pattern of natural land cover loss due to anthropogenic pressure.

The CA-Markov model proved to be a robust tool for LULC projection in the Manderjan watershed, though it has inherent limitations. It relies on past trends and does not account for sudden socio-economic shifts, policy interventions, or climate anomalies. Moreover, the use of only four broad land use classes may overlook intra-class variability. Future improvements could include integrating socio-economic drivers, using higher-resolution imagery, and developing alternative management scenarios.

Conclusion

This study successfully applied the CA-Markov model to simulate past and future LULC changes in the Manderjan watershed. The results indicate a clear and ongoing trend of rangeland conversion to agricultural and residential uses, with significant potential environmental consequences, including increased flood risk, soil degradation, and reduced water retention capacity. The high validation accuracy supports the reliability of the projections.

The research provides a spatially explicit, quantitative basis for land use planning and highlights the urgent need for sustainable management strategies. Recommendations include establishing protected rangeland zones, promoting sustainable agricultural practices, and implementing urban growth boundaries based on ecological carrying capacity. The methodology adopted here can be extended to other watersheds in Iran and similar regions for proactive land use planning and decision support.

For future research, it is suggested to: (1) incorporate direct drivers of land change (e.g., distance to roads, population density, policies) into the model; (2) use advanced classification algorithms and higher-resolution imagery for finer class discrimination; (3) develop and compare multiple future scenarios, including conservation and controlled-development options; and (4) quantitatively assess the hydrological and ecological impacts of projected changes through integrated modeling approaches.



کاربرد مدل CA-Markov در حوضه آبخیز مندرجان زاینده رود جهت پیش بینی تغییرات کاربری اراضی

علی نجفی^۱، افشین هنربخش^{۲*}، مهدی پژوهش^۳، خدایار عبدالمهی^۴

۱. دانشجوی دکتری رشته علوم و مهندسی آبخیز، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران، رایانامه:

Estedadyabi.esf@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد، ایران، رایانامه: afshin.honarbakshsh@gmail.com

۳. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، آبخیزداری، عضو هیئت علمی دانشگاه شهرکرد، ایران، رایانامه: drpajooohesh@gmail.com

۴. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، آبخیزداری، عضو هیئت علمی دانشگاه شهرکرد، ایران، رایانامه: Abdollahikh@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ کلیدواژه‌ها: تصاویر لندست، مدل CA-Markov، کاربری اراضی، حوضه آبخیز مندرجان.	حوضه آبخیز مندرجان از تغییرات شدید در نوع کاربری اراضی مصون نمانده است. به طور کلی، هدف اصلی این مطالعه پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با کاربرد مدل CA-Markov در حوضه آبخیز مندرجان استان اصفهان است. برای این منظور، از تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۱، ۲۰۱۱، ۲۰۲۱ (در مقاطع زمانی ۱۰ ساله) استفاده شد. نقشه پوشش اراضی در ۴ کلاس کاربری اراضی (شامل اراضی کشاورزی، اراضی کوهستانی، مرتع و اراضی مسکونی) تهیه شد. ضریب کاپای حاصل از نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۱ و پیش‌بینی شده برابر با ۰/۹۶ و برای سال ۲۰۲۱ برابر با ۰/۹۶۹ بود. نتایج نشان می‌دهد اختلاف‌های طبقه‌های مختلف متفاوت است و بزرگی آن به طور کلی در سال ۲۰۱۱ کمتر از ۹ درصد و در سال ۲۰۲۱ کمتر از ۱۵ درصد است. بررسی روند تغییرات کاربری اراضی سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ نسبت به سال ۲۰۲۱ نشان داد بیشترین تغییرات افزایشی از لحاظ سطح، اراضی کشاورزی است. در بین تغییرات کاهشی نیز مرتع با ۳۱۵ و ۸۶۸ هکتار به ترتیب در سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ شاهد خواهیم بود. افزایش سطح اراضی کشاورزی و مسکونی باعث کاهش سطح اراضی مرتعی به همین میزان در سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ شده است.

استناد: نجفی، علی؛ هنربخش، افشین؛ پژوهش، مهدی؛ عبدالمهی، خدایار. کاربرد مدل CA-Markov در حوضه آبخیز مندرجان زاینده رود جهت پیش‌بینی تغییرات

کاربری اراضی. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۲(۴)، ۱۳۸۸-۱۴۰۳.

doi.org/10.22059/ije.2026.408768.1902

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © علی نجفی، افشین هنربخش، مهدی پژوهش، خدایار عبدالمهی



مقدمه

بدون شک، از جمله مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی بشر در قرن بیست و یکم، مبحث تغییرات رو به ازدیاد کاربری اراضی در سرتاسر جهان است، چنان که از دلایل مهم ایجاد تغییرات در پوشش و کاربری‌ها تعامل بشر با طبیعت و استفاده کردن از منابع طبیعی است (داتا و همکاران، ۲۰۰۷)^۱. برای شناخت اثر کاربری‌های گوناگون باید از مدل‌های کامپیوتری بهره برد (دب و همکاران، ۲۰۰۵)^۲. انواع تصاویر با وضوح طیفی، مکانی و زمانی از داده‌های RS می‌توانند برای تشخیص تغییرات در سطح زمین با هزینه کمتر و سرعت بیشتر نسبت به تکنیک‌های مرسوم بررسی میدانی استفاده شوند (کوکو و همکاران، ۲۰۲۰)^۳. داده‌های دقیق و به‌روز LULC برای ردیابی و تجزیه و تحلیل انتقال ضروری است. در مطالعات متعدد نشان داده شده است که از این اطلاعات می‌توان برای نقشه‌برداری و تجزیه و تحلیل تغییرات استفاده کرد (الحاگ و بوتوا، ۲۰۱۶)^۴. چندین مدل معمولاً در مقالات برای پیش‌بینی LULC استفاده می‌شود، از جمله مدل‌های آماری^۵ (سوموانشی و همکاران، ۲۰۲۰)^۶، مدل‌های زنجیره مارکوف^۷ (MC) (احمد و همکاران، ۲۰۱۷)^۸، مدل‌های اتوماتای سلولی^۹ (CA) (خان و همکاران، ۲۰۲۲)^{۱۰}، رگرسیون لجستیک^{۱۱} (بویا و همکاران، ۲۰۲۲)^{۱۲} و شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۳} (ANN) (آکسوی و کاپتان^{۱۴}، ۲۰۲۲، سیل و همکاران^{۱۵}، ۲۰۲۲). محققان متعددی از مدل‌های ترکیبی، یعنی مدل CA-ANN (آسوری و آدو، ۲۰۲۳)^{۱۶} و مدل CA-Markov (آبیجیس و ساروانان، ۲۰۲۲)^{۱۷}، برای کاهش محدودیت‌های مرتبط با مدل‌های فردی استفاده کرده‌اند (آف و همکاران، ۲۰۲۴)^{۱۸}. اتوماتای سلولی یکپارچه (CA) و مدل زنجیره مارکوف (CA-Markov) دو مدل پرکاربرد با دقت زیاد هستند (سی باند و احمد^{۱۹}، ۲۰۲۱، مونتالی و همکاران^{۲۰}، ۲۰۲۰). مدل‌های CA-Markov قوی هستند و روشی مناسب برای مدل‌سازی دینامیک مکانی و زمانی تغییرات LULC در سیستم‌های پیچیده ارائه می‌دهند (معماریان و همکاران^{۲۱}، ۲۰۱۲، هیاندی و مارتز^{۲۲}، ۲۰۱۷). مدل CA-Markov به‌خوبی شناخته شده است و در مطالعات متعددی به کار گرفته شده که در ذیل اشاره می‌شود. به همین دلیل در این تحقیق نیز از مدل CA-Markov استفاده شد. قلی‌زاده و همکاران^{۲۳} (۲۰۲۳) تغییرات کاربری اراضی را با استفاده از مدل زنجیره مارکوف در منطقه قلعه جوق، شهرستان تربت حیدریه مدل‌سازی و پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد با توجه به ضریب کاپای به‌دست‌آمده، نقشه تهیه‌شده دقت زیادی دارد و بیشترین تغییرات در مراتع و اراضی زراعی رخ داده است. ایرانی و همکاران^{۲۴} (۲۰۲۴) تغییرات کاربری اراضی را با استفاده از روش‌های پردازش شیء‌گرا و زنجیره مارکوف پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد تا سال ۲۰۲۸ میلادی کاربری اراضی کشاورزی (۱۳/۸۹) کشت دیم (۱/۱۴) محدوده‌های مسکونی (۰/۳۳) و عرصه‌های نمکی دریاچه ارومیه حدود (۲۶) درصد افزایش خواهد داشت. اکوواشی و همکاران^{۲۵} (۲۰۲۱) برای مدل‌سازی تغییر کاربری اراضی در زمین‌های شهری لاگوس در نیجریه در سال‌های ۱۹۸۴، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۵، ماشین یادگیری با استفاده از زنجیره مارکوف و نیز مدل‌های اتومات سلولی را برای شبیه‌سازی وضعیت شهری آینده مربوط به سال ۲۰۳۰ ترکیب کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان‌دهنده دقت زیاد به‌دست‌آمده در این تحقیق و تناسب قابل توجه بین داده‌های پیش‌بینی‌شده و مرجع بود. تادس و همکاران^{۲۶} (۲۰۲۱) پیش‌بینی کنونی و آینده تغییر کاربری زمین/پوشش زمین (۱۹۸۷-۲۰۱۷) و پیش‌بینی (۲۰۳۲-۲۰۴۷) با استفاده از سنجش از دور و مدل CA-Markov در ذخیره‌گاه‌های زیست‌کره جنگلی ماجانگ گامبلا^{۲۷} در اتیوپی را تحلیل کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی LU/LC بود و گسترش کشاورزی، رشد جمعیت، تغییر کشت، استخراج چوب سوخت و خطر آتش‌سوزی به عنوان محرک‌های اصلی تغییر LU/LC شناسایی شدند. گیرما و همکاران^{۲۸} (۲۰۲۲) تغییر پوشش کاربری اراضی را از ادغام شبکه عصبی مصنوعی با مدل زنجیره‌ای خودکار - مارکوف سلولی در حوضه رودخانه گیدابو، در اتیوپی، مدل‌سازی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد

1. Datta *et al.*
2. Deb *et al.*
3. Koko *et al.*
4. Elhag and Boteva
5. Statistical Models
6. Somvanshi *et al.*
7. Markov Chain
8. Ahmad *et al.*
9. Cellular Automata
10. Khan *et al.*

11. Logistic Regression
12. Buya *et al.*
13. Artificial Neural Networks
14. Aksoy & Kaptan
15. Sayl *et al.*
16. Asori & Adu
17. Abijith & Saravanan
18. Atef *et al.*
19. Sibanda and Ahmed
20. Munthali *et al.*

21. Memarian *et al.*
22. Hyandye and Martz
23. Gholizadeh *et al.*
24. Irani *et al.*
25. Okwuashi *et al.*
26. Tadese *et al.*
27. Majang Gambella
28. Girma *et al.*

تغییرات کاربری اراضی فراتر از پتانسیل زمین نقش مهمی در تخریب زمین داشته است. ال حاج و همکاران^۱ (۲۰۲۳) کاربری اراضی و روندهای آبی را برای سال ۲۰۱۹-۲۰۳۹ با استفاده و مقایسه دو مدل CA-MARKOV و LCM زیرحوضه لخداری مراکش پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش یادشده بیانگر آن است که تغییرات عمده بر مساحت جنگل تأثیر می‌گذارد که در سال‌های آتی کاهش خواهد یافت و متأثر از شهرنشینی خواهد بود که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۹ کاهش ۷۰ درصدی مساحت جنگلی و به موازات آن، افزایش حدود ۳۷ درصدی زمین بایر و مساحت شهری خواهیم داشت.

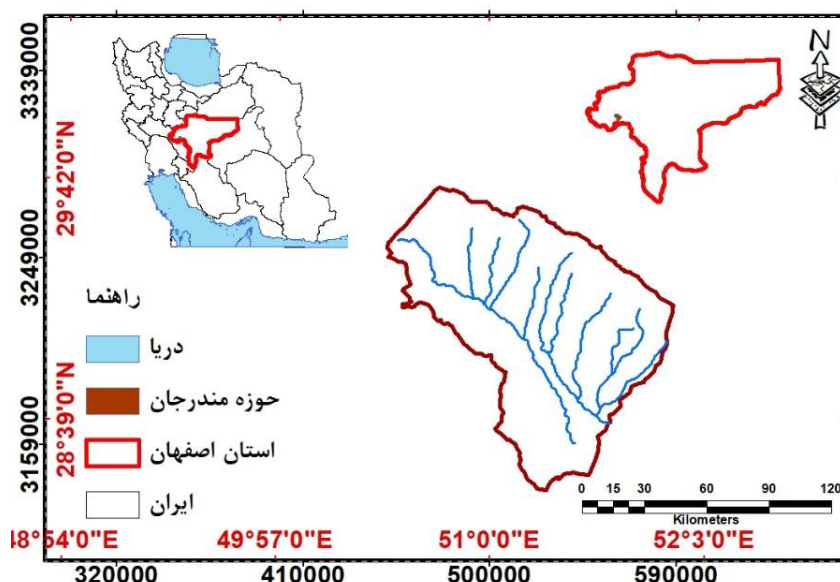
بروهو و همکاران^۲ (۲۰۲۳) کاربری و پوشش اراضی در یک حوضه آبخیز در شمال مراکش را در ۱۹۴۷ و در سال‌های ۲۰۲۸، ۲۰۳۸ و ۲۰۵۰ با استفاده از زنجیره مارکوف پیش‌بینی کردند. شاخص کاپا ۰/۷۳ به دست آمد. سناریوهای آینده مدل‌سازی شده نشان‌دهنده کاهش در مناطق کشاورزی و تالاب‌ها و افزایش مناطق جنگلی است. آنف و همکاران^۳ (۲۰۲۳) تغییرات پوشش زمین و کاربری آینده را در استان الفیوم^۴ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل CA-Markov و از الگوریتم پشتیبان ماشین بردار پیش‌بینی کردند. کشور ایران و از جمله حوضه آبخیز مندرجان نیز از تغییرات شدید در نوع کاربری اراضی مصون نمانده و کاهش وسعت اراضی جنگلی و مرتعی و تبدیل آن‌ها به کاربری‌های کشاورزی، تجاری و مسکونی و تشدید سیلاب و افزایش میزان فرسایش سالانه خاک بر این امر دلالت دارد. لذا بررسی ارتباط بین تغییرات ایجادشده در کاربری‌های مختلف و هر یک از پیامدهای آن در راستای مدیریت صحیح و بهینه آن‌ها ضروری است. در این تحقیق از مدل تلفیقی CA-Markov برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. این مدل که تلفیقی از سلول‌های خودکار و زنجیره مارکوف است، با افزودن مشخصه مجاورت مکانی به مدل تصادفی زنجیره مارکوف، پوشش اراضی را برای سال‌های آینده پیش‌بینی می‌کند. این حوضه نیز همانند بسیاری از مناطق تحت تأثیر تغییرات شدید کاربری قرار داشته، اما تا کنون با این روش تحلیل نشده است که باعث می‌شود کاربرد آن برای پیش‌بینی کاربری اراضی یک رویداد جدید در حوضه آبخیز مندرجان باشد. همچنین، ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با وضوح مناسب، استفاده از مدل CA-Markov که توانایی لحاظ کردن دینامیک مکانی - زمانی را دارد، و تأکید بر ابعاد مدیریتی نتایج، رویکردی تلفیقی و نوآورانه را شکل می‌دهد. به طور کلی هدف اصلی این مطالعه، شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز مندرجان با استفاده از مدل CA-Markov و تحلیل پیامدهای مرتبط با این تغییرات است. هدف از انجام این تحقیق، پاسخ‌گویی به سؤالات کلیدی زیر است:

۱. الگوی تغییرات کاربری اراضی در حوضه مندرجان در دوره‌های گذشته چگونه بوده است؟
۲. روند تغییرات کاربری اراضی در آینده (تحت شرایط ادامه روند فعلی) به چه سمتی پیش خواهد رفت؟
۳. این تغییرات پیش‌بینی‌شده چه تهدیدها یا پیامدهای محیطی بالقوه‌ای را برای منطقه به همراه خواهند داشت؟ یافته‌های تحلیل تغییر کاربری اراضی ممکن است بر مدیریت و برنامه‌ریزی کاربری پایدار اراضی حوضه آبخیز تأثیر بگذارد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه بررسی‌شده حوضه آبخیز مندرجان از سرشاخه‌های حوضه آبخیز سد زاینده‌رود است. این حوضه آبخیز در موقعیت ۱۵۰ کیلومتری از اصفهان در محدوده غرب استان واقع شده که در مجاورت شهر داران و چادگان است. حوضه آبخیز مندرجان دارای مساحت ۲۲۸ کیلومتر مربع واقع در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود است. این حوضه در محدوده طول جغرافیایی ۱۶° ۲۷' ۵۰" تا ۳۴° ۴۰' ۵۰" و عرض جغرافیایی ۱۲° ۴۵' ۳۲" تا ۳۲° ۵۷' ۰۷" و در ۱۵۰ کیلومتری غرب مرکز استان ۶۰۰ متری شمال دریاچه سد زاینده‌رود واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع متوسط حوضه آبخیز ۲۴۰۱ متر از سطح دریا و شیب متوسط حوضه آبخیز ۱۲/۶۷ درصد است. برای تهیه نقشه‌های پوشش اراضی حوضه مندرجان از تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۱، ۲۰۱۱، و ۲۰۲۱ (در مقاطع زمانی ۱۰ ساله) در ردیف ۱۶۴ و مسیر ۳۷ استفاده شد. نقشه پوشش اراضی در ۴ کلاس کاربری اراضی (شامل

اراضی کشاورزی، اراضی کوهستانی، مرتع و اراضی مسکونی) از روی تصاویر ماهواره‌ای تهیه شد و درصد تغییرات افزایشی و کاهشی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با فرض ادامه روند کنونی، نقشه پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه برای سال ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ با استفاده از مدل زنجیره مارکوف - اتومات سلولی (CA) پیش‌بینی شد. شکل ۲ تصویر حوضه آبخیز مندرجان را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز مندرجان در استان اصفهان و ایران

برای محاسبه درصد تغییرات کاربری اراضی از معادله زیر استفاده شد:

درصد تغییرات = $100 * (\text{سطح کاربری اراضی پایه} / \text{سطح کاربری اراضی پایه-سطح کاربری اراضی آتی})$

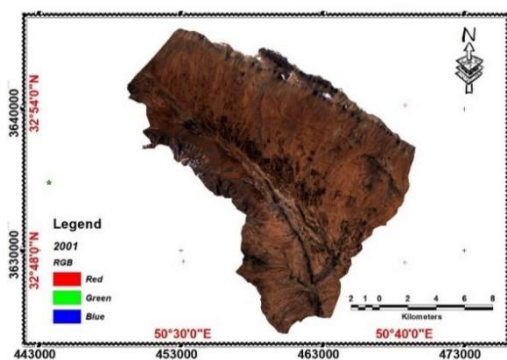
معرفی اجمالی مدل CA-Markov

مدل‌های تغییر کاربری زمین در حال تبدیل شدن به ابزارهای مهم تصمیم‌گیری هستند. آن‌ها شناسایی و تجزیه و تحلیل مقادیر تغییرات، پیش‌بینی روندهای آینده بر اساس سوابق قبلی، مقایسه و اعتبارسنجی نقشه‌های آینده بر اساس روندهای گذشته و همچنین، برنامه‌ریزی استراتژی‌های توسعه پایدار را امکان‌پذیر می‌سازند (الحاج و همکاران، ۲۰۲۳).^۱ مدل سلول‌های خودکار - زنجیره مارکوف به صورت ترکیبی از سلول‌های خودکار و زنجیره مارکوف، چندمعیاره^۲ و تخصیص دادن سرزمین چندمنظوره^۳ برای مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی است به این ترتیب که نقشه آینده کاربری عرصه با استفاده از نقشه‌های شایستگی تغییر پوشش و کاربری با اعمال کردن فیلتر مجاورت و طی فرایند تخصیص به صورت چندمنظوره عرصه تهیه می‌شود. استمن^۴ (۲۰۰۹) تکنیک CA-Markov زنجیره‌های مارکوف را برای پیش‌بینی تغییرات زمین ترکیب می‌کند. فرایند مارکوف از احتمالات انتقال برای کنترل پویایی زمانی بین دسته‌های اخذشده^۵ استفاده می‌کند.^۶

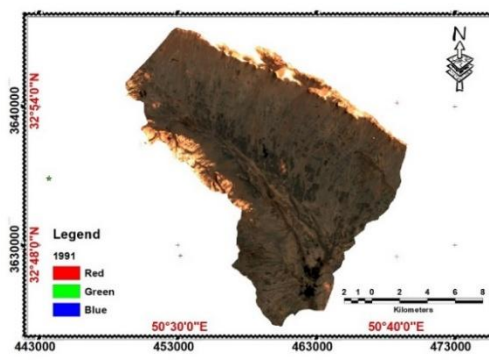
1. El Haj et al.
2. Multi -Criteria

3. Multi objective land allocation
4. Eastman

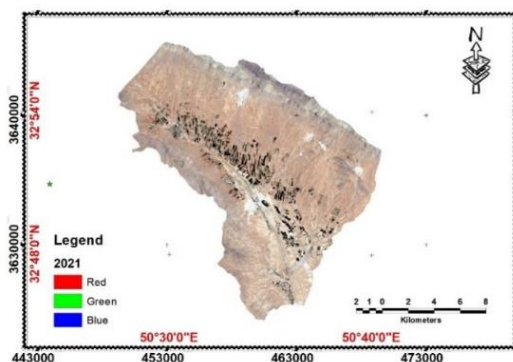
5. Occupancy Categories
6. El Haj et al.



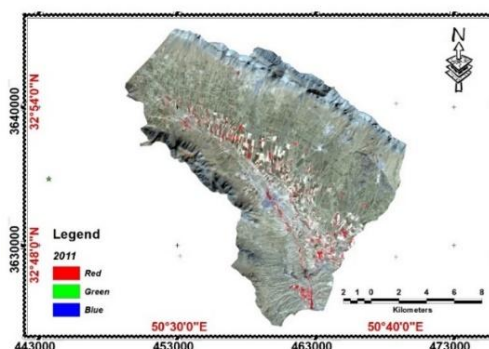
۲۰۰۱



۱۹۹۱



۲۰۲۱



۲۰۱۱

شکل ۲. تصاویر لندست در سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ حوضه آبخیز مندرجان

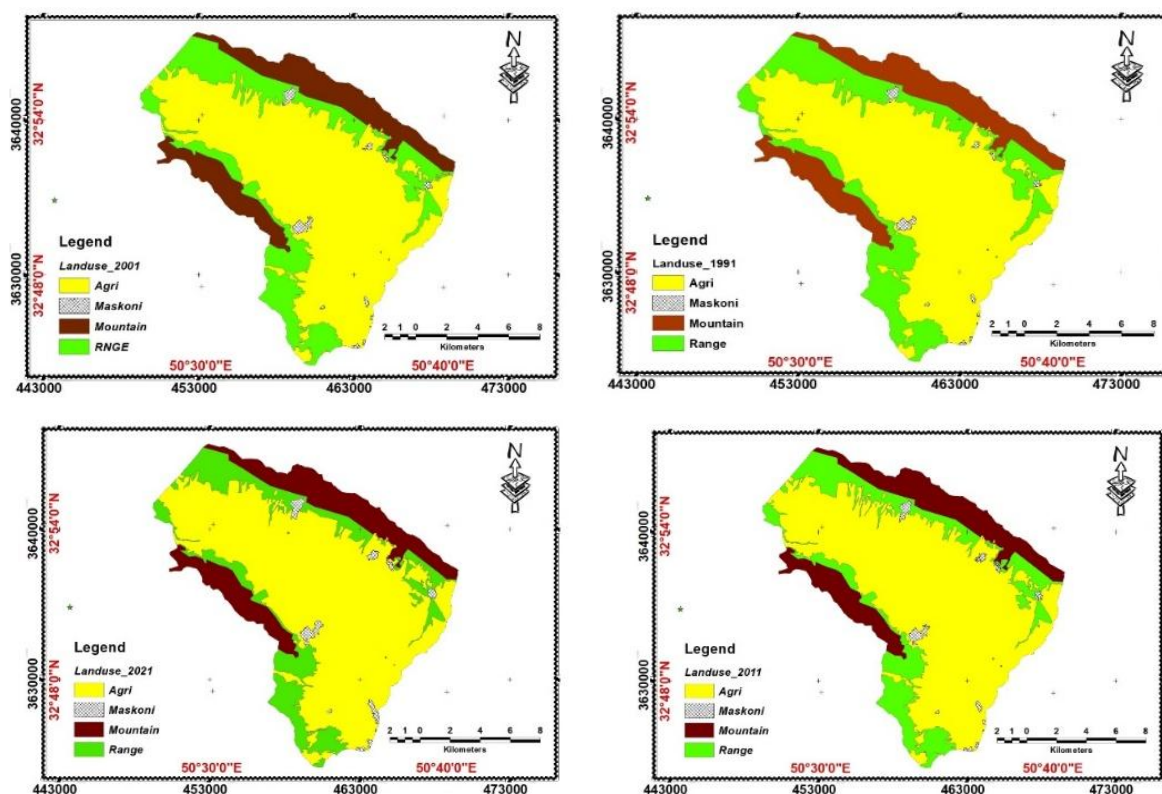
یافته‌های پژوهش

تهیه نقشه پوشی اراضی مربوط به سال‌های مورد مطالعه

شکل ۳ نقشه کاربری اراضی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ در حوضه آبخیز مندرجان نشان می‌دهد. با بهره‌گیری از نمونه‌های آزمایشی، نسبت به محاسبه دقت با بهره‌گیری از ماتریس خطا و محاسبه شاخص‌های آماری دقت کل، ضریب کاپا، دقت تولیدکننده و دقت بهره‌بردار اقدام شد (جدول ۱). نتایج مقادیر دقت کلی و شاخص کاپا برای تصاویر مورد استفاده نشان داد در تمامی موارد و سال‌های استفاده‌شده این میزان بالاتر از ۸۰ به دست آمده است که نشان از دقت بالای تهیه تصاویر و قابل اتکا و اطمینان بودن نتایج تهیه نقشه‌های مستخرج از تصاویر را دارد. مقادیر قابل قبول کاپا (پونتیس و میلونز، ۲۰۱۱) بیشتر از ۰/۴ است و اگر از ۰/۷۵ تجاوز کند بسیار خوب است.^۱

جدول ۱. دقت طبقه‌بندی تصاویر سال‌های مختلف در حوضه آبخیز مندرجان

۲۰۲۱		۲۰۱۱		۲۰۰۱		۱۹۹۱		طبقه کاربری
دقت	دقت	دقت	دقت	دقت	دقت	دقت	دقت	دقت
استفاده‌کننده	تولیدکننده	استفاده‌کننده	تولیدکننده	استفاده‌کننده	تولیدکننده	استفاده‌کننده	تولیدکننده	تولیدکننده
۸۸	۹۵	۸۴	۹۱	۸۶	۸۸	۹۵	۸۴	۹۱
۹۰	۸۷	۸۶	۸۴	۸۹	۹۰	۸۷	۸۶	۸۴
۹۷	۹۸	۹۴	۹۶	۹۶	۹۷	۹۸	۹۴	۹۶
۸۵	۸۸	۸۲	۸۵	۸۲	۸۵	۸۸	۸۲	۸۵
	۹۶		۹۲		۹۵		۹۴	دقت کل
	۹۴		۹۰		۹۳		۹۲	ضریب کاپا



شکل ۳. نقشه طبقه‌بندی‌شده کاربری اراضی حوضه آبخیز مندرجان در سال‌های مختلف

پیش‌بینی نقشه پوشش اراضی با استفاده از مدل CA-Markov^۱

بررسی مدل زنجیره‌ای مارکوف طی ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱

ماتریس احتمال انتقال و ماتریس مساحت انتقال کاربری اراضی و پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل زنجیره‌ای مارکوف برای دوره‌های زمانی ۱۹۹۱ - ۲۰۲۱ در جدول ۲ ذکر شده است. درخور یادآوری است احتمال انتقال کاربری‌ها در بازه ۰ تا ۱ و بدون واحد است. این ماتریس‌ها حاوی اطلاعات درصد تبدیل هر کلاس به سایر کلاس‌ها هستند (میرعلیزاده فرد و علی بخشی، ۲۰۱۶).

جدول ۲. ماتریس احتمال انتقال و مساحت کاربری‌های مختلف در بازه‌های زمانی مختلف

دوره	ماتریس احتمال انتقال کاربری				ماتریس مساحت انتقال کاربری (هکتار)			
	کاربری اراضی	کشاورزی	اراضی مسکونی	اراضی کوهستانی	اراضی مرتع	کشاورزی	اراضی مسکونی	اراضی کوهستانی
۱۹۹۱-۲۰۰۱	کشاورزی	۰/۹۹۸	۰/۰۰۲	۰	۰	۱۳۴۵۵	۰	۴۰۴
	مسکونی	۰	۱	۰	۰	۲۲	۱۷۷	۲
	کوهستانی	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۳۶۶۱
	مرتع	۰/۰۷۴	۰	۰/۰۰۱	۰/۹۲۵	۰	۰	۵۰۵۳
۲۰۰۱-۲۰۱۱	کشاورزی	۱	۰	۰	۰/۰۰۰۱	۱۳۸۲۱	۰	۷۷۱/۷۵
	مسکونی	۰	۱	۰	۰	۳۶/۵	۲۰۰	۰/۵
	کوهستانی	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۳۶۶۶
	مرتع	۰/۱۵	۰	۰	۰/۸۴۷۲	۱/۲۵	۰	۴۲۸۱
۲۰۱۱-۲۰۲۱	کشاورزی	۰/۹۹	۰/۰۱	۰	۰/۰۰۸	۱۴۳۹۵	۱/۷۵	۴۶۵/۵
	مسکونی	۰/۰۱	۰/۹۹	۰	۰	۸۰/۲۵	۲۳۵/۲۵	۸
	کوهستانی	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۳۶۶۶
	مرتع	۰/۱۱	۰	۰	۰/۸۸۹۴	۱۱۷/۲۵	۰	۳۸۰۸/۷۵

کاربرد مدل CA-Marcov در حوضه آبخیز مندرجان در زاینده‌رود نجفی و همکاران								
کشاورزی	۰/۹۹	۰/۰۱	۰	۰/۰۰۱۸	۱۳۷۱۸	۱/۲۵	۰	۱۱۴۳/۵
مسکونی	۰/۰۱	۰/۹۹	۰	۰	۱۱۶	۱۹۸/۷۵	۰	۸/۷۵
کوهستانی	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۳۶۶۶	۰
مرتج	۰/۲۳	۰	۰	۰/۷۷۲	۲۵	۰	۰	۳۹۰۱

اجرای مدل سلول خودکار و پیش‌بینی کاربری اراضی سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۲۱، ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱

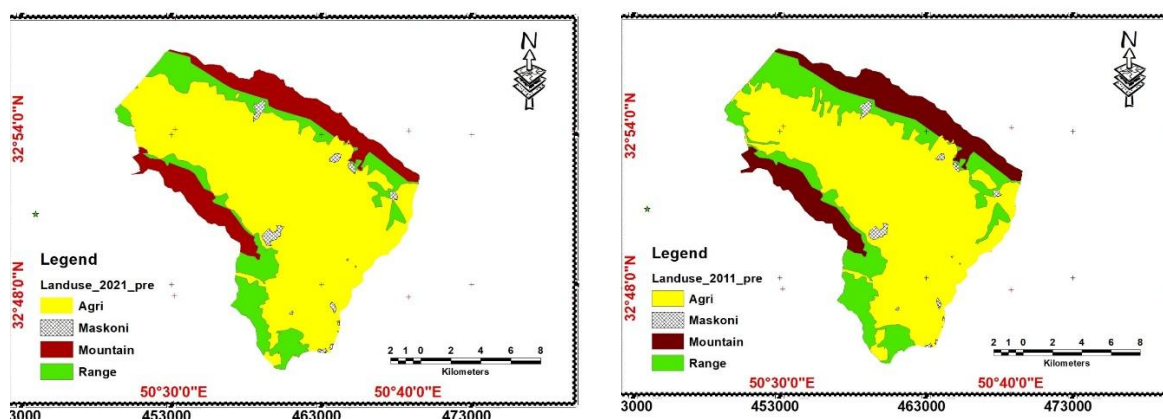
برای ارزیابی عملکرد سلول خودکار و پیش‌بینی کاربری اراضی آتی، شبیه‌سازی نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ با استفاده از مدل سلول خودکار و بر اساس نتایج حاصل از زنجیره مارکوف طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ انجام شده و در شکل ۴ نمایش داده شده است. جدول ۳ تغییرات مساحت و درصد نقشه کاربری اراضی و نقشه پیش‌بینی سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. ضریب کاپای حاصل از نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۱ و پیش‌بینی شده برابر با ۰/۹۶ و برای سال ۲۰۲۱ برابر با ۰/۹۶۹ بود. همچنین، تغییرات سطح و درصد کاربری اراضی طبقه‌بندی شده و پیش‌بینی شده سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ در جدول ۴ ارائه شده است. می‌توان با همین نتایج به‌دست‌آمده از طبقه‌بندی‌ها، تغییرات به‌وجودآمده در کاربری‌های اراضی را در بازه‌های زمانی یادشده ارزیابی و بررسی کرد (میرعلیزاده فرد و علی بخشی، ۲۰۱۶).^۱ متوسط درصد تغییرات محاسبه‌شده برای سال ۲۰۱۱، ۴/۲۸ و برای سال ۲۰۲۱، ۶/۲۵ است که درصد قابل قبولی برای اطمینان به استفاده از این مدل جهت پیش‌بینی نقشه‌های کاربری آتی است. بعد از اطمینان از نتایج صحت‌سنجی نقشه‌های به‌دست‌آمده در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ (جدول ۱)، نقشه‌های سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ پیش‌بینی شد. به منظور تهیه نقشه سال ۲۰۳۱ از نقشه سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ و برای نقشه سال ۲۰۴۱ از نقشه سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱ با فاصله زمانی ۲۰ ساله استفاده شد (شکل ۵). جدول ۵ نقشه کاربری اراضی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل خودکار زنجیره مارکوف مربوط به سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ و مقایسه آن با نقشه طبقه‌بندی شده سال ۲۰۲۱ را در حوضه آبخیز مندرجان نشان می‌دهد.

جدول ۳. تغییرات مساحت و درصد نقشه کاربری اراضی و نقشه پیش‌بینی سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱

طبقه کاربری	کاربری ۲۰۱۱		پیش‌بینی ۲۰۱۱		کاربری ۲۰۲۱		پیش‌بینی ۲۰۲۱	
	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
کشاورزی	۱۴۵۹۳	۶۴	۱۴۲۰۹	۶۲	۱۴۸۶۲	۶۵	۱۵۲۱۰	۶۷
مسکونی	۲۳۷	۱	۲۲۵	۱	۳۲۴	۱	۲۷۵	۱
کوهستانی	۳۶۶۶	۱۶	۳۶۷۱	۱۶	۳۶۶۶	۱۶	۳۶۶۶	۱۶
مرتج	۴۲۸۲	۹	۴۶۷۵	۲۱	۳۹۲۶	۱۷	۳۶۳۷	۱۶

جدول ۴. بررسی تغییرات پوشش اراضی نقشه کاربری طبقه‌بندی شده و پیش‌بینی شده سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ در حوضه آبخیز مندرجان

طبقه کاربری	۲۰۱۱		۲۰۲۱	
	تغییر سطح (هکتار)	درصد تغییر	تغییر سطح (هکتار)	درصد تغییر
کشاورزی	۳۸۴	۳	۳۴۸	۲
مسکونی	۱۲	۵	۴۹	۱۵
کوهستانی	۵	۰/۱۴	۰	۰
مرتج	۳۹۳	۹	۲۹۹	۸

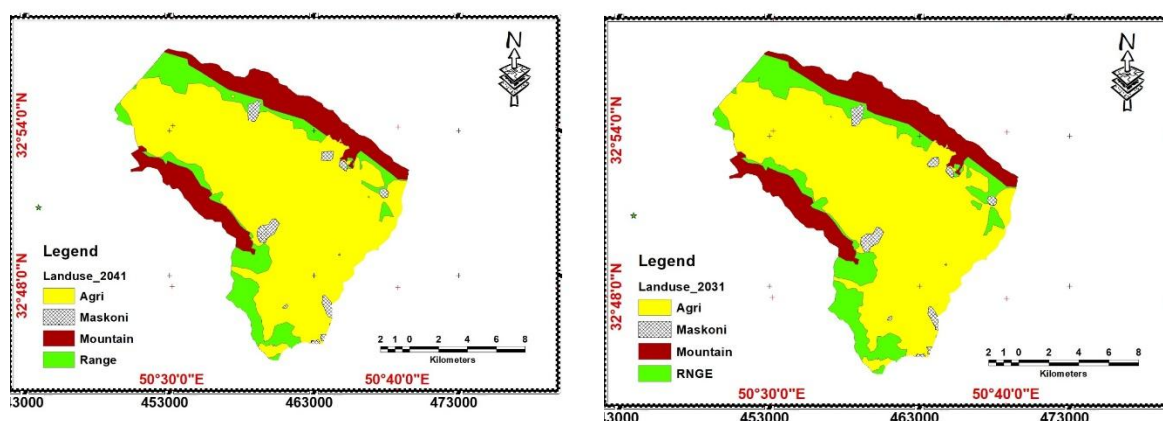


شکل ۴. نقشه پیش‌بینی‌شده کاربری اراضی حوضه آبخیز مندرجان در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱

جدول ۵. طبقات پوشش اراضی و بررسی تغییرات مربوط به سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ در حوضه آبخیز مندرجان

طبقه کاربری	۲۰۱۱	۲۰۳۱	۲۰۴۱	۲۰۳۱	۲۰۴۱	تغییر مساحت (هکتار)	درصد تغییر	تغییر مساحت (هکتار)	درصد تغییر
کشاورزی	۱۴۵۹۳	۶۴	۱۵۰۹۰	۶	۱۵۶۰۰	۶۸	۷۳۸	۲	۲۲۸
مسکونی	۲۳۷	۱	۴۱۱	۲	۴۵۴	۲	۱۳۰	۲۷	۸۸
کوهستانی	۳۶۶۶	۱۶	۳۶۶۶	۱۶	۳۶۶۶	۱۶	۰	۰	۰
مرتفع	۴۲۸۲	۹	۳۶۱۱	۱۶	۳۰۵۹	۱۳	-۸۶۸	-۸	-۳۱۵

بررسی روند تغییرات کاربری اراضی سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ نسبت به سال ۲۰۲۱ نشان داد بیشترین تغییرات افزایشی از لحاظ سطح، اراضی کشاورزی است.



شکل ۵. نقشه پیش‌بینی‌شده کاربری اراضی حوضه آبخیز مندرجان در سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱

بحث

یافته‌های این مطالعه نشان داد مدل CA-Markov با دقت بالایی (ضریب کاپای ۰/۹۶ و ۰/۹۶۹) قادر به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز مندرجان است. این نتایج با یافته‌های مطالعات مشابه در سایر مناطق نظیر قلی‌زاده و همکاران^۱ (۲۰۲۳) در منطقه قلعه‌جوق، اوکوواشی و همکاران^۲ (۲۰۲۱) در لاگوس و تادس و همکاران^۳ (۲۰۲۱) در اتیوپی همسو است که همگی مؤید قابلیت و دقت بالای این مدل تلفیقی در پیش‌بینی پویایی مکانی - زمانی پوشش زمین است. با این حال، در مقایسه با برخی مطالعات مانند بروهو و همکاران^۴ (۲۰۲۳) که ضریب کاپای کمتری گزارش کرده‌اند، دقت زیاد در این تحقیق

1. Gholizadeh et al.
2. Okwuashi

3. Tadese et al.
4. Beroho et al.

می‌تواند ناشی از کیفیت تصاویر ماهواره‌ای، دوره‌های زمانی کوتاه‌تر (ده‌ساله) و طبقه‌بندی دقیق‌تر چهار کلاس اصلی کاربری باشد. نتایج پیش‌بینی حاکی از روند افزایشی مداوم سطح اراضی کشاورزی و مسکونی در سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۴۱ و کاهش قابل توجه مراتع است. این روند نه تنها در منطقه مورد مطالعه، بلکه در بسیاری از حوضه‌های آبخیز ایران و جهان نظیر یافته‌های الحاج و همکاران^۱ (۲۰۲۳) در مراکش و گیرما و همکاران^۲ (۲۰۲۲) در اتیوپی مشاهده شده و بیانگر فشار فزاینده فعالیت‌های انسانی بر اکوسیستم‌های طبیعی است. تبدیل مراتع به زمین‌های کشاورزی و سکونت‌ی پیمادهای محیطی جدی به همراه خواهد داشت، از جمله کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش شماره منحنی و رواناب سطحی، تشدید فرسایش خاک، کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی و در نهایت، افزایش خطر وقوع سیلاب و کاهش دبی پایه جریان‌های آبی. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند تداوم روند فعلی بدون مدیریت آگاهانه، به تخریب پایدار سرزمین و افزایش آسیب‌پذیری منطقه در برابر مخاطرات طبیعی منجر خواهد شد. از منظر عملی، این تحقیق چارچوبی مبتنی بر سنجش از دور و مدل‌سازی را برای پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی ارائه می‌دهد که می‌تواند توسط مدیران و برنامه‌ریزان زمین در سطوح محلی و منطقه‌ای به کار گرفته شود. پیش‌بینی‌های انجام‌شده هشداردهنده هستند و لزوم اتخاذ سیاست‌های حفاظتی، نظیر تعیین مناطق حفاظت‌شده مرتعی، ترویج کشاورزی پایدار و برنامه‌ریزی شهری و روستایی مبتنی بر توان اکولوژیک را پررنگ می‌سازند. با این وجود، مطالعه حاضر با محدودیت‌هایی روبه‌رو است. نخست، مدل CA-Markov ذاتاً بر اساس روندهای گذشته عمل می‌کند و عوامل ناگهانی یا سیاست‌های آتی را در نظر نمی‌گیرد. دوم، تنها چهار کلاس اصلی کاربری در نظر گرفته شد که ممکن است جزئیات درون‌کلاسی (مانند انواع مختلف کشاورزی یا تراکم مسکونی) را پوشش ندهد. سوم، نقش محرک‌های اجتماعی - اقتصادی مستقیم در مدل گنجانده نشد. این محدودیت‌ها می‌توانند بر دقت پیش‌بینی‌های بلندمدت تأثیر بگذارند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مطالعه با به‌کارگیری مدل CA-Markov و تصاویر ماهواره‌ای لندست، به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز مندرجان پرداخت. یافته‌های کلیدی حاکی از آن است که روند تغییرات در گذشته و آینده تحت سناریوی ادامه وضع موجود، به سوی افزایش سطح اراضی کشاورزی و مسکونی و کاهش مستمر و نگران‌کننده مراتع پیش می‌رود. دقت بالای مدل (با ضریب کاپای بیش از ۰/۹۶) اعتبار نتایج پیش‌بینی را تأیید می‌کند. مهم‌ترین نتایج این تحقیق، ارائه یک تحلیل کمی و مکانی از روند آینده تغییر کاربری در یک حوضه آبخیز مهم و نشان دادن پیامدهای محیطی بالقوه آن، به‌ویژه افزایش خطر سیلاب و تخریب خاک، برای اولین بار در منطقه مندرجان است. این امر گامی اساسی در جهت آگاه‌سازی مدیران و ذی‌نفعان محسوب می‌شود. در نهایت، نتایج این پژوهش بر ضرورت تغییر رویکرد از مدیریت منفعلانه به مدیریت فعال و پایدار زمین تأکید دارد. پیش‌بینی‌های ارائه‌شده باید به عنوان زنگ خطری در نظر گرفته شوند که لزوم بازنگری در سیاست‌های توسعه کشاورزی، اسکان و حفاظت از منابع طبیعی را ایجاب می‌کنند. کاربرد مدل به‌کاررفته و چارچوب تحلیل ارائه‌شده می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای دستیابی به توسعه متوازن و سازگار با محیط زیست در سایر حوضه‌های آبخیز مشابه نیز مورد استفاده قرار گیرد. برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود: (۱) ادغام مدل با محرک‌های مستقیم تغییر کاربری (مانند فاصله از جاده، تراکم جمعیت، سیاست‌های دولتی)؛ (۲) استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی پیشرفته‌تر و تصاویر با وضوح بالاتر برای تفکیک دقیق‌تر کلاس‌ها؛ (۳) توسعه و مقایسه سناریوهای مختلف مدیریتی (مانند سناریوی حفاظتی یا توسعه شهری کنترل‌شده) به جای تنها سناریوی ادامه روند فعلی؛ و (۴) ارزیابی کمی پیامدهای هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی پیش‌بینی‌های انجام‌شده با استفاده از مدل‌های تلفیقی.

منابع

- 1 Abijith, D. & Saravanan, S. (2022). Assessment of land use and land cover change detection and prediction using remote sensing and CA Markov in the northern coastal districts of Tamil Nadu, India. Environ Sci Pollut Res, 29(57):86055–86067. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15782-6>
- 2 Ahmad, F., Goparaju, L., & Qayum, A. (2017). LULC analysis of urban spaces using Markov chain predictive model at Ranchi in India. Spatial Information Research, 25(3), 351-359. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0102-x>
- 3 Aksoy, H. & Kaptan, S. (2022). Simulation of future forest and land use/cover changes (2019–2039) using the cellular automata-Markov model. Geocarto Int, 37(4):1183–1202. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1778102>
- 4 Aliani, H., Noorollahi, Y. & Babaie Kafaki, S. (2011). Physiographic factors effects on land use change in Talesh region using Remote Sensing and GIS. Renewable natural resources research, 2(3): 9-21. : <https://sid.ir/paper/212269/en>. (In Persian)
- 5 Arekhi, S., Niazi, Y. & Shabani, A. (2012). Evaluating Spatial Pattern of Changes Trend of Landuse/landcover with use of Transformation Techniques (Case Study: Dareshar Catchment, Ilam Province), Geographic Space, 12(38), 165. magiran.com/p1061151. (In persian)
- 6 Asif, M., Kazmi, J. H., Tariq, A., Zhao, N., Guluzade, R., Soufan, W.,... & Aslam, M. (2023). Modelling of land use and land cover changes and prediction using CA-Markov and Random Forest. Geocarto International, 38(1), 2210532., DOI: [10.1080/10106049.2023.2210532](https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2210532)
- 7 Asori, M., & Adu, P. (2023). Modeling the impact of the future state of land use land cover change patterns on land surface temperatures beyond the frontiers of greater Kumasi: A coupled cellular automaton (CA) and Markov chains approaches. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 29, 100908. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100908>
- 8 Atef, I., Ahmed, W., & Abdel-Maguid, R. H. (2024). Future land use land cover changes in El-Fayoum governorate: a simulation study using satellite data and CA-Markov model. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 38(2), 651-66. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02592-0>
- 9 Beroho M, Briak H, Cherif EK, Boulahfa I, Ouallali A, Mrabet R, Kebede F, Bernardino A, Aboumaria K Beroho, M., Briak, H., Cherif, E. K., Boulahfa, I., Ouallali, A., Mrabet, R.,... & Aboumaria, K. (2023). Future scenarios of land use/land cover (LULC) based on a CA-markov simulation model: case of a mediterranean watershed in Morocco. Remote Sensing, 15(4), 1162. <https://doi.org/10.3390/rs15041162>.
- 10 Buya, S., Tongkumchum, P., Rittiboon, K., & Chaimontree, S. (2022). Logistic regression model of built-up land based on grid-digitized data structure: a case study of krabi, Thailand. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 50(5), 909-922. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01503-0>

- 11 Datta, D., Deb, K., Fonseca, C. M., Lobo, F., Condado, P. & Seixas, J. (2007). Multi objective evolutionary algorithm for land-use management problem. *International Journal of computational intelligence research*, 3(4), 371-384.
- 12 Deb, K., Mohnn, M. & iishra, S. (2005). Evaluating the -domination based on multi objectives evolutionary algorithm for a quick computation of pareto-optimal solutions. *Journal of evolutionary computation*, 13(4), 501-525. doi: 10.1162/106365605774666895.
- 13 Dow, C. L. (2007). Assessing regional land-use/cover influences on New Jersey Pinelands streamflow through hydrograph analysis. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(2), 185-197.
- 14 Eastman, J. R. (2009). *IDRISI Taiga guide to GIS and image processing*. Clark Labs Clark University, Worcester, MA.
- 15 El Haj, F. A., Ouadif, L., & Akhssas, A. (2023). Simulating and predicting future land-use/land cover trends using CA-Markov and LCM models. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100342.
- 16 Elhag M, Boteva S (2016) Mediterranean land use and land cover classification assessment using high spatial resolution data. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 44(4):42032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/4/042032>
- 17 Fathizad, H., Karimi, H. , Tazeh, M. and Tavakoli, M. (2014). Prediction of Land Use and Land Cover Changes in Arid and Semi-Arid Regions Using Satellite Images and Markov Chain Models (Case study: Doviraj Basin, Ilam Province). *Desert Management*, 2(3), 61-76. doi: 10.22034/jdmal.2014.17062.. (In Persian)
- 18 Fu, F., Deng, S., Wu, D., Liu, W., & Bai, Z. (2022). Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103760. ISSN 2210-6707,
- 19 Gholizadeh, Z. , Farzadmehr, J. and Rostami Khalaj, M. (2023). Modeling and predicting land use changes using Markov chain Model (Case study: Ghaleh Jogh, Torbat-e-Heydarieh City). *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(2), 75-96. doi: 10.22069/jwsc.2023.21009.3611.. (In Persian)
- 20 Girma, R., Fürst, C., & Moges, A. (2022). Land use land cover change modeling by integrating artificial neural network with cellular Automata-Markov chain model in Gidabo river basin, main Ethiopian rift. *Environmental Challenges*, 6, 100419, 100419, ISSN 2667-0100.
- 21 Hyandye C, Martz LW (2017) A Markovian and cellular automata land-use change predictive model of the Usangu Catchment. *Int J Remote Sens* 38(1):64–81. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1259675>
- 22 Irani, T. , Abghari, H. and rasooli, A. A. (2024). Analyzing the trend of land use changes in the past and future in Zolachay watershed. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 316-338-. doi: 10.22067/geoh.2024.88446.1494. (In Persian)
- 23 Khan, F., Das, B., & Mohammad, P. (2022). Urban growth modeling and prediction of land use land cover change over Nagpur City, India using cellular automata approach. *Geospatial technology for landscape and environmental management: sustainable assessment and planning*, 261-282. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7373-3_13.

- 24 Khoi D. N. & Suetsugi, T. (2014). Impact of climate and land-use changes on hydrological processes and sediment yield—a case study of the Be River catchment, Vietnam, *Hydrological Sciences Journal*, 59 (5), 1095-1108.
- 25 Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Hamed, R., & Alabsi, A. A. N. (2020). Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated cellular automata and markov chain model (CA-Markov). *Sustainability*, 12(24), 10452. <https://doi.org/10.3390/su122410452>
- 26 Leopold, L. B. (1968). *Hydrology for urban land planning: A guidebook on the hydrologic effects of urban land use* (Vol. 554). US Geological Survey.
- 27 Masoomi, H. , Malekian, A. , Salajegheh, A. and Nazari Samani, A. (2020). An Assessment of the Effect of Land Use Change on the Runoff Using the Markov Chain and Cellular Automata in the Bidgol Watershed, the Province of Fars. *Watershed Management Research*, 33(2), 31-51. doi: 10.22092/wmej.2019.126983.1242.. (In Persian)
- 28 Memarian H, Balasundram SK, Talib JB, Sung CTB, Sood AM and Abbaspour K (2012) Validation of CA-Markov for simulation of land use and cover change in the Langat Basin, Malaysia
- 29 Munthali MG, Mustak S, Adeola A, Botai J, Singh SK, Davis N (2020) Modelling land use and land cover dynamics of Dedza district of Malawi using hybrid cellular automata and Markov model. *Remote Sens Appl Soc Environ* 17:100276. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100276>
- 30 Mir Alizadehhfard, S. R. & Alibakhshi, S. M. (2016). Monitoring and forecasting of land use change by applying Markov chain model and land change modeler (Case study: Dehloran Bartash plains, Ilam). *RS & GIS for Natural Resources*, 7(2):33-46. (In Persian)
- 31 Okwuashi, O., & Ndehedehe, C. E. (2020). Integrating machine learning with Markov chain and cellular automata models for modelling urban land use change. *Remote Sens Appl: Soc Environ* 21: 100461. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100461>.
- 32 Pontius Jr, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International journal of remote sensing*, 32(15), 4407-4429. *Int. J. Rem. Sens.*, 32, 4407-429.
- 33 Rahimzadeh keivi, M. (2015). Evaluation of the effects of land use change on the amount of runoff in watersheds using combined SWAT hydrological model and remote sensing technique (Case study: Lorestan-Al-Shatter basin). Master's. Thesis of Watershed Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Malayer University. (In Persian)
- 34 Sayl, K. N., Sulaiman, S. O., Kamel, A. H., & Al-Ansari, N. (2022). Towards the generation of a spatial hydrological soil group map based on the radial basis network model and spectral reflectance band recognition. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 17(5), 761-766.. <https://doi.org/10.18280/ijdne.170514>
- 35 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. *Model Earth Syst Environ* 7(1):57–70. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00963-y>
- 36 Somvanshi, S. S., Bhalla, O., Kunwar, P., Singh, M., & Singh, P. (2020). Monitoring spatial LULC changes and its growth prediction based on statistical models and earth observation

- datasets of Gautam Budh Nagar, Uttar Pradesh, India. *Environment, Development and Sustainability*, 22(2), 1073-109. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0234-8>
- 37 Tadese, S., Soromessa, T., & Bekele, T. (2021). Analysis of the current and future prediction of land use/land cover change using remote sensing and the CA-Markov model in Majang forest biosphere reserves of Gambella, Southwestern Ethiopia. *The scientific world journal*, 2021(1), 6685045. <https://doi.org/10.1155/2021/6685045>