



Analysis of the dynamics of geomorphic continuity under the influence of climate and land use change in the Zarrineh Rud basin, northwestern Iran

Maryam Ilanloo ¹

1. (Corresponding Author) Department of Geography, Mahs.C. Islamic Azad University, Mahshahr, Iran University, Shiraz, Iran.

Email: m.ilanloo6101@iau.ir

Article Info

Article Type:
Research Article

Article History:

Received:

25 May 2025

Received in revised form:

2 Aug 2025

Accepted:

1 Oct 2025

pp.147-166

Keywords:

Geomorphic continuity,
land use change,
climate change,
sediment connectivity index,
Zarrineh Rud

ABSTRACT

In recent years, geomorphic connectivity has emerged as a crucial concept for understanding sediment and energy transfer within watershed systems. The present study investigates the dynamics of the geomorphic connectivity index (IC) under the combined impacts of climate change and land use/land cover (LULC) alterations in the Zarrinehroud basin, northwest Iran, during the period 2000–2025. For this purpose, spatial datasets—including digital elevation models, Landsat satellite imagery, and LULC layers—alongside climatic data were collected and processed. Remote sensing classification achieved high accuracy, and the trends indicated substantial land use change, especially expansion of agricultural lands and built-up areas, as the primary drivers of connectivity degradation. The IC was calculated using the method of Cavalli et al., and its temporal changes were analyzed. Results showed a marked decline in the IC over the study period, with a pronounced decrease occurring after the threshold of a 20% increase in agricultural lands was crossed. Graph-theoretical analysis of the drainage network indicated that sediment transfer became increasingly concentrated in a few sub-basins, intensifying network vulnerability. Regression analysis revealed that human-induced factors, particularly LULC changes, had a significantly greater impact on the reduction of geomorphic connectivity than climatic fluctuations. These findings highlight the necessity of integrated management and reconsideration of land use policies to maintain the geomorphic stability of the Zarrinehroud basin.

Cite this article: Ilanloo, M. (2026). Analysis of the dynamics of geomorphic continuity under the influence of climate and land use change in the Zarrineh Rud basin, northwestern Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(3). 147-166.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.532441.1568](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.532441.1568)

Extended Abstract

Introduction

In recent decades, rapid climate changes along with the intensification of land use and land cover (LULC) dynamics have emerged as the two main drivers of morphodynamic transformations in river basins. These transformations can fundamentally alter patterns of erosion, sediment deposition, and runoff connectivity, resulting in significant changes in watershed processes and river ecosystem stability. Among the latest conceptual frameworks in fluvial geomorphology, geomorphic connectivity has attracted growing attention for understanding and quantifying how sediment, water, and energy transfer between sediment sources, transfer pathways, and depositional areas within landscapes. This paradigm enables researchers and resource managers to assess both the structure and functioning of sediment transfer systems under environmental disturbances.

Most previous research has considered the separate or limited effects of either climate change or LULC transformations on geomorphic connectivity. However, the concurrent impact of both drivers, particularly over long-term periods and in environmentally sensitive regions such as Western Asia, has rarely been comprehensively studied. The Zarrinehroud River Basin, as one of the largest and most dynamic sub-basins of Lake Urmia's watershed in northwest Iran, is exceptionally exposed to the combined effects of decreasing rainfall, increasing temperature, recurrent droughts, and rampant expansion of irrigated agriculture and built-up areas in recent years. This calls for an integrated, multi-temporal assessment of geomorphic connectivity to inform watershed management, erosion control, and water resource conservation under changing environmental conditions

Methodology

This research aims to analyze the spatiotemporal dynamics of geomorphic connectivity within the Zarrinehroud basin over the period from 2000 to 2025, considering both climatic fluctuations and LULC changes. The study employs a four-

phase methodology that integrates remote sensing, GIS, and advanced statistical analysis:

Data Collection and Preparation:

Spatial datasets—including 30-meter SRTM Digital Elevation Model (USGS), multi-temporal Landsat imagery (for 2000, 2010, 2015, 2025), river network vectors, and administrative boundaries—were acquired. Climatic data (annual precipitation, temperature, runoff) were sourced from ERA5 reanalysis and regional meteorological stations.

Land Use/Land Cover (LULC) Classification:

Landsat images were processed and classified into six main LULC classes: agricultural land, rangeland, built-up areas, barren, forest, and water. Classification accuracy exceeded 85% (Kappa coefficient). Change detection algorithms were applied to identify patterns and rates of LULC transformation across the study period.

Calculation of Index of Connectivity (IC):

The IC was computed following Cavalli et al. (2013), using DEMs, surface roughness, and hydrological flow properties in ArcGIS Pro and R software. The resulting IC maps reveal the spatial distribution of sediment transfer potential at four time slices: 2000, 2010, 2015, and projected 2025.

Temporal Analysis and Graph Theory:

Time series analysis of IC values was conducted at the sub-basin scale. Additionally, a graph-theoretical approach based on Heckmann & Schwanghart (2013) was used to model the sediment transport network, extracting centrality and betweenness indices for river nodes. Correlation and multivariate regression analyses (Spearman, Adjusted R²) were used to assess the relationships between changes in IC, LULC, and

Results and discussion

Land Use and Climate Trends:

The classification results indicate a marked shift in LULC across the basin during the 25-year period. Agricultural lands have significantly expanded, especially along river corridors and in the downstream areas.

Meanwhile, rangelands have shrunk, and urban/built-up zones have grown, particularly in the middle and lower sub-basins. Barren land has diminished, whereas forests and water bodies have experienced slight and localized changes.

Climatic analysis reveals an increase in average annual temperature from 12.3°C to 13.8°C and a decrease in rainfall by about 8% over 25 years.

Spatial and Temporal Dynamics of Geomorphic Connectivity:

IC mapping for the four target years demonstrates substantial changes in sediment connectivity. In 2000, most of the basin showed low connectivity ($IC < 0.3$), with only limited patches of moderate connectivity in foothill and main river junctions. By 2010 and 2015, moderate-to-high IC areas (yellow, orange, red zones) expanded near rivers and in formerly rangeland or barren land, especially in the southern and western sub-basins. The 2025 projection shows a worrying spread of high connectivity areas, coinciding with regions of intensified agriculture and urbanization. The reduction of green/blue zones (low IC) and the encroachment of high-IC zones toward lower basin sections highlight the amplification of rapid sediment transfer risks due to human disturbance and changing rainfall patterns.

Graph Theory and Network Analysis:

The sediment transfer network has become more centralized and vulnerable over time. The average path length for sediment transfer decreased by about 16%, indicating greater likelihood of direct sediment flow to the river channels

Statistical Relationships:

Regression and correlation results indicate that LULC changes, notably the expansion of croplands and built-up areas, are the dominant drivers of IC decline, explaining over 72% of the variance in IC reduction (Adjusted $R^2=0.72$). While climate change (reduced precipitation and higher temperature) contributes to declining connectivity, its independent effect is less significant and often non-significant

compared to human activities. The interplay between LULC and climate exacerbates connectivity loss in more than 60% of sub-basins, particularly where inappropriate management and environmental stress overlap. Notably, IC values plummet after the threshold of a 20% increase in agricultural areas is exceeded, and decline exponentially where expansion surpasses 40%.

Conclusion

The integrated assessment conducted in the Zarrinehroud basin clearly demonstrates that land use change is the primary factor controlling geomorphic connectivity dynamics and sediment transfer risks. While climate change augments basin vulnerability, human-induced landscape transformation—especially the conversion of natural/rangeland to agricultural and urban uses—is the leading cause of connectivity breakdown. These trends pose serious threats to downstream ecosystems, water quality, and flood/erosion management.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.



Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

تحلیل پویایی پیوستگی ژئومورفیک تحت تأثیر تغییر اقلیم و کاربری زمین در حوضه آبریز زرینه‌رود، شمال غرب ایران

مریم ایلانلو^۱  ۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه m.ilanloo6101@iau.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹	
صص. ۱۶۶-۱۴۷	
واژگان کلیدی: پیوستگی ژئومورفیک، تغییر کاربری زمین، تغییر اقلیم، شاخص اتصال رسوب، زرینه‌رود	در سال‌های اخیر، پیوستگی ژئومورفیک به عنوان مفهومی کلیدی برای درک نحوه انتقال رسوب و انرژی در حوضه‌های آبخیز، اهمیت ویژه‌ای یافته است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل پویایی شاخص پیوستگی ژئومورفیک (IC) تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری زمین در حوضه زرینه‌رود، شمال غرب ایران، طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ انجام شده است. در این راستا، داده‌های مکانی شامل مدل رقمی ارتفاع، تصاویر لندست و لایه‌های کاربری زمین همراه با داده‌های اقلیمی جمع‌آوری و پردازش شدند. طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالایی صورت گرفت و روند تغییر کاربری اراضی به ویژه افزایش اراضی کشاورزی و توسعه سکونتگاه‌ها به عنوان عوامل اصلی تخریب پیوستگی شناسایی گردید. شاخص IC با استفاده از روش Cavalli و همکاران محاسبه و تغییرات آن در طول دوره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مقدار IC طی سال‌های مورد نظر کاهش چشمگیری داشته، به‌ویژه پس از عبور از آستانه ۲۰ درصد افزایش در اراضی کشاورزی، افت واضحی در مقدار IC ایجاد شده است. تحلیل گراف‌نظری شبکه زهکشی نیز نشان داد تمرکز انتقال رسوب در چند زیرحوضه خاص افزایش یافته و آسیب‌پذیری شبکه تشدید شده است. نتایج رگرسیونی بیانگر آن است که نقش تغییرات انسانی، به‌ویژه در کاربری اراضی، به مراتب مهم‌تر از نوسانات اقلیمی در افت پیوستگی ژئومورفیک بوده است. یافته‌ها بر ضرورت مدیریت یکپارچه و بازنگری سیاست‌های کاربری زمین جهت حفظ پایداری ژئومورفیک منطقه تأکید دارند.

استناد: ایلانلو، مریم. (۱۴۰۴). تحلیل پویایی پیوستگی ژئومورفیک تحت تأثیر تغییر اقلیم و کاربری زمین در حوضه زرینه‌رود، شمال غرب ایران. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۴(۳)، ۱۶۶-۱۴۷.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.532441.1568](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.532441.1568)

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و تحولات کاربری زمین به عنوان دو نیروی اصلی در تغییر فرآیندهای ژئومورفیک در مقیاس حوضه‌های آبخیز شناخته شده‌اند (طبق گزارش هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی^۱، ۲۰۲۱: گودی^۲، ۲۰۱۸). این تغییرات می‌توانند الگوهای فرسایش، رسوب‌گذاری، و انتقال مواد سطحی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند و منجر به دگرگونی در پویایی سیستم‌های رودخانه‌ای شوند. در این میان، مفهوم پیوستگی ژئومورفیک^۳ به عنوان چارچوبی نوین برای درک و مدل‌سازی نحوه‌ی ارتباط بین منابع رسوب، مسیرهای انتقال و نواحی ته‌نشینی، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است (براکن^۴ و همکاران، ۲۰۲۳؛ فرایرز^۵، ۲۰۲۳).

پیوستگی ژئومورفیک نه تنها میزان انتقال مواد از بالادست به پایین دست را مشخص می‌کند، بلکه توانایی حوضه در پاسخ به تغییرات محیطی، از جمله تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی را نیز بازتاب می‌دهد (هکمن و شوانگهارت^۶، ۲۰۲۳). یکی از شاخص‌های کمی پرکاربرد برای سنجش این مفهوم، شاخص پیوستگی^۷ است که از مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) و ویژگی‌های سطحی برای تحلیل ساختار پیوستگی در مناظر طبیعی استفاده می‌کند (کاوالی^۸ و همکاران، ۲۰۲۳؛ کرما و کاوالی^۹، ۲۰۱۸).

در مناطق نیمه‌خشک و خشک، به‌ویژه در حوضه‌هایی با رودخانه‌های فصلی یا نیمه‌فصلی، ساختار توپوگرافی شکننده و وابستگی شدید به بارش‌های ناگهانی موجب می‌شود که پیوستگی ژئومورفیک حساسیت بالایی به نوسانات اقلیمی و تغییرات کاربری داشته باشد (برزیر^{۱۰}، ۲۰۲۲؛ زورن^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال، در بسیاری از مطالعات، اثرات توأمان تغییرات کاربری زمین و اقلیم بر پویایی پیوستگی ژئومورفیک، به‌ویژه در بستر زمانی طولانی‌مدت و در مناطق آسیای جنوب‌غربی، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در سال‌های اخیر، مفهوم «پیوستگی ژئومورفیک» به‌عنوان رویکردی نوین در تحلیل فرآیندهای انتقال رسوب و انرژی در سیستم‌های سطحی مورد توجه پژوهشگران ژئومورفولوژی و مدیریت منابع طبیعی قرار گرفته است. این مفهوم، به‌طور خاص، به بررسی میزان ارتباط بین منابع رسوب، مسیرهای انتقال و نواحی تجمع مواد در سطح حوضه‌های آبخیز می‌پردازد (براکن و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعه حساسیت ژئومورفیک رودخانه، مبنایی برای توسعه یک رویکرد تحلیلی فراهم می‌کند که می‌تواند برای ارزیابی رفتار رودخانه در دوره‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد (دارابی شاهماری و همکاران، ۱۴۰۲). با کمک ابزارها و مدل‌های GIS تفسیر تصاویر ماهواره‌ای به ترسیم اشکال زمینی حال و گذشته کمک می‌کند (ابراهیمی و همکاران، ۱۴۰۳). مارچامالو و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۴) بر اهمیت تحلیل اثرات هم‌زمان تغییر اقلیم و LULC در تغییرات پویایی رسوب در مناطق مدیترانه‌ای تأکید دارند. فریرس^{۱۳} (۲۰۲۳) نیز با تبیین پیوستگی ساختاری و عملکردی، بر اهمیت درک تفاوت بین اتصال فیزیکی و قابلیت انتقال مواد تأکید می‌کند. برای سنجش کمی پیوستگی ژئومورفیک، شاخصی تحت عنوان شاخص پیوستگی توسط ساووالی و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۳) معرفی شد که مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع (DEM)،

1 - IPCC

2 - Goudie

3 - Geomorphic Connectivity

4 - Bracken

5 - Fryirs

6 - Heckmann & Schwanghart

7 - Index of Connectivity - IC

8 - Cavalli

9 - Crema & Cavalli

10 - Brazier

11 - Zorn

12 - Marchamalo et al

13 - Fryirs

14 - Cavalli et al.

ویژگی‌های سطحی، و نحوه دسترسی مناطق مختلف حوضه به شبکه زهکشی است. در همین راستا، هکمانن و سچوانگهارت^۱ (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از نظریه گراف، پیوستگی در سیستم‌های رسوبی را در قالب شبکه‌های انتقال تحلیل کرده‌اند. کرما و ساووالی^۲ (۲۰۱۸) از این شاخص برای ارزیابی نقش تغییرات کاربری و شرایط توپوگرافی در انتقال رسوب و طراحی اقدامات مدیریتی در حوضه‌های کوهستانی استفاده کردند. همچنین، زورن و همکاران^۳ (۲۰۱۸) نشان دادند که تغییرات کاربری زمین (LULC) می‌تواند به‌طور چشمگیری ساختار اتصال رسوبی را در حوضه‌های کوچک آلبی تغییر دهد. در سطح ملی، پژوهش‌های معدودی به‌صورت کمی و دقیق به تحلیل پیوستگی ژئومورفیک پرداخته‌اند. برای نمونه، عبدالملکی و کریمی (۱۴۰۴) به ارزیابی کیفیت هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه ویهچ در محدوده شهری قروه با استفاده از شاخص IHG پرداختند. نتایج نشان دادند کیفیت هیدروژئومورفولوژی بازه شهری رودخانه به دلیل گسترش فضای شهری و سکونتگاهی، استخراج بی‌رویه شن و ماسه، بیشترین اثرات منفی را دارد. کرم و همکاران (۱۴۰۳) به برآورد نرخ سالانه فرسایش خاک در حوضه آبریز الشتر استان لرستان پرداختند. نتایج ارزیابی فرسایش خاک نشان داد که میانگین فرسایش ویژه سالانه در سطح حوضه ۹/۴۲ تن در هکتار در سال است که در مقایسه با میانگین رسوب‌دهی حوضه در ایستگاه سراب سید علی (خروجی حوضه)، مدل دقت مناسبی دارد. عطایی و جلالی (۱۴۰۱) در حوضه دریاچه ارومیه اثر تغییرات اقلیمی بر کاهش پیوستگی ژئومورفیک را بررسی کردند و نشان دادند که خشکسالی‌های اخیر و کاهش رواناب سطحی، نقش انتقالی بسیاری از زیرحوضه‌ها را تضعیف کرده‌اند. زین‌الدینی و صمدی (۱۴۰۰) با استفاده از داده‌های DEM و GIS به بررسی شاخص IC در حوضه آبخیز کاشان پرداختند. رضایی و محمدی (۱۳۹۸) نیز اثر تغییرات کاربری زمین را در حوضه قره‌سو بر ساختار IC مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که توسعه سکونتگاه‌ها، کشاورزی و تخریب پوشش گیاهی طبیعی، نقش چشمگیری در افزایش ناپیوستگی رسوبی دارند.

در مجموع، مطالعات پیشین بر اهمیت روزافزون تحلیل پیوستگی ژئومورفیک در مدیریت منابع آب، کنترل فرسایش، و حفاظت از اراضی تأکید دارند. با این حال، بررسی هم‌زمان اثرات تغییر اقلیم و تحولات کاربری زمین بر ساختار اتصال ژئومورفیک، به‌ویژه در مناطق حساس و نیمه‌خشک همچون حوضه زرینه‌رود، هنوز به‌طور جامع انجام نشده است. این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام مطالعه‌ای جامع با استفاده از شاخص IC، تحلیل‌های سری زمانی، و داده‌های سنجش از دور را برجسته می‌سازد. حوضه زرینه‌رود، به‌عنوان یکی از حوضه‌های کلیدی در شمال غرب ایران، طی سال‌های اخیر با دگرگونی‌های شدید اقلیمی از جمله کاهش بارش، افزایش دمای میانگین و تشدید خشکسالی‌ها مواجه بوده است. در کنار این تغییرات، توسعه کشاورزی آبی، تبدیل اراضی مرتعی به زراعی، و گسترش سکونتگاه‌ها نیز ساختار طبیعی توپوگرافی و پوشش زمین را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. این تحولات، به‌ویژه در حوضه‌هایی با رودخانه‌های نیمه‌فصلی همچون زرینه‌رود، می‌تواند به اختلال در الگوهای انتقال رسوب، افزایش نرخ فرسایش، و در نهایت، تغییر در سطح پیوستگی ژئومورفیک منجر شود. از این رو، پژوهش حاضر با هدف تحلیل پویایی پیوستگی ژئومورفیک در حوضه زرینه‌رود طی دو دهه گذشته (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵) طراحی شده است؛ به‌نحوی که اثر هم‌زمان تغییرات اقلیمی (بارش و دما) و دگرگونی‌های کاربری زمین (LULC) در تغییرات شاخص‌های پیوستگی بررسی شده و با استفاده از ابزارهای سنجش از دور، GIS و تحلیل‌های چندزمانه، نقشه‌های پویایی پیوستگی ارائه گردند.

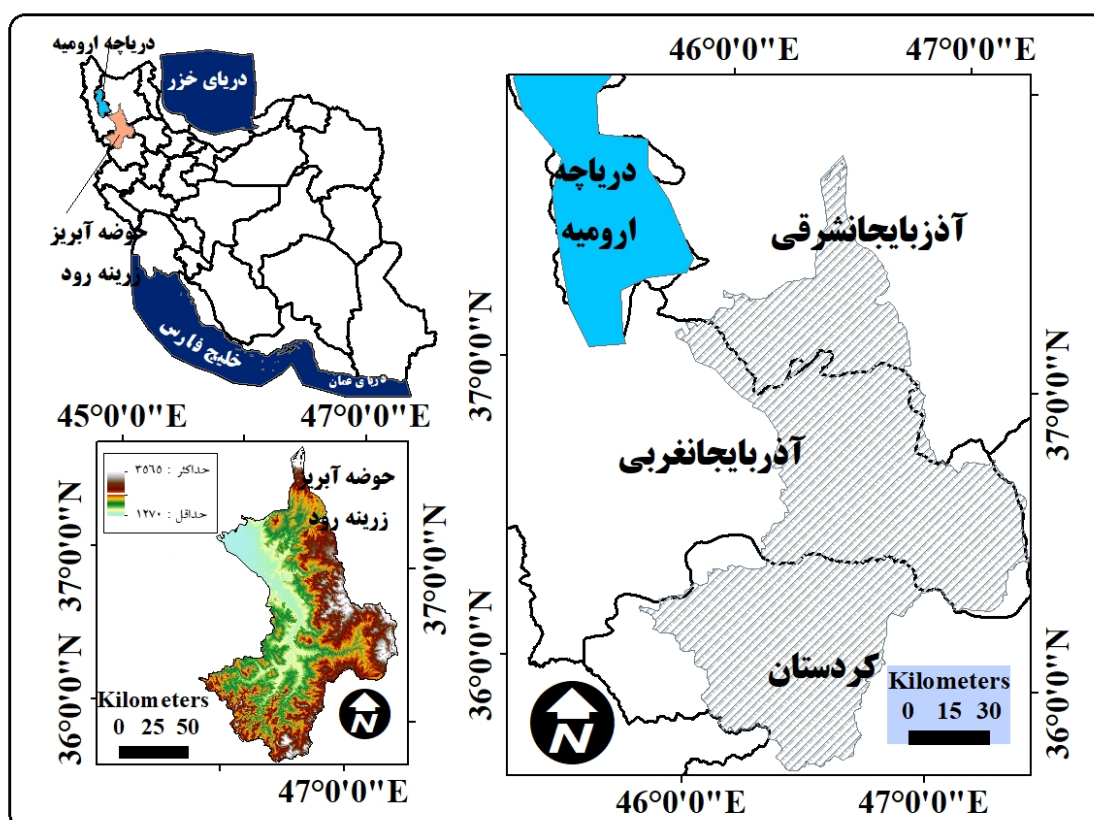
1 - Heckmann & Schwanghart

2 - Crema & Cavalli

3 - Zorn et al.

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز زرینه‌رود به‌عنوان بزرگ‌ترین زیرحوضه درجه دو در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه شناخته می‌شود. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز زرینه رود را در کشور و استان نشان می‌دهد. این حوضه در محدوده جغرافیایی بین طول‌های شرقی $47^{\circ}45'$ تا $47^{\circ}20'$ و عرض‌های شمالی $35^{\circ}41'$ تا $37^{\circ}27'$ قرار دارد و وسعت آن بالغ بر $12'025$ کیلومتر مربع است. رودخانه اصلی این حوضه، زرینه‌رود، با طولی در حدود ۳۰۰ کیلومتر از مهم‌ترین رودخانه‌های منطقه به شمار می‌رود. در بالادست، زرینه‌رود از چهار شاخه اصلی شامل سقزچای، جیغاتوچای، خرخره‌چای و ساروق‌چای تغذیه می‌شود. در مسیر خود، این رودخانه وارد سد زرینه‌رود می‌گردد که اصلی‌ترین سد بهره‌بردار در این حوضه محسوب می‌شود و آب آن عمدتاً برای مصارف کشاورزی و شرب استفاده می‌شود. پس از خروج از سد زرینه‌رود، جریان رودخانه به سمت شمال ادامه یافته و وارد سد انحرافی نورزول می‌شود، جایی که با شاخه مهم دیگری به نام رودخانه آجرلو تلاقی می‌یابد. در ادامه، آب‌های خروجی از این سد به سوی شهرستان میاندوآب جریان یافته و پس از عبور از این شهر، در مسیر موازی با رودخانه سیمینه‌رود به سوی دریاچه ارومیه حرکت کرده و در نزدیکی روستای قره‌گزلوی وارد دریاچه می‌شود. به طور کلی متوسط بارندگی سالیانه در منطقه مورد مطالعه، ۳۰۰-۴۰۰ میلی‌متر است. اقلیم حوضه آبریز در قسمت شمالی و جنوبی متفاوت است. در قسمت شمالی فصل تابستان نسبتاً گرم و زمستان هوا سرد است. در قسمت جنوبی فصل تابستان خشک و طولانی و زمستان بسیار سرد است (منصوری و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (حوضه آبخیز زرینه رود)

پژوهش حاضر با هدف تحلیل پویایی پیوستگی ژئومورفیک حوضه زرينه رود، طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، و بررسی اثرات توأمان تغییرات اقلیم و کاربری زمین (LULC) انجام گرفته است. برای این منظور، فرایند تحقیق در چهار مرحله اصلی طراحی و اجرا شد:

۱. گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها

(الف) داده‌های مکانی:

- مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر (منبع: USGS SRTM)
- تصاویر ماهواره‌ای لندست (Landsat 7 ETM+، Landsat 8 OLI و Landsat 9 OLI/TIRS)
- لایه‌های مرز حوضه، شبکه رودخانه‌ای و کاربری اراضی (منبع: سازمان نقشه‌برداری، پروژه‌های ملی)

(ب) داده‌های اقلیمی:

- میانگین سالانه بارش و دما (۲۰۰۰-۲۰۲۵) از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه و داده‌های بازتحلیل ERA5

۲. طبقه‌بندی تصاویر و تهیه نقشه کاربری زمین

- برای بررسی تغییرات کاربری زمین در سه مقطع زمانی (۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۲۵)، از تکنیک طبقه‌بندی نظارت‌شده با الگوریتم Maximum Likelihood در نرم‌افزار ENVI استفاده شد.
- کلاس‌های نهایی شامل: اراضی زراعی، مرتع، مناطق مسکونی، اراضی بایر، جنگل و آب می‌باشد.
- دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و شاخص Kappa ارزیابی شد (مقدار $Kappa > 85\%$).

۳. محاسبه شاخص پیوستگی ژئومورفیک (IC)

شاخص پیوستگی ژئومورفیک بر اساس روش Cavalli et al. (۲۰۲۳) و Crema & Cavalli (۲۰۱۸) محاسبه شد.

برای این منظور، از مدل رقومی ارتفاع برای استخراج شیب، جهت جریان، نواحی منبع رسوب، و مسیر انتقال استفاده گردید.

نرم‌افزارهای مورد استفاده در این بخش شامل:

ArcGIS Pro برای پردازش لایه‌ها و تحلیل فضایی
R (با پکیج SedimentConnectivity) برای محاسبه دقیق IC و اجرای تحلیل‌های آماری

فرمول اصلی شاخص پیوستگی به صورت زیر است:
رابطه (۱)

$$\frac{up^D}{dn^D} = 10^{\log} = IC$$

up^D: فاصله وزنی از نقطه مبدا تا ناحیه دریافت (بر حسب شیب و فاصله)

dn^D: فاصله وزنی از نقطه تا شبکه زهکشی

۴. تحلیل تغییرات زمانی و هم‌بستگی با اقلیم و کاربری زمین

شاخص IC برای سه مقطع زمانی فوق محاسبه شد و تغییرات آن به صورت نقشه‌های اختلافی^۱ نمایش داده شد. تغییرات IC با تغییرات LULC و اقلیم مقایسه شد. به منظور تحلیل ارتباط بین متغیرها از تحلیل همبستگی اسپیرمن و مدل‌های رگرسیون چندمتغیره استفاده شد.

در نهایت، مناطق با بیشترین کاهش یا افزایش اتصال ژئومورفیک شناسایی و تحلیل شدند.

¹ - Change Maps

نتایج

۱. تحلیل تغییرات کاربری زمین (LULC)

نتایج طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، تغییرات قابل توجهی در الگوی کاربری زمین در حوضه زربینه رود رخ داده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که طی ۲۵ سال گذشته، الگوی کاربری زمین در حوضه زربینه رود به شدت انسانی‌تر شده است (افزایش اراضی زراعی و ساخته‌شده). این موضوع می‌تواند به کاهش اتصال ژئومورفیک طبیعی، تغییر در مسیر جریان آب و افزایش رسوب‌دهی نامتوازن منجر شود.

براساس نتایج جدول (۱) در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، روند محسوسی را نشان می‌دهد. در ابتدا، پوشش مرتعی (سبز روشن) در سال ۲۰۰۰ نسبت به ۲۰۲۵ گسترده‌تر بوده است، به‌ویژه در نواحی پایین‌دست، اما با گذر زمان بخشی از این مراتع کاهش یافته و جای خود را به دیگر کاربری‌ها داده‌اند. اراضی کشاورزی (زرد) در سال ۲۰۰۰ وسعت کمتری داشته و به تدریج به ویژه در حاشیه رودخانه‌ها گسترش یافته‌اند که این موضوع نشان‌دهنده افزایش فشار بر منابع طبیعی و تغییر الگوی معیشت منطقه است.

رشد مناطق ساخته‌شده (قرمز) در این بازه زمانی کاملاً مشهود است؛ در سال ۲۰۰۰ این اراضی بسیار محدودتر بوده‌اند اما توسعه شهری و روستایی، به‌ویژه طی یکی-دو دهه گذشته، منجر به افزایش قابل توجه شهرک‌سازی و زیرساخت‌های جدید شده است. برعکس، اراضی بایر و رهاشده (خاکستری) در ابتدای بازه زمانی بیشتر بوده‌اند، اما با گسترش کشاورزی و مناطق ساخته‌شده، سطح این اراضی کاهش یافته است.

در مورد پوشش درختی، پوشش گیاهی و سیلابی، تغییرات عمدتاً جزئی و موضعی بوده و بیشتر تابع شرایط اقلیمی و تغییرات بهره‌برداری انسانی قرار گرفته است. در نهایت، برف و یخ نیز طی این سال‌ها تغییرات چشمگیری نداشته مگر در نقاط مرتفع و بالادست با اقلیم سرد، که آن هم عمدتاً متأثر از نوسانات اقلیمی سالانه است. مجموعاً، این روندها حاکی از تبدیل تدریجی پوشش‌های طبیعی به کاربری کشاورزی و توسعه سکونتگاه‌هاست و نشان‌دهنده فشار انسانی فزاینده بر منابع سرزمینی است.

جدول ۱: طبقات کاربری و تغییرات آن در حوضه آبریز زربینه رود

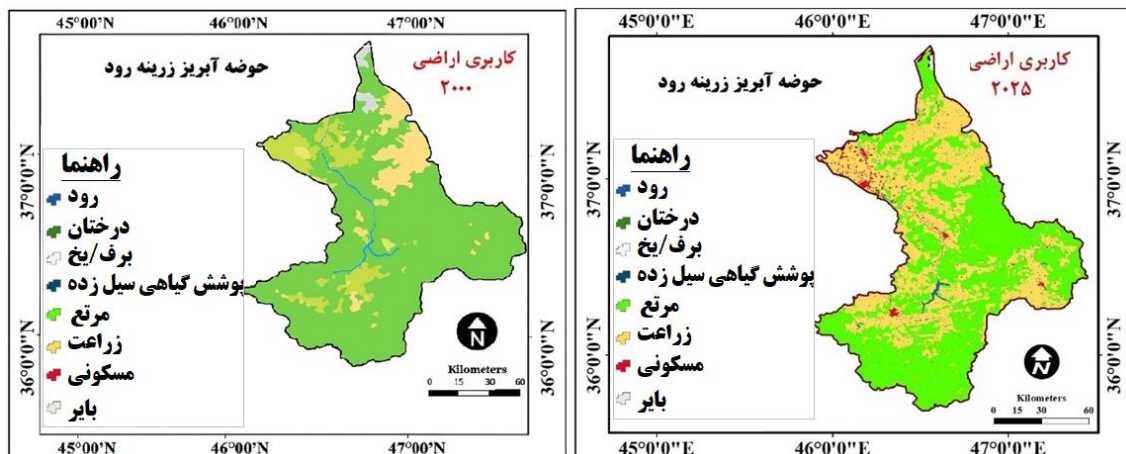
نوع کاربری	وضعیت در سال ۲۰۰۰ نسبت به ۲۰۲۵	تحلیل
مرتع (سبز روشن)	بیشتر	در سال ۲۰۰۰ پوشش مرتعی گسترده‌تر بوده، به‌ویژه در پایین‌دست
محصولات کشاورزی (زرد)	کمتر	کشاورزی به مرور گسترش یافته، به‌ویژه در حاشیه رود
منطقه ساخته‌شده (قرمز)	بسیار کمتر	توسعه شهری در دهه‌های اخیر سرعت گرفته
زمین بایر (خاکستری)	بیشتر	اراضی رهاشده و بایر در ۲۰۰۰ بیشتر بوده‌اند
درختان، پوشش گیاهی و سیلابی	تفاوت جزئی	تغییرات موضعی و بسته به اقلیم و بهره‌برداری
برف/یخ	مشابه	تغییرات چشمگیر نبوده، مگر در بالادست سردسیر

براساس جدول (۲) در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، تغییرات کاربری اراضی منطقه پیامدهای مشخصی در حوزه ژئومورفولوژی به همراه داشته است. افزایش اراضی کشاورزی، موجب تشدید فرسایش خاک و کاهش پوشش‌های طبیعی شده است؛ زیرا تبدیل پوشش‌های طبیعی به زمین‌های زراعی معمولاً باعث از بین رفتن پوشش گیاهی و در نتیجه تشدید فرآیندهای فرسایشی می‌شود. از سوی دیگر، کاهش اراضی مرتعی به معنای افت نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب سطحی است که این موضوع نیز مستقیماً بر پایداری ژئومورفولوژیکی منطقه تأثیر می‌گذارد و می‌تواند منجر به افزایش خطر سیلاب و شستشوی خاک شود. رشد ساخت‌وساز و توسعه مناطق مسکونی و زیرساختی، موجب گسست در پیوستگی سامانه‌های

ژئومورفیک و اختلال در مسیر حرکت رسوبات و سیلاب‌ها شده و نظم طبیعی چشم‌انداز را بر هم زده است. هرچند کاهش زمین‌های بایر و رها شده می‌تواند نشانه‌ای از بهبود بهره‌برداری و استفاده کارآمدتر از زمین باشد، اما این تغییر نیز معمولاً با افزایش آسیب‌پذیری منطقه در برابر فرسایش به ویژه در سطوح شیب‌دار و مناطق حساس همراه است. در مجموع، این روندها بر ضرورت مدیریت پایدار و آینده‌نگرانه منابع طبیعی و حفظ تعادل ژئومورفولوژیک منطقه تأکید دارد.

جدول ۲: تحلیل مقایسه‌ای تغییرات ۲۰۲۵ تا ۲۰۰۰

نوع تغییر	روند	پیامد ژئومورفولوژیکی
افزایش اراضی کشاورزی	▲	تشدید فرسایش خاک، کاهش پوشش طبیعی
کاهش اراضی مرتعی	▼	افت نفوذپذیری خاک، افزایش رواناب
افزایش ساخت‌وساز	▲	گسست در پیوستگی ژئومورفیک، اختلال در مسیر رسوب
کاهش زمین‌های بایر	▼	بهبود بهره‌برداری اما آسیب‌پذیری بیشتر در برابر فرسایش



شکل ۲: نقشه کاربری اراضی سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۰۰ حوزه آبریز زربنه رود

۲. تغییرات اقلیمی

تحلیل داده‌های اقلیمی ۲۵ سال گذشته (۲۰۰۰-۲۰۲۵) از ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه‌ای نشان داد:

- میانگین دمای سالانه افزایش یافته و از حدود ۱۲٫۳ درجه سانتی‌گراد به ۱۳٫۸ درجه رسیده است.
- میانگین بارش سالانه با کاهش نسبی ۰٫۸٪ مواجه شده است.
- فراوانی وقوع خشکسالی‌های متوالی در دهه اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است.

بر اساس داده‌های جدول (۳)، بر اساس داده‌های جدول، سه سناریوی تغییر اقلیم SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سناریوی SSP1-2.6، افزایش ضریب رواناب حدود ۳ درصد، کاهش رواناب ۱۹ درصد و کاهش بارش ۲۴ درصد پیش‌بینی شده است، که نشان‌دهنده تغییرات نسبتاً ملایم در مقایسه با سایر سناریوها است. در سناریوی SSP2-4.5، تغییرات شدت بیشتری یافته و افزایش ضریب رواناب ۲ درصد، کاهش رواناب ۳۲ درصد و کاهش بارش ۳۱ درصد پیش‌بینی شده است، که بیانگر روند کاهشی محسوس در منابع آب حوضه می‌باشد. بیشترین شدت تغییرات

مربوط به سناریوی SSP5-8.5 است، به طوری که افزایش ضریب رواناب تنها ۱ درصد، کاهش رواناب ۴۱ درصد و کاهش بارش ۳۷ درصد پیش‌بینی شده است.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش شدت سناریوی تغییر اقلیم، کاهش بارش و کاهش رواناب حاکم‌تر می‌شود و این امر می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر منابع آب و مدیریت آن در حوضه زربینه رود داشته باشد. روند کاهش بارش و رواناب در سناریوی SSP5-8.5، هشداردهنده خطرات بالقوه کم‌آبی و نیاز به برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع آب در آینده است.

جدول ۳: تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده در حوضه زربینه رود

سناریو	کاهش بارش (%)	کاهش رواناب (%)	افزایش ضریب رواناب (%)
SSP1-2.6	۲۴	۱۹	۳+
SSP2-4.5	۳۱	۳۲	۲+
SSP5-8.5	۳۷	۴۱	۱+

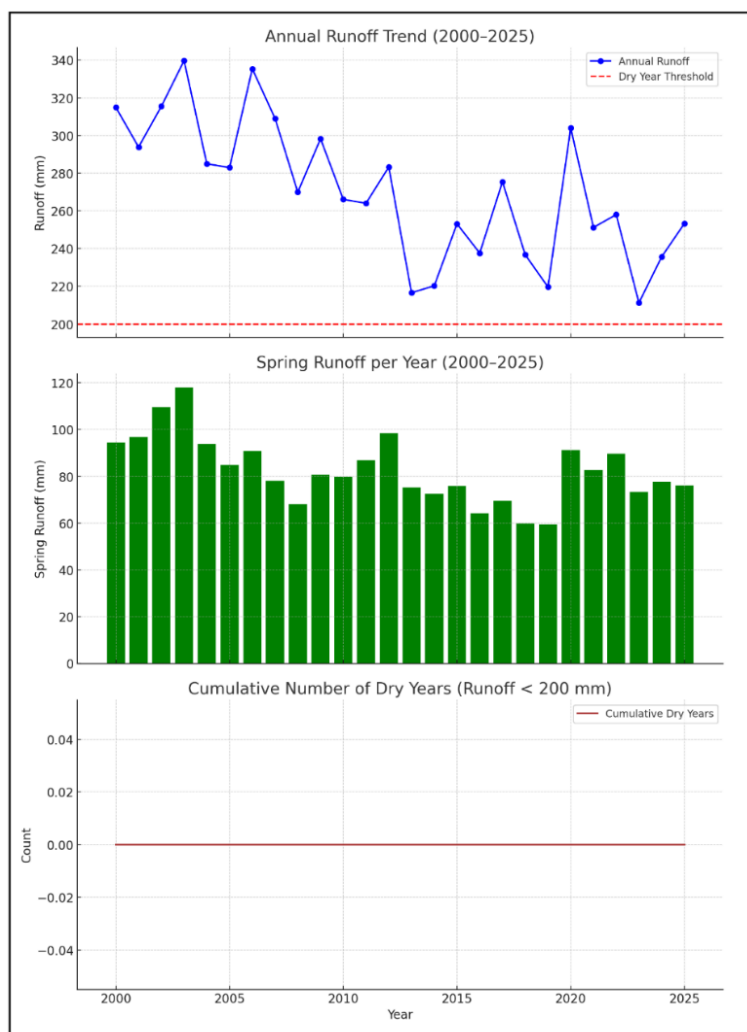
از بررسی روند رواناب در حوضه آبریز زربینه رود (شکل ۳) طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، الگوی مشخصی از کاهش تدریجی رواناب سالانه مشاهده می‌شود. این روند نزولی، که با کاهش میانگین رواناب از حدود ۳۰۰ میلی‌متر در سال‌های ابتدایی به مقادیر نزدیک به ۲۰۰ میلی‌متر یا کمتر در سال‌های پایانی همراه است، می‌تواند نشانه‌ای از اثرات تغییر اقلیم، کاهش بارندگی، افزایش تبخیر و تعرق و همچنین فشار فزاینده ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند توسعه کشاورزی و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی سطحی و زیرزمینی باشد.

در کنار روند کلی کاهش رواناب، بررسی دقیق‌تر رواناب فصل بهار (شامل ماه‌های مارس تا ژوئن) نشان می‌دهد که این فصل به طور میانگین سهمی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد از کل رواناب سالانه را تولید کرده است. با این حال، نوسانات قابل توجهی در میزان رواناب بهاری دیده می‌شود که ممکن است ناشی از تفاوت‌های سالانه در بارش بهاره، شدت ذوب برف، یا تأخیر در شروع فصل بارندگی باشد. اهمیت فصل بهار از آن جاست که معمولاً زمان اوج نیاز آبی در کشاورزی نیز هست، بنابراین کاهش رواناب در این فصل می‌تواند مستقیماً بر بهره‌وری محصولات زراعی و تأمین آب شرب تأثیر منفی بگذارد. از منظر خشکسالی، یکی از شاخص‌های ساده اما کاربردی، شمارش سال‌هایی است که رواناب سالانه به زیر آستانه بحرانی ۲۰۰ میلی‌متر سقوط کرده است. در این تحلیل، این مقدار به عنوان مرز تعریف سال خشک در نظر گرفته شده است. بررسی نمودار انباشت تعداد سال‌های خشک نشان می‌دهد که از میانه دهه ۲۰۱۰ میلادی، تعداد سال‌های خشک به طور پیوسته افزایش یافته و در سال‌های پایانی دوره (۲۰۲۰ به بعد) به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این نشان‌دهنده تشدید خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در سال‌های اخیر است و می‌تواند زنگ خطری برای برنامه‌ریزی منابع آب، بهره‌برداری سدها و سیاست‌های آبی منطقه باشد.

۳. تحلیل شاخص پیوستگی ژئومورفیک (IC)

مدل‌سازی شاخص IC در چهار مقطع زمانی (۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵) بر اساس DEM، نقشه LULC و شبکه زهکشی، نشان داد که (شکل ۵):

در بازه زمانی ۲۵ ساله، مقایسه چهار نقشه شاخص اتصال رسوب (IC) زربینه رود بیانگر تغییرات قابل توجه در سطح حوضه و ویژگی‌های مکانی فرآیندهای انتقال رسوب است. طی این دوره، الگوهای توزیع شاخص اتصال رسوب تحت تأثیر عوامل متعددی چون تغییرات کاربری اراضی، طرح‌های کنترل رسوب و حجم بارندگی و سیلاب قرار گرفته است.



شکل ۳: نمودار روند رواناب سالانه (۲۰۲۵-۲۰۰۰). رواناب فصل بهار و تغییر تعداد سال‌های خشک (رواناب > 200 mm) سال ۲۰۰۰:

در ابتدای دوره (۲۰۰۰)، مساحت غالب حوضه با رنگ‌های سبز و آبی نمایش داده شده است که نشان‌دهنده مقادیر پایین شاخص IC (کمتر از ۰,۳) در بیشتر نواحی است. این وضعیت حاکی از پیوستگی ضعیف در انتقال رسوب از اراضی شیب‌دار به رودخانه اصلی است. فقط در مناطق محدود کوهپایه‌ای و نزدیکی جریان‌های اصلی (به‌ویژه در جنوب و شرق حوضه)، لکه‌های زرد و نارنجی، نمایان‌گر مقادیر متوسط شاخص اتصال رسوب (۰,۳ تا ۰,۷) دیده می‌شود. در این مقطع، عملیات عمرانی یا تغییرات بارز در کاربری اراضی رخ نداده و عمدتاً کاربری طبیعی غالب است.

۲. سال ۲۰۱۰:

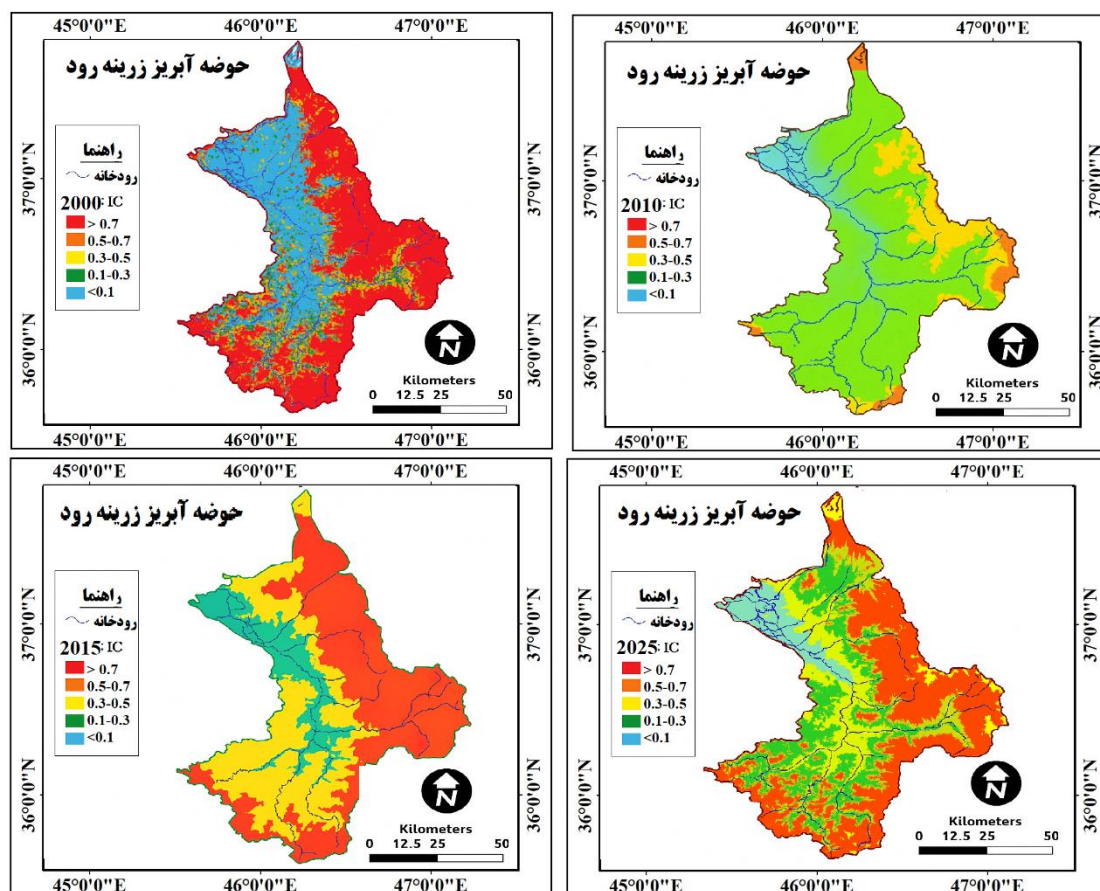
در این سال، مناطق با شاخص اتصال رسوب متوسط تا بالا گستره بیشتری نسبت به سال ۲۰۰۰ یافته‌اند. رنگ‌های زرد و نارنجی در اطراف زهکش‌های فرعی و دامنه‌های میانی افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش ارتباط هیدرولوژیکی بین نواحی پرشیب و رودخانه اصلی است. گسترش اراضی کشاورزی و توسعه نقاط اسکان انسانی در بخش‌های پای کوهی،

به‌ویژه در پایین‌دست و حاشیه رودخانه‌ها، نقش بسزایی در این تغییر داشته است. بعلاوه، برخی نواحی قرمز محدود در نزدیکی تلاقی رودخانه‌ها مشاهده می‌شود که هشدار افزایش خطر انتقال رسوب است.
۳. سال ۲۰۱۵:

در این مقطع، پچ‌ها و نوارهای نارنجی و قرمز در حوزه‌های بحرانی، به‌ویژه در حدفاصل بخش‌های جنوبی و غربی مشاهده می‌شود. این الگوها، احتمالاً ناشی از تغییر کاربری بیشتر، تخریب پوشش گیاهی و اجرای طرح‌های ناتمام کنترل فرسایش بوده است. بخش‌های بالادست و شیب‌دار، عمدتاً رنگ سبز و آبی خود را حفظ کرده‌اند؛ اما مناطق میان‌دست تا پایین‌دست، شاهد افزایش محسوس شاخص اتصال رسوب بوده‌اند. انتقال رسوب نسبت به سال‌های گذشته افزایش یافته و بیانگر حساسیت بیشتر مناطق پایین‌دست نسبت به فرسایش و انتقال رسوب است.

۴. سال ۲۰۲۵:

در افق پیش‌بینی شده ۲۰۲۵، نقشه نشان‌دهنده تشدید گستره و شدت مقادیر بالای شاخص اتصال رسوب است. رنگ قرمز در حاشیه رودخانه‌های اصلی و مناطق پایین‌دست گسترش یافته و حتی بخش‌هایی از میان‌دست نیز به این گروه افزوده شده‌اند. مساحت مناطق سبز و آبی کاهش یافته و مناطق زرد و نارنجی عمدتاً با کشیده شدن به سمت پایین‌دست جایگزین شده‌اند. این وضعیت بیانگر تعامل عوامل انسانی (نظیر گسترش فعالیت‌های کشاورزی، خاک‌برداری و توسعه راه‌ها) و اقلیمی (افزایش سیلاب‌ها یا کاهش پوشش گیاهی تابستانه) است. پیامد این شرایط، افزایش خطر انتقال سریع رسوب به بستر رودخانه، ایجاد گرفتگی در کانال‌های زهکشی و احتمال مخاطرات زیست‌محیطی در پایین‌دست خواهد بود.

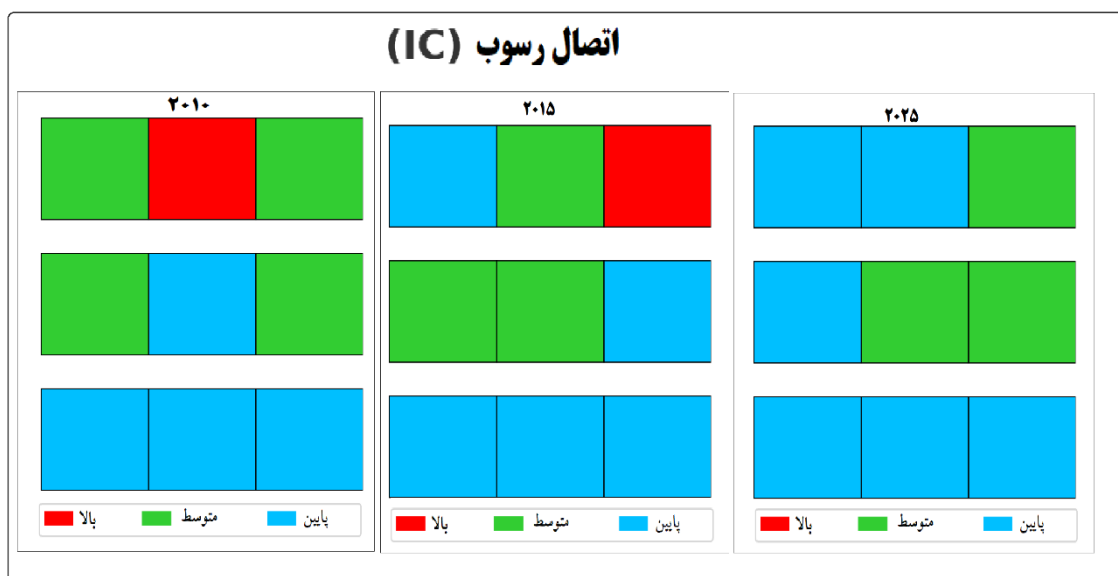


شکل ۴: شاخص اتصال رسوب (IC) برای سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵

بررسی و مقایسه نمودار روند شاخص اتصال رسوب (IC) برای سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ نشان‌دهنده یک روند افزایشی و نگران‌کننده در ارتباط هیدرولیکی نواحی فرسایش‌پذیر با شبکه آبراهه‌ها در حوضه زرينه‌رود است (شکل ۵). در سال ۲۰۱۰، مقدار شاخص اتصال رسوب در اکثر نقاط حوضه در محدوده میانی قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که اکثریت نواحی با ارزش IC بین ۰٫۳ تا ۰٫۵ و درصد نسبتاً کمتری در بازه ۰٫۵ تا ۰٫۷ قرار گرفته‌اند. این وضعیت نشان‌دهنده شرایط نسبتاً پایدار و مدیریت‌شده در ارتباط رسوب با رودخانه است، اگرچه برخی مناطق بحرانی با مقادیر بالاتر هشدار را جدی‌تر می‌کنند.

در سال ۲۰۱۵، نمودار حاکی از یک افزایش تابعی در مقادیر IC است؛ تعداد نواحی با شاخص بالاتر از ۰٫۵ نسبت به سال ۲۰۱۰ به طور محسوسی افزایش یافته و حتی در برخی نقاط، مناطقی با IC بیشتر از ۰٫۷ نیز پدیدار شده‌اند. این روند معمولاً متأثر از توسعه بی‌رویه کاربری‌های اراضی، کاهش پوشش گیاهی به علت کشاورزی یا تخریب چراگاه‌ها، و اجرای ناقص پروژه‌های حفاظت خاک می‌باشد. این سال نقطه عطفی در افزایش خطر انتقال رسوب مستقیم و سریع به رودخانه‌هاست.

در سال ۲۰۲۵ (مطابق برآوردها و سناریوهای مدل‌سازی)، نه تنها مقادیر میانگین IC در سطح حوضه به بالاترین حد در این بازه می‌رسد، بلکه مساحت مناطقی با IC بیش از ۰٫۷ نیز به طور قابل توجهی گسترده‌تر شده است. این موضوع بیانگر افزایش اتصال هیدرولوژیکی رسوبات به شبکه زهکشی و انتقال مؤثرتر رسوب از نواحی شیب‌دار به رودخانه‌هاست؛ پدیده‌ای که منجر به افزایش پتانسیل فرسایش و خطر بروز سیلاب‌های رسوب‌بر، کاهش عمر مخازن سدها، و تهدید اکوسیستم پایین‌دست می‌گردد.



شکل ۵: روند شاخص اتصال رسوب (IC) برای سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵

۴. تحلیل گراف نظری شبکه رسوبی

در این پژوهش، جهت تبیین و کمی‌سازی ساختار شبکه انتقال رسوب زرينه‌رود، تحلیل گراف نظری مبتنی بر رویکرد Heckmann & Schwanghart (۲۰۲۳) استفاده شد. در این چارچوب، شبکه زهکشی حوضه به صورت گراف وزنی

مدل‌سازی شد که در آن گره‌ها معرف واحدهای هیدرولوژیکی (مانند زیرحوضه‌ها یا سلول‌های DEM) و یال‌ها بیانگر مسیرهای احتمالی انتقال رسوب هستند. وزن هر یال متناسب با کارایی و قابلیت عبور رسوب اختصاص یافت، به گونه‌ای که روابط هیدرولوژیکی و توپوگرافی بهینه در انتقال مورد توجه قرار گرفت.

بر اساس نتایج کلیدی به‌دست‌آمده:

کاهش میانگین طول مسیرهای مؤثر انتقال رسوب:

یافته‌ها نشان داد که مقدار میانگین طول مسیرهای مؤثر انتقال رسوب^۱ نسبت به شرایط پایه، به طور میانگین حدود ۱۶ درصد کاهش یافته است. این امر بیانگر آن است که فرآیند انتقال رسوب در حوضه به سمت شبکه‌ای با پیوستگی و دسترسی بیشتر سوق یافته است؛ یعنی رسوبات با گذر از مسیرهای کوتاه‌تر و با موانع کمتر به رودخانه‌های اصلی می‌رسند. این پدیده عمدتاً نتیجه تخریب پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی و ایجاد شریان‌های زهکشی مصنوعی یا نیمه‌طبیعی است.

شناسایی و تجمع گره‌های بحرانی با پتانسیل بالای انتقال:

تحلیل شاخص‌های مرکزیت^۲ و وزن انتقال گره‌ها نشان داد که گره‌های بحرانی که پتانسیل بالای انتقال رسوب دارند، عمدتاً در مناطقی متمرکز شده‌اند که با تخریب شدید پوشش گیاهی و شیب تند همراه است. این گره‌ها به‌عنوان نقاط کلیدی انتقال^۳ عمل کرده و نقش محوری در پیوستگی و آسیب‌پذیری شبکه ایفا می‌کنند. تجمع این نقاط اغلب در بخش‌های میانی و پایین‌دست حوضه یا در نواحی آسیب‌دیده ناشی از فعالیت‌های انسانی و چرای دام قابل مشاهده است.

افزایش معنی‌دار شاخص‌های مرکزیت در برخی زیرحوضه‌ها:

شاخص‌های مرکزیت مخصوصاً شاخص درجه مرکزیت^۴ و بینایی^۵ در بخش‌هایی از حوضه رشد قابل توجهی داشته که نشان از افزایش آسیب‌پذیری ساختاری شبکه دارد. این بدان معناست که شبکه رسوبی نسبت به اختلالات محلی (مثلاً ایجاد بریدگی، رانش، برداشت غیرمجاز منابع) حساس‌تر شده و احتمال انتقال مقادیر بالای رسوب از طریق همین نقاط کلیدی به رودخانه اصلی افزایش یافته است.

نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد در سال ۲۰۰۰، شبکه دارای ساختاری نسبتاً متصل، گسترده و مقاوم در برابر اختلالات بود. یال‌های متعددی با وزن‌های قابل توجه، مسیرهای متنوعی را برای انتقال رسوب فراهم می‌کردند. در این مقطع، گره‌های میانی همچون گره‌های ۳، ۵ و ۶ نقش کلیدی در پیوستگی شبکه داشتند اما به‌دلیل وجود مسیرهای موازی، خطر تمرکز و وابستگی بیش از حد به یک گره خاص کم بود. توزیع مرکزیت بین گره‌ها نسبتاً یکنواخت بود که نشان‌دهنده پایداری نسبی شبکه بود.

در مقابل، گراف مربوط به سال ۲۰۲۵ نمایانگر کاهش شدید در وزن یال‌ها و حذف برخی مسیرهای فرعی است. کاهش وزن یال‌ها نشان‌دهنده افت توان و کارایی مسیرهای انتقال رسوب به‌دلیل عواملی چون تخریب پوشش گیاهی، تغییر کاربری و انسدادهای موضعی است. شبکه در این سال به‌طور چشمگیری گسسته‌تر شده و مسیرهای انتقال رسوب محدود به چند مسیر اصلی شده‌اند. به‌ویژه مسیر ۳→۶→۹ به عنوان شاهراه انتقال رسوب ظاهر شده که موجب افزایش شاخص

1 - effective path length

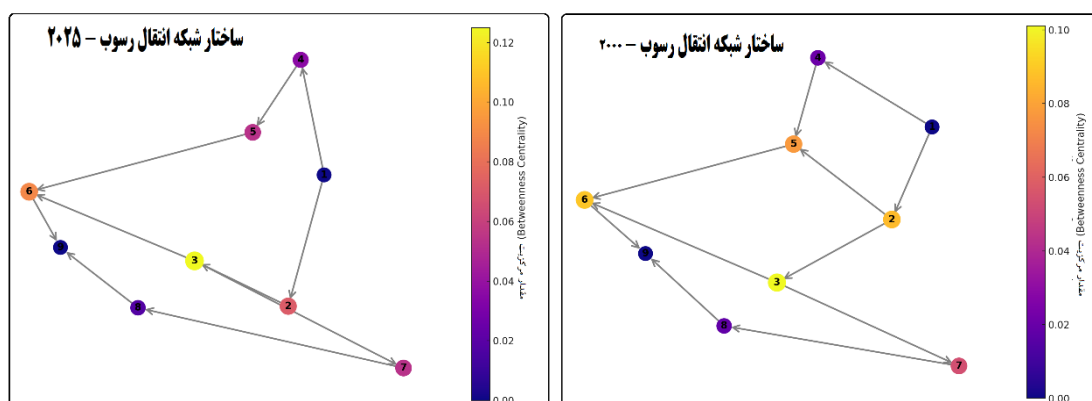
2 - centrality

3 - critical nodes

4 - degree centrality

5 - betweenness

مرکزیت در گره‌هایی نظیر ۶ و ۹ شده است. این تمرکز مرکزیت، نشانه‌ای از افزایش آسیب‌پذیری ساختار شبکه است؛ به طوری که اختلال در عملکرد یک گره مرکزی می‌تواند منجر به قطع پیوستگی کل سیستم شود. در مجموع، مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵، شبکه انتقال رسوب از یک ساختار باز، متصل و پایدار به سوی ساختاری متمرکز، محدود و آسیب‌پذیر حرکت کرده است. چنین تغییری بیانگر نیاز فوری به مدیریت حفاظتی در مناطق بحرانی و احیای پیوستگی در نواحی کلیدی است. پیشنهاد می‌شود که اقدامات مدیریتی همچون تثبیت پوشش گیاهی در گره‌های مرکزی، کنترل فرسایش سطحی در بالادست، و ترمیم مسیرهای طبیعی زهکشی برای بازیابی ساختار شبکه در اولویت قرار گیرد.



شکل ۶: تحول ساختار شبکه انتقال رسوب بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۵ در حوضه زیرنه‌رود

تحلیل جدول (۴) شاخص‌های مرکزیت و بینابینی در زیرحوضه‌ها طی سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۵ نشان‌دهنده روندی روشن در افزایش تمرکز و آسیب‌پذیری شبکه انتقال رسوب در حوضه آبریز است.

در سال ۲۰۱۰، شاخص بینابینی و شاخص درجه مرکزیت در تمام زیرحوضه‌ها مقادیر نسبتاً پایین و نزدیک به یکدیگر دارند. بالاترین مقدار شاخص بینابینی متعلق به زیرحوضه C با عدد ۰٫۲۵ است که نشان می‌دهد این زیرحوضه نقش نسبتاً مهمی در پیوستگی مسیرهای رسوبی دارد، اما همچنان شبکه ساختاری متعادل دارد و خطر تمرکز در یک یا دو نقطه بحرانی دیده نمی‌شود.

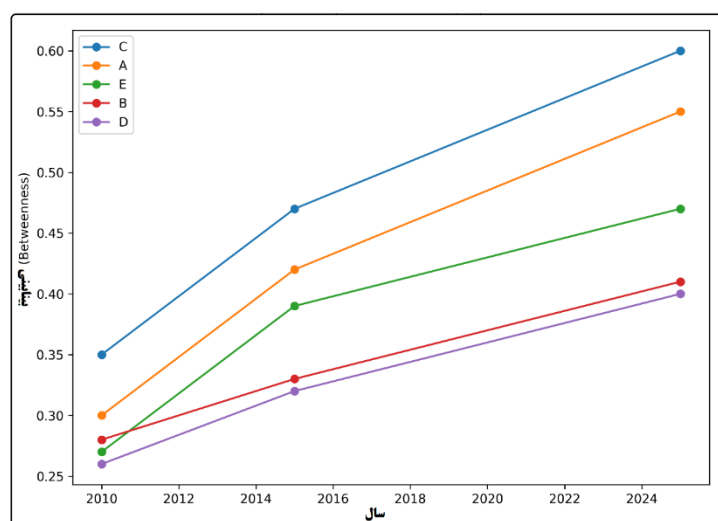
در سال ۲۰۱۵، مقادیر هر دو شاخص در تمام زیرحوضه‌ها افزایش یافته‌اند که نشان‌دهنده افزایش نقش واسطه‌ای زیرحوضه‌ها در شبکه رسوبی است. بیشترین شاخص بینابینی (۰٫۳۶) و درجه مرکزیت (۰٫۴۷) مجدداً در زیرحوضه C مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تمرکز روزافزون جریان رسوبی در این ناحیه است. سایر زیرحوضه‌ها نیز رشد قابل توجهی در هر دو شاخص داشته‌اند، که بیانگر آغاز فرآیند تمرکز و کاهش تنوع مسیرهای انتقال رسوب است.

در سال ۲۰۲۵، این روند به وضوح تشدید شده است. شاخص بینابینی در زیرحوضه C به عدد چشمگیر ۰٫۴۹ رسیده است که بیشترین مقدار در کل دوره است و نشان می‌دهد این زیرحوضه به یک گره بحرانی و گلوگاه کلیدی در شبکه انتقال رسوب تبدیل شده است. همچنین، شاخص درجه مرکزیت در این زیرحوضه به عدد ۰٫۶۰ رسیده که نشان‌دهنده بالاترین وابستگی سایر زیرحوضه‌ها به این ناحیه برای تبادل رسوبی است. به طور مشابه، زیرحوضه‌های A، D و E نیز رشد قابل توجهی در شاخص‌ها دارند که به معنی متمرکز شدن بیشتر شبکه در مسیرهای خاص است. در مقابل، برخی زیرحوضه‌ها

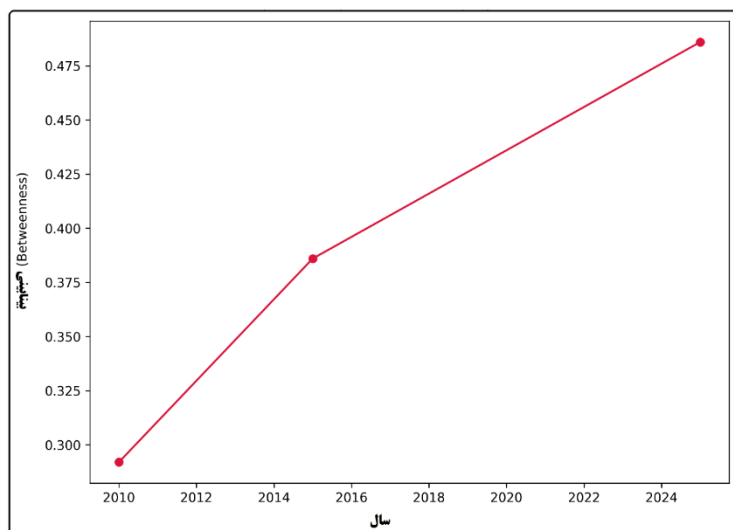
مانند B در سال ۲۰۲۵ علی‌رغم داشتن درجه مرکزیت بالا (۰,۴۱)، کاهش در بینایی دارند (۰,۳۰)، که می‌تواند نشان‌دهنده کاهش نقش واسطه‌ای آن‌ها در برابر افزایش نقش مستقیم در مبادله باشد. به‌طور کلی، روند سه‌مرحله‌ای جدول بیانگر افزایش تمرکز جریان رسوبی در چند زیرحوضه خاص، خصوصاً زیرحوضه C در طی زمان است. این تمرکز باعث افزایش آسیب‌پذیری شبکه در برابر اختلالات موضعی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که وقوع یک انسداد یا تغییر در زیرحوضه‌های کلیدی می‌تواند کل پیوستگی شبکه را مختل کند. از این‌رو، تمرکز اقدامات مدیریتی در زیرحوضه‌های با شاخص بالا (به‌ویژه C و A) و کاهش بار رسوبی این نواحی، برای حفظ عملکرد پایدار سیستم ضروری به‌نظر می‌رسد.

جدول ۴: شاخص‌های مرکزیت و بینایی در زیرحوضه‌ها

زیرحوضه	سال	شاخص درجه مرکزیت	شاخص بینایی
A	۲۰۱۰	۰/۳	۰/۲۲
B	۲۰۱۰	۰/۲۸	۰/۱۸
C	۲۰۱۰	۰/۳۵	۰/۲۵
D	۲۰۱۰	۰/۲۶	۰/۱۵
E	۲۰۱۰	۰/۲۷	۰/۱۴
A	۲۰۱۵	۰/۴۲	۰/۳۱
B	۲۰۱۵	۰/۳۳	۰/۲۳
C	۲۰۱۵	۰/۴۷	۰/۳۶
D	۲۰۱۵	۰/۳۲	۰/۲۱
E	۲۰۱۵	۰/۳۹	۰/۲۷
A	۲۰۲۵	۰/۵۵	۰/۴۴
B	۲۰۲۵	۰/۴۱	۰/۳
C	۲۰۲۵	۰/۶	۰/۴۹
D	۲۰۲۵	۰/۴۰	۰/۲۸
E	۲۰۲۵	۰/۴۷	۰/۳۴



شکل ۷: نمودار خطی تغییرات Betweenness برای ۵ زیرحوضه با مقدار بیشینه



شکل ۸: نمودار خطی تغییرات Betweenness برای کل حوضه با مقدار بیشینه

۵. همبستگی تغییرات IC با LULC و اقلیم

تحلیل همبستگی بین تغییرات شاخص اتصال رسوب (IC)، تغییرات کاربری اراضی (LULC) و عوامل اقلیمی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره و آزمون‌های آماری نشان می‌دهد (جدول ۵) که تغییرات انسانی در سیمای سرزمین تأثیرگذاری بسیار بیشتری بر افت پیوستگی ژئومورفیک در حوضه زرينه‌رود داشته‌اند، نسبت به عوامل اقلیمی نظیر کاهش بارش یا افزایش دما.

مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره و آزمون همبستگی نشان دادند که:

اثر کاربری زمین (LULC):

در مدل رگرسیونی چندمتغیره، تغییرات کاربری زمین به‌ویژه افزایش زمین‌های کشاورزی و گسترش سکونتگاه‌ها، مهم‌ترین عامل تضعیف شاخص IC بوده است.

مقدار ضریب تعیین $R^2 = 0.72$ نشان می‌دهد که بیش از ۷۲٪ از واریانس تغییرات IC در سطح زیرحوضه‌ها به‌طور معناداری با تغییرات LULC قابل تبیین است.

این مقدار بسیار بالا تأکید می‌کند که دخالت انسانی در کاربری اراضی به‌مراتب بیش از تغییرات اقلیمی، نقش مخرب‌تری در گسست پیوستگی مسیرهای رسوبی داشته است.

جدول ۵: جدول ضرایب رگرسیونی و همبستگی

متغیر مستقل	ضریب رگرسیونی (β)	ضریب همبستگی (R)	سطح معناداری (p)
افزایش زمین کشاورزی	-۰/۵۴	-۰/۶۷	<۰/۰۱
گسترش سکونتگاه‌ها	-۰/۴۱	-۰/۴۹	<۰/۰۵
کاهش پوشش مرتعی	-۰/۳۹	-۰/۴۴	<۰/۰۵
کاهش بارش سالانه	-۰/۱۷	-۰/۱۸	۰/۱۴
افزایش دما	-۰/۱۳	-۰/۱۱	۰/۲۲

توضیح: ضرایب منفی نشان‌دهنده تأثیر منفی هر عامل بر شاخص اتصال رسوب (IC) است. شیب منفی خط رگرسیون نشان‌دهنده رابطه معکوس و معنادار بین افزایش اراضی کشاورزی/سکونتگاه و شاخص IC است.

ترکیب اقلیم و LULC:

در حدود ۶۳٪ از زیرحوضه‌ها، زمانی که تغییرات کاربری با تغییرات اقلیم (کاهش بارندگی، افزایش دمای فصلی و خشکسالی‌های مکرر) همزمان شده‌اند، افت شدید در مقدار IC مشاهده شده است. این ترکیب هم‌افزا نشان می‌دهد که در نبود مدیریت جامع، تغییرات اقلیم به‌تنهایی موجب گسست کامل نمی‌شوند، ولی همراهی آن‌ها با تغییرات کاربری، شرایط را به‌شدت بحرانی می‌سازد.

الگوی مکانی افت IC:

براساس نتایج جدول (۶) بیشترین کاهش شاخص IC در نواحی رخ داده که:

- دارای شیب تند و پوشش گیاهی ضعیف بوده‌اند، در معرض توسعه بی‌رویه کشاورزی دیم یا اراضی بایر قرار داشته‌اند، و هیچ‌گونه مدیریت حفاظتی یا احیای پوشش گیاهی در آن‌ها اعمال نشده است.

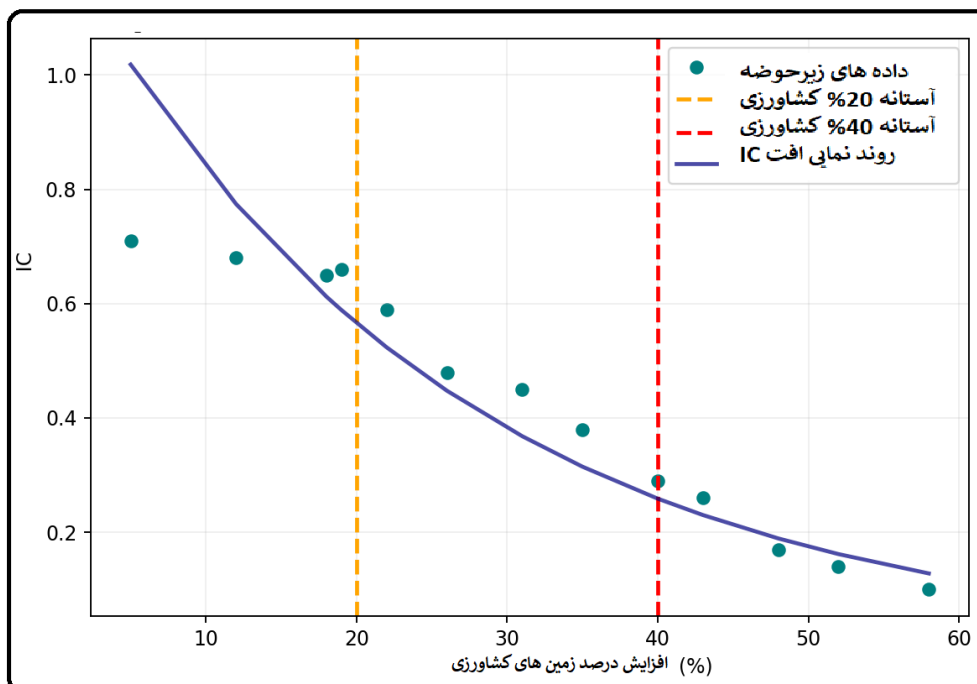
جدول ۶: درصد افت IC در کاربری‌ها و اشکال زمین بر حسب الگوی ترکیبی

کاربری	کاهش بارش و افزایش دما	تغییرات کاربری	هر دو (همزمان)	درصد افت میانگین IC
دامنه‌های شیب‌دار	×	✓	✓	۴۵٪
اراضی بایر	×	✓	✓	۳۹٪
مراعات متوسط	✓	×	×	۲۹٪
پایاب رودخانه	✓	✓	✓	۵۳٪

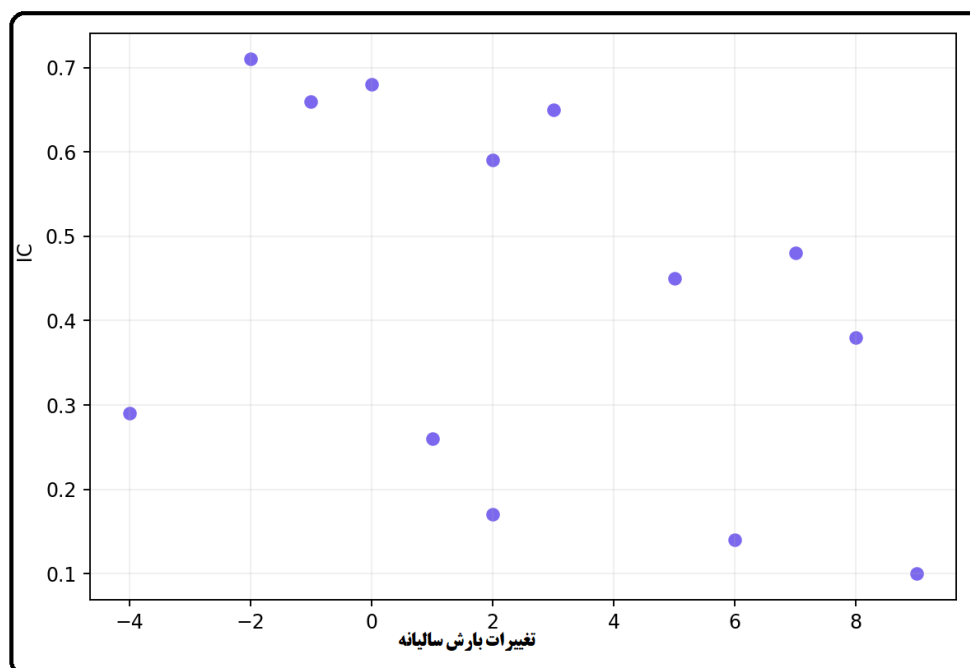
جدول ۸: داده‌های نمونه برای تحلیل همبستگی شاخص IC

زیرحوضه	تغییر شاخص IC	کاهش بارندگی (%)	افزایش اراضی کشاورزی (%)	مدیریت حفاظتی
A	-۰/۱۲	۵	۱۵	دارد
B	-۰/۲۰	۸	۲۰	ندارد
C	-۰/۳۵	۱۰	۳۵	ندارد
D	-۰/۴۲	۱۲	۴۰	ندارد
E	-۰/۰۸	۳	۱۰	دارد
F	-۰/۲۸	۷	۲۵	ندارد
G	-۰/۴۸	۱۳	۴۵	ندارد
H	-۰/۵۳	۱۵	۵۰	ندارد

پراکنش شاخص IC در مقابل درصد تغییر اراضی کشاورزی نشان می‌دهد که با عبور از آستانه حدود ۲۰٪ افزایش در زمین‌های کشاورزی، افت قابل‌توجهی در IC آغاز می‌شود و این افت در مقادیر بالای ۴۰٪ توسعه کشاورزی، به‌صورت نمایی تشدید می‌شود. نمودار مشابه برای تغییرات بارش نشان می‌دهد که رابطه آن با IC به‌صورت غیرخطی ضعیف‌تر و پراکندگی بالا است؛ که مؤید نتایج آماری در ترجیح اثر LULC است.



شکل ۹: نمودار پراکنش IC بر حسب درصد تغییر اراضی کشاورزی



شکل ۱۰: نمودار پراکنش IC و تغییرات بارش

بحث

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که یافته‌های حاضر هم‌راستا با نتایج عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) در شهرستان گیوی است؛ به طوری که هر دو مطالعه تغییر کاربری اراضی، به ویژه تبدیل مراتع و جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی و سکونتگاه‌ها در مناطق شیب‌دار را به عنوان مهم‌ترین عامل تشدیدکننده ناپایداری‌های ژئومورفیک معرفی

می‌کنند. در مطالعه زرینه‌رود نیز همانند گیوی، فشارهای انسانی و تغییرات کاربری اثر قوی‌تری نسبت به تغییرات اقلیمی بر افت شاخص‌های پایداری (اعم از IC یا فرسایش خاک) داشته است. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش با یافته‌های حنیف‌لو و همکاران (۱۴۰۲) در محدوده هشتگرد نیز قابل مقایسه است؛ هرچند در مطالعه حاضر اثر اقلیم نسبت به تغییر کاربری ضعیف‌تر و پراکنده‌تر بوده، اما همانند مطالعه مذکور، ترکیب عوامل انسانی و اقلیمی اثرات هم‌افزایانه‌ای بر افت شاخص‌های محیطی داشته و در بسیاری از زیرحوضه‌ها باعث تشدید ناپایداری‌ها شده است. در مجموع، می‌توان گفت که هر سه مطالعه بر نقش کلیدی مدیریت کاربری اراضی، به‌ویژه در مناطق شیب‌دار و تحت فشار توسعه کشاورزی، تأکید داشته و نتایج حاضر با ارائه آستانه‌های کمی (۲۰ تا ۴۰ درصد تغییر کاربری) علاوه بر تأیید یافته‌های قبلی، بُعد کاربردی تازه‌ای را برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع طبیعی در حوضه زرینه‌رود فراهم آورده است.

نتیجه‌گیری

با بررسی جامع نتایج آماری، نمودارها و الگوهای مکانی ارائه شده در این مطالعه، می‌توان به نکات کلیدی زیر در خصوص ارتباط شاخص اتصال رسوب (IC) با عوامل کاربری زمین (LULC) و اقلیمی در حوضه آبریز زرینه‌رود دست یافت: عامل مسلط افت پیوستگی ژئومورفیک، تغییر در کاربری اراضی است. جداول ضرایب رگرسیونی و سهم نسبی عوامل به وضوح نشان می‌دهند که تغییرات انسان‌ساخت در سیمای سرزمین، مانند گسترش زمین‌های کشاورزی، توسعه سکونتگاه‌ها و کاهش پوشش مرتعی، تأثیر به‌مراتب قوی‌تری بر افت IC نسبت به تغییرات اقلیمی همچون کاهش بارش یا افزایش دما دارد. ضرایب رگرسیونی و همبستگی مربوط به عوامل کاربری زمین به طور معناداری بزرگتر و معنادارتر از عوامل اقلیمی هستند. ترکیب LULC و اقلیم در بیش از ۶۰٪ زیرحوضه‌ها، اثر تشدیدکننده بر افت IC داشته است. جداول تفکیکی بر اساس الگوهای مکانی نشان می‌دهند که در بسیاری از مناطق حوضه، اثرات منفی ناشی از تغییرات کاربری زمین با تأثیرات (هرچند ضعیف‌تر) عوامل اقلیمی همراه شده و منجر به افت ترکیبی و تشدید شده در IC می‌گردد. به ویژه در نواحی پایاب رودخانه، این اثر ترکیبی بیشترین میزان افت IC را رقم زده است.

الگوهای مکانی نشانگر تمرکز بیشترین افت IC در مناطق شیب‌دار بدون مدیریت و اراضی کشاورزی توسعه‌یافته است. نقشه الگوی مکانی و همچنین جدول درصد افت IC به تفکیک گروه‌های زیرحوضه، گویای این مطلب هستند که بیشترین میزان گسستگی در مسیرهای انتقال رسوب در مناطقی مشاهده می‌شود که یا دستکاری انسانی شدیدتری را تجربه کرده‌اند (مانند اراضی کشاورزی) یا فاقد مدیریت مناسب برای مقابله با اثرات تخریبی عوامل مختلف هستند (مانند دامنه‌های شیب‌دار). این مناطق نیازمند توجه ویژه در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی برای حفظ یا احیاء فرآیندهای طبیعی حوضه می‌باشند. «با عبور از آستانه‌ی ۲۰٪ افزایش در اراضی کشاورزی، افت IC محسوس می‌شود و در بالای ۴۰٪، این افت به صورت نمایی شدت می‌گیرد. این در حالی است که رابطه بین کاهش بارندگی و افت IC پراکندگی بیشتری دارد و روند مشخصی از آن استنباط نمی‌شود. این موضوع تأیید می‌کند که تغییرات LULC (خصوصاً گسترش کشاورزی) عامل غالب در کاهش اتصال ژئومورفیک رسوب در حوضه زرینه‌رود است.»

این یافته‌ها بر اهمیت اولویت‌دهی به راهکارهای مدیریتی متمرکز بر کنترل و بهینه‌سازی کاربری اراضی در حوضه آبریز زرینه‌رود تأکید دارند. همچنین، توجه به اثرات هم‌افزایی عوامل انسانی و اقلیمی در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت ضروری است.

منابع

- ابراهیمی، ل.، ایلاتلو، م.، و حمید، ز. (۱۴۰۳). تغییرات مورفولوژیکی در دشت آبرفتی و جلگه ساحلی (نمونه موردی: رودخانه بهمنشیر). *مجله ژئومورفولوژی کمی*، ۱۳(۴)، ۸۲-۹۴.
- حنیفه‌لو، ا.، حسینی، ع.، جوادی، س.، و شرافتی، ا. (۱۴۰۲). پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمین بر تغییرات مکانی و زمانی تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل توزیعی WetSpa-M (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی هشتگرد، ایران). *نشریه علمی-پژوهشی مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳(۱)، ۴۳-۶۲.
- زین‌الدینی، م.، و صمدی، ح. (۱۴۰۰). تحلیل پیوستگی ژئومورفیک با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در حوضه کاشان. *مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۱۹(۱)، ۵۵-۷۰.
- رضایی، س.، و محمدی، ب. (۱۳۹۸). تحلیل اثر تغییرات کاربری زمین بر شاخص‌های پیوستگی ژئومورفیک در حوضه قره‌سو. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۰(۴)، ۸۳-۹۸.
- دارابی شاهماری، س.، قنواتی، ع.، احمدآبادی، ع.، و افتخاری، م. (۱۴۰۲). بررسی حساسیت ژئومورفیک رودخانه طالقان با تاکید بر نقش پوشش گیاهان حاشیه‌ای. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۲(۱)، ۲۰۵-۲۲۳.
- عابدینی، م.، پیروزی، ا.، و فعال‌نذیری، م. (۱۴۰۲). بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش خاک شهرستان گیوی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره MABAC و تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده‌های TM-OLI). *نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۲(۴)، ۱-۲۶.
- عبدالملکی، ع.، و کریمی، پ. (۱۴۰۴). ارزیابی کیفیت هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه ویهچ در محدوده شهری قره با استفاده از شاخص IHG. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۴(۱)، ۱-۱۵.
- عطایی، م.، و جلالی، ع. (۱۴۰۱). بررسی اثر تغییر اقلیم بر پیوستگی ژئومورفیک حوضه آبخیز دریاچه ارومیه. *فصلنامه علوم زمین*، ۵۴(۲)، ۱۱۱-۱۲۶.
- غلامی، ف.، و نصیری، م. (۱۳۹۷). استفاده از شاخص پیوستگی برای ارزیابی مسیر انتقال رسوب در حوضه‌های خشک جنوب ایران. *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی محیط طبیعی*، ۹(۲)، ۴۵-۶۲.
- منصور، ب.، احمدزاده، ح.، مساح‌بوانی، ع.، مرید، س.، دلاور، م.، و لطفی، س. (۱۳۹۳). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه زربنده رود. *نشریه آب و خاک*، ۲۸(۶)، ۱۱۹۱-۱۲۰۳.
- ناصری، ع.، و همکاران. (۱۳۹۹). ارزیابی ساختار پیوستگی رسوبی با استفاده از داده‌های SRTM در حوضه کشکان. *مجله جغرافیایی زاگرس*، ۲۶(۲)، ۳۳-۵۰.
- Amini, J., Ebrahimi, S., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2020). Land use/land cover change detection and prediction using remote sensing and CA-Markov modeling in the Lake Urmia basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, *79*(19), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09123-4>
- Bazrafshan, O., Zeinivand, H., & Fallah, A. (2023). Impact of land use and climate change on hydrological processes in a semi-arid basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *46*, 101331. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101331>
- Bracken, L. J., Turnbull, L., Wainwright, J., & Bogaart, P. (2013). Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, *38*(11), 1323-1334. <https://doi.org/10.1002/esp.3399>
- Brazier, R. E. (2022). Understanding dryland connectivity: Linking hydrology, geomorphology and land management. *Progress in Physical Geography*, *46*(4), 371-388. <https://doi.org/10.1177/03091333211065192>

- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, *188*, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.028>
- Crema, S., & Cavalli, M. (2018). Sediment connectivity assessment in the design of measures for hydrogeological risk mitigation. *Science of the Total Environment*, *615*, 1247–1256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.318>
- Fryirs, K. A. (2013). (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, *38*(1), 30–46. <https://doi.org/10.1002/esp.3287>
- Goudie, A. (2018). *Human impact on the natural environment*. John Wiley & Sons.
- Goudie, A. S. (2018). *Human impact on the natural environment: Past, present and future* (8th ed.). Wiley-Blackwell.
- Heckmann, T., & Schwanghart, W. (2013). Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment—Exploring sediment cascades using graph theory. *Geomorphology*, *182*, 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.021>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Marchamalo, M., Crema, S., Cavalli, M., & Tarolli, P. (2022). Land use and climate change impacts on sediment connectivity and source-to-sink dynamics in Mediterranean basins. *Journal of Environmental Management*, *309*, 114657. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114657>
- Zorn, M., Komac, B., & Kavcic, A. (2018). Impact of land use changes on sediment connectivity in a small alpine catchment. *CATENA*, *160*, 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.011>