Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 17, Issue 1, 2026 ..... p: 33- 47

OPEN ACCESS

Research Paper

Monitoring and Predicting Land Use Changes in the Nehbandan Watershed Using the Random Forest Algorithm and the CA-Markov Model in the 2040 Horizon

Arezoo Nourizadeh[1], Elham Yousefi[2] and Toktam Makki[3]

1- M.Sc. in Land use planning, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Associate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, (Corresponding author: e_yusefi_31@birjand.ac.ir)

3- Ph.D. in Biodiversity, Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Environment, University of Birjand, Birjand, Iran

Received: 25 July, 2025 Revised: 25 October, 2025 Accepted: 28 November, 2025

Extended Abstract

Background: Detecting changes is one of the main factors in studying the relationship between human activities and the environment. Land use emphasizes the social aspect of land use. In other words, land use is the output of activities that humans perform according to their economic and social needs. On the other hand, modeling and predicting future changes are also necessary to understand the quantity and quality of future changes and developments. Detecting and predicting changes are essential to take care of an ecosystem, especially in areas with rapid and often unplanned changes in developing countries. Recently, remote sensing techniques and geographic information systems have been used in most applications of detecting changes in land use and cover and, as a result, monitoring land uses. Using remote sensing information and geographic information systems, future changes can be predicted from the ratio of land use and cover changes over time, and appropriate measures can be taken. In this study, two methods, Random Forest and Ca_Markov, were used to detect and predict land use changes in the Nehbandan watershed in the horizon of 2040. In this regard, the objectives of this study are to detect land use in the Nehbandan watershed using the Random Forest method and to simulate land use in the Nehbandan watershed using the Ca_Markov method over a 33-year period (2008-2040).

Methods: In this study, data from the TM sensor of Landsat 4 and 5 satellites from 2008 and Landsat 8 in 2013 and 2022 were used to determine and evaluate land use changes in the Nehbandan watershed. After preprocessing the images, the image classification operation was performed by applying the Random Forest algorithm in the Saga GIS software environment. The Random Forest method is a supervised classification method in which a set of trees is used for classification and decision-making. Then, using the probability matrix of land use class conversion, the land use map of the Nehbandan watershed was predicted for the year 2040 by applying the CA-Markov model in IDRISI Terrset software. Following previous studies, the VALIDATE tool in Idrisi software was used in this study to validate the CA-Markov model, which was validated by comparing the model with a real map.

Results: The results of monitoring changes in the Nehbandan watershed from 2008 to 2022 showed that vegetation and residential land use have changed by 4.5 and 6.51 square kilometers, respectively. Also, the CA-Markov model prediction results showed that the land use changes in 2040 in vegetation and residential uses will be 11.23 and 9.63 km2, respectively, compared to 2008. The prediction results of the area and percentage of uses in 2040 show that the largest changes will be in the area of vegetation. Considering the trend of land use changes in the Nehbandan watershed, an increase in vegetation related to agricultural use and, at the same time, a limited increase in residential areas is expected by 2040 in the future. Moreover, the residential use will increase in the form of filling within the urban use, and the growth of the city will be less on the margins and in its suburbs. This is mainly because Nehbandan County is small in terms of population and area in this watershed, the occupation of most people is agriculture, and the growth of the county has been accompanied by the growth of agricultural use, which has been the occupation of most people.

Conclusion: The results of this study clearly show that analyzing land use changes in the Nehbandan watershed using advanced methods, such as random forest and CA-Markov, is feasible and accurate. The relatively high accuracy of the random forest model for classifying

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

Copyright ©2026. Nourizadeh et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

satellite images confirms the results of other studies that have considered this method to be one of the most efficient methods for distinguishing diverse land covers. Accurate monitoring of these changes has been carried out from 2008 to 2022, with regard to vegetation and residential uses with high accuracy (vegetation and residential use have changed by 4.5 and 6.51 km2, respectively). The results obtained not only demonstrate the capabilities of these tools in location modeling and accurate analysis of land use changes, but also this capability helps environmental and urban officials to make the best possible decisions for appropriate land management in the future, and emphasizes the need for comprehensive policymaking and management to reduce the negative consequences of land use changes in the region. The results of the land use classification evaluation between the simulated and reference maps show that a standard coefficient of 90% has been achieved for the preparation of land use and land cover maps. Land use and land cover changes are considered a consistent and reliable basis for simulating future scenarios and confirm the ability of the CA-Markov model to simulate future land use changes. Therefore, this model can be used to simulate land use change in the study area up to the horizon of 2040.

Keywords: Geographic information system, remote sensing, classification, land use and land cover

How to Cite This Article: Nourizadeh, A., Yousefi, E., & Makki, T. (2026). Monitoring and Predicting Land Use Changes in the Nehbandan Watershed Using the Random Forest Algorithm and the CA-Markov Model in the 2040 Horizon. *J Watershed Manage Res,* 17(1), 33-47. DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

پایش و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و مدل CA-Markov در افق ۱۴۲۰

آرزو نوری زاده[۱]، الهام یوسفی[۲] و تکتم مکی[۳]

۱- کارشناسی ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲- دانشیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، (نویسنده مسوول: e_yusefi_31@birjand.ac.ir)
۳- دکتری تنوع زیستی، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷
صفحه: ۳۳تا ۴۷

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: آشکارسازی تغییرات یکی از عوامل اصلی در بررسی ارتباط بین فعالیت‌های انسانی و محیط زیست است. کاربری اراضی، بیشتر بر جنبه اجتماعی استفاده از زمین تأکید دارد. به عبارتی، کاربری اراضی خروجی فعالیت‌هایی است که انسان بر حسب نیازهای اقتصادی و اجتماعی خود انجام می‌دهد. از سوی دیگر، مدل‌سازی تغییرات آینده و پیش‌بینی آن نیز در جهت پی‌بردن به کمیت و کیفیت تغییر و تحولات آینده ضروری است. برای مراقبت از یک اکوسیستم به‌ویژه در مناطقی با تحولات سریع و اغلب بدون برنامه‌ریزی در کشورهای درحال‌توسعه، آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات یک امر لازم و ضروری است. اخیراً در اغلب کاربردهای آشکارسازی تغییرات کاربری و پوشش زمین و در نتیجه پایش کاربری‌ها، از تکنیک سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده می‌شود. با استفاده از اطلاعات سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، از نسبت تغییرات کاربری و پوشش زمین در گذر زمان می‌توان تغییرات آتی را پیش‌بینی نمود و اقدامات مقتضی را انجام داد. در این پژوهش، از دو روش جنگل تصادفی CA-Markov به ترتیب جهت آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز نهبندان در افق ۲۰۴۰ استفاده شد. در این راستا، اهداف این پژوهش عبارت از آشکارسازی کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از روش جنگل تصادفی و شبیه‌سازی کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از روش CA-Markov در یک دوره ۳۳ ساله (۲۰۰۸ تا ۲۰۴۰) هستند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، از داده‌های سنجنده TM ماهواره لندست ۴ و ۵ مربوط به سال ۲۰۰۸ و لندست ۸ در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ برای تعیین وارزیابی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان استفاده گردید. سپس، بعد از پیش‌پردازش تصاویر، عملیات طبقه‌بندی تصاویر با اعمال الگوریتم جنگل تصادفی در محیط نرم‌افزار Saga gis انجام شد. روش جنگل تصادفی یک روش طبقه‌بندی نظارت شده است که در آن از مجموعه‌ای از درخت‌ها در راستای طبقه‌بندی و تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. سپس، با استفاده از ماتریس احتمال تبدیل کلاس‌های کاربری اراضی، نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان برای سال ۲۰۴۰ با اعمال مدل CA-Markov در نرم‌افزار IDRISI Terrset پیش‌بینی گردید. در این مطالعه، جهت اعتبارسنجی مدل CA-Markov از ابزار VALIDATE در نرم‌افزار ادریسی استفاده شد که در این روش اعتبارسنجی با استفاده از مقایسه مدل با یک نقشه واقعی انجام شد.

یافته‌ها: نتایج پایش تغییرات در حوضه آبخیز نهبندان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲ نشان دادند که کاربری پوشش گیاهی و مسکونی به‌ترتیب ۴/۵ و ۶/۵۱ کیلومترمربع تغییرات داشتند. همچنین، نتایج پیش‌بینی مدل CA-Markov نشان دادند که تغییرات کاربری اراضی در سال ۲۰۴۰ نسبت به ۲۰۰۸ در کاربری‌های پوشش گیاهی و مسکونی به ترتیب ۱۱/۲۳ و ۹/۶۳ کیلومترمربع خواهد بود. نتایج پیش‌بینی مساحت و درصد کاربری‌ها در سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهند که بیشترین تغییرات در میزان مساحت پوشش گیاهی خواهند بود. با توجه به روند تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان، انتظار افزایش پوشش گیاهی مربوط به کاربری کشاورزی و درعین‌حال افزایش محدود مناطق مسکونی تا سال ۲۰۴۰ در آینده وجود دارد. همچنین، کاربری مسکونی تغییرات افزایشی به‌صورت توسعه درون‌شهری خواهد بود و رشد شهر کمتر به‌صورت حاشیه‌ای و در حومه‌ی آن خواهد بود. این موضوع بیشتر به این علت است که شهرستان نهبندان در این حوضه آبخیز از لحاظ جمعیتی و مساحتی کوچک است، شغل اکثر مردم کشاورزی است و رشد شهرستان همراه با رشد کاربری کشاورزی که شغل اکثر مردم است، همراه بوده است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهند که تحلیل تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای نظیر جنگل تصادفی و CA-Markov، امکان‌پذیر و دقیق است. دقت ۹۰ درصدی مدل جنگل تصادفی برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای تاییدی بر نتایج سایر پژوهش‌ها است که این روش را یکی از کاراترین روش‌ها برای تفکیک پوشش‌های متنوع زمین دانسته‌اند. پایش دقیق این تغییرات از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲، باتوجه‌به کاربری‌های پوشش گیاهی و مسکونی بادقت بالا (کاربری پوشش گیاهی و مسکونی به‌ترتیب ۵ /۴ و ۶/۵۱ کیلومترمربع تغییرات داشته است) انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده نه‌تنها توانمندی این ابزارها را در مدل‌سازی مکان و تحلیل دقیق تغییرات کاربری اراضی نشان می‌دهند بلکه این توانمندی به مسئولین محیط زیست و شهری کمک می‌کند تا بهترین تصمیمات ممکن را برای مدیریت مناسب اراضی در آینده اخذ کنند و بر ضرورت سیاست‌گذاری و مدیریت جامع برای کاهش پیامدهای منفی تغییرات کاربری اراضی در منطقه تأکید دارد. نتایج ارزیابی طبقه‌بندی کاربری اراضی بین نقشه شبیه‌سازی شده و مرجع نشان می‌دهند که ضریب استاندارد به میزان ۹۰ درصد برای تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش زمین حاصل شده است. تغییرات کاربری و پوشش زمین مبنایی سازگار و قابل‌اعتماد برای شبیه‌سازی سناریوهای آینده به‌حساب می‌آیند و قابلیت مدل CA-Markov برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری در آینده را تأیید می‌کنند؛ بنابر این، می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی تغییر کاربری اراضی در منطقه موردمطالعه تا افق ۲۰۴۰ استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: سیستم اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور، طبقه‌بندی، کاربری اراضی و پوشش زمین

مقدمه

تغییرات کاربری اراضی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل شکل‌دهنده سیمای زمین، اثرات ژرف و گسترده‌ای بر محیط زیست، اقتصاد و جوامع انسانی برجای می‌گذارند (Matsushita *et al.*, 2006; Tikuye *et al.*, 2023). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های اکوسیستم‌های طبیعی، کاربری اراضی است که شناخت درست نسبت به آن و چگونگی تحولات آن در طی بازه‌های زمانی متفاوت از اساسی‌ترین پیش‌نیازها در برنامه‌ریزی‌های محیطی است. با این روش می‌توان تحولات اخیر کاربری اراضی را در جهت برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده پایدار از کاربری اراضی آشکارسازی و پیش‌بینی کرد (Mas *et al.*, 2014).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

این مطالعات با فراهم‌آوردن اطلاعات دقیق و به‌روز در باره تغییرات کاربری اراضی، امکان برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع طبیعی را فراهم می‌آورند (Palmate *et al.,* 2022). به‌عبارت دیگر، با شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات کاربری اراضی و پیش‌بینی روندهای آینده، می‌توان اقدامات مدیریتی مناسبی را برای حفظ و بهبود محیط زیست و توسعه پایدار اتخاذ کرد (Liu & Yang, 2015; Shirazi *et al.,* 2010).

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری سنجش از دور و مدل‌سازی مکانی، امکان مطالعه دقیق و جامع تغییرات کاربری اراضی را فراهم کرده‌اند. در واقع، داده‌های سنجش از دور داده‌های چندزمانه‌ی گران‌بهایی را درباره‌ی فرآیندها و الگوهای تغییر پوشش زمین و کاربری اراضی در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌کنند به‌طوری‌که نقشه‌های پوشش اراضی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای نقش مهمی را در ارزیابی‌های منطقه‌ای و ملی ایفا می‌کنند (Dewan & Yamaguchi, 2009; Knorn *et al*., 2009; Tewolde & Cabral, 2011). با این رویکرد می‌توان تحولات اخیر کاربری اراضی را در جهت برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده پایدار از کاربری اراضی آشکارسازی و پیش‌بینی کرد (Mas *et al.,* 2014).

از سوی دیگر، مدل‌سازی تغییرات آینده و پیش‌بینی آن نیز در جهت پی‌بردن به کمیت و کیفیت تغییر و تحولات آینده ضروری است. برای مراقبت از یک اکوسیستم به‌ویژه در مناطقی با تحولات سریع و اغلب بدون برنامه‌ریزی در کشورهای در حال توسعه، آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات یک امر لازم و ضروری است (Vafaei *et al.,* 2013).

اخیرا در اغلب کاربردهای آشکارسازی تغییرات کاربری و پوشش زمین و در نتیجه پایش کاربری‌ها، از تکنیک سنجش از دور استفاده می‌شود، زیرا نسبت به روش‌های قدیمی بر اساس بررسی‌های زمینی که اکثرا هزینه‌بر و زمان‌بر هستند، مقرون به صرفه‌تر و کارامدتر هستند (Adam *et al.,* 2014؛ Sadeghi *et al.,* 2013).

درطی سال‌های گذشته، برای تهیه‌ی نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی، روش‌های طبقه‌بندی مختلفی استفاده شده‌اند که شامل درخت تصمیم‌گیری، ماشین بردار پشتیبان، روش حداکثر احتمال، شبکه‌ی عصبی و جنگل تصادفی هستند. از جمله الگوریتم‌های غیرپارامتریک، یادگیری ماشین و الگوریتم جنگل تصادفی هستند که به‌صورت وسیع در طبقه‌بندی کاربری اراضی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Breiman, 2001). این الگوریتم‌ها برای طبقه‌بندی داده‌های گسسته و پیوسته استفاده می‌شود. از ویژگی‌های مهم این الگوریتم‌ها، کارایی مناسب در مواجه با داده‌های نامتوازن و عدم حساسیت به نویز(خطا) است (Adam *et al*., 2014).

از سویی دیگر، برای مدل‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی، روش‌های گوناگونی وجود دارند که به مدل مارکوف می‌توان اشاره کرد. برای امکان پیش‌بینی کاربری‌های مختلف و همچنین برای تعیین نسبت تبدیل آن‌ها از مدل زنجیره‌ی مارکوف استفاده می‌شود (Asif *et al*., 2023؛ MIR & Alibakhshi, 2016).

مدل مارکوف به‌صورت یک روش تصادفی است که بر اساس آن وضعیت تصادفی آینده هر پیکسل به وضعیت گذشته آن وابسته است که باتوجه‌به این موضوع، نقشه پیش‌بینی شده تهیه می‌شود؛ سپس نتیجه‌ی به‌صورت یک ماتریس به دست می‌آید که میزان احتمال تغییر را پیش‌بینی می‌کند (Khosraviaqdam *et al.,* 2019).

محبوبیت اتوماتای سلولی از توانایی آن در مدل‌سازی سلول‌های مجاور 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).

مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب این روش‌ها منجر به افزایش دقت شبیه‌سازی تغییرات کاربری و پوشش زمین می‌شود (Palmate *et al*., 2022). در ارتباط با مدل CA-Markov، ونگ (Weng, 2002) و نهزاک و همکاران (Nehzak *et al.,* 2022) کاربرد موفق این مدل در پیش‌بینی تغییرات کاربری را تأیید کردند. ژو و همکاران (Zhou *et al.,* 2020) و ژانگ و همکاران (Zhang *et al.,* 2023) ترکیب مدل‌های CA-Markov و جنگل تصادفی را برای ارزیابی تغییرات مناطق خشک توصیه کردند. مطالعاتی نظیر آسیف و همکاران (Asif *et al.,* 2023) و روی و همکاران (Roy *et al.,* 2024) و رویگار و همکاران (Ruigar *et al.,* 2024) نیز تأیید می‌کنند که تلفیق این الگوریتم‌ها دقت مدل‌سازی را افزایش می‌دهد. این پژوهش برای نخستین‌بار با ترکیب الگوریتم جنگل تصادفی و مدل CA–Markov، تغییرات کاربری اراضی را در حوضه آبخیز نهبندان آشکارسازی و تا افق ۲۰۴۰ پیش‌بینی کرده است؛ رویکردی که دقت بالا و قابلیت کاربردی ویژه‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد.

حوضه آبخیز نهبندان به‌عنوان یک منطقه خشک و نیمه‌خشک با حساسیت بالا نسبت به تغییرات محیطی انتخاب شده است. با توجه به محدودیت‌های مطالعات قبلی در این منطقه، این پژوهش سعی دارد با استفاده از داده‌های باکیفیت بالاتر و روش‌های مدل‌سازی پیشرفته‌تر، به درک دقیق‌تری از تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز نهبندان دست یابد.

در این پژوهش، از دو روش جنگل تصادفی و CA-Markov به‌ترتیب جهت آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز نهبندان در افق ۲۰۴۰ استفاده شد. در این راستا، اهداف این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. آشکارسازی کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از روش جنگل تصادفی

۲. شبیه‌سازی کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از روش CA-Markov در افق ۲۰۴۰.

نتایج این پژوهش می‌توانند به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران محلی و ملی در زمینه مدیریت پایدار منابع آب‌وخاک و حفظ محیط زیست کمک کنند. همچنین، این مطالعه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای مطالعات مشابه در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

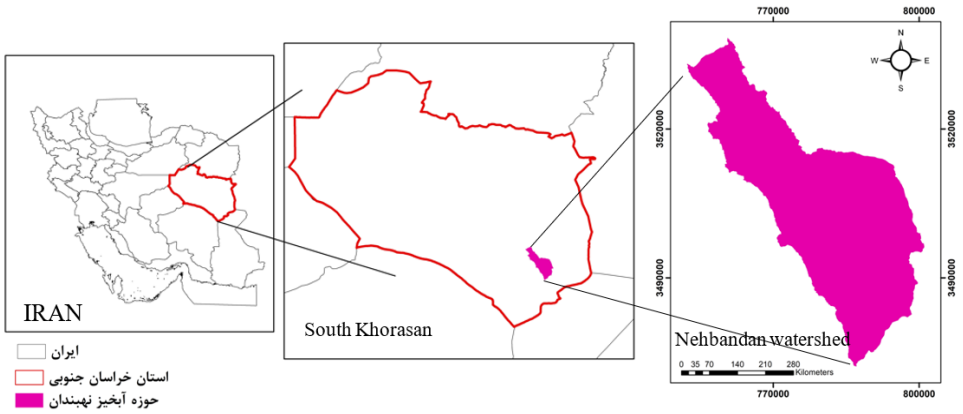
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

در این مطالعه، منطقه‌ی مورد مطالعه حوضه‌ی آبخیز نهبندان است که شهر نهبندان در این حوضه قرار دارد. شهرستان نهبندان در موقعیت جغرافیایی ۵۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۲ دقیقه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱).

ارتفاع از سطح دریا در این منطقه ۱۲۶۰ متر و جمعیت این منطقه ۱۸۰۳ نفر است و دارای مساحت ۲۶۰۰ کیلومتر مربع و میانگین دمای سالانه‌ی آن ۱۹/۵ سیلسیوس است که در ناحیه‌ی کویری واقع شده است. به‌طور کلی جهت شیب در شهرستان نهبندان از جنوب و جنوب غربی است به‌طوری‌که در قسمت شرقی و جنوب شرقی به دشت سیستان و در جنوب و جنوب غربی به بیابان لوت منتهی می‌گردد. شهرستان نهبندان از شمال به کوه‌های کم‌ارتفاع بهاران محدود می‌شود. این کوه‌ها در شمال دشت سهل‌آباد و چاهدراز واقع گردیده‌اند که از مشجرترین کوه‌های شهرستان هستند. متراکم‌ترین ارتفاعات در غرب (کوه هاری ۲۷۰۸ متر) قرار دارند و پس از آن ارتفاعات شمال شرقی و سپس بهاران کوه هستند (Meteorological Organization, 2016).



شکل ۱- نقشه محدوده حوضه آبخیز نهبندان
Figure 1. The Nehbandan watershed area map

داده‌های مورد استفاده

مطالعه حاضر به آشکارسازی و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تلفیق زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار با استفاده از سناریونویسی تا سال ۲۰۴۰ در حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از تصاویر لندست ۴ و ۵ سال ۲۰۰۸ و لندست ۷ سال ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ پرداخته است. در این پژوهش، از نرم‌افزارهای Google erth، Idrisi، Envi Saga gis و Arc gis استفاده شد.

روش کار

مطالعه حاضر به آشکارسازی و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و تلفیق زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار تا سال ۲۰۴۰ در حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از تصاویر لندست ۴ و ۵ سال ۲۰۰۸ و لندست ۸ برای سال های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ پرداخته است. در مطالعات با دوره زمانی کوتاه‌تر و مناطق مطالعاتی کوچک‌تر استفاده از تصاویر با دقت بالاتر نیز مانند Sentinel-2، SPOT و WorldView کاربرد دارد. در این پژوهش، بررسی سری زمانی طولانی‌مدت در سطح حوضه آبخیز استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست با دقت ۳۰ متر که با استفاده از دستور Gram و باند پانکروماتیک رزولوشن مکانی آن ۱۵ متر شده است، استفاده شده است که دقت مناسبی است. مراحل کلی این پژوهش در (شکل ۲) آورده شده‌اند.

مراحل پیش‌پردازش تصاویر

در این پژوهش، از داده‌های سنجنده TM ماهواره لندست ۴ و ۵ مربوط به سال ۲۰۰۸ و لندست ۸ در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ که به‌طور رایگان از سایت زمین‌شناسی امریکا گرفته شد برای تعیین و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان استفاده گردید (http://earthexplorer.usgs.gov). در انتخاب این تصاویر، معیارهای حداقل پوشش ابر (کمتر از ۱۰ درصد) لحاظ شدند و این تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌ی تابستانه (ماه June) استخراج شدند.

پس از استخراج تصاویر، تصحیحات رادیومتریک و اتمسفریک انجام اعمال شدند. سپس، دستور Gram برای افزایش دقت مکانی و پس از آن دستور Band Math جهت استانداردسازی رنج داده‌ها انجام شدند.

مراحل پردازش تصاویر

ایجاد شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)

در این تحقیق برای بالابردن دقت طبقه‌بندی برای ظهور و استخراج طبقه‌ی پوشش گیاهی از تصویر ماهواره‌ای از شاخص NDVI استفاده شد و در محیط نرم‌افزار Envi 5.3 این شاخص برای هر سه تصویر سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ به‌دست آمد. محدوده‌ی منفی حذف و محدوده‌ی مثبت به طبقات معنادار طبقه‌بندی شد (محدوده بالای ۰/۲) تا در طبقه‌بندی نهایی از آن استفاده گردد (Dastigerdi *et al.*, 2024). خروجی این شاخص برای سال ۲۰۲۲ به‌عنوان نمونه در شکل ۳ آورده شده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

انتخاب نمونه‌ی آموزشی

نمونه‌ی آموزشی مورد استفاده در پژوهش موردنظر از کاربری‌های اراضی را شامل می‌شود که در جدول ۱ بیان شده است.

انتخاب الگوریتم طبقه‌بندی

پس از این که تصحیحات لازم بر روی تصاویر انجام شدند، در نرم‌افزار ENVI، به فرمت رستری Tif تبدیل گردید، و برای اجرای الگوریتم جنگل تصادفی، در حوضه آبخیز نهبندان از هر سه کاربری اراضی (پوشش گیاهی، مسکونی، و بایر) نمونه‌برداری انجام شد. سپس، سه فایل نمونه‌برداری با یکدیگر ترکیب شدند و در انتها، با استفاده از نرم‌افزار Saga GIS، الگوریتم جنگل تصادفی اجرا شد.

به‌منظور اختصاص رنگ و نام دلخواه به هر کاربری، لایه طبقه‌بندی جنگل تصادفی با فرمت GeoTiff وارد نرم‌افزار Arc gis شد. سپس، اعتبارسنجی نقشه باتوجه‌به واقعیت زمینی انجام شد. نقشه‌های حاصل از روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی در شکل ۴ آورده شده‌اند.

پس‌پردازش تصاویر

ارزیابی دقت طبقه‌بندی

در این مرحله از پژوهش، نمونه‌هایی از هر سه دسته کاربری مربوط به تابستان ۲۰۲۲ در نرم‌افزار Google Earth انتخاب و با نقشه‌های پردازش شده و طبقه‌بندی شده توسط الگوریتم جنگل تصادفی مقایسه شدند. خروجی حاصل از این مرحله با استفاده از ضریب Kappa ارزیابی شد.

برای استفاده مناسب از تصویر ماهواره‌ای و امکان استخراج اطلاعات صحیح و مورد نظر، باید قبل از هر گونه استفاده از این تصاویر، عملیاتی به نام پردازش تصاویر بر روی داده‌ها انجام گردد تا علاوه بر تصحیح خطاهای موجود، تصاویر برای طبقه‌بندی آماده گردند. این فرایند شامل سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش است (Kamali, 2009). پیش‌پردازش داده‌ها به جهت آماده‌سازی آن‌ها برای ورود به طبقه‌بندی انجام می‌گیرد. به‌منظور بررسی و پیش‌بینی تغییرات حوضه آبخیز نهبندان، ابتدا پیش‌پردازش‌های تصاویر در نرم‌افزار ENVI5.3 انجام شدند. در ادامه، در محیط نرم‌افزار SAGA تصاویر با اعمال الگوریتم Random Forest که در آن تعداد درخت‌های جنگل با توجه به منطقه موردنظر ۱۰۰ تا در نظر گرفته شد و سپس طبقه‌بندی گردیدند. برای اجرای الگوریتم جنگل تصادفی، از مجموع ۴۵۰ نمونه آموزشی (۱۵۰ نمونه برای هر یک از سه کلاس کاربری اراضی) استفاده شد. نقاط نمونه از طریق تفسیر بصری تصاویر ماهواره‌ای و تطابق با داده‌های Google Earth برداشت و به‌طور یکنواخت در سطح محدوده حوضه پراکنده شدند. سپس، به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی از نرم‌افزار IDRISI Terrset استفاده گردید. به‌منظور ارزیابی صحت طبقه‌بندی از دو پارامتر اصلی صحت کلی و ضریب کاپا استفاده شد (رابطه ۱) (Arekhi, 2015)

$$OA=1/N\sum P_{ij}$$

ضریب کاپا به‌طور متداول به‌منظور ارزیابی دقت با استفاده از تمام اطلاعات ماتریس ابهام مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$k=(N\sum_{i=1}^{r}\llbracket X_{ji}-\sum_{i=1}^{r}\llbracket (X_{i+}X_{+i}) \rrbracket \rrbracket) / (N^2-\sum_{i=1}^{r}\llbracket (X_{i+}X_{+j})\rrbracket)$$

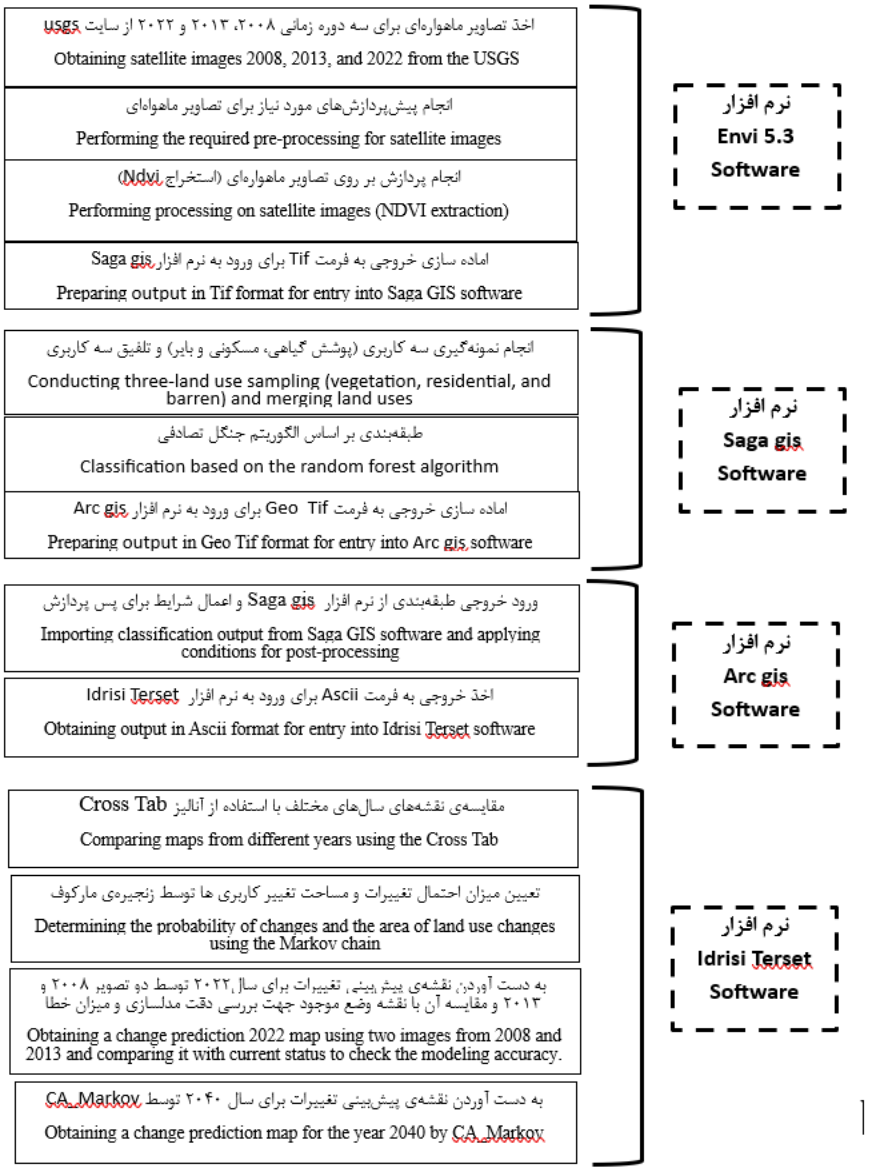
در رابطه (۱)، OA صحت کلی، N تعداد کل پیکسل‌ها و PIJΣ مجموع پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده هستند. در رابطه (۲)، r تعداد سطرها و ستون‌ها در ماتریس ابهام، xij ماتریس ابهام، xi + و x+i به‌ترتیب مجموع کل سطر i و ستون j و N تعداد کل پیسکل‌ها هستند (Smits *et al.*, 1999).

به‌منظور مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی از مدل CA – Markov استفاده شد. مدل «اتوماتای سلولی» در ترکیب با «زنجیره مارکوف» می‌تواند پویایی سیستم‌های پیچیده را از طریق قوانین ساده نشان دهد.

پیرو مطالعات پیشین، در این مطالعه جهت اعتبارسنجی مدل CA-Markov از ابزار VALIDATE در نرم‌افزار ادریسی استفاده شد که در این روش، اعتبارسنجی با استفاده از مقایسه مدل با یک نقشه واقعی انجام می‌شود (Memarian *et al.*, 2012؛ Surabuddin Mondal, 2013).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]



شکل ۲- فلوچارت روش آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در سه دهه
Figure 2. The flowchart of detecting and predicting land use changes in three decades

نتایج و بحث

با توجه به جدول ۲، مشاهده می‌شود که کاربری‌های مسکونی و پوشش گیاهی از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۲۲ روند افزایشی داشتند. این نتایج تأیید می‌کنند که نقاطی که به‌عنوان مسکونی یا دارای پوشش گیاهی شناخته شدند، در این دوره افزایش یافتند. در این میان، کاربری بایر روند کاهشی داشت. این ممکن است نشانگر تغییر کاربری از بایر به مسکونی یا پوشش گیاهی باشد. برای بررسی دقیق‌تر این تغییرات، از جدول Crosstab استفاده گردید تا با تفکیک بیشتری اطلاعات به‌دست آورده شود و با دقت بیشتر تغییرات مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۱- نقشه توصیف کاربری‌های اراضی
Table 1. The land use description map

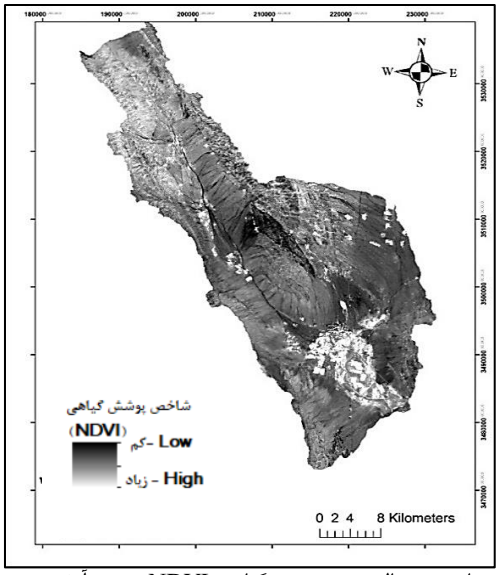
عنوان کلاس کاربری User class title	توصیف Description
پوشش گیاهی Vegetation	توسط شاخص NDVI به‌دست آمد. It was obtained by the NDVI index.
مناطق ساخته شده Built-up areas	شامل مناطق شهری، روستایی، شهرک صنعتی و به‌طورکلی مناطق ساخت بشر Including urban, rural, industrial, and generally man-made areas.
بایر Barren	این کلاس اراضی را که به‌طورکلی کشت نمی‌شود و به اراضی رها شده تبدیل شده است شامل می‌گردد. This class includes lands that are not generally cultivated and have become abandoned lands.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

جدول ۲- مساحت کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲

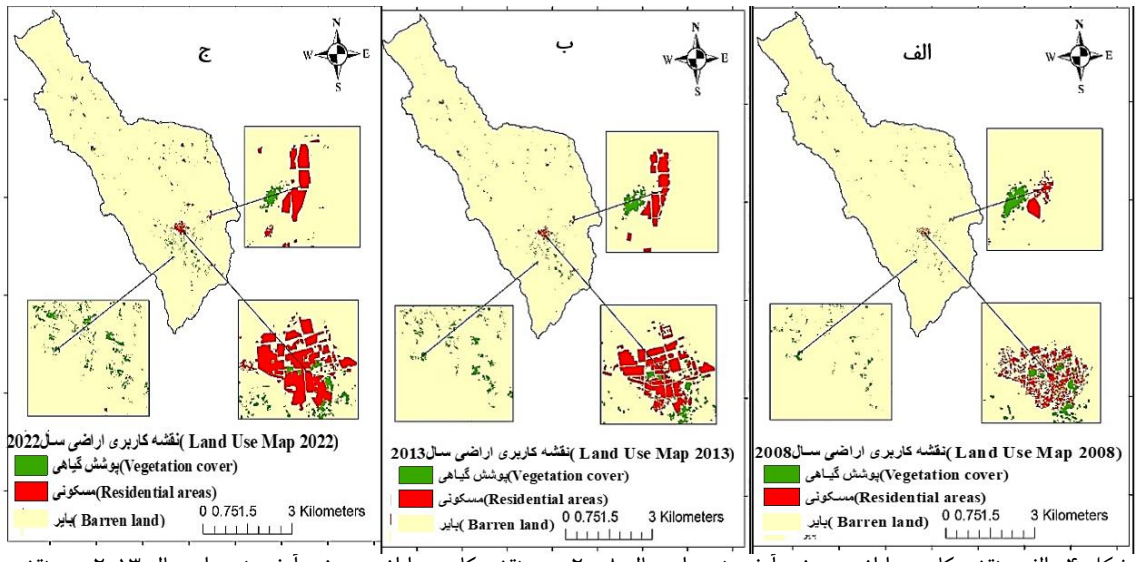
Table 2. Land use area in 2008, 2013, and 2022

روند تغییرات The process of change	۲۰۲۲ 2022		۲۰۱۳ 2013		۲۰۰۸ 2008		کلاس کاربری اراضی Land use class
	درصد Percentage	کیلومترمربع Square kilometer	درصد Percentage	کیلومترمربع Square kilometer	درصد Percentage	کیلومترمربع Square kilometer	
افزایشی Additive	0.77	9.09	0.62	7.34	0.41	4.94	پوشش گیاهی Vegetation
افزایشی Additive	0.80	9.41	0.51	6.11	0.24	2.90	مسکونی Residential
کاهشی Subtractive	98.4	1164.96	98.9	1169.90	99.33	1175,49	بایر Barren
	100	1183.46	100	1183.35	100	1183.33	کل Total



شکل ۳- نقشه شاخص نرمال شده پوشش گیاهی NDVI حوضه آبخیز نهبندان سال۲۰۲۲

Figure 3. Normalized NDVI vegetation index map of Nehbandan watershed in 2022



شکل ۴- الف- نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان سال ۲۰۰۸، ب- نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان سال ۲۰۱۳، ج- نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان سال ۲۰۲۲ (با بزرگ‌نمایی مناطق اصلی)

Figure 4. A- The land use map of the Nahbandan watershed in 2008, B- The land use map of the Nahbandan watershed in 2013, and C- The land use map of the Nahbandan watershed in 2022 (with the enlargement of the main areas)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

ارزیابی دقت طبقه‌بندی

بر اساس داده‌های (جدول ۳)، دقت و صحت طبقه‌بندی با استفاده از روش جنگل تصادفی بالای ۹۰ درصد تعیین شد؛ بنابر این، مشخص می‌شود که نقشه‌های طبقه‌بندی شده به این روش، صحت قابل قبولی دارند.

آنالیز Crosstab

با استفاده از تجزیه و تحلیل Crosstab در نرم‌افزار TerrSet Idrisi، دقت طبقه‌بندی نقشه‌های موضوعی کاربری و پوشش زمین ارزیابی شد تا مشخص شود چه کاربری‌هایی به چه میزانی بعد از هر دوره زمانی به کاربری دیگر تبدیل شده‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهند که در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲، بیشترین روند تبدیلات در اراضی بایر به پوشش گیاهی(کاربری کشاورزی) است (جدول ۴).

جدول ۳- نتایج برآورد صحت نقشه‌های سال ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲

Table 3. Results of estimating the accuracy of maps for 2008, 2013, and 2022

سال Year	صحت کلی Overall accuracy	ضریب کاپا Kappa coefficient
2008	90.80	90.05
2013	94.5	92.80
2022	95.50	94.90

جدول ۴- میزان تبدیلات کاربری‌ها از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲ (بر حسب کیلومتر هکتار)

Table 4. Land use conversion rates from 2008 to 2022 (kilometers per hectare)

تبدیل پوشش گیاهی به مسکونی Converting vegetation to residential	0.08
تبدیل بایر به پوشش گیاهی Converting barren land to vegetation	36
تبدیل بایر به مسکونی Converting barren to residential	0.07

پیش‌بینی کاربری اراضی ۲۰۴۰ با استفاده از زنجیره‌های مارکوف

در روش زنجیره‌های مارکوف، تصاویر ماهواره‌ای پوشش زمین بر اساس ماتریس احتمال تغییرات مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. جدول ۵ نتایج پیش‌بینی روند تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان را برای سال ۲۰۲۲ با استفاده از زنجیره های مارکوف نشان می‌دهد. با توجه به زنجیره مارکوف حاصل از مقایسه نقشه‌های سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳ (جدول ۶)، نتایج نشان می‌دهند که در سال ۲۰۲۲ تعداد سلول‌های پوشش گیاهی و مسکونی افزایش یافت (جدول ۵). از مدل CA-Markov برای پیش‌بینی نقشه سال ۲۰۲۲ استفاده شده است (شکل ۵) تا پس از تایید اعتبار مدل، پیش‌بینی کاربری اراضی برای سال ۲۰۴۰ انجام گردد.

اعتبارسنجی نقشه

برای اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش زمین سال ۲۰۲۲، از نقشه واقعیت زمینی در سال ۲۰۲۲ استفاده شد. این فرآیند شامل مقایسه نقشه‌ی شبیه‌سازی شده با واقعیت سال ۲۰۲۲ و محاسبه ضریب استاندارد برای اطمینان از صحت مدل پیش‌بینی بود (شکل ۶).

نتایج ارزیابی طبقه‌بندی کاربری اراضی بین نقشه شبیه‌سازی شده و مرجع نشان می‌دهند که ضریب استاندارد به میزان ۹۰ درصد برای تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش زمین حاصل شده است. تغییرات کاربری و پوشش زمین مبنایی سازگار و قابل اعتماد برای شبیه‌سازی سناریوهای آینده به‌حساب می‌آیند و قابلیت مدل CA-Markov برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری در آینده را تأیید می‌کنند. بنابر این، می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی تغییر کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه تا افق ۲۰۴۰ استفاده کرد.

نتایج زنجیره مارکوف به هدف پیش‌بینی احتمال تغییرات در سال ۲۰۴۰ با استفاده از نقشه‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲

با توجه به جداول ۷ و ۸، زنجیره مارکوف بر اساس نقشه‌های سال ۲۰۲۲ و ۲۰۱۳ نشان می‌دهد که در سال ۲۰۴۰ تعداد سلول‌های پوشش گیاهی و مسکونی افزایش خواهند یافت. این اطلاعات با کمک مدل اتوماتای سلولی به نقشه‌ی پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۴۰ منجر می‌شود.

جدول ۵- درصد احتمال تغییردرکاربری‌های حوضه آبخیز نهبندان تا سال ۲۰۲۲ با استفاده مدل زنجیره‌های مارکوف

Table 5. Percentage probability of changes in the uses of the Nehbandan watershed by 2022 using the Markov chain

کلاس کاربری اراضی Land use class	پوشش گیاهی Vegetation	مسکونی Residential	بایر Barren
پوشش گیاهی Vegetation	0.2506	0.0215	0.7279
مسکونی Residential	0.0071	0.3179	0.6750
بایر Barren	0.0826	0.0771	0.8403

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

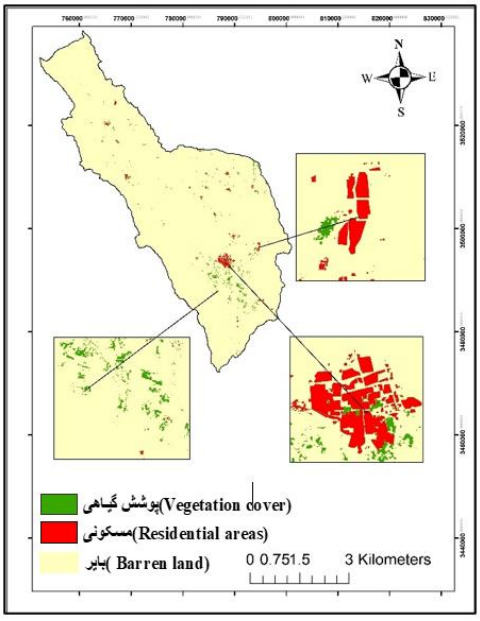
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

جدول ۶- تغییرات صورت گرفته از لحاظ تعداد سلول بین سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳
Table 6. Changes in the number of cells between 2008 and 2013

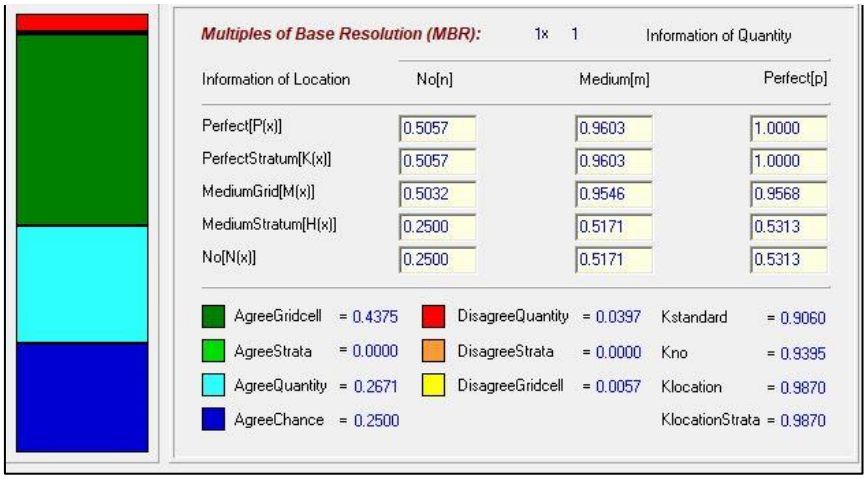
بایر Barren	مسکونی Residential	پوشش گیاهی Vegetation	کلاس کاربری اراضی Land use class
5945	175	2047	پوشش گیاهی Vegetation
4554	2144	48	مسکونی Residential
1091719	100177	107326	بایر Barren

جدول ۷- مساحت (کیلومترمربع) سال ۲۰۲۲ واقعی و سال ۲۰۲۲ شبیه‌سازی شده
Table 7. Area (square kilometers) in actual 2022 and simulated 2022

۲۰۲۲ شبیه‌سازی Simulation 2022	۲۰۲۲ واقعی Real 2022	کلاس کاربری/ سال User class/year
8.90	9.09	پوشش گیاهی Vegetation
9.20	9.41	مسکونی Residential



شکل ۵- نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان سال ۲۰۲۲ (با بزرگ‌نمایی مناطق اصلی)
Figure 5. The land use prediction map of the Nahbandan watershed in 2022 (with the enlargement of main areas)



شکل ۶- مقایسه نقشه طبقه‌بندی شده کاربری اراضی سال۲۰۲۲ با نقشه شبیه‌سازی شده سال ۲۰۲۲
Figure 6. A comparison of the classified land use map of 2022 with the simulated map of 2022

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

جدول ۸- درصد احتمال تغییر درکاربری‌های حوضه آبخیز نهبندان تا سال ۲۰۴۰ با استفاده مدل زنجیره‌های مارکوف (کیلومتر مربع)

Table 8. Percentage probability of changes in the uses of the Nehbandan watershed by 2040 using the Markov chain model (square kilometers)

کلاس کاربری اراضی Land use class	پوشش گیاهی Vegetation	مسکونی Residential	بایر Barren
پوشش گیاهی Vegetation	0.1648	0.0148	0.8204
مسکونی Residential	0.275	0.4519	0.5206
بایر Barren	0.0805	0.0820	0.8375

جدول ۹- تغییرات مورد انتظار از لحاظ تعداد سلول بین سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲

Table 9. Expected changes in cell numbers between 2013 and 2022

کلاس کاربری اراضی Land use class	پوشش گیاهی Vegetation	مسکونی Residential	بایر Barren
پوشش گیاهی Vegetation	1164	149	8252
مسکونی Residential	284	4672	5382
بایر Barren	104233	106141	1084014

شبیه‌سازی روند تغییرات کاربری اراضی برای سال‌های آتی با استفاده از شبکه خودکار مارکوف

افق پیش‌بینی در این تحقیق سال ۲۰۴۰ (۲۰۴۰ شمسی) انتخاب شده است. ابتدا، با تحلیل و مقایسه کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲، و با بهره‌گیری از روش‌های زنجیره مارکوف و مدل اتوماسیون سلولی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات در کاربری‌ها در محیط نرم‌افزار Idrisi Terset برای سال‌های آتی انجام شدند. به این منظور، دستورات Markov و CA-Markov در سربرگ Change/Time series اجرا شدند تا تغییرات کاربری اراضی برای ۲۰ سال آینده مورد بررسی قرار گیرند. با استفاده از نتایج مدل مارکوف برای سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳، مدل پیش‌بینی برای سال ۲۰۲۲ با استفاده از دستور CA-Markov در نرم‌افزار Terset Idrisi ایجاد شد. سپس با مقایسه نقشه پیش‌بینی شده و نقشه طبقه‌بندی شده در سال ۲۰۲۲، دقت کار ارزیابی گردید.

در مرحله بعدی، پیش‌بینی و مدل‌سازی نقشه کاربری اراضی در سال ۲۰۴۰ انجام گرفت. برای این منظور، از تصاویر سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳ برای سال ۲۰۲۲، و سپس از تصاویر سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ برای پیش‌بینی سال ۲۰۴۰ استفاده شد. این مراحل با استفاده از شبکه سلول‌های خودکار اجرا شدند، که شامل سه داده ورودی اصلی است: نقشه طبقه‌بندی شده کاربری اراضی سال پایه (که برای سال ۲۰۲۲، سال ۲۰۰۸ و برای سال ۲۰۴۰ سال ۲۰۱۳ هستند)، ماتریس تغییرات مارکوف، و نقشه ارزش‌گذاری شده. دلیل ساخت این نقشه‌ها این است که بر اساس مفهوم روش اتوماتای سلولی، احتمال تغییرات در سلول‌های همسایه‌ی حاشیه‌ی هر کاربری امتیاز بالاتری دارد. در نهایت، یک بار با استفاده از تصاویر ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳ سال ۲۰۲۲ سپس با استفاده از تصاویر ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ نقشه‌ی پیش‌بینی سال ۲۰۴۰ مدل‌سازی شد. نتایج پیش‌بینی مساحت و درصد کاربری‌ها در سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات در میزان مساحت پوشش گیاهی خواهد بود. همچنین، کاربری مسکونی تغییرات افزایشی و نواحی بایر تغییرات کاهشی کمی را خواهند داشت (جدول ۱۰).

با توجه به روند تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان (شکل ۸)، انتظار افزایش پوشش گیاهی مربوط به کاربری کشاورزی و در عین حال افزایش محدود مناطق مسکونی تا سال ۲۰۴۰ در آینده وجود دارد. اگرچه کاربری مسکونی نیز گسترش می‌یابد، اما سرعت رشد کاربری کشاورزی بیشتر است. این موضوع بیشتر به علت این است که شهرستان نهبندان در این حوضه آبخیز از لحاظ جمعیتی و مساحتی کوچک است، شغل اکثر مردم کشاورزی است و رشد شهرستان همراه با رشد کاربری کشاورزی که شغل اکثر مردم است، همراه خواهد بود. این روند در مورد شهرهای بزرگ مانند مراکز استان ها برعکس است و افزایش کاربری بیشتر در نوع مسکونی است. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، در تطابق با برخی از پژوهش‌های اجرا شده همچون مطالعات انجام شده توسط مطالعات و (Hamad *et al*., 2018؛ Kiani Salmi, 2018) برای مدل CA_Markov و همچنین مطالعات (Sadian & Sedighi & Amini, 2020؛ Shafizadeh-Moghadam, 2021) برای الگوریتم جنگل تصادفی، تأیید می‌کنند که این مدل‌ها به‌عنوان ابزارهای موفق در جهت آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی شناخته می‌شوند.

بررسی مطالعات داخلی و بین‌المللی نیز نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم جنگل تصادفی (RF) با مدل CA-Markov، رویکردی مؤثر برای آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی محسوب می‌شود (Ahmadi *et al*., 2025، Tahir *et al*., 2025,). علاوه بر این، مدل‌های هیبریدی مانند CA-MC-ANN یا MC-MLP-CA که در برخی پژوهش‌ها استفاده شده‌اند، دقت بالاتری نسبت به مدل‌های منفرد ارائه داده‌اند و نشان می‌دهند که تلفیق چند الگوریتم یادگیری ماشین با مدل‌های دینامیک مکانی می‌تواند به افزایش قابلیت پیش‌بینی و تحلیل جامع‌تر منجر شود.

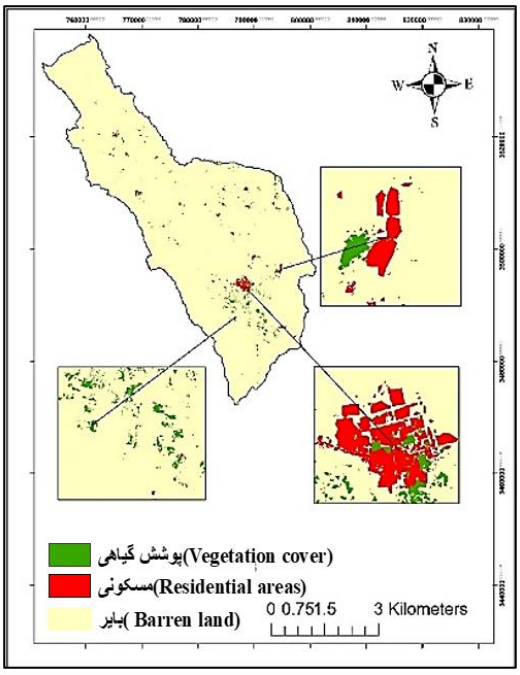
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

جدول ۱۰- پیش‌بینی مساحت و درصد کاربری‌ها در سال ۲۰۴۰

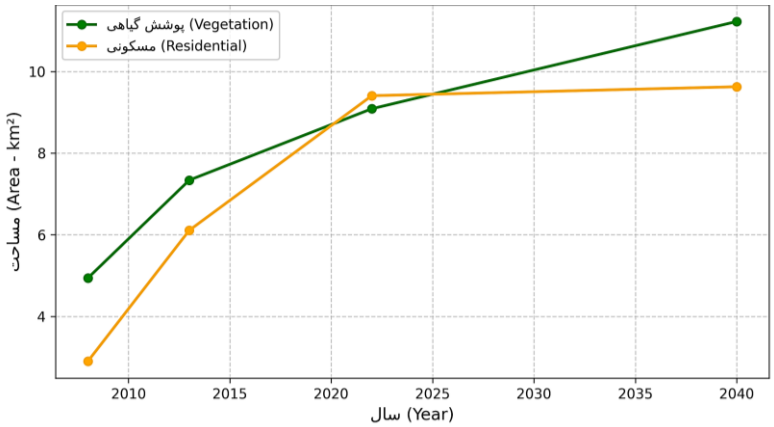
Table 10. Forecasting the area and percentage of land uses in 2040

درصد Percentage	کیلومترمربع Square kilometer	کلاس کاربری اراضی Land use class
0.95	11.23	پوشش گیاهی Vegetation
0.81	9.63	مسکونی Residential
98.2	1162.41	بایر Barren
100	1183.27	کل Total



شکل ۷- نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان سال ۲۰۴۰ (با بزرگنمایی مناطق اصلی)

Figure 7. The land use prediction map of the Nahbandan watershed in 2040 (with the enlargement of main areas)



شکل ۸- روند تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز نهبندان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۴۰

Figure 8. The trend of land use changes in the Nahbandan watershed from 2008 to 2040

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

نتیجه‌گیری کلی

تهیه نقشه کاربری و پوشش اراضی از نیازهای اساسی برای مدیریت و نظارت محیط زیستی است. شناخت الگوی این تغییرات و پیش‌بینی روند آتی، نقشی کلیدی را در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار سرزمین ایفا می‌کند. تهیه‌ی نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی از اهداف مهم و اساسی در تفسیر داده‌های سنجش از دور محسوب می‌شود که معمولاً از طریق طبقه‌بندی داده‌های سنجش از دور با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده و نظارت نشده و با ترکیبی از آن ها ایجاد می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اهمیت بررسی تغییرات کاربری اراضی دوچندان افزایش می‌یابد، چرا که این مناطق به لحاظ شکنندگی بوم‌شناختی و حساسیت به تغییرات انسانی و اقلیمی آسیب‌پذیری بیشتری دارند.

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز نهبندان (۲۰۰۸–۲۰۲۲) از الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی و در ادامه از مدل CA-Makov جهت پیش‌بینی کاربری اراضی در افق زمانی ۲۰۴۰ استفاده شد. این روش‌ها امکان تحلیل دقیق و کاملی از تغییرات در پوشش گیاهی، مناطق مسکونی و نواحی بایر را فراهم کرده‌اند. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، به‌عنوان یک ابزار ارزشمند برای مدیران شهری و محیط زیستی در فرایند تصمیم‌گیری برای مدیریت بهینه و پایدار مناطق، خدمات، و فعالیت‌های شهری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. دقت نسبتاً بالای مدل جنگل تصادفی برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای تأییدی بر مطالعات بین‌المللی است که این روش را یکی از کاراترین روش‌ها برای تفکیک پوشش‌های متنوع زمین دانسته‌اند (Belgiu & Drăguţ, 2016). مدل CA-Markov نیز به‌عنوان ابزاری معتبر در پیش‌بینی روند تغییرات کاربری شناخته می‌شود و ترکیب این دو ابزار باعث افزایش قابلیت اطمینان نتایج نهایی شده است.

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهند که تحلیل تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز نهبندان با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای نظیر جنگل تصادفی و CA-Markov امکان‌پذیر و دقیق است. پایش دقیق این تغییرات از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۲، با توجه به کاربری‌های پوشش گیاهی و مسکونی بادقت ۹۰ درصدی (کاربری پوشش گیاهی و مسکونی به ترتیب ۵ /۴ و ۶/۵۱ کیلومترمربع تغییرات داشت) انجام شد. این نتایج، اعتبار ابزارها و روش‌های مورداستفاده از جمله الگوریتم جنگل تصادفی را برای آشکارسازی دقیق تغییرات کاربری اراضی در طول زمان تأیید می‌کنند .

همچنین، پیش‌بینی تغییرات آینده در کاربری‌های اراضی در سال ۲۰۴۰ (به‌ترتیب ۱۱/۲۳ و ۹/۶۳ کیلومترمربع برای پوشش گیاهی و مسکونی) است. افزایش سطح کاربری مسکونی در جهت پرشدگی درون کاربری فعلی خواهد بود تا بزرگ شدن و توسعه شهر از سمت حاشیه شهر. افزایش در سطح پوشش گیاهی که توسط شاخص ndvi محاسبه شده است، مربوط به افزایش سطح کاربری کشاورزی است که خود یک پدیده انسان ساخت است. با توجه به خشکسالی‌های اخیر، وضعیت بارشی و منابع آب زیرزمینی منطقه وضعیت کاهشی داشته‌اند اما به‌دلیل افزایش جمعیت و این که منطقه مورد مطالعه در یک شهرستان کوچک است که شغل اکثر افراد کشاورزی و دامداری است. همزمان با رشد جمعیت و رشد زمین‌های کشاورزی (به علت شغل اکثر مردم) منجر به افزایش فشار از طریق برداشت بیش از حد از چاه‌ها و آب‌های زیرزمینی منطقه شده است. این افزایش پوشش گیاهی یک پدیده مثبت نیست زیرا در پوشش‌های سبز طبیعی که دارای خدمات اکوسیستم بالایی هستند نیست، بلکه با توجه به شرایط منطقه باعث فرونشست زمین و فرسایش بیشتر خاک نیز می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده نه‌تنها توانمندی این ابزارها را در مدل‌سازی مکان و تحلیل دقیق تغییرات کاربری اراضی نشان می‌دهند بلکه این توانمندی به مسئولین محیط زیست و شهری کمک می‌کند تا بهترین تصمیمات ممکن را برای مدیریت مناسب اراضی در آینده اخذ کنند و بر ضرورت سیاست‌گذاری و مدیریت جامع برای کاهش پیامدهای منفی تغییرات کاربری اراضی در منطقه تأکید دارند.

References

Adam, E., Mutanga, O., Odindi, J., & Abdel-Rahman, E. M. (2014). Land-use/cover classification in a heterogeneous coastal landscape using RapidEye imagery: evaluating the performance of random forest and support vector machines classifiers. *International Journal of Remote Sensing, 35*(10), 3440-3458.

Arekhi, S., & Momeni Taramsari, M. (2015). Envi 5 software video tutorial. First edition, Golestan University Press. 526 pp. [In Persian]

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.

Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114*, 24-31.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*, 5-32.

Dastigerdi, M., Nadi, M., Shamgani Mashhadi, B., Hatamipour, M., & Mahdavi amrei, O. (2024). Analysis of Vegetation Trend in Mazandaran Province with an Emphasis on Land Use Changes Using MODIS NDVI Time Series. *Journal of Watershed Management Research*. *15*(2), 105-118. [In Persian]

Dewan, A. M., & Yamaguchi, Y. (2009). Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography, 29*(3), 390-401.

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).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2018). Predicting Land Use/Land Cover Changes Using a CA-Markov Model under Two Different Scenarios. *Sustainability*, *10*(10), 3421.

Kamali, J. (2009). Investigating land use changes in the Qori Gol wetland area by processing satellite images, Master's thesis. University of Tabriz. [In Persian]

Khosraviaqdam, K., Momtaz, H. R., & Asadzadeh, F. (2019). Estimation of Soil erodibility factor of USLE model and its relationship with landscape features in some parts of Nazzlo-Chay basin, Iran. *Applied Soil Research, 7*(1), 31-43.

Kiani Salmi, E., & Ebrahimi, A. (2018). Evaluating land cover changes in Shahrekord and predicting its future using remote sensing data and CA-Markov model. *Spatial Planning,* 8(1), 71-87. [In Persian]

Knorn, J., Rabe, A., Radeloff, V. C., Kuemmerle, T., Kozak, J., & Hostert, P. (2009). Land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring Landsat satellite images. *Remote Sensing of Environment, 113*(5), 957-964.

Liu, T., & Yang, X. (2015). Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, GIS and landscape metrics. *Applied Geography, 56*, 42-54.

Mas, J.-F., Kolb, M., Paegelow, M., Olmedo, M. T. C., & Houet, T. (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software, 51*, 94-111.

Matsushita, B., Xu, M., & Fukushima, T. (2006). Characterizing the changes in landscape structure in the Lake Kasumigaura Basin, Japan using a high-quality GIS dataset. *Landscape and Urban Planning, 78*(3), 241-250.

Memarian, H., Balasundram, S. K., Talib, J. B., Sung, C. T. B., Sood, A. M., & Abbaspour, K. (2012). Validation of CA-Markov for simulation of land use and cover change in the Langat Basin, Malaysia. *Journal of Geographic Information System,* 4(6), 542.

Meteorological Organization, S. K. (2016). Reports of Nehbandan Meteorological Station from 1988 to 2011. Office of Meteorological Experts and Studies, Birjand County. [In Persian]

Mir Alizadehfard, S.R. and S.M. Alibakhshi. 2016. Monitoring and forecasting of land use change by applying Markov chain model and land change modeler (Case study: Dehloran Bartash plains, Ilam). *Journal of RS and GIS in Natural Resources,* 7(2), 33-45. [In Persian]

Nehzak, H. K., Aghaei, M., Mostafazadeh, R., & Rabiei-Dastjerdi, H. (2022). Evaluation of land use change predictions using CA-Markov model and management scenarios. *In Computers in Earth and Environmental Sciences*, 105-115.

Ruigar, H., Emamgholizadeh, S., Gharechelou, S., & Golian, S. (2024). The Effect of Climate Change and Future Land Use Using the CA-Markov Model on the Streamflow of the Talar River in Mazandaran Province. *Journal of Watershed Management Research*. *15*(2), 89-104.

Roy, K. C., Soren, D. D. L., & Biswas, B. (2024). Land-use/cover change and future prediction by integrating the ML techniques of random forest and CA-Markov chain model of the Ganges alluvial tract of Eastern India. *Environment, Development and Sustainability*, 1-28.

Sadeghi, V., Ebadi, H., & Ahmadi, F. F. (2013). A new model for automatic normalization of multitemporal satellite images using Artificial Neural Network and mathematical methods. *Applied Mathematical Modelling, 37*(9), 6437-6445.

Sadian, A., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2021). Investigation of Land Use Changes in Karkheh Watershed during 1990 and 2020 Using Google Earth Engine Platform and Landsat Satellite Images. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 52*(10), 2569-2580.

Sedighi, M., & Amini, A. S. (2020). Classification Lake Parishan water basin by random forest classification using Landsat satellite images. *Watershed Engineering and Management, 12*(3), 621-634.

Shirazi, M., Zehtabian, G., & Alavipanah, S. K. (2010). Applicability of IRS Satellite Images for Surveying Water, Soil and Vegetation Cover Condition of Najm Abad Region, Savojbolagh. *Journal of Natural Environment, 63*(1), 33-51.

Smits, P., Dellepiane, S., & Schowengerdt, R. (1999). Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: A review and a proposal for a cost-based approach. *International Journal of Remote Sensing, 20*(8), 1461-1486.

Surabuddin Mondal, M., Sharma, N., Kappas, M., & Garg, P. K. (2013). Modeling of spatio-temporal dynamics of land use and land cover in a part of Brahmaputra River basin using Geoinformatic techniques. *Geocarto International, 28*(7), 632-656.

Palmate, S. S., Wagner, P. D., Fohrer, N., & Pandey, A. (2022). Assessment of uncertainties in modelling land use change with an integrated cellular automata–Markov chain model. *Environmental Modeling & Assessment*, 1-19.

Tahir, Z., Haseeb, M., Mahmood, S. A., Batool, S., Abdullah-Al-Wadud, M., Ullah, S., & Tariq, A. (2025). Predicting land use and land cover changes for sustainable land management using CA-Markov modelling and GIS techniques. *Scientific Reports*, *15*(1), 3271.

Tewolde, M. G., & Cabral, P. (2011). Urban sprawl analysis and modeling in Asmara, Eritrea. *Remote Sensing, 3*(10), 2148-2165.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]

Tikuye, B. G., Rusnak, M., Manjunatha, B. R., & Jose, J. (2023). Land use and land cover change detection using the random forest approach: the case of the upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Global Challenges, 7*(10), 2300155.

Vafaei, S., Darvishsefat, A., & Pir Bavaghar, M. (2013). Monitoring and predicting land use changes using LCM module (Case study: Marivan region). *Iranian Journal of Forest*, 5(3), 323-336.

Weng, Q. (2002). Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modeling, *Journal of Environmental Management* 64, 273-284.

Zhang, Z., Hörmann, G., Huang, J., & Fohrer, N. (2023). A random forest-based CA-Markov model to examine the dynamics of land use/cover change aided with remote sensing and GIS. *Remote Sensing*, 15(8), 2128.

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.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1321]