

در بهینه‌سازی مکان‌یابی اقدامات آبخیزداری و ارتقای مدیریت مشارکتی منابع طبیعی در مناطق مشابه نشان می‌دهد. به‌کارگیری این رویکرد می‌تواند به تدوین برنامه‌های منطقه‌ای مؤثر برای کاهش فرسایش خاک، کنترل رسوب و بهبود کیفیت منابع آب کمک شایانی نماید.

واژگان کلیدی: شاخص اتصال رسوب، *GEE*، مناطق کوهستانی، سنجش‌ازدور، استان خوزستان.

مقدمه

فرسایش خاک و انتقال رسوب از چالش‌های اساسی مدیریت منابع طبیعی در مناطق کوهستانی به شمار می‌رود. شناسایی فرآیندهای کنترل‌کننده این پدیده‌ها، به‌ویژه در مناطقی با داده‌های محدود، ضرورتی است که بارها در اسناد راهبردی منابع آب‌وخاک ایران تأکید شده است [۱]. در این راستا، مفهوم اتصال رسوب^۴ به‌عنوان ابزاری مفهومی برای تحلیل پیوند مکانی و عملکردی بین منابع تولید رسوب (نظیر شیب‌ها، دامنه‌ها، اراضی کشاورزی) و مجاری انتقال (آبراهه‌ها) در دهه‌های اخیر توسعه‌یافته است [۳، ۵ و ۸]. این مفهوم، بر پایه ارزیابی مسیرهای بالقوه و واقعی انتقال ذرات رسوب از نقطه تولید تا گیرنده نهایی شکل گرفته و می‌تواند شناخت مناسبی از دینامیک رسوب در مقیاس حوضه فراهم آورد [۸]. یکی از شاخص‌های پرکاربرد برای سنجش این پیوستگی، شاخص اتصال ساختاری رسوب (SCI)^۵ است که نخستین بار توسط بورسلی و همکاران [۲] در قالب یک چارچوب عددی-مکانی ارائه شد. این شاخص، با استفاده از پارامترهایی نظیر شیب، مساحت، فاصله تا آبراهه و نوع کاربری زمین، میزان پتانسیل انتقال رسوب هر سلول از سطح حوضه به آبراهه را کمی‌سازی می‌کند [۱۰، ۱۹ و ۱۴]. اگرچه این شاخص از نظر ساختاری ساده و قابل پیاده‌سازی است، اما درک عمیق‌تری از رفتار دینامیکی و زمانی رسوب ارائه نمی‌دهد و تمرکز آن بیش‌تر بر برآورد «پتانسیل اتصال» است تا فرآیندهای واقعی رسوب‌زایی. باین‌حال، ساده‌سازی‌های آن در محیط‌های فاقد داده، به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه، آن را به ابزاری پرکاربرد تبدیل کرده است [۵، ۸ و ۲]. پژوهش‌های متعددی در سطح جهانی به بررسی کارایی این شاخص پرداخته‌اند. برای مثال، کاوالی و

4. Sediment Connectivity

5. Structural Sediment Connectivity Index

تحلیل مکانی پیوستگی رسوب و نقش آن در مدیریت منابع آب‌وخاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز منجیق خوزستان)

کهزاد حیدری^{*}، حمزه سعیدیان^آ سیدحسین آرامی^۳

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۴/۱۱ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۶/۰۷

DOI:/ 10.22034/wmji.2025.2064664.1119

چکیده

شناسایی و مکان‌یابی نواحی با پتانسیل بالای انتقال رسوب، یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک است. در این پژوهش، شاخص اتصال رسوب به‌عنوان یک ابزار کمی، مکانی و کارآمد برای تحلیل پویایی انتقال رسوب در حوزه آبخیز منجیق در استان خوزستان به کار گرفته شده است. با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، شاخص پوشش گیاهی استخراج شد و سپس در محیط محاسبات ابری (*GEE*)، مؤلفه‌های بالادست و پایین‌دست شاخص اتصال رسوب محاسبه و نقشه توزیع مکانی آن تهیه گردید. نتایج تحلیل نشان داد که مناطق با شیب تند و پوشش گیاهی ضعیف (دارای شاخص پوشش گیاهی بالا)، دارای بیش‌ترین مقادیر *SCI* هستند که بر نقش کنترلی این عوامل تأکید می‌کند. همچنین، همبستگی مثبت و معنادار ($r=0.78$) بین مقادیر *SCI* و داده‌های رسوب‌برداری میدانی، دقت بالای این شاخص را در بازنمایی پتانسیل واقعی انتقال رسوب تأیید نمود. یافته‌های این پژوهش، ضمن فراهم کردن امکان شناسایی دقیق و هدفمند نواحی بحرانی فرسایش و رسوب، کارایی شاخص اتصال رسوب را به‌عنوان ابزاری علمی

۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران. پست الکترونیکی: kohzad93@gmail.com و k.heidary@areo.ac.ir

۲- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

همکاران [۴] در مطالعه‌ای در حوزه‌های آلی شمال ایتالیا، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با وضوح بالا، نشان دادند که شاخص SCI با شدت فرسایش و تراکم مسیرهای جریان همبستگی قابل توجهی دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزار شناسایی نواحی حساس به انتقال رسوب استفاده شود. هکمن و ورکات [۹] در یک مقاله مروری گسترده در اروپا، انواع شاخص‌های اتصال (از جمله SCI) را از منظر مفهومی و عملیاتی بررسی کرده و به محدودیت‌های آن در بازتاب رفتار دینامیکی و زمانی رسوب اشاره کرده‌اند؛ با این حال، آن را برای تحلیل ساختاری بسیار مفید دانسته‌اند. یان و همکاران [۱۵] نیز در فلات لس چین، با ترکیب شاخص SCI با مدل SDR و الگوریتم‌های جهت جریان متفاوت، دریافتند که SCI نسبت به تغییرات کاربری زمین بسیار حساس است و در ارزیابی مناطق مستعد رسوب‌زایی عملکرد بالایی دارد. در ایران نیز، اگرچه کاربرد SCI هنوز محدود است، اما نجفی و همکاران [۱۲] در حوزه تهم‌چای زنجان، با تلفیق داده‌های میدانی و تحلیل ساختاری شاخص، توانستند الگوی زمانی و مکانی اتصال رسوب را شناسایی و با تغییرات کاربری اراضی مقایسه کنند. سلیمان‌پور و همکاران [۱۳] نیز چارچوبی را برای استفاده از SCI در مناطق فاقد داده ارائه داده‌اند و آن را با اقدامات حفاظتی مقایسه کرده‌اند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که SCI می‌تواند به‌عنوان شاخص ارزیابی عملکرد حفاظت خاک در مقیاس شیب استفاده شود. همچنین، در یک مطالعه اخیر عربخدری و همکاران [۱] به‌صورت ترکیبی از داده‌های مکانی، تحلیل ساختاری و تجربی استفاده شد تا SCI به‌عنوان ابزار شناسایی نواحی بحرانی در حوضه‌های با پتانسیل فرسایش مشابه بررسی شود. این مطالعه نشان داد که SCI با داده‌های میدانی رسوب همبستگی مناسبی دارد و می‌تواند پایه‌ای برای تصمیم‌گیری مدیریتی در حوزه‌های آبخیز فاقد داده فراهم آورد. با وجود این پیشرفت‌ها، استفاده از SCI در مقیاس برنامه‌ریزی اجرایی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی در حوزه‌های آبخیز کوهستانی ایران، به‌ویژه مناطق پرخطر جنوب غرب کشور، هنوز به‌طور نظام‌مند مورد بررسی قرار نگرفته است. خلاصه مطالعاتی در اتصال تحلیل عددی این شاخص به سیاست‌گذاری و طراحی عملیاتی پروژه‌های کنترل فرسایش، ضرورتی است که تحقیق حاضر به دنبال پاسخ به آن است. از سوی دیگر، پژوهش‌های داخلی عموماً تمرکز خود را بر تحلیل ساختاری یا همبستگی‌های ساده قرار داده‌اند و فقدان یک رویکرد نظام‌مند برای پیوند دادن خروجی‌های مکانی SCI با سیاست‌های اجرایی و برنامه‌های آبخیزداری به‌وضوح احساس می‌شود. این خلاصه به‌ویژه در مناطق کوهستانی جنوب غرب کشور مانند خوزستان که با شدت بالایی فرسایش، پوشش گیاهی ضعیف و توسعه‌نشده و مخاطرات سیلابی روبه‌رو هستند، بیش‌تر مشهود است. نبود ابزار ساده و مکان‌مبنا برای شناسایی سریع نواحی بحرانی، موجب می‌شود که اقدامات اجرایی، بدون اولویت‌بندی مکانی دقیق انجام گیرد و اثربخشی آن‌ها کاهش یابد. پژوهش حاضر باهدف ارزیابی قابلیت شاخص اتصال رسوب

(SCI) در تعیین نواحی بحرانی تولید و انتقال رسوب در حوزه آبخیز منجیق خوزستان، به‌عنوان یکی از آبخیزهای کوهستانی این استان، انجام شده است. در بسیاری از مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک، مدیریت کارآمد منابع آب و خاک با چالش‌هایی همچون شناسایی دقیق مناطق بحرانی رسوب‌زایی و تصمیم‌گیری بهینه برای اقدامات حفاظتی روبه‌رو است. در این مطالعه، با بهره‌گیری از داده‌های مکانی شامل مدل رقومی ارتفاع، نقشه پوشش اراضی و جهت جریان و با پیاده‌سازی شاخص اتصال رسوب در محیط GIS و GEE، الگویی کاربردی و قابل اجرا برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی ارائه شده است. هدف اصلی پژوهش، نه تنها تحلیل مکانی SCI، بلکه تبیین قابلیت‌های آن در اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی، تخصیص بهینه منابع و جلب مشارکت بهره‌برداران محلی در راستای مدیریت پایدار منابع آب و خاک است. نوآوری این تحقیق در ادغام هم‌زمان رویکرد عددی، تحلیل مکانی و ملاحظات مدیریتی است که می‌تواند به ارائه راهکاری جامع و بومی برای مدیریت حوزه‌های آبخیز در شرایط مشابه منجر شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوزه آبخیز منجیق در استان خوزستان است (شکل ۱) که در محدوده کوهستانی شهرستان اندیکا واقع شده است. این حوزه آبخیز با مساحتی حدود ۲۴۰ کیلومتر مربع، دارای توپوگرافی نسبتاً ناهموار، شیب‌های تند و پوشش اراضی متنوع شامل اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی است. مطابق تحلیل داده‌های هواشناسی طی بازه ۲۰ ساله، اقلیم منطقه نیمه‌خشک بوده و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۵۰۰ میلی‌متر برآورد شده است. وجود فرسایش‌پذیری بالا، کاربری‌های ناپایدار و کمبود پوشش گیاهی در برخی قسمت‌ها، این حوزه آبخیز را به یکی از کانون‌های بالقوه تولید رسوب در جنوب غرب ایران تبدیل کرده است. در این مطالعه، از حوزه آبخیز منجیق به‌عنوان نمونه‌ای از مناطق کوهستانی خوزستان برای ارزیابی کارایی شاخص اتصال رسوب (SCI) استفاده شد.

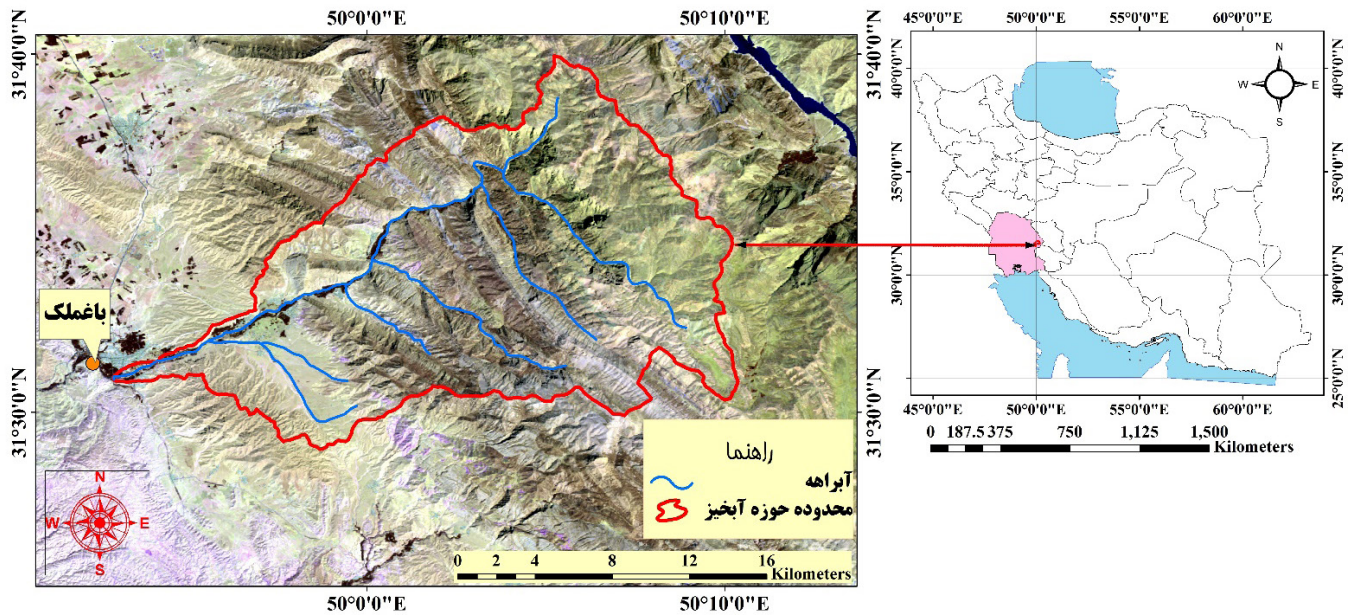
برای محاسبه و تحلیل شاخص اتصال رسوب^۱ از داده‌های مکانی رستری و برداری با دقت ۱۰ متر استفاده شد. تمامی پردازش‌های مربوط به استخراج، پیش‌پردازش و تحلیل لایه‌های رستری عمدتاً در محیط محاسبات ابری گوگل ارث انجین^۲ انجام گرفت. پلتفرم GEE با قابلیت‌های گسترده در دسترسی به مجموعه‌های داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های پردازش مکانی، امکان تحلیل کارآمد حجم بالایی از اطلاعات را فراهم آورد. جزئیات داده‌های مورد استفاده به شرح زیر است:

• مدل رقومی ارتفاع (DEM): برای استخراج لایه‌های شیب، جهت جریان و تجمع جریان، از مدل رقومی ارتفاع

1. Sediment Connectivity Index or SCI

2. Google Earth Engine (GEE)

حوزه آبخیز منجیق خوزستان



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز منجیق در استان خوزستان

به‌روزرسانی و اصلاح گردید و از این لایه محاسبه فاصله تا آبراه‌ها در مؤلفه پایین‌دست SCI مورد استفاده قرار گرفت.

- موقعیت بندهای اصلاحی و پلات‌های رسوب‌برداری: موقعیت شش بند اصلاحی و نُه پلات رسوب‌برداری صحرایی (سه پلات در هر یک از سه زیرحوضه اصلی) به‌صورت نقاط برداری گردآوری شد. داده‌های رسوب انباشته‌شده در پلات‌ها، به‌صورت میانگین سالانه در دوره زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ شمسی (۲۰۲۱-۲۰۲۳ میلادی) جمع‌آوری و برای اعتبارسنجی مدل به کار رفت.

روش محاسبه SCI

شاخص اتصال رسوب به‌صورت زیر تعریف می‌شود (شکل ۲):

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) \quad \text{(رابطه ۲) [۱ و ۳]}$$

که در آن:

- D_{up} : مؤلفه بالادست که نشان‌دهنده پتانسیل تولید رسوب در سلول‌های بالادست است.
- D_{dn} : مؤلفه پایین‌دست که مقاومت مسیر انتقال رسوب تا گیرنده را بیان می‌کند.

محاسبه مؤلفه بالادست D_{up}

$$[D_{up} = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot A_i \cdot S_i)] \quad \text{(رابطه ۳) [۱ و ۳]}$$

که در آن:

- (W_i) : ضریب وزنی بر اساس نوع کاربری اراضی (از ۰/۱ برای جنگل تا ۱ برای زمین بایر) [۱۴].
- (A_i) : مساحت سلول‌های بالادست (برحسب مترمربع)
- (S_i) : شیب سلول‌ها به‌صورت درصد
- محاسبه مؤلفه پایین‌دست (D_{dn})

SRTMGL1_003^۱ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. این DEM به دلیل پوشش جهانی و دقت قابل قبول [۱]، به‌عنوان مبنای محاسبات توپوگرافیک انتخاب گردید. پردازش‌های اولیه DEM شامل برش محدوده مورد مطالعه و رفع خطاهای احتمالی، در محیط GEE صورت گرفت.

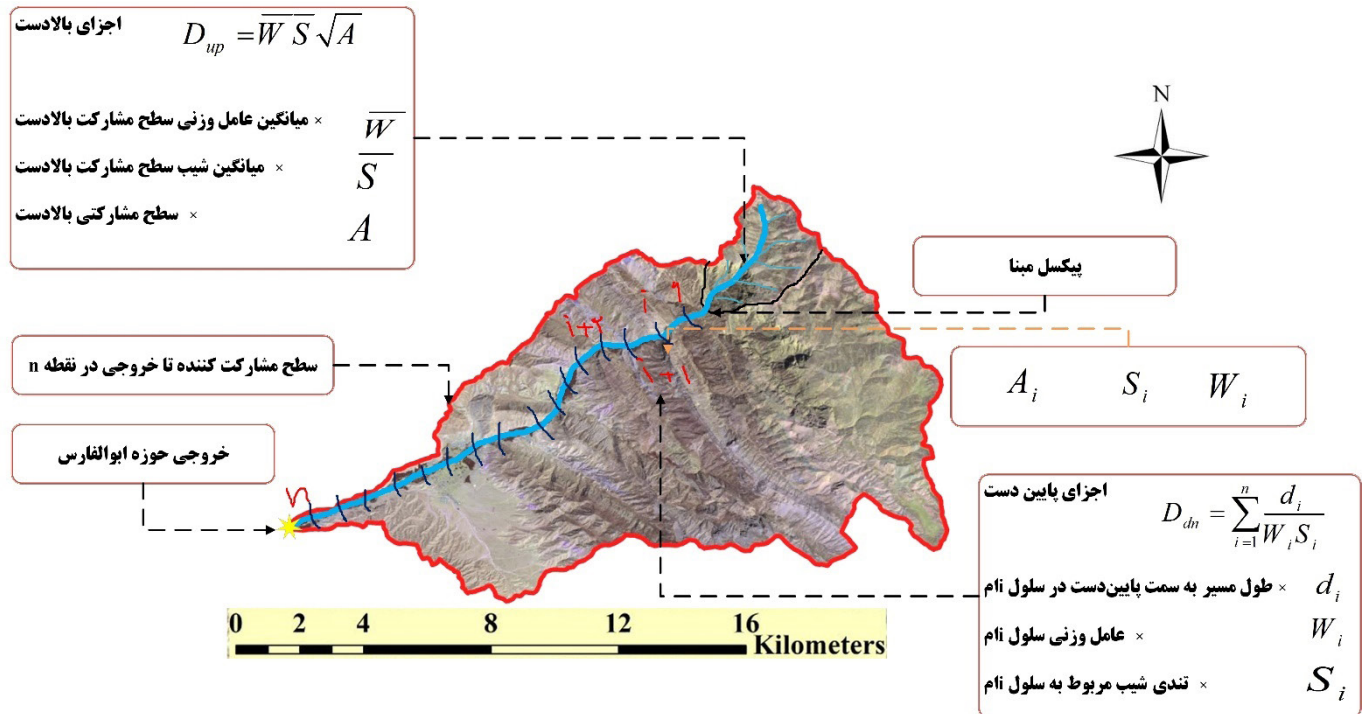
- تصاویر ماهواره‌ای جهت تهیه شاخص پوشش گیاهی (C): برای محاسبه شاخص C، از مجموعه تصاویر سنتینل SR ۲ HARMONIZED (سطح بازتابش زمین) استفاده شد. این تصاویر با رزولوشن ۱۰ متر و با تصحیحات اتمسفری اولیه، منبع مناسبی برای ارزیابی پوشش گیاهی هستند. تصاویر مربوط به بازه زمانی مارس تا سپتامبر ۲۰۲۴ مورد فیلتر قرار گرفته و با استفاده از میانه^۲ یک تصویر موزاییک جهت کاهش اثر ابر و بهبود کیفیت زمانی ایجاد شد [۱۵ و ۱۶]. سپس، شاخص NDVI از باندهای مادون‌قرمز نزدیک (B8) و قرمز (B4) محاسبه و در نهایت، شاخص C بر اساس رابطه زیر استخراج شد [۱ و ۱۸].

$$C = (1 - NDVI) / 2 \quad \text{(رابطه ۱)}$$

این شاخص علاوه بر نمایش وضعیت پوشش گیاهی منطقه، به‌عنوان ضریب وزنی تأثیر پوشش گیاهی بر پتانسیل تولید رسوب (W_i) در محاسبه مؤلفه بالادست شاخص SCI نیز به کار گرفته شد. تمامی مراحل فیلترینگ، ساخت موزاییک و محاسبه شاخص‌های NDVI و C به‌طور کامل در محیط GEE انجام شد.

- شبکه آبراه‌ها: شبکه هیدروگرافی منطقه از لایه هیدروگرافی موجود استخراج و با استفاده از تصاویر Google earth نیز

1. Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc-second
2. Median Composite



شکل ۲: گرافیک جریان‌ی اجزاء مختلف محاسباتی شاخص اتصال رسوب در آبخیز منجینق استان خوزستان

برای مؤلفه بالادست در محاسبه SCI مورد استفاده قرار گرفت.

- محاسبه SCI در ArcGIS: با استفاده از ابزار Raster Calculator در ArcGIS، مؤلفه‌های بالادست و پایین دست محاسبه و سپس شاخص SCI برای هر پیکسل بر اساس فرمول ارائه شده، استخراج گردید.

اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل SCI و ارزیابی دقت آن در بازنمایی واقعی پتانسیل انتقال رسوب، از دو رویکرد استفاده شد:

- همبستگی با داده‌های رسوب برداری میدانی: داده‌های رسوب انباشته شده از نُه پلات رسوب برداری صحرائی (سه پلات در هر زیر حوضه اصلی) در دوره زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ (۲۰۲۳-۲۰۲۱) جمع‌آوری شد. میانگین رسوب سالانه این پلات‌ها با میانگین شاخص SCI مربوط به محدوده پلات‌ها در زیر حوضه‌های متناظر مقایسه گردید. برای سنجش قدرت رابطه کمی بین SCI و مقادیر رسوب اندازه‌گیری شده، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. رویکرد مشابه در مطالعات بورسلی و همکاران [۳] و کوالی و همکاران [۴] برای اعتبارسنجی شاخص‌های پیوستگی رسوب با داده‌های میدانی به کار رفته است.

- تحلیل مکانی موقعیت سازه‌های کنترلی: موقعیت ۶ بند اصلاحی موجود در منطقه (شکل ۱) با نقشه شاخص SCI مقایسه گردید. هدف از این ارزیابی، بررسی میزان انطباق مکان‌یابی سازه‌ها با نواحی دارای پتانسیل اتصال رسوب بالابود، مشابه رویکرد کوالی

(رابطه ۴) [۱ و ۳]

که در آن:

- (d_i) : فاصله افقی سلول تا نزدیک‌ترین آبراهه یا گیرنده رسوب (برحسب متر)
- (S_i) : شیب مسیر پایین دست

مقادیر SCI به صورت لگاریتمی نرمال‌سازی شده و خروجی به صورت نقشه‌ای از کلاس‌های اتصال رسوب طبقه‌بندی شد [۱۴ و ۱۵].

مراحل تحلیل و پردازش در محیط GIS و GEE

برای اجرای مدل SCI، مراحل زیر به صورت ترکیبی در محیط GEE برای پردازش اولیه تصاویر و رسترهای بزرگ و سپس در محیط نرم‌افزار ArcGIS برای تحلیل‌های نهایی و طبقه‌بندی دنبال شد:

- تهیه لایه‌های توپوگرافیک در GEE:
- استخراج لایه شیب از DEM SRTM 30 متری.
- استخراج جهت جریان از DEM.
- محاسبه فاصله سلولی تا آبراهه‌ها: با استفاده از ابزار Euclidean Distance در ArcGIS، فاصله هر پیکسل تا نزدیک‌ترین آبراهه (که از لایه تجمع جریان استخراج شده بود) محاسبه گردید.
- اعمال ضریب وزنی (شاخص C): نقشه شاخص پوشش گیاهی (C-factor) که قبلاً در GEE محاسبه شده بود، به عنوان ضریب وزنی

1. Flow Direction

و همکاران [۴] که از همپوشانی سازه‌های مهندسی با نقشه‌های SCI برای ارزیابی کفایت مکان‌یابی بهره برده‌اند. این دو رویکرد در کنار یکدیگر، مبنای تحلیل‌های مکانی بخش نتایج و شناسایی نواحی بحرانی از نظر تولید و انتقال رسوب را فراهم ساختند. در مجموع، استفاده از SCI به‌عنوان ابزاری ساده، قابل توسعه و مبتنی بر GIS و GEE، امکان تحلیل کارآمد پیوستگی رسوب را در حوضه‌هایی که فاقد داده‌های میدانی گسترده‌اند فراهم می‌کند [۳ و ۴].

نتایج و بحث

نقشه شیب آبخیز منجنیق

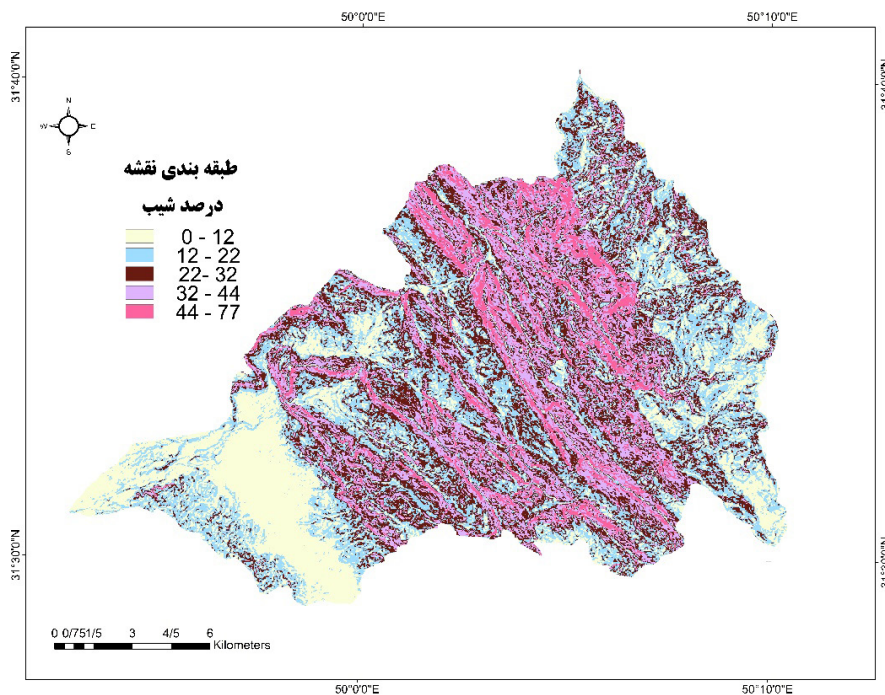
توپوگرافی، به‌عنوان یک عامل اصلی کنترل‌کننده فرآیندهای هیدرولوژیک و مورفودینامیک حوزه آبخیز، تأثیر بسزایی بر پتانسیل فرسایش و انتقال رسوب دارد. نقشه درصد شیب حوزه آبخیز منجنیق (شکل ۳) که از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با رزولوشن ۳۰ متر استخراج شده است، نشان‌دهنده غالب بودن شیب‌های زیاد در بخش‌های قابل توجهی از منطقه است. مشاهده می‌شود که بخش‌های وسیعی از حوضه، به‌ویژه در نواحی شرقی، مرکزی و جنوب غربی، دارای شیب‌های تند (بیش از ۳۲ درصد و حتی تا ۷۷ درصد) هستند. این شیب‌های بالا، با افزایش انرژی جنبشی رواناب، کاهش زمان تمرکز و تقلیل فرصت نفوذ آب به خاک، پتانسیل فرسایش شیاری، خندقی و ورقه‌ای را به‌شدت افزایش می‌دهند. این یافته با مطالعات متعدد در آبخیزهای کوهستانی و نیمه‌خشک که شیب را به‌عنوان عامل غالب مورفومتریک در کنترل فرسایش و انتقال رسوب معرفی می‌کنند، همخوانی دارد [۳، ۱۷ و ۵]. در مقابل، شیب‌های کم (۰-۱۲ درصد) عمدتاً در بخش‌های غربی و

شمال غربی آبخیز و در مسیرهای دره‌ای و دشت‌های آبرفتی مشاهده می‌شوند که شرایط مساعدتری را برای تجمع آب و رسوب و کاهش فرسایش فراهم می‌آورند. این الگوی توزیع شیب، با توجه به ماهیت کوهستانی منطقه باغملک در استان خوزستان، عامل مهمی در تشدید فرآیندهای ژئومورفیک فرسایشی و افزایش دینامیک انتقال رسوب به سمت آبراهه‌ها و خروجی آبخیز محسوب می‌شود و در نهایت، بر مقادیر شاخص رسوب‌دهی تأثیر مستقیم دارد.

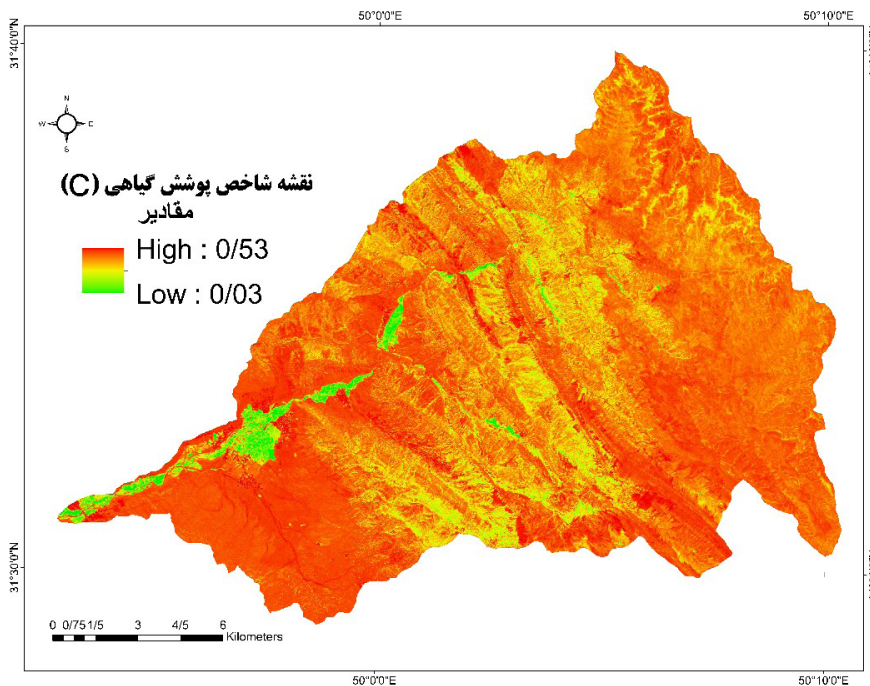
تحلیل شاخص پوشش گیاهی

شاخص پوشش گیاهی (C-factor) که در این مطالعه بر اساس رابطه (۱) و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ (SR_HARMONIZED) در بازه زمانی مارس تا سپتامبر ۲۰۲۴ محاسبه شده است، نقش حیاتی پوشش گیاهی در کنترل فرسایش خاک را منعکس می‌کند (شکل ۴).

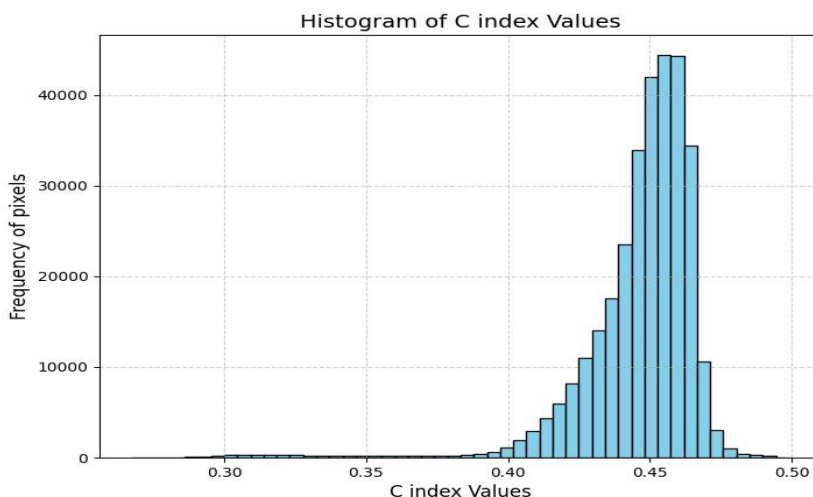
مقادیر این شاخص بین صفر تا ۱ متغیرند؛ مقادیر پایین (نزدیک به ۰/۰۳) نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم و حفاظت بالا در برابر فرسایش و مقادیر بالا (نزدیک به ۰/۵۳) بیانگر پوشش گیاهی کم یا تخریب‌شده و آسیب‌پذیری بیش‌تر خاک هستند. نقشه خروجی شاخص C به‌وضوح نشان می‌دهد که مناطق با پوشش گیاهی متراکم (رنگ سبز)، عمدتاً در بخش‌های دره‌ای و مجاورت رودخانه‌ها متمرکز شده‌اند که از خاک در برابر فرسایش آبی محافظت می‌کنند. در مقابل، بخش‌های وسیعی از حوزه آبخیز، به‌ویژه ارتفاعات و دامنه‌ها (رنگ نارنجی/قرمز)، دارای مقادیر C بالاتری هستند که بیانگر پوشش گیاهی ضعیف و پتانسیل بالای فرسایش خاک در این نواحی است.



شکل ۳. نقشه درصد شیب حوزه آبخیز منجنیق



شکل ۴: نقشه شاخص پوشش گیاهی حوزه آبخیز منجنيق



شکل ۵: نمودار فراوانی شاخص پوشش گیاهی حوزه آبخیز منجنيق

[۷] در ایران نیز، پوشش گیاهی ضعیف را به عنوان یکی از عوامل اصلی پتانسیل بالای فرسایش و رسوب‌دهی در مناطق کوهستانی نیمه‌خشک شناسایی کرده‌اند. کاهش شدید فراوانی در مقادیر پایین C نیز تأییدی بر محدود بودن مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم و بسیار خوب است.

تحلیل عددی و مکانی شاخص اتصال رسوب (IC)
 نتایج تحلیل مکانی شاخص اتصال رسوب (IC) در حوزه آبخیز منجنيق نشان داد که مقادیر این شاخص در سطح پیکسلی بین حداقل ۷/۹- و حداکثر ۳/۴۴ تغییر می‌کند (شکل ۶). این گستره بیانگر تنوع

تحلیل نمودار فراوانی شاخص پوشش گیاهی، توزیع آماری مقادیر این شاخص را در ۱۰ کلاس یکسان بین ۰/۰۳ تا ۰/۵۳ نمایش می‌دهد (شکل ۵). این نمودار که شکلی نامتقارن با تمایل به سمت راست دارد، نشان‌دهنده غالب بودن پیکسل‌ها با مقادیر بالاتر C در منطقه است. اوج فراوانی پیکسل‌ها در بازه ۰/۴ تا ۰/۴۵ قرار دارد که حاکی از آن است بخش قابل توجهی از حوزه آبخیز از نظر پوشش گیاهی وضعیت نامطلوبی دارد و در معرض خطر فرسایش قرار گرفته است. مقادیر بالای C به‌طور مستقیم در افزایش مؤلفه بالادست SCI نقش داشتند که مطابق با میانی مدل‌سازی فرسایش نظیر USLE/RUSLE است [۱۳]. مطالعاتی نظیر غلامی و محسنی

بسیار زیاد شرایط توپوگرافی، کاربری اراضی و مسیرهای انتقال رسوب در سطح حوضه است. بر اساس نقشه خروجی شاخص اتصال رسوب، بخش‌های دارای مقادیر بالا (زرد تا قرمز) عمدتاً در دامنه‌های جنوبی و جنوب غربی حوضه واقع شده‌اند که دارای شیب تند، کاربری بایر و نزدیکی به آبراهه‌ها هستند. نواحی با IC پایین‌تر (آبی تا بنفش) بیش‌تر در مناطق شمالی و مرکزی حوضه دیده می‌شوند که دارای شیب کم، فاصله زیاد از آبراهه‌ها و پوشش گیاهی متراکم‌تر (مقادیر پایین شاخص پوشش گیاهی) هستند. این نتایج بر نقش اساسی دو عامل شیب و پوشش گیاهی در فرآیند انتقال رسوب تأکید دارد. این نتایج با یافته‌های مطالعاتی که SCI را در حوضه‌های مشابه به‌کاربرده‌اند، نظیر ژنو و همکاران [۱۹] در مناطق مدیترانه‌ای یا نجفی و همکاران [۱۱] در ایران، کاملاً سازگار است. آن‌ها نیز نشان داده‌اند که SCI به‌خوبی مناطق با پتانسیل بالای فرسایش و اتصال به شبکه آبراهه‌ها را شناسایی می‌کند. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر، حوضه به سه زیرحوضه اصلی تقسیم شد و آماره‌های توصیفی شاخص در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱: آمار توصیفی شاخص اتصال رسوب (IC) در سه آبخیز اصلی

شماره زیرحوضه	میانگین IC	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	درصد سطح IC > 2
۱	۰/۴۵	-۶/۹	۲/۸۸	۱/۳۴	۱۸
۲	۱/۱۲	-۵/۳	۳/۱۲	۱/۰۲	۳۴
۳	۱/۸۷	-۳/۲	۳/۴۴	۰/۷۸	۴۹

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، آبخیز شماره سه

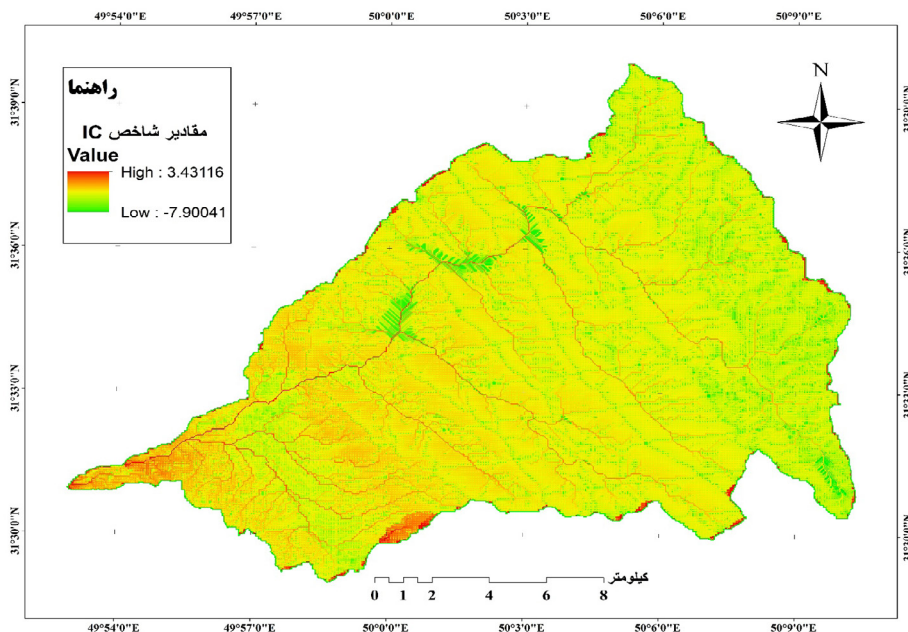
(جنوبی‌ترین آبخیز) دارای بالاترین میانگین IC (۱/۸۷) و کم‌ترین انحراف معیار (۰/۷۸) است که نشان‌دهنده تمرکز بالای اتصال رسوب در این بخش و یکنواختی نسبی آن در سطح حوضه آبخیز است. تقریباً نیمی از سطح این زیرحوضه آبخیز (۴۹ درصد) دارای اتصال بالا ($IC > 2$) است که این منطقه را از نظر مدیریت رسوب، نیازمند اولویت‌بندی اقدامات کنترلی می‌کند. در مقابل، آبخیز شماره یک (شمالی‌ترین زیرحوضه) با میانگین IC پایین‌تر (۰/۴۵) و انحراف معیار بالاتر (۱/۳۴)، پراکندگی بیش‌تر نواحی با گسست در انتقال رسوب را نشان می‌دهد. نقشه نهایی شاخص اتصال رسوب هم‌چنین گویای الگوی هم‌راستای مسیرهای IC بالا با شبکه آبراهه‌ها و جاده‌های کوهستانی است؛ به‌ویژه در دامنه جنوب غربی حوضه آبخیز، جاده‌ها مسیرهای جایگزین برای انتقال رسوب ایجاد کرده‌اند که موجب افزایش شدید IC در این نواحی شده است.

تحلیل همبستگی بین شاخص اتصال رسوب و داده‌های میدانی

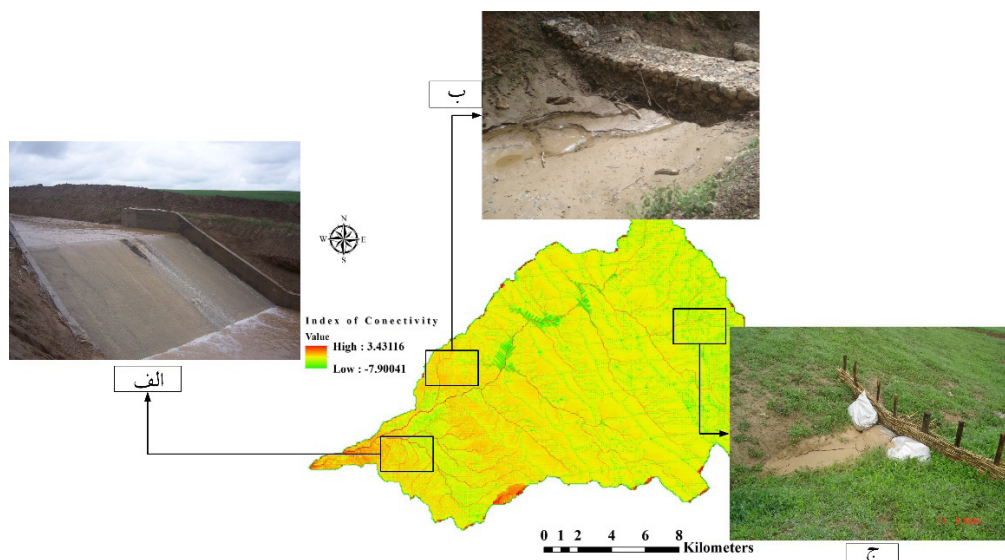
به‌منظور ارزیابی دقت شاخص اتصال رسوب (IC) در بازنمایی واقعی پتانسیل انتقال رسوب، داده‌های رسوب‌برداری از نه پلات صحرائی (سه پلات در هر زیرحوضه اصلی) طی دوره زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ جمع‌آوری شد (شکل ۷).

مقادیر رسوب انباشته‌شده به‌صورت میانگین سالانه برآورد گردید و سپس با میانگین SCI مربوط به همان محدوده مقایسه شد. جدول ۲ آمار توصیفی داده‌های برداشته‌شده میدانی و همبستگی آن‌ها با شاخص SCI را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که میانگین رسوب سالانه از زیرحوضه یک (۱/۸ تن در هکتار) به زیرحوضه سه (۹/۵ تن در هکتار) افزایش یافته



شکل ۶: نقشه توزیع مکانی و درصد فراوانی شاخص اتصال رسوب



شکل ۷: برخی از نقاط نمونه برداری رسوب در بازیدهای میدانی

جدول ۲: همبستگی بین میانگین شاخص اتصال رسوب (IC) و میزان رسوب انباشته شده در نقاط نمونه برداری

ضریب همبستگی (r)	میانگین SCI	انحراف معیار	حد اکثر	حد اقل	میانگین رسوب سالانه (تن/هکتار)	تعداد پلات	زیرحوضه
۰/۶۸	۰/۴۶	۰/۶	۲/۴	۱/۲	۱/۸	۳	۱
۰/۷۶	۱/۰۲	۰/۸	۶/۲	۴/۷	۵/۵	۳	۲
۰/۸۱	۱/۷۵	۰/۷	۱۰/۲	۸/۹	۹/۵	۳	۳

نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که شیب زمین و پوشش گیاهی دو عامل اصلی در کنترل پتانسیل فرسایش و اتصال رسوب در حوزه آبخیز منجنیق هستند. مناطق دارای شیب تند و پوشش گیاهی ضعیف، بیشترین مقادیر شاخص اتصال رسوب (SCI) را نشان دادند که بیانگر نقش محوری این عوامل در تشدید فرآیندهای فرسایشی و انتقال رسوب است. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن بود که مسیرهای انسانی به‌ویژه جاده‌های کوهستانی، به‌عنوان عوامل تشدیدکننده، موجب افزایش شاخص اتصال رسوب در مناطق مجاور می‌شوند.

اعتبارسنجی SCI با داده‌های میدانی رسوب برداری صحرائی، همبستگی مثبت و قوی ($r = 0/84$, $P < 0/01$) را نشان داد که دقت بالای این شاخص در بازنمایی پتانسیل واقعی انتقال رسوب را تأیید می‌کند. همچنین، انطباق نسبی موقعیت بندهای اصلاحی موجود با نواحی دارای مقادیر بالای SCI، بیانگر ظرفیت این شاخص در بهینه‌سازی مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری است. از منظر کاربردی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از SCI در ترکیب با داده‌های سنجش از دور و محیط محاسبات ابری GEE می‌تواند ابزاری ساده، کارآمد و مقیاس‌پذیر برای شناسایی نواحی بحرانی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی باشد. این چارچوب می‌تواند به سازمان‌های مسئول کمک کند تا:

• منابع مالی و انسانی محدود را به‌صورت هدفمند در مناطق بحرانی

است. این روند همسو با افزایش میانگین SCI از ۰/۴۶ به ۱/۷۵ بوده و بیانگر رابطه مستقیم بین شدت رسوب‌زایی و مقادیر SCI است. همبستگی مثبت و معنادار کلی ($r = 0/84$, $P < 0/01$) دقت بالای SCI را در بازنمایی پتانسیل واقعی انتقال رسوب تأیید می‌کند. همچنین مقدار انحراف معیار پایین‌تر در زیرحوضه سه (۰/۷) نسبت به سایر زیرحوضه‌ها نشان‌دهنده یکنواختی شرایط بحرانی رسوب‌زایی در این منطقه است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که شاخص SCI علاوه بر شناسایی نواحی بحرانی، قابلیت انعکاس شدت رسوب‌زایی را نیز در مقیاس زیرحوضه دارد و می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی باشد.

تحلیل موقعیت بندهای اصلاحی

بررسی موقعیت شش بند اصلاحی مشخص شده در شکل ۱ (مثلث‌های مشکی) نشان می‌دهد که اکثر آن‌ها در مناطق با IC بین ۱/۲ تا ۱/۸ قرار گرفته‌اند، به‌ویژه در زیرحوضه شماره ۳ که تمرکز بالای IC در آن دیده می‌شود. اگرچه داده‌های زمانی قبل و بعد از احداث این سازه‌ها در دسترس نبود، اما موقعیت‌یابی آن‌ها به‌درستی در مسیرهای با اتصال بالا واقع شده‌اند؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که موقعیت‌یابی بسیاری از این بندها با اولویت‌های مکانی IC همخوانی دارد و این شاخص می‌تواند ابزار کارآمدی برای بهینه‌سازی مکان‌یابی سازه‌های مشابه در طرح‌های آبی مدیریت رسوب باشد.

S., Javaux, M., Lode, E., Smetanová, A., Vericat, D., and Brardinoni, F. 2018. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth-Science Reviews*, 187, 77–108.

9. Heckmann, T., and Vericat, D. 2018. Computing spatially distributed sediment delivery ratios: inferring functional sediment connectivity from repeat high-resolution digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1547–1554.

10. Mishra, K., Sinha, R., Jain, V., Nepal, S., and Uddin, K. 2019. Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin. *Science of the Total Environment*. 661, 251–265.

11. Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., and Sadeghi, S. H. 2021. Sediment connectivity concepts and approaches. *Catena*, 196(August 2020), 104880.

12. Najafi, S., Sadeghi, S. H., and Heckmann, T. 2017. Temporospatial variations of structural sediment connectivity patterns in Taham-Chi watershed in Zanjan province, Iran. *Journal of Soil and Water Conservation*, 24(3), 131–147.

13. Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., Mccool, D. K., and Yoder, D. C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture Agricultural Handbook No.

14. Soleimanpour, S. M., Rahmati, O., Arabkhedri, M., and 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 Modelling*, 4(3), 239–252. (In Persian)

15. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18–27.

16. Jiang, W. Yuan, L. Wang, W. Cao, R. Zhang, Y. and Shen, W. 2015. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 51, 117–126.

17. Yan, X., qin, Jiao, J., ying, Tang, B., zhe, Liang,

تخصیص دهند،

• اقدامات حفاظتی را بر اساس اولویتهای مکانی اجرا کنند،
• مشارکت جوامع محلی را در مدیریت پایدار منابع آب و خاک تقویت نمایند.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می دهد که شاخص اتصال رسوب می تواند به عنوان ابزاری عملی برای تدوین برنامه های منطقه ای مؤثر در کاهش فرسایش، کنترل رسوب و بهبود کیفیت منابع آب در مناطق کوهستانی نیمه خشک مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1. Arabkhedri, M., Heidary, K., and Parsamehr, M. R. 2021. Relationship of sediment yield to connectivity index in small watersheds with similar erosion potentials. *Journal of Soils and Sediments*, 21(7), 2699–2708.

2. Astuti, A. J. D., Dondeyne, S., Lemma, H., Nyssen, J., Annys, S., and Frankl, A. 2024. Recent dynamics in sediment connectivity in the Ethiopian Highlands. *Regional Environmental Change*, 24(3), 109.

3. Borselli, L., Cassi, P., and Torri, D. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3), 268–277.

4. Bracken, L. J., Turnbull, L., Wainwright, J., and Bogaart, P. 2015. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 177–188.

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

6. Fryirs, K. 2013. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(1), 30–46.

7. Gholami, V., and Mohseni Saravi, M. 2010. Effects of impervious surfaces and urban development on runoff generation and flood hazard in the Hajighoshan watershed. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 8(1), 1–12.

8. Heckmann, T., Cavalli, M., Cerdan, O., Foerster,

19. Zhao, G., Gao, P., Tian, P., Sun, W., Hu, J., and Mu, X. 2020. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China. *Catena*, 185, 104284.

Y., and Wang, Z. jie. 2022a. Assessing sediment connectivity and its spatial response on land use using two flow direction algorithms in the catchment on the Chinese Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 19(4), 1119–1138.

18. Zingaro, M., Scicchitano, G., Refice, A., Kushabaha, A., Marsico, A., Tapete, D., and Capolongo, D. 2024. The use of normalized difference vegetation index (NDVI) in sediment connectivity analysis: insights for considering land cover changes in Sediment flow Connectivity Index (SfCI). In EGU General Assembly Conference Abstracts, 8030.



Abstract

Spatial Analysis of Sediment Connectivity and Its Role in Water and Soil Resource Management (Case Study: Manjanigh Watershed, Khuzestan)Ko. Heidary^{1*}, H. Saeidian² and S. H. Arami³

Received: 2025/07/02 Accepted: 2025/08/29

Identifying and mapping areas with a high potential for sediment transfer is one of the key challenges in sustainable watershed management, particularly in mountainous and semi-arid regions. In this study, the Sediment Connectivity Index was employed as a quantitative, spatial, and efficient tool to analyze sediment transfer dynamics in the Manjanigh watershed, Khuzestan Province, Iran. Using digital elevation model data and Sentinel-2 satellite imagery, the vegetation cover index was derived, and subsequently, the upstream and downstream components of the SCI were calculated within the Google Earth Engine (GEE) cloud-computing environment. Spatial distribution maps of SCI were then produced. The results indicated that areas with steep slopes and sparse vegetation cover (characterized by high vegetation index values) exhibited the highest SCI values, underscoring the controlling influence of these factors. Moreover, a strong positive correlation ($r = 0.84$) was found between SCI values and field-measured sediment yield data, confirming the high accuracy of the index in representing the actual potential for sediment transfer. The findings of this study not only enable precise and targeted identification of critical erosion and sediment-prone areas but also demonstrate the utility of SCI as a scientific tool for optimizing the spatial planning of watershed management interventions and enhancing participatory natural resource management in similar regions. Implementing this approach can significantly contribute to the development of effective regional programs aimed at reducing soil erosion, controlling sediment, and improving water quality.

Keywords: Sediment connectivity Index, Google earth engine, Mountainous regions, Remote sensing, Khuzestan province.

1. Research Assistant Professor, Soil and Water Conservation Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Khuzestan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.

Emails: kohzad93@gmail.com, k.heidary@areeo.ac.ir

2. Research Assistant Professor, Soil and Water Conservation Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Khuzestan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.

3. Research Assistant Professor, Forestry and Rangeland Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Khuzestan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.