



Spatio-temporal Analysis and Prediction of Land Use and Land Cover Change Dynamics in the Kashafrud River Basin

Behnaz Sheikh¹ , Masoud Minaei² ✉, Seyed Reza Hosseinzadeh³ , Abbasali Dadashi Roudbari⁴
, Masoud Irannezhad⁵ , Mehmet Fatih Döker⁶

1. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Email: behnaz.sheikh@alumni.um.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Email: m.minaei@um.ac.ir

3. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Email: srhosseinzadeh@um.ac.ir

4. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Email: a-dadashi@um.ac.ir

5. Water, Energy and Environmental Engineering Research Unit, Faculty of Technology, University of Oulu, Oulu, Finland

Email: masoud.irannezhad@oulu.fi

6. Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Sakarya University, Sakarya, Türkiye

Email: fdoker@sakarya.edu.tr

ARTICLE INFO

Article type:

Research Paper

Article History:

Received:

6 July 2025

Received in revised form:

10 October 2025

Accepted:

19 November 2025

Available online:

23 December 2025

Keywords:

Land Use/Land Cover Change,
Kashafrud River Basin,
Support Vector Machine,
Markov Chain,
Cellular Automata.

ABSTRACT

Land use and Land cover (LULC) changes play a crucial role in the environmental dynamics and natural resource sustainability of arid and semi-arid regions. Driven by both natural and anthropogenic factors, these changes lead to alterations in ecosystem structure and function. In this study, past changes and future dynamics of LULC in the Kashafrud River Basin were analyzed and projected using a hybrid SVM–CA–Markov modeling approach. LULC maps extracted from GlobeLand30 data for the years 2000, 2010, and 2020 were classified into six categories: agricultural lands, forests, grasslands and shrublands, water bodies and wetlands, built-up areas, and barren lands. Transition probabilities among land cover classes were estimated using the Markov Chain model, while change potential maps were generated utilizing the Support Vector Machine (SVM) algorithm based on driving factors. Subsequently, the Cellular Automata–Markov (CA–Markov) model was employed to simulate spatial patterns and predict LULC distribution for the year 2037. Model validation demonstrated high accuracy, yielding a Kappa coefficient of 0.88 and an Area Under the Curve (AUC) of 0.946. The results indicate an expansion of agricultural lands and built-up areas coupled with a decline in natural land covers, particularly forests, throughout the study period; future projections confirm the continuation of this trend. These findings underscore the necessity for integrated land-use planning and sustainable natural resource management in the Kashafrud River Basin to mitigate environmental degradation and ensure ecological sustainability.

Citation: Sheikh, B., Minaei, M., Hosseinzadeh, S. R., Dadashi Roudbari, A., Irannezhad, M., & Fatih Döker, M. (2025). Spatio-temporal Analysis and Prediction of Land Use and Land Cover Change Dynamics in the Kashafrud River Basin. *Journal of Geography and Spatial Development*, 2 (4), 37-54.

<http://doi.org/10.22098/gsd.2026.19264.1112>



© The Author (s)

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

Extended Abstract

Introduction

Land Use and Land Cover (LULC) change, driven by natural processes and anthropogenic activities, serves as a primary indicator of environmental transformation, threatening sustainability by fundamentally altering ecosystem structure. These impacts are intensified in arid and semi-arid regions with limited resource availability, where ecological vulnerability is inherently high. Analyzing the spatio-temporal dynamics of LULC provides essential insights into past landscape transformations and supports the prediction of future land-use scenarios. Such analyses contribute to improved land-use planning and sustainable management of natural resources. Advances in remote sensing technologies and Geographic Information Systems (GIS) have considerably enhanced monitoring capabilities. These tools now enable more accurate modeling of land-use dynamics. Among available modeling approaches, Cellular Automata–Markov (CA–Markov) models have been widely applied to simulate spatial and temporal patterns of LULC change. However, incorporating machine learning techniques can further improve simulation accuracy and spatial realism. The Support Vector Machine (SVM) algorithm has demonstrated strong capability in modeling nonlinear relationships between land-use changes and their driving factors and in generating reliable transition potential maps. The Kashafrud River Basin in northeastern Iran is an environmentally sensitive region characterized by an arid and semi-arid climate, intensive land-use pressures, and its strategic importance for regional water supply. Despite numerous studies conducted within the Mashhad metropolitan area, comprehensive analyses at the basin scale remain scarce. Therefore, the objective of this study is to analyze spatio-temporal LULC dynamics in the Kashafrud River Basin and to simulate future land-use patterns using an integrated SVM–CA–Markov modeling framework.

Methodology

Land Use/Land Cover changes within the Kashafrud River Basin were analyzed utilizing GlobeLand30 datasets for 2000, 2010, and 2020 with a spatial resolution of 30m. The datasets were reclassified into six major land-use categories, including agricultural lands, forests, grasslands and shrublands, water bodies and wetlands, built-up areas, and barren lands. Transition probabilities between land-use classes were estimated using the Markov chain module in the TerrSet software. Transition potential maps were generated using the SVM algorithm based on the selected driving variables, including distance to power transmission lines, distance to main roads, distance to rivers, slope, elevation, distance to industrial areas, and distance to faults. A total of 3,000 stratified random samples were used for model calibration and validation, and model parameters were optimized using the Radial Basis Function (RBF) kernel to enhance classification performance. Future land-use patterns were simulated using the CA–Markov model with a 5×5 neighborhood configuration. Model accuracy was assessed by comparing the simulated 2020 LULC map with the observed map using the Kappa coefficient and the Area Under the Curve (AUC). After validation, land-use patterns were projected for the year 2037.

Results and Discussion

The results of land use and land cover change analysis indicated that the Kashafrud River Basin experienced considerable transformations during the period from 2000 to 2020. All through this period, agricultural lands and built-up areas showed increasing trends, whereas natural land covers, particularly forests, as well as grasslands and shrublands, exhibited decreasing trends. This pattern reflects the increasing pressure of human activities on the natural resources of the basin. Model validation results indicated that the hybrid SVM–CA–Markov framework achieved high simulation accuracy. The Kappa coefficient reached 0.88 and the AUC value was 0.946, demonstrating strong agreement between simulated and observed land-use

patterns. Simulation results suggest that built-up areas will expand significantly by 2037, increasing from approximately 388 km² in 2020 to more than 766 km². This expansion reflects rapid urban growth and infrastructure development within the basin, particularly in areas influenced by the Mashhad metropolitan region. Agricultural lands are projected to increase from approximately 4,448 km² to about 5,850 km², primarily through the conversion of barren lands into cultivated areas. Conversely, barren lands are expected to decrease from approximately 11,166 km² to about 9,494 km². Natural land covers are projected to decline further. Forest areas are expected to decrease from approximately 330 km² in 2020 to about 253 km² in 2037, while grasslands and shrublands are also predicted to follow a decreasing trend. These projected changes indicate that continuation of current land-use trajectories may increase pressure on soil and water resources, reduce infiltration capacity, increase surface runoff, and accelerate soil erosion processes. Moreover, degradation of natural vegetation may result in biodiversity loss and reduced ecological resilience across the basin.

Conclusion

The results indicate that the Kashafrud River Basin has undergone substantial land-use transformations over recent decades, largely driven by the expansion of agricultural and built-up areas and the decline of natural land covers. Future projections suggest that these trends are likely to continue, potentially threatening the ecological sustainability of the basin. The hybrid SVM-CA-Markov model demonstrated reliable performance in simulating LULC dynamics and successfully reproduced spatial patterns with high accuracy. Integration of machine learning techniques with spatio-temporal modeling approaches improved prediction capability and enhanced the robustness of simulation results. The findings provide a scientific basis for land-use planning and natural resource management in the Kashafrud River Basin. Application of the modeling results in urban development policies, water resource management

strategies, and conservation programs can contribute to sustainable development in the region.

Funding

This research was financially supported by Ferdowsi University of Mashhad (Dr. Ali Shariati Faculty of Letters and Humanities) under Grant No. 61287. This funding included a thesis grant for the first author and financial support for the co-authors.

Authors' Contribution

The authors' contributions to this research are as follows:

The first author was responsible for conceptualization, methodological design, data collection and analysis, drafting the manuscript, and final editing.

The second, third, and sixth authors provided supervision of the research, validation of findings, critical review of the content, and approval of the final version.

The fourth author contributed to the development of the theoretical framework and structural editing; and the fifth author participated in preparing the analysis, discussion, and conclusion sections.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



تحلیل و پیش‌بینی پویایی‌های فضایی-زمانی تغییرات کاربری و پوشش اراضی در حوضه آبریز رودخانه کشف رود

بهناز شیخ^۱، مسعود مینائی^۲✉، سید رضا حسین‌زاده^۳، عباسعلی داداشی رودباری^۴، مسعود ایران‌نژاد^۵،
محمت فاتح دوکر^۶

- ۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: behnaz.sheikh@alumni.um.ac.ir
- ۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: m.minaei@um.ac.ir
- ۳- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: srhosseinzadeh@um.ac.ir
- ۴- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: a-dadashi@um.ac.ir
- ۵- واحد تحقیقات مهندسی آب، انرژی و محیط‌زیست، دانشکده فناوری، دانشگاه اولو، اولو، فنلاند. رایانامه: masoud.irannezhad@oulu.fi
- ۶- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه ساکاریا، ساکاریا، ترکیه. رایانامه: fdoker@sakarya.edu.tr

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تغییرات کاربری و پوشش اراضی نقش مهمی در تحولات زیست‌محیطی و پایداری منابع طبیعی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کنند. این تغییرات تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی، موجب دگرگونی در ساختار و عملکرد اکوسیستم می‌شوند. در این پژوهش، تغییرات گذشته و پویایی‌های آینده کاربری و پوشش اراضی در حوضه آبریز رودخانه کشف رود با استفاده از رویکرد مدل‌سازی ترکیبی SVM-CA-Markov تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی شد. نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی استخراج‌شده از داده‌های GlobeLand30 برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ در شش طبقه اراضی کشاورزی، جنگل، مرتع و بوته‌زار، پهنه‌های آبی و تالاب‌ها، انسان‌ساخت و سایر دسته‌بندی شدند. احتمالات انتقال بین طبقات پوشش زمین با استفاده از مدل زنجیره مارکوف برآورد گردید و نقشه‌های پتانسیل تغییر با بهره‌گیری از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان بر اساس عوامل محرک تهیه شد. سپس مدل سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف برای شبیه‌سازی الگوهای فضایی و پیش‌بینی توزیع کاربری و پوشش اراضی در سال ۲۰۳۷ به کار رفت. ارزیابی مدل دقت بالایی را با ضریب کاپای ۰/۸۸ و سطح زیر منحنی ۰/۹۴۶ نشان داد. نتایج نشان‌دهنده گسترش اراضی کشاورزی و مناطق انسان‌ساخت و کاهش پوشش‌های طبیعی، به‌ویژه جنگل‌ها، در طول دوره مطالعه هستند و پیش‌بینی‌های آینده تداوم این روند را تأیید می‌کنند. این یافته‌ها بر ضرورت برنامه‌ریزی یکپارچه کاربری زمین و مدیریت پایدار منابع طبیعی در حوضه کشف رود به‌منظور کاهش تخریب زیست‌محیطی و تضمین پایداری اکولوژیکی تأکید دارند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸	
تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲	
واژگان کلیدی: تغییرات کاربری/پوشش اراضی، حوضه آبریز رودخانه کشف رود، ماشین بردار پشتیبان، زنجیره مارکوف، سلول‌های خودکار.	
استناد: شیخ، بهناز؛ مینائی، مسعود؛ حسین‌زاده، سیدرضا؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ ایران‌نژاد، مسعود و فاتح دوکر، محمت. (۱۴۰۴). تحلیل و پیش‌بینی پویایی‌های فضایی-زمانی تغییرات کاربری و پوشش اراضی در حوضه آبریز رودخانه کشف رود. <i>مجله جغرافیا و توسعه فضایی</i> ، ۳۷(۴)، ۵۴-۳۷.	

<http://doi.org/10.22098/gsd.2026.19264.1112>

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان



مقدمه

مطالعات تغییرات پوشش اراضی/کاربری اراضی (LCLU) به بخش ضروری برنامه‌های کنونی برای مدیریت محیط‌زیست و منابع طبیعی در سراسر جهان، اعم از سازمان‌های ملی و محلی، تبدیل شده است (Minaei & Kainz, 2016). تغییرات کاربری و پوشش زمین^۱ به دگرگونی‌هایی اطلاق می‌شود که در اثر تعامل عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی در سطح زمین رخ می‌دهند (Hu et al., 2023). این تغییرات بازتاب‌دهنده تحول در پوشش سطح زمین و شیوه‌های بهره‌برداری از منابع طبیعی بوده و بیانگر رابطه پیچیده میان فرآیندهای بیوفیزیکی و فشارهای انسانی هستند (Haseeb et al., 2024). کاهش پوشش گیاهی، تغییر الگوهای بهره‌برداری از اراضی، توسعه سکونتگاه‌ها و دگرگونی کاربری اراضی طبیعی از مهم‌ترین نمودهای این پدیده به شمار می‌روند (Athick & Shankar, 2019). چنین دگرگونی‌هایی پیامدهای قابل توجهی برای محیط‌زیست، تنوع زیستی و معیشت انسان دارند و می‌توانند منجر به کاهش کیفیت خدمات اکوسیستمی، افت توان تولیدی زمین و تهدید پایداری منابع طبیعی شوند (Zhu et al., 2022). در دهه‌های اخیر، در نتیجه رشد جمعیت، گسترش کشاورزی و شهری و کاهش پوشش جنگلی و مراتع، انواع مختلفی از تغییرات LCLU در سطحی گسترده در کشورهای در حال توسعه در حال وقوع است (Minaei & Kainz, 2016). این تغییرات پدیده‌ای پویا و چندعاملی هستند که تحت تأثیر شرایط اقلیمی، ویژگی‌های طبیعی، تحولات اقتصادی، ساختارهای اجتماعی و تصمیمات مدیریتی شکل می‌گیرند (Belay & Mengistu, 2021). اگرچه فعالیت‌های انسانی نقش غالبی دارند، اما عواملی نظیر تغییرات اقلیمی و ویژگی‌های بیوفیزیکی نیز می‌توانند روند و شدت دگرگونی‌ها را تعدیل یا تشدید کنند (Guarderas et al., 2022). بنابراین، تغییرات LULC به‌عنوان شاخص کلیدی برای سنجش تأثیر فعالیت‌های انسانی بر اکوسیستم‌های طبیعی شناخته می‌شود (Zhang et al., 2023). تحلیل فضایی-زمانی تغییرات LULC، دانشی اساسی برای درک روندهای گذشته، شناسایی الگوهای غالب و پیش‌بینی وضعیت‌های آینده فراهم می‌آورد و نقش مهمی در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی کاربری اراضی ایفا می‌کند (Roushangar et al., 2023).

در همین راستا، مدل‌سازی تغییرات LULC در مناطق خشک و نیمه‌خشک به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های سنجش‌ازدور تبدیل شده است؛ زیرا این مناطق به دلیل محدودیت منابع آب، حساسیت اکولوژیک بالا و فشارهای جمعیتی شدید، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر تغییرات کاربری زمین دارند. مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات LULC توسعه یافته‌اند که مدل‌های ترکیبی کمی-فضایی به دلیل توانایی هم‌زمان در برآورد مقدار تغییر و شبیه‌سازی الگوهای فضایی، کاربرد گسترده‌تری یافته‌اند (Hamad et al., 2018). مدل ترکیبی CA-Markov به‌عنوان یکی از کارآمدترین ابزارها در شبیه‌سازی تغییرات LULC شناخته می‌شود. این مدل با تلفیق زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار، توانایی بالایی در شبیه‌سازی هم‌زمان ابعاد زمانی و فضایی تغییرات دارد (F. Fu et al., 2022). افزون بر این، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین^۲ نیز به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی و افزایش دقت پیش‌بینی، نقش مؤثری در شناسایی روندهای تغییرات LULC ایفا می‌کنند (Omrani et al., 2017).

با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات متعددی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان انجام شده است. از جمله این مطالعات، در مناطق بیابانی پاکستان، (Asif et al., 2023) با استفاده از Random Forest و CA-Markov با دقت کلی بیش از ۸۷ نشان دادند که شهرنشینی و توسعه کشاورزی در حال گسترش به سمت نواحی حاشیه‌ای است. در

1. Land Use and Land Cover changes

2. Machine learning

شمال آفریقا، (Selmy et al., 2023) در مصر روند افزایش هم‌زمان مناطق شهری و اراضی کشاورزی و کاهش اراضی بیابانی را با استفاده از مدل‌های CA-Markov گزارش کردند. در شرق آفریقا (Leta et al., 2021) در حوضه نیل اتیوپی با مدل LCM و MLP، افزایش اراضی کشاورزی و کاهش پوشش‌های طبیعی را تا ۲۰۵۰ پیش‌بینی کردند (Girma et al., 2022) نیز در حوضه گیدابو افزایش اراضی کشاورزی و کاهش جنگل‌ها و مراتع را گزارش کردند. در شمال غرب چین، (Wang et al., 2021) با مدل‌های LR-CA-Markov و FLUS نشان دادند رشد اقتصادی و دسترسی به آب مهم‌ترین محرک‌های تغییرات کاربری زمین هستند (Wang et al., 2023) با مدل PLUS در حوضه شی‌یانگ، گسترش کاربری‌های شهری را در تمامی سناریوها گزارش کردند (Yonaba et al., 2021) در بورکینافاسو با MLP افزایش اراضی کشاورزی و کاهش پوشش طبیعی را پیش‌بینی کردند. از جمله مطالعاتی که در حوضه آبخیز کشف رود انجام شده یا بخشی آن را پوشش می‌دهد نیز، می‌توان به پژوهش (Minaei et al., 2018) اشاره نمود که الگوهای تخریب سرزمین و پویایی‌های پوشش اراضی در ایران را مطالعه نمودند. در پژوهشی دیگر، Shafizadeh-Moghadam et al. (۲۰۱۹) تغییرات کاربری اراضی در آسیا را ارزیابی نمودند. همچنین، Shafizadeh-Moghadam et al. (۲۰۲۲) گسترش شهری در کلان‌شهر مشهد را شبیه‌سازی نمودند. در پژوهشی دیگر، Aghajani et al. (۲۰۲۴) با CA-Markov و LCM در مشهد رشد پراکنده شهری و کاهش اراضی کشاورزی را پیش‌بینی کردند.

با وجود این مطالعات، در حوضه کشف‌رود تمرکز پژوهش‌ها عمدتاً بر محدوده شهری مشهد بوده و تحلیل یکپارچه در مقیاس کل حوضه آبریز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، رویکردهای مدل‌سازی موجود عمدتاً به مدل‌های متداول محدود شده و بهره‌گیری از چارچوب‌های ترکیبی پیشرفته مبتنی بر یادگیری ماشین در کنار مدل‌های پویای فضایی کمتر مشاهده می‌شود. در حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود، شناخت جامعی از روندهای فضایی-زمانی تغییرات LULC وجود ندارد. این حوضه به دلیل شرایط اقلیمی نیمه‌خشک، حساسیت اکولوژیکی و فشارهای فزاینده انسانی، در معرض دگرگونی‌های قابل توجه کاربری اراضی قرار دارد. در مناطق نیمه‌خشک، تغییرات اقلیمی و سیاست‌های مدیریتی می‌توانند منجر به تغییر الگوهای بهره‌برداری، کاهش پوشش‌های طبیعی و افزایش اراضی بایر شوند.

نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه و به‌کارگیری چارچوب یکپارچه SVM-CA-Markov در مقیاس کل حوضه آبریز کشف‌رود است. این رویکرد با تلفیق توانایی SVM در استخراج روابط غیرخطی پیچیده، قابلیت زنجیره مارکوف در تحلیل احتمالات انتقال زمانی و قدرت سلول‌های خودکار در بازنمایی پویایی فضایی و اثرات همسایگی، بستری منسجم برای شبیه‌سازی هم‌زمان تغییرات فضایی-زمانی فراهم می‌کند. تحلیل تغییرات در کل سیستم فضایی حوضه و با در نظر گرفتن تعاملات پیچیده بین اراضی شهری، روستایی، کشاورزی و طبیعی انجام شده است. این رویکرد حوضه مبنای ارائه تصویری جامع‌تر از دینامیک گسترش اراضی انسان‌ساخت و تغییرات اکوسیستمی را فراهم ساخته و می‌تواند مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی فضایی یکپارچه و مدیریت پایدار منابع در مقیاس منطقه‌ای باشد.

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر تحلیل فضایی-زمانی تغییرات LULC در حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود و شبیه‌سازی روندهای آینده آن با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، GIS و مدل ترکیبی SVM-CA-Markov است. این مطالعه با شناسایی الگوها و روندهای غالب تغییرات در گذشته و ارائه تصویری از وضعیت آتی، می‌تواند مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری مدیران منطقه‌ای فراهم آورد. بر این اساس، چارچوب پژوهش بر پاسخ‌گویی به پرسش‌های اساسی زیر استوار است:

۱) الگوها و روندهای فضایی-زمانی تغییرات LULC در حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود طی دوره زمانی مورد مطالعه چگونه بوده است؟

۲) مدل ترکیبی SVM-CA-Markov تا چه اندازه توانایی شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آینده LULC در این حوضه را دارد و این تغییرات چه پیامدهایی برای مدیریت پایدار سرزمین به همراه خواهد داشت؟ برای دستیابی به اهداف فوق، این پژوهش در ساختاری منسجم و گام‌به‌گام تدوین شده است. در ادامه، مبانی نظری پژوهش تشریح شده و منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود) از نظر ویژگی‌های اقلیمی، جغرافیایی و اکولوژیکی معرفی می‌گردد. سپس، در بخش روش‌شناسی، چارچوب مفهومی و مراحل کار از جمله شناسایی عوامل محرک تغییرات و طبقه‌بندی کاربری/پوشش اراضی منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش یافته‌ها به تحلیل فضایی-زمانی تغییرات کاربری اراضی در دوره تاریخی می‌پردازد. در ادامه، فرآیند شبیه‌سازی تغییرات کاربری/پوشش اراضی با استفاده از مدل ترکیبی پیشنهادی تشریح شده و صحت‌سنجی شبیه‌سازی برای اطمینان از دقت مدل ارائه می‌شود. بر این اساس، مدل‌سازی کاربری/پوشش اراضی سال ۲۰۳۷ به‌عنوان پیش‌بینی آینده اجرا و نتایج آن تحلیل می‌گردد. در نهایت، یافته‌های به‌دست‌آمده در بخش بحث با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه و تفسیر شده و در بخش نتیجه‌گیری، پیامدهای مدیریتی و پیشنهادهایی برای برنامه‌ریزی پایدار در حوضه آبریز ارائه می‌شود.

مبانی نظری

تغییرات کاربری و پوشش اراضی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در مقیاس جهانی به شمار می‌روند (Hussain et al., 2022; Islam et al., 2022; Syed et al., 2014). که پیامدهای گسترده‌ای بر منابع طبیعی، زیستگاه‌ها و تنوع زیستی برجای می‌گذارند (Becker et al., 2013; Bera et al., 2022; Khalil et al., 2022). این تغییرات عمدتاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نظیر شهرنشینی، گسترش کشاورزی فشرده و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی رخ می‌دهند، هرچند عوامل طبیعی نیز در شکل‌گیری و تشدید آن‌ها نقش دارند. در سامانه‌های حساس نظیر حوضه‌های آبریز، پویایی‌های کاربری اراضی می‌تواند پایداری منابع آب‌و خاک و عملکرد اکوسیستم‌ها را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهد (Fu et al., 2022; Haq et al., 2022). از این رو، پایش مستمر و پیش‌بینی دقیق روند تغییرات کاربری اراضی، به‌عنوان پیش‌نیاز اساسی برای مدیریت پایدار سرزمین و برنامه‌ریزی محیطی مطرح است (Haq et al., 2022). در دهه‌های اخیر، رویکردهای متعددی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تغییرات LULC توسعه‌یافته‌اند که امکان تحلیل هم‌زمان ابعاد فضایی و زمانی این پدیده را فراهم می‌سازند (Dammag et al., 2023; Kondum et al., 2024). در این میان، مدل‌های زنجیره مارکوف و اتوماتای سلولی^۱ (CA) از پرکاربردترین ابزارها در مطالعات LULC محسوب می‌شوند. مدل زنجیره مارکوف با تکیه بر ماتریس‌های احتمال انتقال، روندهای زمانی تغییرات را بر اساس مقایسه نقشه‌های کاربری در دوره‌های مختلف برآورد می‌کند و امکان پیش‌بینی کمی انتقال بین کلاس‌های کاربری را فراهم می‌سازد (Tahir et al., 2025). این مدل، به‌ویژه در تحلیل روندهای بلندمدت تغییرات، کاربرد گسترده‌ای یافته است. در مقابل، مدل اتوماتای سلولی بر بازنمایی پویایی‌های فضایی تمرکز دارد و با بهره‌گیری از قواعد همسایگی، الگوی گسترش مکانی کاربری‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. در این چارچوب، وضعیت هر سلول تحت تأثیر ویژگی‌های ذاتی آن و شرایط سلول‌های مجاور قرار می‌گیرد؛ از این رو، مدل‌های CA قادرند ساختار فضایی و الگوهای خوشه‌بندی تغییرات را در مقیاس‌های مختلف بازنمایی کنند (Dammag et al., 2023). به‌منظور ارتقای دقت پیش‌بینی، ترکیب این دو رویکرد در قالب مدل CA-Markov توسعه‌یافته است. در این چارچوب، زنجیره مارکوف وظیفه برآورد کمی احتمالات انتقال را

بر عهده دارد، درحالی‌که اتوماتای سلولی نحوه توزیع فضایی این انتقالات را شبیه‌سازی می‌کند. این یکپارچگی، امکان بازنمایی هم‌زمان روندهای زمانی و الگوهای فضایی تغییرات را فراهم ساخته و نسبت به کاربرد منفرد هر یک از مدل‌ها، نتایج واقع‌گرایانه‌تری ارائه می‌دهد (Kondum et al., 2024). با توجه به آن‌که تغییرات کاربری اراضی اغلب تحت تأثیر روابط پیچیده و غیرخطی میان عوامل محیطی و انسانی رخ می‌دهند، بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در کنار مدل‌های فضایی-زمانی اهمیت فزاینده‌ای یافته است. در این میان، ماشین بردار پشتیبان به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط غیرخطی، مقاومت در برابر بیش برآزش و عملکرد مناسب در داده‌های ناهمگن، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات LULC یافته است (Boulaghi et al., 2023). استفاده از توابع کرنل، به‌ویژه کرنل پایه شعاعی (RBF)، امکان تفکیک بهتر کلاس‌ها و افزایش دقت طبقه‌بندی را فراهم می‌کند (Ghayour et al., 2021). با این حال، الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌تنهایی قادر به بازنمایی کامل پویایی‌های فضایی-زمانی تغییرات نیستند؛ از این رو، تلفیق آن‌ها با مدل‌های شبیه‌سازی فضایی نظیر CA-Markov می‌تواند دقت پیش‌بینی و قابلیت تعمیم نتایج را به‌طور معناداری افزایش دهد. در ارزیابی عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی تغییرات کاربری و پوشش زمین، استفاده از شاخص‌های دقت استاندارد ضروری است. شاخص کاپا (Kappa) یکی از مهم‌ترین معیارهای سنجش میزان توافق میان نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده یا شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مرجع است که اثر توافق تصادفی را حذف کرده و برآوردی واقع‌بینانه‌تر از دقت ارائه می‌دهد. مقادیر بالاتر کاپا بیانگر انطباق بیشتر و عملکرد مناسب‌تر مدل است. افزون بر آن، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده^۲ (ROC) و شاخص سطح زیر منحنی^۳ (AUC) نیز برای سنجش توان تفکیک مدل در شناسایی سلول‌های تغییریافته و تغییرنیافته به کار می‌روند (Li, 2024). مقادیر بالاتر AUC نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی بیشتر و کارایی مناسب‌تر مدل در بازنمایی الگوهای تغییر است (Bendib & Berghout, 2023). در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی، از نرم‌افزارهای تخصصی تحلیل فضایی برای پیاده‌سازی مدل‌ها و اعتبارسنجی نتایج استفاده می‌شود. این نرم‌افزارها با فراهم‌سازی ابزارهای پردازش، تحلیل فضایی و ارزیابی دقت، بستر مناسبی برای شبیه‌سازی و تحلیل پویایی‌های کاربری اراضی فراهم می‌آورند.

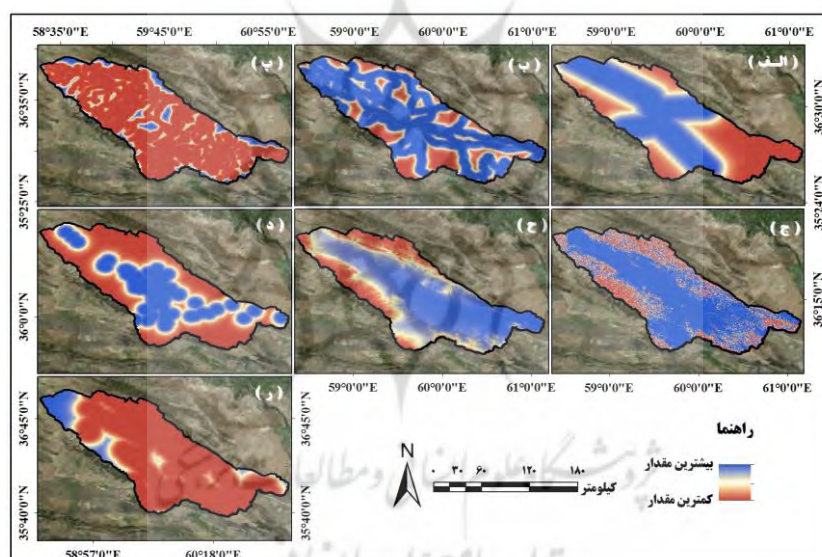
روش‌شناسی

در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی و تحلیل روند تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین در حوضه آبریز رودخانه کشف رود، از رویکرد یکپارچه SVM-CA-Markov بهره گرفته شد. این چارچوب ترکیبی با تلفیق تحلیل‌های آماری-زمانی (زنجیره مارکوف)، مدل‌سازی یادگیری ماشین (ماشین بردار پشتیبان) و شبیه‌سازی پویایی فضایی (سلول‌های خودکار)، امکان بازسازی الگوهای گذشته و پیش‌بینی الگوی گسترش آتی تغییرات کاربری را فراهم می‌سازد. در این راستا، داده‌های تاریخی کاربری و پوشش زمین به‌عنوان مبنای تحلیل و آموزش مدل مورد استفاده قرار گرفتند و پس از ارزیابی صحت مدل، سناریوی آینده برای سال ۲۰۳۷ شبیه‌سازی گردید. کلیه مراحل پردازش، مدل‌سازی و اعتبارسنجی در محیط نرم‌افزار TerrSet انجام شد.

1. Radial Basis Function
2. Receiver Operating Characteristic
3. Area Under Curve

عوامل محرک

به منظور مدل سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی، مجموعه ای از عوامل محیطی و زیرساختی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. این عوامل شامل ارتفاع (Hao et al., 2023)، شیب (Mhanna et al., 2023)، فاصله از رودخانه (Nacishali Nteranya et al., 2024)، فاصله از جاده های اصلی (Taiwo et al., 2023)، فاصله از گسل (Azizi et al., 2022)، فاصله از مراکز صنعتی (Karimov, 2023; Minaei et al., 2025) و فاصله از خطوط انتقال نیرو (Mahmoudzadeh et al., 2022) بودند (شکل ۱). هدف از انتخاب این متغیرها، تبیین نقش شرایط توپوگرافی، دسترسی و زیرساخت های انسانی در الگوی گسترش کاربری های مختلف به ویژه اراضی انسان ساخت بود. به منظور جلوگیری از تأثیر هم خطی بین متغیرهای ورودی بر عملکرد مدل، میزان همبستگی بین آن ها بررسی شد (Nacishali Nteranya et al., 2024). نتایج نشان داد که مقدار VIF^1 برای تمامی متغیرها کمتر از ۵ بوده و در نتیجه، هم خطی معناداری بین متغیرهای ورودی وجود ندارد. این امر بیانگر استقلال نسبی مناسب متغیرها و قابلیت استفاده آن ها در مدل ماشین بردار پشتیبان است. در گام بعد، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به منظور استخراج الگوهای تغییر کاربری از داده های تاریخی به کار گرفته شد و نقشه های پتانسیل تغییر برای هر کلاس کاربری تولید گردید. این نقشه ها احتمال وقوع تغییر در سطح سلول را نشان داده و به عنوان ورودی فضایی مدل CA-Markov مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۱. لایه های استاندارد شده مورد استفاده در فرایند مدل سازی تغییرات کاربری / پوشش اراضی

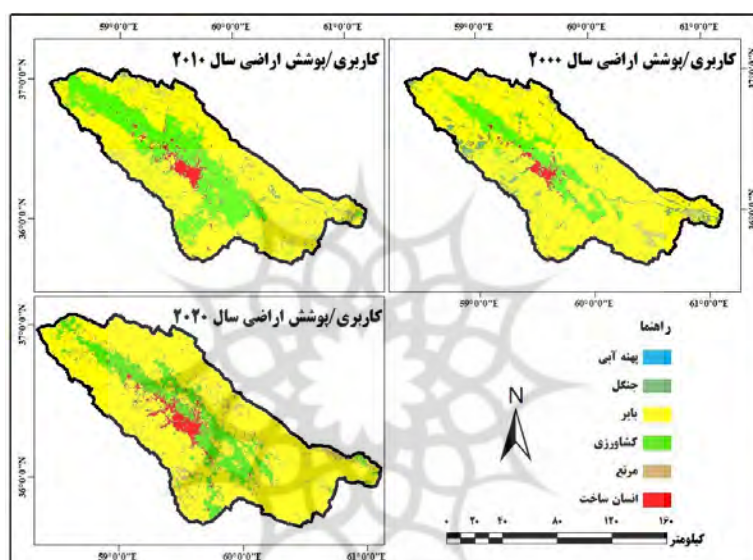
(الف: فاصله از خطوط انتقال نیرو، ب: فاصله از جاده های اصلی، پ: فاصله از رودخانه، ج: شیب، ح: ارتفاع، د: فاصله از مناطق صنعتی، ر: فاصله از گسل)

کاربری/پوشش اراضی منطقه

در این پژوهش، نقشه های کاربری اراضی و پوشش زمین برای سال های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ از پایگاه داده GlobeLand30 با تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج، باز طبقه بندی و هم مرجع سازی فضایی-زمانی شدند تا تحلیل تغییرات در دوره های متوالی امکان پذیر گردد (شکل ۴). این پایگاه داده به دلیل یکپارچگی زمانی، پوشش کامل منطقه و دقت طبقه بندی مناسب (حدود ۸۰ درصد) به عنوان مبنای تحلیل تغییرات و ورودی مدل شبیه سازی انتخاب شد؛ جزئیات آماری کلاس های کاربری نیز در جدول ۱ و شکل ۵ ارائه شده است. برای تحلیل روندهای زمانی تغییرات، مدل زنجیره

1. Value Inflation Factor

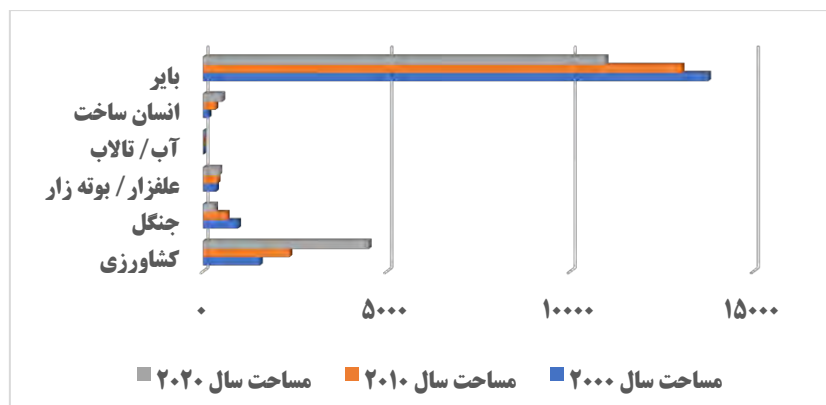
مارکوف در محیط TerrSet اجرا و ماتریس‌های احتمالات انتقال بین کلاس‌های کاربری برای دوره‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۰ و ۲۰۲۰-۲۰۳۰ محاسبه شد. این ماتریس‌ها احتمال تبدیل هر کلاس به سایر کلاس‌ها را بر اساس روند گذشته نشان می‌دهند و مستقل از الگوی توزیع فضایی تغییرات هستند. سپس با تلفیق این ماتریس‌ها و نقشه‌های تناسب حاصل از SVM، مدل CA-Markov برای بازتولید الگوی گسترش فضایی تغییرات بر اساس قواعد همسایگی سلولی اجرا شد. به‌منظور ارزیابی مدل، نقشه‌های کاربری سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ به‌عنوان ورودی استفاده و نقشه سال ۲۰۲۰ شبیه‌سازی شد. نقشه شبیه‌سازی‌شده با نقشه مشاهده‌ای ۲۰۲۰ مقایسه و دقت مدل با استفاده از منحنی ROC و شاخص مساحت زیر منحنی ارزیابی گردید که نتایج بیانگر توان مناسب مدل در تفکیک سلول‌های تغییریافته و تغییرنیافته بود. در نهایت، پس از تأیید عملکرد مدل، شبیه‌سازی کاربری و پوشش اراضی سال ۲۰۳۷ در حوضه آبریز کشف‌رود با استفاده از مدل SVM-CA-Markov انجام شد تا روند تغییرات و سیمای آتی حوضه تحلیل گردد.



شکل ۲. نقشه‌های کاربری / پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. اطلاعات مربوط به نقشه‌های کاربری/پوشش اراضی حوضه آبریز رودخانه کشف رود

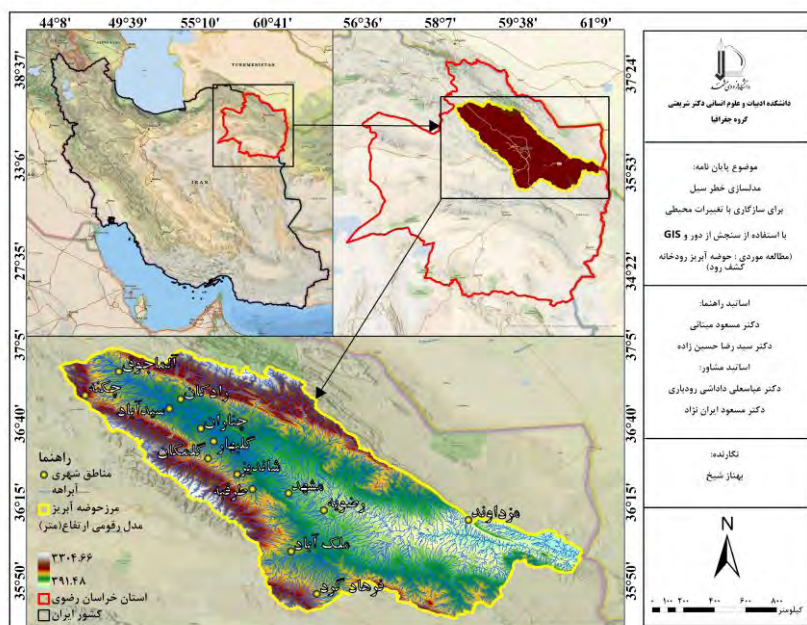
کاربری / پوشش اراضی	کاربری / پوشش اراضی ۲۰۰۰		کاربری / پوشش اراضی ۲۰۱۰		کاربری / پوشش اراضی ۲۰۲۰	
	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
کشاورزی	۱۵۴۸/۸۳	۹/۲۳	۳۳۵۰/۷۱	۱۴/۰۱	۴۵۱۰/۲۲	۲۶/۸۹
جنگل	۹۵۵/۵۶	۵/۷۰	۶۴۲/۹۹	۳/۸۳	۳۳۰/۴۳	۱/۹۷
علفزار / بوته‌زار	۳۵۲/۶۲	۲/۱۰	۳۹۷/۰۲	۲/۳۷	۴۴۱/۴۲	۲/۶۳
آب / تالاب	۲/۹۸	۰/۰۲	۵/۴۵	۰/۰۳	۷/۹۲	۰/۰۵
انسان‌ساخت	۱۵۰/۰۵	۰/۸۹	۳۳۶/۶۲	۲/۰۱	۵۲۳/۱۸	۳/۱۲
بایر	۱۳۷۶۴/۵۶	۸۲/۰۶	۱۳۰۴۱/۷۸	۷۷/۷۵	۱۰۹۶۱/۴۵	۶۵/۳۵



شکل ۳. روند تغییرات نقشه‌های کاربری/پوشش اراضی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود بخشی از حوضه قره‌قوم بوده و در شمال شرق ایران و استان خراسان رضوی واقع شده است. این حوضه شهرستان‌های مشهد، چناران، کلات، فریمان، بینالود، سرخس، تربت‌جام، درگز، قوچان و نیشابور را دربر می‌گیرد و مساحتی حدود ۱۶۷۴۵ کیلومترمربع دارد. محدوده جغرافیایی آن بین $35^{\circ}37'55''$ تا $37^{\circ}3'56''$ عرض شمالی و $58^{\circ}22'6''$ تا $61^{\circ}7'59''$ طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۴). رودخانه کشف‌رود با طول ۲۹۰ کیلومتر زهکش اصلی دشت مشهد است و تحت تأثیر بهره‌برداری سدهای گلستان، طرق، کارده و ارداک قرار دارد؛ به‌طوری‌که سرریز آن‌ها در برخی رخدادهای موجب تشدید سیلاب پایین‌دست شده است (Abedini & Pour Farrash Zadeh, 2021). ارتفاع حوضه از ۳۳۰۲ متر در ارتفاعات بینالود و هزار مسجد تا ۳۹۰ متر در دشت سرخس، شیب غرب به شرق و افزایش رواناب و فرسایش در بالادست و رسوب‌گذاری در پایین‌دست را ایجاد می‌کند. چهار زیر حوضه نریمانی، مشهد، آق‌دربند و سنگ‌بست ساختار مدیریتی حوضه را شکل می‌دهند و زیر حوضه مشهد بیشترین آسیب‌پذیری سیلابی و آلودگی را دارد (Javidi Sabbaghian & Nejadhashemi, 2020). اقلیم منطقه خشک تا نیمه‌خشک سرد است. بارش سالانه از ۲۴۰ میلی‌متر در غرب تا ۱۱۰ میلی‌متر در شرق متغیر بوده و بیش از ۷۰ درصد آن در فصول سرد رخ می‌دهد. میانگین دمای سالانه ۱۳ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است و طی سه دهه گذشته حدود ۱/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. کشف‌رود دارای رژیم سیلابی با آبدهی سالانه ۶۲ تا ۷۶ میلیون مترمکعب است. کیفیت آب در پایین‌دست به دلیل شوری بالا نامطلوب بوده و ورود حدود ۷۰ درصد فاضلاب شهری بدون تصفیه همراه با پساب صنایع قند، سیمان و نساجی و آلودگی کشاورزی، مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت آب هستند. همچنین تغییر کاربری ۲۰ درصد مراتع به کشاورزی و مسکونی طی سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۴۰۰ موجب افزایش رواناب، کاهش نفوذپذیری، تخریب آبراهه‌ها و افت آب زیرزمینی شده است (تارم، ۱۳۸۸).



شکل ۴. نقشه منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

شبیه‌سازی تغییرات کاربری/پوشش اراضی

برای شبیه‌سازی کاربری و پوشش اراضی سال ۲۰۲۰، نقشه‌های پتانسیل تغییرات با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان تهیه شد. بدین منظور از نقشه‌های LULC سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ استخراج الگوی تغییرات استفاده گردید. متغیرهای ورودی مدل شامل پارامترهای فیزیوگرافی و انسانی بود. برای آموزش پایدار مدل، نمونه به روش تصادفی طبقه‌بندی شده استخراج شد که ۷۰٪ آن برای آموزش و ۳۰٪ برای ارزیابی مدل به کار رفت. مدل SVM با کرنل شعاعی پایه و با تنظیم پارامترهای بهینه از طریق جستجوی شبکه‌ای در نرم‌افزار TerrSet ($C=128$, $\gamma=1$) و $\epsilon=0.01$ پیاده‌سازی شد. نتایج ارزیابی عملکرد مطلوب مدل را در تفکیک مناطق مستعد تغییر نشان داد، به‌طوری‌که صحت کلی ۰/۹۳ و ضریب کاپا ۰/۸۸ به دست آمد (جدول ۲).

جدول ۲. پارامترهای حاصل از اجرای مدل SVM برای شبیه‌سازی تغییرات LULC سال ۲۰۲۰

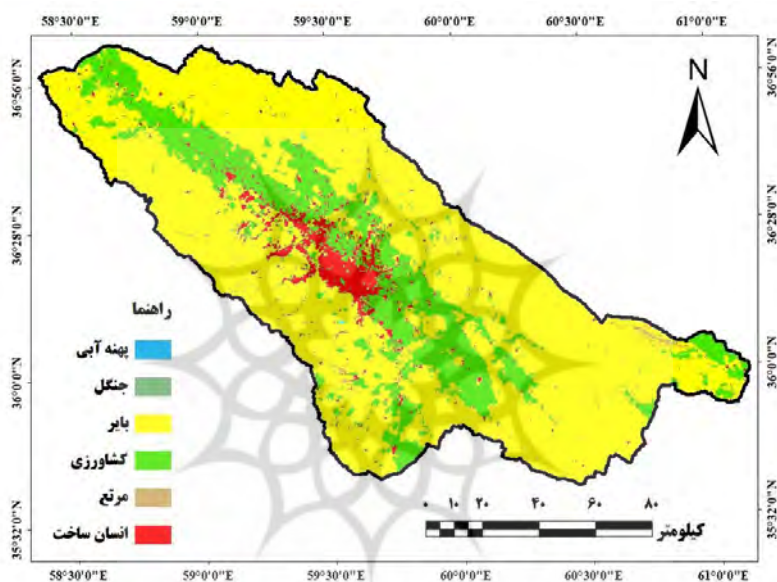
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
نوع کرنل	RBF	نسبت داده‌های آموزش	۷۰٪
پارامتر جریمه (C)	۱۲۸	نسبت داده‌های آزمون	۳۰٪
پارامتر گاما (γ)	۱	صحت کلی	۰/۹۳
پارامتر ϵ	۰/۰۱	اندازه مهارت (Skill measure)	۰/۸۸
تعداد کل نمونه‌های آموزشی		۳۰۰۰	

در گام بعدی، تغییرات کمی کاربری و پوشش اراضی در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ با استفاده از ماتریس احتمال انتقال مدل زنجیره مارکوف محاسبه شد (جدول ۳) که نشان‌دهنده پایداری بالای اراضی انسان‌ساخت و کشاورزی و تغییرپذیری زیاد اراضی بایر بود. سپس به‌منظور تخصیص فضایی تغییرات، مدل سلول‌های خودکار با فیلتر همسایگی 5×5 به کار گرفته شد. قوانین انتقال در این مدل بر پایه ترکیب نقشه‌های پتانسیل تغییر (حاصل از مدل SVM) و ماتریس انتقال مارکوف

تعریف گردید. در نهایت، با تنظیم و اجرای مدل برای ۱۷ تکرار (معادل ۱۷ سال)، نقشه شبیه‌سازی شده کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ توسط مدل ترکیبی SVM-CA-Markov تولید (شکل ۶) و مساحت مربوط به هر کلاس کاربری استخراج شد (جدول ۴).

جدول ۳. ماتریس تغییرات کمی کاربری‌ها حاصل از زنجیره Markov در حفاصل زمانی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰

کاربری/پوشش اراضی	آب/تالاب	جنگل	علفزار/بوته‌زار	کشاورزی	بایر	انسان‌ساخت
آب/تالاب	۲/۲۲	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۱۶	۰/۵۲	۰/۰۴
جنگل	۰/۲۸	۸۰۹/۰۵	۲۱/۸۹	۶/۰۳	۱۱۶/۷۷	۱/۵۳
علفزار/بوته‌زار	۰/۰۰	۱۴/۵۷	۲۶۹/۸۰	۰/۴۹	۶۷/۴۸	۰/۲۹
کشاورزی	۰/۵۰	۲/۹۴	۴/۹۲	۱۴۲۴/۵۰	۷۷/۷۴	۳۸/۲۲
بایر	۱/۳۶	۸۵/۳۰	۱۳۸/۲۲	۶۶۳/۶۸	۱۲۸۰۷/۷۵	۶۸/۲۶
انسان‌ساخت	۰/۰۱	۰/۷۸	۲/۶۹	۱۱/۵۶	۱۲/۷۱	۱۲۲/۲۰



شکل ۶. نقشه LULC شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۰ با الگوریتم SVM-CA-Markov

جدول ۴. مساحت کاربری/پوشش اراضی شبیه‌سازی شده حوضه آبریز رودخانه کشف رود برای سال ۲۰۲۰

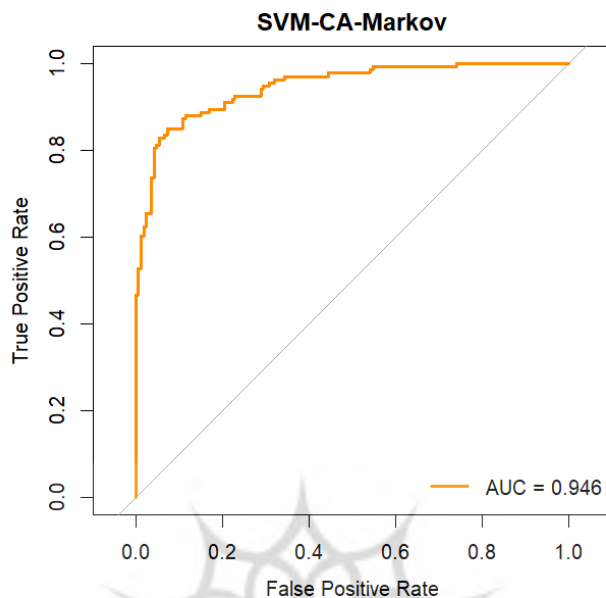
کاربری/پوشش اراضی	مساحت (کیلومتر مربع)	کاربری/پوشش اراضی	مساحت (کیلومتر مربع)
LULC	SVM-CA-Markov	LULC	SVM-CA-Markov
کشاورزی	۴۴۴۸/۲۴	آب / تالاب	۶/۲۰
جنگل	۳۳۰/۵۶	انسان‌ساخت	۳۸۸/۷۵
علفزار / بوته‌زار	۴۳۴/۶۹	بایر	۱۱۱۶۶/۱۸

صحت‌سنجی شبیه‌سازی

به‌منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی LULC سال ۲۰۲۰، نقشه شبیه‌سازی شده با نقشه مرجع مقایسه و ماتریس خطا^۱ تشکیل گردید. نتایج ارزیابی نشان داد که صحت کلی مدل برابر با ۰/۹۳ و ضریب کاپا ۰/۸۸ است که بیانگر انطباق مکانی بسیار خوب و توانایی بالای مدل SVM-CA-Markov در بازسازی الگوی کاربری‌ها است. افزون بر این،

1. Confusion Matrix

ارزیابی قدرت پیش‌بینی مدل با استفاده از شاخص ROC انجام گرفت که مقدار مساحت زیر منحنی برابر با ۰/۹۴۶ به دست آمد (شکل ۷). این مقادیر بالا توانایی قابل توجه مدل را در تفکیک مناطق پایدار از مناطق مستعد تغییر ثابت کرده و در مجموع، عملکرد اطمینان‌پذیر آن را در شبیه‌سازی تغییرات منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کند.



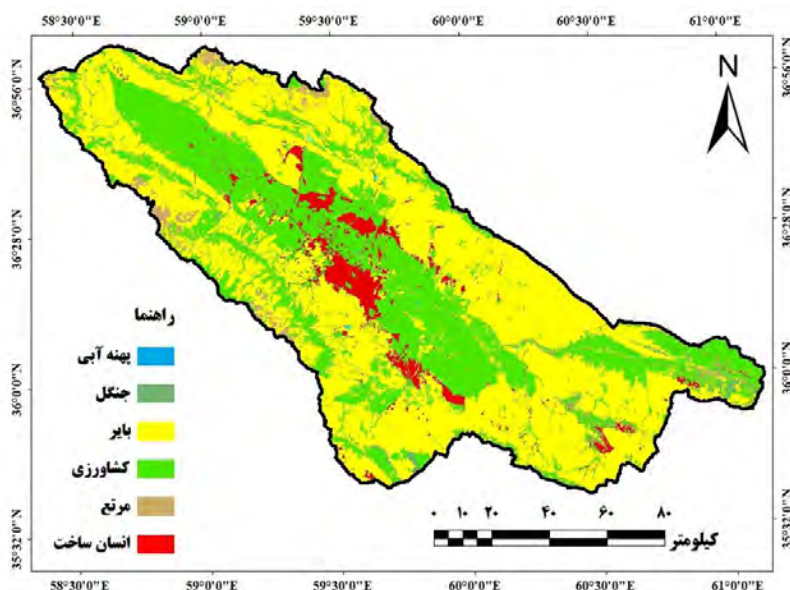
شکل ۷. نمودار منحنی مشخصه عملکرد نسبی (ROC)

مدل‌سازی کاربری/پوشش اراضی سال ۲۰۳۷

پس از تأیید عملکرد مدل ترکیبی SVM-CA-Markov، از آن جهت پیش‌بینی تغییرات LULC در افق ۲۰۳۷ استفاده شد. بدین منظور، نقشه‌های سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به عنوان داده‌های پایه انتخاب شدند و ماتریس احتمال انتقال کلاس‌ها برای این دوره توسط مدل مارکوف محاسبه گردید (جدول ۵) تا مبنای پیش‌بینی کمی قرار گیرد. به منظور تخصیص فضایی تغییرات، نقشه‌های تناسب مکانی مدل SVM به مدل CA-Markov وارد شد. در بخش سلول‌های خودکار، با استفاده از پنجره همسایگی ۵×۵ و ترکیب احتمالات انتقال مارکوف با مقادیر تناسب SVM، قوانین انتقال سلول‌ها مشخص گردید؛ به طوری که اولویت تغییر با سلول‌های دارای احتمال و تناسب بالاتر بود. در نهایت، این مدل با ۱۷ تکرار برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۷ اجرا شد که خروجی آن شامل نقشه پیش‌بینی شده LULC سال ۲۰۳۷ (شکل ۸) و مساحت دقیق پیش‌بینی شده برای هر کلاس (جدول ۶) است.

جدول ۵. ماتریس تغییرات کمی کاربری‌ها حاصل از زنجیره Markov در حدفصل زمانی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

کاربری/پوشش اراضی	آب/تالاب	جنگل	علفزار/بوته‌زار	کشاورزی	بایر	انسان ساخت
آب/تالاب	۲/۶۶	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۶۲	۲/۰۱	۰/۰۷
جنگل	۰/۵۷	۱۲۳/۲۳	۴۳/۷۹	۲۳/۲۱	۴۴۹/۱۴	۳/۰۶
علفزار/بوته‌زار	۰/۰۰	۲۹/۱۴	۱۰۵/۹۲	۱/۸۹	۲۵۹/۵۰	۰/۵۷
کشاورزی	۱/۹۴	۵/۸۸	۹/۸۴	۱۸۸۷/۰۹	۲۹۹/۰۱	۱۴۷/۰۰
بایر	۲/۷۲	۱۷۰/۶۰	۲۷۶/۴۳	۲۵۵۲/۶۰	۹۹۰۲/۹۱	۱۳۶/۵۳
انسان ساخت	۰/۰۳	۱/۵۷	۵/۳۸	۴۴/۸۱	۴۸/۸۸	۲۳۵/۹۵



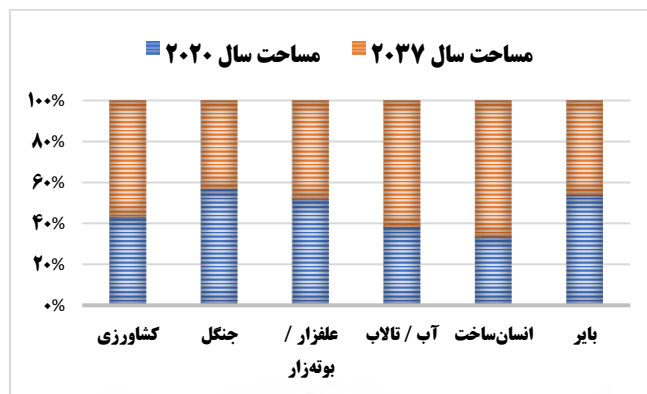
شکل ۸. نقشه LULC شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۳۷ با الگوریتم SVM-CA-Markov

جدول ۶. مساحت کاربری/پوشش اراضی حوزه آبریز رودخانه کشف رود سال ۲۰۳۷

کاربری / پوشش اراضی	مساحت (کیلومتر مربع)	کاربری / پوشش اراضی	مساحت (کیلومتر مربع)
LULC	SVM-CA-Markov	LULC	SVM-CA-Markov
کشاورزی	۵۸۵۰/۵۵	آب / تالاب	۱۰/۰۲
جنگل	۲۵۳/۰۰	انسان ساخت	۷۶۶/۰۵
علفزار / بوته‌زار	۴۰۰/۰۶	بایر	۹۴۹۴/۹۴

الگوی تغییرات کاربری و پوشش اراضی حوزه آبریز کشف‌رود در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۷ بر اساس مدل SVM-CA-Markov نشان‌دهنده دگرگونی‌های چشمگیر در ساختار فضایی حوزه است (شکل ۹). اراضی انسان‌ساخت با رشد قابل‌توجهی از ۳۸۸/۷۵ به ۷۶۶/۰۵ کیلومترمربع افزایش یافته‌اند که بیانگر توسعه سریع شهری و گسترش سکونتگاه‌ها به‌ویژه در اطراف کلان‌شهر مشهد و نواحی پایین‌دست است. این روند با یافته‌های مطالعه (بولاقی، ۱۴۰۳) و همچنین پژوهش‌های مشابه در سایر حوزه‌های رودخانه‌ای که رشد جمعیت، مهاجرت و توسعه زیرساخت‌ها را عامل گسترش اراضی انسان‌ساخت دانسته‌اند، همسو است (Boulaghi, 2024; Khan & Chen, 2025; Tahir et al., 2025). در مقابل، مساحت جنگل‌ها از ۳۳۰/۵۶ به ۲۵۳ کیلومترمربع کاهش یافته است؛ کاهشی که ناشی از تبدیل اراضی جنگلی به کشاورزی و بهره‌برداری انسانی است و در مطالعات مشابه نیز به‌عنوان چالش مهم زیست‌محیطی گزارش شده است (Denga et al., 2025). این کاهش موجب تشدید فرسایش، کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب شده و پایداری اکولوژیک حوزه را تهدید می‌کند (Gashaw et al., 2018). اراضی کشاورزی نیز از ۴۴۴۸/۲۴ به ۵۸۵۰/۵۵ کیلومترمربع افزایش یافته‌اند؛ افزایشی که عمدتاً از تبدیل اراضی بایر حاصل شده است، زیرا اراضی بایر در این دوره از ۱۱۱۶۶/۱۸ به ۹۴۹۴/۹۴ کیلومترمربع کاهش یافته‌اند. این تغییرات در راستای افزایش تقاضای کشاورزی و سیاست‌های توسعه‌ای است (Beshir et al., 2023) اما بدون مدیریت پایدار، می‌تواند منجر به تخریب خاک و فشار بیشتر بر منابع آب شود. همچنین، مساحت علفزار/بوته‌زار از ۴۳۴/۶۹ به ۴۰۰/۰۶ کیلومترمربع کاهش یافته که پیامد توسعه اراضی زراعی و ساخت‌وساز است. کاهش این پوشش‌ها آثار منفی بر ظرفیت چرای دام، تنوع زیستی و تاب‌آوری اکوسیستم دارد. به‌طور کلی، الگوی LULC حاکی از گسترش فزاینده فعالیت‌های انسان‌ساخت و کاهش پوشش‌های طبیعی در کشف‌رود

است؛ روندی که در حوضه‌های مشابه در ایران، آفریقا و آسیا نیز مشاهده شده است (Lukas et al., 2023). این تحولات پیامدهای مهمی برای رژیم هیدرولوژیک، رسوب‌گذاری، نفوذپذیری و پایداری اکولوژیک حوضه دارد و می‌تواند باعث افزایش سیلاب، کاهش کیفیت آب و تهدید امنیت غذایی شود (Mekonnen & Manderso, 2023). از این رو پایش مستمر و تدوین راهبردهای مدیریت سرزمین و منابع طبیعی برای جلوگیری از تخریب بیشتر و حفظ پایداری زیست‌محیطی منطقه ضروری است.



شکل ۹. روند تغییرات LULC در حداصل زمانی بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۷
(خروجی مدل SVM-CA-Markov)

بحث

نتایج نشان داد تغییرات کاربری و پوشش اراضی در حوضه آبریز کشف‌رود طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۳۷ و سناریوی ۲۰۳۷ عمدتاً ناشی از گسترش فعالیت‌های انسانی است. مدل SVM-CA-Markov، افزایش اراضی کشاورزی و کاربری‌های انسان‌ساخت و کاهش پوشش‌های طبیعی را نشان می‌دهد که بیانگر گذار ساختار فضایی حوضه از الگوی طبیعی به انسان‌محور است. این روند با یافته‌های حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک مشابه، از جمله رودخانه ستلج هند همخوان است (Rani et al., 2023)، با این تفاوت که در کشف‌رود توسعه کشاورزی عمدتاً از تبدیل اراضی بایر صورت گرفته، درحالی‌که در بتیندا هند کشاورزی از ابتدا غالب بوده است. همچنین همسویی با حوضه‌های خشک تاریم و هه‌شی چین نقش تعیین‌کننده منابع آب و محدودیت‌های محیطی را تأیید می‌کند (Wang et al., 2021). بیشترین تغییرات در دشت‌های مرکزی کم‌شیب و نزدیک به مراکز جمعیتی به‌ویژه پیرامون کلان‌شهر مشهد رخ داده و مناطق کوهستانی کمترین تحول را داشته‌اند که بیانگر اثر توپوگرافی و زیرساخت است. رشد جمعیت و توسعه سکونتگاه‌ها محرک اصلی افزایش اراضی انسان‌ساخت و فشار اقتصادی و دسترسی حمل‌ونقلی عامل توسعه کشاورزی بوده است. از منظر هیدرولوژیکی، گسترش سطوح غیرقابل نفوذ باعث کاهش نفوذپذیری، افزایش رواناب و تشدید سیل‌خیزی می‌شود (Shayani, 2025) و کاهش پوشش طبیعی و فشردگی خاک نیز هدایت هیدرولیکی را کاهش می‌دهد؛ الگویی که با مناطق نیمه‌خشک سازگار است (Wang et al., 2023). در مجموع، تغییرات کاربری و پوشش اراضی در کشف‌رود حاصل برهم‌کنش عوامل انسانی، محیطی و مدیریتی است و نقش اراضی بایر در توسعه کشاورزی اهمیت ساختار اولیه زمین و محدودیت‌های اقلیمی را نشان می‌دهد. همخوانی با مطالعات مشابه و الگوی منظم در ماتریس انتقال مارکوف و نقشه‌های پتانسیل، اعتبار و کارایی مدل SVM-CA-Markov را در تحلیل پویایی‌های کاربری زمین در مقیاس حوضه تأیید می‌کند.

نتیجه گیری

تغییرات کاربری و پوشش اراضی از مهم ترین محرک های پویایی محیطی در حوضه های خشک و نیمه خشک به شمار می روند. نتایج مدل SVM-CA-Markov نشان می دهد حوضه آبریز کشف رود تا افق ۲۰۳۷ با تغییر شدید ساختار فضایی مواجه است؛ به گونه ای که اراضی انسان ساخت، به ویژه در حریم کلان شهر مشهد و اراضی کشاورزی پیرامون آن، بر پهنه های طبیعی غلبه می یابند. پیامد این روند، کاهش نفوذپذیری، افت تغذیه آبخوان های بحرانی، کاهش زمان تمرکز رواناب و افزایش سیلاب های شهری و برون شهری است؛ امری که همراه با کاهش مراتع و پوشش گیاهی، تاب آوری اکولوژیک حوضه را در برابر تنش های اقلیمی تضعیف می کند. در چارچوب مدیریت یکپارچه، اجرای مرز رشد شهری^۱ در محور پیشروی مشهد، توسعه حریم های اکولوژیک^۲ و کمربندهای سبز در امتداد آبراهه های اصلی برای تعدیل رواناب و کاهش رسوب و آلاینده های غیر نقطه ای و نیز اصلاح سیاست های آب از طریق جایگزینی محصولات پر آب طلب با گونه های مقاوم به خشکی و گسترش آبیاری پربازده ضروری است. با وجود عملکرد مناسب مدل، محدودیت هایی مانند دقت داده های GlobeLand30، وابستگی به روندهای گذشته و عدم لحاظ سناریوهای مدیریتی و اقلیمی وجود دارد؛ بنابراین استفاده از داده های با قدرت تفکیک بالاتر مانند Sentinel-2 (۱۰ متر)، تحلیل عدم قطعیت، به کارگیری سناریوهای مدیریتی-اقلیمی و مقایسه با الگوریتم های پیشرفته یادگیری ماشین توصیه می شود. همچنین پیشنهاد می شود نقشه های پیش بینی شده به عنوان ورودی مدل های هیدرولوژیک نظیر SWAT برای کمی سازی اثر تغییر کاربری بر دبی پیک و ضریب رواناب به کار روند. در مجموع، این پژوهش چارچوبی علمی و کاربردی برای پایش و پیش بینی تغییرات کاربری در حوضه کشف رود و پشتیبانی از برنامه ریزی فضایی، مدیریت منابع آب و توسعه پایدار فراهم می کند.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه فردوسی مشهد دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی به شماره طرح پژوهشی ۶۱۲۸۷ در قالب پژوهانه پایان نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسنده اول مسئولیت مفهوم سازی، طراحی روش شناسی، گردآوری و تحلیل داده ها، نگارش پیش نویس و ویرایش نهایی را بر عهده داشت. نویسندگان دوم، سوم و ششم در نظارت بر اجرای پژوهش، اعتبارسنجی یافته ها، بازنگری انتقادی محتوای مقاله و تأیید نسخه نهایی مشارکت داشتند. نویسنده چهارم در توسعه چارچوب نظری و ویرایش ساختاری همکاری نمود و نویسنده پنجم در تدوین بخش های تحلیل، بحث و نتیجه گیری سهیم بود.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می نمایند.

منابع

- بولاقی، صادق. (۱۴۰۳). مدل‌سازی توسعه فضایی کلان‌شهرهای ایران با رویکردی مبتنی بر آینده‌پژوهی در افق ۱۴۲۰. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- تارم، صابر. (۱۳۸۸). مفیدسازی و آنالیز منطقه‌ای داده‌های هیدرولوژیکی و سیلاب (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه جاجرگ در استان خراسان رضوی). دومین کنفرانس سراسری آب، بهبهان.

References

- Abedini, M., & Pour Farrash Zadeh, F. (2021). Analysis and Modeling of the Relationship between Monthly Discharge and Geomorphometric Characteristics (Case Study: Kashaftood Watershed). *Geography and Environmental Planning*, 32(4), 29-44. <https://doi.org/10.22108/gep.2021.128899.1426>
- Aghajani, H., Sarkari, F., & Fattahi Moghaddam, M. (2024). Predicting land use/land cover changes using CA-Markov and LCM models in the metropolitan area of Mashhad, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02051-x>
- Asif, M., Kazmi, J. H., Tariq, A., Zhao, N., Guluzade, R., Soufan, W., Almutairi, K. F., Sabagh, A. E., & Aslam, M. (2023). Modelling of land use and land cover changes and prediction using CA-Markov and Random Forest. *Geocarto International*, 38(1), 2210532. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2210532>
- Athick, A. M. A., & Shankar, K. (2019). Data on land use and land cover changes in Adama Wereda, Ethiopia, on ETM+, TM and OLI-TIRS landsat sensor using PCC and CDM techniques. *Data in brief*, 24, 103880. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103880>
- Azizi, P., Soltani, A., Bagheri, F., Sharifi, S., & Mikaeili, M. (2022). An integrated modelling approach to urban growth and land use/cover change. *Land*, 11(10), 1715. <https://doi.org/10.3390/land11101715>
- Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., & Ziese, M. (2013). A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth System Science Data*, 5(1), 71-99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>
- Belay, T., & Mengistu, D. A. (2021). Impacts of land use/land cover and climate changes on soil erosion in Muga watershed, Upper Blue Nile basin (Abay), Ethiopia. *Ecological Processes*, 10(1), 68. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00339-2>
- Bendib, A., & Berghout, K. (2023). Use of the classification by a decision tree in the analysis of the effect of urban dynamics on the consumption of agricultural land in the municipality of Batna. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(6), 1279-1296. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01724-4>
- Bera, D., Das Chatterjee, N., Mumtaz, F., Dinda, S., Ghosh, S., Zhao, N., Bera, S., & Tariq, A. (2022). Integrated influencing mechanism of potential drivers on seasonal variability of LST in Kolkata municipal corporation, India. *Land*, 11(9), 1461. <https://doi.org/10.3390/land11091461>
- Beshir, S., Moges, A., & Dananto, M. (2023). Trend analysis, past dynamics and future prediction of land use and land cover change in upper Wabe-Shebele river basin. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19522>
- Boulaghi, S., Afsahi, H., & Minaei, M. (2024). Land use/cover change modeling with emphasis on built-up land growth with the help of CA-Markov model integration and multi-criteria decision analysis based on GIS (Case study: Aras River watershed). *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 16(2), 137–158. <https://doi.org/10.48308/gisj.2024.233751.1186>
- Boulaghi, S., Minaei, M., Shafizadeh-Moghadam, H., & Kharazmi, O. A. (2023). Improving modeling of spatial development of cities by combining machine learning methods and the CA-Markov model (Case study: Qom Metropolis). *Journal of Geographic Research and Development*. <https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.82877.1292>

- Boulaghi, S. (2024). *Modeling the spatial development of Iranian metropolises with an approach based on future studies in the horizon of 1420* [Master's thesis, Ferdowsi University of Mashhad]. (Original work published in 1403 SH) [In Persian].
- Dammag, A. Q., Jian, D., Cong, G., Derhem, B. Q., & Latif, H. Z. (2023). Predicting spatio-temporal land use/land cover changes and their drivers forces based on a cellular automated Markov model in Ibb City, Yemen. *Geocarto International*, 38(1), 2268059. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2268059>
- Denga, R. V., Simwanda, M., Vinya, R., Ranagalage, M., & Murayama, Y. (2025). Spatiotemporal Patterns of Agriculture Expansion Intensity and Land-Use/Cover Changes in the Mixed Urban-Rural Upper Kafue River Basin of Zambia (1989–2019). *Agriculture*, 15(10), 1047. <https://doi.org/10.3390/agriculture15101047>
- Fu, C., Cheng, L., Qin, S., Tariq, A., Liu, P., Zou, K., & Chang, L. (2022). Timely plastic-mulched cropland extraction method from complex mixed surfaces in arid regions. *Remote Sensing*, 14(16), 4051. <https://doi.org/10.3390/rs14164051>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103760>
- Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M., & Worqlul, A. W. (2018). Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of The Total Environment*, 619, 1394–1408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.191>
- Ghayour, L., Neshat, A., Paryani, S., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chen, W., Al-Ansari, N., Geertsema, M., Pourmehdi Amiri, M., & Gholamnia, M. (2021). Performance evaluation of sentinel-2 and landsat 8 OLI data for land cover/use classification using a comparison between machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 13(7), 1349. <https://doi.org/10.3390/rs13071349>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100419>
- Guarderas, P., Smith, F., & Dufrene, M. (2022). Land use and land cover change in a tropical mountain landscape of northern Ecuador: Altitudinal patterns and driving forces. *Plos one*, 17(7), e0260191. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260191>
- 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. <https://doi.org/10.3390/su10103421>
- Hao, J., Lin, Q., Wu, T., Chen, J., Li, W., Wu, X., Hu, G., & La, Y. (2023). Spatial–Temporal and Driving Factors of Land Use/Cover Change in Mongolia from 1990 to 2021. *Remote Sensing*, 15(7), 1813. <https://doi.org/10.3390/rs15071813>
- Haq, S. M., Tariq, A., Li, Q., Yaqoob, U., Majeed, M., Hassan, M., Fatima, S., Kumar, M., Bussmann, R. W., & Moazzam, M. F. U. (2022). Influence of edaphic properties in determining forest community patterns of the zabarwan mountain range in the Kashmir Himalayas. *Forests*, 13(8), 1214. <https://doi.org/10.3390/f13081214>
- Haseeb, M., Tahir, Z., Mahmood, S. A., Batool, S., & Farooq, M. U. (2024). Spatial soil loss prediction impacted by long-term land use/land cover change: a case study of Swat District. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(1), 37. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12190-2>
- Hu, Y., Raza, A., Syed, N. R., Acharki, S., Ray, R. L., Hussain, S., Dehghanisanij, H., Zubair, M., & Elbeltagi, A. (2023). Land use/land cover change detection and NDVI estimation in Pakistan's Southern Punjab Province. *Sustainability*, 15(4), 3572. <https://doi.org/10.3390/su15043572>
- Hussain, S., Qin, S., Nasim, W., Bukhari, M. A., Mubeen, M., Fahad, S., Raza, A., Abdo, H. G., Tariq, A., & Mousa, B. (2022). Monitoring the dynamic changes in vegetation cover using spatio-temporal remote sensing data from 1984 to 2020. *Atmosphere*, 13(10), 1609. <https://doi.org/10.3390/atmos13101609>
- Islam, F., Riaz, S., Ghaffar, B., Tariq, A., Shah, S., & Nawaz, M. (2022). Landslide susceptibility mapping (LSM) of Swat District, Hindu Kush Himalayan region of Pakistan, using GIS-based bivariate modeling. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1027423. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1027423>

- Javidi Sabbaghian, R., & Nejadhashemi, A. P. (2020). Developing a risk-based consensus-based decision-support system model for selection of the desirable urban water strategy: Kashafroud Watershed study. *Water*, 12(5), 1305. <https://doi.org/10.3390/w12051305>
- Karimov, Y. M., I. Mirzababayeva, S. Abobakirova, Z. Umarov, S. & Mirzaeva, Z. (2023). Land use and land cover change dynamics of Uzbekistan: a review. *E3S Web of Conferences*.
- Khalil, U., Azam, U., Aslam, B., Ullah, I., Tariq, A., Li, Q., & Lu, L. (2022). Developing a spatiotemporal model to forecast land surface temperature: A way forward for better town planning. *Sustainability*, 14(19), 11873. <https://doi.org/10.3390/su141911873>
- Khan, M., & Chen, R. (2025). Assessing the Impact of Land Use and Land Cover Change on Environmental Parameters in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan: A Comprehensive Study and Future Projections. *Remote Sensing*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/rs17010000>
- Kondum, F., Rowshon, M. K., Luqman, C., Hasfalina, C., & Zakari, M. (2024). Change analyses and prediction of land use and land cover changes in Bernam River Basin, Malaysia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, 101281. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101281>
- Leta, M. K., Demissie, T. A., & Tränckner, J. (2021). Modeling and prediction of land use land cover change dynamics based on land change modeler (Lcm) in nashe watershed, upper blue Nile basin, Ethiopia. *Sustainability*, 13(7), 3740.
- Li, J. (2024). Area under the ROC Curve has the most consistent evaluation for binary classification. *PloS one*, 19(12), e0316019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316019>
- Lukas, P., Melesse, A. M., & Kenea, T. T. (2023). Prediction of future land use/land cover changes using a coupled CA-ANN model in the upper omo-gibe river basin, Ethiopia. *Remote Sensing*, 15(4), 1148. <https://doi.org/10.3390/rs15041148>
- Mahmoudzadeh, H., Abedini, A., & Aram, F. (2022). Urban growth modeling and land-use/land-cover change analysis in a metropolitan area (case study: Tabriz). *Land*, 11(12), 2162. <https://doi.org/10.3390/land11122162>
- Mekonnen, Y. A., & Manderso, T. M. (2023). Land use/land cover change impact on streamflow using Arc-SWAT model, in case of Fetam watershed, Abbay Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 13(5), 111. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01918-4>
- Mhanna, S., Halloran, L. J., Zwahlen, F., Asaad, A. H., & Brunner, P. (2023). Using machine learning and remote sensing to track land use/land cover changes due to armed conflict. *Science of the Total Environment*, 898, 165600. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165600>
- Minaei, M., Boulaghi, S., Sheikh, B., Rezaalizadeh, M., & Najafi Deh Jalali, A. (2025). Monitoring and simulation of land use and land cover changes in the Great Karun Basin. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 34(133), 65-87. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2025.2027958.3075>
- Minaei, M., & Kainz, W. (2016). Watershed Land Cover/Land Use Mapping Using Remote Sensing and Data Mining in Gorganrood, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(5), 57. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijgi5050057>
- Minaei, M., Shafizadeh-Moghadam, H., & Tayyebi, A. (2018). Spatiotemporal nexus between the pattern of land degradation and land cover dynamics in Iran. *Land Degradation & Development*, 29(9), 2854-2863. <https://doi.org/doi:10.1002/ldr.3007>
- Nacishali Nteranya, J., Kiplagat, A., Ucakuwun, E. K., & Nzabandora, C. K. (2024). Modelling the impact of past and future land-use changes on land cover degradation at territorial level in Eastern DR Congo. *Environmental Systems Research*, 13(1), 55. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00366-2>
- Omran, H., Tayyebi, A., & Pijanowski, B. (2017). Integrating the multi-label land-use concept and cellular automata with the artificial neural network-based Land Transformation Model: an integrated ML-CA-LTM modeling framework (vol 54, pg 283, 2017). *GISCIENCE & REMOTE SENSING*, 54(3), CP3-CP3. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1287474>
- Rani, A., Gupta, S. K., Singh, S. K., Meraj, G., Kumar, P., Kanga, S., Durin, B., & Dogančić, D. (2023). Predicting future land use utilizing economic and land surface parameters with ANN and Markov chain models. *Earth*, 4(3), 728-751. <https://doi.org/10.3390/earth4030039>

- Roushangar, K., Aalami, M. T., Golmohammadi, H., & Shahnazi, S. (2023). Monitoring and prediction of land use/land cover changes and water requirements in the basin of the Urmia Lake, Iran. *Water Supply*, 23(6), 2299-2312. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.125>
- Selmy, S. A., Kucher, D. E., Mozgeris, G., Moursy, A. R., Jimenez-Ballesta, R., Kucher, O. D., Fadl, M. E., & Mustafa, A.-r. A. (2023). Detecting, analyzing, and predicting land use/land cover (LULC) changes in arid regions using landsat images, CA-Markov hybrid model, and GIS techniques. *Remote sensing*, 15(23), 5522. <https://doi.org/10.3390/rs15235522>
- Shafizadeh-Moghadam, H., Minaei, M., Feng, Y., & Pontius Jr, R. G. (2019). GlobeLand30 maps show four times larger gross than net land change from 2000 to 2010 in Asia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 240-248.
- Shafizadeh-Moghadam, H., Valavi, R., Asghari, A., Minaei, M., & Murayama, Y. (2022). On the spatiotemporal generalization of machine learning and ensemble models for simulating built-up land expansion. *Transactions in GIS*, 26(2), 1080-1097.
- Shayani, N., Shafizadeh Moghadam, H., & Minaei, M. (2025). Using remote sensing techniques to monitor changes in the use of protected lands and the Gheshlagh River bed and their impacts on flooding potential in the basin. *Land Management Biannual Journal*, 12(2), 149-167. <https://civilica.com/doc/2222982/>
- Syed, F. S., Iqbal, W., Syed, A. A. B., & Rasul, G. (2014). Uncertainties in the regional climate models simulations of South-Asian summer monsoon and climate change. *Climate Dynamics*, 42(7), 2079-2097. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1879-x>
- 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. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87796-w>
- Taiwo, B. E., Kafy, A.-A., Samuel, A. A., Rahaman, Z. A., Ayowole, O. E., Shahrier, M., Dut, B. M., Rahman, M. T., Peter, O. T., & Abosede, O. O. (2023). Monitoring and predicting the influences of land use/land cover change on cropland characteristics and drought severity using remote sensing techniques. *Environmental and Sustainability Indicators*, 18, 100248. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100248>
- Taram, S. (2009). Beneficialization and regional analysis of hydrological data and floods (Case study: Jaghraq River basin in Razavi Khorasan Province). *The 2nd National Water Conference*, Behbahan. [In Persian].
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107231>
- Wang, Q., Guan, Q., Sun, Y., Du, Q., Xiao, X., Luo, H., Zhang, J., & Mi, J. (2023). Simulation of future land use/cover change (LUCC) in typical watersheds of arid regions under multiple scenarios. *Journal of Environmental Management*, 335, 117543. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117543>
- Yonaba, R., Koïta, M., Mounirou, L., Tazen, F., Queloz, P., Biaou, A., Niang, D., Zouré, C., Karambiri, H., & Yacouba, H. (2021). Spatial and transient modelling of land use/land cover (LULC) dynamics in a Sahelian landscape under semi-arid climate in northern Burkina Faso. *Land use policy*, 103, 105305. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105305>
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs15082128>
- Zhu, L., Song, R., Sun, S., Li, Y., & Hu, K. (2022). Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2050. *Ecological Indicators*, 142, 109178. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109178>