



Assessment of Land-Use Changes Impact on River Morphology and Its Implications for Increased Flood Hazard Vulnerability (Case Study: Qara-Su River – Ardabil)

Masoud Rahimi ^{1*}, Seyed Reza Hosseinzadeh ², Mehrdad Vahabzadeh Zargari ³

¹ Assistant Professor in Geomorphology, Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Professor in Geomorphology, Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ M.Sc. in Geomorphology and Environmental Management, Faculty of Social Sciences University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 09 September 2025

Revised: 17 November 2025

Accepted: 26 November 2025

Available Online: 27 November 2025

Keywords:

Land-Use Change

River Morphology

Floodplain

Qara-Su River

ABSTRACT

This study investigates the impact of land-use changes on the channel morphology of the Qara-Su River and its consequences. The extraction of land-use maps was carried out using Landsat (2005) and Sentinel-2 (2024) satellite imagery. Subsequently, the effects of these changes on the river width, channel bed area, and the migration of the river's centerline were examined. The results indicated that over the past 19 years, agricultural land-use within the river's floodplain has expanded (e.g., 116 hectares in the first reach, 252 hectares in the second reach, and 203 hectares in the third reach). This expansion reflects the encroachment of agricultural activities into the riparian zone and even the active channel of the Qara-Su River. Furthermore, the analysis of river width changes at 38 selected cross-sections along the Qara-Su River clearly revealed a reduction in river width over the past 19 years. Measurements conducted on these 38 cross-sections indicated that the most frequent river width of the Qara-Su River was approximately 13 meters in 2005, while in 2024, the most frequent width decreased to around 4 meters. These changes thus indicate a significant narrowing of the river channel, which consequently reduces its capacity to discharge surface flows. Therefore, the risk of destructive flooding and the vulnerability of agricultural lands along the river's riparian zone are expected to increase significantly in the future. Consequently, attention to land-use changes in the Qara-Su River floodplain and the development of a comprehensive plan for managing human activities within the riparian areas and the river bed should be considered a primary priority for the relevant authorities.

* Corresponding author: Dr. Masoud Rahimi

E-mail address: Masoudrahimi@um.ac.ir

How to cite this article: 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: Qara-Su River–Ardabil). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.95345.1607>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

English Extended Abstract

Introduction

Rivers, as fundamental components of the hydrological cycle, play a crucial role in sustaining ecosystems and flood control. They are vital elements of terrestrial water systems and serve as the primary conveyors of surface water resources. Globally, areas near rivers are preferred for agricultural development and population settlement, and human civilization prospers along river (Wang et al., 2022). Land-use changes, such as urbanization and agricultural expansion, can significantly alter the morphological dynamics and hydrological behavior of rivers. River morphology plays a crucial role in channel stability, flood control, and ecological conservation, and changes in river morphology can have multifaceted impacts on the surrounding environment and society. These impacts include changes to river and adjacent ecosystems, shifts in the distribution and availability of water resources, and hydrological hazards in nearby and downstream areas (Qiang et al., 2007; Chakraborty and Datta, 2013; Ospide et al., 2017). The application of advanced technologies, such as remote sensing, GIS, and hydromorphological modelling, is essential for the analysis and management of river systems. The Qara-Su River in Ardabil Province has experienced significant physical changes due to the expansion of agricultural lands within its bed and riparian zones. Investigating the impacts of these land-use changes on river morphology is essential for the conservation of natural resources and the implementation of sustainable management strategies.

Material and Methods

In this study, multiple data sources were utilized to analyze land-use changes and the morphology of the Qara-Su River. Topographic and geological maps, ALOS-PALSAR elevation data, Sentinel-2, Landsat, and IRS satellite imagery were employed to generate a Digital Elevation Model (DEM), extract stream networks, and assess land-use changes. Hydrological data, including daily discharge and sediment load, were obtained from the Ardabil Regional Water Company and field surveys and were incorporated into the analysis. Data processing and analysis were carried out using software tools such as ArcGIS, ENVI, Sas Planet, Google Earth, HEC-RAS, and related plugins. Field data were controlled and validated with GPS. For land-use classification, a supervised classification method using the maximum likelihood algorithm was applied, with classification performed for both images based on 128 training samples. To quantify river width changes, the Lateral Mobility Index can be applied. This index is calculated by measuring changes in the outermost bankline of the channel (Richard, 2005):

$$\text{Lateral Mobility Index} = \frac{\text{Change Active Channel Area}}{\text{Previous Active Channel Area}} * 100 \quad (1)$$

In this context, a value close to 100% indicates the maximum lateral changes of the river, while a low value of this index represents minimal lateral changes. For calculating lateral migration rates was offered by Shields et al. It uses the following equation (Giardino and Lee 2011; Shields et al. 2000):

$$R_m = (A / L) / y \quad (2)$$

Where R_m refers to lateral migration rate, A is the area between two centerlines of the channel, L is the length of centerline at time t_1 , and y is the number of years. The lateral stability of the channel is determined by the changes in the river's active channel without vegetation during the study period. In other words, the lateral stability index is calculated by dividing the unchanged active channel area by the previous active channel area:

$$\text{Lateral Stability Index} = \frac{\text{Unchange Active Channel Area}}{\text{Previos Active Channel Area}} \quad (3)$$

When the output of this index approaches one, it indicates that the channel has remained in place, while values closer to zero reflect changes in the channel over the study period (Richard et al., 2005a, b).

Results and Discussion

In this study, land-use changes and the morphology of the Qara-Su River over the past 19 years were investigated. The results indicated that between 2005 and 2024, agricultural activities within the floodplain of the river, particularly in its bed and riparian zone, have significantly increased. In certain reaches, such as the first reach, 116 hectares, and in the second reach, 251 hectares of agricultural land were expanded. These changes have led to the narrowing of the river channel and a reduction in the river's flood conveyance capacity. For example, in 2024, the average width of the river channel in certain reaches decreased from 13 meters in 2005 to 3 meters. The construction of the Sabalan Dam has not only reduced the river's discharge and induced morphological changes downstream but also resulted in the stabilization of sediment bars and a further reduction in the channel width. These changes have led to a reduction in the river's lateral dynamics and an increased risk of major floods with return periods exceeding 10 years. Consequently, the diminished conveyance capacity and the potential for overbank flow into the floodplain pose significant threats to agricultural lands and downstream areas. The results showed that over the past 19 years, the river migration rate in different intervals ranged from 0.29 to 0.52 m/year, with an overall average of 0.44 m/year. The river area decreased from 80.04 ha in 2005 to 26.02 ha in 2024, indicating channel narrowing and a reduction in river width. Additionally, the lateral stability index for the intervals was calculated to range between 0.16 and 0.32, with an overall average of 0.22 for the river. The lateral change index ranged from 71% to 85% across different reaches, indicating significant lateral changes of the river. Even in areas with geological control, high values of the index correspond with a reduction in river width.

Conclusions

The present study investigates land-use changes in the floodplain of the Qara-Su River over the period from 2005 to 2024. The results indicate that these changes have occurred rapidly, leading to the narrowing of the river channel and a reduction in its water conveyance capacity. Satellite image analysis, with classification accuracies of 93% for 2024 and 91% for 2005, reveals an expansion of agricultural areas within the river's riparian zone and active channel, which has contributed to the stabilization of vegetation along the riverbanks. The construction of the Sabalan Dam upstream has led to reduced river discharge and an increased risk of severe floods with return periods exceeding 10 years. These changes have increased the vulnerability of the floodplain to flooding and reduced its flow conveyance capacity. Therefore, it is essential to closely monitor land-use changes within the floodplain of the Qara-Su River and to develop a comprehensive plan for managing human activities in its riparian zone, which should be considered a primary priority. For effective river management, it is recommended that policies such as annual land-use monitoring and the enforcement of agricultural restrictions along the riverbanks be implemented.



ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر مورفولوژی رودخانه و پیامدهای آن بر تشدید خطرپذیری سیلاب (مطالعه موردی: رودخانه قره سو- اردبیل)

مسعود رحیمی^{۱*}، سیدرضا حسین زاده^۲، مهرداد وهاب زاده زرگری^۳

^{۱*} استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳ کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی و آمایش محیط، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵	این پژوهش به بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی بر مورفولوژی مجرای رودخانه قره سو و پیامدهای ناشی از آن می پردازد. استخراج نقشه کاربری اراضی بر اساس تصاویر ماهواره- ای (Landsat (2005 و Sentinel-2 (2024 صورت گرفته است. در ادامه تاثیر این تغییرات بر عرض رودخانه، مساحت بستر رودخانه و نیز جابجایی خط مرکزی رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که در طی ۱۹ سال اخیر وسعت کاربری کشاورزی در محدوده دشت سیلابی رودخانه (برای مثال بازه اول ۱۱۶ هکتار، بازه دوم ۲۵۲ هکتار و بازه سوم ۲۰۳ هکتار) افزایش داشته است که این موضوع نشان دهنده پیش روی فعالیت- های کشاورزی به بخش های حریم و حتی بستر فعال رودخانه قره سو بوده است. همچنین نتایج بررسی تغییرات عرض رودخانه قره سو در ۳۸ مقطع عرضی انتخابی در طول مسیر رودخانه، کاهش عرض رودخانه در طی ۱۹ سال اخیر را به طور واضح نمایان ساخت. اندازه گیری های انجام شده بر روی این ۳۸ مقطع عرضی نشان داد که بیشترین فراوانی عرض رودخانه قره سو در سال ۲۰۰۵ نزدیک ۱۳ متر و همچنین بیشترین فراوانی عرض رودخانه در سال ۲۰۲۴ نزدیک ۴ متر بوده است. براین اساس این تغییرات بیانگر وقوع تنگ شدگی شدید در بستر رودخانه بوده که پیامد آن، کاهش ظرفیت عبور جریان های سطحی است. در نتیجه، احتمال بروز سیلاب های مخرب و افزایش آسیب پذیری اراضی کشاورزی حاشیه رودخانه در آینده به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. از این رو لزوم توجه به تغییرات کاربری اراضی در دشت سیلابی رودخانه قره سو و تدوین برنامه ای جامع برای مدیریت مداخلات انسانی در محدوده حریم و بستر این رودخانه، می بایست در زمره اولویت های اصلی نهادهای ذی ربط قرار گیرد.

مقدمه

رودخانه‌ها از اجزای اساسی اکوسیستم‌های طبیعی می‌باشند و به‌عنوان مهم‌ترین منابع آب سطحی به شمار می‌روند. در سراسر جهان، مناطق مجاور رودخانه‌ها همواره مکان‌های مناسبی برای توسعه کشاورزی و سکونت انسان بوده‌اند و تمدن‌های بشری نیز در امتداد رودخانه‌ها شکل گرفته و گسترش یافته‌اند (Wang, Borthwick & Ni, 2022). از قرن نوزدهم به بعد، توسعه فزاینده شهری تأثیر چشمگیری بر مجرای رودخانه و الگوهای کاربری زمین بر جای گذاشت، به‌گونه‌ای که تغییرات قابل توجهی در پلان‌فرم رودخانه‌ها از جمله باریک‌شدن، کانالیزه‌شدن، جابجایی و پوشش بستر آن‌ها به‌وجود آمد (Clerici, Perego, Chelli & Tellini, 2018; Roccati et al., 2015). بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها، از جمله تغییر در مساحت و جهت مجرا در بازه‌های زمانی مختلف، می‌تواند به جوامع مستقر در مجاورت بستر رودخانه کمک کند تا برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و ساخت‌وساز خود را از نواحی مستعد جابجایی مجرا دور نگه داشته و در نتیجه خطرات ناشی از وقوع سیلاب را به حداقل برسانند. به دلیل رشد روزافزون جمعیت و توسعه سریع زندگی شهری و روستایی در اراضی حاشیه رودخانه و طبیعتاً افزایش تقاضا برای ایجاد ساخت و ساز در این اراضی، متأسفانه روند تجاوز به بستر و حریم رودخانه‌ها و نیز تصرف غیرقانونی این‌گونه اراضی به شدت افزایش یافته است (MPOI, 2005). در صورتی که بستر و حریم رودخانه بدون حفاظت یا برنامه‌ریزی رها شوند، در معرض تجاوزات انسانی در مناطق پرخطر آینده قرار می‌گیرند و فرصت ایجاد فضای کافی برای فرآیندهای رودخانه‌ای و بازسازی، از دست می‌رود (Fashae & Olusola, 2017). در واقع زمانی که انسان‌ها در بستر و حریم رودخانه‌ها، فعالیت‌های بدون کنترل انجام دهند، ایمنی این بخش به خطر می‌افتد. در این بین مورفولوژی مجرای رودخانه به توصیف و تعیین ویژگی‌های مساحت مقطع عرضی، شکل، الگوهای فضایی بستر و کناره‌های رودخانه اشاره دارد (Nath & Ghosh, 2022).

مورفولوژی رودخانه نقشی اساسی در پایداری مجرا، کنترل سیلاب و حفاظت اکولوژیکی ایفا می‌کند. پژوهش در زمینه‌ی مورفولوژی مجرای رودخانه از جمله بررسی مساحت مجرا، تغییرات عرض رودخانه و جابجایی مسیر مجرا نقش چشمگیری در کاهش اثرات منفی سیلاب‌ها، فرسایش کناره‌ها، تعیین محل مناسب سازه‌های حاشیه رودخانه و ایجاد چارچوبی پایدار برای مدیریت سیلاب دارد (Field, Tambunan & Floch, 2014). مطالعات متعددی نشان می‌دهند که فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای طبیعی به‌صورت هم‌افزا، تغییراتی در مورفولوژی رودخانه‌ها ایجاد کرده‌اند (Hohensinner, Hauer & Muhar, 2018; Ibitoye, 2021). در واقع تغییرات کاربری اراضی می‌تواند از طریق دگرگونی‌های هیدرولوژی و دینامیک رسوب، مورفولوژی رودخانه و مناطق حاشیه‌ای آن را تحت تأثیر قرار دهد (Fortugno et al., 2017). لازم است از روش‌های مؤثر و اثبات‌شده برای پایش تغییرات مورفولوژی رودخانه استفاده شود تا زمینه‌ای برای درک و مقابله با پیامدهای احتمالی فراهم گردد. فناوری سنجنش‌ازدور ابزاری بسیار مناسب برای پایش و بررسی مورفولوژی رودخانه‌هاست، زیرا از پوشش مکانی گسترده و قابلیت تکرار مشاهدات برخوردار است. دقت در شناسایی و استخراج محدوده‌های آبی، نقش مهمی در محاسبه‌ی دقیق شاخص‌های مورفولوژیکی رودخانه چون طول و عرض مجرای رودخانه، میزان پایداری، شاخص سینوزیته رودخانه، نرخ جابجایی جانبی، تغییرات فرسایش و رسوب‌گذاری دارد (Du et al., 2015). در سال‌های اخیر، رودخانه قره‌سو در استان اردبیل که نقشی کلیدی در تأمین منابع آب کشاورزی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و پایداری زیست‌بوم‌های منطقه ایفا می‌کند، با چالش‌های فزاینده‌ای ناشی از تغییرات کاربری اراضی مواجه شده است. رشد جمعیت و فشار برای گسترش اراضی زراعی موجب شده تا بخش‌هایی از بستر و حریم رودخانه، بدون مجوز قانونی به باغات و زمین‌های کشاورزی تبدیل شود. تداوم این روند، پایداری طبیعی رودخانه را تهدید می‌کند. در چنین شرایطی، عدم ارزیابی و فقدان کنترل‌های نظارتی، سبب می‌شود تا مداخلات بدون درک پیامدهای بلندمدت ادامه یابند. لذا تحلیل علمی و دقیق این تغییرات با استفاده از داده‌های جغرافیایی، سنجنش‌ازدور و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، ضرورتی اساسی برای شناسایی روندهای تخریب، پیش‌بینی آینده مجرا و تدوین راهبردهای مدیریتی مؤثر در راستای توسعه پایدار و حفاظت از منابع طبیعی رودخانه قره‌سو به‌شمار می‌رود.

با توجه به این موضوع مطالعاتی مختلفی در داخل ایران و نیز در سطح بین‌الملل صورت گرفته که به صورت خلاصه به آن پرداخته می‌شود. خالقی و همکاران (Khaleghi, Roustaei, Khorshiddoust, Rezaei-Moghadam & Ghorbani, 2016)، با استفاده از مدل HEC-RAS و داده‌های میدانی، تغییرات عرض و عمق بستر رودخانه ليقوان چای را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با وجود افزایش دبی، بخش‌هایی از پایین‌دست رودخانه به دلیل مداخلات انسانی مانند کانالیزه کردن و تغییر کاربری حریم رودخانه، دچار حفر و تنگ‌شدگی شده‌است. همچنین، بخش‌های بالادست رودخانه نیز تغییرات موضعی ناشی از رسوب‌گذاری را نشان می‌دهند. اسفندیاری و همکاران (Esfandiyari Darabadi, Rafiei Mahmoodjagh & Farzaneh, 2022) به بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز زربینه رود و تاثیر آن بر روی فرسایش خاک با استفاده از مدل WLC^1 پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از بررسی این محققان، تغییرات کاربری اراضی با بهره‌گیری از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا نشان داد که بیشترین افزایش مساحت مربوط به کاربری‌های کشاورزی دیم و کشاورزی آبی است. همچنین آنها نشان دادند که روند تغییرات کاربری‌های بایر، مرتع غنی و متوسط، به مرور زمان به نحوی کاهش یافته است. اصغری سراسکانرود و سعیدی ستا (Asghari Saraskanroud & Saeedi Seta, 2023) در پژوهشی به تحلیل تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر رواناب حوضه قره‌چای با استفاده از مدل SWAT در استان همدان پرداختند. در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰ و روش طبقه‌بندی شیء‌گرا برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی استفاده شد. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه با مدل SWAT و واسنجی و اعتبارسنجی آن با الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP انجام گرفت. نتایج آنها نشان داد افزایش اراضی کشاورزی موجب افزایش رواناب در حوضه قره‌چای شده است. بعاج‌زاده و همکاران (Baajzadeh, Shah-Hosseini & Shayan, 2025) ضمن تحلیل فعالیت‌های انسانی و نوکتونیک، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی، تغییرات مورفولوژیک رودخانه شور و دشت اشتهارد را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که عوامل آنتروپوژنیک از قبیل تغییر کاربری اراضی، استخراج معادن، جاده‌سازی بیشترین تأثیر را بر تغییر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه داشته است. الطائی و همکاران (Al-Taei, Alesheikh & Darvishi Boloorani, 2023) در پژوهشی تغییرات کاربری در حوضه رودخانه‌های دجله و فرات را طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ با الگوریتم جنگل تصادفی در محیط Google Earth Engine بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد مدل از دقت بالایی برخوردار است و شاخص‌های طیفی بیشترین نقش را در تفکیک کاربری‌ها دارند. بر اساس نظر این پژوهشگران، مناطق شرق و جنوب‌شرق عراق و شرق سوریه بیشترین شدت تغییرات کاربری و نیز خطر فرسایش را داشته است. لیو و همکاران (Liu, Wu, Xu, Mu & Zhang, 2024) در پژوهشی به مدل‌سازی اثرات تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر رواناب رودخانه با استفاده از مدل SWAT در منطقه سرچشمه رودخانه دان‌جیانگ^۲ چین پرداختند. نتایج آنها نشان داد اراضی زراعی کاهش و اراضی جنگلی، مرتعی و شهری افزایش یافته‌اند. افزایش اراضی شهری و کشاورزی موجب افزایش رواناب و گسترش جنگل‌ها سبب کاهش آن شده است. این پژوهش مبنایی علمی برای مدیریت بهینه منابع آب و برنامه‌ریزی کاربری اراضی منطقه فراهم کرده است.

نونز و همکاران (Nones, Guerrero, Schippa & Cavalieri, 2024) در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییرات انسانی و اقلیمی بر مورفولوژی مجرا و پوشش گیاهی رودخانه پو^۳ ایتالیا با استفاده از تصاویر Landsat پرداختند. نتایج تحقیق این پژوهشگران نشان داد که پوشش گیاهی بر روی کناره‌های رودخانه افزایش داشته و پویایی مجرا کاهش یافته است. این مطالعه نشان می‌دهد دوره‌های خشک طولانی می‌توانند توسعه گیاهان روی کناره‌های رودخانه‌های معتدل را تقویت کنند. رودز و همکاران (Rhodes, Talchabhadel & Jordan, 2024) در پژوهشی به بررسی تغییرات مورفولوژی کانال و کاربری اراضی طی سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۲۰

1- Weighted Linear Combination

2- Danjiang

3- Po River

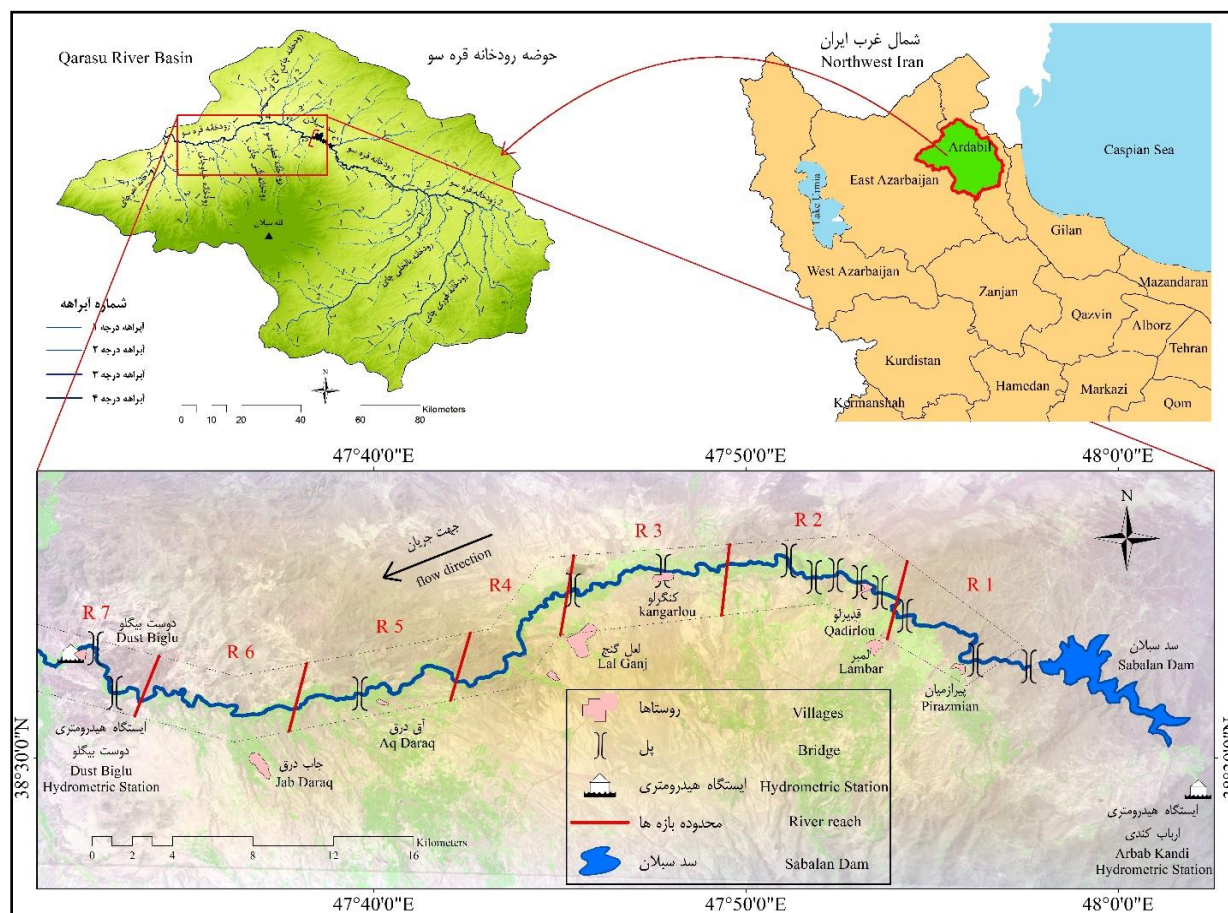
در حوضه رودخانه ناواسوتا^۱، تگراس پرداختند. نتایج تحقیق این پژوهشگران نشان داد در طی بازه مورد مطالعه، طول رودخانه ۴/۳ کیلومتر کوتاه شده و تعداد کانال‌های فرعی نیز کاهش یافته است. همچنین نتایج آنها نشان داد که سطح پوشش غیرقابل نفوذ ۳۹/۲ درصد افزایش و پوشش گیاهی علفی ۱۲/۵ درصد کاهش یافته است. این تغییرات همراه با افزایش بارش، موجب افزایش رواناب و تشدید مشکلات سیلاب در حوضه شده‌اند. چین و همکاران (Qin, Jin, Du & Jin, 2024) در پژوهشی به بررسی تغییرات مورفولوژیکی و تأثیر عوامل طبیعی و انسانی در رودخانه زرد^۲ طی ۲۵ سال گذشته پرداختند. این پژوهشگران با استفاده از تصاویر لندست اصلاح‌شده و شاخص AWEI در محیط Google Earth Engine، پارامترهای مورفولوژیکی مانند عرض کانال، طول مرکز کانال و نرخ مهاجرت جانبی محاسبه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد عوامل طبیعی و توسعه نیروگاه‌های آبی بیشترین تأثیر را بر مورفولوژی رودخانه داشته‌اند. پژوهش حاضر در راستای تقویت درک علمی از روابط پیچیده میان تغییرات کاربری اراضی و پویایی‌های مورفولوژیک رودخانه‌ها طراحی و اجرا شده است. مطالعات نشان می‌دهد که مجرای رودخانه قره‌سو در طی ۱۹ سال اخیر متأثر از تغییرات گسترده کاربری اراضی و دخل و تصرف‌های انسانی (عموماً توسعه فعالیت‌های کشاورزی) در محدوده بستر و حریم آن، دچار تخریب و تغییرات مورفولوژیکی چشمگیری گردیده است. این تغییرات صورت گرفته عمدتاً به صورت کاهش عرض رودخانه و تنگ‌شدگی مجرا نمایان شده که نتیجه آن کاهش ظرفیت انتقال جریان آب و تشدید پدیده کانالیزه شدن مجرای رودخانه می‌باشد. بر این اساس این روند در آینده می‌تواند مخاطرات سیلابی را برای اراضی کشاورزی حاشیه رودخانه به طور قابل توجهی افزایش دهد. از این رو، بررسی نقش دقیق مداخلات آنتروپوژنیک به عنوان عامل محرک این تغییرات صورت گرفته در مورفولوژی رودخانه قره‌سو، امری ضروری به نظر می‌رسد.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه قره‌سو یکی از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل می‌باشد که از دامنه‌های شمالی کوه سبلان سرچشمه گرفته و پس از اتصال رودخانه اهر چای به‌عنوان رودخانه دره‌رود شناخته‌شده و در نزدیکی شهرستان اصلاندوز به رودخانه ارس ملحق می‌شود. منطقه مورد مطالعه در بین عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه و ۵۶ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۳۵ دقیقه و ۳۴ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۱ دقیقه و ۲۱ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۴۸ ثانیه شرقی واقع شده است. از رودخانه‌های مهمی که قبل از پیوستن اهر چای به رودخانه قره‌سو می‌ریزند می‌توان به رودخانه‌های بالیقلوچای و خیاوچای اشاره کرد. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، بازه‌ای از این رودخانه است که از پایین‌دست سد سبلان شروع شده و در تلاقی رودخانه اهر چای به پایان می‌رسد. طول تقریبی رودخانه در این بازه ۷۵ کیلومتر می‌باشد. از جمله روستاهای استقرار یافته در حاشیه این رودخانه می‌توان به روستاهای پیرازمیان، لمبر، قدیرلو، کنگرلو، قاراداش، لعل گنج، آق درق، جبدرق و روستای دوست بیگلو اشاره کرد (شکل ۱).

1- Navasota River

2- Yellow River



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال غرب کشور (استان اردبیل)

Fig.1. Location of the study area in northwestern Iran (Ardabil Province)

مواد و روش‌ها

یکی از اساسی‌ترین مراحل انجام هر پژوهش علمی، جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات پایه است. در این پژوهش، به منظور تحلیل ویژگی‌های مورفولوژیکی و هیدرولوژیکی رودخانه قره‌سو، از داده‌ها و منابع متنوعی استفاده شده است. نقشه‌های توپوگرافی بزرگ‌مقیاس رودخانه قره‌سو با مقیاس ۱:۲۰۰۰ (شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل) برای استخراج توپوگرافی دقیق بستر و پهنای سیلابی رودخانه به کار گرفته شد. همچنین، از نقشه‌های زمین‌شناسی مشکین‌شهر و اردبیل با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی کشور) جهت شناسایی واحدهای لیتولوژیکی و ساختاری منطقه استفاده گردید. علاوه بر این، داده‌های ارتفاعی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای ALOS – PALSAR با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر به منظور تولید مدل رقومی ارتفاع (DEM) و تحلیل توپوگرافی عمومی محدوده‌ی مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه، جهت تحلیل تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره‌ای شامل: تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر (سازمان فضایی اروپا-ESA) مربوط به سال ۲۰۲۴ و همچنین تصاویر سنجنده‌های TM و ETM⁺ ماهواره‌ی Landsat با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر (سازمان زمین‌شناسی آمریکا-USGS) مربوط به سال ۲۰۰۵، استفاده شد. همچنین از تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک مکانی ۲/۵ و ۵ متر (سازمان جغرافیای نیروهای مسلح) به منظور استخراج مجرای رودخانه برای سال ۲۰۰۵ بهره‌گرفته شد. سایر داده‌ها، شامل داده‌های هیدرولوژیکی (داده حداکثر دبی روزانه‌ای، داده‌های

دبی اشل و داده‌های رسوب) از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل اخذ شده و در کنار مطالعات میدانی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش از مجموعه‌ای از نرم‌افزارها و ابزارهای مختلف استفاده شده است. نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و تحلیل‌های مکانی مورد استفاده قرار گرفتند. نرم‌افزار Sas Planet و Google Earth نیز به منظور مشاهده تغییرات بصری در بازه‌های زمانی مختلف و بررسی دقیق‌تر مناطق مورد مطالعه به کار گرفته شدند. برای تحلیل‌های هیدرولوژیکی و ارتباط بین الگوهای کاربری اراضی و رفتار رودخانه، از نرم‌افزار HEC-RAS و الحاقی‌های HEC-GeoRAS و Arc Hydro استفاده شد. علاوه افزونه Planform Statistics برای بررسی تغییرات شکل و مسیر رودخانه به کار رفت.

استخراج کاربری اراضی

در این پژوهش جهت استخراج لایه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و Sentinel-2 برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ استفاده شد. در ابتدا تصاویر ماهواره‌ای Landsat تحت تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری قرار گرفتند. ابتدا مقادیر DN به رادیانس با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون متادیتا تبدیل شد. سپس تصحیح اتمسفری FLAASH انجام شد که طول‌موج‌های مرئی تا مادون قرمز نزدیک و کوتاه را تصحیح می‌کند (Module, 2009). FLAASH از یک معادله استاندارد برای رادیانس طیفی در یک پیکسل سنجنده، L ، شروع می‌شود که به دامنه طول موج خوشیدی و مواد صاف، لامبرتی یا معادل آنها اعمال می‌شود. این معادله به صورت زیر است (رابطه ۱).

$$L = \left(\frac{Ap}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (1)$$

که در آن: ρ بازتاب سطح پیکسل، ρ_e متوسط بازتاب سطح پیکسل و پیرامون آن، S البدوی کروی اتمسفر، L_a پخش برگشتی رادیانس توسط اتمسفر، A و B ضرایبی هستند که وابسته به شرایط اتمسفری و ژئومتریک می‌باشند. در ادامه، با استفاده از طبقه‌بندی هیبریدی، تصاویر سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ به پنج کلاس کاربری تفکیک شدند. پس از انتخاب نمونه‌های تعلیمی، طبقه‌بندی نظارت‌شده با الگوریتم حداکثر احتمال^۱ اجرا شد و صحت آن ارزیابی گردید. همچنین، برای استخراج مجرای رودخانه نیز، شاخص آب (WI) از رابطه (۲) مورد استفاده قرار گرفت.

$$WI = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{B_4 + B_5 + B_7} \quad (2)$$

در این رابطه B_i باند شماره i از تصویر ETM+ می‌باشد. در آخر، دقت طبقه‌بندی تصاویر سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ با نمونه‌گیری میدانی و بررسی پیکسل‌ها، ارزیابی شد. دقت کلی برای سال ۲۰۲۴ حدود ۹۳/۱ درصد و برای سال ۲۰۰۵ حدود ۹۱/۲ درصد به دست آمد. ضریب کاپا نیز برای سال ۲۰۲۴ برابر ۰/۸۸ و برای سال ۲۰۰۵ برابر ۰/۸۵ بود که نشان‌دهنده دقت بالاتر طبقه‌بندی سال ۲۰۲۴ است (شکل ۲).

مورفومتری رودخانه

تغییرات جانبی^۲ و پایداری جانبی^۳ مجرای رودخانه از مهم‌ترین شاخص‌هایی می‌باشند که در مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. تغییرات جانبی به وسیله اندازه‌گیری تغییرات در بیرونی‌ترین خط کناری مجرا قابل محاسبه می‌باشد. شاخص پایداری مجرا نیز بر اساس محاسبه مقدار مساحت مجرای فعال تغییر یافته و همچنین مقدار مساحت مجرای فعال تغییر نیافته در طول بازه زمانی مورد بررسی، قابل اندازه‌گیری می‌باشد (Richard, 2001). تغییرات جانبی مجرا به دو بخش اصلی تغییرات در عرض

1- Maximum Likelihood Classification

2- Lateral Mobility (Movement)

3- Lateral Stability

رودخانه و مهاجرت مجرا تقسیم می‌گردد. برای محاسبه تغییرات عرض رودخانه می‌توان از شاخص تغییرات جانبی مجرا^۱، رابطه (۳) استفاده کرد. در واقع این شاخص به‌وسیله اندازه‌گیری تغییرات در بیرونی‌ترین خط کناره‌های مجرای رودخانه قابل محاسبه می‌باشد (Richard., 2005):

$$\text{Lateral Mobility Index} = \frac{\text{Change Active Channel Area}}{\text{Previous Active Channel Area}} * 100 \quad (3)$$

در این رابطه، ارزش نزدیک به ۱۰۰٪ نشان‌دهنده بیشترین تغییرات عرضی رودخانه و ارزش کم این شاخص، تغییرات عرضی پایین رودخانه را نشان می‌دهد. همچنین برای محاسبه آهنگ مهاجرت مجرا می‌توان از روشی که توسط شیلدز و همکاران (Shields, Simon & Steffen, 2000) ارائه شده، استفاده کرد. این روش با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه می‌باشد (Giardino & Lee, 2011; Shields et al., 2000):

$$R_m = (A / L) / y \quad (4)$$

که در آن: R_m آهنگ مهاجرت؛ A مساحت موجود بین دو خط مرکزی مجرا؛ L طول خط مرکزی مجرا در زمان t_1 ؛ و y تعداد سال می‌باشد. در این زمینه، برای افزایش دقت کار در رابطه با محاسبه خط مرکزی مجرا و سایر محاسبات از افزونه^۲ Planform Statistics کمک گرفته شد.

شاخص پایداری جانبی مجرا^۳ نیز بر اساس تغییر در مجرای فعال بدون پوشش گیاهی رودخانه در طول بازه زمانی مورد مطالعه، براساس رابطه (۵) محاسبه می‌گردد. به عبارت دیگر شاخص پایداری جانبی، از طریق تقسیم مساحت مجرای فعال تغییر نیافته^۴ به مساحت مجرای فعال پیشین^۵ قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

$$\text{Lateral Stability Index} = \frac{\text{Unchange Active Channel Area}}{\text{Previos Active Channel Area}} \quad (5)$$

عدد خروجی این شاخص هرچقدر به واحد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عدم تغییر و هرچقدر به واحد صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تغییر در بازه زمانی مورد مطالعه می‌باشد. هر یک از این شاخص‌های اشاره شده در بالا اطلاعات زیادی را درباره چگونگی تغییرات و پایداری جانبی مجرای رودخانه در اختیار قرار می‌دهد که به راحتی به‌وسیله تکنیک‌های GIS با دقت بالا قابل اندازه‌گیری می‌باشند.

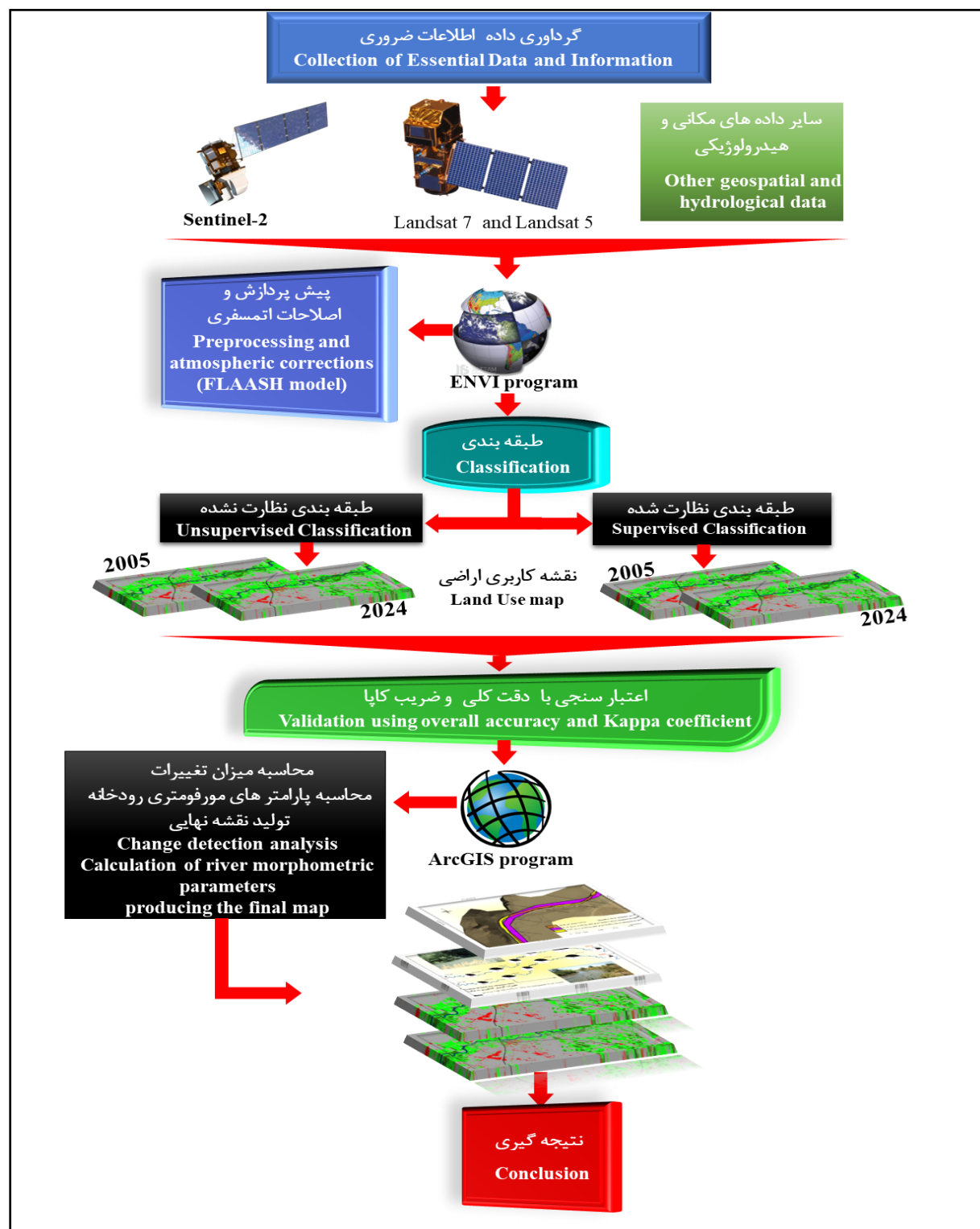
1 - Lateral Mobility Index

2- Add In

3 - Lateral Stability Index

4 - Unchanged Active Channel Area

5 - Previous Active Channel Area

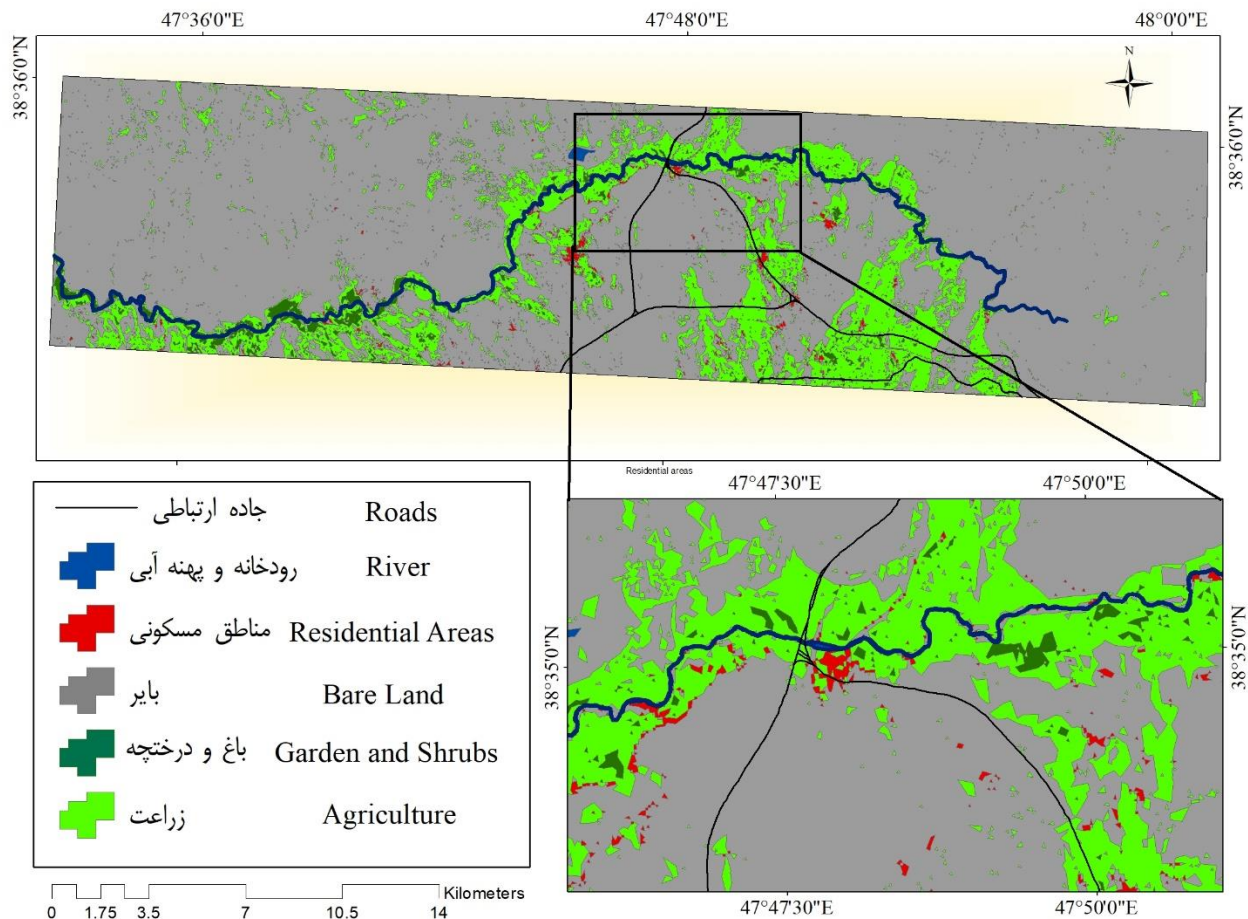


شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام تحقیق

Fig.2. Flowchart of Research Steps

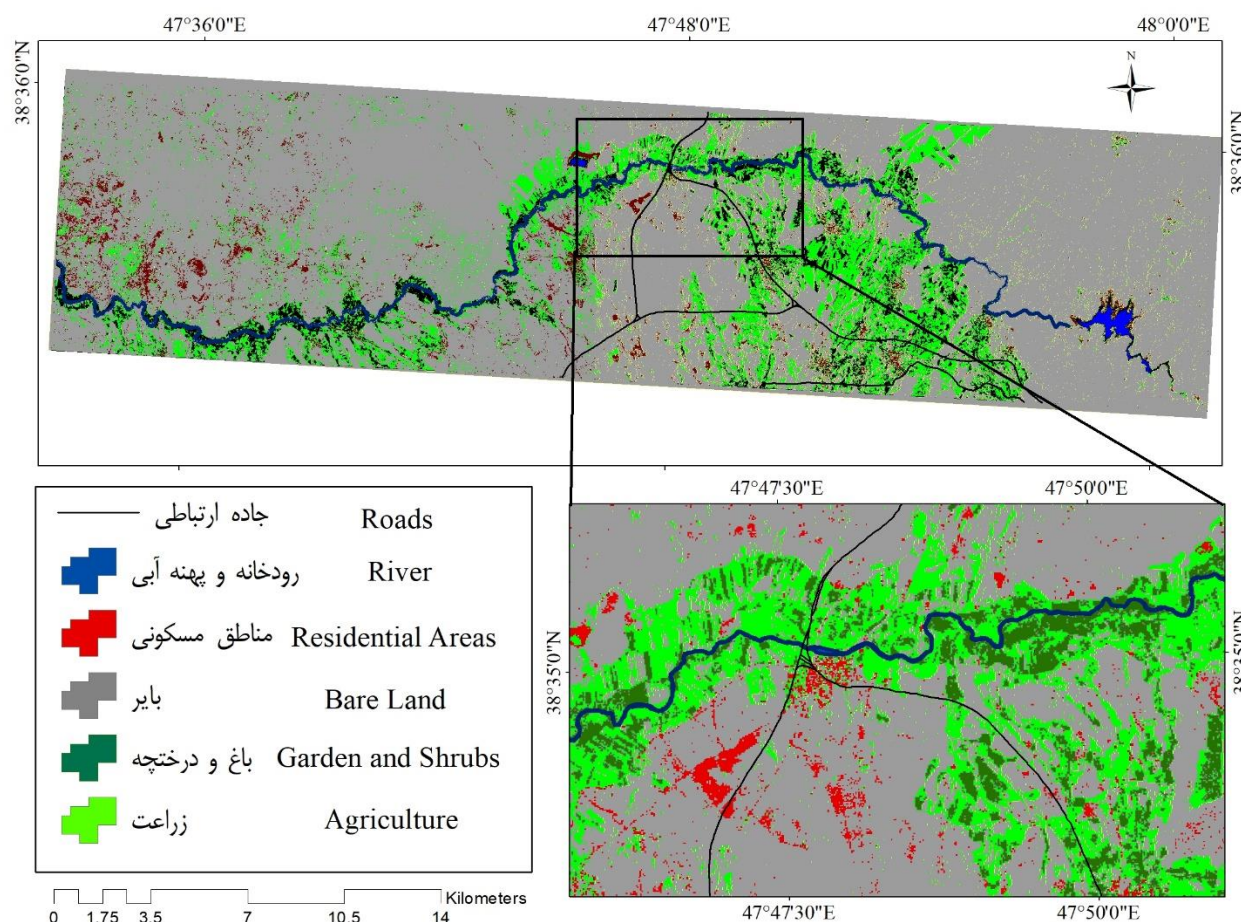
نتایج و بحث

تعداد طبقات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه هم برای سال ۲۰۰۵ و هم برای سال ۲۰۲۴ به ۵ طبقه کاربری رودخانه و پهنه‌های آبی، کاربری مناطق مسکونی، کاربری بایر، کاربری باغ و درختچه و کاربری زراعت کلاس‌بندی شد. بررسی تغییرات پوشش کاربری اراضی در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ حاکی از آن است که در این فاصله زمانی مساحت هر چهار کاربری زراعت، کاربری باغ و درختچه، کاربری مسکونی، کاربری رودخانه و پهنه‌های آبی افزایش یافته و به تبع آن از مساحت کاربری بایر در منطقه کاسته شده است (شکل‌های ۳ و ۴). بررسی تغییرات کاربری کشاورزی در محدوده هفت بازه انتخابی نیز نشان داد که در بازه اول نزدیک ۱۱۶ هکتار، در بازه دوم ۲۵۱ هکتار، در بازه سوم ۲۰۲ هکتار، در بازه چهارم ۴۹ هکتار، در بازه پنجم ۲۷ هکتار و در بازه هفتم ۲۶ هکتار بر وسعت کاربری کشاورزی در منطقه دشت سیلابی رودخانه قره‌سو افزوده شده و همچنین نزدیک ۳۶ هکتار در بازه ششم از وسعت کاربری کشاورزی در محدوده دشت سیلابی رودخانه قره‌سو کاسته شده است.



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی دشت سیلابی رودخانه قره‌سو برای سال ۲۰۰۵

Fig.3. Land-use map of the Qara-Su River floodplain for the year 2005



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی دشت سیلابی رودخانه قره‌سو برای سال ۲۰۲۴

Fig.4. Land-use map of the Qara-Su River floodplain for the year 2024

همچنین محاسبه درصد کاربری کشاورزی برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ نشان داد که درصد کاربری کشاورزی در بازه اول از ۱۷ درصد به ۳۷ درصد، در بازه دوم از ۳۴ درصد به ۵۲ درصد، در بازه سوم از ۳۳ درصد به ۵۳ درصد، در بازه چهارم از ۳۵ درصد به ۴۹ درصد و در بازه پنجم از ۳۷ درصد به ۳۹ درصد افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که درصد کاربری کشاورزی در بازه ششم از ۳۱ درصد در سال ۲۰۰۵ به ۲۳ درصد در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته و نیز در بازه هفتم کاربری کشاورزی از ۶/۵ درصد در سال ۲۰۰۵ به ۴/۵ درصد در سال ۲۰۲۴ کاسته شده است (جدول ۱).

بر اساس نتایج جدول ۱ بیش‌ترین میزان افزایش کاربری کشاورزی در محدوده دشت سیلابی رودخانه قره‌سو در طی ۱۹ سال اخیر مربوط به بازه اول، دوم بوده است. به بیان دیگر، بازه اول با ۱۱۶ هکتار و بازه دوم با ۲۵۱ هکتار افزایش در کاربری کشاورزی بیشترین تغییر در کاربری کشاورزی داشته‌اند. همچنین بر اساس این جدول می‌توان نتیجه گرفت که میزان تغییرات در کاربری کشاورزی در چهار بازه اول، دوم، سوم و هفتم بسیار بیشتر از بازه‌های دیگر رودخانه بوده است. بر این اساس می‌توان گفت که میزان دخل و تصرف کشاورزان در این چهار بازه بیشتر از بازه‌های دیگر بوده و تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر مورفولوژی مجرای رودخانه قره‌سو به صورت تنگ‌شدگی مجرا در این بازه‌های ذکر شده، بیشتر از سایر بازه‌ها بوده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، بر اساس شکل‌های ۳ و ۴ بیشترین میزان کاربری کشاورزی، هم در سال ۲۰۰۵ و هم در سال ۲۰۲۴ مربوط به محدوده سه بازه دوم، سوم و پنجم می‌باشد. همچنین بازه اول و هفتم نیز کمترین میزان کاربری کشاورزی را در طی سال‌های مذکور دارا می‌باشند.

جدول ۱- تغییرات کاربری کشاورزی محدوده دشت سیلابی در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ (مساحت به هکتار)

Table 1- Agricultural land-use change in the floodplain area from 2005 to 2024 (ha)

بازه‌های مورد مطالعه Study reaches	مساحت کاربری کشاورزی سال ۲۰۰۵ Agricultural land area in 2005 (ha)	مساحت کاربری کشاورزی سال ۲۰۲۴ Agricultural land area in 2024(ha)	میزان اختلاف (به هکتار) Difference(ha)	درصد تغییرات (به درصد) Percentage change (%)	درصد ^۱ کاربری در سال ۲۰۰۵ Percentage of land-use in 2005 (%)	درصد کاربری در سال ۲۰۲۴ Percentage of land-use in 2024 (%)
بازه اول First reach	287.6	404.54	116.94	40.66%	17.07%	37.01%
بازه دوم Second reach	877.73	1129.68	251.95	28.70%	34.49%	52.39%
بازه سوم Third reach	778.09	980.96	202.87	26.07%	33.49%	53.03%
بازه چهارم Fourth reach	598.28	642.66	49.38	8.25%	35.01%	49.57%
بازه پنجم Fifth reach	768.97	796.63	27.66	3.60%	37.27%	39.97%
بازه ششم Sixth reach	616.57	579.29	-36.78	-5.96%	31.47%	23.57%
بازه هفتم Seventh reach	127.48	154.05	26.57	20.84%	6.52%	4.54%

تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر دشت سیلابی

تغییرات کاربری اراضی برای منطقه رودکنار^۲ و دشت سیلابی رودخانه قره‌سو از طریق مقایسه تصاویر ماهواره‌ای Landsat و Sentinel-2 برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی تغییرات کاربری اراضی در طی ۱۹ سال گذشته یک روند افزایشی در تراکم کاربری زراعت و باغ و درختچه را در منطقه رودکنار و دشت سیلابی رودخانه قره‌سو نشان می‌دهد (شکل ۶). به علت احداث سد سیلان و به تبع آن کاهش دبی و دینامیک جانبی مجرا، کاربری اراضی پایین‌دست سد دچار تغییرات بسیار زیادی شده است. ورود کشاورزان به بستر و حریم رودخانه و دخل و تصرف صورت گرفته در طول مسیر رودخانه قره‌سو، سبب تثبیت کناره‌ی رودخانه به دلیل فعالیت‌های کشاورزی چون زراعت و باغداری شده است (شکل ۵). در بازه‌های دوم و سوم علی‌رغم افزایش قابل توجه پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه، پوشش گیاهی متراکم دشت سیلابی امکان رخداد تغییر مجرا به صورت مهاجرت رودخانه^۳ را به حداقل ممکن کاهش داده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد، دست‌اندازی به بستر و حریم رودخانه قره‌سو، علاوه بر مشکلات و تنش‌های اجتماعی ناشی از آن، به دلیل کاستن عرض مجرا، سبب کاهش ظرفیت انتقالی جریانات سیلابی برای سیلاب‌های با دوره بازگشت بیش از ۱۰ سال شده است. با توجه به باز دیدهای میدانی صورت گرفته، دخل و تصرفات حتی به داخل مجرای اصلی رودخانه نیز رسیده و تلاش برای افزایش سطح زمین‌های کشاورزی، به بهای کاهش عرض مجرای رودخانه بوده و این به معنی افزایش ریسک خطرات ناشی از سیلاب‌های بزرگ می‌باشد (شکل ۵). به بیانی دیگر انجام فعالیت‌های کشاورزی در اطراف رودخانه قره‌سو و دست‌اندازی در بستر و حریم رودخانه و به تبع آن کانالیزه کردن مجرای رودخانه، منجر به تنگ‌تر شدن مجرای رودخانه و تسریع در آب‌گرفتگی زمین‌های مجاور در هنگام وقوع سیلاب می‌شود.

۱- درصد این مساحت نسبت به مساحت داخل ترانسکت هر بازه که برای هر دو بازه زمانی یکسان می‌باشد، محاسبه شده است.

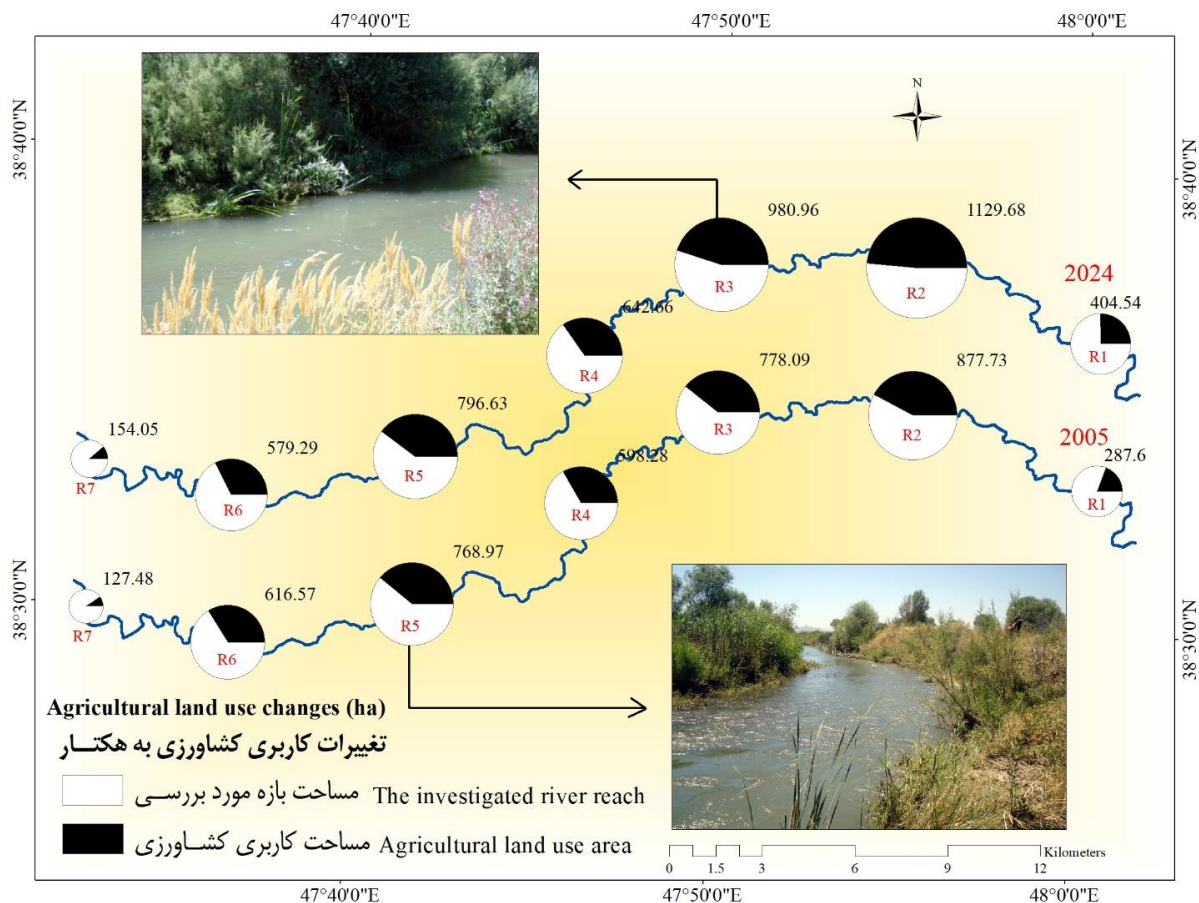
2- Riparian

3- Channel Migration



شکل ۵- فعالیت‌های کشاورزی در محدوده بستر و حریم رودخانه قره‌سو (بازه دوم)

Fig.5. Agricultural activities within the bed and riparian zone of the Qara-Su River (second reach)



شکل ۶- تغییرات کاربری کشاورزی در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ محدوده دشت سیلابی رودخانه قره‌سو

Fig.6. Changes in agricultural land-use from 2005 to 2024 in the floodplain area of the Qara-Su River

مورفومتری مجرای رودخانه قره‌سو

برای بررسی دینامیک عرضی مجرای رودخانه قره‌سو از چندین شاخص کمی در قالب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. در رابطه با جابجایی جانبی مجرای رودخانه‌ها، مخصوصاً نرخ مهاجرت جانبی مجرا، روش‌ها و شاخص‌های مختلفی با مبنای محاسباتی متفاوت وجود دارد. برخی از محاسبات بر مبنای ترسیم ترانسکت‌هایی عمود بر مسیر رودخانه می‌باشد. روش ترانسکت، شامل ترسیم یک سری از ترانسکت‌های عمود بر دشت سیلابی رودخانه و اندازه‌گیری فاصله بین نقاط متقاطع بین خط مرکزی مجرا و ترانسکت برای چهارچوب دوره‌های زمانی بعدی می‌باشد (Giardino & Lee, 2011). هر ترانسکت از طریق خطوطی تحت عنوان خطوط فرسایش-رسوب‌گذاری^۱ به چندین بخش تفکیک می‌شود. این ترانسکت‌ها و خطوط برای تمامی دوره‌های زمانی ثابت باقی می‌ماند و تغییرات مجرا نسبت به آن‌ها به صورت کمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آهنگ حرکت جانبی مجرای رودخانه از طریق اندازه‌گیری حرکت کناره‌های چپ و راست مجرا در طول خطوط انباشت/کاوش در طی دوره زمانی مطالعاتی محاسبه شد. هر معیار یا سنجه حرکت جانبی، ویژگی‌های مختلفی از نحوه حرکت مجرا را آشکار می‌سازند. دو سنجه متفاوت عرض مجرا شامل عرض مجرای فعال و عرض مجرای کل می‌باشد. عرض مجرای فعال، پشته‌ها یا جزایر داخل مجرا را شامل نمی‌شود و به عنوان معرف مجرای شکل‌گرفته توسط رژیم غالب رسوب و آب در نظر گرفته می‌شود. عرض مجرای کل، پشته‌ها و جزایر داخل مجرا را شامل می‌شود.

1- Aggradation/Degradation

برای یک مجرای تک شاخه (تک مجرا) همچون بیشتر قسمت‌های رودخانه قره‌سو، عرض مجرای فعال و عرض مجرای کل برابر می‌باشند. در تئوری، تغییرات در عرض مجرای فعال می‌تواند نشان‌دهنده پاسخ به رژیم محرک رسوب، آب و یک حرکت به‌سوی یک عرض تعادل باشد. تغییرات در عرض مجرای کل همچنین در پاسخ به رژیم رسوب و آب هستند، اما آن‌ها می‌توانند شامل تنظیمات پلانفرم به شکل تغییرات در اندازه پشته‌ها یا جزایر وسط مجرا باشند. مقدار مهاجرت رودخانه با افزایش جریان انرژی، سینوزیته و عرض کلی مجرا (شامل پشته‌های تثبیت‌شده با پوشش گیاهی) افزایش می‌یابد. نتایج بررسی میزان آهنگ مهاجرت بر اساس رابطه (۴) برای بازه‌های انتخابی رودخانه قره‌سو نشان داد که در طول ۱۹ سال اخیر در بازه اول، میزان آهنگ مهاجرت رودخانه ۰/۲۹ متر در سال، بازه دوم ۰/۴۱ متر در سال، بازه سوم ۰/۴۸ متر در سال، بازه چهارم ۰/۴۳ متر در سال، بازه پنجم ۰/۵۲ متر در سال، بازه ششم ۰/۴۹ متر در سال و برای بازه هفتم ۰/۵۱ متر در سال بوده است. میانگین آهنگ مهاجرت کل بازه‌ها نیز ۰/۴۴ متر در سال محاسبه گردید. همچنین محاسبات نشان داد که در سال ۲۰۰۵ مقدار مساحت رودخانه قره‌سو ۸۰/۰۴ هکتار بوده که در سال ۲۰۲۴ مقدار مساحت رودخانه به ۲۶/۰۲ هکتار کاهش پیدا کرده است که این مطلب نیز نشان‌دهنده تغییرات در عرض مجرای رودخانه بوده که عمدتاً در جهت کاهش عرض و تنگ‌شدگی مجرا اتفاق افتاده است.

شاخص پایداری جانبی^۱ با اندازه‌گیری مقدار مساحت مجرای فعال تغییرنیافته^۲ و نیز مقدار مساحت مجرای فعال قبلی^۳ قابل محاسبه می‌باشد (Richard, 2001). مقدار نزدیک به عدد ۱ شاخص پایداری جانبی نشان می‌دهد که مجرا تحرکی نداشته و نسبتاً پایدار بوده و نیز مقدار کوچک‌تر این شاخص نشان‌دهنده تغییر موقعیت مجرای فعال رودخانه می‌باشد. بر اساس رابطه (۵)، میزان پایداری جانبی بازه‌های انتخابی رودخانه قره‌سو نیز محاسبه گردید. نتایج محاسبات نشان داد که میزان شاخص پایداری جانبی برای بازه اول عدد ۰/۳۲، بازه دوم ۰/۳۱، بازه سوم ۰/۲، بازه چهارم ۰/۲۱، بازه پنجم ۰/۱۷، بازه ششم ۰/۱۶ و برای بازه هفتم عدد ۰/۱۷ می‌باشد. همچنین میانگین شاخص پایداری جانبی کل مجرای رودخانه قره‌سو نیز عدد ۰/۲۲ محاسبه گردید. مقدار پایین شاخص پایداری بازه‌های مختلف رودخانه قره‌سو با توجه به آهنگ مهاجرت پایین آن نشان‌دهنده میزان پایین مساحت مجرای فعال تغییرنیافته در طول دوره موردبررسی می‌باشد که علت آن نیز تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو بوده است (شکل ۷).

همچنین با اندازه‌گیری مقدار مساحت مجرای فعال تغییریافته^۴ و نیز مقدار مجرای فعال قبلی می‌توان به شاخص مهم دیگری به نام شاخص تغییرات جانبی^۵ دست یافت. در واقع این شاخص به‌وسیله اندازه‌گیری تغییرات در بیرونی‌ترین خط کناره‌های مجرای رودخانه قابل محاسبه می‌باشد (Richard, 2005). بر اساس این شاخص، ارزش نزدیک به ۱۰۰٪ نشان‌دهنده بیشترین تغییرات عرضی رودخانه و ارزش کم این شاخص تغییرات عرضی پایین رودخانه را نشان می‌دهد. نتایج محاسبات این شاخص، بر اساس رابطه (۳) برای بازه‌های انتخابی نشان داد که شاخص تغییرات جانبی مجرای رودخانه در بازه اول ۰/۷۱٪، در بازه دوم ۰/۷۹٪، در بازه سوم ۰/۸۳٪، در بازه چهارم ۰/۸۱٪، در بازه پنجم ۰/۸۴٪، در بازه ششم ۰/۸۵٪ و در بازه هفتم ۰/۸۴٪ بوده است. نتایج این شاخص با نتایج شاخص پایداری جانبی رودخانه کاملاً مطابقت دارد. باید افزود مقدار نسبتاً بالای این شاخص حتی در بازه‌هایی که کنترل زمین‌شناسی وجود دارد با کاهش عرض رودخانه (تنگ‌شدگی مجرا) قابل توجیه می‌باشد. نتایج بررسی تغییرات عرض رودخانه قره‌سو در ۳۸ مقطع عرضی انتخابی در طول مسیر رودخانه، کاهش عرض رودخانه در طی ۱۹ سال اخیر را به‌طور واضح نمایان ساخت (جدول ۲). اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر روی این ۳۸ مقطع عرضی نشان داد که بیشترین فراوانی عرض رودخانه قره‌سو در سال ۲۰۰۵ نزدیک ۱۳ متر و همچنین بیشترین فراوانی عرض رودخانه در سال ۲۰۲۴ نزدیک ۴ متر می‌باشد (شکل‌های ۸ و ۹).

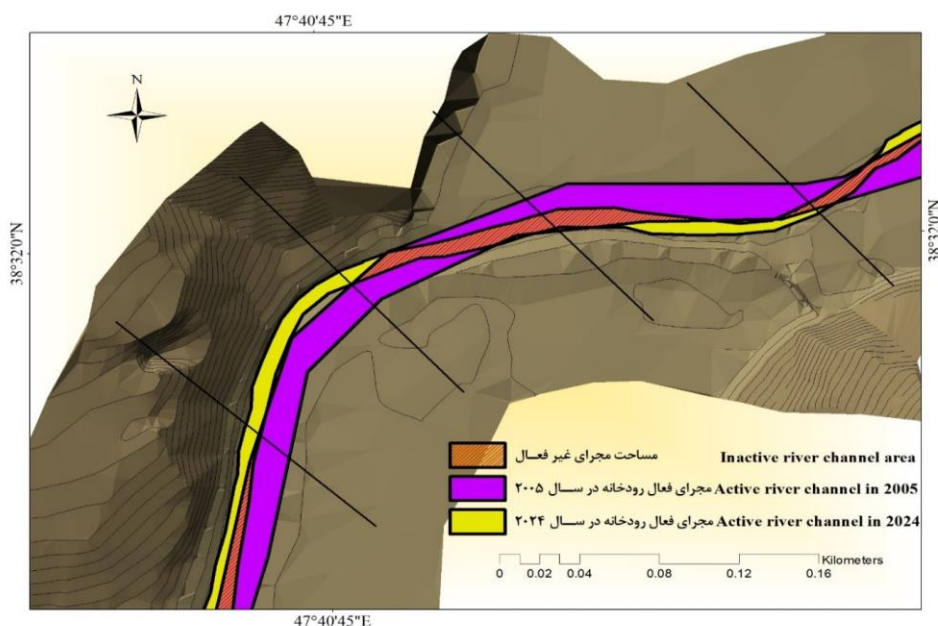
1- Lateral Stability Index

2- Unchange Active Channel Area

3- Previous Active Channel Area

4- Change Active Channel Area

5- Lateral Mobility Index



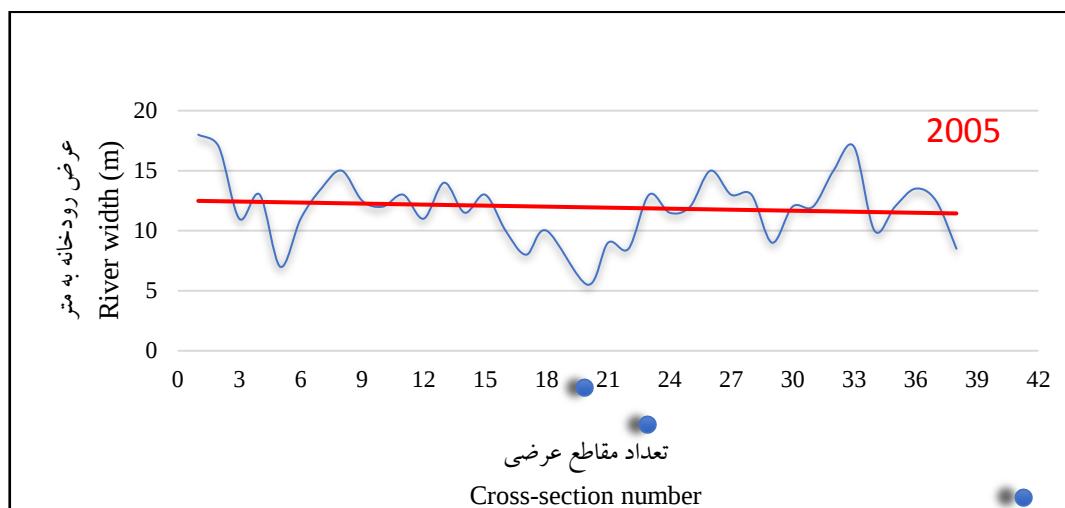
شکل ۷- نحوه محاسبه شاخص پایداری جانبی رودخانه قره‌سو در بخشی از بازه پنجم

Fig.7. Method of calculating the lateral stability index of the Qara-Su River (fifth reach)

جدول ۲- خلاصه نتایج تغییرات عرض رودخانه قره‌سو در محدوده مورد مطالعه (۳۸ مقطع انتخابی)

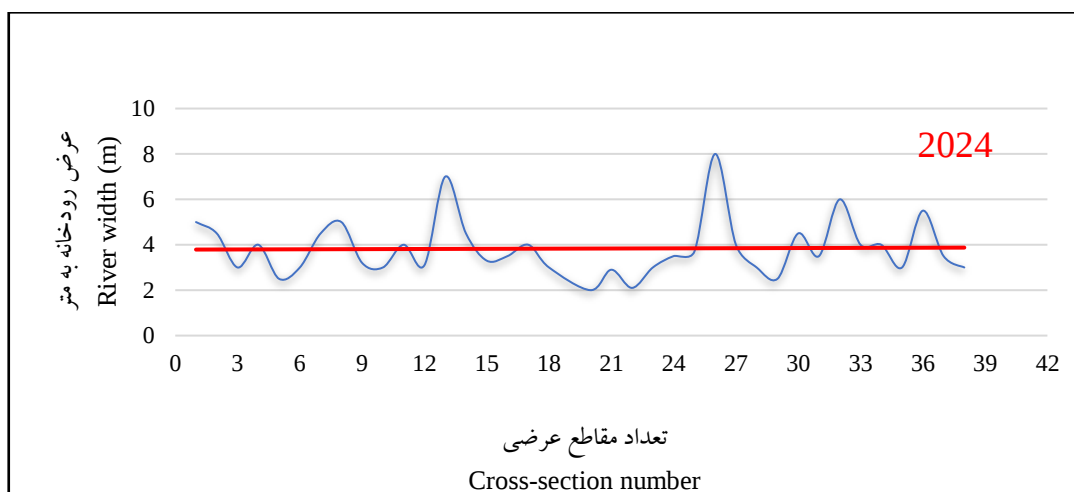
Table 2- Summary of changes in the width of the Qara-Su River in study area (selected 38 cross-sections)

حداکثر عرض (متر) ۲۰۲۴ Maximum width (m) in 2024	حداقل عرض (متر) ۲۰۲۴ Minimum width (m) in 2024	میانگین عرض (متر) ۲۰۲۴ Average width (m) in 2024	حداکثر عرض (متر) ۲۰۰۵ Maximum width (m) in 2005	حداقل عرض (متر) ۲۰۰۵ Minimum width (m) in 2005	میانگین عرض (متر) ۲۰۰۵ Average width (m) in 2005	بازه‌های انتخابی Selected reaches
5	2.5	3.8	18	7	13.2	بازه اول First reach
5	3	3.7	15	11	12.8	بازه دوم Second reach
7	3.1	4.3	14	10	11.9	بازه سوم Third reach
4	2.1	2.8	10	5.5	8.2	بازه چهارم Fourth reach
9	3	4.6	13	11.5	12.9	بازه پنجم Fifth reach
6	2.5	3.9	17	9	13	بازه ششم Sixth reach
5.5	3	3.8	13.5	8.5	11.3	بازه هفتم Seventh reach



شکل ۸- تغییرات عرض رودخانه قره‌سو در سال ۲۰۰۵

Fig.8. Changes in the width of the Qara-Su River in 2005



شکل ۹- تغییرات عرض رودخانه قره‌سو در سال ۲۰۲۴

Fig.9. Changes in the width of 3.the Qara-Su River in 2024

تأثیر احداث سد بر الگو و عرض مجرای پایین‌دست رودخانه توسط افراد متعددی از جمله سوریان (Surian, 1999)، ویلیامز و همکاران (Williams, Wolman & Wolman, 1984)، چرچ و همکاران (Church, Kellerhals & Day, 1989) و شیلدز و همکاران (Shields et al., 2000)، مورد بررسی قرار گرفته است. سدهای مخزنی یکی از سازه‌های عظیم آبی هستند که به منظور ذخیره آب رودخانه‌ها برای تنظیم مصارف شرب، کشاورزی و صنعت ساخته می‌شوند. سدهای مخزنی با تغییر در عرض مجرا، عمق جریان، اندازه مصالح بستر و پوشش گیاهی کناره‌ها بر هندسه هیدرولیکی رودخانه در پایین‌دست تأثیر می‌گذارند (Shin & Julien, 2011). سد سبلان از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هسته‌ی رسی، در ۵۵ کیلومتری شمال غربی شهر اردبیل و در فاصله ۴۰ کیلومتری شمال شرقی مشکین‌شهر واقع شده است. تنظیم سالانه ۱۱۵ میلیون مترمکعب رواناب رودخانه قره‌سو از اهداف اصلی احداث این سد به شمار می‌آید. به‌طور کلی احداث سد سبلان بر روی رودخانه قره‌سو به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم مورفولوژی مجرای رودخانه را تحت تأثیر قرار داده است. در بررسی نقش مستقیم سد سبلان بر مورفولوژی پایین‌دست سد، می‌توان گفت که با احداث سد سبلان، هرچند کاهش جریانات لب‌پری و لبریزی و به‌تبع آن جریانات مؤثر، به‌عنوان دبی‌های شکل‌دهنده مجرا، باعث کاهش دینامیک

جانبی مجرای رودخانه شده است. اما همین امر، مجموعه‌ای از تغییرات مورفولوژیکی، به‌ویژه به‌صورت تغییر الگوی رودخانه، کاهش مساحت سطح مقطع عرضی، تثبیت پشته‌های کناری و میانی و نیز کاهش عرض و تنگ‌شدگی مجرا، را به همراه داشته است. الگوی برداری مستخرج از بررسی تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک ۲/۵ متر برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ (قبل و بعد از احداث سد) نشان داد که مجرای رودخانه قره‌سو در اکثر بازه‌های مورد مطالعه دچار تنگ‌شدگی شده است (جدول ۲). همچنین، به‌صورت غیرمستقیم، وجود سد سبلان و اندازه حجم مخزن آن (از نظر تناوب وقوع سرریز جریان) سبب افزایش تجاوزات به محدوده حریم و بستر (حتی بستر اصلی جریان) رودخانه شده و موجب ایجاد ایمنی کاذب در پایین دست سد، گردیده است. درواقع با احداث سد سبلان بخش وسیعی از اراضی حریم و بستر رودخانه قره‌سو (به ویژه پشته‌های کناری خم رودخانه) توسط کشاورزان منطقه به کاربری کشاورزی تبدیل‌شده که یکی از عوامل اصلی در تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو به شمار می‌آید (شکل‌های ۷ و ۸).

به عبارت دیگر با توجه به طول ۷۲ کیلومتری رودخانه قره‌سو در پایین دست سد سبلان و افزایش سطح حوضه و ورود شاخه‌های فرعی، سهم سد سبلان در کنترل دبی جریان کاهش یافته و میزان تأثیر آن تا اولین تلاقی‌های رودخانه قره‌سو (چای‌لاخ و قطورسویی) می‌باشد. در واقع با توجه به تلاقی رودخانه‌های مهمی چون خیاوچای، قطورچای، آلنی چای و رودخانه چای‌لاخ در پایین دست سد سبلان که اغلب همراه با رژیم سیلابی به‌ویژه در فصل بهار می‌باشند، بخش وسیعی از رودخانه قره‌سو هنوز تحت تأثیر مخاطره سیلاب قرار داشته و بررسی مخاطرات سیلابی در این منطقه حائز اهمیت می‌باشد. کنترل جریان پایه باعث رشد گیاهان و تثبیت پشته‌های رسوبی موجود در بستر و کناره‌های رودخانه می‌گردد که نشانه‌های پایداری کاذب رودخانه قره‌سو می‌باشد. درواقع با توجه به تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو در طی سال‌های اخیر عبور جریان‌های سیلابی از مجرای رودخانه با مشکل روبه‌رو شده و سبب خروج آب از مجرای رودخانه و جاری شدن سیلاب در پهنه‌ی دشت سیلابی خواهد شد. در نتیجه، در صورت وقوع سیلاب‌های بزرگ و سرریز قابل توجه جریان با توجه به تنگ‌شدگی مجرا، باید انتظار تغییرات شدید رودخانه و آسیب‌پذیری اراضی کشاورزی حاشیه رودخانه قره‌سو را داشت.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد تغییرات کاربری اراضی صورت گرفته در نواحی دشت سیلابی رودخانه قره‌سو طی بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ با سرعت بالایی اتفاق افتاده و در ادامه سبب تنگ‌شدگی مجرای، کاهش ظرفیت عبور رودخانه و در نهایت افزایش آسیب‌پذیری سیلابی رودخانه شده است. نتایج طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر Landsat و Sentinel-2 با دقت کلی به ترتیب حدود ۹۳ درصد (۲۰۲۴) و ۹۱ درصد (۲۰۰۵) و ضرایب کاپای ۰/۸۸ و ۰/۸۵، بیانگر صحت و پایایی بالای تحلیل‌های جغرافیایی انجام‌شده است. نتایج تحلیل تغییرات کاربری اراضی نشان داد که وسعت کاربری کشاورزی در بیشتر بازه‌های مورد مطالعه (برای مثال بازه اول ۱۱۶ هکتار، بازه دوم ۲۵۲ هکتار و بازه سوم ۲۰۳ هکتار) افزایش داشته است که این موضوع نشان دهنده پیش‌روی فعالیت‌های کشاورزی به قسمت‌های حریم و حتی بستر فعال رودخانه قره‌سو بوده که سبب ایجاد یک پایداری کاذب ناشی از تثبیت پوشش گیاهی حاشیه رودخانه شده است. همچنین نتایج محاسبات شاخص پایداری جانبی مجرا نشان داد، میزان این شاخص برای بازه اول عدد ۰/۳۲، بازه دوم ۰/۳۱، بازه سوم ۰/۲، بازه چهارم ۰/۲۱، بازه پنجم ۰/۱۷، بازه ششم ۰/۱۶ و برای بازه هفتم عدد ۰/۱۷ می‌باشد. مقدار پایین شاخص پایداری بازه‌های مختلف رودخانه قره‌سو با توجه به آهنگ مهاجرت پایین آن، نشان‌دهنده میزان پایین مساحت مجرای فعال تغییرنیافته در طول دوره مورد بررسی می‌باشد که علت آن نیز تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو بوده است. احداث سد سبلان در بالادست محدوده مورد مطالعه در واقع از یک سو سبب کاهش دبی‌های شکل دهنده مجرای رودخانه، تضعیف دینامیک جانبی مجرا و تثبیت پشته‌های کناری رودخانه قره‌سو شده و از سوی دیگر نیز ایمنی کاذبی را در نواحی پایین دست خود ایجاد کرده است که در صورت سیلابی شدن تلاقی‌های مهمی چون خیاوچای، قطورچای، آلنی چای و رودخانه چای‌لاخ، احتمال سرریز و آب‌گرفتگی دشت سیلابی رودخانه را برای دوره‌های بازگشت بیش از ۱۰ سال به وجود خواهد آورد. در مجموع می‌توان گفت

تغییرات کاربری اراضی صورت گرفته در طی ۱۹ سال اخیر در دشت سیلابی رودخانه قره‌سو باعث کاهش ظرفیت جریان عبوری آب در مجرای رودخانه شده و علی‌رغم تحرک جانبی پایین رودخانه، احتمال وقوع مخاطره سیلابی را در محدوده دشت سیلابی افزایش داده است. از این رو می‌توان با اتخاذ سیاست‌های کاربردی و مهمی چون پایش سالانه تغییرات کاربری اراضی در محدوده دشت سیلابی و نیز ایجاد ممنوعیت در فعالیت‌های کشاورزی حاشیه رودخانه قره‌سو، گامی موثر در مدیریت صحیح این رودخانه مهم در استان اردبیل برداشت.

References

- Al-Taei, A. I., Alesheikh, A. A., & Darvishi Boloorani, A. (2023). Land use/land cover change analysis using multi-temporal remote sensing data: a case study of Tigris and Euphrates Rivers Basin. *Land*, 12(5), 1101. <https://doi.org/10.3390/land12051101>
- Asghari Sarsakanroud, S., & Saeedi Seta, A. (2023). Investigating the effect of land use changes on the runoff of the Qara chai River Basin using the SWAT model. *Geography and Environmental Planning*, 34(3), 95-118. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2023.134432.1535>
- Baajzadeh, Z., Shah-Hosseini, M., & Shayan, S. (2025). Evaluating the Effects of Anthropogenic and Tectonic Factors on Landform Changes with the Aim of Improving the Environment (Case Study: Shour River and Eshtehard Plain). *Environmental Erosion Research Journal*, 15(1), 1-24. <https://doi.org/10.61186/jeer.15.1.1>
- Church, M., Kellerhals, R., & Day, T. J. (1989). Regional clastic sediment yield in British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(1), 31-45. <https://doi.org/10.1139/e89-004>
- Clerici, A., Perego, S., Chelli, A., & Tellini, C. (2015). Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries. *Journal of Hydrology*, 527, 1106-1122. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.063>
- Du, Z., Linghu, B., Ling, F., Li, W., Tian, W., Wang, H., ... & Zhang, X. (2012). Estimating surface water area changes using time-series Landsat data in the Qingjiang River Basin, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1), 063609-063609. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.6.063609>
- Esfandiyari Darabadi, F., Rafiei Mahmoodjagh, H., & Farzaneh, R. (2022). Investigation of land use changes in Zarrineh Rud catchment and its effect on soil erosion using WLC model. *Journal of Hydrogeomorphology*, 8(29), 68-45. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.47572.1600>
- Fashae, O. A., & Olusola, A. O. (2017). Landuse types within channel corridor and river channel morphology of River Ona, Ibadan, Nigeria. *Indonesian Journal of Geography*, 49(2), 111-117. <https://doi.org/10.22146/ijg.12738>
- Field, J., Tambunan, B., & Floch, P. (2014). *Pyanj river morphology and flood protection*. <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/42682/cwa-wp-06-pyanj-river-morphology.pdf>
- Fortugno, D., Boix-Fayos, C., Bombino, G., Denisi, P., Quiñonero Rubio, J. M., Tamburino, V., & Zema, D. A. (2017). Adjustments in channel morphology due to land-use changes and check dam installation in mountain torrents of Calabria (southern Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2469-2483. <https://doi.org/10.1002/esp.4197>
- Giardino, J. R., & Lee, A. A. (2011). *Rates of channel migration on the Brazos River*. Yangling: Department of Geology & Geophysics, Texas A & M University. https://texashistory.unt.edu/ark:/67531/metapth415066/m2/1/high_res_d/txca-0835.pdf
- Hohensinner, S., Hauer, C., & Muhar, S. (2018). River morphology, channelization, and habitat restoration. In *Riverine ecosystem management: science for governing towards a sustainable future* (pp. 41-65). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_3
- Ibitoye, M. O. (2021). A remote sensing-based evaluation of channel morphological characteristics of part of lower river Niger, Nigeria. *SN Applied Sciences*, 3(3), 340. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04215-1>

- Khaleghi, S., Roustaei, S., Khorshiddoust, A. M., Rezaei-Moghadam, M. H., & Ghorbani, M. A. (2016). Investigation of human role on morphological channel changes of Lighvan Chai River. *Geographic Space*, 16(55), 111–135. [In Persian] <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-944-fa.html>
- Liu, W., Wu, J., Xu, F., Mu, D., & Zhang, P. (2024). Modeling the effects of land use/land cover changes on river runoff using SWAT models: A case study of the Danjiang River source area, China. *Environmental research*, 242, 117810. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117810>
- Module, F. L. A. A. S. H. (2009). *Atmospheric correction module: Quac and flaash user's guide*. Version, 4, 44.
- MPOI (2005). Guidelines for Flood Zoning and Delineation of Riverbed and Riparian Zone. Management and Planning Organization of Iran Press, Tehran. [In Persian] https://waterstandard.wrm.ir/uploaded_files/DCMS/WRMResearch_files/307-s.pdf
- Nath, A., & Ghosh, S. (2022). Assessment of river morphology based on changes in land use and land cover and the spatial and temporal variation of meandering parameters of the barak river. *Water Practice & Technology*, 17(11), 2351-2370. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.114>
- Nones, M., Guerrero, M., Schippa, L., & Cavalieri, I. (2024). Remote sensing assessment of anthropogenic and climate variation effects on river channel morphology and vegetation: Impact of dry periods on a European piedmont river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(5), 1632-1652. <https://doi.org/10.1002/esp.5791>
- Qin, Y., Jin, X., Du, K., & Jin, Y. (2024). Changes in river morphology and influencing factors in the upper Yellow River over the past 25 years. *Geomorphology*, 465, 109397. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109397>
- Rhodes, E. C., Talchabhadel, R., & Jordan, T. (2024). A changing river: Long-term changes of sinuosity and land cover in the Navasota River Watershed, Texas. *River*, 3(2), 152-165. <https://doi.org/10.1002/rvr2.85>
- Richard, G. A. (2001). *Quantification and prediction of lateral channel adjustments downstream from Cochiti Dam, Rio Grande, New Mexico*. Colorado State University. <https://www.proquest.com/openview/245b8fbb4e008aa6d75a66255376708c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Richard, G. A., Julien, P. Y., & Baird, D. C. (2005). Case study: modeling the lateral mobility of the Rio Grande below Cochiti Dam, New Mexico. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11), 931-941. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:11\(931\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:11(931))
- Roccati, A., Luino, F., Turconi, L., Piana, P., Watkins, C., & Faccini, F. (2018). Historical geomorphological research of a Ligurian coastal floodplain (Italy) and its value for management of flood risk and environmental sustainability. *Sustainability*, 10(10), 3727. <https://doi.org/10.3390/su10103727>
- Shields Jr, F. D., Simon, A., & Steffen, L. J. (2000). Reservoir effects on downstream river channel migration. *Environmental Conservation*, 27(1), 54-66. <https://doi.org/10.1017/s0376892900000072>
- Shin, Y. H., & Julien, P. Y. (2011). Effect of flow pulses on degradation downstream of Hapcheon Dam, South Korea. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(1), 100-111. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000287](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000287)
- Surian, N. (1999). Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 24(12), 1135-1151. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199911\)24:12%3C1135::AID-ESP40%3E3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199911)24:12%3C1135::AID-ESP40%3E3.0.CO;2-F)
- Wang, Y., Borthwick, A. G., & Ni, J. (2022). Human affinity for rivers. *River*, 1(1), 4-14. <https://doi.org/10.1002/rvr2.12>
- Williams, G. P., Wolman, M. G., & Wolman, M. G. (1984). *Downstream effects of dams on alluvial rivers* (Vol. 1286). US Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp1286>