



Spatio-temporal analysis and future prediction of land use changes using multitemporal remotely sensed data and GIS techniques in Hirmand River Basin

Mahboubeh Ebrahimian¹✉ | Roghaye Karami²

1. Corresponding Author, Department of Water Resources Management, Hamoun International Wetland Research Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: mebrahimian@uoz.ac.ir

2. Department of Natural Ecosystem Management, Hamoun International Wetland Research Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: roghaye.karami@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	This study aimed to analyze and quantify land use/land cover changes in the transboundary Hirmand River basin over the past 30 years and to predict probable changes for next 20 years. Land cover maps of 1992, 2002, and 2022 were generated using Landsat images of TM and OLI sensors. The Random Forest algorithm was employed for classification and identification of land use classes. The overall accuracy and Kappa index for all classified maps were over 80% and 0.78, respectively. CA-Markov model was used to predict the changes using the land use maps first simulated for 2022, after validation, the future maps of 2030 and 2040 projected. The Kappa index of 0.82 indicated the model's high ability to simulate land use and cover changes in the basin. Water bodies experienced a 97% reduction from 1992 to 2022, with a significant portion of the remaining water body related to the Hamoun Wetland. This trend is expected to reverse slightly, with the water body area increasing from 0.05% in 2022 to 0.36% and 0.37% in 2030 and 2040, respectively. Forests have lost 20% of area, and this decline is likely to continue. Dense rangelands have lost approximately 75% of their areas by 2022, and it is projected that they will decline to 34% by 2040, while poor rangelands have increased by around 2%. Meanwhile, agricultural land has expanded by approximately 115% by 2022, increasing from 2.72% to 5.88%. It is anticipated that agricultural land will experience a further increase of 20–30% by 2040.
Article history:	
Received: Dec. 7, 2024	
Revised: Jan. 13, 2025	
Accepted: Feb. 11, 2025	
Published online: May. 2025	
Keywords: CA-Markov Model, Hamoun Wetland, Landsat Satellite, Hirmand River Basin.	
Cite this article: Ebrahimian, M., & Karami, R (2025). Spatio-temporal analysis and future prediction of land use changes using multitemporal remotely sensed data and GIS techniques in Hirmand River Basin. <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i> , 56 (3), 785-805. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.386623.669848	
© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.	
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.386623.669848	



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Land use and land cover (LULC) changes, particularly in arid and semi-arid regions, play a critical role in sustainable development and environmental stability. Given the strategic importance of the transboundary Hirmand River Basin and the environmental crises in recent decades, such as severe droughts, dust storms, vegetation loss, and desertification, precise and up-to-date assessment of land use and land cover changes is essential as a basis for effective land management studies. This study aims to analyze and quantify the patterns of land use/land cover (LULC) changes over the past 30 years (1992–2022) and predict them for the next 20 years using the CA-Markov model.

Numerous studies have demonstrated the effectiveness of remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) in monitoring LULC changes. The studies highlighted the potential of RS and GIS tools to analyze and predict LULC changes effectively, providing insights into sustainable land management. Based on the search results, no study has comprehensively analyzed land use and land cover (LULC) changes across the entire Hirmand Basin using remote sensing and GIS techniques. Most research has focused on specific sub-regions, such as the Hamoun Wetlands or the impacts of climate change and human activities on the Hirmand River. This indicates a gap in the literature, highlighting the novelty of your study, which uniquely integrates satellite imagery analysis and predictive modeling to examine LULC transitions across the whole basin. This makes the contribution of the study both innovative and crucial for informed regional planning and sustainable resource management.

Methodology

This study employs Landsat satellite images of TM and OLI sensors to generate LULC maps for 1992, 2002, and 2022. The Random Forest algorithm was used for image classification, ensuring high accuracy in differentiating land cover types. Nine land use classes were identified. The overall accuracy and kappa coefficient indicated high classification accuracy. For predicting future LULC changes, the CA-Markov model was applied, integrating historical LULC data to simulate spatial and temporal dynamics. Land use maps were first generated for 2022 for validation (kappa coefficient of 0.86) and then simulated for 2030 and 2040. Additionally, Google Earth Engine facilitated data preprocessing, while ArcGIS Pro and IDRISI TerrSet supported advanced spatial analysis and visualization.

Results and Discussion

The results revealed that from 1992 to 2022, water bodies lost 97% of their area. Notably, a significant portion of the remaining water body is part of the Hamoun International Wetland. This trend is expected to slightly reverse, with the area increasing from 0.05% of the basin in 2022 to 0.36% and 0.37% in 2030 and 2040, respectively. Forests lost 20% of their area, shrinking from 0.21% in 1992 to 0.16% in 2022, and a continued decline is projected for 2030 and 2040. Dense rangelands have also experienced a sharp reduction, losing about 75% of their areas by 2022, decreasing from 4.83% to 1.18%. By 2040, an additional 34% reduction is expected. Meanwhile, agricultural land increased by approximately 115% by 2022, expanding from 2.72% to 5.88%. With ongoing policies in Afghanistan, agricultural land is expected to increase by an additional 20–30% reaching 23.93% by 2030 and 34% by 2040. It is expected that built-up areas will experience minimal growth, remaining around 0.23% by 2040 due to socioeconomic and political factors. The significant reduction in water bodies and rangelands, coupled with the expansion of agricultural land, emphasizes the complex interplay of environmental, socioeconomic, and political factors. The decline in water resources is attributed to both climatic factors (reduced precipitation and increased droughts) and human activities. Also, poor urban planning, political instability, and insufficient infrastructure have limited urban expansion.

Conclusion

This study highlights the critical changes in LULC in the Hirmand River Basin over the past 30 years and projects significant future transformations by 2040. The findings emphasize the urgent need for integrated land-use planning for sustainable land management strategies to mitigate the adverse effects of LULC changes. Without proactive management, continued degradation of rangelands and water bodies is inevitable, posing serious ecological and socio-economic risks.

Author Contributions

M.E.: Writing original draft, Formal analysis, Conceptualization, Data curation, Methodology, Software, Validation. R.K.: Writing – review & editing.

Data Availability Statement

Not applicable

Acknowledgements

This manuscript is a part of the research project (Project code: PR-RIOZ-1401-5091-1). The authors would like to thank the Research Institute of Zabol for their support.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of Research Institute of Zabol. The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تحلیل زمانی-مکانی و پیش‌بینی آینده تغییرات کاربری اراضی با استفاده از داده‌های چندزمانه سنجش از دور و تکنیک‌های GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز هیرمند)

محبوبه ابراهیمیان^۱ | رقیه کرمی^۲^۱ نویسنده مسئول، گروه منابع آب، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: mebrahimian@uoz.ac.ir^۲ گروه اکوسیستم‌های طبیعی، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: roghaye.karami@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف این مطالعه، تحلیل و کمی‌سازی الگوی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز فرامرزی هیرمند طی ۳۰ سال گذشته و پیش‌بینی آن در ۲۰ سال آینده بود. برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۲، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲ از تصاویر ماهواره Landsat سنجنده TM و OLI استفاده شد. الگوریتم جنگل تصادفی برای طبقه‌بندی نقشه‌ها معرفی و ۹ کلاس کاربری شناسایی شدند. دقت کلی و شاخص کاپا برای تمام نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده به ترتیب بیش از ۸۰٪ و ۰/۷۸ بوده است. برای پیش‌بینی تغییرات، مدل CA-Markov استفاده شد. نقشه‌های کاربری ابتدا برای سال ۲۰۲۲ و پس از اعتبارسنجی برای ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ شبیه‌سازی شدند. نتایج آماری شاخص کاپا (۰/۸۲) که از مقایسه نقشه‌های تولید شده و شبیه‌سازی شده سال ۲۰۲۲ به دست آمد نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی تغییرات کاربری و پوشش زمین در منطقه بود. نتایج نشان داد که از ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ وسعت بدنه آبی حوضه ۹۷٪ کاهش یافته است (بخش بزرگ بدنه آبی موجود مربوط به تالاب بین‌المللی هامون است). این روند برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ افزایشی بوده و از ۰/۰۵٪ در ۲۰۲۲ به ۰/۳۶٪ و ۰/۳۷٪ در ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ خواهد رسید. جنگل‌ها ۲۰٪ از مساحت خود را از دست داده و ادامه این روند در سال‌های آینده نیز محتمل است. مراتع متراکم حدود ۷۵٪ از مساحت خود را تا سال ۲۰۲۲ از دست داده و انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۴۰ حدود ۳۴٪ کاهش مساحت دیگر را تجربه کند؛ این در حالی است که مساحت مراتع فقیر حدود ۲٪ افزایش خواهد یافت. در این میان، مساحت زمین‌های کشاورزی تا سال ۲۰۲۲ حدود ۱۱۵٪ افزایش داشته و از ۲/۷۲٪ به ۵/۸۸٪ رسیده است. افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصدی وسعت زمین‌های کشاورزی تا سال ۲۰۴۰ محتمل است. این نتایج می‌تواند نقشی مؤثر در تدوین برنامه‌های زیست‌محیطی و راهبردهای مدیریت منابع در حوضه آبریز هیرمند داشته باشد.
واژه‌های کلیدی: تالاب هامون، حوضه آبریز هیرمند، ماهواره لندست، مدل زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار.	استناد: ابراهیمیان، محبوبه و کرمی، رقیه. (۱۴۰۳). تحلیل زمانی-مکانی و پیش‌بینی آینده تغییرات کاربری اراضی با استفاده از داده‌های چندزمانه سنجش از دور و تکنیک‌های GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز هیرمند)، <i>مجله تحقیقات آب و خاک ایران</i> ، ۵۶ (۳)، ۸۰۵-۸۷۵
	
	ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
	DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.386623.669848

مقدمه

تغییرات کاربری و پوشش زمین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از موضوعات اساسی و چالش برانگیز در توسعه پایدار و تغییر اکوسیستم و محیط زیست به شمار می‌رود. این تغییرات نقشی کلیدی در حفظ پایداری زیست‌محیطی، توسعه کشاورزی و تأمین معیشت میلیون‌ها نفر ایفا می‌کند. حوضه آبریز فرامرزی هیرمند که عمدتاً در افغانستان واقع شده و به تالاب بین‌المللی هامون در ایران ختم می‌شود، دارای اهمیت استراتژیک زیادی است (UNODC, 2016). رودخانه هیرمند مهمترین منبع آبی این حوضه است که هر دو کشور یعنی منطقه سیستان در ایران و ولایت نیمروز و هلمند در افغانستان به آن کاملاً وابسته هستند؛ به گونه‌ای که مسائل محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و امنیت ملی این مناطق با آن گره خورده است. همین امر باعث پیچیده شدن چگونگی مدیریت حوضه آبریز هیرمند می‌شود. از طرفی این حوضه تنها منبع اصلی تأمین آب شیرین منطقه است که به دلیل توسعه کشاورزی، تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و مدیریت نادرست منابع طبیعی با چالش‌های جدی مواجه شده است. افزایش دمای جهانی و کاهش میزان بارندگی در این منطقه منجر به خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت و کاهش جریان‌های سطحی و خشک شدن بسیاری از منابع آبی در پایین‌دست حوضه، به ویژه در تالاب هامون شده است. این خشکسالی‌ها تعادل اکوسیستم‌های منطقه را به خطر انداخته و باعث نابودی پوشش گیاهی طبیعی، طوفان‌های گرد و غبار و افزایش فرسایش خاک شده است (ابراهیم زاده، ۱۳۸۸؛ خسروی، ۱۳۸۹؛ حاجی حسینی و همکاران، ۱۳۹۴).

از مهمترین عوامل مؤثر بر بحران‌های زیست‌محیطی پیش آمده بحث تغییرات کاربری زمین و ساخت و بهره‌برداری از سدهای بزرگ و دیگر سازه‌های انحرافی در بالادست حوضه است که منجر به ایجاد مشکلات گسترده‌ای در پایین‌دست، به‌ویژه در منطقه سیستان و تالاب بین‌المللی هامون شده است. کاهش جریان‌های آبی به تالاب هامون، به عنوان بزرگترین تالاب آب شیرین ایران، منجر به خشک شدن این تالاب و از بین رفتن زیستگاه‌های حیاتی برای حیات وحش و جوامع محلی شده است (پیری و انصاری، ۱۳۹۲). این پدیده علاوه بر ایجاد بحران‌های اجتماعی و اقتصادی، منجر به مهاجرت گسترده روستاییان و کشاورزان به مناطق شهری و تغییرات گسترده در کاربری زمین شده است. بسیاری از زمین‌های کشاورزی رها شده به بیابان تبدیل شده‌اند که روند بیابان‌زایی را تسریع کرده است (فکوری و شوریان، ۱۳۹۶). بنابراین اطلاعات به‌روز، کافی و قابل اعتماد درباره تغییرات کاربری و پوشش زمین از گذشته تا حال و همچنین تغییرات احتمالی آینده، برای درک روند تغییرات و ارزیابی پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی این تغییرات حیاتی است (Aminiparsa & Salehi, 2016). تحلیل کاربری زمین می‌تواند به مقامات محلی، مدیران و سیاست‌گذاران کمک کند تا اقدامات مدیریتی و حفاظتی بهتری را برای حفظ منابع آبی، جلوگیری از بیابان‌زایی و احیای تالاب‌های حیاتی مانند هامون انجام دهند. استفاده از داده‌های سنجش از دور و روش‌های تحلیلی مکانی-زمانی این امکان را می‌دهد که روند تغییرات را در طول زمان بررسی کرده و تأثیر تغییرات کاربری زمین بر منابع طبیعی و محیط زیست شناسایی شود.

روش‌ها و فنون سنتی برای نقشه‌برداری تغییرات کاربری و پوشش زمین، بسیار زمان‌بر و پرهزینه هستند؛ از طرفی با توجه به اینکه بخش بزرگی از حوضه در کشور افغانستان واقع شده است و دسترسی به داده‌های مشاهده‌ای و معتبر امکان‌پذیر نیست، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور^۱ (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS) برای پایش تغییرات کاربری زمین بسیار مؤثر است. این روش‌ها به دلیل کارآمدی و هزینه مناسب، به‌طور فزاینده‌ای در استخراج نقشه‌های کاربری زمین، تحلیل، شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات در آینده در ایران و سایر کشورها به کار گرفته شده‌اند (Osman et al., 2023; Gómez-Fernández et al., 2024; Tesfaye et al., 2024; Basheer et al., 2022; Roodari et al., 2021; Gibson et al., 2018; Abd El-Kawy et al., 2011; Wang & Zhang 2001). اغلب از مدل‌سازی برای مطالعه روند تغییر کاربری زمین و همچنین شبیه‌سازی وضعیت و الگوی کاربری آینده استفاده می‌کنند. مدل‌های شبیه‌سازی، تغییرات زمین را در مقیاس زمانی و مکانی توصیف یا پیش‌بینی می‌کنند. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی پویایی تغییر کاربری زمین وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به اتوماتای سلولی^۳ (CA)، روش‌های آماری، زنجیره مارکوف^۴ (Markov Chain) و شبکه عصبی مصنوعی^۵ (ANN) اشاره کرد. با توجه به مطالعات انجام شده، تلفیق دو مدل زنجیره مارکوف و خودکار سلولی به دلیل ترکیب قدرت تحلیل آماری و توانایی مدل‌سازی مکانی، برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین مزایای ویژه‌ای نسبت به سایر روش‌ها دارند.

1 . Remote Sensing

2 . Geographic Information System

3 . Cellular Automata

4 . Markov Chain

5 . Artificial Neural Network

زنجیره مارکوف به طور خاص برای پیش‌بینی روندهای زمانی و احتمال انتقال بین طبقات کاربری زمین مناسب است از سوی دیگر، مدل خودکار سلولی قادر است روابط مکانی پیچیده مانند همجواری، الگوهای فضایی، و تأثیر عوامل محیطی را در مقیاس پیکسل شبیه‌سازی کند. بنابراین ترکیب این دو مدل در CA-Markov امکان ارائه پیش‌بینی‌هایی با دقت زمانی و مکانی بالا را فراهم می‌کند. این مدل در مقایسه با سایر روش‌ها ابزار ساده‌تر، عملی‌تر و در عین حال مؤثرتری برای مطالعات تغییرات کاربری زمین، به ویژه در مقیاس‌های بزرگ، ارائه می‌دهد و امکان تجسم خروجی‌ها به شکل نقشه‌های پیش‌بینی‌شده را فراهم می‌کند که برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی بسیار کارآمد است. در ادامه مواردی از مطالعات انجام شده با استفاده از مدل CA-Markov و داده‌ها و تکنیک‌های GIS و RS در مدل‌سازی و شبیه‌سازی کاربری اراضی/پوشش زمین^۱ LULC ارائه شده است.

تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین با استفاده از تصاویر لندست در نرم افزار گوگل ارث انجین^۲ (GEE) توسط (Tesfaye et al., 2024) بررسی شد. نتایج مطالعه از دقت بالایی برخوردار بود و نشان داد که مناطق مسکونی و زمین‌های بایر گسترش زیادی داشته است و در عوض شاهد کاهش جنگل‌ها و بوته‌زارها بودند. (Osman et al., 2023) تغییرات کاربری و پوشش زمین را با استفاده از تصاویر لندست و مدل تلفیقی سلول خودکار و شبکه عصبی مصنوعی (CA-ANN) در ایالت Gedaref در شرق سودان از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی، مساحت جنگل و مراتع به میزان قابل توجهی کاهش داشته است. شبیه‌سازی نقشه‌های کاربری در آینده نیز نشان داد که این روند هر چند با شدت کمتر تا سال‌های ۲۰۲۸ و ۲۰۴۸ نیز ادامه خواهد داشت. (Selmy et al., 2022) تغییرات تاریخی و آینده کاربری زمین را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست (۱۹۸۴-۲۰۲۲) و مدل تلفیقی CA-Markov در استان سوهاگ مصر بررسی کردند. مدل CA-Markov با ضرایب کاپای ۰/۸۴ تا ۰/۹۳ عملکرد دقیقی در پیش‌بینی داشت و ابزاری مفید برای برنامه‌ریزی پایدار معرفی شد. نتایج نشان داد که مناطق شهری و اراضی کشاورزی افزایش یافته‌اند، در حالی که اراضی بیابانی نصف مساحت خود را از دست داده‌اند. شبیه‌سازی‌های ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ روند مشابهی با گذشته نشان دادند. در مطالعه‌ای دیگر بررسی تغییرات کاربری زمین با استفاده از مدل CA-Markov و تکنیک‌های ژئومکانی در جنوب غربی اتیوپی توسط (Gemmechis, 2022) انجام شد. این مطالعه با استفاده از تصاویر لندست تغییرات کاربری زمین منطقه جنگلی بلته گرا را طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۸ بررسی و روند آینده را پیش‌بینی کرد. نتایج نشان داد جنگل‌ها در این بازه کاهش و زمین‌های کشاورزی افزایش داشته‌اند. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند روند کاهش جنگل‌ها و افزایش اراضی کشاورزی تا سال ۲۰۳۷ ادامه خواهد داشت. مدل با ضریب کاپای ۱ اعتبارسنجی شد و به عنوان ابزاری برای مدیریت پایدار جنگل‌ها و مقابله با تغییرات کاربری زمین معرفی شد. همچنین (Jana et al., 2022) با استفاده از مدل هیبریدی CA-Markov تغییرات کاربری زمین در حوضه رودخانه ماهی (Mahi) را برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ بررسی کرده و پیش‌بینی‌هایی برای سال ۲۰۳۰ ارائه داده است. نقشه‌های کاربری زمین از تصاویر لندست و سنتینل استخراج شدند و نتایج اعتبارسنجی مدل برای سال ۲۰۲۰ نشان‌دهنده دقت مناسب بود و تغییرات قابل توجهی در جنگل، کشاورزی، اراضی بایر و مناطق ساخته‌شده مشاهده شد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند تا سال ۲۰۳۰، زمین‌های کشاورزی و مناطق ساخته‌شده افزایش خواهند داشت. (Tadesse et al., 2021) با استفاده از تصاویر لندست و مدل CA-Markov به مطالعه تغییرات حال و شبیه‌سازی آینده کاربری اراضی در ذخیره‌گاه زیست‌کره جنگل ماجانگ در شمال غربی اتیوپی پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که تغییرات قابل توجهی در کاربری/پوشش زمین مشاهده شده است و این روند در آینده نیز ادامه خواهد داشت. (Leta et al., 2021) مطالعه‌ای در حوضه آبخیز ناشه (اتیوپی)، که شاخه اصلی حوضه آبی نیل آبی بالا است، با هدف ارزیابی پویایی زمانی و مکانی کاربری اراضی در گذشته و پیش‌بینی آینده با استفاده از تصاویر Landsat انجام دادند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که تبدیل اکوسیستم‌های جنگلی، مرتعی و علفزارها به کاربری‌های دیگر، به ویژه به کاربری کشاورزی، اصلی‌ترین تغییر کاربری و پوشش زمین در آینده خواهد بود. (Wang et al., 2021) تغییرات آینده کاربری اراضی/پوشش گیاهی را در مناطقی با اقلیم خشک و بسیار خشک با استفاده از روش CA-Markov شبیه‌سازی کردند. دقت شاخص کاپا برای نتایج شبیه‌سازی بالای ۸۵٪ بود که نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل‌ها در شبیه‌سازی LULC در منطقه مورد مطالعه بوده است. در مطالعه‌ای دیگر که توسط (Mondal et al., 2020) انجام شد، از تصاویر ماهواره‌ای لندست برای تهیه نقشه‌های کاربری و با استفاده از مدل CA-Markov برای پیش‌بینی و بررسی روند تغییرات در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۲۷ و ۲۰۵۰ استفاده شد. نتایج نشان داد که این مدل ابزاری دقیق برای پیش‌بینی تغییرات آینده LULC است، هرچند تغییرات مکانی جزئی ممکن است مشاهده شود. همچنین تعداد تکرارها و فاصله‌های

1. Land Use Land Cover

2. Google Earth Engine

زمانی (گام‌های زمانی) تأثیر قابل توجهی بر نتایج کمی پیش‌بینی ندارند (همبستگی بالا: $+0.98$) اما بر توزیع مکانی پیش‌بینی‌ها تأثیر اندکی دارند. همچنین (Hajihosseini et al., 2020) تأثیر تغییرات کاربری اراضی و متغیرهای اقلیمی بخش میانی رودخانه فرامرزی هیرمند را با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست و مدل هیدرولوژیکی سوات بررسی و نشان دادند که اراضی کشاورزی تحت تأثیر تغییر کاربری زمین در دوره‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۱۱ به میزان قابل توجهی افزایش یافته و باعث ایجاد کاهش ۸۱۰ میلیون متر مکعب در جریان سالانه رودخانه برای حوضه هیرمند میانی شده است. (Hamad et al., 2018) به تحلیل و پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین در منطقه هالگورد-ساکران در پارک ملی کردستان عراق با استفاده از تصاویر لندست پرداخته است. در این مطالعه دو سناریوی مختلف بررسی شده‌اند. سناریوی اول فرض می‌کند که روند تغییرات بین سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ (دوره تحریم‌های سازمان ملل علیه عراق) تا سال ۲۰۲۳ ادامه یابد. در سناریوی دوم، روند تغییرات بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ (پس از پایان تحریم‌ها) برای پیش‌بینی سال ۲۰۲۳ استفاده شده است. چهار کلاس کاربری زمین با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی^۱ (RF) طبقه‌بندی و دقت آنها با شاخص کاپا و دقت کلی ارزیابی شد. مدل CA-Markov برای شبیه‌سازی نقشه‌های پیش‌بینی شده کاربری زمین در سال ۲۰۲۳ به کار رفت. نتایج نشان داد که در سناریوی دوم، روند پایداری و همگنی مناطق افزایش می‌یابد که اثرات مثبتی بر پارک ملی خواهد داشت. در پژوهشی که توسط کیانپور کل خواجه و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر لندست و مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و خودکار سلولی برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی در محدوده سد گتوند انجام شد، نتایج حاصل از ارزیابی مدل دقت بالای آن (ضریب کاپا بیش از ۰/۹۲) را برای همه سال‌ها نشان داد. بررسی روند تغییرات نشان‌دهنده کاهش پوشش مراتع و افزایش اراضی کشاورزی و مناطق ساخته‌شده در دوره‌های زمانی مختلف است. همچنین هاشمی و همکاران (۱۴۰۱) روند تغییرات کاربری و پوشش اراضی دشت سیستان را با استفاده از تصاویر لندست و روش‌های تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار بررسی کردند. نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۱ و ۲۰۱۸ تهیه شد. نتایج نشان داد که در دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۱، اراضی زراعت آبی، پوشش درختی، منابع آب و اراضی بایر کاهش و اراضی مالچ‌پاشی و تپه‌های ماسه‌ای افزایش یافته‌اند. در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸، سطوح زراعت آبی و اراضی بایر کاهش و پوشش درختی، منابع آب، مالچ‌پاشی و تپه‌های ماسه‌ای افزایش داشتند. پیش‌بینی‌ها برای سال ۲۰۳۰ نشان داد که زراعت آبی، تپه‌های ماسه‌ای و اراضی بایر کاهش خواهند یافت، در حالی که پوشش درختی، منابع آب و مالچ‌پاشی افزایش خواهند داشت. در مطالعه‌ای دیگر که توسط اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۰) در دشت داراب انجام شد، تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار و با کمک GIS و تصاویر لندست پیش‌بینی شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل دقت بالای آن را برای همه سال‌ها نشان داد. نتایج نشان داد که بین سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۸، مساحت زمین‌های زراعی، کوه‌ها، مراتع و منابع آب کاهش خواهد یافت؛ در حالی که زمین‌های بایر، اراضی باغی و مسکونی افزایش می‌یابند. پیش‌بینی‌ها برای سال ۱۴۰۸ نشان داد که تغییرات قابل توجهی در ساختار کاربری اراضی منطقه اتفاق خواهد افتاد. همچنین در پژوهش انجام‌شده توسط عربی‌علی‌آباد و همکاران (۱۴۰۰) در حوزه شیرکوه استان یزد، تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶، هر سال به‌طور متوسط ۱۶۱/۸۵ هکتار از مراتع غنی، ۱۳۱/۱۴ هکتار از مراتع فقیر و ۷/۷۲ هکتار از اراضی کشاورزی کاسته شده، در حالی که به مساحت اراضی شهری ۴۵/۱۶ هکتار و مناطق صخره‌ای ۲۶۵/۷۲ هکتار افزوده گردیده است. پیش‌بینی‌ها برای سال ۲۰۲۴ نشان داد که بیشتر اراضی کشاورزی و شهری به تغییرات شدیدتر دچار خواهند شد در حالی که مناطق صخره‌ای و سنگلاخی پایداری بیشتری خواهند داشت. این پیش‌بینی‌ها به برنامه‌ریزی‌های آینده برای مدیریت منابع طبیعی کمک می‌کند. در مطالعه‌ای که توسط عزیزی‌قلاتی و همکاران (۱۳۹۵) در منطقه کوهمره سرخی فارس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و مدل CA-Markov انجام شد نقشه‌های کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۱۳۶۶، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۱ تهیه شد. نتایج با ضرایب اعتبارسنجی قابل‌قبول ۰/۸۳ و ۰/۸۸ برای دوره‌های زمانی مختلف به‌دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش جنگل و تبدیل آن به اراضی کشاورزی و مرتع بوده است. Aminiparsa & Salehi (۲۰۱۶) به مطالعه پویایی تغییرات کاربری اراضی و شبیه‌سازی آن در آینده با استفاده از تصاویر لندست طی یک بازه ۲۷ ساله در نقره، استان آذربایجان غربی پرداختند. مدل زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی نقشه‌های کاربری اراضی برای سال ۲۰۴۱ استفاده گردید. دقت شاخص کاپا برای نتایج شبیه‌سازی شده قابلیت بالای مدل در شبیه‌سازی LULC در منطقه را نشان داد. همچنین پایش تغییرات گذشته اراضی در طول سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۴ نشان‌دهنده رشد مناطق شهری بوده است، در حالی که با کاهش و تبدیل زمین‌های برهنه و بایر این تغییرات صورت گرفته است. در این مطالعه کاربری اراضی پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۴۱، با توجه به ثابت بودن روندهای فعلی مدیریت، رشد و گسترش مناطق شهری

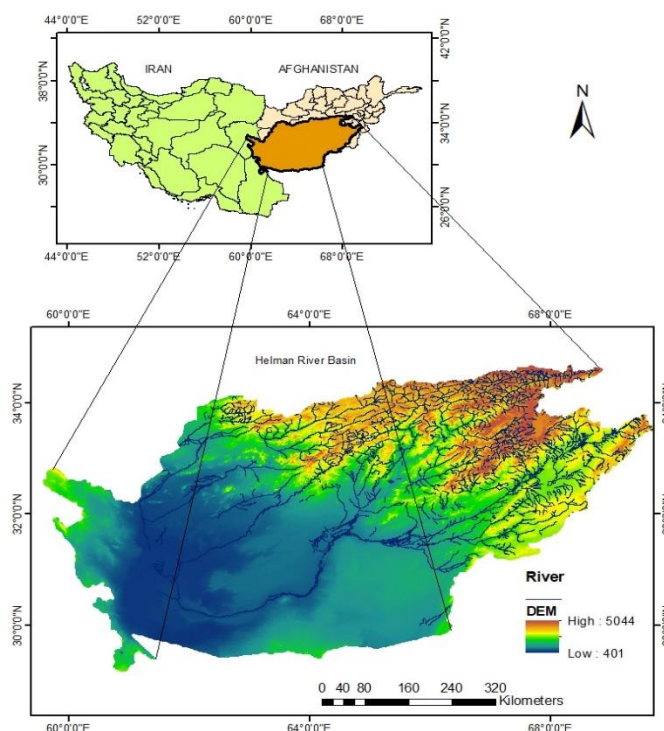
همراه با گسترش بالقوه در زمین‌های کشاورزی محتمل است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ابزارهای سنجش از دور و مدل‌سازی در پایش، شبیه‌سازی، و تحلیل تغییرات کاربری و پوشش زمین، به‌ویژه در مناطق حساس، اهمیت بسزایی دارند و بر ضرورت برنامه‌ریزی‌های محیطی تأکید می‌کنند. در همین راستا، هدف این مطالعه با تمرکز بر حوضه فرامرزی هیرمند، که حدود ۸۵ درصد آن خارج از مرزهای ایران قرار دارد، بررسی جامع تغییرات کاربری زمین در سطح کل حوضه در گذشته و پیش‌بینی آن در آینده است. اهمیت این رویکرد در این است که تغییرات عمده در بالادست، بدون دخالت مدیریت داخلی، بر اکوسیستم‌های پایین‌دست تأثیر مستقیم می‌گذارد. تحلیل تغییرات در مقیاس کل حوضه برای دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب و اراضی در پایین‌دست، به‌ویژه در ایران، ضروری است. اطلاعات این تحقیق با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دور و GIS جمع‌آوری شده و پیش‌بینی توزیع و ساختار آینده کاربری زمین با بهره‌گیری از مدل CA-Markov انجام شده است. ترکیب این روش‌ها و رویکرد جامع، نه تنها دقت و جامعیت تحلیل‌های مکانی-زمانی را افزایش می‌دهد بلکه نقشی مؤثر در تدوین سیاست‌های زیست‌محیطی و راهبردهای مدیریتی پایدار ایفا می‌کند.

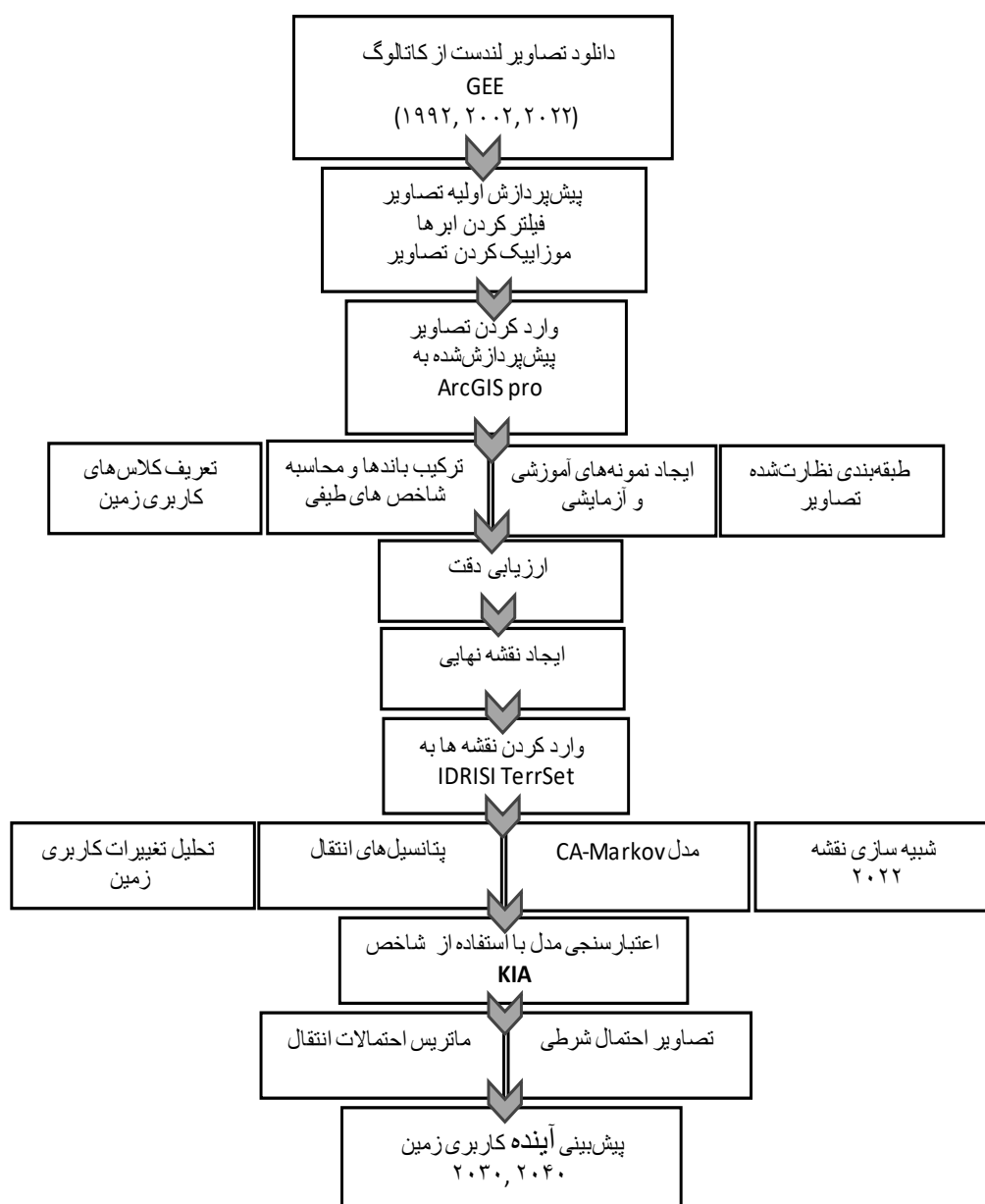
مواد و روش کار

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز فرامرزی هیرمند با وسعتی حدود ۲۸۰،۰۰۰ کیلومتر مربع بین ایران و افغانستان قرار دارد که تنها ۱۵ درصد آن در ایران واقع شده است (شکل ۱). این حوضه اقلیمی عمدتاً خشک و بیابانی دارد، با بارندگی سالانه ۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و توزیع ارتفاعی متنوع؛ مناطق مرتفع شمالی و شرقی (۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متر) سرچشمه اصلی جریان‌های آبی هستند و مناطق میانی (۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر) برای کشاورزی مناسب‌اند، در حالی که بخش‌های جنوبی و غربی (دشت سیستان) با مشکلاتی نظیر کمبود آب، بیابانزایی و فرسایش بادی مواجه هستند. رودخانه هیرمند، زهکش اصلی نیمه جنوبی افغانستان و منبع حیاتی آب شرب، کشاورزی و محیط‌زیست سیستان و همچنین نقش کلیدی در تأمین آب تالاب هامون دارد. کاربری اراضی در این حوضه متنوع و شامل مراتع، اراضی کشاورزی، بیابان، جنگل و مناطق مسکونی است. مراحل تحقیق شامل تهیه نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از تصاویر لندست، آشکارسازی تغییرات، تحلیل زنجیره مارکف و اجرای مدل CA-Markov در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. مراحل کار برای استخراج، تحلیل و شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی/پوشش زمین

منابع داده

داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور و پیش‌پردازش

در مطالعات مربوط به رونمایی و تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی در طبقه‌بندی کاربری و پوشش زمین، تصاویر چندطیفی Landsat به دلیل وجود داده‌های تاریخی طولانی‌مدت که در بایگانی آن‌ها موجود است، به‌طور گسترده استفاده می‌شود. در این مطالعه، از تصاویر چندزمانه لندست برای سال‌های ۱۹۹۲، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲ استفاده شد که توسط سنجنده‌های^۱ Landsat 5 (TM) و^۲ Landsat 8 (OLI) به‌دست آمدند. این داده‌ها از آرشیو رایگان داده‌های موجود در GEE با وضوح مکانی ۳۰ متر و در سیستم ژئودتیک جهانی WGS84^۳ استخراج شدند. پیش‌پردازش تصاویر شامل فیلتر کردن ابرها، موزاییک کردن تصاویر و هم‌پوشانی لایه‌ها و تغییر اندازه‌ها در GEE انجام شد. برای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌های زمانی مختلف، در نظر گرفتن پوشش مکانی بدون ابر و سایه، وضوح مکانی و طیفی نسبتاً بالا و همچنین

1. Landsat 5 Thematic Mapper

2. Landsat 8 Operational Land Imager

3. World Geodetic System 1984

تاریخ مربوط به فصل رشد گیاهان مشابه ضروری است. با توجه به محدودیت‌ها و مشکلات موجود در تهیه و انتخاب تصاویر مناسب، برای ایجاد یک تصویر ترکیبی از یک مقدار میانگین ۶ ماهه تصاویر (از ۱ آوریل تا ۳۱ سپتامبر) برای سال‌های ۱۹۹۲، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲ استفاده شد زیرا استفاده از تصاویر ترکیبی میانگین نتایج دقیق‌تری تولید می‌کند (Phan et al., 2020). بعد از انجام این مراحل از GEE خروجی گرفته شد و تصاویر برای تجزیه و تحلیل بیشتر به نرم افزار ArcGIS pro منتقل شد.

طبقه بندی تصاویر و نمونه‌های آموزشی و مرجع

طبقه‌بندی در نرم‌افزار ArcGIS Pro انجام شد. بدین منظور کلاس‌های کاربری مختلف با توجه به ویژگی‌های منطقه مشخص شد. تعاریف کلاس‌های کاربری اراضی در این مطالعه بر اساس کلاس‌های^۱ IPCC (هیأت بین‌دولتی تغییرات آب و هوا) بود، که شامل زمین‌های زراعی، جنگل‌ها، مراتع (فقیر و متراکم)، آب‌ها، شوره‌زارها، زمین‌های بایر و رها شده، مناطق برفی و مناطق مسکونی است. سپس طبقه‌بندی نظارت‌شده با استفاده از روش جنگل تصادفی (RF) برای هر تصویر به‌صورت جداگانه انجام و نقاط آموزشی برای هر کلاس مشخص شد. برای به دست آوردن نمونه‌های دقیق (داده‌های مرجع) از هر کلاس کاربری، برای هر سال تعداد ۵۰۰ نمونه به‌صورت تصادفی جمع‌آوری شد. از نمونه‌های آموزشی جمع‌آوری شده، ۷۰ درصد برای طبقه‌بندی و ۳۰ درصد برای ارزیابی استفاده شد. نمونه‌های آموزشی می‌توانند از بازدیدهای زمینی، تصاویر گوگل ارث، عکس‌های هوایی، ایجاد ترکیب رنگی کاذب بر روی تصاویر، محاسبه شاخص‌های مختلف، و گزارشات و نقشه‌های مرجع سازمان‌های مختلف تهیه شوند. به دلیل قرار گرفتن حدود ۸۵ درصد حوضه هیرمند در خاک افغانستان و محدودیت دسترسی میدانی، استفاده از داده‌های مرجع زمینی در این مطالعه امکان‌پذیر نبود. بنابراین، نقاط آموزشی و مرجع با ترکیبی از روش‌های (۱) تصاویر Google Earth، (۲) عکس‌های هوایی موجود، (۳) ابزارهایی نظیر ترکیب رنگ کاذب و (۴) محاسبه شاخص‌های طیفی مختلف انتخاب و ارزیابی شدند.

نمونه‌ها، پلیگون‌های آموزشی کوچک هستند و شامل پیکسل‌های همگن از یک کلاس خاص کاربری که ویژگی‌های بارز هر کلاس را دارا بودند انتخاب شدند. این نمونه‌ها باید معرف آن کلاس باشند و باید به تعدادی باشند که ویژگی‌های نمونه‌ها در آن به صورت دقیق و کامل آورده شده باشد. از نمونه‌های اشاره شده به‌عنوان داده‌های آموزشی استفاده شد تا تغییرات طیفی درون کلاسی و بین کلاسی کاربری‌ها به‌خوبی ثبت شود. برای تشخیص بهتر ویژگی‌های طیفی کلاس‌های مختلف، از شاخص‌های طیفی مختلفی مانند^۲ NDVI (شاخص پوشش گیاهی نرمال شده) برای تمایز پوشش گیاهی،^۳ SAVI (شاخص پوشش گیاهی با حذف اثر خاک) برای نواحی کم‌پوشش و زمین‌های بایر،^۴ NDWI (شاخص آبی نرمال شده) برای تشخیص بدنه‌های آبی و^۵ NDBI (شاخص ساخت و ساز نرمال شده) برای مناطق مسکونی و شهری استفاده شد. این شاخص‌ها به انتخاب بهتر نمونه‌های آموزشی و کاهش خطاهای بین کلاسی کمک کردند. برای دقت بیشتر، مناطق آموزشی باید به‌طور کامل نمایانگر تنوع موجود در هر کلاس کاربری باشند (مثلاً برای مراتع، مناطق با تراکم‌های مختلف در نظر گرفته شد). مدل آموزش دیده شده روی کل تصویر اعمال شد. سپس، برای بررسی دقت طبقه‌بندی (درصد پیکسل‌های درست طبقه بندی شده)، از شاخص‌های آمار دقت کلی^۶ و ضریب کاپا^۷ استفاده شد. علاوه بر آن، برای برآورد دقت کلی و دقت تک تک کلاس‌های کاربری از عامل‌های آماری ماتریس خطا یعنی دقت تولید کننده و دقت استفاده کننده نیز استفاده شد.

ارزیابی دقت طبقه بندی

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای زمانی کامل می‌شود که دقت آن‌ها ارزیابی شده باشد (اسمعیلی و نگهبان، ۱۴۰۰). معمول‌ترین و پرکاربردترین روش ارزیابی صحت نقشه‌های تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌های دقت کلی و شاخص کاپا هستند که بر اساس نمونه‌های مرجع یا داده‌های زمینی و توسط ماتریس خطا به دست می‌آیند (عربی علی‌آباد و همکاران، ۱۴۰۰). با توجه به این که این پارامترها تنها به کل طبقه‌بندی مربوط هستند و اطلاعاتی درباره دقت تک‌تک کلاس‌ها یا توزیع مکانی خطا ارائه نمی‌کنند، برای ارزیابی دقت هر یک از کلاس‌ها، از دقت تولیدکننده و دقت کاربر نیز استفاده شد تا نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۹۲، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲ صحت‌سنجی شوند. ماتریس خطا از مقایسه تصویر طبقه‌بندی شده با داده‌های مرجع یا واقعیت زمینی به دست می‌آید. عناصر روی قطر اصلی ماتریس

1. Intergovernmental Panel on Climate Change

2. Normalized Difference Vegetation Index

3. Soil Adjusted Vegetation Index

4. Normalized Difference Water Index

5. Normalized Difference Built-up Index

6. Overall accuracy

7. Kappa Coefficient

نشان‌دهنده پیکسل‌هایی هستند که به‌درستی شناسایی شده‌اند، درحالی‌که عناصر خارج از قطر بیانگر پیکسل‌هایی با طبقه‌بندی نادرست هستند. با استفاده از این ماتریس، دقت کلی و ضریب کاپا محاسبه می‌شود (کیانپور کل خواجه و همکاران، ۱۴۰۱). مقدار این ضریب در بازه صفر تا یک قرار دارد و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالاتر نقشه و تطابق بیشتر آن با واقعیت است. برای این منظور، از رابطه (۱) برای محاسبه دقت کلی (OA) و از رابطه (۲) برای محاسبه شاخص کاپا (KI) استفاده شد (Foody, 2020; Thomlinson et al., 1999).

$$OA = \frac{Tr}{Tn} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، OA دقت کلی؛ T_r تعداد کل پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده؛ و T_n تعداد کل پیکسل‌ها است.

$$KI = \frac{N \sum_{i=1}^n a_{i,i} - \sum_{i=1}^n (T_i + F_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^n (T_i + F_i)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، i نمایانگر شماره کلاس؛ n تعداد کلاس؛ N تعداد کل پیکسل‌ها در ماتریس خطا؛ $a_{i,i}$ تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده برای کلاس i است که مقادیر آن در امتداد قطر اصلی ماتریس خطا قرار دارند و نشان‌دهنده تطابق کامل بین طبقه‌بندی و داده‌های مرجع یا واقعیت زمینی برای هر کلاس هستند؛ F_i تعداد کل پیکسل‌ها برای کلاس i و T_i تعداد پیکسل‌های واقعیت زمینی یا مرجع برای کلاس i است.

برای محاسبه شاخص‌های دقت تولیدکننده و دقت استفاده‌کننده نیز از ماتریس خطا استفاده می‌شوند که اطلاعات مهمی در مورد عملکرد طبقه‌بندی ارائه می‌دهد (Li & Yeh, 2002). دقت تولیدکننده، نشان می‌دهد که چه تعداد از پیکسل‌های یک کلاس خاص به‌درستی به همان کلاس طبقه‌بندی شده‌اند. به عبارت دیگر، این معیار نمایانگر توانایی مدل در شناسایی صحیح یک کلاس خاص است و از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$PA = \frac{a_{i,i}}{T_i} \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، $a_{i,i}$ تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده برای کلاس i (در امتداد قطر اصلی ماتریس خطا) و T_i تعداد پیکسل‌های واقعیت زمینی یا مرجع برای کلاس i است. دقت استفاده‌کننده نشان می‌دهد که چه تعداد از پیکسل‌هایی که به یک کلاس خاص طبقه‌بندی شده‌اند، واقعاً به همان کلاس تعلق دارند. این معیار، میزان اطمینان کاربران به پیش‌بینی‌ها برای یک کلاس خاص را ارزیابی می‌کند و از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$UA = \frac{a_{i,i}}{F_i} \times 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن، $a_{i,i}$ تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده برای کلاس i (در امتداد قطر اصلی ماتریس خطا) و F_i تعداد کل پیکسل‌ها برای کلاس i است.

مدل‌ساز تغییر زمین

در این بخش تغییرات کاربری زمین بین کلاس‌های مختلف در طول زمان تجزیه و تحلیل شد. مدل‌ساز تغییر زمین^۱ (LCM) درک بهتری از عملکرد سیستم‌های استفاده از زمین مانند تجزیه و تحلیل تغییرات، پیش‌بینی تغییر، مطالعات ارزیابی تاثیر و پشتیبانی مورد نیاز برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در توسعه پایدار دارد. در LCM سه الگوریتم برای مدل‌سازی متغیرهای انتقال انتخابی استفاده می‌شود: شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۲ (MLP)، SimWeight، و رگرسیون لجستیک. در این مطالعه، شبکه عصبی MLP برای مدل‌سازی استفاده شد. سپس انتقال‌ات انتخابی در یک زیرمدل جمع‌آوری شده و زیرمدل‌ها ارزیابی شدند. MLP قابلیت مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای ورودی را دارد و به‌طور مؤثری الگوهای پیچیده را شناسایی می‌کند و برای مدل‌سازی چندین متغیر به صورت همزمان، بهترین گزینه است. این شبکه همچنین انعطاف‌پذیر است و می‌تواند انواع مختلف داده‌ها، از جمله متغیرهای کمی و دسته‌بندی را پردازش کند. ابزار پتانسیل انتقال در LCM نقشه‌های پتانسیل انتقال را با دقت قابل قبول برای اجرای مدل‌سازی واقعی تولید می‌کند. این ابزار،

انتقال‌ها را به مجموعه‌ای از زیرمدل‌ها گروه‌بندی می‌کند و قدرت بالقوه متغیرهای موجود را بررسی می‌کند. متغیرها می‌توانند به صورت ایستا (بدون تغییر در طول زمان مانند شیب و مدل رقومی ارتفاعی) یا پویا (وابسته به زمان مانند جاده‌ها و منابع آبی) به مدل اضافه شوند.

وضعیت زیرمدل‌های انتقال

در این مرحله فهرستی از تمامی انتقال‌هایی که از زمان t1 تا t2 رخ داده‌اند را ارائه می‌دهد. برای حوضه‌ی هیرمند، تمامی انتقال‌هایی که میان کلاس‌های پوشش کاربری زمین رخ داده‌اند در نظر گرفته شده است.

محدودیت‌ها و عوامل

محدودیت‌ها معیارهایی هستند که گسترش یک نوع خاص کاربری زمین را محدود می‌کنند. محدودیت‌های فیزیکی می‌توانند شامل وجود بدنه‌های آبی، مناطق ساخته‌شده، شبکه جاده‌ای و غیره باشند. عوامل معیارهایی هستند که تناسب یک گزینه خاص برای فعالیت موردنظر را افزایش یا کاهش می‌دهند. برخلاف محدودیت‌ها، عوامل درجه‌ای از تناسب را برای یک منطقه جهت تغییر ارائه می‌دهند (معمولاً بر اساس فاصله). در این مطالعه، عوامل زیر ایجاد شده‌اند: مدل رقومی ارتفاع (DEM)، جهت جغرافیایی (Aspect)، شیب (Slope)، و فاصله از شبکه جاده‌ای (Distance from road). در جدول ۱ اطلاعات مربوط به منابع داده‌ها، مشخصات تصاویر ماهواره‌ای و ابزارهای استفاده‌شده در مطالعه ارائه شده است.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به منابع داده استفاده شده در مطالعه

مشخصات	سال/دوره زمانی	منبع داده	نوع داده
رزولوشن مکانی: ۳۰ متر باند‌های طیفی: باندهای مرئی، NIR ^۲ ، SWIR ^۳	1992, 2002, 2022	Landsat TM, OLI	تصاویر ماهواره‌ای
باندهای NIR و Red	1992, 2002, 2022	محاسبه از تصاویر لندست	NDVI شاخص
باندهای NIR و Green	1992, 2002, 2022	محاسبه از تصاویر لندست	NDWI شاخص
باندهای NIR و SWIR	1992, 2002, 2022	محاسبه از تصاویر لندست	NDBI شاخص
باندهای NIR و Red	1992, 2002, 2022	محاسبه از تصاویر لندست	SAVI شاخص
تصاویر با وضوح بالا برای اعتبارسنجی	1992, 2002, 2022	تصاویر Google Earth عکس‌های هوایی منطقه	داده‌های مرجع
رزولوشن مکانی: ۳۰ متر	-	ASTER	DEM
-	-	مشتق شده از DEM	نقشه شیب
-	-	مشتق شده از DEM	نقشه جهت شیب
فاصله رستری به جاده‌های موجود (متر)	-	مشتق شده از نقشه جاده‌ها	فاصله تا جاده

برای پیش‌بینی الگوی آینده LULC در منطقه مورد مطالعه، از ترکیب زنجیره مارکوف و مدل اتوماتای سلولی (CA-Markov) استفاده شد. در این حالت اتوماتای سلولی به زنجیره مارکوف پیوستگی مکانی و همچنین انتقالات احتمالی مکانی که در یک منطقه خاص طی یک دوره زمانی رخ می‌دهند را اضافه می‌کند. این ترکیب، پیشرفتی در مدل‌سازی دینامیک زمانی-مکانی ایجاد می‌کند (Wang et al., 2021; Tadesse et al., 2021; Subedi et al., 2013).

برای بررسی شباهت بین نقشه تولید شده و نقشه شبیه‌سازی‌شده، لازم است که داده‌های خروجی با داده‌های واقعی به صورت کمی مقایسه شوند. در نهایت برای ارزیابی سطح دقت خروجی مدل، نقشه کاربری اراضی شبیه‌سازی‌شده سال ۲۰۲۲ با نقشه تولید شده بر اساس روش KIA^۴ مقایسه شد؛ روشی که به‌طور گسترده برای اعتبارسنجی خروجی‌های مدل‌های LULC استفاده می‌شود (Wang et al., 2021; Aminiparsa & Salehi, 2016). ماژول VALIDATE در IDRISI TerrSet به کار گرفته شد. شاخص توافق کاپا (KIA) برای بررسی اعتبار پیش‌بینی استفاده شد. دامنه مقادیر KIA و تفسیر این شاخص در جدول ۲ ارائه شده است.

1. Digital Elevation Model
2. Near Infrared
3. Short-Wave Infrared
4. Kappa Index of Agreement

جدول ۲. دامنه مقادیر شاخص KIA (قتباس از: Altman, 1990)

سطح دقت خروجی مدل	دامنه مقادیر شاخص KIA
دقت ضعیف	کمتر از ۰/۲۰
دقت نسبتاً ضعیف	۰/۲۰-۰/۴۰
دقت متوسط	۰/۴۰-۰/۶۰
دقت خوب	۰/۶۰-۰/۸۰
دقت بسیار خوب	۰/۸۰-۱/۰۰

پس از اعتبار سنجی خروجی مدل چنانچه شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار بود الگوی آینده تغییرات کاربری اراضی بر اساس سناریوهای مختلف شبیه‌سازی می‌شود. توسعه سناریوهای تغییر کاربری زمین به اهداف تحقیق، مقیاس مکانی، مدل مورد استفاده، ویژگی‌های طبیعی و اجتماعی-اقتصادی و محدودیت‌های منطقه مورد مطالعه وابسته است. معمول‌ترین سناریوها برای پیش‌بینی تغییر کاربری زمین، سناریوهای محتمل می‌باشد که با توجه به روند موجود در گذشته استفاده می‌شود. باید توجه داشت که استفاده از روندهای گذشته برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین تنها در شرایطی معتبر است که شرایط محیطی، اقتصادی، اجتماعی، و سیاسی مشابه گذشته باقی بمانند. در غیر اینصورت استفاده از این روندها دقیق و کافی نیست و نیاز به تعریف سناریوهای فرضی وجود دارد (Zhang et al., 2021).

دسته دیگر سناریوها، سناریوهای حساسیت کاربری زمین هستند که تمرکز آن‌ها بر روی انواع کاربری‌هایی است که در دهه‌های اخیر افزایش یا کاهش داشته‌اند مانند زمین‌های کشاورزی، مناطق شهری و یا مراتع. در این مطالعه، چهار کلاس کاربری شامل اراضی کشاورزی، مراتع، اراضی بایر و شوره‌زارها برای سناریوهای حساسیت در نظر گرفته شدند و سایر دسته‌های کاربری ثابت فرض شدند عواملی مانند تغییرات مشاهده شده کاربری زمین بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲، دسترسی به زمین‌های مناسب برای کشاورزی و مستندات و گزارش‌های منتشر شده در تعریف سناریوها لحاظ شدند (جدول ۳).

جدول ۳. سناریوی تعریف شده برای شبیه‌سازی نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰

نوع کاربری	۲۰۳۰	۲۰۴۰
اراضی کشاورزی	+۲۰	+۳۰
اراضی بایر و رها شده	-۲۰	-۲۵
شوره‌زار	.	-۲
مراتع	.	-۳

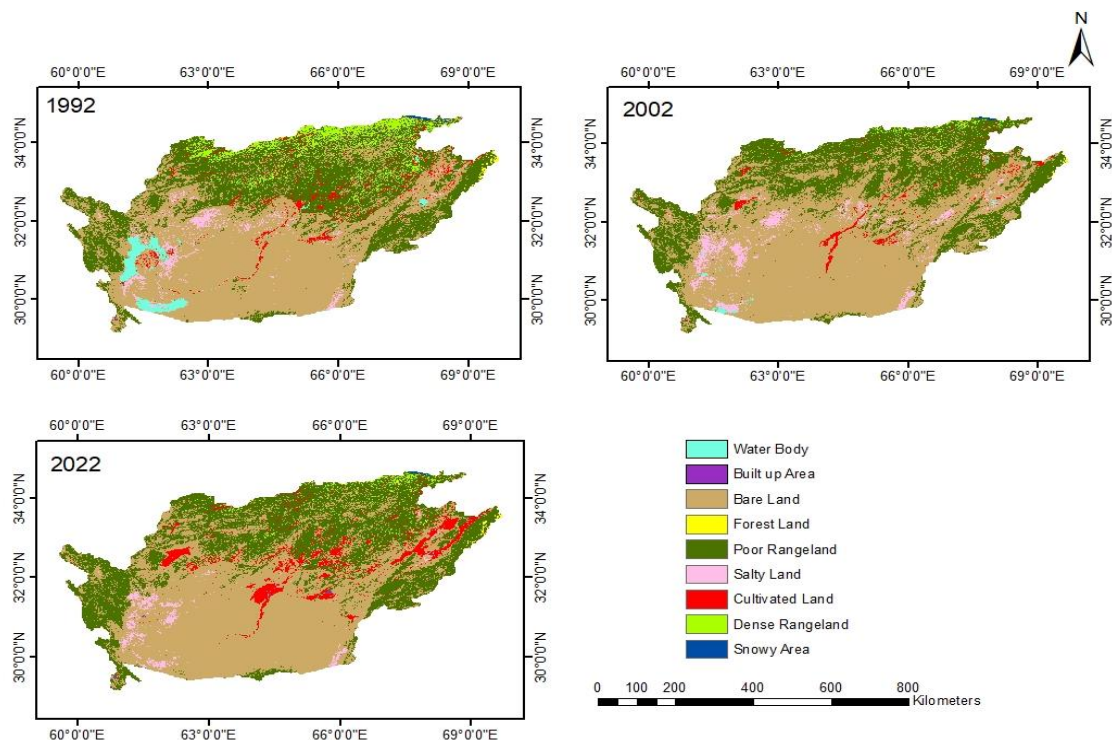
نتایج و بحث

برای بررسی روند تغییرات کاربری اراضی، یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲) در نظر گرفته شد. نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی با استفاده از روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی (RF) و تعیین ۹ کلاس کاربری شامل، پهنه‌های آبی^۱، مناطق مسکونی^۲، اراضی بایر و لم یزرع^۳، جنگل^۴، مراتع متراکم^۵، مراتع فقیر^۶، اراضی کشاورزی^۷، مناطق برفی^۸ و شوره‌زارها^۹ طبقه‌بندی شدند (شکل ۳). دقت داده‌های سنجش از دور برای نتایج طبقه‌بندی تحلیل شد و نتایج اعتبار سنجی این طبقه‌بندی شامل دقت تولید کننده و استفاده کننده برای هر کلاس کاربری، ضرایب کاپا و دقت کلی برای هر سال در جدول ۴ ارائه شده است. این مقادیر نشان‌دهنده دقت بالا و قابل اطمینان در طبقه‌بندی برای هر نقشه است. این نتایج در مقایسه با مطالعات مشابه مانند (Mondal et al., 2020; Hamad et al., 2018) که از تصاویر Landsat برای تحلیل تغییرات کاربری زمین در مناطق وسیع استفاده کرده‌اند،

- 1 . Water Body
- 2 . Built-up Area
- 3 . Bare Land
- 4 . Forest
- 5 . Dense Rangeland
- 6 . Poor Rangeland
- 7 . Cultivated Land
- 8 . Snowy Area
- 9 . Salty Land



قابل تایید است. مساحت مربوط به هر کلاس کاربری اراضی و درصد تغییرات آن از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۰ در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۳. نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی استخراج شده برای سال‌های ۱۹۹۲، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲

جدول ۴. ارزیابی دقت تولید کننده و استفاده کننده و صحت کلی و شاخص کاپا در تصاویر طبقه‌بندی شده

۲۰۲۲	۲۰۰۲	۱۹۹۲	دقت تولیدکننده (Producer's accuracy)
۷۹/۲۰	۸۹/۲۴	۸۸/۷۶	پهنه آبی
۹۲/۴۰	۷۶/۹۲	۸۴/۷۶	مناطق مسکونی
۹۰/۴۰	۸۲/۹۷	۸۳/۸۷	اراضی بایر و لم‌یزرع
۷۶/۰۱	۷۰/۹۸	۸۱/۱۴	اراضی جنگلی
۸۴/۷۸	۷۶/۵۶	۸۲/۲۹	مراعات فقیر
۸۲/۱۶	۸۱/۳۰	۸۷/۱۹	شوره‌زار
۸۹/۲۸	۹۵/۲۳	۸۳/۱۲	اراضی کشاورزی
۹۱/۱۲	۸۲/۳۴	۹۱/۴۵	مراعات متراکم
۸۷/۵۹	۸۳/۳۴	۷۹/۵۲	مناطق برفی
۲۰۲۲	۲۰۰۲	۱۹۹۲	دقت استفاده کننده (User's accuracy)
۹۴/۱۱	۸۷/۶۷	۸۱/۱۳	پهنه آبی
۸۸/۴۸	۸۳/۲۳	۸۹/۰۹	مناطق مسکونی
۸۷/۷۰	۸۶/۰۲	۸۵/۱۵	اراضی بایر و لم‌یزرع
۷۹/۶۷	۸۳/۰۰	۸۱/۳۹	اراضی جنگلی
۸۱/۲۵	۷۷/۵۰	۸۰/۵۵	مراعات فقیر
۷۸/۶۹	۷۹/۴۳	۹۰/۲۱	شوره‌زار
۸۰/۶۴	۸۲/۱۹	۷۷/۴۱	اراضی کشاورزی
۸۹/۰۷	۸۷/۶۹	۸۹/۳۲	مراعات متراکم
۸۶/۴۵	۸۲/۵۲	۸۱/۶۰	مناطق برفی
۸۶/۵۴	۸۳/۲۶	۸۱/۷۴	دقت کلی (Overall Accuracy (%))
۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۷۸	ضریب کاپا (Kappa Coefficient)

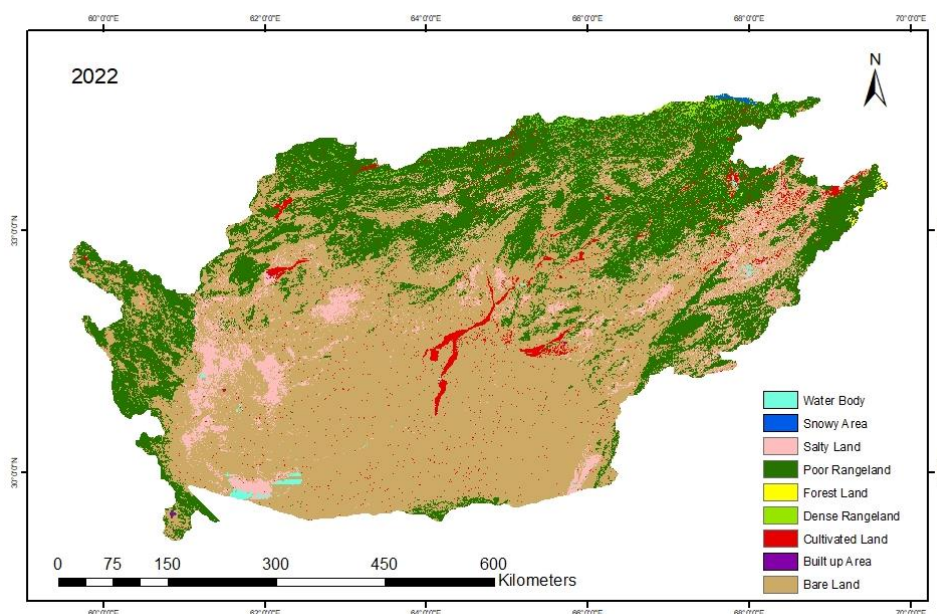
جدول ۵. کلاس‌های کاربری موجود در منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۰۲

نوع کاربری	۱۹۹۲ (km ²)	% از مساحت حوضه	۲۰۰۲ (km ²)	% از مساحت حوضه	تغییر مساحت (ha) ۱۹۹۲-۲۰۰۲	% از مساحت حوضه
پهنه آبی	۶۴۳۶/۹۱	۲/۲۶	۸۶۶/۴۳	۰/۳۱	-۵۵۷۰/۴۸	-۱/۹۷
مناطق مسکونی	۵۴۲/۸۹	۰/۲۰	۵۶۹/۷۷	۰/۲۰	۲۶/۸۸	۰/۰۱
اراضی بایر و لم‌یزرع	۱۴۷۷۷۱/۹۱	۵۲/۳۴	۱۶۹۷۵۸/۵۷	۶۰/۰۹	۲۱۹۸۶/۶۶	۷/۷۷
اراضی جنگلی	۵۸۳/۴۹	۰/۲۱	۱۶۷/۵۵	۰/۰۶	-۴۱۵/۹۴	-۰/۱۵
مراعات فقیر	۹۷۵۱۷/۰۲	۳۴/۴۹	۹۱۹۹۹/۵۵	۳۲/۵۳	-۵۵۱۷/۴۷	-۱/۹۵
شوره‌زار	۸۳۴۷/۸۷	۲/۹۲	۱۲۱۸۸/۸۲	۴/۳۱	۳۹۴۰/۹۵	۱/۳۹
اراضی کشاورزی	۷۶۹۹/۵۰	۲/۷۲	۴۸۶۷/۶۳	۱/۷۲	-۲۸۳۱/۸۷	-۱/۰۰
مراعات متراکم	۱۳۶۴۲/۹۶	۴/۸۳	۲۲۰۸/۴۰	۰/۷۸	-۱۱۴۳۴/۵۶	-۴/۰۴
مناطق برفی	۳۶۱/۰۴	۰/۱۳	۱۷۶/۸۷	۰/۰۶	-۱۸۴/۱۷	-۰/۰۷

انواع کاربری اراضی غالب در حوضه هیرمند شامل اراضی بایر و مراعات بودند که این نسبت در سال ۱۹۹۲ در مجموع حدود ۹۱ درصد از کل حوضه را شامل می‌شد (اراضی بایر ۵۲٪ و مراعات ۳۹٪) و در سال ۲۰۰۲ این مقدار به ۹۳ درصد رسیده است (اراضی بایر ۶۰٪ و مراعات ۲۳٪). نتایج به درستی نشان می‌دهد که مراعات متراکم در این دوره در طول ۱۰ سال با کاهش ۴ درصد از مساحت کل حوضه بیش‌ترین میزان کاهش را داشته است. مساحت مراعات فقیر و جنگل‌ها به ترتیب با کاهش حدود ۲ و ۱۵ درصد همراه بوده است. اراضی بایر با افزایش حدود ۸ درصدی از مساحت کل حوضه مواجه شده‌اند. از طرفی به دلیل خشکسالی، تغییر در منابع آبی و اراضی کشاورزی به ترتیب با کاهش ۲ و ۱ درصد از مساحت کل حوضه همراه بوده است. شایان ذکر است که قسمت اعظم بدنه آبی موجود در منطقه مربوط به تالاب بین‌المللی هامون است که طی سال‌های ۱۹۹۲-۲۰۰۲ حدود ۷۵ درصد از مساحت خود را از دست داده است. در این دوره بیش‌ترین افزایش مساحت مربوط به اراضی بایر با رشد ۷/۷۷ درصدی و مناطق مسکونی با افزایش ۰/۰۱ درصد بوده است. نتایج این بخش از مطالعه مشابه و هم‌راستا با پژوهش‌های پیشین در خصوص تغییرات کاربری اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. روندهای مشابه در کاهش جنگل‌ها، مراعات و منابع آبی و افزایش اراضی کشاورزی و مسکونی در حوضه‌های دیگر توسط پژوهشگرانی مانند (Jana et al., 2022; Tadesse et al., 2021; Leta et al., 2021; Tesfaye et al., 2024; همکاران، ۱۴۰۰) گزارش شده است. برای مثال، نتایج این مطالعه با یافته‌های (Tefaye et al., 2024) همخوانی دارد که گسترش اراضی مسکونی و زمین‌های بایر را همراه با کاهش جنگل‌ها و مراعات نشان دادند. این روند نیز در حوضه هیرمند قابل مشاهده است. علاوه بر این، (Osman et al., 2023) نیز به کاهش جنگل‌ها و مراعات و افزایش اراضی کشاورزی و مسکونی در شرق سودان اشاره کرده‌اند. نقشه کاربری اراضی برای سال ۲۰۲۲ با استفاده از مدل CA-Markov شبیه‌سازی شد (شکل ۴). برای شبیه‌سازی تغییرات در آینده، مدل زنجیره مارکوف برای برآورد ماتریس احتمالی انتقال با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۰۲ و با فرض ادامه روند مدیریت فعلی اجرا شد و سپس خروجی برای پیش‌بینی کاربری اراضی سال ۲۰۲۲ مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۴). مساحت هر کدام از کلاس‌های کاربری موجود در منطقه برای نقشه تولید شده از تصاویر لندست و نقشه شبیه‌سازی شده در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. مساحت (km²) هر کدام از کلاس‌های کاربری موجود در منطقه برای نقشه تولید شده با تصاویر لندست و شبیه‌سازی شده ۲۰۲۲

نوع کاربری	نقشه تولید شده ۲۰۲۲	% از مساحت حوضه	نقشه شبیه‌سازی شده ۲۰۲۲	% از مساحت حوضه
پهنه آبی	۱۳۷/۳۶	۰۵/۰	۴۲/۸۸۱	۳۱/۰
مناطق مسکونی	۶۸۷/۱۱	۲۴/۰	۵۶/۶۱۲	۲۲/۰
اراضی بایر و لم‌یزرع	۱۵۳۳۳۱/۹۶	۲۳/۵۴	۴۹/۱۶۰۳۲۴	۷۱/۵۶
اراضی جنگلی	۴۶۰/۳۰	۱۶/۰	۷۱/۱۵۷	۰۶/۰
مراعات فقیر	۱۰۲۵۷۶/۶۹	۲۸/۳۶	۶۰/۹۰۵۴۲	۰۳/۳۲
شوره‌زار	۵۴۶۵/۶۲	۹۳/۱	۴۸/۱۶۷۳۵	۹۲/۵
اراضی کشاورزی	۱۶۶۳۴/۸۱	۸۸/۵	۶۴/۱۰۸۰۳	۸۲/۳
مراعات متراکم	۳۳۳۳/۳۲	۱۸/۱	۱۵/۲۴۸۷	۸۸/۰
مناطق برفی	۱۸۶/۴۳	۰۷/۰	۴۶/۱۷۹	۰۶/۰



شکل ۴. نقشه‌های کاربری اراضی شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۲

در مرحله بعد، اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی کاربری اراضی برای ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص کاپا انجام شد. برای اعتبارسنجی مدل، میزان شباهت بین نقشه شبیه‌سازی شده سال ۲۰۲۲ و نقشه تولید شده با تصاویر لندست سال ۲۰۲۲ مقایسه شد (جدول ۷). شاخص کاپا سطح توافق بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده را اندازه‌گیری می‌کند. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان می‌دهد که تمامی مقادیر شاخص Kappa بالاتر از ۰/۸۲ بودند و بنابراین به درستی برای شبیه‌سازی نقشه‌های کاربری سال‌های آینده مورد استفاده قرار گرفتند (Aminiparsa & Salehi, 2016).

جدول ۷. مقادیر شاخص کاپا برای نقشه کاربری اراضی شبیه‌سازی شده و تولید شده سال ۲۰۲۲

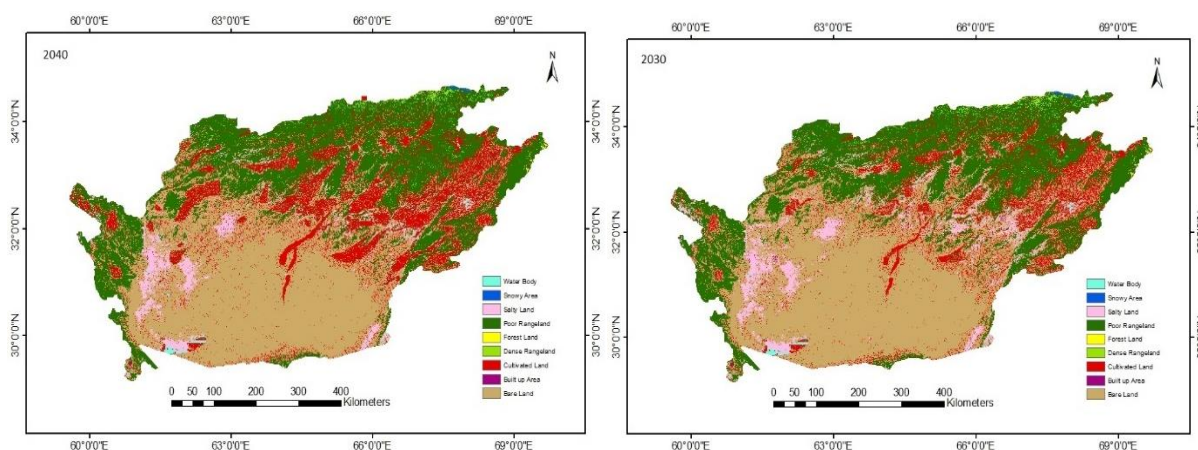
مقدار	تعریف	Kappa Index of Agreement
۰/۸۶۴۸	Kappa for no information	Kno
۰/۸۸۰۲	Kappa for grid-cell level location	K location
۰/۸۸۰۲	Kappa for stratum-level location	K location Starta
۰/۸۲۱۰	KIA	K standard

بررسی مقادیر نقشه تولید شده و شبیه‌سازی شده کاربری‌های اراضی در سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که برخی از کاربری‌ها بیش‌برآورد و برخی دیگر کم‌برآورد شده‌اند. در کاربری بدنه‌های آبی، مساحت مناطق شبیه‌سازی شده در مقایسه با مقدار واقعی حدود ۶ برابر بیش‌برآورد شده است. این اختلاف می‌تواند دقت پایین تصاویر ماهواره‌ای در شناسایی بدنه‌های کوچک آبی، یا تغییرات فصلی سطح آب، رخ داده باشد. همچنین، محدودیت‌های مدل‌سازی و عدم شناسایی دقیق این تغییرات در الگوریتم مدل‌سازی نیز ممکن است تأثیرگذار باشد. به‌طور مشابه در مورد شوره‌زارها و اراضی بایر به ترتیب با بیش‌برآوردی سه‌برابری و ۲/۵ برابری همراه بوده که ممکن است به دلیل طبقه‌بندی اشتباه مناطق مشابه یا تمایل مدل به تعمیم تغییرات سایر کاربری‌ها (مانند مراتع ضعیف یا اراضی کشاورزی رها شده) به این کلاس‌ها رخ داده باشد. در مقابل، مراتع ضعیف و متراکم به ترتیب ۴ و ۰/۳ درصد کم‌برآورد شده‌اند که می‌تواند ناشی از خطای طبقه‌بندی یا تغییرات واقعی در این کاربری‌ها باشد. علت کم‌برآوردی ۲ درصدی در اراضی کشاورزی نیز احتمالاً به دلیل نادیده گرفتن عواملی مانند توسعه آبیاری است. در مناطق جنگلی، برفی و مسکونی به دلیل کوچک بودن مساحت آنها در مقیاس کل حوضه و محدودیت در داده‌های آموزشی باشد. با این حال، تطابق بالای مناطق مسکونی (۰/۲۴ تولید شده و ۰/۲۲ شبیه‌سازی شده) و مناطق برفی (۰/۰۷ تولید شده و ۰/۰۶ شبیه‌سازی شده) نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در این کلاس‌ها است. با این وجود، با توجه به بالا بودن شاخص کاپا (۰/۸۲)، هرچند مقادیر بیش‌برآورد و کم‌برآورد در برخی از کاربری‌های اراضی مشاهده می‌شود، اما این شاخص نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی

تغییرات است. شاخص کاپا به‌طور خاص توانایی مدل را در تشخیص الگوهای تغییر و طبقه‌بندی صحیح اراضی در سطح کلی ارزیابی می‌کند. بنابراین، اگرچه ممکن است در برخی کلاس‌ها مانند بدنه‌های آبی و اراضی شور بیش‌برآورد یا مراتع کم‌برآورد شوند، این ناهماهنگی‌ها به دلیل محدودیت‌های داده‌های ورودی، تنوع مکانی و زمانی، یا دشواری تفکیک برخی کلاس‌ها است. از طرفی مدل‌سازی تغییرات اراضی فرایندی چندبعدی است که تحت تأثیر عوامل پیچیده انسانی و طبیعی قرار دارد. بنابراین، عملکرد مدل را باید به صورت یک کل و جامع در نظر گرفت. این موضوع تأیید می‌کند که مدل با وجود برخی اختلافات محلی، ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آینده اراضی است.

به طور کلی تحلیل تغییرات مشاهده شده در روند کاربری زمین طی دو دوره ۱۹۹۲-۲۰۰۲ و ۲۰۰۲-۲۰۲۲، نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در روند توسعه زمین‌های کشاورزی و منابع آب موجود می‌باشد. این تفاوت‌ها بیانگر وجود عوامل پیچیده‌ای است که بررسی دقیق آن‌ها برای درک صحیح الگوهای تغییر، ضروری به نظر می‌رسد. از مهم‌ترین دلایل آن، تغییر در سیاست‌ها و شرایط اقتصادی است که می‌تواند به‌طور مستقیم بر گسترش یا کاهش کاربری خاصی مانند زمین‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه اثرگذار باشد. سیاست‌های حمایتی دولت مانند افزایش بارانه‌های کشاورزی یا توسعه آبیاری و همچنین افزایش جمعیت، ممکن است به افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی و توسعه زمین‌های کشاورزی منجر شده باشد. تغییرات اقلیمی و محیطی نیز می‌تواند نقش بسزایی در تغییر الگوهای کاربری زمین داشته باشد. تغییر در الگوی بارندگی، خشکسالی‌های شدید یا کاهش دما ممکن است بر کاهش یا افزایش زمین‌های کشاورزی تأثیر گذاشته باشد. رخدادهایی نظیر سیلاب‌ها، زلزله یا پروژه‌های احیای مراتع نیز ممکن است موجب تغییرات عمده‌ای در الگوهای کاربری زمین شده باشد.

نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش زمین برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ بر اساس سناریوهای حساسیت کاربری زمین و با استفاده از مدل CA-Markov شبیه‌سازی شد (شکل ۵). نتایج نشان داد چنانچه روند مدیریتی در این حوضه بر اساس سناریوهای تعریف شده باشد انتظار می‌رود که از سال ۱۹۹۲ تا سال ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ مساحت زمین‌های کشاورزی از ۲/۷۲ درصد به ترتیب حدود ۲۳/۹۳ و ۳۴ درصد از کل مساحت حوضه خواهد رسید که نشان‌دهنده روند افزایشی است. مساحت مراتع متراکم روندی کاهشی و از ۴/۸۳ درصد در سال ۱۹۹۲ به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۸ درصد در ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ خواهد رسید و مساحت مراتع با پوشش کم از ۳۴/۴۹ درصد در سال ۱۹۹۲ به ۳۱/۴۷ درصد در سال ۲۰۳۰ و ۲۸/۹۲ درصد در سال ۲۰۴۰ خواهد رسید. پیش‌بینی می‌شود که شوره‌زارها روندی افزایشی را تجربه کنند و از ۲/۹۲ درصد در سال ۱۹۹۲ به ۶/۵۳ درصد در ۲۰۲۰ و ۴/۵۸ درصد در ۲۰۴۰ خواهند رسید. پوشش مناطق ساخته‌شده توسط انسان به ۰/۲۳ درصد در سال ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ خواهد رسید. که در مقایسه با مقدار آن در سال ۱۹۹۲ (۰/۲ درصد) افزایش چندانی نشان نمی‌دهد. عدم افزایش مناطق شهری و مسکونی در حوضه آبریز هیرمند ناشی از ترکیبی از عوامل امنیتی، اقتصادی، محیطی و برنامه‌ریزی ضعیف بوده است. بی‌ثباتی سیاسی و جنگ‌های طولانی‌مدت، مهاجرت، اقتصاد کشاورزی محور و تمرکز بر کشاورزی و آبیاری، محدودیت منابع آب، افزایش شوری زمین و نبود زیرساخت‌های شهری پایدار از مهمترین دلایل عدم گسترش مناطق مسکونی در این حوضه بوده است.



شکل ۵. نقشه‌های کاربری اراضی شبیه‌سازی شده برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰

جدول ۸. مساحت (km^2) هر کدام از کلاس‌های کاربری موجود در منطقه برای نقشه‌های شبیه‌سازی شده ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰

نوع کاربری	۲۰۳۰	% از مساحت حوضه	۲۰۴۰	% از مساحت حوضه
پهنه آبی	۹۶۵/۹۷	۰/۳۴	۱۰۴۸/۵۶	۰/۳۷
مناطق مسکونی	۶۴۰/۰۲	۰/۲۳	۶۵۸/۷۴	۰/۲۳
اراضی بایر و لم‌یزرع	۱۰۲۴۳۳/۳۲	۳۶/۲۳	۱۵۸۰۷۷/۱۰	۳۰/۹۱
اراضی جنگلی	۱۵۹/۶۱	۰/۰۶	۱۶۱/۱۴	۰/۰۶
مراعات فقیر	۸۹۷۴۲/۵۵	۳۱/۷۴	۸۸۷۹۵/۳۸	۲۸/۹۲
شوره‌زار	۱۸۴۶۳/۷۶	۶/۵۳	۲۰۰۰۸/۶۶	۴/۵۸
اراضی کشاورزی	۶۷۶۹۸/۰۹	۲۳/۹۳	۱۱۳۱۴/۰۱	۳۴/۰۰
مراعات متراکم	۲۴۷۳/۲	۰/۸۷	۲۴۷۷/۴۸	۰/۸۸
مناطق برفی	۱۸۱/۹۴	۰/۰۶	۱۸۳/۴۲	۰/۰۶

نتیجه‌گیری

حوضه آبریز فرامرزی هیرمند، به دلیل موقعیت استراتژیک و بحران‌های زیست‌محیطی چند دهه اخیر نظیر خشکسالی‌های شدید، طوفان‌های گردوغبار، از بین رفتن پوشش گیاهی و گسترش بیابان، با چالش‌های جدی مواجه بوده است. در چنین شرایطی، ارزیابی دقیق و به‌روز تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین، گامی حیاتی برای مدیریت پایدار زمین و منابع طبیعی این منطقه محسوب می‌شود. در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ای لندست طی دوره زمانی ۳۰ ساله استفاده شد که به دلیل وضوح مکانی و زمانی مناسب و در دسترس بودن، منبعی ارزشمند برای تحلیل تغییرات محسوب می‌شوند. در گام نخست، نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش زمین برای سال‌های ۱۹۹۲، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲ تهیه و با شاخص‌های آماری کاپو دقت کلی ارزیابی شدند که نتایج آن، دقت بالای نقشه‌های تولیدشده را تأیید کرد. تحلیل تغییرات کاربری اراضی در دو بازه زمانی ۱۹۹۲-۲۰۰۲ و ۲۰۰۲-۲۰۲۲ انجام و تغییرات و مساحت کاربری‌های مختلف محاسبه شد. برای پیش‌بینی نقشه کاربری اراضی سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ از مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها با نقشه‌های تولید شده مقایسه و دقت مدل تأیید شد.

بررسی تغییرات نشان داد که پهنه‌های آبی در طول ۳۰ سال گذشته ۹۷ درصد از مساحت خود را از دست داده‌اند. این کاهش، ناشی از احداث سدها و بندهای انحرافی در بالادست حوضه بوده که علاوه بر تخریب اکوسیستم تالاب هامون، موجب کاهش رطوبت خاک، افزایش شوری زمین‌ها، بیابان‌زایی و مهاجرت ساکنان محلی شده است. پیش‌بینی‌ها نیز نشان می‌دهند که این روند کاهش تا سال ۲۰۴۰ ادامه خواهد داشت. همچنین، نتایج حاکی از افزایش زمین‌های کشاورزی طی دو دهه آینده است که فشار بیشتری بر منابع آبی و اکوسیستم طبیعی منطقه وارد خواهد کرد. این تغییرات، همراه با کاهش مراتع متراکم، جنگل‌ها و افزایش زمین‌های بایر، روند بیابان‌زایی را در پایین‌دست حوضه، به‌ویژه در منطقه سیستان، تشدید خواهد کرد.

در این مطالعه، ابزارها و مدل‌های مختلفی مانند Google Earth Engine، ArcGIS Pro و شاخص‌های مختلف به همراه مدل پیش‌بینی گر CA-Markov، برای تحلیل تغییرات کاربری اراضی و پیش‌بینی وضعیت آبی استفاده شدند. با وجود برخی محدودیت‌ها نظیر تفکیک مکانی متوسط تصاویر لندست و حساسیت به شرایط جوی مانند گردوغبار، این روش‌ها دقت بالایی در آشکارسازی، تحلیل، شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین نشان دادند. نتایج تحقیق، کاهش چشمگیر بدنه‌های آبی، مراتع متراکم و جنگل‌ها را تأیید کرده و همچنین افزایش زمین‌های کشاورزی و بایر را به‌عنوان چالش‌های پیش‌رو برجسته ساخت.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که استفاده از داده‌های سنجنش از دور، ابزارهای تحلیلی پیشرفته و مدل‌های پیش‌بینی گر، رویکردی جامع و کارآمد برای ارزیابی تغییرات کاربری زمین در مناطق حساس و استراتژیک ارائه می‌دهد. این روش می‌تواند الگویی برای سایر مطالعات مشابه باشد و راهنمایی علمی و عملی برای مدیران منابع آب، منابع طبیعی و محیط‌زیست در تدوین برنامه‌های برنامه‌های زیست‌محیطی، مدیریت منابع آب و توسعه پایدار فراهم آورد. نتایج این مطالعه بر ضرورت به‌کارگیری ابزارهای نوین برای تحلیل تغییرات در سطح کل حوضه آبریز برای مقابله با بحران‌های زیست‌محیطی تأکید داشته‌اند و نشان می‌دهد که چنین روش‌هایی می‌تواند پایه‌ای علمی برای مدیریت آینده تغییرات در منطقه فراهم کنند.

منابع

- ابراهیم زاده، عیسی. (۱۳۸۸). تحلیل اثرات خشکسالی‌های اخیر و کمبود آب دریاچه هامون بر کارکردهای اقتصادی سیستان. تحقیقات منابع آب ایران ۷۱-۷۶، ۵(۲).
- اداره کل حفاظت محیط زیست استان سیستان و بلوچستان. (۱۳۹۴). برنامه مدیریت جامع زیست بومی تالاب‌های بین‌المللی هامون. زاهدان-اداره کل حفاظت محیط زیست استان س و ب.
- اسمعیلی، حسین. و نگهبان، سعید. (۱۴۰۰). آشکارسازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل زنجیره‌ی مارکوف و سلول‌های خودکار (CA-Markov)، (مطالعه‌ی موردی: دشت داراب). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۱۲(۴۳)، ۴۱-۶۱.
- پیری، حلیمه. و انصاری، حسین. (۱۳۹۲). بررسی خشکسالی دشت سیستان و تاثیر آن بر تالاب بین‌المللی هامون. اکویولوژی تالاب. ۵(۱۵)، ۶۳-۷۴.
- خسروی، محمود. (۱۳۸۹). تحلیل زمانی-مکانی پایدار دریاچه‌های هامون. تحقیقات منابع آب ایران. ۶(۳)، ۶۸-۷۹.
- زارع، محمد. تیموریان، تیمور. و جوری، محمدحسن. (۱۳۹۶). پایش تغییرات کاربری اراضی / پوشش با استفاده از شاخص‌های شدت تغییرات، درجه پویایی و مقایسه پس از طبقه‌بندی. اکوسیستم‌های طبیعی ایران. ۱۲۳-۱۳۶، ۸(۱).
- عربی‌علی‌آباد، فهیمه.، زارع، محمد. و غفاریان‌مالمیری، حمیدرضا. (۱۴۰۰). پیش‌بینی تغییرات پوشش اراضی با استفاده از مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار (مطالعه موردی: حوزه شبرکوه). جغرافیا و توسعه. ۶۲(۱۹)، ۲۵۱-۲۷۰.
- عزیزی قلاتی، سارا. رنگزن، کاظم.، سدیدی، جواد.، حیدریان، پیمان.، و تقی زاده، ایوب. (۱۳۹۵). پیش‌بینی روند تغییرات مکانی کاربری اراضی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف-CA (مطالعه موردی: منطقه کوهمره سرخی استان فارس). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. ۷(۱)، ۵۹-۷۱.
- کیانپور کل‌خواجه، محمد. پژوهش، مهدی. و امامقلی زاده، صمد. (۱۴۰۱). ارزیابی مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار در شبیه‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی سد گتوند. آب و توسعه پایدار. ۹(۳)، ۴۷-۵۶.
- هاشمی، زهره. سودایی زاده، حمید.، مختاری، محمدحسین.، حکیم زاده اردکانی، محمدعلی و کمالی علی‌آبادی، کاظم. (۱۴۰۱). پیش‌بینی و روند تغییرات کاربری و پوشش اراضی با استفاده از روش‌های تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار و مدل‌ساز تغییر سرزمین در دشت سیستان. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. ۱۵(۳)، ۵۹-۱۵۳.

REFERENCES

- Abd El-Kawy, O. R., Rød, J. K., Ismail, H., & Suliman, S. (2011). Land use and land cover change detection in the western Nile delta of Egypt using remote sensing data. *Applied Geography*, 31(2), 483-494. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.10.012>.
- Aminiparsa, V., & Salehi, E. (2016). Spatio-temporal analysis and simulation pattern of land use/cover changes, case study: Naghadeh, Iran, *Journal of Urban Management*, 5 (2), 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2016.11.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2226585616300334>)
- Altman, D. G. (1990). *Practical Statistics for Medical Research*. Taylor & Francis.
- Arabi Ali Abad, F., Zare, M. and Ghafarian Malamiri, H. R. (2021). Land use Change Prediction using Markov Chain Compilation Model and Automated Cells (Case Study: Shirkuh). *Geography and Development*, 19(62), 251-270. doi: 10.22111/gdij.2021.6022. (In Persian).
- Azizi Qalati, M., Rangzan, A., Kazem, A., Sadidi, A., Heidarian, M., & Taghizadeh, F. (2016). Predicting spatial land use changes using the Markov-CA model (Case study: Kouhmareh Sorkhi region, Fars province). *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, 7(1), 59-71. (In Persian).
- Basheer, S., Wang, X., Farooque, A. A., Nawaz, R. A., Liu, K., Adekanmbi, T., & Liu, S. (2022). Comparison of land use land cover classifiers using different satellite imagery and machine learning techniques. *Remote Sensing*, 14(19), 4978.
- Ebrahimzadeh, I. (2009). Analysis of the Recent Droughts and Lack of Water in Hamoon Lake on Sistan Economic Functions. *Iran-Water Resources Research*, 5(2), 71-76. (In Persian).
- Esmaili, H. and Negahban, S. (2021). Detection and prediction of land use/ land cover changes using Markov chain model and Cellular Automata (CA-Markov), (Case study: Darab plain). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 12(43), 41-61. (In Persian).
- Foody, G.M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sens. Environ.* 239, 111630

<https://doi.org/10.1016/J. RSE.2019.111630>.

- Gemmechis, W. A. (2022). Modeling Earth Systems and Environment Land Use Land Cover Dynamics Using CA-Markov Chain Model and Geospatial Techniques: A Case of Belete Gera Regional Forest Priority Area, South Western Ethiopia. *JRobot Auto Res*, 3(3), 282-294.
- General Directorate of Environmental Protection of Sistan and Baluchestan Province. (2015). *Comprehensive Ecological Management Plan for the International Wetlands of Hamoun*. Zahedan: General Directorate of Environmental Protection of Sistan and Baluchestan Province (In Persian).
- Gómez-Fernández, D., López, R. S., Zabaleta-Santisteban, J. A., Medina-Medina, A. J., Gonas, M., Silva-López, J. O., ... & Rojas-Briceno, N. B. (2024). Landsat images and GIS techniques as key tools for historical analysis of landscape change and fragmentation. *Ecological Informatics*, 82, 102738.
- Hajihosseini, M., Hajihosseini, H., Morid, S., Delavar, M., & Booiij, M. J. (2020). Impacts of land use changes and climate variability on transboundary Hirmand River using SWAT. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1695-1711.
- Haji Hoseini, M., Haji Hoseini, H., Morid, S., & Delavar, M. (2015). Assessment of the effect of land-use changes on streamflow in Helmand transboundary basin during 1990 to 2012 using remote sensed data & SWAT model. *Iran-Water Resources Research*, 11(1), 73-86.
- 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>
- Hashemi, Z., Soudaei Zadeh, H., Mokhtari, M. H., Hakimzadeh Ardakani, M. A., & Kamali Ali Abadi, K. (2022). Prediction and trend of land use and land cover changes using integrated Markov chain and cellular automata methods and the Land Change Modeler in Sistan Plain. *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, 15(3), 59-153. (in Persian).
- Jana, A., Jat, M. K., Saxena, A., & Choudhary, M. (2022). Prediction of land use land cover changes of a river basin using the CA-Markov model. *Geocarto International*, 37(26), 14127–14147. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2086634>
- Khosravi, M. (2010). Spatiotemporal analysis of the sustainability of Hamoun Lakes. *Iranian Water Resources Research*, 6(3), 68-79. (In Persian).
- Kianpoor K. K., M., Pajouhesh, M. and Emamgholizadeh, S. (2022). Evaluation of Markov Chain and Automated Cell Integrated Model in Simulation of Land Use Change and Land Cover of Gotvand Dam. *Journal of Water and Sustainable Development*, 9(2), 47-56. doi: 10.22067/jwsd.v9i2.2112.1106. (In Persian).
- 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, 3740. <https://doi.org/10.3390/su13073740>
- Li, X.; A. Yeh.; (2002). Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(4): 323- 343. <https://doi.org/10.1080/13658810210137004>
- Mondal, M. S., Sharma, N., Kappas, M., & Garg, P. K. (2020). CA Markov modeling of land use land cover change predictions and effect of numerical iterations, image interval (time steps) on prediction results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 713-720.
- Osman, M. A., Abdel-Rahman, E. M., Onono, J. O., Olaka, L. A., Elhag, M. M., Adan, M., & Tonnang, H. E. (2023). Mapping, intensities and future prediction of land use/land cover dynamics using google earth engine and CA-artificial neural network model. *PLoS One*, 18(7), e0288694.
- Piri, H., & Ansari, H. (2013). Investigation of drought in Sistan plain and its impact on the Hamoun International Wetlands. *Ecobiology of Wetlands*, 5(15), 63-74. (In Persian).
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition. *Remote Sensing*, 12(15), 2411.
- Roodari, A., Hrachowitz, M., Hassanpour, F., & Yaghoobzadeh, M. (2021). Signatures of human intervention—or not? Downstream intensification of hydrological drought along a large Central Asian River: the individual roles of climate variability and land use change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(4), 1943-1967.
- Selmy, S. A. H., Kucher, D. E., Mozgeris, G., Moursy, A. R. A., 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>
- Tadese, S., Soromessa, T., & Bekele, T. (2021). Analysis of the current and future prediction of land use/land cover change using remote sensing and the CA-Markov model in Majang forest biosphere reserves of Gambella, Southwestern Ethiopia. *The scientific world journal*, 2021(1), 6685045.
- Thomlinson, J.R., Bolstad, P.V., Cohen, W.B. (1999). Coordinating methodologies for scaling Landcover classifications from site-specific to global: steps toward validating global map products. *Remote Sens. Environ.* 70 (1), 16–28. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00055-3).
- Tesfaye, W., Elias, E., Warkineh, B., Tekalign, M., & Abebe, G. (2024). Modeling of land use and land cover changes using google earth engine and machine learning approach: implications for landscape management. *Environmental Systems Research*, 13(1), 31.
- UNEP. (2006). History of Environmental Change in the Sistan Basin, Based on Satellite Image Analysis: 1976–2005. Post-Conflict Branch Geneva, (ITC) Netherlands.
- United Nation Office on Drugs and Crime (UNODC). (2016). Afghanistan Opium Survey. Cultivation and Production, Kabul.
- Wang, Q., Guan, Q., Lin, J., Luo, H., Tan, Z., & Ma, Y. (2021). Simulating land use/land cover change in an arid region with the coupling models. *Ecological Indicators*, 122, 107231.
- Wang, Y., & Zhang, X. (2001). A dynamic modeling approach to simulating socioeconomic effects on landscape changes. *Ecological Modelling*, 140(1–2), 141–162. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00262-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00262-9).
- Yang, Y., Bao, W., & Liu, Y. (2020). Scenario simulation of land system change in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Land Use Policy*, 96, 104677.
- Zare, M., Teymourian, T., & Jouri, M. H. (2017). Monitoring land use/land cover changes using change intensity indices, dynamic degree, and post-classification comparison. *Natural Ecosystems of Iran*, 8(1), 123-136. (In Persian).
- Zhang, Y., Li, Y., Lv, J., Wang, J., & Wu, Y. (2021). Scenario simulation of ecological risk based on land use/cover change—A case study of the Jinghe county, China. *Ecological Indicators*, 131, 108176.