



Modeling and Forecasting Riverbed Changes and Riparian Land Use Patterns along the Aras River in Ardabil Province

Reza Talaei ^{1*}, Alireza Habibi ¹

¹ Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 09 November 2025

Revised: 10 February 2026

Accepted: 12 February 2026

Available Online:

18 February 2026

Keywords:

Bank Erosion

River Morphodynamic

Channel Migration

Cellular Automata–Markov
(CA–Markov) Model

Northwest of Iran

ABSTRACT

The Aras River, as a transboundary meandering river system, has experienced pronounced morphodynamic and riparian land-use changes driven by the combined effects of natural processes and human interventions. This study aimed to conduct a quantitative spatial analysis of riverbed dynamics and riparian land-use changes along the Aras River during the period 2010–2024, and to predict future trends up to the 2031 horizon within Ardabil Province, Iran. To this end, multi-temporal Landsat 5 TM (2010), Landsat 8 OLI (2017) and Sentinel-2 satellite imagery were integrated with field observations related to changes in riverbed and land-use, along with GIS techniques, to detect spatiotemporal patterns of channel migration and land-use transformation. Future changes were predicted using an integrated Cellular Automata and Markov model. The results reveal a substantial reduction in the riverbed area, declining from 1,821.6 ha in 2010 to 939.47 ha in 2024, whereas agricultural lands (31,968 ha) and residential areas (829.99 ha) exhibited the highest spatial persistence. Concurrently, tree-shrubland expanded markedly, increasing from 921.6 to 1,684.7 ha over the study period. Model validation confirmed the high predictive capability of the CA–Markov model, with an overall accuracy of 99%, a Kappa coefficient of 0.97, and an AUC value of 0.926. Model projections indicate that by 2031 approximately 25.5% of the riverbed will be converted into tree and shrubland and 2.92% into agricultural land, reflecting continued lateral channel migration, riverbed morphological alteration, and a tendency toward relative channel desiccation. The intensification of bank erosion and channel displacement poses increasing risks to agricultural lands and human settlements. These findings highlight the need for integrated riparian land-use management, bank stabilization strategies, and flood risk mitigation in transboundary river systems.

* Corresponding author: Reza Talaei

E-mail address: Talaei1969@gmail.com

How to cite this article: Talaei, R., & Habibi, A. (2026). Modeling and Forecasting Riverbed Changes and Riparian Land Use Patterns along the Aras River in Ardabil Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(2), 93-117. <https://doi.org/10.22067/geoe.2026.96349.1623>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Rivers, as dynamic geomorphological systems, play a crucial role in sediment transport, floodplain formation, and the stability of surrounding ecosystems. Meandering rivers, due to the complexity of hydrodynamic and sedimentary processes, have long been a focus of scientific research. Their morphological changes are influenced by hydrological, tectonic, and human-induced factors, and understanding them requires a multi-scale approach. Remote sensing technologies and geographic information systems (GIS) enable tracking river course changes and quantifying morphometric indices over decades. The Aras River, with its meandering course and numerous bends in the northern part of Ardabil Province, is a prominent example of this dynamism. Its channel migration has led to bed changes, lateral erosion, and the threat to agricultural lands, natural resources, and settlements. Land-use changes and unsustainable exploitation of natural resources further intensify these hydrodynamic processes. This study aims to analyze the morphological changes of the Aras River from 2010 to 2024 and predict future trends until 2031. Using multi-temporal satellite imagery combined with spatiotemporal CA–Markov modeling, dynamic changes in river morphology and surrounding land-use were quantified, and hazard maps identifying high-risk areas in agricultural lands, rangelands, woody and shrub vegetation, shrublands and residential zones were produced. The findings provide valuable insights for sustainable water and soil resource management, mitigation of flood and erosion hazards, and enhancement of environmental and economic security in border regions.

Material and Methods

To analyze the morphological and land-use dynamics of the Aras River and predict future trends up to 2031, an integrated modeling approach was applied using the TerrSet environment. The study area covers a 73-km reach of the Aras River in the Moghan Plain, Ardabil Province, characterized by high fluvial dynamism and geomorphological sensitivity. Multitemporal satellite imagery, including Landsat 5 TM (2010), Landsat 8 OLI (2017), and Sentinel-2 (2024) with 10–30 m spatial resolution, served as the primary dataset. Supplementary data from Google Earth and field surveys were used for validation and accurate delineation of land-use boundaries. Classification accuracy was assessed through overall accuracy, Kappa coefficient and the ROC curve. The CA–Markov hybrid model was employed as the core predictive framework. The transition probability matrix was computed using 2010–2017 data to simulate the 2024 scenario, which was validated against the actual 2024 map. Upon confirming model reliability, the 2031 land-use projection was generated. The model integrates Markov analysis (temporal transitions) with Cellular Automata (spatial dynamics), enabling detailed simulation of landscape evolution. Finally, the simulated changes in land-use, as well as in the extent and channel of the Aras River, were integrated with the potential economic losses to examine the bidirectional interactions between natural fluvial processes and human activities, along with their associated economic impacts on agricultural lands, natural resources, and infrastructures. This methodological framework provides a scientific foundation for sustainable land management and flood-risk mitigation in the Moghan Plain located along the northern border of Ardabil Province.

Results and Discussion

The Aras River, located in the northern part of Ardabil Province, exhibits a highly dynamic and meandering course that plays a crucial role in shaping floodplains and controlling sediment deposition. Continuous erosion along concave banks and deposition on convex ones have resulted in channel migration and significant local morphological changes. Fertile agricultural lands and diverse vegetation have developed along the river margins, which, although productive, remain highly vulnerable to natural river dynamics and land loss. To mitigate erosion and protect infrastructure, several embankments have been constructed; however, these structures, while effective in the short term, often modify natural flow regimes and intensify downstream erosion.

Land-use analyses from 2010, 2017, and 2024 reveal a clear expansion of human-modified zones—especially agricultural, residential, and industrial areas—while the riverbed area has shrunk significantly by 2024. Between 2010 and 2017, the main river channel migrated primarily northward, affecting around 373.35 hectares. Some of the abandoned river areas were converted to tree and shrub cover, while the riverbed width decreased by approximately 64.78 hectares. Agricultural and residential lands showed the highest persistence ($\approx 99\%$), while rangelands experienced the most substantial changes. From 2010 to 2024, agricultural and residential areas remained largely stable (99% and nearly 100%, respectively), whereas the riverbed underwent the most drastic transformations, retaining only 734 out of 1,868 hectares. Some of these transformed zones were converted to agricultural, rangeland, or tree/shrub areas. These results emphasize the stability of anthropogenic land-uses and the high dynamism of riverine environments over the 14-year period.

Using the CA–Markov model, the 2024 land-use simulation based on 2010–2017 data showed high predictive accuracy (Overall accuracy = 99%, Kappa = 0.97, AUC = 0.926). The model predicted that by 2031, agricultural (99.89%), residential (98.86%), and tree/shrub (97.66%) areas will remain highly stable, while the riverbed will continue to be the most dynamic feature, with only a 68.33% probability of persistence. Around 25.5% of the riverbed is expected to convert to tree/shrub cover and 2.9% to agriculture, indicating continued channel adjustment and further desiccation in the future.

The economic assessment estimated total losses of about 22,971 billion rials by 2031, mainly due to riverbed conversion to natural cover (19,193 billion rials). Changes in agricultural (60 ha; 1,811 billion rials) and residential (18 ha; 530 billion rials) lands also contributed substantially. Based on the estimated value of 30 billion rials per hectare in 2025, agricultural and residential zones represent the highest economic risk, whereas rangelands and natural covers serve critical ecological functions. Among the six studied reaches, reaches 3 and 5 are most vulnerable, with estimated losses of 7,106 and 6,145 billion rials, respectively. Therefore, priority management should focus on these sectors through channel stabilization, protective vegetation, and adaptive land-use planning. Historical floods in Parsabad and Aslanduz (Modarres, Sarhadi & Burn, 2016; Khoshnoodmotlagh et al., 2020) confirm recurring flood hazards.

Conclusion

The Aras River in Ardabil Province is experiencing active morphological and functional transformation driven by meandering channel migration, bank erosion, and sediment deposition. Analysis of satellite imagery and CA–Markov modeling (2010–2024) revealed that agricultural and residential lands remain largely stable, whereas the riverbed is highly dynamic, with significant portions transforming into vegetated and agricultural areas. Model validation (Overall accuracy = 99%, Kappa = 0.97, AUC = 0.926) confirmed its reliability, and predictions for 2031 indicate continued riverbed contraction alongside high stability of cultivated and settled areas.

These results highlight the strong interaction between fluvial processes and surrounding land-use dynamics, demonstrating that channel migration directly influences the stability of agricultural and residential lands. Without integrated management, ongoing morphological evolution may intensify economic losses and ecological degradation. Therefore, implementing targeted floodplain planning, riverbank stabilization, and systematic monitoring especially in high-risk reaches is essential for ensuring long-term sustainability. This study provides a scientific basis for sustainable water and soil management, erosion and flood risk mitigation, and rational land-use planning in the transboundary Moghan Plain.



دسترسی آزاد

نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی

DOI: 10.22067/GEOEH.2026.96349.1623

مقاله پژوهشی



مدل سازی و پیش بینی تغییرات بستر و الگوهای کاربری اراضی حاشیه ای رودخانه ارس در محدوده استان اردبیل

رضا طلائی^{۱*}، علیرضا حبیبی^۱^۱ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳	رودخانه ارس به عنوان یکی از سامانه های رودخانه ای مئاندری و مرزی ایران، تحت تأثیر همزمان فرآیندهای طبیعی و مداخلات انسانی، دچار تغییرات سریع مورفودینامیکی و کاربری اراضی در پهنه های ساحلی خود شده است. این پژوهش با هدف تحلیل کمی- فضایی تغییرات بستر رودخانه و الگوی کاربری اراضی در کرانه های رودخانه ارس طی دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۴ و پیش بینی روندهای آتی تا افق ۲۰۳۱ در محدوده استان اردبیل انجام شد. بدین منظور، از تصاویر ماهواره ای چندزمانه Landsat 5 TM (2010)، Landsat 8 OLI (2017) و Sentinel-2 در تلفیق با داده های برداشت میدانی مربوط به تغییرات در بستر و کاربری اراضی و سامانه اطلاعات جغرافیایی برای استخراج تغییرات مکانی- زمانی استفاده شد. پیش بینی تغییرات آینده با بهره گیری از مدل ترکیبی سلول های خودکار و مارکوف صورت گرفت. نتایج نشان داد که مساحت بستر رودخانه طی دوره مطالعه کاهش چشمگیری داشته و از ۱۸۲۱/۶ هکتار در سال ۲۰۱۰ به ۹۳۹/۴۷ هکتار در سال ۲۰۲۴ رسیده است، در حالی که اراضی کشاورزی (۳۱۹۶۸ هکتار) و کاربری های مسکونی (۸۲۹/۹۹ هکتار) بالاترین سطح پایداری مکانی را حفظ کرده اند. همزمان، پوشش درختی- درختچه ای و بوته زار با افزایشی قابل توجه از ۹۲۱/۶ به ۱۶۸۴/۷ هکتار گسترش یافته است. نتایج اعتبارسنجی مدل سلول های خودکار- مارکوف نشان دهنده توان پیش بینی بسیار بالای آن است (صحت کلی ۹۹ درصد، ضریب کاپا ۰/۹۷ و AUC برابر با ۰/۹۲۶). پیش بینی های مدل نشان می دهند که تا سال ۲۰۳۱ حدود ۲۵/۵ درصد از بستر رودخانه به پوشش های درختی- درختچه ای و بوته زار و ۲/۹۲ درصد به اراضی کشاورزی تبدیل خواهد شد که بیانگر تداوم مهاجرت جانبی کانال، تغییر مورفولوژی بستر و گرایش به خشک شدگی نسبی پهنه رودخانه ای است. تشدید فرسایش کرانه ای و جابه جایی مسیر رودخانه تهدیدی فزاینده برای اراضی کشاورزی و سکونتگاه های انسانی منطقه محسوب می شود. یافته های این پژوهش بر ضرورت اتخاذ رویکردهای یکپارچه در مدیریت کاربری اراضی ساحلی، تثبیت کرانه ها و کاهش خطرات سیلاب در رودخانه های مرزی تأکید دارد.
کلمات کلیدی: فرسایش کناره ای مورفودینامیک رودخانه مهاجرت جانبی کانال رودخانه مدل سلول های خودکار- مارکوف شمالغرب ایران	

مقدمه

رودخانه‌ها سامانه‌های هیدروژئومورفولوژیکی هستند که نقش اساسی در انتقال جریان آب و رسوب، شکل‌دهی چشم‌اندازهای آبرفتی و پایداری اکوسیستم‌ها ایفا می‌کنند. در تقسیم‌بندی آن‌ها، رودخانه‌های ماندری به دلیل پیچیدگی فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری همواره مورد توجه پژوهش‌های مختلفی قرار گرفته‌اند (Hook, 2023). مورفودینامیک این رودخانه‌ها تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی است و تحلیل آن تنها با رویکرد چندمقیاسی امکان‌پذیر می‌باشد. فناوری‌های سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی امکان ردیابی تغییرات مسیر رودخانه‌ها و اراضی ساحلی در دوره‌های چند دهه‌ای را فراهم کرده‌اند (Shahriar, Sharifi Pichon & Esfandiyari, 2020; Basnayaka, Nandalal & Rathnayake, 2022).

نتایج به دست آمده از تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که تغییرات بستر رودخانه‌ها در مناطق خشک عمدتاً ناشی از برهم‌کنش فرآیندهای آب-رسوب و مداخلات انسانی است و موجب جابه‌جایی مسیر، تغییر عرض بستر و الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری می‌شود. تغییرات کاربری اراضی ساحلی نیز پایداری بستر و کرانه‌ها را کاهش داده و شدت مخاطرات هیدروژئولوژیکی و ژئومورفولوژیکی را افزایش می‌دهد (Li, Li & Liu, 2025). همچنین بهره‌برداری ناپایدار از منابع آب و تغییرات اقلیمی از دیگر عوامل مؤثر مهم در پویایی رودخانه‌ها هستند (Yucong, Zhiwei, Junqiang, Shanshan, Yinjun, 2024)، که نمونه‌هایی از این تغییرات و اثر آن بر رودخانه‌ها در جهان و ایران مورد بررسی قرار گرفته است. در کشور بنگلادش، رودخانه آریل خان^۱ طی دوره زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۴ حدود ۵۱۴۲ هکتار فرسایش کناره‌ای و نزدیک به ۴۷۵۶ هکتار رسوب‌گذاری را تجربه کرده است. همچنین مسیر این رودخانه به‌طور میانگین حدود ۰/۶۶ کیلومتر تغییر مکان یافته و گسترش مناطق مسکونی در حاشیه رودخانه هم‌زمان با این تحولات، موجب کاهش قابل توجه اراضی کشاورزی شده است. بررسی این تغییرات با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، اطلاعات ارزشمندی را برای برنامه‌ریزی مدیریت پایدار اراضی و کاهش خسارات ناشی از فرسایش در آینده فراهم می‌سازد (Hasan et al., 2024). مطالعات میدانی در چین و هند نیز حساسیت بالای انتقال رسوبات و تغییرات هیدروپدینامیک رودخانه‌ها به تغییرات کاربری زمین را تأیید کرده‌اند (Wang, Zheng & Zang, 2012; Hazarika, Das & Borah, 2015). نتایج مطالعه بر روی رودخانه کارون نیز نشان می‌دهد گسترش سریع کاربری‌های شهری با کاهش عرض رودخانه و تغییر مسیر مجرا همراه بوده و پیش‌بینی آن با استفاده از مدل‌سازی به روش مدل سلول‌های خودکار-مارکوف^۲ تداوم این روند را همراه با تشدید بیشتر ناپایداری مورفولوژی و تغییر بستر رودخانه نشان می‌دهد (Hatamiafkoueh, Shirali & Razoumny, 2025).

اراضی حاصل‌خیز حاشیه رودخانه‌ها منابع ارزشمند معیشتی هستند، اما تغییرات کاربری زمین، سیلاب و فرسایش کناره‌ای پایداری آن‌ها را تهدید می‌کند (Hazarika et al., 2015; Debnath, Das, Ahmed & Bhowmik, 2017; Shahid, Cong, & Zhang, 2018; Anandkumar, Vijith, Nagarajan & Jonathan, 2019). تخریب پوشش گیاهی و بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی سواحل رودخانه‌ها نیز موجب افزایش رواناب و تغییرات سریع مسیر رودخانه می‌شود (Adnan, Dewan, Zannat & Abdullah, 2019). پیامدهای این تحولات شامل تخریب اراضی، افزایش خطر زمین‌لغزش و آسیب به سکونتگاه‌ها است (Yamani, Rahimi & Veysi, 2022; Masoumi, Habibi & Gharibreza, 2021; Hasanuzzaman, Gayen, Haque & Shit, 2022). از جمله پژوهش‌مهانگانه و آنداما (Muhangane & Andama, 2024) بر حوضه آبریز رودخانه رویزی^۳ در اوگاندا، نشان داده‌اند که تحلیل تغییرات کاربری و پوشش زمین و استفاده از مدل‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی برای پیش‌بینی روندهای آبی و تدوین سیاست‌های مدیریت پایدار منابع اهمیت ویژه‌ای دارد.

1- Arial Khan River

2- CA-Markov (Cellular Automata (CA) and Markov Model)

3- Rwizi

در پژوهش رحیمی و همکاران (Rahimi, Hosseinzadeh & Vahabzadeh Zargari, 2025) در حوضه رودخانه قره‌سو، تأثیر گسترش فعالیت‌های کشاورزی و احداث سد سبلان بر تنگ‌شدگی مجرا، کاهش دینامیک رودخانه و افزایش خطر آب‌گرفتگی زمین‌های پایین‌دست مورد تحلیل قرار گرفته و بر اساس نتایج به دست آمده بر ضرورت مدیریت دقیق کاربری اراضی در حریم رودخانه تأکید شده است.

رودخانه ارس در شمال غرب ایران یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های مرزی ایران در حوضه خزر بوده و نمونه‌ای فعال از سیستم ممانداری است که پیچ‌وخم‌های آن ناشی از فرسایش کناره‌های بیرونی و رسوب‌گذاری کناره‌های درونی است (Esfandiyari Darabad, 2025). این رودخانه با جابه‌جایی بستر و فرسایش کناره‌ای مواجه است که تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و مالکیت اراضی محسوب می‌شود و خسارات سالانه ناشی از آن میلیاردی است (Mohebi & Mirzaie, 2014). نرخ بالای تغییرات جانبی و مهاجرت مجرا در این رودخانه موجب تغییر مسیر جریان، تخریب اراضی کشاورزی و تهدید سکونتگاه‌های انسانی در شمال غرب کشور شده است (Rezaei Moghaddam, Keirizadeh & Rahimi, 2016). این یافته‌ها ضرورت تحلیل هم‌زمان تغییرات بستر رودخانه و تحولات کاربری اراضی ساحلی در رودخانه‌های مرزی ارس را نشان می‌دهد و تأکید دارد که بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی فضایی برای مدیریت پایدار منابع آب، کاهش مخاطرات ژئومورفولوژیکی و برنامه‌ریزی آگاهانه در سال‌های آینده ضروری است. اهمیت رودخانه ارس تنها از نظر طبیعی نیست بلکه موقعیت مرزی آن با جمهوری آذربایجان و ارمنستان جنبه‌های اقتصادی و سیاسی ویژه‌ای نیز دارد.

بر اساس پژوهش حجازی و همکاران (Hejazi, Modiri, Rahimi & Mehrvarz, 2017) تغییرات مجرای رودخانه ارس طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴ با استفاده از روش ترانسکت مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، تغییرات مورفولوژیکی مجرای رودخانه ارس طی بازه زمانی ۲۸ ساله مورد تحلیل قرار گرفته و اراضی آزادشده در پی اجرای طرح‌های اصلاح و سامان‌دهی مسیر رودخانه شناسایی و برآورد شده است. نتایج نشان داد که میانگین جابه‌جایی مجرا حدود ۴/۸ متر در سال بوده و در دوره‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۰ میلادی، حدود ۵۹۴ هکتار و در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴، ۲۷۵ هکتار به اراضی در دسترس افزوده شده است. چوبین و حبیبی (Choubin & Habibi, 2024) در گزارشی فنی با عنوان کاربرد مدل سلول‌های خودکار-مارکوف در پیش‌بینی مناطق بحرانی مخاطره سیل در حوضه آبخیز ارس به شناسایی و تعیین محدوده‌های پرخطر در بازه غربی رودخانه ارس پرداختند. همچنین حبیبی و همکاران (Habibi, Habibzadeh, Talaei & Choubin, 2025) در گزارش ملی طرح تحقیقاتی با موضوع تهیه نقشه نقاط بحرانی مخاطره سیل در حوضه آبخیز ارس با تأکید بر کاربری‌های کشاورزی و سکونتگاه‌های شهری و روستایی، با تقسیم رودخانه ارس به سه بازه اصلی، اقدام به پیش‌بینی نواحی مستعد فرسایش کناره‌ای و رسوب‌گذاری برای افق زمانی ۱۴۱۰ نمودند. این مطالعات نقش مهمی در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب در حوضه ارس ایفا می‌کنند. حبیب‌زاده و همکاران (Habibzadeh, Habibi & Eslahi, 2025) در پژوهشی با هدف شناسایی نواحی بحرانی مستعد سیلاب و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در حوضه میانی رودخانه ارس، از تصاویر ماهواره‌ای TM و ETM+ مربوط به سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۳ بهره گرفتند. در این پژوهش، تغییرات مسیر و کانال رودخانه با استفاده از مدل سلول‌های خودکار-مارکوف مورد تحلیل قرار گرفت و دقت نقشه‌های تولیدشده با ضریب کاپا و ماتریس تغییرات سنجیده شد. همچنین نتایج پیش‌بینی‌شده برای سال ۲۰۳۰ از طریق بازبینی‌های میدانی اعتبارسنجی گردید. یافته‌ها نشان داد که به احتمال زیاد وسعت دشت‌ها و مراتع از حدود ۱۱۹۳۵۴ هکتار در سال ۲۰۰۰ به نزدیک ۹۶۰۰۰ هکتار در سال ۲۰۳۰ کاهش خواهد یافت، در حالی که اراضی کشاورزی در حاشیه جنوبی حوضه از ۷۳۴۶ هکتار به بیش از ۲۲۰۰۰ هکتار افزایش می‌یابد. همچنین پیشروی کانال رودخانه در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ حدود ۶۰ درصد برآورد شد که بیشترین تأثیر را بر اراضی کشاورزی برجای گذاشته است.

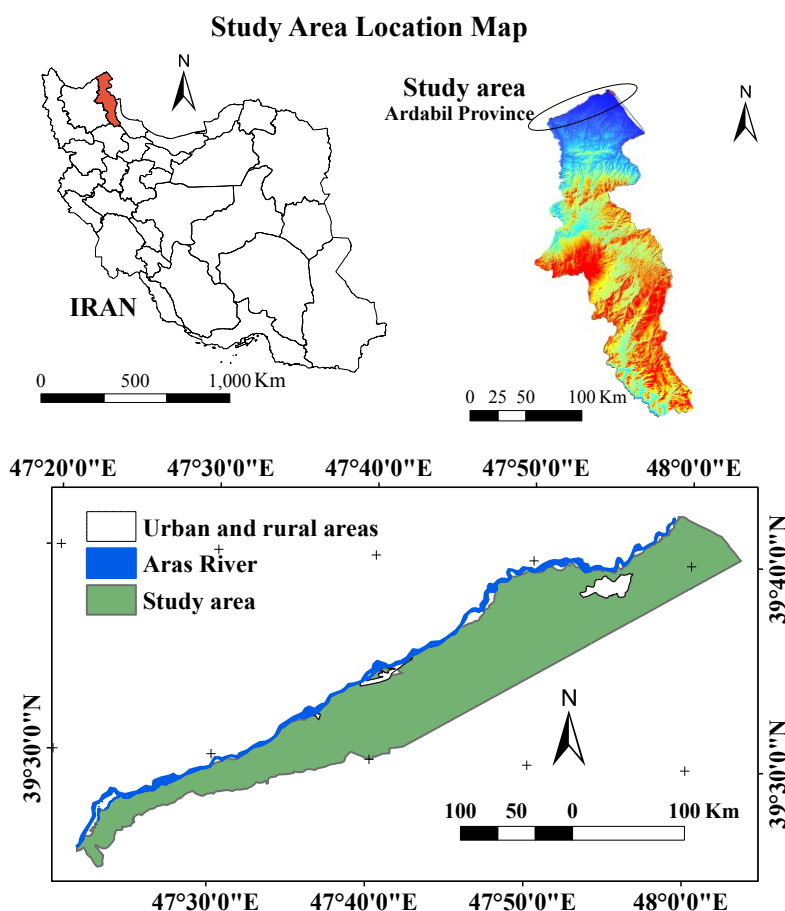
با توجه به اینکه فناوری های سنجش از دور و سامانه های اطلاعات جغرافیایی ابزارهای اصلی برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی بستر رودخانه و تحلیل فرآیندهای فرسایش و رسوب گذاری به شمار می روند، و همچنین مدل های پیش بینی مانند سلول های خودکار-مارکوف قادر به شبیه سازی دقیق روندهای آتی تغییرات مورفولوژیکی، پوشش گیاهی یا کاربری اراضی هستند (Hazarika et al., 2015; Langat, Kumar & Koech, 2019; Camargo, Sano, Almeida, Mura & Almeida, 2019; Jamali, 2019; Verma, Ashwini, Singh, 2021; Yucong et al., 2024;) انجام مطالعاتی در این زمینه در منطقه مورد نظر ضروری به نظر می رسد. رودخانه ارس که نقش حیاتی در تأمین منابع آب، حفاظت از زمین های ساحلی و توسعه پایدار منطقه ایفا می کند، نیاز به شناخت دقیق تغییرات بستر و کاربری و پوشش زمین در سواحل آن برای مدیریت بهینه منابع طبیعی دارد. با این حال، در حال حاضر هیچ پژوهشی در محدوده شرقی رودخانه ارس در استان اردبیل با استفاده از مدل های سلول های خودکار-مارکوف برای شبیه سازی هم زمان تغییرات بستر رودخانه و کاربری و پوشش زمین در سواحل آن انجام نشده است. بنابراین، مطالعه حاضر به عنوان نخستین پژوهش در این زمینه، با بهره گیری از این روش ها و ابزارها، تغییرات بلندمدت مسیر رودخانه و سواحل آن را مورد بررسی قرار می دهد و هدف آن تحلیل تغییرات بستر رودخانه و اراضی ساحلی طی سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ و پیش بینی روند آینده تغییر در کاربری اراضی تا سال ۲۰۳۱ با استفاده از تصاویر ماهواره ای است.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه ارس یکی از مهم ترین رودخانه های مرزی شمال غرب ایران به شمار می رود که از دامنه های کوه های بین گول (مین گول) در شرق ترکیه سرچشمه می گیرد و پس از پیمودن مسیری در حدود ۱۰۰۰ کیلومتر، به رودخانه کورا پیوسته و در نهایت به دریای خزر می ریزد. این رودخانه در بیش از ۴۰۰ کیلومتر از مسیر خود، مرز مشترک ایران با جمهوری آذربایجان و ارمنستان را تشکیل می دهد و از این نظر دارای اهمیت ژئوپلیتیکی و مرزی ویژه ای است. بخش مورد مطالعه، شامل حدود ۷۳ کیلومتر از مسیر رودخانه ارس در محدوده دشت مغان و استان اردبیل است (شکل ۱). در این محدوده، رودخانه عمدتاً در بستری وسیع از دشت سیلابی توسعه یافته و جریان دارد. میانگین دبی سالانه رودخانه در این بازه بین ۲۸۵ تا ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه متغیر بوده و بیشترین نوسانات دبی در فصل بهار و در نتیجه ذوب برف های ارتفاعات بالادست رخ می دهد.

مئاندر رودخانه به همراه وجود رسوبات و آبرفت های جوان کوآترنری، که مواد اصلی تشکیل دهنده دشت سیلابی منطقه هستند، موجب فرسایش پذیری بالای بستر و کناره ها شده و تغییرات مداوم مورفولوژی رودخانه را به دنبال داشته است. این شرایط، فرسایش کناره ای، جابه جایی بستر و پویایی بالای رودخانه را تشدید می کند. اهمیت انتخاب این محدوده مطالعاتی، علاوه بر نقش مرزی رودخانه ارس، به پویایی بالای آن ناشی از دبی قابل توجه و نیز تأثیر فعالیت های انسانی در حاشیه رودخانه بازمی گردد. فعالیت هایی نظیر کشاورزی، بهره برداری از اراضی سیلابی و مداخلات سازه ای، تأثیر مستقیمی بر رفتار هیدرومورفولوژیک رودخانه و روند تغییرات آن در این بخش دارند (Esfandiyari et al., 2025).

رودخانه ارس در شمال استان اردبیل، با مسیر مئاندری و پویایی بالای کانال، نقش مهمی در شکل گیری دشت های سیلابی و توزیع رسوبات دارد (شکل ۲ الف). در این رودخانه فرسایش کناره های مقعر و رسوب گذاری در کناره های محدب موجب مهاجرت کانال و تغییرات مورفولوژیکی محلی می شود، در حالی که پوشش گیاهی متنوع و اراضی کشاورزی حاصل خیز در حاشیه رودخانه توسعه یافته اند (شکل ۲ ب). این اراضی تحت تأثیر مستقیم فرآیندهای طبیعی رودخانه بوده و در برخی بخش ها با خطر از دست رفتن زمین مواجهند. به منظور کاهش فرسایش و حفاظت از اراضی و زیرساخت ها، دیواره های حفاظتی احداث شده اند که اگرچه از تخریب فوری جلوگیری می کنند، اما گاهی موجب تغییر الگوی طبیعی جریان و تشدید فرسایش در پایین دست می شوند (شکل ۲ ج).



شکل ۱- موقعیت رودخانه ارس در استان اردبیل

Fig. 1. Location of the Aras River in Ardabil Province

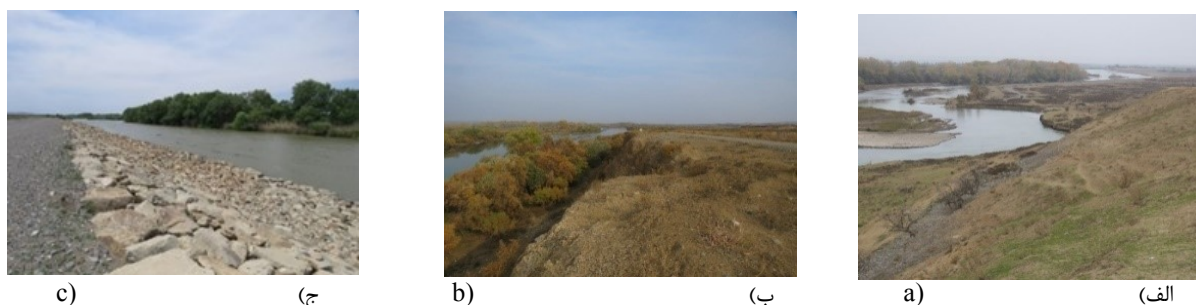
مواد و روش‌ها

داده‌ها و منابع اطلاعاتی

برای تحلیل تغییرات کاربری اراضی و تحولات بستر رودخانه، از تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه شامل Landsat 5 TM (2010)، Landsat 8 OLI (2017) و Sentinel-2 (2024) با تفکیک مکانی ۱۰ تا ۳۰ متر استفاده شد. انتخاب این تصاویر به دلیل دسترسی آسان، پوشش گسترده زمانی و همگن بودن داده‌ها برای دوره‌های بلندمدت مطالعه صورت گرفت. استفاده از داده‌های Sentinel بیش از یک تاریخ (مثلاً ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) به دلیل محدودیت در پوشش ابری و نبود داده‌های همزمان با سال‌های مورد مطالعه محدود شد، در حالی که Landsat با دسترسی رایگان و طول دوره زمانی طولانی امکان تحلیل تغییرات بلندمدت را فراهم می‌کند.

انتخاب سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴ بر اساس ملاحظات روش‌شناختی، داده‌ای و مدل‌سازی انجام شده است. نخست، این سال‌ها از نظر دسترسی پذیری تصاویر ماهواره‌ای با کیفیت مناسب، پوشش مکانی کامل، حداقل پوشش ابر و شرایط فصلی مشابه، بیشترین همگنی داده‌ای را فراهم می‌کنند؛ امری که برای کاهش عدم قطعیت ناشی از تفاوت کیفیت داده‌ها در تحلیل تغییرات ضروری است. دوم، فاصله‌ی زمانی تقریباً یکسان (۷ ساله) بین تصاویر انتخاب‌شده، بازه‌ای بهینه برای آشکارسازی تغییرات تدریجی بستر رودخانه و کاربری اراضی ساحلی محسوب می‌شود، به گونه‌ای که از یک سو امکان شناسایی روندهای معنادار مکانی- زمانی

فراهم شده و از سوی دیگر، تغییرات کوتاه مدت و ناپایدار بر نتایج غالب نمی شود. سوم، با توجه به ماهیت مدل سلول های خودکار-مارکوف و فرض تداوم الگوهای انتقال در افق زمانی نزدیک، استفاده از این بازه های زمانی منظم موجب افزایش پایداری ماتریس، احتمال انتقال و بهبود قابلیت اتکای پیش بینی ها شده است. بر همین اساس، سال ۲۰۳۱ به عنوان یک افق پیش بینی کوتاه مدت انتخاب شد تا ضمن حفظ سازگاری با رفتار گذشته ی سیستم، از تعمیم بیش از حد مدل و افزایش عدم قطعیت پیش بینی جلوگیری شود. در مجموع، انتخاب این سال ها توازن مناسبی میان کیفیت داده ها، تفکیک زمانی تغییرات و مفروضات مدل سازی ایجاد کرده و چارچوبی قابل اتکا برای تحلیل و پیش بینی تغییرات بستر رودخانه و کاربری اراضی ساحلی فراهم می کند. انتخاب سال های جایگزین با فواصل نامنظم یا کیفیت داده ای متفاوت، می تواند منجر به افزایش عدم قطعیت و کاهش پایداری نتایج مدل شود (Zhu, 2017).



شکل ۲- سیمای عمومی منطقه، الف) مسیر مئاندری رودخانه ارس و فرسایش در دیواره ساحلی رودخانه، ب) دیواره های بلند حاصل از فرسایش ساحلی با پوشش درختی، درختچه ای و بوته زار در دشت سیلابی، ج) دیواره ساحلی احداث شده جهت کاهش اثرات سیلاب و فرسایش دیواره

Fig. 2. General landscape of the area; a) Meandering path of the Aras River and bank erosion, b) High riverbanks resulting from bank erosion with tree, shrub, and bush cover in the floodplain, c) Constructed riverbank/revetment to mitigate flood impacts and bank erosion.

علاوه بر تصاویر ماهواره ای، داده های Google Earth و بازدیدهای میدانی جهت کنترل صحت طبقه بندی، تعیین مرز دقیق کاربری ها و ثبت تغییرات مورفولوژیکی به کار گرفته شد. منظور از داده های Google Earth، تصاویر ماهواره ای و نماهای هوایی با وضوح بالا است که امکان بازبینی بصری، تعیین مرز دقیق کلاس های کاربری و اعتبارسنجی طبقه بندی ها را فراهم می کنند. در بازدیدهای میدانی، نقاط کلیدی با GPS برداشت و نوع کاربری اراضی و تغییرات بستر رودخانه ثبت گردید تا اعتبار نقشه های تولیدی افزایش یابد و دقت تحلیل تغییرات مکانی به حداکثر برسد. نقاط کلیدی، مکان هایی هستند که اطلاعات آن ها برای ارزیابی و اعتبارسنجی دقت مدل ها و نقشه ها اهمیت بالایی دارند و امکان دسترسی و بررسی میدانی آن ها فراهم است. این نقاط عمدتاً در مسیر رودخانه و اراضی ساحلی، به ویژه در مرزها و محل های تغییر کاربری، با قضاوت و نظر کارشناسی تعیین شدند. استفاده همزمان از داده های ماهواره ای و مشاهدات میدانی امکان ارزیابی دقیق روندهای تغییرات کاربری و مورفولوژی رودخانه را فراهم کرده و پایه ای برای مدیریت بهینه منابع آب و کاهش مخاطرات سیلاب ایجاد می کند.

استخراج کاربری اراضی

در این مطالعه پنج کلاس کاربری اراضی بررسی شد: (۱) کانال رودخانه، (۲) اراضی مسکونی، (۳) اراضی کشاورزی، (۴) اراضی مرتعی و (۵) پوشش درختی، درختچه ای و بوته زارها.

دقت نقشه‌های سال ۲۰۲۴ با مقایسه داده‌های میدانی و تحلیل ماتریس خطا^۱، که به آن ماتریس به‌هم‌ریختگی^۲ نیز گفته می‌شود، ارزیابی شد (Johnson & Olsen, 1998). شاخص‌های آماری شامل صحت کلی و یادآوری نیز بر اساس روابط (۱) و (۲) محاسبه شدند.

$$\text{Accuracy} = \frac{H+CN}{H+FA+M+CN} \quad (۱)$$

$$\text{Recall} = \frac{H}{H+M} \quad (۲)$$

که H، FA، M و CN به ترتیب برخوردها یا مثبت‌های درست، هشدار نادرست یا مثبت‌های نادرست، خطاها یا منفی‌های نادرست و منفی‌های درست در جدول توافقی می‌باشند (Sokolova, Japkowicz & Szpakowicz, 2006). علاوه بر آن، کارایی مدل با استفاده از منحنی ROC^۳ بررسی شد. در این روش درصدی از پیکسل‌های دارای یک نوع کاربری که توسط مدل به‌درستی پیش‌بینی شده‌اند حساسیت^۴ مدل نامیده می‌شوند (رابطه ۳) (Lobo, Jiménez-Valverde & Real, 2008).

$$\text{Sensitivity} = \frac{H}{H+FA} \quad (۳)$$

قدرت درست‌نمایی و یا وضوح سازی^۵ مدل نیز بر اساس درصد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده که فاقد کاربری هستند نشان داده می‌شود (رابطه ۴).

$$\text{Specificity} = \frac{CN}{CN+M} \quad (۴)$$

مساحت زیر منحنی AUC^۶ بین صفر تا یک متغیر بوده و مقدار نزدیک به یک، بیانگر دقت بالای مدل در تفکیک صحیح کاربری‌ها است، در حالی که مقدار ۰/۵ نشان‌دهنده عملکرد تصادفی مدل می‌باشد.

پیش‌بینی کاربری اراضی

در این پژوهش، پس از تهیه نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴، پیش‌بینی تغییرات تا سال ۲۰۳۱ با مدل ترکیبی سلول‌های خودکار - مارکوف در نرم‌افزار TerrSet انجام شد. ابتدا با داده‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷، ماتریس احتمال انتقال^۷ محاسبه و نقشه سال ۲۰۲۴ پیش‌بینی و با داده واقعی اعتبارسنجی شد. مدل سلول‌های خودکار- مارکوف بر دو مؤلفه استوار است: فیلتر سلول‌های خودکار برای تحلیل تغییرات مکانی و مارکوف برای محاسبه نرخ انتقال میان کلاس‌های کاربری اراضی. ساختار کلی مدل به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$L(t, t+1) = T[L(t), N] \quad (۵)$$

که در آن: مجموعه‌ای از حالت‌های سلولی محدود و مشخص با L نمایش داده شده است. میدان سلولی با N نشان داده می‌شود، و وضعیت‌های زمانی مختلف با t و t+1 مشخص شده‌اند، که در آن T نمایانگر قاعده تبدیل وضعیت سلولی در فضای محلی است. مدل سلول‌های خودکار- مارکوف یک فرمول محاسباتی بر پایه احتمال شرطی است که برای پیش‌بینی تغییرات کاربری/پوشش زمین به کار می‌رود و در رابطه (۶) بیان شده است (Vahid & Aly, 2025).

$$L(t+1) = P_{ij} \times L(t) \quad (۶)$$

1- Error Matrix

2- Confusion Matrix

3- Receiver Operating Characteristic curve

4- Sensitivity

5- Specificity

6- Area Under the Curve

7- Transition Probability Matrix

در این معادله، $L(t)$ و $L(t+1)$ به ترتیب نشان دهنده وضعیت سیستم در زمان t و $t+1$ هستند، P_{ij} ماتریس احتمال انتقال بین وضعیت ها را نشان می دهد، که این ماتریس به صورت زیر در رابطه (۷) تعیین شده است (Yuan & Tang, 2023):

$$P = P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \dots & P_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{where } \sum P_{ij} = 1 \quad (7)$$

مدل مارکف تغییرات کاربری زمین را به صورت فرآیندی تصادفی و وابسته به زمان پیش بینی می کند (Zhang et al., 2015) و بخش زنجیره با قوانین همسایگی، تغییر وضعیت سلول ها را بر اساس سلول های مجاور شبیه سازی می کند (Sang, Zhang, Yang, 2011). مدل تلفیقی سلول های خودکار و مارکوف با داده های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ کالیبره و برای سال ۲۰۲۴ اعتبارسنجی شد. سپس تغییرات کاربری تا سال ۲۰۳۱ و تأثیر آن بر بستر و حاشیه رودخانه ارس تحلیل شد تا پایه ای برای مدیریت بهینه اراضی و کاهش مخاطرات سیلاب فراهم گردد.

نقشه پیش بینی تغییرات تا افق زمانی ۲۰۳۱، تغییرات بالقوه در پویایی و تغییر بستر رودخانه و تحولات کاربری اراضی ساحلی را نشان می دهد. در چارچوب این مطالعه و به منظور افزایش دقت تحلیل کمی-فضایی تغییرات کاربری اراضی در بازه پیش بینی، بستر رودخانه و اراضی مجاور آن بر اساس شاخص مساحت تحت خطر به ازای طول بازه^۱ به شش بازه تحلیلی مجزا تقسیم بندی شد.

نتایج و بحث

کاربری های اراضی

نقشه های کاربری اراضی مربوط به سال های ۲۰۱۰، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴ در شکل ۳ (الف تا ج) ارائه شده اند. سطح اراضی انسان ساز (مسکونی و صنعتی) و کشاورزی در دوره های زمانی مورد بررسی (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴) روند افزایشی داشته اند. در مقابل، مساحت بستر رودخانه در سال ۲۰۲۴ نسبت به سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ کاهش یافته است (جدول ۱).

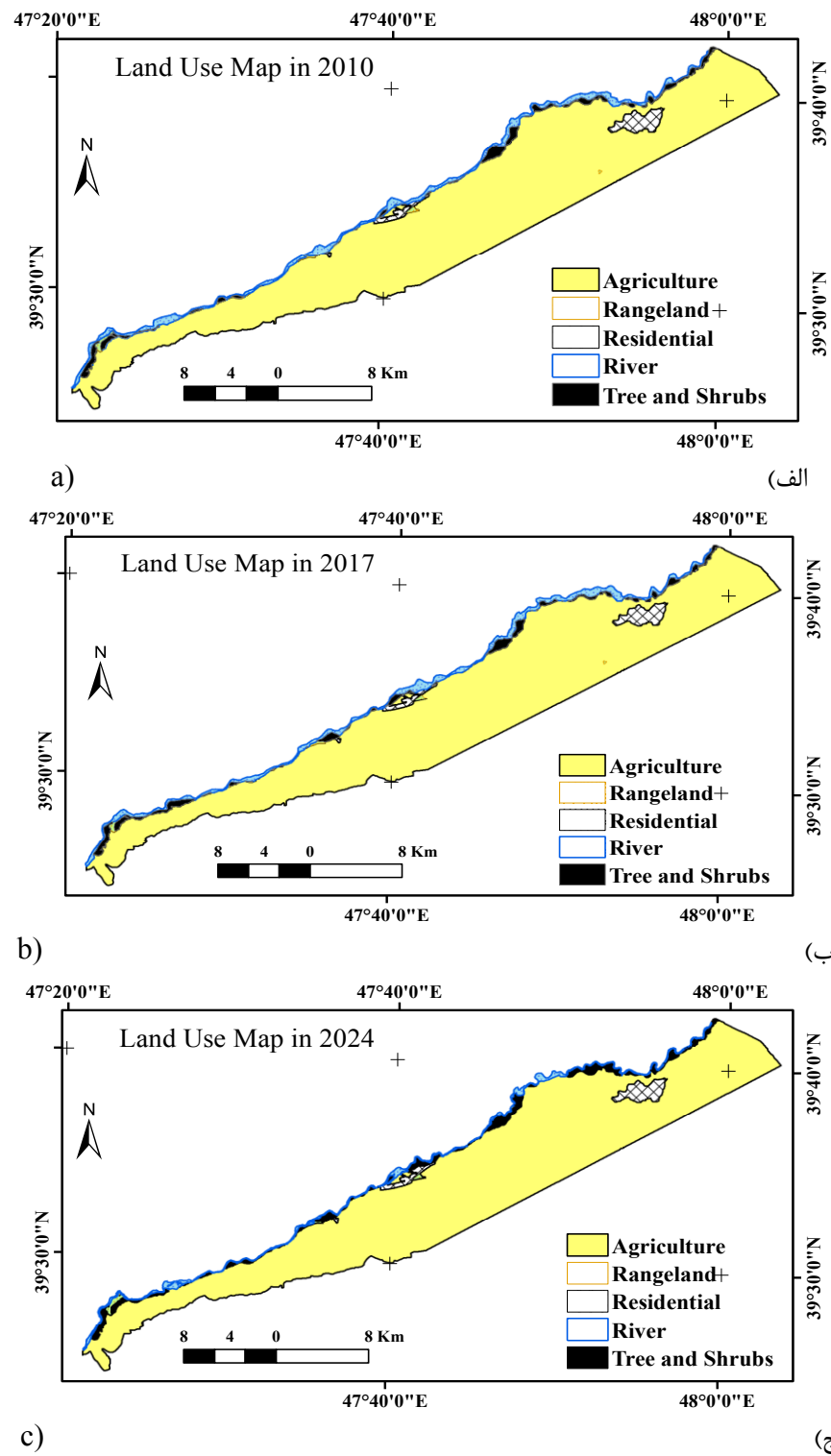
تغییرات کاربری در کوتاه مدت (سال ۲۰۱۷ نسبت به ۲۰۱۰)

در فاصله زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷، تغییرات کاربری و پوشش اراضی در حاشیه رودخانه ارس با استفاده از ماتریس انتقال و نقشه های مورفولوژیکی تحلیل شد. بستر رودخانه در این بازه به طور عمده به سمت شمال مهاجرت کرده و مساحت حدود ۳۷۳/۳۵ هکتار از آن تغییر یافته است، که بخشی از اراضی آزاد شده به پوشش درختی، درختچه ای و بوته زار تبدیل شده اند.

جدول ۱- تغییرات سطح کاربری های مختلف در سه سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴

Table 1- Changes in the area of different land-use types in 2010, 2017, and 2024

کاربری اراضی به هکتار Land-use (hectares)	سال Year		
	2010	2017	2024
اراضی زراعی (آبی، دیم و باغی) Agricultural lands (irrigated, rainfed, and orchards)	31891.79	31922.07	31968.08
مرتعی Rangelands	118.33	117.46	173.94
سازه های مسکونی، صنعتی و کشاورزی Residential, industrial, and agricultural structures	797.50	802.11	829.99
بستر رودخانه Riverbed	1821.60	1923.82	939.47
درخت و بوته زار Tree and shrubland	921.60	1117.56	1684.70
جمع Total	35550.82	38883.02	35596.18



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی در سال‌های الف) ۲۰۱۰، ب) ۲۰۱۷ و ج) ۲۰۲۴

Fig. 3. Land-use maps for the years a) 2010, b) 2017, and c) 2024

تغییرات کاربری در کوتاه مدت (سال ۲۰۱۷ نسبت به ۲۰۱۰)

در فاصله زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷، تغییرات کاربری و پوشش اراضی در حاشیه رودخانه ارس با استفاده از ماتریس انتقال و نقشه های مورفولوژیکی تحلیل شد. بستر رودخانه در این بازه به طور عمده به سمت شمال مهاجرت کرده و مساحت حدود ۳۷۳/۳۵ هکتار از آن تغییر یافته است، که بخشی از اراضی آزاد شده به پوشش درختی، درختچه ای و بوته زار تبدیل شده اند. کاهش سطح بستر رودخانه در حدود ۷۸/۶۴ هکتار نیز مشاهده شد. بیشترین پایداری مربوط به زمین های کشاورزی و مسکونی با حفظ حدود ۹۹٪ مساحت اولیه بوده است، در حالی که اراضی مرتعی بیشترین تغییرات را تجربه کرده اند؛ ۲۹/۹۹ هکتار به زمین کشاورزی و ۱۷/۵۸ هکتار به بستر رودخانه تبدیل شده است. تغییرات جزئی نیز شامل تبدیل زمین های کشاورزی به رودخانه (۲۶/۵۹ هکتار) و پوشش گیاهی درختی، درختچه ای و بوته زار (۲۰/۰۸ هکتار) می باشد. همچنین مهاجرت بستر رودخانه منجر به ایجاد ۶/۲۷ هکتار اراضی زراعی و ۵/۸۱ هکتار اراضی مسکونی جدید شده است. در کاربری با پوشش گیاهی درختی، درختچه ای و بوته زار، ۱۲۳/۷۲ هکتار تحت تأثیر مهاجرت بستر رودخانه و تغییرات فرسایشی قرار گرفته و ۲۳/۱۷ هکتار آن به زمین های کشاورزی تبدیل شده است. نتایج نشان می دهد که فعالیت های فرسایشی، مهاجرت کانال و تغییرات طبیعی بستر رودخانه نقش مهمی در تغییرات کاربری زمین و پوشش گیاهی منطقه داشته اند.

تغییرات کاربری در دوره بلندمدت (سال ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۱۰)

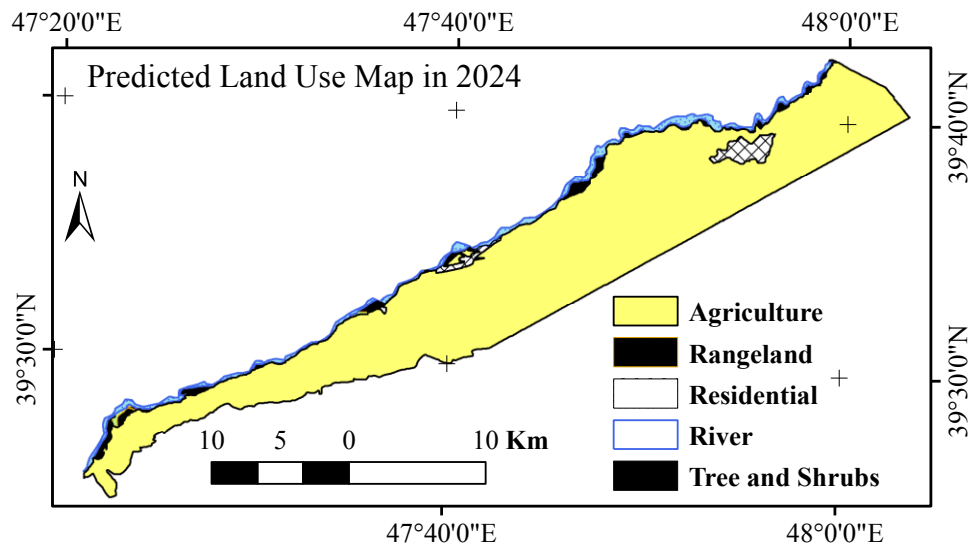
ارزیابی تغییرات کاربری اراضی در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ نشان داد که بخش عمده زمین های کشاورزی و مسکونی پایدار مانده اند؛ به طوری که حدود ۳۱۸۸۶ هکتار (۹۹٪) زمین های کشاورزی و ۷۹۶ هکتار مسکونی حفظ شده اند. سطح اراضی مرتعی نیز عمدتاً ثابت مانده و تنها با تغییر جزئی، به زمین های کشاورزی و بستر رودخانه تبدیل شده اند. در مقابل، بستر رودخانه بیشترین تغییرات را نشان می دهد؛ از مجموع سطح ۱۸۶۸ هکتاری بستر رودخانه تنها ۷۳۴ هکتار حفظ شده است و بقیه اراضی آن به کاربری کشاورزی، مرتعی، پوشش درختی، درختچه ای و بوته زار و مسکونی تبدیل شده است، همچنین حدود ۳۱۱ هکتار به دلیل عقب نشینی و جابه جایی بستر رودخانه به اراضی اضافه شده است. هرچند کاربری پوشش گیاهی درختی، درختچه ای و بوته زار عمدتاً حفظ شده، اما بخشی از آن به زمین کشاورزی تبدیل شده و بخشی تحت تأثیر جابه جایی رودخانه قرار گرفته است. این نتایج نشان می دهند که کاربری های مسکونی و کشاورزی پایدار بوده اند، در حالی که بستر رودخانه و اراضی پیرامون طی ۱۴ سال مورد مطالعه، تغییرات قابل توجهی داشته اند.

پیش بینی تغییرات کاربری

نقشه پیش بینی کاربری سال ۲۰۲۴ بر اساس داده های پایه ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ با استفاده از مدل سلول های خودکار- مارکوف تولید شد (شکل ۴). ماتریس تغییرات نشان داد که اراضی کشاورزی با ۹۹/۹۷٪ و مسکونی با ۹۹/۸۳٪ بیشترین پایداری را دارند، در حالی که رودخانه و پوشش درختی، درختچه ای و بوته زار بیشترین تغییرپذیری را نشان دادند. حدود ۱۳٪ از اراضی درختی، درختچه ای و بوته زار به بستر رودخانه و ۲۰٪ از بستر رودخانه به سایر کاربری ها تبدیل شده است. کاربری مرتعی ۲۲٪ به کشاورزی و ۱۰٪ به رودخانه تغییر یافته است. اعتبارسنجی مدل نشان می دهد که صحت کلی ۹۹٪، کاپای کلی ۰/۹۷ و سطح زیر منحنی ROC برابر ۰/۹۲۶ است، که بیانگر دقت بسیار بالای پیش بینی می باشد. ماتریس احتمال انتقال مارکوف نشان داد که اراضی کشاورزی و مسکونی با احتمال ۰/۹۹ بالاترین پایداری را دارند، در حالی که کاربری مرتعی با احتمال ۰/۶۷ و رودخانه و پوشش درختی، درختچه ای و بوته زار تغییرپذیری بالایی دارند (شکل ۵). این یافته با مطالعات آناندکومار و همکاران (Anandkumar et al., 2019) در مالزی و ناث و گوش (Nath & Ghosh, 2024) در هند هم راستا است که نشان دهنده الگوی جهانی پایداری اراضی با ارزش اقتصادی بالاست.

پیش‌بینی تا سال ۲۰۳۱

مدل سلول‌های خودکار- مارکوف بر اساس داده‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۴ برای پیش‌بینی تا سال ۲۰۳۱ نشان داد که کاربری‌های کشاورزی (۰/۹۹۸۹)، مسکونی (۰/۹۸۸۶) و درختی، درختچه‌ای و بوته‌زار (۰/۹۷۶۶) بالاترین احتمال پایداری را خواهند داشت، در حالی که بستر رودخانه با احتمال ۰/۶۸۳۳ بیشترین پویایی را نشان می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود بخش قابل توجهی از بستر رودخانه (۲۵/۵٪) به پوشش درختی، درختچه‌ای و بوته‌زار و ۲/۹۲٪ به کشاورزی تبدیل شود که می‌تواند نشانگر خشک شدن و تغییر مورفولوژی بستر باشد (شکل ۶).



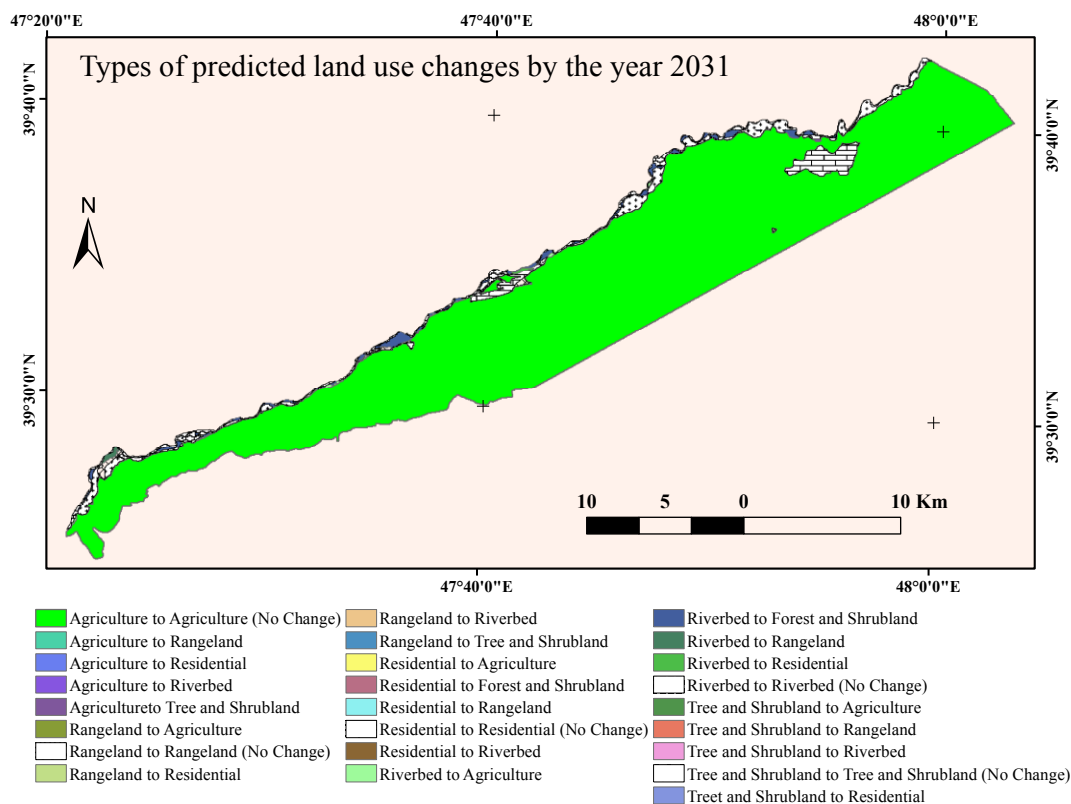
شکل ۴- نقشه پیش‌بینی کاربری در سال ۲۰۲۴ بر مبنای سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ براساس روش سلول‌های خودکار- مارکوف

Fig.4. Predicted land-use map for the year 2024 based on 2010 and 2017 data using the CA-Markov model

کاربری مبدأ \ کاربری مقصد Source land-use \ Target land-use	کشاورزی Agriculture	مرتع Rangeland	مسکونی Residential	رودخانه River	درختی، درختچه‌ای و بوته‌زار Tree-shrubland	درصد احتمال پایداری Percentage probability of persistence
کشاورزی Agriculture	0.9991	0	0	0.0008	0	100
مرتع Rangeland	0.221	0.6693	0.0003	0.1071	0.0023	80
مسکونی Residential	0.0022	0	0.9967	0.0011	0	60
رودخانه River	0.0162	0.0065	0.0033	0.7919	0.182	40
درختی، درختچه‌ای و بوته‌زار Tree-shrubland	0.0067	0.0002	0.0001	0.1359	0.8572	20
						0

شکل ۵- نمودار حرارتی^۱ ماتریس احتمال انتقال مدل سلول‌های خودکار- مارکوف

Fig.5. Heat map of the CA-Markov transition probability matrix



شکل ۶- نوع تغییر کاربری های پیش بینی شده تا سال ۲۰۳۱

Fig.6. Types of predicted land-use changes by the year 2031

ماتریس تغییرات پیکسل ها نشان داد ۳,۱۸۶,۵۶۶ پیکسل با اندازه ۱۰ متر × ۱۰ متر از اراضی کشاورزی و ۸۱,۹۵۸ پیکسل از اراضی مسکونی پایدار خواهند ماند. اراضی مرتعی پویایی متوسط و بستر رودخانه پویایی بالای دارند؛ تقریباً ۳۱/۷٪ از پیکسل های رودخانه به کاربری های دیگر منتقل خواهند شد. پوشش درختی، درختچه ای و بوته زار با ۹۷٪ پایداری تنها ۳٪ تغییر خواهد داشت. نقشه تغییرات نشان می دهد تحولات عمده در مسیر و بستر رودخانه و مناطق حاشیه ای آن رخ خواهد داد (شکل ۷).

تحلیل اقتصادی تغییرات

ارزیابی اقتصادی نشان داد که تغییرات کاربری تا سال ۲۰۳۱ خسارت اقتصادی کلی حدود ۲۲,۹۷۱ میلیارد ریال (۲,۲۹۷ میلیارد تومان) را به همراه خواهد داشت. بیشترین خسارت مربوط به تغییر بستر رودخانه به پوشش طبیعی با ۱۹,۱۹۳ میلیارد ریال است. مجموع مساحت تغییر یافته ۷۶۶ هکتار برآورد شده است. تغییرات اراضی کشاورزی (۶۰ هکتار، ۱,۸۱۱ میلیارد ریال) و سکونتگاهی (۱۸ هکتار، ۵۳۰ میلیارد ریال) نیز خسارت قابل توجهی ایجاد خواهند کرد.

ارزش اقتصادی هر هکتار زمین بر اساس میانگین قیمت های منطقه ای، بررسی میدانی و گزارش های رسمی مرتبط با ارزش اراضی در سال ۱۴۰۴ برآورد شده و به عنوان شاخص مقایسه ای خسارت اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته است. این مطالعه بر مقایسه نسبی خسارت اقتصادی بین کلاس های مختلف کاربری زمین متمرکز است و هدف آن تعیین ارزش مطلق زمین نیست؛ از این رو، از شاخص های اقتصادی برآوردی استفاده شده است که مطابق با روش های متداول در ادبیات تغییر کاربری زمین می باشد. (Lambin, Geist, & Lepers, 2003; Pontius & Malanson, 2005; Costanza et al., 2014).

با این رویکرد، امکان تحلیل نسبی اثرات تغییرات کاربری بر خسارت اقتصادی برای تحلیلگران فراهم شده و نقش حیاتی اراضی مرتعی و پوشش‌های طبیعی در حفظ اکوسیستم‌ها حفظ می‌شود (جدول ۲).

کاربری مبدأ \ کاربری مقصد Source land-use \ Target land-use	کشاورزی Agriculture	مرتع Rangeland	مسکونی Residential	رودخانه River	درختی، درختچه‌ای و بوته‌زارها Tree-shrubland	درصد احتمال پایداری Percentage probability of persistence
کشاورزی Agriculture	0.9989	0.0001	0.0003	0.0001	0.0006	100
مرتع Rangeland	0.0185	0.9475	0.0059	0.0059	0.0221	80
مسکونی Residential	0.0104	0.0007	0.9886	0	0.0003	60
رودخانه River	0.0292	0.0213	0.0108	0.6833	0.2554	40
درختی، درختچه‌ای و بوته‌زارها Tree-shrubland	0.0168	0.0019	0.0007	0.004	0.9766	20
						0

شکل ۷- نمودار حرارتی مربوط به مدل سلول‌های خودکار- مارکوف براساس کاربری سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۴ برای پیش‌بینی سال ۲۰۳۱
Fig. 7. Heat map of the CA-Markov model based on land-use in 2010 and 2024 for predicting the year 2031

جدول ۲- خسارت مالی پیش‌بینی شده کاربری اراضی تا ۲۰۳۱
Table 2- Predicted economic losses of land-use up to the year 2031

کاربری زمین Land-use	مساحت تغییر (هکتار) Area of change (hectares)	خسارت (میلیارد ریال) Estimated loss (Billion Rials)	مقصد اصلی تغییر Main destination of change
کشاورزی Agriculture	60.38	1811.4	درختی / بوته‌زار Tree/Shrubland
مرتع Rangeland	11.78	353.4	درختی / بوته‌زار Tree/Shrubland
مسکونی Residential	17.67	530.1	کشاورزی Agriculture
رودخانه River	639.76	19192.8	درختی / بوته‌زار Tree/Shrubland
درختی / بوته‌زار Tree/Shrubland	36.12	1083.6	کشاورزی Agriculture
کل Total	765.71	22971.3	-

نقاط بحرانی رودخانه

رودخانه ارس در محدوده استان اردبیل به شش بازه تقسیم شد (شکل ۸). تقسیم‌بندی رودخانه ارس به شش بازه با هدف مدیریت بهتر و تحلیل دقیق‌تر تغییرات بستر و خسارات ناشی از آن انجام شد. این تقسیم‌بندی بر اساس طول متفاوت، مساحت تحت تأثیر، و نسبت مساحت به طول در هر بازه صورت گرفت. به عنوان مثال، بازه‌های سه و پنج با خسارات بالای ۷۱۰۵/۷۴ و ۶۱۴۴/۹۵ میلیارد ریال، به‌ویژه در معرض فرسایش شدید و تهدید اراضی کشاورزی و سکونتگاهی هستند و نیاز به اقدامات پیشگیرانه و مدیریت خاص دارند. در مقابل، بازه شش که کمترین مساحت تحت تأثیر و خسارت احتمالی را دارد، کم‌خطرترین بخش محسوب می‌شود (جدول ۳). این تقسیم‌بندی به تحلیل دقیق‌تر خسارات اقتصادی و تصمیم‌گیری مؤثرتر در مدیریت منابع کمک می‌کند و امکان

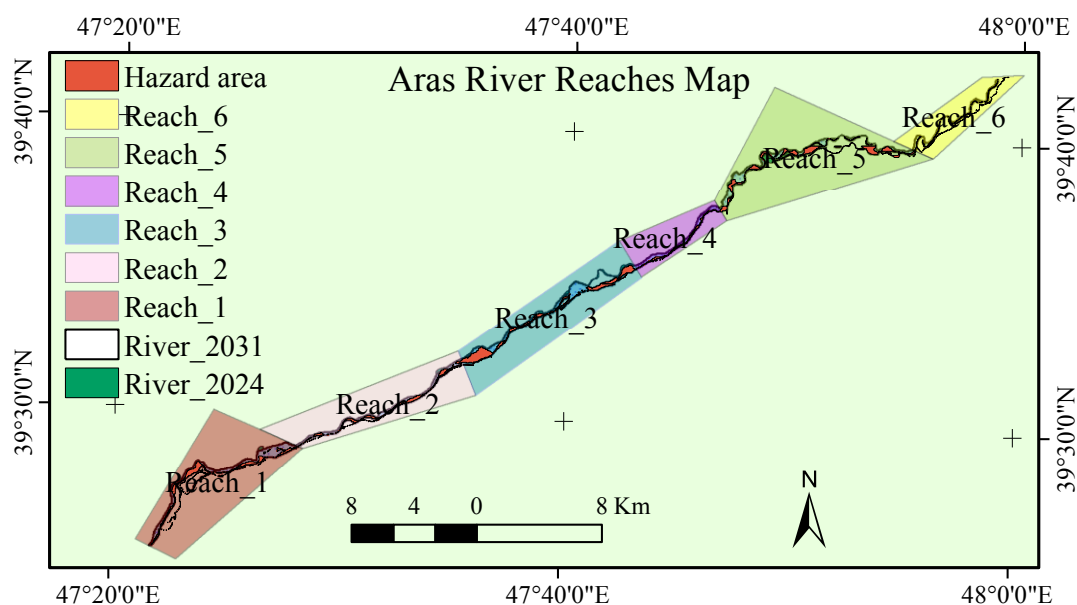
برنامه ریزی هدفمند برای هر بخش از رودخانه را فراهم می آورد. به این ترتیب، می توان استراتژی های مدیریتی متفاوتی را برای مناطق بحرانی و کم خطر تدوین کرده و به طور مؤثرتری از آسیب های احتمالی جلوگیری کرد.

جدول ۳- مشخصات بازه ای رودخانه ارس و برآورد خسارت ناشی از تغییرات بستر و کاربری اراضی

Table 3- Characteristics of Aras River reaches and damage estimation resulting from riverbed and land use changes

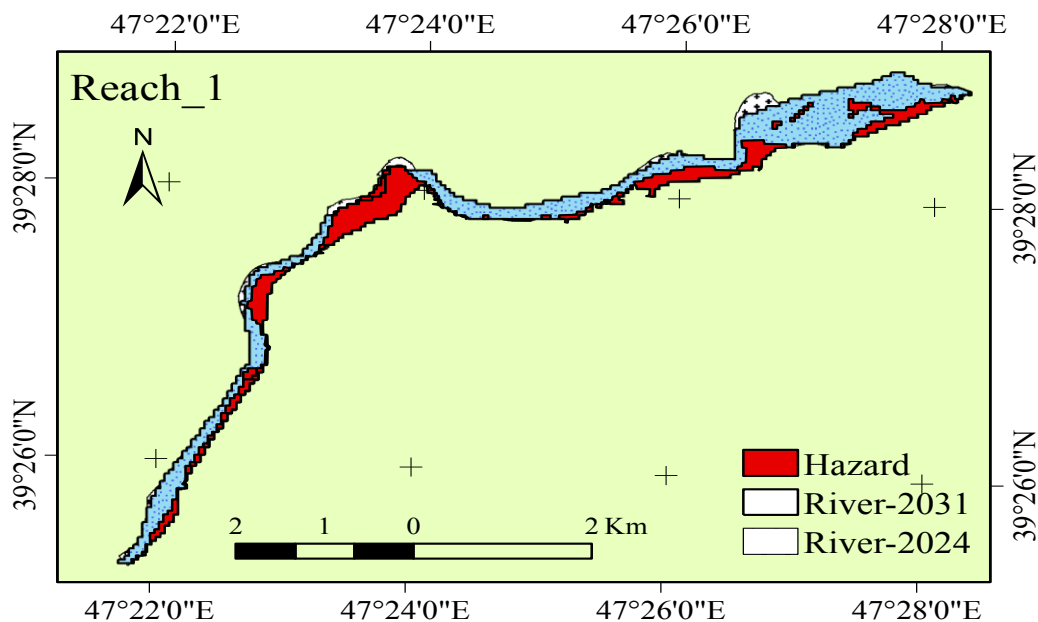
بازه Reach	طول بازه (کیلومتر) Segment Length (Kilometers)	مساحت (هکتار) Area (Hectares)	نسبت مساحت به طول (هکتار/کیلومتر) Area-to-Length Ratio (Hectares/Kilometer)	خسارت احتمالی (میلیارد ریال) Estimated Damage (Billion Rial)
1	13.880	150.30	10.83	4508.99
2	12.687	112.08	8.83	3362.47
3	13.780	236.86	17.19	7105.74
4	7.030	41.96	5.97	1258.66
5	16.365	204.83	12.52	6144.95
6	9.635	19.68	2.04	590.49
کل Total	73.377	765.71	10.44	22971.30

نقشه های سال ۲۰۲۴ و پیش بینی تا ۲۰۳۱، تحولات قابل توجه در بستر، افزایش فرسایش کناری و تهدید اراضی کشاورزی و سکونتگاهی را نشان می دهند (شکل های ۹-۱۴). مجموع طول رودخانه ۷۳/۴ کیلومتر و مساحت تحت تأثیر ۷۶۶ هکتار برآورد شد. براساس شاخص مساحت تحت خطر به طول بازه، بازه های سه و پنج با خسارت ۷،۱۰۶ و ۶،۱۴۵ میلیارد ریال و نسبت مساحت به طول ۱۷/۱۹ و ۱۲/۵۲ هکتار/کیلومتر بحرانی ترین نقاط هستند. بازه یک با طول ۱۳/۸۸ کیلومتر، مساحت ۱۵۰ هکتار و خسارت ۴،۵۰۹ میلیارد ریال در اولویت بعدی قرار دارد. بازه دو با ۱۱۲ هکتار و ۳،۳۶۲ میلیارد ریال خسارت نیز قابل توجه است. بازه چهار با ۴۲ هکتار و ۱،۲۵۹ میلیارد ریال و بازه شش با ۲۰ هکتار و ۵۹۰ میلیارد ریال کم خطرترین بخش ها محسوب می شوند.



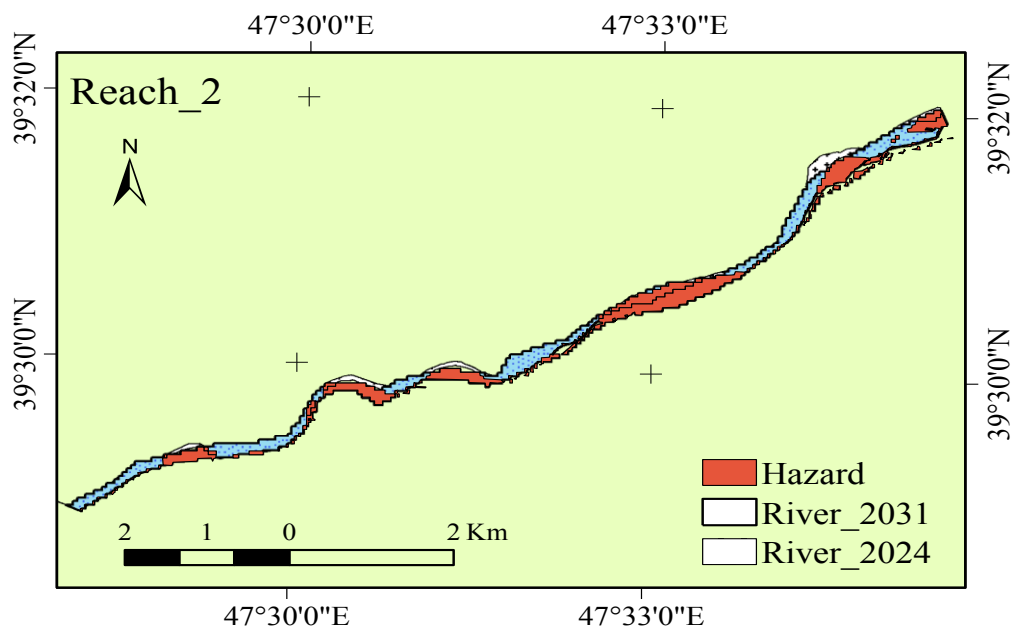
شکل ۸- موقعیت بازه های مسیر رودخانه ارس در محدوده استان اردبیل

Fig. 8. Location of river reaches along the Aras River within Ardabil Province



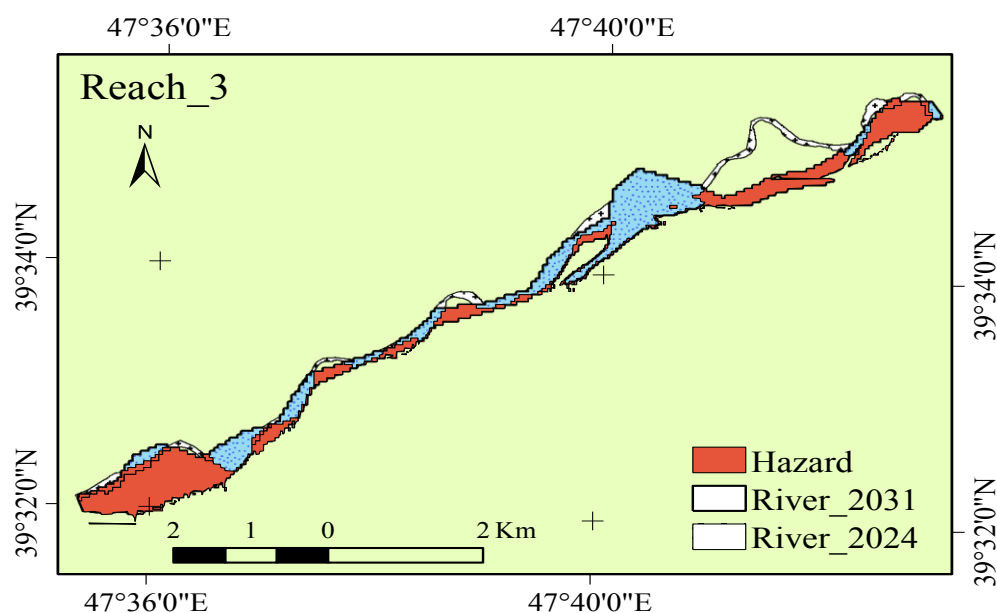
شکل ۹- موقعیت بازه یک مسیر روخانه ارس در استان اردبیل و اراضی تحت خطر احتمالی تا سال ۲۰۳۱

Fig. 9. Location of the first reach of the Aras River in Ardabil Province and the areas potentially at risk up to 2031



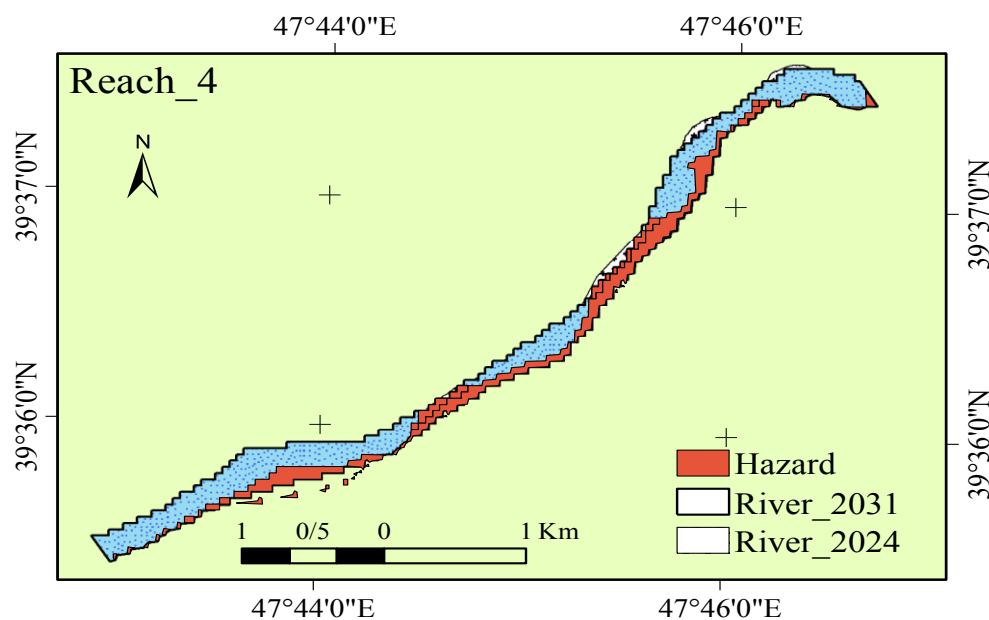
شکل ۱۰- موقعیت بازه دوم مسیر روخانه ارس در استان اردبیل و اراضی تحت خطر احتمالی تا سال ۲۰۳۱

Fig. 10. Location of the second reach of the Aras River in Ardabil Province and the areas potentially at risk up to 2031



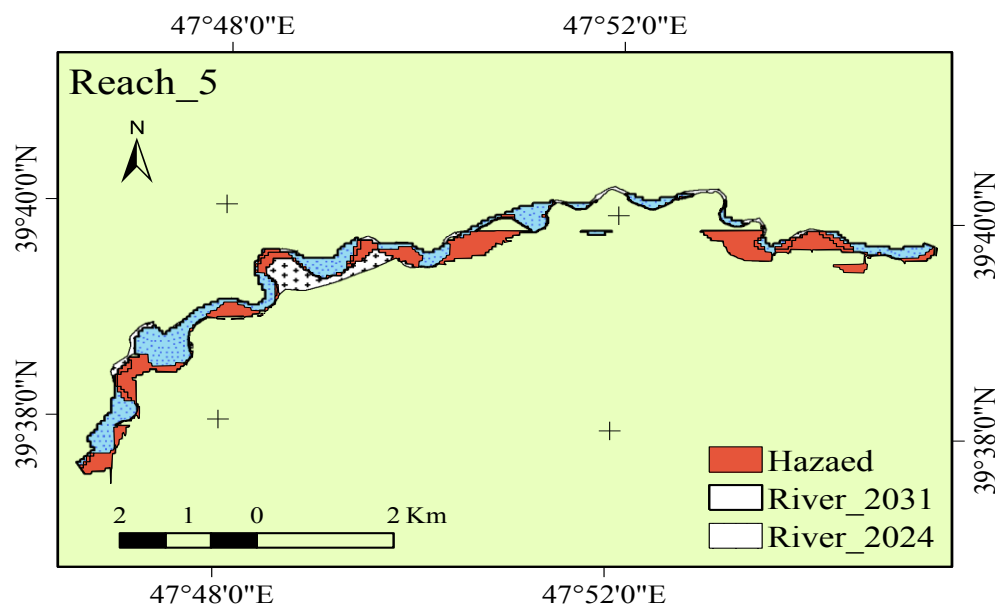
شکل ۱۱- موقعیت بازه سوم مسیر روخانه ارس در استان اردبیل و اراضی تحت خطر احتمالی تا سال ۲۰۳۱

Fig. 11. Location of the third reach of the Aras River in Ardabil Province and the areas potentially at risk up to 2031



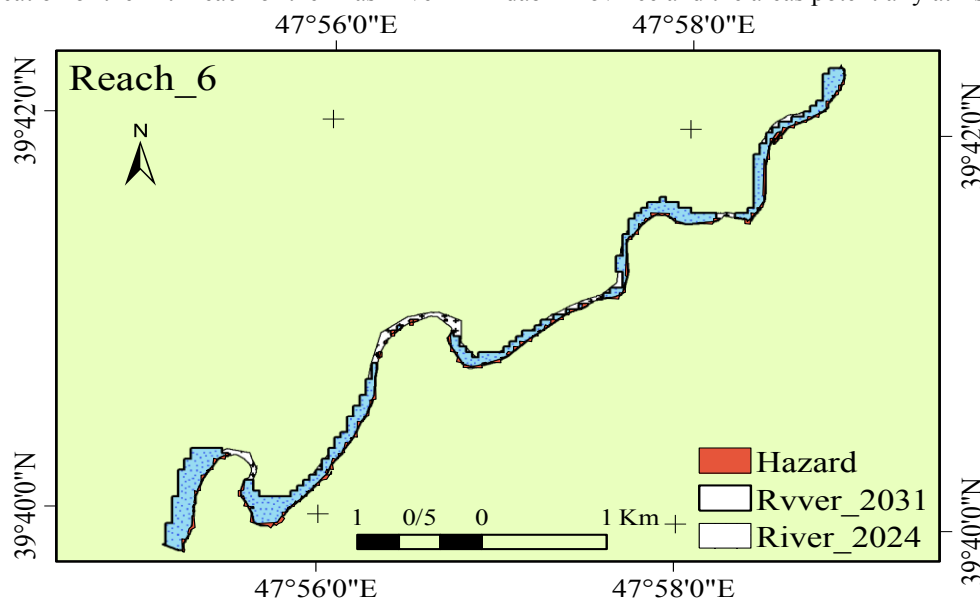
شکل ۱۲- موقعیت بازه چهارم مسیر روخانه ارس در استان اردبیل و اراضی تحت خطر احتمالی تا سال ۲۰۳۱

Fig. 12. Location of the fourth reach of the Aras River in Ardabil Province and the areas potentially at risk up to 2031



شکل ۱۳- موقعیت بازه پنجم مسیر روخانه ارس در استان اردبیل و اراضی تحت خطر احتمالی تا سال ۲۰۳۱

Fig. 13. Location of the fifth reach of the Aras River in Ardabil Province and the areas potentially at risk up to 2031



شکل ۱۴- موقعیت بازه ششم مسیر روخانه ارس در استان اردبیل و اراضی تحت خطر احتمالی تا سال ۲۰۳۱

Fig. 14. Location of the sixth reach of the Aras River in Ardabil Province and the areas potentially at risk up to 2031

اولویت‌بندی مدیریت باید روی بازه‌های پرخطر برای تثبیت بستر، سازه‌های حفاظتی و اصلاح کاربری اراضی باشد. استفاده از شاخص ترکیبی خسارت مالی و نسبت مساحت به طول می‌تواند برای رتبه‌بندی بازه‌ها و تخصیص منابع در مطالعات مشابه مفید باشد. این یافته‌ها با مطالعات هازاریکا و همکاران (Hazarika et al., 2015)، حمد و همکاران (Hamad, Balzter & Kolo, 2018) و گوش و ساها (Ghosh & Saha, 2023) همخوانی دارد و اهمیت تلفیق داده‌های مکانی، اقتصادی و مدل‌های پیش‌بینی برای کاهش خسارات را برجسته می‌کند.

نتایج این مطالعه با یافته‌های تحقیقات مشابه در ایران و سایر کشورها همخوانی دارد. در مطالعه هازاریکا و همکاران (Hazarika et al., 2015) در دشت‌های سیلابی برهماپوترای هند، الگوی مشابهی از تغییرات سریع کاربری در مناطق طبیعی پیرامون بستر رودخانه و پایداری نسبی اراضی کشاورزی و سکونتگاهی مشاهده شد. ناث و گوش (Nath & Ghosh, 2024) نیز در رودخانه‌های مئاندری هند نشان دادند که مهاجرت بستر و تغییرات مورفولوژیکی موجب تغییرات گسترده در کاربری زمین می‌شود. مطالعات آناندکومار و همکاران (Anandkumar et al., 2019) در ساحل میری مالزی نشان دادند که اراضی کشاورزی و مناطق شهری به دلیل اهمیت اقتصادی کمتر تحت تأثیر تغییرات کاربری قرار می‌گیرند، که با یافته‌های این پژوهش در رودخانه ارس هم‌راستا است. همچنین مطالعات داخلی نظیر اصغری سراسکانرود و اردشیرپی (Asghari Sereskanrood & Ardeshtirpey, 2020)، زارعی و همکاران (Zarei, Shanani Hoveyze & Joorabian Shooshtari, 2024) نیز پایداری بالای اراضی با ارزش اقتصادی را تأیید می‌کنند. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند که توسعه ناپایدار کاربری انسانی در دشت‌های سیلابی و اطراف رودخانه‌ها خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کند (Dottori et al., 2018; Sun et al., 2022; Wang et al., 2024).

یافته‌های این پژوهش نیز هم‌راستا با نتایج مطالعات خشنود مطلق و همکاران و مدرس و همکاران (Modarres, Sarhadi & Wang et al., 2012) در حوضه ارس و همچنین مطالعات وانگ و همکاران (Wang et al., 2012) در چین و هازاریکا و همکاران (Hazarika et al., 2015) در هند نشان می‌دهد که تغییرات گسترده کاربری اراضی در محدوده‌های سیلابی رودخانه ارس، همراه با افزایش رخداد‌های حدی نظیر خشکسالی و سیلاب، موجب تشدید ناپایداری مورفودینامیکی، افزایش مهاجرت بستر و حساسیت بیشتر سامانه رودخانه‌ای نسبت به فرسایش کناره‌ای و انتقال رسوبات شده است. این تغییرات نه تنها پویایی کانال را افزایش داده بلکه منجر به تخریب پوشش گیاهی حاشیه‌ای، کاهش ظرفیت جذب و ذخیره رواناب، و تهدید اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌های مجاور نیز شده است. در نتیجه، لزوم برنامه‌ریزی برای کاربری اراضی با رویکرد مدیریت سیلاب و حفاظت کرانه‌ای به‌عنوان راهبردی اساسی برای کاهش خطرپذیری و پایداری بلندمدت سیستم رودخانه‌ای ارس ضروری به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پویایی بستر و تغییرات کاربری اراضی در ساحل رودخانه ارس در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی، برداشت‌های میدانی و مدل سلول‌های خودکار-مارکوف مورد تحلیل جامع قرار گرفت. نتایج نشان داد که رودخانه ارس به دلیل الگوی مئاندری، مهاجرت فعال کانال و فرآیندهای غالب فرسایش کناره‌ای و رسوب‌گذاری، بیشترین تغییرات را در بستر خود تجربه کرده است. کاهش قابل توجه مساحت بستر رودخانه (حفظ تنها حدود ۷۳۴ هکتار از ۱۸۶۸ هکتار اولیه) بیانگر حساسیت بالای این پهنه به عوامل طبیعی و مداخلات انسانی بوده و تهدید جدی برای اراضی کشاورزی، سکونتگاه‌ها و پوشش‌های طبیعی پیرامونی ایجاد کرده است. در مقابل، اراضی کشاورزی و مسکونی در طول دوره مورد مطالعه از پایداری بسیار بالایی برخوردار بوده و بیش از ۹۹ درصد مساحت اولیه خود را حفظ کرده‌اند که نشان‌دهنده اهمیت اقتصادی و اجتماعی این کاربری‌ها و تمرکز سیاست‌های مدیریتی بر حفاظت از آن‌ها است.

نتایج مدل‌سازی سلول‌های خودکار-مارکوف و تحلیل ماتریس احتمال انتقال نیز مؤید این الگو است؛ به‌گونه‌ای که اراضی کشاورزی و مسکونی بیشترین پایداری (حدود ۰/۹۹۹) و بستر رودخانه و مراتع بیشترین تغییرپذیری را نشان دادند. دقت بسیار بالای مدل (صحت کلی ۹۹ درصد، ضریب کاپای ۰/۹۷ و AUC برابر ۰/۹۲۶) قابلیت اطمینان آن را در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آتی کاربری اراضی تأیید می‌کند. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۳۱ نیز روند غالب ثبات در اراضی کشاورزی و سکونتگاهی ادامه خواهد یافت، در حالی که بستر رودخانه و پوشش‌های طبیعی، به‌ویژه پوشش درختی، درختچه‌ای و بوته‌زار، بیشترین پویایی را تجربه خواهند کرد. تبدیل بخشی از بستر رودخانه به پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی، نشانه‌ای از تغییر در بستر رودخانه و گرایش به خشک‌شدگی نسبی بستر است که پیامدهای اکولوژیکی و اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته و خواهد داشت.

تحلیل اقتصادی نتایج نشان داد که تداوم این تغییرات تا سال ۲۰۳۱ می‌تواند منجر به خسارت مالی چشمگیری در حدود ۲,۲۹۷ میلیارد تومان شود که بخش عمده آن ناشی از تغییرات بستر رودخانه و کاهش اراضی کشاورزی است. ارزیابی بازه‌ای رودخانه مشخص کرد که بازه‌های ۳ و ۵ از نظر خطر فرسایش و میزان خسارت اقتصادی، بحرانی‌ترین بخش‌ها محسوب می‌شوند و باید در اولویت اقدامات مدیریتی و حفاظتی قرار گیرند.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که حفاظت و تثبیت بستر و کرانه‌های رودخانه، مدیریت پایدار اراضی کشاورزی و سکونتگاهی، و احیای پوشش‌های گیاهی پیرامونی، علاوه بر توجیه‌پذیری اقتصادی، نقش کلیدی در کاهش خطر سیلاب، مهار فرسایش، حفظ تعادل اکولوژیکی، ارتقای امنیت زیست‌محیطی و اجتماعی و افزایش تاب‌آوری در شرایط تغییرات اقلیمی در این منطقه مرزی دارد. رویکرد تلفیقی مبتنی بر سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های پیش‌بینی مانند سلول‌های خودکار-مارکوف، چارچوبی کارآمد برای شناسایی مناطق بحرانی، اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت رودخانه‌ای و برنامه‌ریزی منطقه‌ای در مقیاس‌های محلی، ملی و فرامرزی فراهم می‌آورد.

References

- Adnan, M. S., Dewan, A., Zannat, K. E., & Abdullah, A. Y. (2019). The use of watershed geomorphic data in flash flood susceptibility zoning: A case study of the Karnaphuli and Sangu river basins of Bangladesh. *Natural Hazards*, 99(1), 425–448. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03749-3>
- Anandkumar, A., Vijith, H., Nagarajan, R., & Jonathan, M. P. (2019). *Evaluation of decadal shoreline changes in the coastal region of Miri, Sarawak, Malaysia*. Chapter 7, Coastal Management, Global Challenges and Innovations, 95–119. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810473-6.00008-X>
- Asghari Sereskanrood, S., & Ardeshirpey, A. (2020). Prediction of Land Use Changes Using CA-Markov: A Case Study of Yasuj City. *Town and Country Planning*, 12(2), 407-430. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.302048.670111>
- Basnayaka, B., Nandalal, K. D. W., & Rathnayake, U. (2022). Analysis of meandering river morphodynamics using satellite remote sensing data: An application in the Lower Deduru Oya (River), Sri Lanka. *Land*, 11(7), 1091. <https://doi.org/10.3390/land11071091>
- Camargo, F. F., Sano, E. E., Almeida, C. M., Mura, J. C., & Almeida, T. A. (2019). Comparative assessment of machine-learning techniques for land use and land cover classification of the Brazilian tropical savanna using ALOS-2/PALSAR-2 polarimetric images. *Remote Sensing*, 11(1600), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs11131600>
- Choubin, B., & Habibi, A. (2024). *Application of the Cellular Automata–Markov Model in Predicting Critical Flood Hazard Areas in the Aras Watershed within West Azerbaijan Province*. Technical Report, Ministry of Agriculture-Jahad, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute.
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- Debnath, J., Das, N., Ahmed, I., & Bhowmik, M. (2017). Channel migration and its impact on land use/land cover using RS and GIS: A study on Khowai River of Tripura, North-East India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.01.009>
- Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J. C., Zhao, F., Alfieri, L., Hirabayashi, Y., ... & Feyen, L. (2018). Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*, 8(9), 781–786. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z>

- Esfandyari Darabad, F., Asghari Saraskanroud, S., Ghandi Asl, M., & Mostafazadeh, R. (2025). Analyzing the lateral changes of Aras River channel in Ardabil Province using morphological indicators. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 15(4), 1–27. [In Persian] <https://doi.org/10.30495/girs.2022.697516>
- Ghosh, D., & Saha, S. (2023). Identifying river bank erosion potential zones through geo-spatial and binary logistic regression modeling approach: A case study of river Ganga in Malda district (India). *Modeling Earth Systems and Environment*, 10, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01740-3>
- Habibi, A., Habibzadeh, A., Talaie, R., & Choubin, B. (2025). *Development of flood hot spot map in the Aras Watershed, emphasizing agricultural and urban-rural settlement land uses*. Final report of research project, Ministry of Agriculture-Jahad, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute.
- Habibzadeh, A., Habibi, A., Eslahi, M. (2025). Assessment and Prediction of Land Use Changes in the Middle Aras watershed using a Modeling Approach. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 19(69), 114-127. <http://jwmsei.ir/article-1-1207-en.html>
- 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>
- Hasan, I., Dey, J., Munna, M. M., Preya, A., Nisanur, T., Memy, M. J., & Zeba, M. (2024). Morphological changes of river bank erosion and channel shifting assessment on Arial Khan River of Bangladesh using Landsat satellite time series images. *Progress in Disaster Science*, 24, 100381. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100381>
- Hasanuzzaman, M. D., Gayen, A., Haque, S. M., & Shit, P. K. (2022). Spatial modeling of river bank shifting and associated LULC changes of the Kaljani River in Himalayan foothills. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(2), 563–582. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02147-1>
- Hatamiafkoueih, J., Shirali, M., & Razoumny, Y. (2025). Assessment of land use changes in Ahvaz and their impact on the morphological changes of the Karun River using Landsat time-series data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48(2/W9), 117–122. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W9-2025-117-2025>
- Hazarika, N., Das, A., & Borah, S. (2015). Assessing land-use changes driven by river dynamics in chronically flood affected Upper Brahmaputra plains, India, using RS-GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 39, 107-118. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.02.001>
- Hejazi, A., Modiri, M., Rahimi, M., & Mehrvarz, A. (2017). Investigation of Channel Change of Aras River by Using Transect Method from 1987 to 2014 and the Effects of Built Structures on the Modification of River Route (Case Study: From Aslandoz to Parsabad). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 5(4), 73-89. <https://doi.org/10.22067/geo.v5i4.56104>
- Hook, J. (2023). Morphodynamics of active meandering rivers reviewed in a hierarchy of spatial and temporal scales. *Geomorphology*, 439, 108596. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108825>
- Jamali, A. (2019). Evaluation and comparison of eight machine learning models in land use/land cover mapping using Landsat 8 OLI: A case study of the northern region of Iran. *SN Applied Sciences*, 1, 1448. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1502-1>
- Johnson, L. E., & Olsen, B. G. (1998). Assessment of quantitative precipitation forecasts. *Weather and Forecasting*, 13(1), 75-83. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013%3C0075:AOQPF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013%3C0075:AOQPF%3E2.0.CO;2)
- Khoshnood Motlagh, S., Verrelst, J., Daneshi, A., Mirzaei, M., Azadi, H., Haghighi, M., ... & Marofi, S. (2020). Transboundary basins need more attention: Anthropogenic impacts on land cover changes in Aras River Basin, monitoring and prediction. *Remote Sensing*, 12(20), 3329. <https://doi.org/10.3390/rs12203329>
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>

- Langat, P. K., Kumar, L., & Koech, R. (2019). Monitoring River channel dynamics using remote sensing and GIS techniques. *Geomorphology*, 325, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.007>
- Li, Z., Li, L., & Liu, J. (2025). Remote Sensing and GIS-Based Assessment of Riverbank Erosion, Deposition, and Channel Migration: A Case Study in Tarim River's Xinqiman–Kelelik Mainstem. *Applied Sciences*, 15(13), 6977. <https://doi.org/10.3390/app15136977>
- Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A., & Real, R. (2008). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 145-151. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x>
- Masoumi, H., Habibi, A., & Gharibreza, M. (2021). Prediction of rivers and floods in Dashtyari region for 2030 horizon. *Watershed Engineering and Management*, 13(3), 638-649. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.352118.1842>
- Modarres, R., Sarhadi, A., & Burn, D. H. (2016). Changes of extreme drought and flood events in Iran. *Global and Planetary Change*, 146, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.008>
- Mohebi, A., & Mirzaie, M. (2014). Evaluation of stability of Aras using method A–Syst margin. *Journal of Water and Soil Management in Environmental Resources (JWMSEIR)*, 8(26). [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1393.8.26.4.5>
- Muhangane, L., & Andama, M. (2024). Modelling Land Use/Land Cover Change of River Rwizi Catchment, South-Western Uganda Using GIS and Markov Chain Model. *Journal of Water Resource and Protection*, 16, 181-206. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2024.162011>
- Nath, B., & Ghosh, S. (2024). Morphodynamic evolution of braided rivers: Insights from remote sensing and hydrological modeling. *Geomorphology*, 445, 109973.
- Pontius, R. G., & Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 243–265. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713434>
- Rahimi, M., Hosseinzadeh, S. R., & Vahabzadeh Zargari, M. (2025). Assessment of Land Use Changes Impact on River Morphology and Its Implications for Increased Flood Hazard Vulnerability (Case Study: Qarasu River – Ardabil). *Journal of Geography and Environmental Hazards*. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.95345.1607>
- Rezaei Moghaddam, M., Keirizadeh, M., & Rahimi, M. (2016). Investigating the Lateral Movement of Aras River from 2000-2014 (15 km away from West of Aslanduz City to Exit of the River in Iran's Border). *Geography and Environmental Planning*, 27(3), 15-32. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2017.97944>
- Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 938-943. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.019>
- Shahid, M., Cong, Z., & Zhang, D. (2018). Understanding the impacts of climate change and human activities on streamflow: A case study of the Soan River basin, Pakistan. *Theoretical and Applied Climatology*, 134, 205–219. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2269-4>
- Shahriar, A., Sharifi Pichon, M., & Esfandiyari, Z. (2020). Investigation of river meanders geomorphologic changes using satellite imagery during the period from 1990 to 2018 (Case study: Bashar River). *Quantitative Geomorphological Researches*, 8(3), 132–145. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_102798.html?
- Sokolova, M., Japkowicz, N., & Szpakowicz, S. (2006). Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation. Conference Paper in: *Advances in Artificial Intelligence (pp. 1015–1021)*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11941439_114
- Sun, Q., Fang, J., Dang, X., Xu, K., Fang, Y., Li, X., & Liu, M. (2022). Multi-scenario urban flood risk assessment by integrating future land use change models and hydrodynamic models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 3815–3829. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3815-2022>

- Vahid, R., & Aly, M. H. (2025). An Integrated CA–Markov Modeling Framework for Forecasting Land Use and Land Cover Dynamics in Arkansas, USA. *Geomatics*, 5(4), 62. <https://doi.org/10.3390/geomatics5040062>
- Verma, R. K., Ashwini, K., & Singh, A. (2021). Channel morphology and prediction of mid-line channel migration in the reach of Ganga River using GIS and ARIMA modeling during 1975–2020. *H2Open Journal*, 4(1), 321–335. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2021.124>
- Wang, L., Wang, N., Pang, M., Zhang, Q., Wei, D., Li, Y., ... & Jin, L. (2024). Analysis of spatiotemporal land use change characteristics in the upper watershed area of the Qingshui River basin from 1990 to 2020. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1388058. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1388058>
- Wang, S. Q., Zheng, X. Q., & Zang, X. B. (2012). Accuracy assessments of land use change simulation based on Markov-cellular automata model. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1238–1245. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.117>
- Yamani, M., Rahimi, M., & Veysi, A. (2015). Morphometric analysis and comparison of cross-sectional changes of the Aras River during the past three decades: A case study of the downstream of the Mil-Moghan Dam. *Quantitative Geomorphological Research*, 3(4), 74-89. [In Persian]
- Yuan, Q., & Tang, X. (2023). Multi-temporal urban land-use change detection and prediction using CNN-based CA–Markov model from Gaofen satellite images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-3, 279–284. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-3-2023-279-2023>
- Yucong H., Zhiwei L., Junqiang X., Shanshan D., & Yinjun Z. (2024). Channel Morphological Characteristics and Morphodynamic Processes of Large Braided Rivers in Response to Climate-Driven Water and Sediment Flux Change in the Qinghai-Tibet Plateau. *Water Resources Research*, 60, e2023WR036126. <https://doi.org/10.1029/2023WR036126>
- Zarei, H., Shanani Hoveyze, S. M., & Joorabian Shooshtari, S. (2024). Temporal-Spatial Prediction of Land Use Changes Using LCM Model in Doroodzan Dam Watershed. *Environment and Water Engineering*, 10(3), 363-378. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.408348.1881>
- Zhang, F., Tiyp, T., Feng, Z. D., Kung, H.-T., Johnson, V. C., Ding, J. L., Tashpolat, N., ... & Gui, D. W. (2015). Spatio-temporal patterns of land use/cover changes over the past 20 years in the middle reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. *Land Degradation & Development*, 26, 284–297. <https://doi.org/10.1002/ldr.2206>
- Zhu, Z. (2017). Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 370–384. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>