Prioritizing Sirvan Sub-Watersheds Based on the Concept of Sediment Connectivity

Abstract

This study aims to map the Index of Connectivity (IC) and provide a streamlined approach for prioritizing sub-watersheds in the Sirvan watershed, Kurdistan Province, regarding sediment connectivity and transfer potential. The IC index was derived using a 30-meter resolution Digital Elevation Model (DEM). Model validation against the Field-based Index of Connectivity (FIC) across 50 sample points yielded a coefficient of determination of R^2=0.78, confirming satisfactory model accuracy. The IC values across the entire basin ranged from −7.33 to 2.67, indicating a heterogeneous spatial distribution of sediment connectivity. Among the 120 sub-watersheds, the Zrvaran sub-watershed (SW120) exhibited the highest IC value and was classified under the very high priority category. Furthermore, 11 sub-watersheds—namely Bisaran (SW16), Dle-marz2 (SW32), Gavaz (SW42), Goshkhani (SW54), Lavisan (SW70), Mehrab (SW75), Mianeh (SW76), Neshour (SW82), Noureh (SW85), Park-abkhiz (SW89), and Tawriwar (SW114)—were placed in the high priority class. These 12 sub-watersheds demonstrate a high potential for sediment transfer to downstream areas and are thus introduced as primary targets for implementing conservation measures (such as exclosures, biomechanical operations, and watershed management structures). The application of the IC index provides a powerful tool for objectively identifying critical source areas at the watershed scale. Such connectivity-based prioritization enables the concentration of watershed interventions in high-efficiency locations, optimal resource allocation, and the achievement of comprehensive and sustainable management.

Keywords: *Geographic Information System (GIS), Prioritization, Sirvan Watershed, Sediment Connectivity, Sediment Connectivity Index (IC)*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil erosion and sediment transfer are recognized as critical environmental challenges worldwide, with particularly severe implications in semi-arid regions such as Iran, where annual soil loss is estimated at approximately 900 million tons. These processes not only degrade soil fertility and agricultural productivity on-site but also generate extensive off-site damages, including reservoir sedimentation, water quality deterioration, river morphology alteration, and infrastructure destruction. Traditional watershed prioritization approaches have predominantly concentrated on estimating sediment production potential using various models and analytical techniques, including morphometric analysis, regression models, game theory, and physical models such as RUSLE. However, these methods have largely neglected the essential concept of sediment connectivity, which refers to the physical linkage between sediment sources and sinks within a watershed system. Sediment connectivity determines the efficiency with which detached soil particles are transferred from hillslopes and upland areas through the drainage network to the watershed outlet. A sub-watershed characterized by high connectivity, even with moderate erosion rates, can contribute disproportionately to the total sediment yield, whereas a sub-watershed with low connectivity may retain most of its eroded material locally despite high erosion rates. This knowledge gap has resulted in inefficient allocation of limited financial and technical resources and suboptimal watershed management interventions, where decisions are frequently based on expert judgment rather than objective, quantifiable criteria.

The Sirvan watershed, covering an area of 7350 square kilometers in Kurdistan Province of western Iran, was selected as the study area. This watershed exhibits complex topography with elevations ranging from 752 to 3110 meters above sea level and is characterized by steep slopes dominating the landscape. The climate is temperate to semi-humid, with annual precipitation

varying from 300 millimeters in lower valleys to over 800 mm in highland areas. The geological formations in this region are highly susceptible to erosion, and land use changes—including deforestation, overgrazing, and conversion of rangelands to rainfed agriculture—have intensified soil loss and sediment delivery to downstream reservoirs. The drainage network follows a dendritic pattern, and surface runoff converges from northern, western, eastern, and southeastern areas toward the main outlet in the southwest. The watershed is divided into 120 sub-watersheds for detailed analysis. These factors collectively make the Sirvan watershed an ideal case study for applying the concept of sediment connectivity to prioritize sub-watersheds for targeted management interventions.

Objectives

The primary objectives of this study were: first, to map the spatial pattern of the Sediment Connectivity Index across the entire watershed at readily available spatial resolution (30m); second, to validate the modeled index using field-based measurements, specifically the Field Index of Connectivity, at multiple sampling points across the watershed; and third, to prioritize the 120 sub-watersheds based on their mean connectivity values, thereby identifying critical areas that require immediate soil and water conservation measures. By addressing these objectives, the study aims to provide a scientific, evidence-based framework for optimizing the allocation of financial and technical resources in watershed management, moving beyond subjective expert judgment toward objective, spatially explicit prioritization.

Method

This study adopted a postpositivist, quantitative approach with a descriptive-analytical research design, integrating spatial analysis, field validation, and geographic information system analysis. The methodological framework comprised four sequential phases: data acquisition, index calculation, field validation, and sub-watershed prioritization.

A 30-meter resolution Digital Elevation Model (SRTM DEM) was utilized. The DEM serves as a critical spatial data layer representing terrain surface topography. At the watershed scale, hydrological regimes, drainage network structures, and erosion-sedimentation processes are significantly influenced by topographic variations. Although higher-resolution DEMs are available, this study aims to employ a readily available DEM for experts and practitioners, thereby developing a straightforward and efficient framework for monitoring sediment connectivity patterns and ultimately prioritizing sub-watersheds. The Digital Elevation Model was used to generate the slope map and the terrain roughness index.

The Sediment Connectivity Index was calculated for each pixel of the watershed following the established framework proposed by Borselli et al (2008). This index integrates both upstream and downstream components. The upstream component represents the potential for sediment production and transport from upstream areas and is derived from the average roughness weighting factor, the average slope, and the upstream contributing area. The downstream component represents the potential for sediment transport toward the watershed outlet and is calculated based on the flow path length, the roughness weighting factor along the path, and the slope along the path. The Roughness Index, which serves as the basis for calculating the weighting factor, was computed using SAGA-GIS software based on the standard deviation of elevation within a moving

window. The weighting factor was then derived from the Roughness Index to ensure values between zero and one, where values near zero indicate minimum roughness and low resistance to sediment movement, while values near one indicate maximum roughness and high resistance. The SedInConnect software was used to produce sediment connectivity map.

To assess the accuracy and reliability of the modeled connectivity index, a comprehensive field validation campaign was conducted. The Field Index of Connectivity (FIC) was measured at 50 randomly distributed sampling points across the watershed. The random distribution ensured spatial representation of different geomorphic conditions, including various slope gradients, land uses, and distances from the drainage network. At each sampling point, field observers scored multiple components of upstream and downstream connectivity—including surface roughness, vegetation cover, presence of barriers such as roads and terraces, slope angle, and evidence of active erosion or deposition—using standardized protocols. The FIC was then calculated by combining the upstream and downstream scores according to the original formulation. The coefficient of determination between the modeled connectivity values extracted at the 50 field points and the corresponding field measurements was computed as the primary validation metric.

The Sirvan watershed was divided into 120 sub-watersheds using standard hydrological delineation procedures based on the Digital Elevation Model. Using Zonal Statistics tools in ArcGIS 10.5, the mean connectivity index value was extracted for each sub-watershed. The sub-watersheds were then ranked based on their mean values and classified into five priority classes: Very Low, Low, Medium, High, and Very High. This classification scheme, using the natural breaks method, ensures that sub-watersheds with the highest mean connectivity values—indicating the greatest sediment connectivity and, consequently, the highest potential for delivering sediment to the watershed outlet—are identified as top priorities for conservation interventions.

Results

The computed Sediment Connectivity Index across the Sirvan watershed exhibited a range of variation from -7.33 to 2.67, with a mean value of -3.21 and a standard deviation of 1.89. The predominantly negative values indicate that the watershed is generally characterized by moderate to low sediment connectivity, with localized areas of high connectivity. To validate the model, the Index of Connectivity (IC) results were compared against the Field-based Index of Connectivity (FIC) across 50 sampling locations, yielding a coefficient of determination of R^2=0.78 that confirms acceptable accuracy. Out of 120 evaluated sub-watersheds, Zrvaran (SW120) recorded the highest IC score, placing it in the very-high-priority tier. Furthermore, 11 sub-watersheds—namely Bisaran (SW16), Dle-marz No. 2 (SW32), Gavaz (SW42), Goshkhani (SW54), Lavisan (SW70), Mehrab (SW75), Mianeh (SW76), Neshour (SW82), Noureh (SW85), Park-abkhiz (SW89), and Tawriwar (SW114)—fell into the high-priority group. Because these 12 sub-watersheds exhibit a strong capacity for downstream sediment transport, they are designated as primary candidates for targeted conservation practices, including exclosures, biomechanical measures, and structural interventions. Ultimately, the IC approach offers a robust framework for the objective identification of critical source areas at the basin scale. This connectivity-driven prioritization facilitates the precise placement of management actions, optimizes resource distribution, and supports comprehensive, long-term sustainability.

Conclusion

This study successfully demonstrated that the Sediment Connectivity Index is a robust, reliable, and practical tool for objective identification of critical areas and sub-watershed prioritization at a large scale. The high resolution of the digital elevation model and the comprehensive field validation with multiple sampling points provide strong empirical support for the applicability of this index in complex, topographically heterogeneous watersheds typical of semi-arid mountainous regions. The high-priority sub-watersheds identified in this study—Zrvaran (SW120) and the eleven additional sub-watersheds—due to their steep slopes, poor vegetation cover, and strategic position along main drainage lines, disproportionately contribute to sediment delivery at the watershed outlet even with moderate erosion rates. These areas should receive immediate and concentrated watershed management interventions, including bio-mechanical operations such as contour trenching and gully plugging, construction of check dams and sediment retention structures, vegetation management through reforestation and controlled grazing, and terracing on cultivated slopes. The validated priority map enables evidence-based allocation of limited financial and technical resources, reducing costs and increasing the efficiency of soil conservation programs. The practical significance of this research extends beyond the Sirvan watershed. The methodological framework can be replicated in other watersheds across Iran and other semi-arid regions with similar environmental conditions, providing a standardized, scientifically defensible protocol for watershed prioritization. The results offer a clear and direct response to the practical need expressed by executive agencies for objective criteria to guide conservation investments. For future research, the integration of sediment source fingerprinting techniques with connectivity indices is recommended. This combined approach would enable identification not only of transport pathways but also of precise sediment sources, thereby enabling even more targeted and effective interventions. Furthermore, the development of a spatial Decision Support System that overlays the connectivity-based priority map with socio-economic data would provide a powerful operational tool for managers, allowing scenario simulation, cost-benefit analysis, and multi-criteria decision-making, ultimately paving the way for truly integrated and sustainable watershed management in the Sirvan watershed and similar regions.



اولویت‌بندی زیرحوزه‌های آبخیز سیروان بر اساس مفهوم پیوستگی رسوب

چکیده

هدف این پژوهش، تهیه نقشه شاخص پیوستگی رسوب (IC) و ارائه یک روش آسان برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز سیروان در استان کردستان از نظر پتانسیل انتقال رسوب است. شاخص IC با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر محاسبه شد. اعتبارسنجی با شاخص میدانی پیوستگی (FIC) در ۵۰ نقطه نمونه، ضریب تعیین R^2=۰/۷۸ را نشان داد که دقت قابل‌قبول مدل را تأیید می‌کند. مقادیر IC در کل حوضه از ۷/۳۳- تا ۲/۶۷ متغیر بود که نشان‌دهنده توزیع مکانی ناهمگون پیوستگی رسوب است. از میان ۱۲۰ زیرحوضه، زیرحوضه زرواران (SW120) با بالاترین مقدار IC در کلاس اولویت بسیار زیاد و ۱۱ زیرحوضه شامل بیساران (SW16)، دل‌مرز شماره ۲ (SW32)، گاواز (SW42)، گوشخانی (SW54)، لاویسان (SW70)، مهراب (SW75)، میانه (SW76)، نشور (SW82)، نوره (SW85)، پارک آبخیز (SW89)، تاوریوار (SW114) در کلاس اولویت زیاد قرار گرفتند. این ۱۲ زیرحوضه درای پتانسیل انتقال رسوب به پایین‌دست بوده و به‌عنوان اولویت‌های اولیه برای اجرای اقدامات حفاظتی (قرق، عملیات بیومکانیکی و سازه‌های آبخیزداری) معرفی شدند. کاربرد شاخص IC ابزاری قدرتمند برای شناسایی عینی مناطق بحرانی در مقیاس حوضه فراهم می‌کند و اولویت‌بندی مبتنی بر آن، تمرکز عملیات آبخیزداری در نقاط کارآمد، تخصیص بهینه منابع و دستیابی به مدیریت جامع و پایدار را ممکن می‌سازد.

واژگان کلیدی: اولویت‌بندی، آبخیز سیروان، پیوستگی رسوب، سامانه اطلاعات جغرافیایی(GIS)، شاخص پیوستگی رسوب(IC)

مقدمه

فرآیند فرسایش خاک و تولید رسوب به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی محیطزیستی در سطح جهانی، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی، آب و انرژی به‌شمار می‌رود. این پدیده که تحت تأثیر ترکیبی از تغییرات کاربری اراضی، فعالیت‌های کشاورزی نامناسب و بارش‌های شدید رخ می‌دهد، نه‌تنها منجر به تخریب و کاهش حاصلخیزی خاک‌های سطحی می‌شود، بلکه پیامدهای ثانویه‌ای همچون کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن، آلودگی منابع آب سطحی، تغییر مورفولوژی رودخانه‌ها و تخریب تأسیسات زیربنایی را در پی دارد (Asres et al., 2025). در ایران نیز با توجه به شرایط اقلیمی نیمه‌خشک و وضعیت زمین‌شناسی حساس، میزان فرسایش سالانه نزدیک به ۹۰۰ میلیون تن برآورد شده که بیانگر وضعیت بحرانی و لزوم توجه ویژه به این مقوله است (عرب‌خدری، ۱۴۰۰).

شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر پتانسیل تولید و انتقال رسوب، به‌عنوان سنگ‌بنای مدیریت یکپارچه و اجرای عملیات آبخیزداری هدفمند مطرح می‌شود. با توجه به وسعت زیاد حوزه‌های آبخیز و محدودیت‌های اقتصادی و اجرایی، انجام اقدامات مدیریتی در تمامی زیرحوضه‌ها نه‌تنها امکان‌پذیر نیست، بلکه ممکن است با تخصیص نادرست منابع، کارایی لازم را نیز نداشته باشد. بنابراین، تصمیم‌گیرندگان نیازمند ابزارها و روش‌های علمی هستند تا بتوانند سرمایه‌گذاری‌ها را به‌صورت بهینه به زیرحوضه‌های حیاتی و بحرانی تخصیص دهند. در همین راستا، مطالعات متعددی در داخل و خارج از کشور با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله تحلیل‌های مورفومتریک (Malik et al., 2019)، مدل‌های رگرسیونی (عرب‌عامری و همکاران، ۱۳۹۸)، تئوری بازی‌ها (Adhami & Sadeghi, 2016) و مدل‌های فیزیکی مانند RUSLE (Negash et al., 2021) به اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها پرداخته‌اند. همچنین، اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در مطالعات دیگر (Najafi et al., 2021; Naoui et al., 2025;) نیز مورد تأکید قرار گرفته است. اگرچه این مطالعات دستاوردهای ارزشمندی داشته‌اند، اما اغلب بر برآورد میزان تولید رسوب متمرکز بوده و کمتر به عامل کلیدی انتقال و پیوستگی رسوب از مبدأ تا خروجی حوضه توجه کرده‌اند. این شکاف دانشی منجر به آن شده است که در عمل، دستگاه‌های اجرایی فاقد یک

دستورالعمل علمی مشخص برای مکان‌یابی اقدامات باشند و صرفاً بر اساس نظر کارشناسی عمل کنند که خود می‌تواند موجب هدررفت منابع گردد.

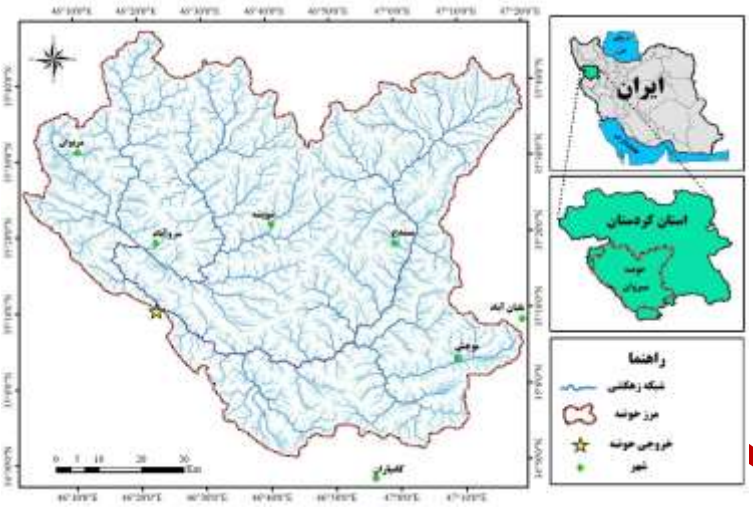
مفهوم نوظهور پیوستگی رسوب[1] در سال‌های اخیر به‌عنوان چارچوبی قدرتمند برای درک یکپارچه فرآیندهای انتقال رسوب مطرح شده است (Shi et al., 2025). این مفهوم به درجه اتصال فیزیکی بین منابع تولید رسوب (مانند دامنه‌ها) و چاهک‌های رسوب (مانند آبراهه‌ها و مخازن) اشاره دارد و سهولت انتقال رسوب را در سراسر سامانه حوزه آبخیز تعیین می‌کند. مطالعات متعددی در جهان به برآورد شاخص پیوستگی رسوب پرداخته‌اند. در ایران نیز در برخی از مطالعات از شاخص پیوستگی رسوب استفاده شده است (نجفی و همکاران، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷؛ صادقی و همکاران، ۱۴۰۴؛ عنایتی و همکاران، ۱۴۰۵). در مطالعه Rahmati et al. (2023) از شاخص پیوستگی رسوب برای ارزیابی اثربخشی بانکت‌بندی دامنه‌ها در حوضه خامسان استان کردستان استفاده شد. همچنین، Wu et al. (2026) برای پایش تغییرات زمانی–مکانی تولید رسوب در حوضه‌های وسیع از شاخص پیوستگی رسوب استفاده نمودند. حتی در مقیاس پلات نیز از این شاخص استفاده شده است. به عنوان مثال، Gerami et al. (2026) تغییرات مکانی الگوی شار رسوب خاک‌های لخت را با استفاده از شاخص پیوستگی رسوب بررسی نمودند. از شاخص پیوستگی رسوب نیز برای ارزیابی اثر تغییرات اقلیمی و پوشش گیاهی بر الگوی شار رسوب حوزه آبخیز نیز استفاده شده است. همچنین اثر تراس‌ها و سازه‌های آبخیزداری بر تغییرات شار رسوب با استفاده از شاخص پیوستگی رسوب مورد بررسی قرار گرفته است (Pan et al., 2026). بنابراین، شاخص پیوستگی رسوب قابلیت مناسبی برای ارزیابی اثرات عملیات مدیریتی و حفاظتی بر الگوی شار رسوب حوزه آبخیز دارد. این شاخص به ندرت برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز در جهان بکار برده شده است (Feng et al., 2026). بنابراین، ارزیابی کاربرد این مفهوم برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز نیازمند پژوهش‌های دقیق در شرایط محیطی مختلف است. نوآوری اصلی این تحقیق، کاربست عملیاتی این شاخص برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز است تا کارشناسان بتوانند به آسانی از این روش استفاده نمایند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز سیروان با وسعت ۷۳۵۰ کیلومتر مربع، به‌عنوان یک واحد هیدرولوژیکی و اکولوژیکی مهم، در جنوب غربی استان کردستان ایران و بین طول‌های جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳ دقیقه و ۴۷ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۵۰ دقیقه و ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه متشکل از ۱۲۰ زیرحوضه است و از توپوگرافی پیچیده‌ای با تغییرات ارتفاعی قابل توجه برخوردار است؛ به‌طوری که حداقل ارتفاع آن ۷۵۲ متر و حداکثر آن به ۳۱۱۰ متر می‌رسد. از نظر زمین‌شناسی این حوضه در زون زاگرس مرتفع قرار دارد. شیب‌های تند عمدتاً بر این حوزه حاکم هستند و مناطق مسطح عمدتاً به صورت دشت‌های بین‌کوهی پراکنده شده‌اند. اگرچه آب و هوای منطقه معتدل و مرطوب است، زمستان‌ها معمولاً همراه با برف و یخبندان همراه است. میزان بارندگی سالانه از حدود ۳۰۰ میلی‌متر در دره‌های پایین‌دست تا بیش از ۸۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات متغیر است. مقدار میانگین بارش سالانه حدود ۶۳۰ میلی‌متر گزارش شده است (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). بافت خاک در منطقه عمدتاً سنگین تا متوسط سنگین است و به سه نوع اصلی رسی، رسی لومی و لومی طبقه‌بندی می‌شود. شبکه زهکشی حوضه از الگوی شاخه‌درختی تبعیت می‌کند و رواناب سطحی از نواحی شمالی، غربی، شرقی و جنوب شرقی به سمت خروجی اصلی در جنوب غربی همگرا می‌شود. شاخه‌های اصلی رودخانه سیروان شامل رودخانه‌های گاوه‌رود و قشلاق هستند.

[1] Sediment Connectivity

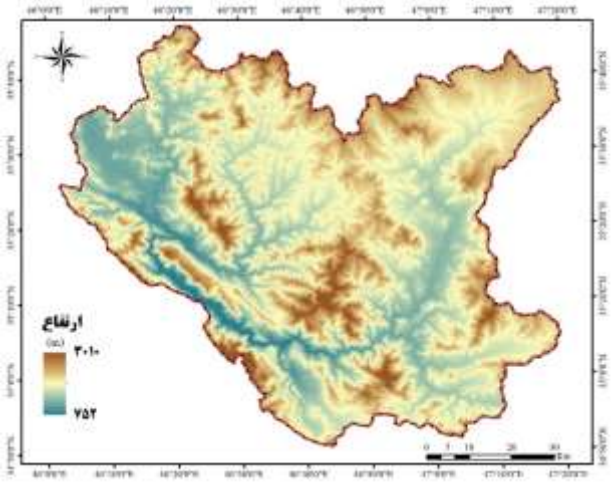


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی زیرحوضه‌های آبخیز سیروان

جمع‌آوری و پردازش داده‌ها

زیرحوضه‌های آبخیز سیروان از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان دریافت شد. نام زیرحوضه‌ها مطابق نام‌های رسمی مطالعات اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان، در این پژوهش استفاده شده است. این موضوع باعث می‌شود که نتایج این پژوهش بتواند در مطالعات و برنامه‌ریزی‌های دستگاه‌های اجرایی نیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، با توجه به پیچیدگی فرآیند انتقال رسوب در مقیاس حوزه آبخیز و تأثیر عوامل متعدد محیطی بر آن، در این تحقیق از مجموعه‌ای جامع از داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی استفاده شد. لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به عنوان پایه اصلی تمامی تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، لایه ارتفاع به‌عنوان یکی از ورودی‌های اصلی برای محاسبه شاخص پیوستگی رسوب به‌کار رفته است، زیرا اختلاف ارتفاع بین نقاط مختلف زنجیره رسوبی (منبع، مسیر انتقال، منطقه نهشته‌گذاری) نقش کلیدی در تعیین تداوم یا گسستگی رسوب دارد. نقشه شیب آبخیز سیروان نواحی با شیب تند، متوسط و ملایم را در سطح حوضه مشخص می‌کند. شیب به عنوان نیروی محرکه اصلی حرکت رسوب، ارتباط مستقیمی با سرعت رواناب و قدرت حمل رسوب دارد. در محاسبه شاخص پیوستگی رسوب، شیب منطقه بر میزان اتصال بین واحدهای بالادست و پایین‌دست اثر می‌گذارد؛ به طوری که در مناطق پرشیب، احتمال پیوستگی رسوب بیشتر و در مناطق کم‌شیب، احتمال گسستگی و انباشت رسوب افزایش می‌یابد. شکل (۲) به‌ترتیب نقشه‌ی شیب و ارتفاع منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این الگوی ارتفاعی مستقیماً بر انرژی پتانسیل جریان، نوع فرسایش و میزان تولید رسوب تأثیر می‌گذارد.

ویراستاری نشده



شکل ۲. نقشه ارتفاع حوزه آبخیز سیروان

ویراستاری نشده

محاسبه شاخص پیوستگی رسوب (IC)

شاخص پیوستگی رسوب[2] برای هر پیکسل از حوزه بر اساس رابطه ارائه شده توسط Borselli et al. (2008) که همزمان خصوصیات بالادست (منبع) و پایین‌دست (مسیر انتقال) را در نظر می‌گیرد، محاسبه شد (رابطه ۱):

$$SCI = \log_{10}\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right) \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، D_{up} نشان‌دهنده پتانسیل تولید و انتقال رسوب از مناطق بالادست و D_{dn} نشان‌دهنده پتانسیل انتقال رسوب به سمت پایین‌دست است. مقادیر بالاتر IC نشان‌دهنده پیوستگی بیشتر و انتقال آسان‌تر رسوب از منبع به خروجی حوزه است.

مؤلفه بالاد ست (D_{up}): این مؤلفه طبق رابطه ۲ محا سبه می شود که در آن $\bar{W}$ میانگین وزنی عامل مقاومت در سطح بالاد ست، $\bar{S}$ میانگین شیب در سطح بالادست و A مساحت حوضه بالادست هر پیکسل است:

$$D_{up} = \bar{W}\bar{S}\sqrt{A} \quad \text{رابطه ۲}$$

مؤلفه پایین‌دست (D_{dn}): این مؤلفه که سهولت انتقال رسوب را از یک پیکسل مشخص به خروجی حوزه اندازه‌گیری می‌کند، بر اساس رابطه ۳ و با تلفیق عامل مقاومت (W) و شیب (S) در طول مسیر جریان (d) محاسبه شد (Heckmann et al., 2018):

$$D_{dn} = \sum \frac{d_i}{W_i S_i} \quad \text{رابطه ۳}$$

در حالت پایه، از شاخص ناهمواری (RI) به‌عنوان عامل وزنی (W) ا ستفاده می شود که بر ا ساس روابط ۴ و ۵ و در محیط نرم‌افزار SAGA-GIS محاسبه شد (Cavalli & Marchi, 2008):

$$W_{Cavalii} = 1 - \left(\frac{RI}{RI_{max}}\right) \quad \text{رابطه ۴}$$

[2] Sediment Connectivity Index

$$RI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25}(x_i - x_m)^2}{25}}$$ رابطه ۵)

تمامی محاسبات فوق در نرم افزار SedInConnect انجام شده و پس از معرفی نقشه مدل رقومی ارتفاعی و تعیین شاخص ناهمواری به عنوان عامل مقاومت، نقشه شاخص پیوستگی رسوب تولید شد. همانگونه که در رابطه ۵ نیز مشاهده می‌گردد، اندازه پنجره متحرک برای محاسبه شاخص ناهمواری ۵×۵ بوده و این موضوع پیش‌فرض نرم‌افزار است.

اعتبارسنجی و ارزیابی دقت

برای ارزیابی دقت شاخص پیوستگی رسوب، از شاخص میدانی پیوستگی[3](FIC) استفاده شد (Borselli et al., 2008). مطالعات متعددی از این روش برای اعتبارسنجی شاخص پیوستگی رسوب استفاده کرده‌اند (نجفی و همکاران، ۱۳۹۷). این روش مبتنی بر پایش میدانی و امتیازدهی به مولفه‌های بالادست (S_u) و پایین‌دست (S_d) نقاط موردنظر در حوضه موردمطالعه است. متغیرهای مؤثر بر مولفه بالادست (S_u) عبارتند از سطح مشارکت بالادست در تولید رواناب (A_u)، شواهد ترسیب رسوب در سطح مشارکت بالادست (B_u)، سطح خاک لخت (C_{u1})، وضعیت اراضی جنگلی، زراعی، چراگاه و مراتع (C_{u2}) و وضعیت پوشش گیاهی (W_u). سطح مشارکت بالادست در تولید رواناب (A_u) بر حسب هکتار بوده و این متغیر امتیازی بین صفر تا ۶۰ برای آن در نظر گرفته شده است. متغیر شواهد ترسیب رسوب در سطح مشارکت بالادست (B_u) براساس میزان شواهد امتیازی مابین صفر تا ۲۰ در نظر گرفته می‌شود. سطح خاک لخت (C_{u1}) با استفاده از میانگین زبری سطح بالادست نقطه مورد بررسی، محاسبه می‌شود. انحراف معیار ارتفاعات نرمال به سطح خاک (بر حسب سانتی‌متر) یا میزان زبری تصادفی[4](RR) در طول ترانسکت‌های سه متری محاسبه می‌گردد. اراضی جنگلی، زراعی، چراگاه و مراتع (C_{u2}) که این مشخصه به‌عنوان پوشش گیاهی در سطح زمین و به‌صورت مجموع میانگین درصد تاج‌پوشش و سطح پایه گیاه (بر حسب درصد) مورد محاسبه قرار می‌گیرد. متغیر وضعیت نسبت پوشش گیاهی (W_u) به عنوان یک نسبت کمی محاسبه شده و محدوده عددی آن بین صفر تا یک است. وضعیت نسبت پوشش گیاهی به‌صورت بخشی از سطح خاک که فاقد پوشش گیاهی است به بخشی از سطح خاک که دارای پوشش گیاهی است، تعریف می‌گردد. مولفه بالادست (S_u) مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$S_u = A_u + B_u + W_u C_{u1} + (1 - W_u) C_{u2}$$ رابطه ۶)

متغیرهای مؤثر بر مولفه پایین‌دست (S_d) نیز عبارتند از فاصله از مخزن رسوب محلی (A_d)، وضعیت نوارهای گیاهی سپری در انتهای مسیر انتقال رسوب (B_d)، علائم ترسیب رسوب در امتداد مسیر جریان به مخزن رسوب محلی (C_d)، سطح خاک لخت (D_{d1})، وضعیت اراضی جنگلی، زراعی، چراگاه و مراتع (D_{d2}) و وضعیت نسبت پوشش گیاهی (W_d). کلاس‌ها و امتیازهای هریک از متغیرهای مولفه بالادست در جدول (۱) ارائه شده است. پس از بازدید نقاط مختلف در پایش‌های میدانی، کلاس موردنظر برای هریک از متغیرها انتخاب شده و امتیاز مربوطه مطابق جدول (۱) درنظر گرفته شد.

جدول ۱. کلاس‌ها و امتیازهای متغیرهای مولفه بالادست در ارزیابی میدانی

متغیر	کلاس	امتیاز
سطح مشارکت بالادست در تولید رواناب (A_u)	کمتر از ۰/۱	۰
	۰/۱ تا ۰/۵	۱۵
	۰/۵ تا ۱	۳۰
	۱ تا ۲	۴۵

3 Field Index of Connectivity
4 Random Roughness

ویراستاری نشده

	بزرگتر از ۲	۶۰
شواهد ترسیب رسوب در سطح مشارکت بالادست (B_u)	رسوبگذاری شدید	۰
	شواهد واضح	۵
	قطع شواهد	۱۰
	کمینه شواهد	۱۵
	بدون شواهد	۲۰
سطح خاک لخت (C_{u1})	میزان زبری تصادفی بزرگتر از ۴	۰
	میزان زبری تصادفی ۲ تا ۴	۵
	میزان زبری تصادفی ۱ تا ۲	۱۰
	میزان زبری تصادفی ۱ تا ۰/۳	۱۵
	میزان زبری تصادفی کمتر از ۰/۳	۲۰
وضعیت اراضی جنگلی، زراعی، چراگاه و مراتع (C_{u2})	پوشش گیاهی ۸۰ تا ۱۰۰ درصد	۰
	پوشش گیاهی ۶۰ تا ۸۰ درصد	۵
	پوشش گیاهی ۴۰ تا ۶۰ درصد	۱۰
	پوشش گیاهی ۲۰ تا ۴۰ درصد	۱۵
	پوشش گیاهی کمتر از ۲۰ درصد	۲۰

از سویی دیگر، مولفه پایین‌دست (S_d) مطابق رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$S_d = A_d + B_d + C_d + W_d D_{d1} + (1 - W_d) D_{d2} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

فاصله از مخزن رسوب محلی (A_d) به متر، که بر حسب مقدار فاصله، امتیاز صفر تا ۴۰ به آن اختصاص داده می‌شود. درخصوص وضعیت نوارهای گیاهی سپری در انتهای مسیر انتقال رسوب (B_d)، براساس کشت ردیفی و میزان تراکم آن امتیاز صفر تا ۲۰ به آن اختصاص داده می‌شود. همچنین، علائم ترسیب رسوب در امتداد مسیر جریان به مخزن رسوب محلی (C_d) براساس میزان شواهد از کلاس شدید تا کلاس عدم وجود شواهد مربوط به ترسیب رسوب، امتیازی مابین صفر تا ۲۰ در نظر گرفته می‌شود. سطح خاک لخت (D_{d1}) که با استفاده از میانگین زبری سطح بالادست مورد بررسی، محاسبه می‌شود. این متغیر براساس میزان زبری تصادفی (RR) در طول ترانسکت‌های سه متری محاسبه می‌شود. وضعیت اراضی جنگلی، زراعی، چراگاه و مراتع (D_{d2}) که این مشخصه به‌عنوان پوشش گیاهی در سطح زمین و به‌صورت مجموع میانگین درصد تاج‌پوشش و سطح پایه گیاه (بر حسب درصد) مورد محاسبه قرار می‌گیرد. وضعیت نسبت پوشش گیاهی (W_d) که عبارت است از بخشی از سطح خاک که فاقد پوشش گیاهی به بخشی از سطح خاک که دارای پوشش گیاهی است. کلاس‌ها و امتیازهای هریک از متغیرهای مولفه پایین‌دست در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. کلاس‌ها و امتیازهای متغیرهای مولفه پایین‌دست در ارزیابی میدانی

متغیر	کلاس	امتیاز
فاصله از مخزن رسوب محلی (A_d)	بزرگتر از ۱۰۰ متر	۰
	۵۰ تا ۱۰۰ متر	۱۰
	۱۰ تا ۵۰ متر	۲۰
	۵ تا ۱۰ متر	۳۰
	کمتر از ۵ متر	۴۰
وضعیت نوارهای گیاهی سپری در انتهای مسیر انتقال رسوب (B_d)	عرض کاشت نواری بیش از ۴ متر و متراکم	۰
	ردیف‌های گیاهی پیوسته و انبوه	۵
	کشت ردیفی گسسته و پراکنده	۱۰
	شواهد کم از وجود کشت ردیفی	۱۵

ویراستاری نشده

	عدم وجود نوارهای گیاهی	۲۰
علائم ترسیب رسوب در امتداد مسیر جریان به مخزن رسوب محلی (C_d)	ترسیب رسوب زیاد	۰
	شواهد مشخص و زیاد ترسیب رسوب	۵
	شواهد گسسته اما قابل توجه از ترسیب رسوب	۱۰
	نشانه‌های کم از ترسیب رسوب	۱۵
	نبود شواهد ترسیب رسوب	۲۰
سطح خاک لخت (D_{d1})	میزان زبری تصادفی بزرگتر از ۴	۰
	میزان زبری تصادفی ۲ تا ۴	۵
	میزان زبری تصادفی ۱ تا ۲	۱۰
	میزان زبری تصادفی ۱ تا ۰/۳	۱۵
	میزان زبری تصادفی کمتر از ۰/۳	۲۰
وضعیت اراضی جنگلی، زراعی، چراگاه و مراتع (D_{d2})	پوشش گیاهی ۸۰ تا ۱۰۰ درصد	۰
	پوشش گیاهی ۶۰ تا ۸۰ درصد	۵
	پوشش گیاهی ۴۰ تا ۶۰ درصد	۱۰
	پوشش گیاهی ۲۰ تا ۴۰ درصد	۱۵
	پوشش گیاهی کمتر از ۲۰ درصد	۲۰

در نهایت شاخص میدانی پیوستگی (FIC) برای هر نقطه از رابطه ۸ محاسبه شد:

$$FIC = \frac{S_u + S_d}{2} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

مقادیر FIC محاسبه‌شده برای نقاط نمونه مختلف در عرصه با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط شاخص‌های IC و MIC در همان نقاط مقایسه شد. ضریب تعیین (R^2) بین مقادیر میدانی و پیش‌بینی‌شده به عنوان معیاری برای سنجش دقت و اعتبار مدل مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه بازدیدهای میدانی متعددی از زیرحوضه‌های آبخیز سیروان به عمل آمد. براساس وضعیت زمین، متغیرهای مربوط به مولفه بالادست و مولفه پایین‌دست امتیازدهی شدند. از آنجایی که تمرکز بارندگی‌ها در اقلیم مدیترانه‌ای در فصول پاییز و زمستان است و در این بازه زمانی پوشش گیاهی کمتری بر روی زمین وجود دارد، شرایط انتقال رسوب فراهم است. بدین منظور، بهتر است بازدیدهای میدانی در این بازه زمانی انجام شود تا پوشش گیاهی علفی یکساله که تأثیر زیادی در فرسایش خاک و انتقال رسوب ندارند، موجب خطا در امتیازدهی کارشناس نگردد.

اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها و مکان‌یابی اقدامات حفاظتی

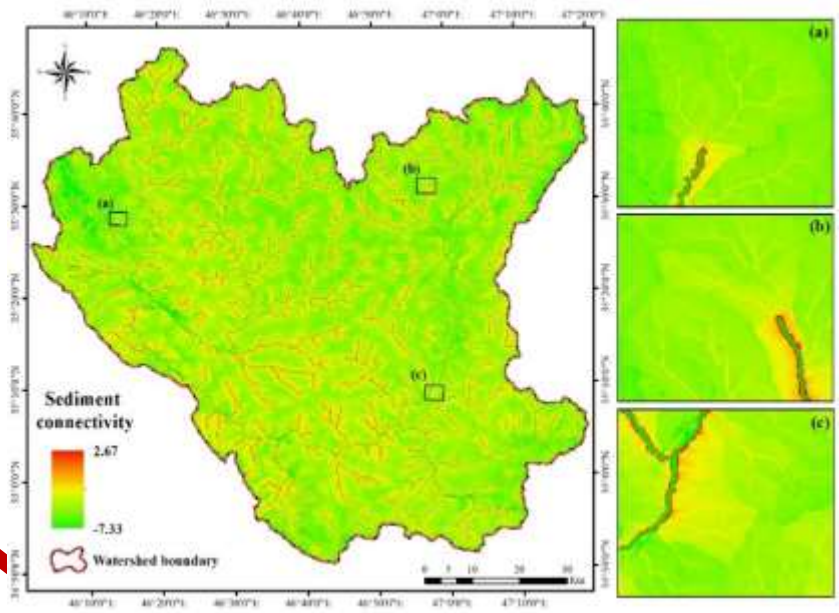
پس از تهیه نقشه نهایی شاخص پیوستگی رسوب (IC) برای کل حوضه، با استفاده از ابزار Zonal Statistics در نرم‌افزار ArcGIS 10.5، مقادیر آماری این شاخص (میانگین، میانه، حداکثر) برای هر یک از زیرحوضه‌ها استخراج گردید. زیرحوضه‌ها بر اساس میانگین مقادیر IC رتبه‌بندی شدند. زیرحوضه‌هایی که بالاترین میانگین IC را داشتند، به‌عنوان بحرانی‌ترین مناطق از نظر پتانسیل انتقال رسوب شناسایی و در اولویت اول برای اجرای اقدامات مدیریتی و عملیات آبخیزداری (مانند احداث بندهای توری، مدیریت پوشش گیاهی، عملیات بیومکانیک) قرار گرفتند. این رویکرد، یک چارچوب علمی و قابل دفاع برای تخصیص بهینه منابع و تمرکز اقدامات کنترل رسوب در کارآمدترین مکان‌ها فراهم می‌کند. در شرایطی که لکه‌هایی (معمولاً با مساحت کم) در یک زیرحوضه دارای شاخص پیوستگی رسوب بالایی هستند، نمی‌توان زیرحوضه را در اولویت حاد قرار داد.

ویراستاری نشده

نتایج و بحث

بررسی و تحلیل شاخص پیوستگی رسوب

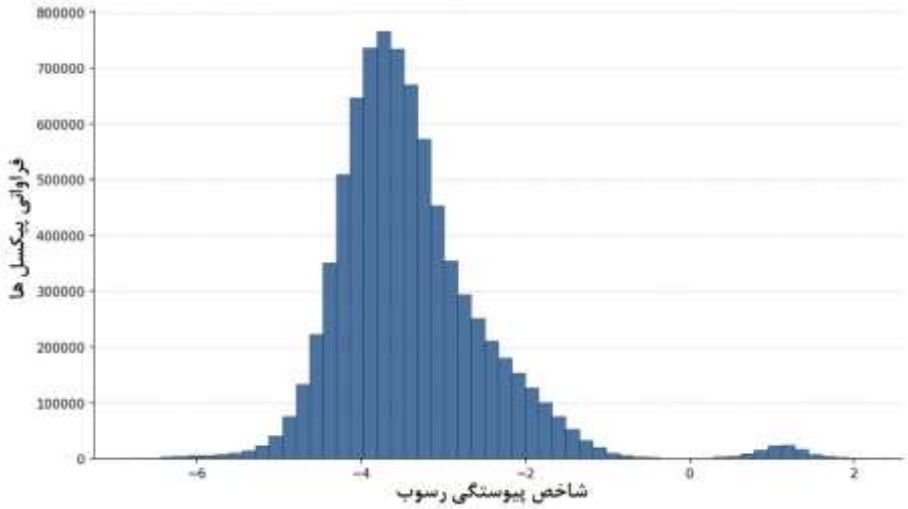
نقشه شاخص پیوستگی رسوب (IC) حوزه آبخیز سیروان با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و در شکل (۳) ارائه شده است. اطلاعات مندرج در نقشه مزبور نشان می‌دهد که مقادیر شاخص در سطح حوضه از ۷/۳۳- تا ۲/۶۷ متغیر است. مناطق با مقادیر مثبت و بالا بیانگر پیوستگی رسوبی شدید هستند و عمدتاً در مجاورت آبراهه‌های اصلی و عرصه‌های پرشیب قرار دارند. نواحی نزدیک به شبکه زهکشی و دارای شیب تند پتانسیل بالایی برای تولید و انتقال سریع رسوب به شبکه‌های هیدروگرافی داشته و به‌عنوان کانون‌های بحرانی در اولویت نخست برای مداخلات آبخیزداری (مانند احداث بندهای رسوب‌گیر، عملیات بیولوژیک و مکانیکی کنترل فرسایش) قرار می‌گیرند. در مقابل، مناطق با مقادیر پایین نشان‌دهنده پیوستگی ضعیف رسوب هستند که عمدتاً در ارتفاعات با پوشش گیاهی متراکم‌تر یا دشت‌های بین‌کوهی با شیب ملایم واقع شده‌اند که نقش ذخیره‌گاه[5] رسوبی ایفا می‌کنند.



شکل ۳. شاخص پیوستگی رسوب محاسبه شده در حوزه آبخیز سیروان

نمودار توزیع فراوانی داده‌های شاخص پیوستگی رسوب حوزه آبخیز سیروان در شکل (۴) نشان داده شده است. تغییرپذیری قابل‌توجهی در وضعیت پیوستگی رسوبات این حوضه مشاهده می‌گردد. کشیدگی نمودار فراوانی شاخص پیوستگی رسوب به سمت اعداد منفی است. فراوانی پیکسل‌هایی که دارای اعداد منفی هستند، در این حوضه بیشتر است. این درحالی است که شاخص پیوستگی رسوب در مناطق محدودتری مثبت است. از اینرو، پتانسیل انتقال رسوب در بخش‌هایی که دارای شاخص پیوستگی رسوب مثبت هستند، وجود دارد.

[5] Sink

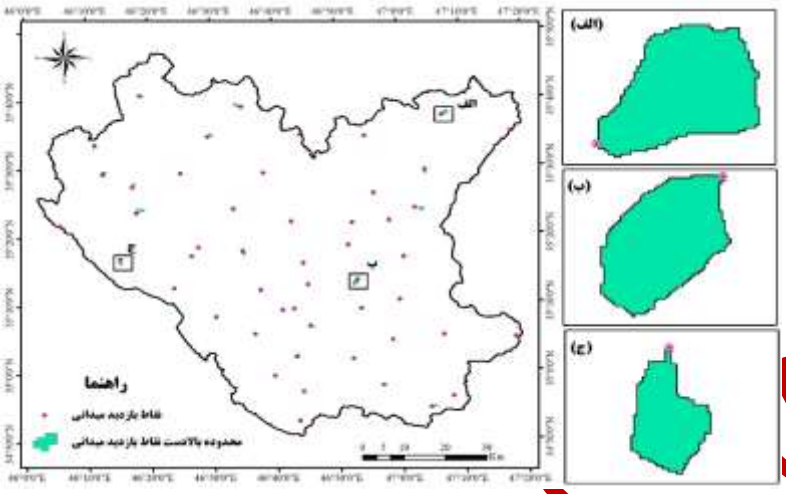


شکل ۴. نمودار توزیع فراوانی شاخص پیوستگی رسوب

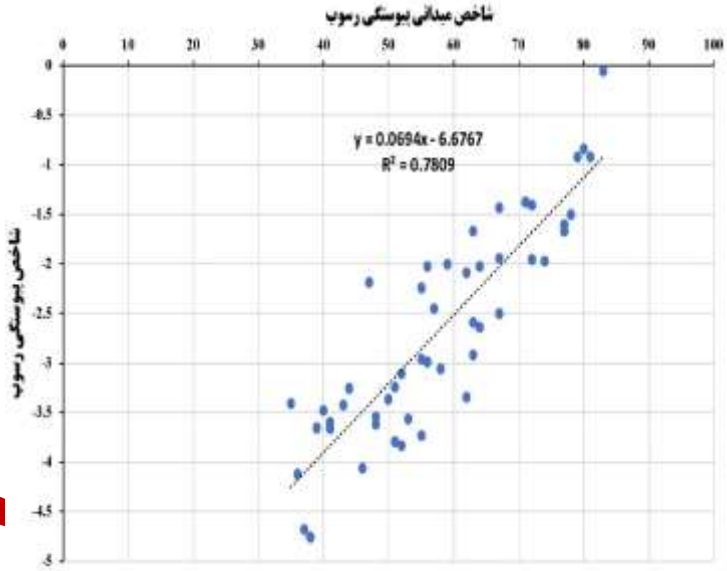
نتایج اعتبارسنجی شاخص پیوستگی رسوب

نقشه‌ی پیوستگی حاصل از روش ضریب ناهمواری با استفاده از شاخص میدانی پیوستگی (FIC) که یک رویکرد میدانی است، مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص میدانی پیوستگی در منطقه‌ی مورد مطالعه در ۵۰ نقطه از حوضه به صورت تصادفی و پراکنده براساس بازدیدهای میدانی محاسبه شد. شکل (۵) نقشه محدوده بالادست نقاط بازدیدی میدانی مربوط به فاکتور Au (رابطه‌ی ۶) در فرایند ارزیابی دقت نقشه شاخص پیوستگی رسوب را نشان می‌دهد. پس از بستن مرز هیدرولوژیکی بالادست هر نقطه در محیط ArcGIS مساحت محدوده بالادست آن محاسبه شد. رابطه رگرسیونی میان شاخص میدانی پیوستگی رسوب و شاخص‌های پیوستگی رسوب مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. براساس نتایج بدست‌آمده، رابطه میان شاخص پیوستگی رسوب مبتنی بر ضریب ناهمواری (ICr) و شاخص میدانی پیوستگی با ضریب تبیین ۰/۷۸۰ توصیف شده است. نتایج ارزیابی میدانی در مورد نتایج به‌دست آمده در نقشه‌ی اتصال رسوبی، توافق قابل قبولی بین داده‌های اتصال رسوبی میدانی و اتصال ساختاری رسوب در نقشه را نشان می‌دهد. این نتایج با یافته‌های پژوهشگران دیگر مانند Borselli et al. (2008) و Cavalli et al. (2013) همخوانی دارد. این پژوهش‌ها نیز بر لزوم انجام بازدیدهای میدانی جامع برای صحت سنجی شاخص‌های مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی تأکید داشته‌اند، چرا که عواملی مانند پوشش گیاهی موضعی، رسوبات در شت‌دانه و موانع انسان ساخت ممکن است در مدل‌های رقومی به طور کامل منعکس نشوند (Lexartza-Artza & Wainwright, 2009).

ترجمه‌ی نشده



شکل ۵. نقشه محدوده بالادست نقاط بازدیدی میدانی مربوط به فاکتورAu



شکل ۶. ارزیابی کارائی شاخص پیوستگی رسوب در حوزه آبخیز سیروان

ارزیابی کارائی شاخص پیوستگی رسوب در حوزه آبخیز سیروان نشان داد که عامل ناهمواری نقش مهمی در الگوی شار رسوب حوضه دارد. از سویی دیگر، مقدار ضریب تبیین نیز مشخص نمود که بخشی از عوامل اثرگذار بر الگوی شار رسوب در این تحلیل درنظر گرفته نشده است و خطایی به اندازه ۲۲ درصد (R^2=0.22) را ایجاد نموده است. عواملی مانند پوشش گیاهی، حساسیت واحدهای سنگ‌شناسی به فرسایش و شاخص‌های مختلف مربوط به رژیم بارندگی می‌توانند نقش مهمی در فرایندهای فرسایش و رسوب ایفا نمایند. Liu et al. (2024) نیز اثبات نمودند که عوامل اقلیمی دارای تغییرات زمانی بوده و الگوی شار رسوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از اینرو، نیاز است نقشه شاخص پیوستگی رسوب هر حوزه آبخیز برای زمان‌های مختلف تهیه گردد. بنابراین، می‌توان استنباط نمود که مطالعه الگوی شار رسوب حوضه نسبتاً پیچیده بوده و عوامل محیطی مختلفی در تغییرات مکانی و زمانی آن می‌توانند نقش ایفا نمایند. از آنجایی که بررسی برخی از این عوامل در مقیاس حوضه نیازمند منابع مالی، منابع انسانی و زمان است، در بسیاری از مواقع دستگاه‌های اجرایی امکان مطالعه تمام عوامل را نداشته و این روش از نظر عملیاتی، برای کارشناسان به آسانی قابل اجرا نیست. هدف از این تحقیق، ارائه یک روش سریع و قابل اعتماد است که کارشناسان دستگاه‌های اجرایی با کمترین داده‌های محیطی بتوانند به الولویت‌بندی

زیرحوضه‌ها بپردازند. با توجه به اینکه عامل ناهمواری نقش اصلی را در الگوی شار رسوب ایجاد می‌نماید، کارشناسان می‌توانند با استفاده از یک مدل رقومی ارتفاعی، برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها به نقشه شاخص پیوستگی رسوب دست یابند. نکته مهمی که باید بدان توجه نمود این است که روش تحقیق این مطالعه براساس یک مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکامی ۳۰ متر طراحی شده است تا کارشناسان بتوانند به آسانی از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر سنجنده SRTM استفاده نمایند. براساس نتایج مطالعه Cantreul et al. (2018) و Hu et al. (2025) در صورتی که اطلاعات ورودی از قدرت تفمیم مکانی بالاتری برخودار باشند، دقت شاخص پیوستگی رسوب بالاتر خواهد بود. از اینرو، در صورتی که از داده‌های ارتفاعی سازمان نقشه‌برداری برای تهیه مدل رقومی ارتفاعی حوزه آبخیز سیروان استفاده شود (مثلاً قدرت تفکیک مکانی ۵ یا ۱۰ متر)، احتمالاً مطابقت شاخص پیوستگی رسوب و شاخص میدانی پیوستگی رسوب بیشتر شده و ضریب تبیین بالاتری به دست خواهد آمد.

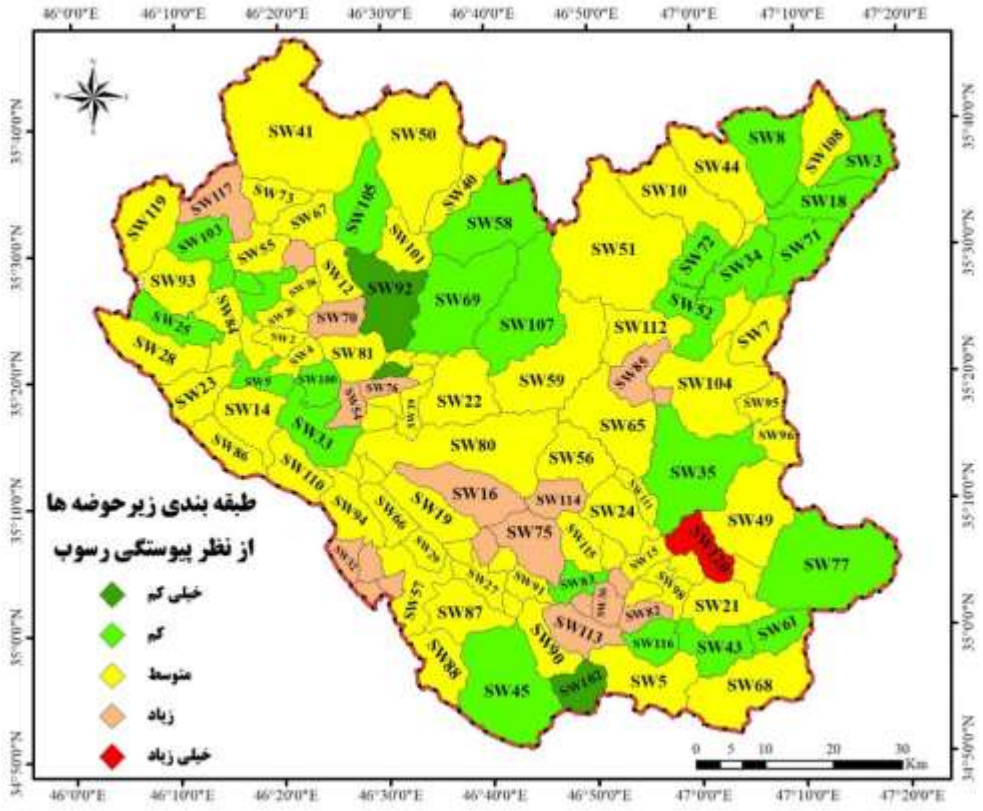
نتایج اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز سیروان بر اساس شاخص پیوستگی رسوب

محدوده‌هایی که مقدار شاخص پیوستگی رسوب آن‌ها مثبت است، پتانسیل انتقال رسوب بالایی دارند. از اینرو، زیرحوضه‌هایی که مقدار میانگین شاخص پیوستگی رسوب آن‌ها مثبت بود، از بقیه زیرحوضه‌ها تفکیک شدند. تنها میانگین شاخص پیوستگی رسوب یک زیرحوضه مثبت بود که این زیرحوضه به عنوان کلاس اولویت خیلی زیاد درنظر گرفته شد. زیرحوضه‌های باقی‌مانده که میانگین شاخص پیوستگی رسوب آن‌ها منفی بود، با استفاده از روش گام‌های برابر[6] در چهار کلاس اولویتی دسته‌بندی شده‌اند (شکل ۷). پراکنش فضایی اولویت‌ها یکنواخت نبوده و زیرحوضه زرواران (SW120) به‌دلیل دارا بودن مقادیر بالای شاخص پیوستگی رسوب، در کلاس اولویت خیلی زیاد قرار گرفته است. یازده زیرحوضه دیگر شامل بیساران (SW16)، دل‌مرز شماره ۲ (SW32)، گاواز (SW42)، گوشخانی (SW54)، لاویسان (SW70)، مهراب (SW75)، میانه (SW76)، نشور (SW82)، نوره (SW85)، پارک آبخیز (SW89) و تاوریوار (SW114)در کلاس اولویت زیاد جای گرفته‌اند. این زیرحوضه‌ها عمدتاً در راستای آبراهه‌های اصلی و مناطق با شیب تند واقع شده‌اند و به دلیل پیوستگی رسوبی بالا، پتانسیل زیادی برای انتقال رسوب به پایین‌دست دارند.

از منظر مدیریتی، تمرکز اقدامات حفاظتی در زیرحوضه‌های با اولویت بسیار زیاد و زیاد منطقی‌ترین راهبرد است؛ چراکه سرمایه‌گذاری در این مناطق بیشترین بازگشت اقتصادی و زیست‌محیطی را به همراه خواهد داشت (Sadeghi, 2005). اقدامات پیشنهادی شامل احداث بندهای گابیونی و توری–سنگی، عملیات بیومکانیکی (مانند کاشت گونه‌های مقاوم و بذرپاشی)، مدیریت چرای دام و کنترل آتش‌سوزی در مراتع، و در موارد حادتر، احداث سازه‌های کنترل رسوب مانند حوضچه‌های رسوبگیر می‌باشد. این در حالی است که در زیرحوضه‌های با اولویت کم، اقدامات پیشگیرانه و حفاظتی سبک (مانند احداث بندهای کوتاه خاکی و تقویت پوشش گیاهی) برای حفظ تعادل هیدرولوژیکی کفایت می‌کند.

شاخص پیوستگی رسوب (IC) ابزاری مفید در تحلیل فرسایش و رسوب‌گذاری است؛ چرا که، با کمّی‌سازی میزان اتصال و انتقال رسوب بین بخش‌های مختلف یک حوزه آبخیز، الگوی شار رسوب (از منبع تا محل انباشت) را به‌صورت فضایی نشان می‌دهد. این شاخص با شناسایی مناطق بحرانی قطع و اتصال در سیستم، به درک پویایی انتقال رسوب و پیش‌بینی پاسخ حوضه به تغییرات کاربری زمین یا رویدادهای هیدرولوژیک کمک می‌کند. مزیت اصلی آن قابلیت ارائه‌ی دید پیوسته و فضامند است که امکان برنامه‌ریزی هدفمند برای مدیریت پایدار حوضه را فراهم می‌آورد. از جمله این برنامه‌ریزی‌ها می‌توان به اولویت‌بندی مناطق برای اجرای اقدامات حفاظتی (مانند احداث سازه‌های کنترل رسوب، قرق، احیای پوشش گیاهی)، کاهش خطرات ناشی از بار رسوبی بالا (مانند پرشدگی مخازن سدها یا تشدید سیلاب) و در نهایت حفظ سلامت اکوسیستم‌های آبی و خاکی در مقیاس منظر اشاره کرد.

[6] Equal interval



شکل ۷. اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز سیروان

زیرحو ضه‌هایی که م ساحت زیادتری دارند، عموماً امکان تولید رواناب بیشتری ن سبت به زیرحو ضه‌های کوچکتر (با شرایط م شابه) دارند. عامل شیب زمین نیز نقش مهمی در پتانسیل انتقال ر سوب دارد به گونه‌ای که زیرحوضه‌هایی که از شیب بیشتری برخودارند، پیوستگی رسوب بیشتری دارند. شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی نشان‌دهنده تراکم پوشش گیاهی است و مقدار آن بین ۱- تا ۱+ متغیر ا ست. هرچه مقدار شاخص نرمال شده تفاوت پو شش گیاهی به عدد یک نزدیکتر با شد، پو شش گیاهی متراکم‌تر ا ست. در زیرحوضه‌هایی که مقدار این شاخص نزدیک به صفر است، وضعیت پوشش گیاهی ضعیف است. مقادیر منفی این شاخص نشان‌دهنده منابع آب و سطوح یخی هستند. کاربری اراضی شیوه مدیریت و استفاده از زمین را نشان می‌دهد. همچنین، ساختار شبکه زهکشی و تراکم آبراهه در زیرحوضه‌ها پتانسیل انتقال رسوب را افزایش می‌دهد.

زیرحوضه زرواران (SW120) که بالاترین اولویت را برای مهار شار رسوب در حوزه آبخیز سیروان نشان داده است، دارای شیب نسبتاً زیاد (۲۷/۱ درصد)، وضعیت پوشش گیاهی ضعیف، کاربری اراضی کشاورزی و مرتع بوده و متوسط فاصله پیکسل‌های این زیرحوضه از آبراهه ۱۶۸ متر به د ست آمد که شرایط را برای انتقال ر سوب از بالاد ست به پایین‌د ست زیرحو ضه فراهم ساخته ا ست. میانگین شیب زمین در زیرحو ضه بیساران (SW16) حدود ۴۲ در صد به د ست آمده ا ست که با درنظر گرفتن تراکم پو شش گیاهی ضعیف و فاصله کم پیکسل‌ها از شبکه زهکشی، رسوبات به آسانی به حرکت درآمده و از بالادست زیرحوضه به سمت خروجی زیرحوضه جریان می‌یابند. تخریب مراتع در زیرحو ضه بیساران و همچنین تو سعه ک شاورزی در ارا ضی شیب‌دار شرایط انتقال ر سوب را ت شدید نموده ا ست. ارا ضی واقع در زیرحو ضه دل‌مرز شماره ۲ (SW32) از شیب زیادی برخودار بوده به گونه‌ای که میانگین شیب زمین در این

زیرحو ضه حدود ۵۹ در صد به د ست آمده ا ست. با درنظر گرفتن کاربری ارا ضی مرتعی تخریب‌یافته و همچنین نزدیکی ارا ضی به آبراهه‌ها، ر سوبات می‌توانند به راحتی از بالاد ست به پایین‌د ست منتقل شوند. زیرحو ضه گاواز (SW42) با شیب زیاد، تراکم پو شش گیاهی ضعیف، کاربری مرتعی تخریب‌یافته و حضور آبراهه‌ها در نزدیکی ارا ضی سبب شده ا ست که پتانسیل انتقال ر سوب زیادی دا شته با شد. زیرحو ضه گو شخانی (SW54) که در جایگاه پنجم اولویت قرار گرفته ا ست، به دلیل وجود ارا ضی بایر و مراتع ضعیف و همچنین شیب‌دار بودن زمین، انتقال رسوب به راحتی اتفاق می‌افتد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، از مفهوم پیوستگی رسوب به‌عنوان روشی مناسب برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها جهت انجام اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری در مقیاس حوزه استفاده شد. موارد ذیل از این مطالعه استخراج شده است:

- تحلیل فضایی شاخص پیوستگی رسوب، شناسایی مسیرهای اصلی انتقال رسوب و تمرکز اقدامات آبخیزداری در زیرحوضه‌های با اولویت بالا را ممکن می‌سازد که این امر می‌تواند به افزایش کارایی تخصیص منابع کمک کند. بر اساس نقشه اولویت‌بندی، زیرحوضه زرواران در کلاس اولویت خیلی زیاد و یازده زیرحوضه دیگر در کلاس اولویت زیاد قرار گرفتند. این زیرحوضه بایستی از نظر معیارهای دیگر مانند فرسایش خاک، کاربری اراضی، مشارکت جوامع محلی و غیره نیز مورد بررسی قرار گرفته و براساس موجودیت منابع مالی و برنامه‌های مدیریتی، در اولویت قرار گیرد. در مقابل، زیرحوضه‌های با اولویت کم و بسیار کم، عموماً در مناطقی با پوشش گیاهی مناسب، ناهمواری‌های کنترل‌کننده یا کاربری‌های پایدار زمین قرار دارند که انتقال رسوب در آن‌ها محدود است و صرفاً به اقدامات حفاظتی و مدیریتی پیشگیرانه نیاز دارند.

- به طور کلی، نتایج اعتبارسنجی میدانی از قابلیت مناسب شاخص پیوستگی رسوب برای بازنمایی الگوی شار رسوب در منطقه مورد مطالعه حمایت می‌کند. الگوی توزیع فضایی شاخص پیوستگی رسوب نشان‌دهنده ناهمگونی شدید مورفولوژیک و توپوگرافیک در حوضه است. همچنین، رویکرد مبتنی بر پیوستگی رسوب، دیدگاهی جامع‌تر و مدیریتی‌تر نسبت به روش‌های سنتی صرفاً مبتنی بر تولید رسوب ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان یک دستورالعمل علمی برای دستگاه‌های اجرایی (مانند ادارات منابع طبیعی) مورد استفاده قرار گیرد.

- برای مطالعات آتی، تلفیق روش منشاءیابی رسوبات (با استفاده از تکنیک‌هایی مانند رادیوایزوتوپ‌ها) با شاخص پیوستگی رسوب می‌تواند به‌عنوان یکی از لایه‌های اطلاعاتی در تصمیم‌گیری دستگاه‌های اجرایی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، عامل وزنی مقاومت در شاخص پیوستگی رسوب می‌تواند در ارتباط با نتایج منشاءیابی رسوبات و سهم تولید رسوب زیرحوضه‌ها انتخاب گردد. این رویکرد ترکیبی قادر است نه تنها مسیرهای انتقال، بلکه منابع دقیق تولید رسوب را نیز شناسایی کند، که به نوبه خود طراحی اقدامات کنترلی را بسیار کارآمدتر می‌سازد. از سویی دیگر، پیشنهاد می‌گردد برای محاسبه شاخص پیوستگی رسوب از داده‌های رقومی ارتفاعی دقیق‌تر مانند پهپادها و نقشه‌های ارتفاعی سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شود.

منابع

ر ضایی‌مقدم، محمدح سین؛ نیکجو، محمدر ضا؛ مختاری، داود؛ ح سین‌زاده، سیدر ضا و ملکی، ح سام. (۱۳۹۵). برآورد دبی و تراز سیلاب‌های گذشته‌ی رودخانه سیروان، با استفاده از شواهد ژئومورفولوژیکی و سیلابی. *فصل‌نامه جغرافیایی طبیعی*، ۹(۳۳)، ۱۸-۱.

صادقی سیّد حمیدر ضا؛ زارع، سمیه؛ ذبیحی سیلابی، م صطفی؛ عبدالباقی، فاطمه؛ ح سن‌پور، فاطمه؛ نوری، علی. (۱۴۰۴). پهنه بندی شاخص اتصال رسوبی در حوزه آبخیز شازند در استان مرکزی. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۶(۱)، ۱۰۷-۱۲۰.

عرب‌خدری، محمود. (۱۴۰۰). وضعیت فرسایش آبی و رسوبدهی ایران، واکاوی آماری و مقایسه ای. *پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۶(۲)، ۱۳۹-۱۵۶.

عرب‌عامری، علیر ضا؛ پورقا سمی، حمیدر ضا؛ ر ضایی، خلیل و سهرابی، م سعود. (۱۳۹۸). اولویت بندی مورفومتریک حوزه های آبخیز به منظور مدیریت بهینه منابع آب و خاک. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۳(۴۵)، ۸۷-۹۶.

عنایتی، فاطمه‌زهرا؛ خالدی درویشـان، عبدالواحد؛ موسـوی، وحید. (۱۴۰۵). تحلیل همبسـتگی توزیعی و نیمه‌توزیعی شـاخص اتصـال رسـوب ساختاری و عملکردی با فرسایش خاک. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک* (DOI: 10.22098/mmws.2026.19901.1823).

نجفی، سـعید؛ صـادقی، سـید.حمیدرضـا و هکمن، توبیاس. (۱۳۹۶). تغییرات زمانی و مکانی الگوی اتصـال سـاختاری رسـوب در حوزه‌ی آبخیز تهم‌چای زنجان. *پژوهش های حفاظت آب و خاک*، ۲۴(۳)، ۱۳۱-۱۴۷.

نجفی، سعید؛ صادقی، سیدحمیدرضا و هکمن، توبیاس. (۱۳۹۷). تحلیل الگوی اتصال ساختاری رسوب در حوزه آبخیز تهم زنجان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۰(۲)، ۱۹۲-۲۰۳.

REFERENCES

Adhami, M. & Sadeghi, H. (2016). Sub-watershed prioritization based on sediment yield using game theory. *Journal of Hydrology*, 541, 977-987.

Arabameri, A., Pourghasemi, H.R., Rezaei, K., Sohrabi, M. (2019). Morphometric Prioritization of Watersheds for Optimal Water and Soil Resources Management. Iran-Watershed Management Science & Engineering, 13(45), 1-10. (in Persian).

Arabkhedri, M. (2021). Water Erosion and Sediment Production Status in Iran: Statistical and Comparative Analyses. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 6(2), 139–156. (in Persian).

Asres, S., Taffese, T., Firiew, Z., Yihunie, L., & Goshu, G. (2025). A review of reservoir sedimentation and water storage losses in the Ethiopian highlands. *Discover Sustainability*, 6(1), 1023.

Borselli, L., Cassi, P., &Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75, 268–277. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006

188.

Cantreul, V., Bielders, C., Calsamiglia, A., & Degré, A. (2018). How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(4), 884-893.

Cavalli, M., & Marchi, L. (2008). Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. *Natural Hazards Earth System Science*, 8, 323–333.

Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188: 31–41.

Enayati, F.Z., Khaledi Darvishan, A., & Moosavi, V. (2026). Distributed and semi-distributed correlation analysis of structural and functional sediment connectivity index with soil erosion. Water and Soil Management and Modelling. doi:10.22098/mmws.2026.19901.1823. (in Persian).

Feng, L., Wang, K., Liu, F., Lei, X., Guo, C., Liu, H., ... & Zhang, M. (2026). Decoupling of hydro-sedimentary processes in a Loess Plateau watershed: Dominant roles of engineering (Check dams and terraces) and vegetation restoration. *Journal of Soils and Sediments*, 26(4), 117.

Gerami, Z., Karimi, A., Arabkhedri, M., Asadi, H., & Cavalli, M. (2026). Investigating the spatial variations of sediment connectivity index in bare tilled soils with a new weighting factor for the plot scale. *Soil and Tillage Research*, 255, 106819.

Hu, J., Zhang, J., Li, W., Li, P., Zhao, G., Li, S., ... & Du, M. (2025). Investigating sediment connectivity of a small catchment on the Loess Plateau using an appropriate index at an optimal spatial resolution. *Journal of Hydrology*, 661, 133588.

Liu, C., Chen, Y., Fang, G., Li, Z., & Liu, Y. (2024). Impact of climatic and geomorphologic drivers on sediment connectivity in the Tarim River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 643, 132027.

Malik, A., Kumar, A., Kushwaha, D. P., Kisi, O., Salih, S. Q., Al-Ansari, N., &Yaseen, Z. M. (2019). The implementation of a hybrid model for hilly sub-watershed prioritization using morphometric variables: Case study in India. *Water*, 11(6), 1138.

Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., & Sadeghi, S.H. (2021). Sediment connectivity concepts and approaches. *Catena*, 196, p.104880.

Najafi, S., Sadeghi, S.H., & Heckmann, T. (2017). Temporospatial Variations of Structural Sediment Connectivity Patterns in Taham-Chi Watershed in Zanjan Province, Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(3), 131-147. (in Persian).

Najafi, S., Sadeghi, S.H.R., & Heckmann, T. (2018). Analyzing structural sediment connectivity pattern in Taham Watershed, Iran. *Watershed Engineering and Management*, 10(2), 192-203. (in Persian).

Naoui, B., Akka, L. B., Titafi, A., Nassri, K., El Idrissi, S., Baghdad, B., & Chakiri, S. (2025). Prioritizing sub-watersheds for soil management and conservation in the Wadi Ouergha watershed, Northern Morocco. *Ecological Engineering & Environmental Technology* (EEET), 26(1).

Negash, D. A., Moisa, M. B., Merga, B. B., Sedeta, F., & Gemeda, D. O. (2021). Soil erosion risk assessment for prioritization of sub-watershed: the case of Chogo Watershed, Horo Guduru Wollega, Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 589.

Pan, J., Li, P., Ren, Z., Xu, Y., Chen, Z., Ma, Y., ... & Cavalli, M. (2026). Effect of terraces and check dams on sediment connectivity in a catchment on the Loess Plateau, China. *Geomorphology*, 110281.

Rahmati, O., Soleimanpour, S. M., Arabkhedri, M., Mehrjo, S., Kalantari, Z., Cavalli, M., ... & Bahmani, A. (2023). Towards quantification of soil conservation performance using sediment connectivity concept at hillslope scale: proposing a new framework for data-scarce regions. *Journal of Soils and Sediments*, 23(5), 2298-2309.

Rezaei moghadam, M.H., Nikjo, M.R., Mokhtari, D., Hosinzadeh, S.R., Maleki, H. (2016). Discharge Estimates and Paleofloods of the stag Sirvan river with using geomorphological evidence and torrential. *Physical Geography Quarterly*, 9(33), 1-18. (in Persian).

Sadeghi, S.H.R., (2005). A Semi-detailed technique for soil erosion mapping based on BLM and satellite image applications. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 7(3, 4), 133-142.

Sadeghi, S.H.R., Zare, S., Zabihi Seilabi, M., Abdulbaghi, F., Hasanpour, F., Nouri, A., et al. (2025). Sediment Connectivity Index Zoning in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran. *Journal of Watershed Management Research*, 16(1), 107-120. (in Persian).

Shi, C., Liang, Y., Qin, W., Ding, L., Cao, W., Zhang, M., & Zhang, Q. (2025). Review of sediment connectivity: Conceptual connotations, characterization indicators, and their relationships with soil erosion and sediment yield. *Earth-Science Reviews*, 264, 105091.

Wu, Z., Baartman, J. E., Pedro Nunes, J., & López-Vicente, M. (2026). Evaluation of sediment connectivity indices to improve the prediction of the spatiotemporal variability of sediment yield for a large river basin (Wei River, China). *Land Degradation & Development*, 37(8), 3406-3417.