

Evaluation of the performance of sediment connectivity and sediment transport capacity indicators in the spatial analysis of the sediment flux pattern in the Neyriz Watershed, Fars Province

Seyed Masoud Soleimanpour^{1*}, Omid Rahmati², Mahmood Arabkhedri³, John Tiefenbacher⁴

¹ Associate Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

² Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran

³ Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

⁴ Professor, Department of Geography & Environmental Studies, College of Liberal Arts, Texas State University, San Marcos, U.S.A

Extended Abstract

Introduction

The amount of sediment production, the manner and time of sedimentation, the size and composition of sediment grains, and transport among the waterways network are important features of the sedimentation regime of Watersheds; Because changes in each of these factors cause changes in Watershed performance. Therefore, sediment production is a reflection of the importance and amount of erosion processes and sediment sources in the upstream parts of the Watershed and how sediment is transported and deposited from the moment of movement of erosion materials from the point of separation to the exit of it. Sediment connectivity indicators indicate the spatial changes of connectivity patterns in different parts of the Watershed and provide a suitable estimate of the contribution of sediment sources and sediment transport routes. For this purpose, investigating the spatial pattern of sediment flux at the Watershed scale is of particular importance in developing comprehensive management plans and measures to control erosion and sedimentation. Although various indicators and models have been developed in this field, their performance has not been evaluated based on observational data and statistical methods. This research aims to analyze the sediment flux pattern of the Neyriz Watershed located in the east of Fars Province, based on sediment connectivity and sediment transfer capacity indicators, and compare their performance based on field sediment evidence.

Materials and Methods

At first, a digital model of the ground elevation of the Neyriz Watershed with a spatial resolution of 12.5 m was prepared and its drainage network was extracted. Then, the sediment connectivity index was calculated by considering the upstream and downstream features of the Watershed and by considering the roughness factor as the sediment movement resistance factor, and the sediment connectivity map of the Watershed was made. Then, the sediment transport capacity index map was also prepared based on the concept of topography and using the digital model layer of land height. For this purpose, the sediment transport capacity index was calculated for each pixel of Neyriz Watershed in SAGA-GIS software, and a sediment transport map was prepared. Based on field visits to different parts of the Watershed, 30 positions that had evidence of sediment transfer were recorded as observation points of the sediment transfer event. Also, 30 other positions that did not have signs and evidence of sediment transfer were added to the validation database as observation points of no sediment transfer event. The corresponding values of each index were also extracted in the geographic information system and based on the available information, using evaluation methods based on the error matrix including true skill statistic (TSS), efficiency (E), and F score (F-score), the validation of the mentioned indicators was done quantitatively.

Results and Discussion

The value of the sediment connectivity index of the Neyriz Watershed in Fars Province varied from -7.24 to 2.43 and its median value was -4.36. The spatial pattern of the sediment connectivity index in this Watershed is such that the middle and western parts have a low amount and the northern, southern, and eastern parts have more amounts. In this research, the drainage network of the Watershed was introduced as the target of receiving the sediment; Parts of the slopes of the Watershed level, which had the conditions of sediment production and transfer were connected to the drainage network in terms of the transfer path, have shown a higher value of connectivity index. This index provides valuable information for

land management by considering the upstream characteristics of each point as well as the characteristics of the transfer path to the sediment-receiving target. The value of the sediment transfer capacity index varied from 7.2 to 23.16 and the average value was 10.19. The value of this index is high in the marginal parts of the Watershed where there are sloping lands, and the middle parts of the Watershed have a small value. Based on the findings, the index of sediment connectivity with the true skill statistic (TSS) of 0.833, the efficiency value (E) of 0.916, and the F score of 0.915 is a better performance than the sediment transport capacity index (TSS= 0.633, E=0.816, F-score=0.825). In addition, based on the values of the false positive component in the error matrix, the sediment transport capacity index predicts high sediment flux potential in many situations; While in the field observations, it was not true.

Conclusion

Based on statistical evaluation criteria, the sediment connectivity index has been able to better describe the state of sediment flux and is more consistent with field realities. So that the sediment connectivity index, in addition to considering the characteristics of the upstream area of each point of the Watershed, is possible to consider the path of the sediment particle to the target location of the receiver (such as the nearest branch of the network drainage) has made it possible. Based on the findings obtained in this research, although the sediment transfer capacity index in some parts of the Neyriz Watershed of Fars Province was in line with the sediment connectivity index; However, due to the energy-based nature of the flow, this index only considers the local conditions of the points and ignores the features of the upstream area as well as the process of transporting sediment particles to the downstream. Therefore, it is suggested to use the sediment connectivity index in the erosion and sedimentation studies of Watersheds. Because when information about the amount of sediment production is not available; the Sediment connectivity index can provide useful information about the sediment transfer process in the Watershed.

Keywords: Geomorphometry, Landscape management, Sediment, Simulation, Watershed management

Article Type: Research Article

Acknowledgment

This study is based on part of the results of a research project entitled “Evaluation and modification of sediment connectivity index for application in smooth Watersheds conditions (case study: Neyriz Watershed, Fars Province)” coded 2-50-29-055-000970, approved by the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. The authors of this paper would like to express their gratitude and appreciation for the cooperation and support of this institution and the Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement:

We have no permission to release data and codes.

Authors' contribution

Seyed Masoud Soleimanpour: Writing original draft, conceptualization; **Omid Rahmati:** Software, manuscript editing, data analysis; **Mahmood Arabkhedri:** Supervision, manuscript editing; **John Tiefenbacher:** Supervision, manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

Citation: Soleimanpour, S.M., Rahmati, O., Arabkhedri, M., & Tiefenbacher, J. (2024). Evaluation of the performance of sediment connectivity and sediment transport capacity indicators in the spatial analysis of the sediment flux pattern in the Neyriz Watershed, Fars Province. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 239-252.
DOI: 10.22098/mmws.2024.15007.1454

Received: 4 May 2024., Received in revised form: 28 June 2024, Accepted: 29 June 2024, Published online: 29 June 2024
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 239-252

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی عملکرد شاخص های پیوستگی رسوب و ظرفیت انتقال رسوب در تحلیل مکانی الگوی شار رسوب حوزه آبخیز نی ریز استان فارس

سید مسعود سلیمان پور^{۱*}، امید رحمتی^۲، محمود عرب خدری^۳، جان تیفن باچر^۴

^۱ دانشیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
^۲ استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران
^۳ استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۴ استاد، گروه جغرافیا و مطالعات محیطی، کالج هنرهای لیبرال، دانشگاه ایالتی تگزاس، سن مارکوس، ایالت متحده آمریکا

چکیده

بررسی الگوی مکانی شار رسوب در حوزه آبخیز در تدوین برنامه های مدیریت جامع حوزه آبخیز و اقدامات مهار فرسایش و رسوب اهمیت ویژه ای دارد. اگرچه شاخص ها و مدل های مختلفی در این زمینه توسعه یافته، اما تاکنون عملکرد آن ها بر اساس داده های مشاهداتی و روش های آماری ارزیابی نشده است. هدف از انجام این تحقیق، تحلیل الگوی شار رسوب حوزه آبخیز نی ریز واقع در شرق استان فارس، مبتنی بر شاخص های پیوستگی رسوب و ظرفیت انتقال رسوب و مقایسه عملکرد آن ها بر اساس شواهد رسوب میدانی است. بدین منظور، ابتدا، مدل رقومی ارتفاع زمین با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر تهیه و شبکه زهکشی حوزه آبخیز استخراج شد. شاخص پیوستگی رسوب بر اساس مؤلفه های بالادست و پایین دست هر پیکسل و با در نظر گرفتن عامل ناهمواری به عنوان عامل مقاومت جابه جایی رسوب محاسبه و نقشه پیوستگی رسوب حوزه آبخیز ساخته شد. نقشه شاخص ظرفیت انتقال رسوب نیز بر اساس مفهوم زمین ریخت سنجی، با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع زمین تهیه شد. پس از انجام بازدهی های میدانی از بخش های مختلف حوزه آبخیز، شواهد مربوط به شار رسوب بررسی و موقعیت آن ها با استفاده از سامانه مکان یابی جغرافیایی ثبت شد. در نهایت، با استفاده از روش های ارزیابی مبتنی بر ماتریس خطا (آماره مهارت صحیح (TSS)، کارایی (E) و امتیاز F (F-score)) صحت سنجی شاخص های پیوستگی رسوب و ظرفیت انتقال رسوب به صورت کمی انجام گرفت. بر اساس یافته ها، شاخص پیوستگی رسوب با آماره مهارت صحیح (TSS) ۰/۸۳۳، مقدار کارایی (E) ۰/۹۱۶ و امتیاز F (F-score) ۰/۹۱۵، عملکرد بهتری نسبت به شاخص ظرفیت انتقال رسوب (TSS=۰/۶۳۳، E=۰/۸۱۶، F-score=۰/۸۲۵) داشته است. علاوه بر آن، با استناد به مقادیر مؤلفه نادرست مثبت در ماتریس خطا، شاخص ظرفیت انتقال رسوب در بسیاری از موقعیت ها، پتانسیل شار رسوب را بالا پیش بینی نمود. در حالی که در مشاهدات میدانی، صحت نداشته است. در نهایت، تحلیل ها نشان داد که ماهیت و مدل مفهومی شاخص ها نقش مهمی در توصیف شار رسوب حوزه آبخیز نی ریز داشته است. به گونه ای که شاخص پیوستگی رسوب با در نظر گرفتن مؤلفه های بالادست و پایین دست هر نقطه، سعی در شبیه سازی فرآیند انتقال رسوبات را دارد. بر اساس یافته ها، شاخص پیوستگی رسوب از قابلیت های زیادی برای پایش الگوی شار رسوب در حوزه های آبخیز برخوردار بوده و پیشنهاد می شود که در مطالعات آبخیزداری به آن توجه شود.

واژه های کلیدی: آبخیزداری، رسوب، زمین ریخت سنجی، شبیه سازی، مدیریت سرزمین

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

استناد: سلیمان پور، سید مسعود، رحمتی، امید، عرب خدری، محمود، و تیفن باچر، جان (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد شاخص های پیوستگی رسوب و ظرفیت انتقال رسوب در تحلیل مکانی الگوی شار رسوب حوزه آبخیز نی ریز استان فارس. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۲۳۹-۲۵۲.
DOI: 10.22098/mmws.2024.15007.1454

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۲۳۹ تا ۲۵۲

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

مقدار تولید رسوب، چگونگی و زمان رسوب‌دهی، اندازه و ترکیب دانه‌های رسوبی، انتقال آن در بین شبکه آبراهه‌ها، از ویژگی‌های مهم رژیم رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز به‌شمار می‌روند؛ زیرا تغییر در هر یک از این عوامل، باعث تغییر عملکرد حوزه‌های آبخیز می‌شوند. بنابراین، تولید رسوب، انعکاسی از اهمیت و مقدار فرآیندهای فرسایشی و منابع رسوب در قسمت‌های بالادست حوزه آبخیز و چگونگی انتقال و ذخیره رسوب از لحظه حرکت مواد فرسایشی از نقطه جدایی تا خروجی حوزه آبخیز است. در نتیجه پدیده تولید رسوب، پیچیده‌تر از فرسایش بوده و عامل‌های زیادی بر آن مؤثر است. علاوه‌براین، مقدار نسبت حمل رسوب یک حوزه آبخیز خاص، تحت تأثیر دامنه وسیعی از عوامل محیطی و ژئومورفولوژی قرار دارد. این عوامل شامل وضعیت وسعت و محل منابع رسوب، خصوصیات پستی و بلندی و شب، الگوی زهکشی و شرایط رودخانه، پوشش گیاهی، استفاده از زمین و بافت خاک هستند (Rahmati et al., 2022).

مفهوم "پیوستگی" یا "Connectivity"، در ابتدا در علوم ریاضی و فیزیک معرفی و سپس در علوم زمین به‌کار برده شد (Keesstra et al., 2018). با آغاز قرن ۲۱، مطرح شدن این مقوله در علوم هیدرولوژی و با نگاهی ویژه به بحث "رسوب" و با واژه تخصصی "پیوستگی رسوب"، گسترش یافت و تاکنون نیز در زمینه‌های مختلف مدیریت حوزه‌های آبخیز مورد استفاده قرار گرفته است. پیوستگی رسوب، نشان‌دهنده اتصال و یا عدم اتصال مسیرهای رواناب و رسوب در یک نقطه زمانی معین در یک سامانه تحت فرآیندهای جدایش، انتقال و رسوب‌گذاری است (Najafi et al., 2021). بنابراین، پیوستگی رسوب را می‌توان در مقیاس‌های مختلف مانند کرت، دامنه و حوزه آبخیز مورد بررسی قرار داد. "دامنه‌ها"، در سامانه آبخیز نقش کلیدی دارند که پیش‌بینی تولید رسوب در مقیاس دامنه از چالش‌های اصلی تحقیقات مرتبط با مباحث ژئومورفولوژی است، به این علت که دامنه‌ها، محل آغازین تولید و انتقال رسوب در فرآیند فرسایش و تحویل رسوب به پایین‌دست هستند (Poesen, 2018). همچنین، ویژگی‌های هر دامنه در میزان تحویل رسوب خالص به رودخانه‌ها و بستر دره‌ها نقش مؤثری دارند؛ زیرا بر ته‌نشست رسوبات و پیوستگی اثرگذار هستند (Houben, 2008). همچنین، پیوستگی رسوب، عمدتاً تحت تأثیر تداوم (عدم) طولی آبراهه‌ها است که با فرورفتگی‌ها و تلاقی آبراهه‌ها مرتبط است (Lu et al., 2019).

میزان پیوستگی رسوب بین بخش‌های مختلف یک حوزه آبخیز، عمدتاً به ویژگی‌های داخلی حوزه آبخیز (مورفولوژی حوزه آبخیز، شیب، پستی و بلندی و ارتفاع)، ویژگی‌های آبراهه (شیب، تراکم شبکه جریان، محصور شدن دره)، پوشش گیاهی

تغییر کاربری اراضی و رها شدن زمین) و اثرات ترکیبی بستگی دارد (Mishra et al., 2019). بنابراین، پیوستگی رسوب در مقیاس حوزه‌های آبخیز از پیوند اجزای تشکیل‌دهنده حوزه‌های آبخیز، مانند آبراهه‌ها و دامنه‌ها و با توجه به انتقال رسوب پدید می‌آید که شامل پیوستگی عرضی (پیوستگی در دامنه و دامنه به آبراهه)، پیوستگی طولی (درون شبکه آبراهه‌ای) و پیوستگی عمودی (پیوستگی سطحی به زیرسطحی) است (Fryirs et al., 2007; Bracken et al., 2015; Keesstra et al., 2018; Poeppl et al., 2020). جریان مداوم رواناب و توانایی آن در انتقال مواد بین بالادست و پایین‌دست و مسیرهای جریان پیوسته که می‌تواند عبور جریان آب را تضمین کند؛ موجب پیوستگی بالای طولی در آبراهه‌ها می‌شود (Zhang et al., 2021). پیوستگی‌های عرضی، طولی و عمودی، در مقیاس حوزه آبخیز با هم ترکیب می‌شوند یا بر هم‌کنش دارند و انتقال رسوب به خروجی حوزه آبخیز را تعیین می‌کند (Heckmann et al., 2018; Arabkhedri et al., 2022). در نتیجه این شاخص، بیان‌گر تغییرات مکانی الگوهای پیوستگی در بخش‌های مختلف حوزه آبخیز است و تخمین مناسبی از مشارکت منابع رسوب و مسیرهای انتقال رسوب ارائه می‌دهد. در این خصوص باید توجه داشت که "شار رسوب"، بیان‌گر آهنگ انتقال رسوب در واقعیت است و "دبی رسوب"، کمیتی است که شار رسوب را بیان می‌کند. این در حالی است که اصطلاح "پیوستگی رسوب"، بیان‌گر پتانسیل حرکت رسوب از بالادست به پایین‌دست حوزه آبخیز است (Soleimanpour et al., 2024).

در دو دهه گذشته، "شاخص پیوستگی رسوب"، به‌عنوان ابزاری کارآمد در تبیین و توصیف فرآیند انتقال رسوب در حوزه آبخیز به‌کار برده شده است (Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013). شاخص پیوستگی رسوب، از جمله شاخص‌های کاربردی است که اطلاعات ارزشمندی از پتانسیل انتقال رسوب در مقیاس حوزه آبخیز در اختیار کارشناسان بخش اجرا قرار می‌دهد تا کارایی اقدامات حفاظت خاک و مهار رسوب ارتقاء یابد. همچنین، اثر اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری و یا دخالت‌های انسانی (تضعیف پوشش گیاهی در اثر چرای دام، تغییر کاربری اراضی و غیره)، بر پتانسیل انتقال رسوب می‌تواند از طریق شاخص پیوستگی رسوب بررسی و ارزیابی شود (Kalantari et al., 2017; López-Vicente and Ben-Salem, 2019). یافته‌های محققان زیادی نشان‌دهنده کارایی مناسب شاخص پیوستگی رسوب است. به‌عنوان مثال، Bracken et al. (2015) مفهوم پیوستگی رسوب را به‌عنوان چارچوب درک فرآیندهای دخیل در انتقال رسوب در مقیاس‌های چندگانه معرفی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد نفوذ آب در خاک یکی از عوامل مؤثر بر

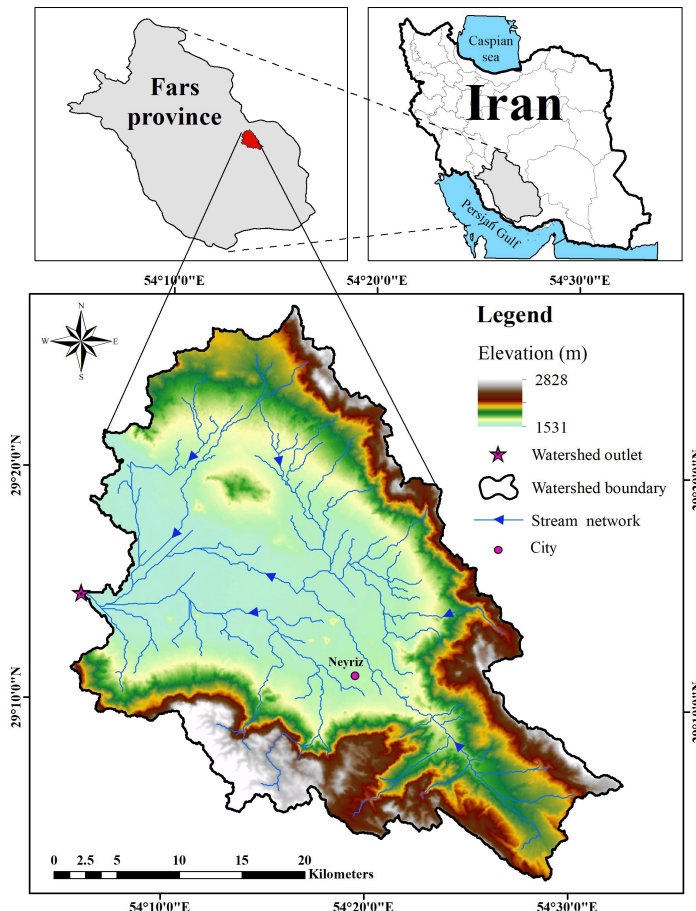
رسوب هستند؛ امکان استفاده از آن حتی در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار کشور نیز فراهم است. بنابراین، بررسی الگوی مکانی شار رسوب در مقیاس حوزه آبخیز در تدوین برنامه‌های مدیریت جامع حوزه آبخیز و اقدامات مهار فرسایش و رسوب از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است. نکته حائز اهمیت این است که اگر چه شاخص‌ها و مدل‌های مختلفی در این زمینه توسعه یافته‌اند؛ اما تاکنون عملکرد آن‌ها بر اساس داده‌های مشاهداتی و روش‌های آماری مورد مقایسه قرار نگرفته است. به این سبب، هدف از انجام این تحقیق، تحلیل الگوی شار رسوب حوزه آبخیز نی‌ریز در شرق استان فارس، مبتنی بر شاخص‌های پیوستگی رسوب و ظرفیت انتقال رسوب و مقایسه عملکرد آن‌ها بر اساس شواهد رسوب میدانی است. این حوزه آبخیز یکی از مناطق فاقد ایستگاه هیدرومتری کشور است که اطلاعات دقیقی از وضعیت و تغییرات مکانی شار رسوب آن در دست نیست و به همین دلیل در این تحقیق برای مطالعه انتخاب شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز نی‌ریز در شرق استان فارس در محدوده طول جغرافیایی $30^{\circ} 1' 54''$ تا $54^{\circ} 15' 32''$ شرقی و عرض جغرافیایی $10^{\circ} 2' 29''$ تا $25^{\circ} 10' 27''$ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوزه آبخیز در نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ شماره NH40-9 نی‌ریز، ۱:۵۰۰۰۰ نی‌ریز و ۱:۲۵۰۰۰ شماره IINW ۶۸۴۸ نی‌ریز و روی آبرفت‌های حاصل از فرسایش پهنه‌های مارنی میوسن ایجاد شده است که در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ نی‌ریز قرار دارد. مراتع ضعیف با مساحت بیش از ۵۷ درصد بخش اعظم کاربری اراضی حوزه آبخیز را شامل شده است. کشاورزی دیم حدود ۱۵ درصد، اراضی بایر ۱۱ درصد، باغ‌ها، اراضی شور، جنگل‌های تنک، مسکونی و پهنه‌های آبی، بقیه منطقه را پوشش داده‌اند. مساحت این حوزه آبخیز ۱۰۱۶۹۷ هکتار بوده و آبراهه فعال نیز دارد (Soleimanpour et al., 2024). ارتفاع متوسط منطقه ۱۶۳۰ متر از سطح دریا و شیب متوسط منطقه سه درصد است. تیپ اراضی در این حوزه آبخیز دشت دامنه‌ای است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن گسترده اقلیم خشک بیابانی سرد است. متوسط دمای سالانه و بارندگی سالانه طبق آمار ۲۱ ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۹)، به ترتیب معادل ۱۹/۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۹۷/۹۶ میلی‌متر است و حداکثر بارندگی روزانه در دوره مذکور برابر با ۶۷/۸ میلی‌متر بوده است (Website of the General Department of Meteorology) (of Fars Province, 2023).

پیوستگی رسوب است که بر جریان متصل رواناب در سطح دامنه تأثیر گذاشته و باعث ایجاد ناهمگنی مکانی در پیوستگی دامنه و حوزه آبخیز می‌شود. در ادامه، (Najafi et al. 2018) در حوزه آبخیز تهم زنجان نشان دادند که شاخص پیوستگی رسوب قادر به بررسی خصوصیات سامانه آبخیز است و پتانسیل جابه‌جایی ذرات رسوب در سراسر این سامانه را بررسی می‌کند. در تحقیق دیگری، (Llena et al. 2019) رویکرد پیوستگی رسوب را به‌عنوان ابزاری مفید برای شناسایی خطرات بالقوه مرتبط با تغییرات مورفولوژیکی و کاربری زمین شامل زیرساخت‌های جاده‌ای، معرفی کردند. در تحقیقی، (Zingaro et al. 2019) با بررسی پیوستگی رسوب، اقدام به تولید نقشه شاخص پیوستگی جریان رسوب کردند و بیان داشتند که نقشه تولید شده، عملکرد خوبی در پیش‌بینی موقعیت‌ها و مسیرهای تجمع رسوبات ارائه کرده است. از سایر تحقیقات، (Buter et al. 2020) سامانه اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فناوری‌های نوین پهبادی و اسکن لیزر هوایی را در تحلیل پیوستگی رسوب مؤثر تشخیص دادند و مفهوم پیوستگی رسوب را به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت اراضی، سودمند اعلام کردند. نتایج تحقیق (Zingaro et al. 2020) نیز نشان داد که تطابق خوبی بین مناطق دارای پیوستگی رسوب بالا با وقوع سیل وجود دارد و عملکرد تشخیص شاخص پیوستگی رسوب جریان را تأیید کردند. در استان گلستان نیز، (Arabkhedri et al. 2021) رابطه میان تولید رسوب ویژه و شاخص پیوستگی رسوب را در ۱۱ حوزه آبخیز کوچک که پتانسیل فرسایش یکسانی دارند را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد در مواقعی که اطلاعاتی از میزان تولید رسوب در دسترس نیست؛ شاخص پیوستگی رسوب می‌تواند اطلاعات مفیدی از فرآیند انتقال رسوب در حوزه آبخیز ارائه نماید. در خامسان استان کردستان، (Rahmati et al. 2022) تأثیر اقدامات آبخیزداری بر پیوستگی رسوب در زیرحوزه‌های آبخیز نمونه و شاهد را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که سازه‌های آبخیزداری موجب کاهش پیوستگی رسوب آبراهه شده و دامنه اثرات آن‌ها از ۵/۹ تا ۹۲ درصد متغیر بود که موقعیت مکانی قرارگیری سازه نیز می‌تواند نقش مهمی در میزان تأثیر آن بر شار رسوب داشته باشد. همچنین، (Batista et al. 2022) کارایی شاخص پیوستگی رسوب در فرسایش خاک در اراضی کشاورزی را مورد تأکید قرار دادند. در نهایت، (Liu et al. 2022) شاخص پیوستگی رسوب را به‌عنوان ابزاری آسان و مناسب برای مطالعه فرسایش خاک و تحویل رسوب در حوزه‌های آبخیز معرفی کردند. با توجه به موارد فوق و از آنجایی که شاخص‌های پیوستگی رسوب و ظرفیت انتقال رسوب بدون نیاز به داده‌های ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی، قادر به ارائه وضعیت پتانسیل انتقال



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز نی ریز در ایران و استان فارس
Figure 1- Location of Neyriz Watershed in Iran and Fars Province

در رابطه بالا، ISC شاخص پیوستگی رسوب، D_{up} خصوصیات بالادست حوزه آبخیز و D_{dn} ویژگی های پایین دست حوزه آبخیز هستند. هر چه مقدار مؤلفه ISC بالاتر باشد، پیوستگی رسوب حوزه آبخیز بیشتر بوده و رسوبات راحت تر و در زمان کمتری به خروجی حوزه آبخیز می رسند. مؤلفه D_{up} تعیین کننده پتانسیل انتقال رسوب از مناطق بالادست حوزه آبخیز است و بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$D_{up} = \bar{W} \sqrt{S} \quad (2)$$

در رابطه فوق پارامترهای \bar{W} و S به ترتیب متوسط عامل وزن داده شده و متوسط شیب بالادست حوزه آبخیز هستند. عامل A در رابطه شاخص پیوستگی، مساحت بالادست حوزه آبخیز است. هنگامی که شاخص پیوستگی برای یک پیکسل محاسبه می شود، عامل A مساحت بالادست آن پیکسل است. عامل وزن داده شده می تواند بر اساس نظر کارشناس انتخاب شود. در حالت پیش فرض رابطه، از نقشه شاخص ناهمواری^۱

۲-۲- روش تحقیق

۲-۲-۱- تهیه مدل رقمی ارتفاع

مدل رقمی ارتفاعی زمین تغییرات ارتفاعی زمینه را به صورت پیوسته نشان می دهد و منای محاسبه بسیاری از متغیرهای ژئومورفومتری و فیزیوگرافی حوزه آبخیز است. نقشه مدل رقمی ارتفاعی زمین مربوط به گستره حوزه آبخیز نی ریز با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر از سایت EarthData که به مدل رقمی ارتفاعی آلوس پالسا شهرت دارد دریافت شد (<https://search.asf.alaska.edu>).

۲-۲-۲- شاخص پیوستگی رسوب

در این تحقیق، شاخص پیوستگی رسوب با در نظر گرفتن ویژگی های بالادست و پایین دست حوزه آبخیز، بر اساس رابطه ارائه شده توسط Borselli et al. (2008) محاسبه شد:

$$ISC = \log_{10} \left[\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right] \quad (1)$$

¹ Roughness index

در رابطه مذکور AS مساحت بالادست پیکسل، B شیب زمین برحسب درجه، m ضریب مساحت مشارکت‌کننده در تولید رواناب و n ضریب شیب زمین است. مقدار m ، غالباً 0.4 و n $1/4$ در نظر گرفته می‌شود. این شاخص در تحلیل‌های فرآیندی فرسایش و رسوب حوزه آبخیز نیز کاربرد وسیعی دارد (Kheir et al. 2007). به این منظور، شاخص ظرفیت انتقال رسوب برای هر پیکسل از حوزه آبخیز نی‌ریز، در نرم‌افزار SAGA-GIS محاسبه و نقشه انتقال رسوب تهیه شد.

۲-۲-۴- صحت‌سنجی و تحلیل شواهد میدانی

اتکا به نتایج تمامی شاخص‌ها و مدل‌های پیش‌بینی که برای توصیف وضعیت شار رسوب یک حوض آبخیز مطرح شده‌اند، نیازمند بازدیدهای میدانی و بررسی شواهد هستند. در بازدیدهای میدانی این تحقیق، شواهد سطح زمین که نشان‌دهنده پدیده حرکت و انتقال رسوب بودند، موقعیت مکانی آن‌ها ثبت شد. به‌عنوان مثال، شیارهای بزرگ ایجاد شده در سطح زمین و نزدیکی آبراه‌ها که در اثر تنش برشی و همگرایی جریان‌ها به‌وجود آمده‌اند و رسوبات بالادست از آن میسرها به راحتی به شبکه زهکشی منتقل می‌شوند، یک شاهد عینی برای شار رسوب هستند. هم‌چنین، به‌منظور افزایش اطمینان از تحلیل‌های مرحله صحت‌سنجی از سه نفر کارشناس باتجربه در زمینه فرسایش و رسوب و دارای شناخت کافی از منطقه، در بازدیدهای میدانی و ثبت شواهد مربوط به انتقال رسوب دعوت شد.

به‌منظور ارزیابی کمی دقت پیش‌بینی شاخص‌های پیوستگی رسوب و ظرفیت انتقال رسوب از سه معیار کمی آماری شامل آماره مهارت صحیح^۶ (TSS)، کارایی^۷ (E) و آماره امتیاز^۸ F^A استفاده شد. این معیارهای ارزیابی که براساس ماتریس خطا محاسبه می‌شوند، در پیش‌بینی‌های موضوعی مختلف در علوم محیطی از جمله شناسایی منابع رسوب، پیش‌بینی جریان گلی^۹، زمین‌لغزش و فرسایش خندقی کاربرد وسیعی دارند (Frattini et al. 2010; Hirschberg et al. 2021; Soleimanpour et al. 2022; Derakhshan-Babaei et al. 2022). معیارهای آماره مهارت صحیح، کارایی و امتیاز F با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه شدند (Allouche et al. 2006; Rahmati et al. 2019):

$$TSS = \frac{TP}{TP + FN} - \frac{FP}{FP + TN} \quad (7)$$

$$TSS = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (8)$$

حوزه آبخیز به‌عنوان عامل وزن داده شده انتخاب شده است و به‌نام $W_{Cavalli}$ شناخته شده است که بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$W_{Cavalli} = 1 - \left[\frac{RI}{RI_{max}} \right] \quad (3)$$

در این رابطه، RI مقدار ناهمواری هر پیکسل از حوزه آبخیز است و در نرم‌افزار SAGA-GIS محاسبه شد. پارامتر RI_{max} بیش‌ترین مقدار ناهمواری در مقیاس حوزه آبخیز است. مقدار پارامتر RI نیز بر اساس رابطه زیر به‌دست آمد (Cavalli and Marchi, 2008):

$$RI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{25}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، مقدار X_i نشان‌دهنده ارتفاع پیکسل‌های حوزه آبخیز و X_m ارتفاع متوسط حوزه آبخیز هستند که در یک فیلتر متحرک پنج در پنج برای محاسبه شاخص ناهمواری استفاده می‌شوند. مؤلفه D_{dn} در رابطه اصلی پیوستگی رسوب نیز شرایط محیط را برای انتقال رسوب از یک منبع به خروجی (یا مخزن) ارزیابی می‌نماید. مؤلفه D_{dn} با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Heckmann et al., 2018):

$$D_{dn} = \sum \frac{d_i}{W_i S_i} \quad (5)$$

در آن، d_i طول مسیر جریان، W_i مقدار عامل وزنی و S_i مقدار شیب در پیکسل i است. عموماً شاخص پیوستگی رسوب در دو زمینه پیوستگی رسوب ساختاری^۱ و فرآیندی^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. براساس هدف این تحقیق و با عنایت به این‌که ماهیت شاخص ظرفیت انتقال رسوب مبتنی بر توپوگرافی سطح زمین است، پیوستگی رسوب ساختاری مدنظر قرار گرفت. شاخص پیوستگی رسوب ساختاری به ارتباط فیزیکی^۳ میان بخش‌های مختلف یک حوزه آبخیز می‌پردازد.

۲-۲-۳- شاخص ظرفیت انتقال رسوب

شاخص ظرفیت انتقال رسوب^۴ (STCI) با استفاده از تئوری توان جریان واحد^۵ (USPT) تعریف شده است که به‌عنوان یکی از عوامل ژئومورفومتری در مطالعات حوزه آبخیز به‌طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته است. این شاخص بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (De Roo, 1998):

$$STCI = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \cdot \text{stn} \left(\frac{B}{0.896} \right)^n \quad (6)$$

¹ Structural sediment connectivity

² Functional sediment connectivity

³ Physical linkage

⁴ Sediment transport capacity index

⁵ Unit stream-power theory

⁶ True skill statistic

⁷ Efficiency

⁸ F-score

⁹ Debris-flow

به‌منظور تشریح بهتر الگوی تغییرات مکانی شاخص پیوستگی رسوب، سه بخش با فواصل مختلف از شبکه زهکشی و ناهمواری در نقشه، بزرگ‌نمایی شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود وضعیت پیوستگی رسوب در بخش بزرگ‌نمایی اول (الف) نقشه، کاملاً پیوسته بوده و رسوبات می‌توانند در نهایت به شبکه زهکشی انتقال یابند. در قسمت بزرگ‌نمایی دوم (ب) نقشه، یک وضعیت متفاوت مشاهده می‌شود. به گونه‌ای که مقدار شاخص پیوستگی رسوب کم بوده و اتصال ساختاری سطح دامنه و شبکه زهکشی، انتقال رسوب به سادگی میسر نیست.

در تحلیل بخش بزرگ‌نمایی سوم (ج) نقشه شاخص پیوستگی رسوب نیز می‌توان وضعیت شار رسوب را پیوسته تلقی کرد و رسوبات پس از پیمودن مسافت نسبتاً طولانی در نهایت به نزدیک‌ترین شاخه شبکه زهکشی حوزه آبخیز منتقل می‌شوند. اگر چه این حوزه آبخیز از نظر توپوگرافی نسبتاً هموار است و از تنوع و پیچیدگی ریخت‌شناسی زیادی برخوردار نیست؛ اما با این وجود، تغییرات مکانی شاخص پیوستگی رسوب قابل ملاحظه است. به عبارت دیگر، وضعیت شار رسوب قسمت‌های مختلف حوزه آبخیز نی‌ریز بر اساس شاخص پیوستگی رسوب قابل تفسیر است. این شاخص با در نظر گرفتن خصوصیات بالادست هر نقطه و خصوصیات مسیر انتقال تا هدف تحویل‌گیرنده رسوب، اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت سرزمین ارائه می‌دهد. یافته‌های این بخش با نتایج تحقیق Najafi et al. (2017) هم‌خوانی دارد به گونه‌ای که مناطق نزدیک شبکه زهکشی که درجه شیب بالادست آن‌ها زیاد است، مقدار شاخص پیوستگی رسوب بالاتری داشته و به دلیل مهیا نبودن شرایط تله‌اندازی رسوب، از پتانسیل بیش‌تری برای انتقال رسوب برخوردارند.

$$TSS = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (9)$$

در روابط بالا، TN، FP، FN و TP به ترتیب صحیح منفی^۱، نادرست مثبت^۲، نادرست منفی^۳ و صحیح مثبت^۴ و تشکیل‌دهنده ماتریس خطا^۵ هستند. ماتریس خطا و مؤلفه‌های آن در جدول ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق، بر اساس بازدیدهای میدانی از بخش‌های مختلف حوزه آبخیز، ۳۰ موقعیت که دارای شواهد انتقال رسوب بودند، به عنوان نقاط مشاهداتی رخداد انتقال رسوب ثبت شدند. ۳۰ موقعیت دیگر که فاقد آثار و شواهد انتقال رسوب بودند نیز به عنوان نقاط مشاهداتی عدم رخداد انتقال رسوب به پایگاه داده صحت‌سنجی اضافه شدند. مقادیر متناظر هر یک از شاخص‌ها نیز در سامانه اطلاعات جغرافیایی استخراج شد و بر اساس اطلاعات موجود، ماتریس خطا برای هر شاخص تکمیل شد. زیرا معیارهای ارزیابی امکان مقایسه کمی شاخص‌های شار رسوب را فراهم می‌کنند.

جدول ۱- مؤلفه‌های ماتریس خطا به منظور انجام صحت‌سنجی
Table 1- The components of the error matrix to perform validation

پیش‌بینی		مشاهداتی
عدم وجود پتانسیل انتقال - رسوب (-)	وجود پتانسیل انتقال - رسوب (+)	
عدم وجود شواهد انتقال رسوب (-)	صحیح منفی (TN)	عدم وجود شواهد انتقال رسوب (-)
وجود شواهد انتقال رسوب (+)	نادرست منفی (FN)	وجود شواهد انتقال رسوب (+)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوی مکانی شاخص پیوستگی رسوب

نقشه شاخص پیوستگی رسوب حوزه آبخیز نی‌ریز استان فارس در شکل ۲ نشان داده شده است. مقدار این شاخص در این حوزه آبخیز از ۷/۲۴- تا ۲/۴۳ متغیر بود و مقدار میانه آن ۴/۳۶- به‌دست آمد. الگوی فضایی شاخص پیوستگی رسوب در این حوزه آبخیز به گونه‌ای است که بخش‌های میانی و غربی از مقدار کم و بخش‌های شمالی، جنوبی و شرقی مقادیر بیش‌تری را به خود اختصاص داده‌اند. از آنجایی که در این تحقیق، شبکه زهکشی به‌عنوان هدف تحویل‌گیرنده رسوب معرفی شد، بخش‌هایی از دامنه‌های سطح حوزه آبخیز که شرایط تولید و انتقال رسوب را داشته و از نظر مسیر انتقال به شبکه زهکشی متصل بوده‌اند، مقدار شاخص پیوستگی بیش‌تری را نشان دادند.

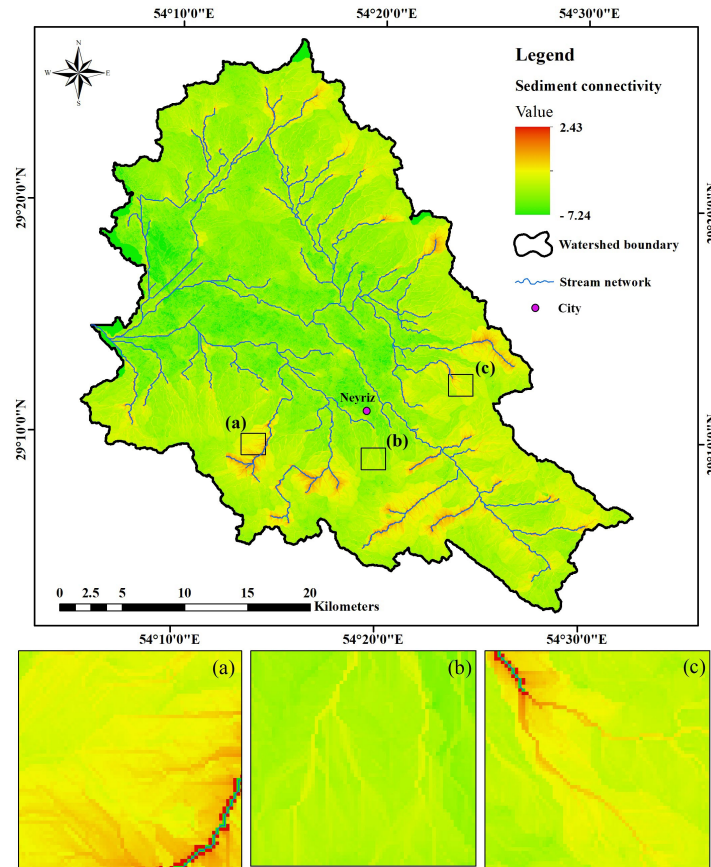
¹ True negative

² False positive

³ False negative

⁴ True positive

⁵ Error matrix



شکل ۲- نقشه شاخص پیوستگی رسوب حوزه آبخیز نیریز استان فارس
Figure 2- Sediment connectivity index map of Neyriz Watershed in Fars province

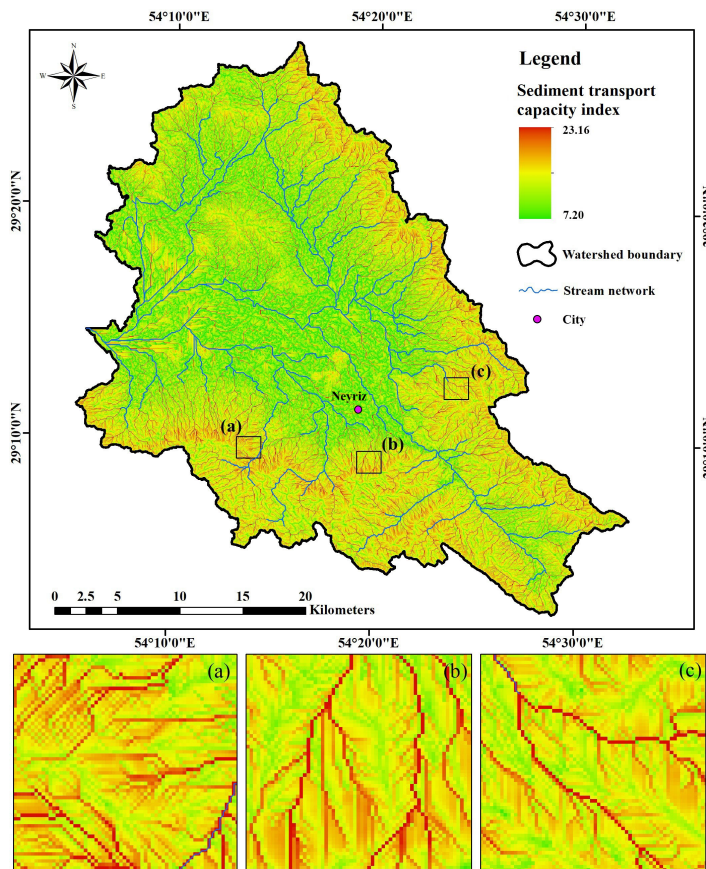
سوم (ج) نیز پتانسیل زیاد انتقال رسوب از اراضی بالادست به اراضی پایین دست به روشنی نشان داده شده است. بر اساس تحلیل‌های مکانی منتج شده از نقشه شاخص ظرفیت انتقال رسوب، می‌توان استنباط کرد که شاخص ظرفیت انتقال رسوب تابع شرایط محلی هر سلول بوده و در قسمت‌هایی که شیب زمین زیاد است، انرژی جریان قابل توجه بوده و به تبعیت از آن، مقدار شاخص ظرفیت انتقال رسوب بالا به دست آمده است. این ویژگی شاخص ظرفیت انتقال رسوب در این تحقیق با یافته‌های Arab et al. (2020) در حوزه آبخیز بهادریبگ انطباق کامل دارد؛ به گونه‌ای که ایشان نیز شاخص ظرفیت انتقال رسوب را تا حد زیادی هم راستا با شاخص توان جریان^۱ (SPI) دانسته‌اند.

۳-۲- الگوی مکانی شاخص ظرفیت انتقال رسوب

نقشه شاخص ظرفیت انتقال رسوب حوزه آبخیز نیریز استان فارس در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار شاخص ظرفیت انتقال رسوب در این حوزه آبخیز از ۷/۲ تا ۲۳/۱۶ متغیر بوده و میانگین آن ۱۰/۱۹ است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار این شاخص در بخش‌های حاشیه حوزه آبخیز که اراضی شیب‌دار قرار دارند، زیاد بوده و بخش‌های میانی حوزه آبخیز از مقدار کمی برخوردارند.

به منظور مقایسه بهتر الگوی مکانی شاخص ظرفیت انتقال رسوب با شاخص پیوستگی رسوب، سه بخش که در نقشه شاخص پیوستگی رسوب بزرگ‌نمایی شده بود؛ در نقشه شاخص ظرفیت انتقال رسوب نیز مدنظر قرار گرفته است. در بخش بزرگ‌نمایی اول (الف) نقشه شاخص ظرفیت انتقال رسوب مشاهده می‌شود که پتانسیل انتقال رسوب از اراضی به شبکه زهکشی زیاد به دست آمده است. در بخش بزرگ‌نمایی دوم (ب) نقشه نیز مشاهده می‌شود که مقدار شاخص ظرفیت انتقال رسوب بالا بوده و بر اساس این شاخص، رسوبات به سادگی می‌توانند به شبکه زهکشی منتقل شوند. هم‌چنین، در بخش بزرگ‌نمایی

¹ Stream power index



شکل ۳- نقشه شاخص ظرفیت انتقال رسوب حوزه آبخیز نی‌ریز استان فارس
Figure 3- Sediment transport capacity index map of Neyriz Watershed in Fars province

شاخص ظرفیت انتقال رسوب به‌دست آمده و نشان می‌دهد که این شاخص در هفت موقعیت به اشتباه پتانسیل شار رسوب را بالا پیش‌بینی نموده در حالی که در مشاهدات میدانی صحت نداشته است. این درحالی است که این موضوع در ارزیابی شاخص پیوستگی رسوب تنها در دو مورد مشاهده شده است (جدول ۲). دلایل اصلی تفاوت عملکرد شاخص‌ها به مدل مفهومی آن‌ها ارتباط دارد؛ به‌گونه‌ای که شاخص پیوستگی رسوب با در نظر گرفتن وضعیت بالادست هر نقطه و مسیر انتقال رسوب آن به هدف تحویل‌گیرنده فرآیند شار رسوب را در نظر می‌گیرد. این در حالی است که شاخص ظرفیت انتقال رسوب، تنها به شرایط نقطه مورد نظر بسنده کرده و صرفاً پتانسیل حرکت رسوب را توصیف می‌نماید و قابلیت برای در نظر گرفتن ادامه مسیر ندارد. این موارد تأیید کننده نتایج تحقیقات (Llena et al. (2019), Najafi et al. (2018), Buter et al. (2020), Zingaro et al. (2019), Arabkhedri et al. (2021) و Liu et al. (2022) است که بر اساس آن مشخص شد که شاخص پیوستگی رسوب به‌دلیل محاسبه سریع، هزینه کم و قابلیت استفاده از داده‌های زودیافت

۳-۳- صحت‌سنجی و مقایسه عملکرد شاخص‌های شار

رسوب

بر اساس تحلیل شواهد در بازدیدهای میدانی بخش‌های مختلف حوزه آبخیز نی‌ریز، تغییرات مکانی و تنوع وضعیت شار رسوب در این حوزه آبخیز مورد تأیید قرار گرفت. نتایج محاسبه معیارهای آماری کمی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار آماره مهارت صحیح (TSS)، کارایی (E) و امتیاز F در ارزیابی شاخص پیوستگی رسوب به‌ترتیب ۰/۸۳۳، ۰/۹۱۶ و ۰/۹۱۵ به‌دست آمدند. از سویی دیگر، آماره مهارت صحیح (TSS)، کارایی (E) و امتیاز F برای شاخص ظرفیت انتقال رسوب به‌ترتیب ۰/۶۳۳، ۰/۸۱۶ و ۰/۸۲۵ شدند. بنابراین، هر سه معیار ارزیابی مؤید این موضوع هستند که شاخص پیوستگی رسوب عملکرد بهتری نسبت به شاخص ظرفیت انتقال رسوب از نظر توصیف پتانسیل شار رسوب در بخش‌های مختلف حوزه آبخیز نی‌ریز داشته است. مؤلفه‌های ماتریس خطا می‌توانند در تحلیل نواقص و مزایای هر یک از شاخص‌های مورد بررسی اطلاعات مفیدی را فراهم سازند. عدد هفت برای مقدار مؤلفه نادرست مثبت (FP)، در

دستگاه‌های اجرایی در حوزه‌های آبخیز کشور پیشنهاد می‌شود. به‌منظور بررسی‌های بیش‌تر و آینده‌پژوهی بهتر، مطالعه پیوستگی رسوب در یک حوزه آبخیز با اطلاعات دقیق و مقایسه آن با نتایج منشاء‌یابی رسوبات می‌تواند گام مهمی در پیشبرد و ارتقاء مدیریت رسوب در حوزه‌های آبخیز کشور باشد.

سپاسگزاری

این اثر بر گرفته از بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی با عنوان "ارزیابی و اصلاح شاخص پیوستگی رسوب برای کاربرد در حوزه‌های آبخیز هموار (تحقیق موردی: حوزه آبخیز نی‌ریز استان فارس)"، با شماره مصوب ۰۰۹۷۰-۰۵۵-۲۹-۵۰-۲ و شماره فروست ۶۵۷۲۴ مصوب در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری و پشتیبانی‌های پژوهشکده و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سپاسگزاری و قدردانی نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این تحقیق وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج، در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

سید مسعود سلیمان‌پور: نگارش نسخه اولیه مقاله، مفهوم‌سازی؛ امید رحمتی: نرم‌افزار، ویرایش مقاله، تحلیل داده؛ محمود عرب‌خدیری: راهنمایی، ویرایش مقاله؛ جان تیفن‌باچر: راهنمایی، ویرایش مقاله.

منابع

تارنمای اداره کل هواشناسی استان فارس (۱۴۰۲). گزارش‌گیری آمار هواشناسی شهرستان‌های استان فارس <https://www.farsmet.ir/ReportAmar.aspx>
رحمتی، امید، سلیمان‌پور، سید مسعود عرب‌خدیری، محمود، مهرجو، سردار، کلانتری، زهرا، کرما، استفانو، کوالی، مارکو، و بهمنی، عارف (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر اقدامات آبخیزداری بر پیوستگی رسوب در حوزه آبخیز خامسان استان کردستان. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۹۸ صفحه.
سلیمان‌پور، سید مسعود، رحمتی، امید، عرب‌خدیری، محمود، و تیفن‌باچر، جان (۱۴۰۳). ارزیابی و اصلاح شاخص پیوستگی رسوب برای کاربرد در حوضه‌های هموار (تحقیق موردی: حوزه آبخیز

(مانند مدل رقمی ارتفاع)، یک ابزار مفید و مناسب برای مطالعه فرسایش خاک و تحویل رسوب در مقیاس حوزه آبخیز است. زیرا در مواقعی که اطلاعاتی از میزان تولید رسوب در دسترس نیست؛ شاخص پیوستگی رسوب می‌تواند اطلاعات مفیدی از فرآیند انتقال رسوب در حوزه آبخیز ارائه نماید. یافته‌های این تحقیق تأییدکننده مزایای استفاده از شاخص پیوستگی رسوب در شناسایی و اولویت‌بندی بخش‌های مختلف یک حوزه آبخیز برای اجرای اقدامات مدیریت رسوب است که با نتایج مطالعه مروری (Gerami et al. (2023) مطابقت دارد. همچنین، Gay et al. (2016) نیز تأیید نمودند که شاخص پیوستگی رسوب حتی در مناطق هموار نیز قابلیت بالایی در ترسیم الگوی شار رسوب حوزه آبخیز دارد که مؤید یافته این تحقیق است.

جدول ۲- نتایج ارزیابی عملکرد شاخص‌های پیوستگی رسوب و ظرفیت انتقال رسوب

معیار ارزیابی	پیوستگی رسوب	ظرفیت انتقال رسوب
صحیح منفی (TN)	28	23
نادرست مثبت (FP)	2	7
نادرست منفی (FN)	3	4
صحیح مثبت (TP)	27	26
آماره مهارت صحیح (TSS)	0.833	0.633
کارایی (E)	0.919	0.816
امتیاز F (F-score)	0.915	0.825

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس معیارهای ارزیابی آماری، شاخص پیوستگی رسوب بهتر توانسته است که وضعیت شار رسوب را در مقیاس حوزه آبخیز توصیف نماید و با نتایج آن در زمینه الگوی مکانی شار رسوب واقعیت‌های میدانی مطابقت بیش‌تری دارد. به‌طوری‌که شاخص پیوستگی رسوب علاوه‌بر در نظر گرفتن خصوصیات محدوده بالادست هر نقطه از حوزه آبخیز، امکان در نظر گرفتن مسیر انتقال ذره رسوب تا محل هدف تحویل‌گیرنده (مانند نزدیک‌ترین شاخه شبکه زهکشی) را میسر نموده است.
بر اساس یافته‌های به‌دست آمده در این تحقیق، اگر چه شاخص ظرفیت انتقال رسوب در برخی از بخش‌های حوزه آبخیز نی‌ریز استان فارس هم‌راستا با شاخص پیوستگی رسوب بوده است؛ اما این شاخص به‌دلیل ماهیت مبتنی بر انرژی جریان، صرفاً شرایط محلی نقاط را در نظر گرفته و از خصوصیات محدوده بالادست و فرآیند انتقال ذره رسوب به پایین‌دست چشم‌پوشی می‌نماید. از این‌رو، استفاده از شاخص پیوستگی رسوب در مطالعات فرسایش و رسوب و اقدامات آبخیزداری

- فرسایشی و رسوب‌گذاری در خاک شخم‌خورده با استفاده از شاخص اتصال رسوب. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۹۶ صفحه.
- نجفی، سعید، صادقی، سید حمیدرضا، و حکمن، تویاس (۱۳۹۶). تغییرات زمانی و مکانی الگوی اتصال ساختاری رسوب در حوزه آبخیز تهم‌چای زنجان. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳(۳): ۱۳۱-۱۴۷. doi: 10.22069/IJWFST.2017.11220.2557
- نجفی، سعید، صادقی، سید حمیدرضا، و حکمن، تویاس (۱۳۹۷). تحلیل الگوی اتصال ساختاری رسوب در حوزه آبخیز تهم‌چای زنجان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۰(۲): ۱۹۲-۲۰۳. doi: 10.22092/ijwmse.2018.116466
- نریز استان فارس). گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۸۴ صفحه.
- گرامی، زهرا، عرب‌خدیری، محمود، کریمی، احمد، و اسدی، حسین (۱۴۰۱). مروری بر مبانی و کاربرد شاخص اتصال‌رسوبی در مطالعات فرسایش خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳(۹): ۲۱۹۱-۲۲۰۸. doi: 10.22059/IJSWR.2022.345385.669310
- عرب، سعید، سگر، یاسمین، نادری خوراسگانی، مهدی، اسدی، محمد، و کیا، پروین (۱۳۹۹). تخمین دبی رواناب، رسوب و شناخت عوامل ژئومورفومتریک به‌کمک DTM در حوزه آبخیز بهادریبگ. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲(۲): ۴۶۷-۴۸۰. doi: 10.22092/ijwmse.2019.123155.1539
- عرب‌خدیری، محمود، گرامی، زهرا، بیات، رضا، نبی‌پیشکریان، سعید، پشوتنی، پرویز، و شکری‌سقزچی، ایرج (۱۴۰۱). بررسی مناطق *Processes and Landforms*, 40(2), 177-188. doi: 10.1002/esp.3635
- Buter, A., Spitzer, A., Comiti, F., & Heckmann, T. (2020). Geomorphology of the Sulden River basin (Italian Alps) with a focus on sediment connectivity. *Journal of Maps*, 16(2), 890-901. doi: 10.1080/17445647.2020.1841036
- Cavalli, M., & Marchi, L. (2008). Characterization of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 8, 323-333. doi: 10.5194/nhess-8-323-2008
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31-41. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007
- De Roo, A.P.J., (1998). Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS. *Hydrological Processes*, 12(6), 905-922. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199805)12:6<905::AID-HYP662>3.0.CO;2-2
- Derakhshan-Babaei, F., Mirchooli, F., Mohammadi, M., Nosrati, K., & Egli, M. (2022). Tracking the origin of trace metals in a Watershed by identifying fingerprints of soils, landscape and river sediments. *Science of The Total Environment*, 835, 155583. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155583
- Fratini, P., Crosta, G., & Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*, 111(1-4), 62-72. doi: 10.1016/j.enggeo.2009.12.004
- Fryirs, K.A., Brierley, G.J., Preston, N.J., & Kasai, M. (2007). Buffers, barriers and blankets: the (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 70(1), 49-67. doi: 10.1016/j.catena.2006.07.007
- Gay, A., Cerdan, O., Mardhel, V., & Desmet, M. (2016). Application of an index of sediment

References

- connectivity in a lowland area. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 280-293. doi:10.1007/s11368-015-1235-y
- Gerami, Z., Arabkhedri, M., Karimi, A., & Asadi, H. (2023). A Review of fundamentals and applications of sediment connectivity index in soil erosion studies. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2191-2208. doi: 10.22059/IJSWR.2022.345385.669310 [In Persian]
- Heckmann, T., Cavalli, M., Cerdan, O., Foerster, S., Javaux, M., Lode, E., Smetanova, A., Vericat, D., & Brardinoni, F. (2018). Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth-Science Reviews*, 187(12), 77-108. doi:10.1016/j.earscirev.2018.08.004
- Hirschberg, J., Badoux, A., McArdell, B.W., Leonarduzzi, E. & Molnar, P. (2021). Evaluating methods for debris-flow prediction based on rainfall in an Alpine catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(9), 2773-2789. doi:10.5194/nhess-21-2773-2021
- Houben, P. (2008). Scale linkage and contingency effects of field-scale and hillslope-scale controls of long-term soil erosion: Anthropogeomorphic sediment flux in agricultural loess Watersheds of Southern Germany. *Geomorphology*, 101(1), 172-191. doi:10.1016/j.geomorph.2008.06.007
- Kalantari, Z., Cavalli, M., Cantone, C., Crema, S., & Destouni, G. (2017). Flood probability quantification for road infrastructure: Data-driven spatial-statistical approach and case study applications. *Science of the Total Environment*, 581-582, 386-398. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.147
- Keesstra, S., Nunes, J.P., Saco, P., Parsons, T., Poepl, R., Masselink, R., & Cerda, A. (2018). The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics?. *Science of The Total Environment*, 644, 1557-1572. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.342
- Kheir, R.B., Wilson, J., & Deng, Y. (2007). Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(12), 1770-1782. doi:10.1002/esp.1501
- Liu, W., Shi, C., Ma, Y., & Wang, Y. (2022). Evaluating sediment connectivity and its effects on sediment reduction in a catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 408, 115566. doi:10.1016/j.geoderma.2021.115566
- Llena, M., Vericat, D., Cavalli, M., Crema, S., & Smith, M.W. (2019). The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments. *Science of the Total Environment*, 660, 899-912. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.479
- López-Vicente, M., & Ben-Salem, N. (2019). Computing structural and functional flow and sediment connectivity with a new aggregated index: A case study in a large Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*, 651, 179-191. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.170
- Lu, X., Li, Y., Washington-Allen, R.A., & Li, Y. (2019). Structural and sedimentological connectivity on a rilled hillslope. *Science of the Total Environment*, 655, 1479-1494. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.137
- Mishra, K., Sinha, R., Jain, V., Nepal, S., & Uddin, K. (2019). Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin. *Science of The Total Environment*, 661, 251-265. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.01.118
- Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., & Sadeghi, S.H.R. (2021). Sediment connectivity concepts and approaches. *Catena*, 196, 104880. doi:10.1016/j.catena.2020.104880
- Najafi, S., Sadeghi, S.H.R., & Heckmann, T. (2017). Temporospatial variations of structural sediment connectivity patterns in Taham-Chi Watershed in Zanjan Province, Iran. *Water and Soil Conservation*, 24(3), 131-147. doi: 10.22069/JWFST.2017.11220.2557 [In Persian]
- Najafi, S., Sadeghi, S.M., & Heckmann, T. (2018). Analyzing structural sediment connectivity pattern in Taham Watershed, Iran. *Watershed Engineering and Management*, 10(2), 192-203. doi:10.22092/ijwmse.2018.116466 [In Persian]
- Poepl, R.E., Fryirs, K.A., Tunnickliffem, J., & Brierley, G.J. (2020). Managing sediment (dis) connectivity in fluvial systems. *Science of the Total Environment*, 736, 139627. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139627
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the anthropocene: research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(1), 64-84. doi:10.1002/esp.4250
- Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Deo, R.C., Conoscenti, C., Lombardo, L., Dayal, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Pourghasemi, H.R., Kumar, S., & Bui, D.T. (2019). PMT: New analytical framework for automated evaluation of geo-environmental modelling approaches. *Science of the total environment*, 664, 296-311. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.017
- Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., Arabkhedri, M., Mehrjo, S., Kalantari, Z., Crema, S., Cavalli, M., & Bahmani, A. (2022). Evaluating the impact of Watershed management measures on sediment connectivity in the Khamesan Watershed, Kurdistan province. Final report of research project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 98 pages. [In Persian]

- Soleimanpour, S.M., Pourghasemi, H.R., & Zare, M. (2021). A comparative assessment of gully erosion spatial predictive modeling using statistical and machine learning models. *Catena*, 207, 105679. doi:10.1016/j.catena.2021.105679
- Soleimanpour, S.M., Rahmati, O., Arabkhedri, M., & Tiefenbacher, J. (2024). Evaluation and modification of sediment connectivity index for application in smooth Watersheds conditions (case study: Neyriz Watershed, Fars province). Final report of research project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 84 pages. [In Persian]
- Website of the General Department of Meteorology of Fars Province. (2023). Reporting meteorological statistics of the cities of Fars province (<https://www.farsmet.ir/ReportAmar.aspx>).
- Zhang, Y., Huang, C., Zhang, W., Chen, J., & Wang, L. (2021). The concept, approach, and future research of hydrological connectivity and its assessment at multiscales. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 52724-52743. doi:10.1007/s11356-021-16148-8
- Zingaro, M., Refice, A.D., Addabbo, A., Hostache, R., Chini, M., & Capolongo, D. (2020). Experimental application of sediment flow connectivity index (SCI) in flood monitoring. *Water*, 12(7), 1857. doi:10.3390/w12071857
- Zingaro, M., Refice, A.D., Giachetta, E.D., Addabbo, A., Lovergine, F., De Pasquale, V., Pepe, G., Brandolini, P., Cevasco, A., & Capolongo, D. (2019). Sediment mobility and connectivity in a catchment: A new mapping approach. *Science of the Total Environment*, 672, 763-775. Doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.461