Geography and Environmental Sustainability
Homepage: http://ges.razi.ac.ir/

Evaluation of Relationship Between Soil Erodibility and Sediment Connectivity and its Application in Sustainable Management of Chehl -Chay Watershed in Golestan Province

Saeedeh Jalali[1]| Kazem Nosrati[2]| Shahram Bahrami[3]

1. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshty University, Tehran, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshty University, Tehran, Iran. E-mail: knosrati@gmail.com
3. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshty University, Tehran, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 02 Nov 2024
Received in revised form: 08 Jan 2025
Accepted: 19 Jan 2025
Available online: 21 Mar 2025

Keywords:
Sediment connectivity,
Soil erodibility,
Sustainable management,
Chehel-Chay watershed.

ABSTRACT

Excessive use of natural resources has led to soil erosion and sediment production aggravation. Knowledge of areas prone to sediment transfer is essential for effective strategic planning in the sustainable management of natural resources. One of the key concepts in this field is the investigation of sediment connectivity, which examines the transfer of sediment from one area to another and the migration potential of sediment particles. The selection of the weighting factor is one of the most challenging aspects in the calculation of sediment connectivity, as it is chosen based on the conditions of each region, the characteristics of the soil surface, and the available data. The purpose of this research is to evaluate the soil erodibility factor as a weighting factor in the calculation of the sediment connectivity index and to investigate the spatial distribution of sediment connectivity. In this study, the flow direction and cumulative flow were determined using a digital elevation model (DEM) of the area and slope layers. The vegetation factor was derived from Landsat images using the NDVI index. To prepare a soil erodibility map, 40 topsoil samples were collected, and key parameters, including texture, excellent sand content, and organic carbon, were measured. The results showed that the average erodibility in forested and pasture areas had the lowest and highest rates, at 0.014 and 0.026, respectively. Additionally, based on the model implementation, sediment connectivity ranged from -1.9 to 5.3. A linear regression equation was calculated, and the coefficient of determination ($R^2 = 0.74$) was estimated. The findings of this research can be useful for watershed management and subsequent studies related to sediment connectivity.

Cite this article: Jalali, S., Nosrati, K., & Bahrami, Sh. (2025). Evaluation of Relationship Between Soil Erodibility and Sediment Connectivity and its Application in Sustainable Management of Chehl -Chay Watershed in Golestan Province. *Geography and Environmental Sustainability*, *15* (1), 83-96. https://doi.org/10.22126/GES.2025.11295.2796

© The Author (s).
DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2025.11295.2796
Publisher: Razi University

جغرافیا و پایداری محیط
وبگاه نشریه: http://ges.razi.ac.ir/

ارزیابی ارتباط بین فرسایش‌پذیری خاک و اتصال رسوب و کاربرد آن در مدیریت پایدار حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان

سعیده جلالی[۱]| کاظم نصرتی[۲]| شهرام بهرامی[۳]

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی ، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: Knosrati@sbu.ac.ir
۳. گروه جغرافیای طبیعی ، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:
اتصال رسوب،
فرسایش‌پذیری خاک،
مدیریت پایدار،
حوضه آبخیز چهل چایی.

چکیده

استفادهٔ بی‌رویه از منابع طبیعی سبب تشدید هدررفت خاک و تولید رسوب شده است. آگاهی از پهنه‌های مهم و مستعد انتقال رسوب از ملزومات طراحی راهبردی مؤثر در مدیریت پایدار منابع طبیعی است. یکی از مفاهیم مهم در این زمینه، بررسی اتصال رسوب است که انتقال رسوب از یک بخش به بخش دیگر و امکان بالقوه جابه‌جایی برای ذرات رسوب را مورد بررسی قرار می‌دهد. انتخاب عامل وزنی یکی از موضوعات چالش‌برانگیز در محاسبه اتصال رسوب است و متناسب با شرایط هر منطقه، ویژگی‌های سطح خاک و داده‌های موجود، انتخاب می‌شود. هدف از این پژوهش ارزیابی عامل فرسایش‌پذیری خاک به‌عنوان عامل وزنی در محاسبهٔ شاخص اتصال رسوب و بررسی پراکنش مکانی اتصال رسوب می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از نقشه لایه‌های شیب، جهت جریان و جریان تجمعی و لایه رقومی عامل پوشش گیاهی تهیه شد. نرخ فرسایش‌پذیری خاک بر اساس نمونه‌برداری و اندازه‌گیری خصوصیات خاک محاسبه و نقشه مورد نظر تهیه گردید. نتایج نشان داد کاربری جنگل بیشترین میزان مواد آلی (۵/۵ کیلوگرم در مترمکعب) و کمترین نرخ فرسایش‌پذیری را به خود اختصاص داده است و در کاربری مرتع بیشترین میزان فرسایش‌پذیری وجود دارد و مواد آلی کاربری مذکور ۳/۸ کیلوگرم در مترمکعب بوده که نسبت به سایر کاربری‌ها در کمترین میزان است. میانگین فرسایش‌پذیری در کاربری جنگل و مرتع به ترتیب با میزان ۰/۰۱۴ و ۰/۲۶۰ به‌ترتیب کمترین و بیشترین نرخ را به خود اختصاص داده است. همچنین بر اساس اجرای مدل، اتصال رسوب در محدوده‌ی ۱/۹- و ۵/۳ قرار دارند. معادلهٔ رگرسیون خطی محاسبه و ضریب تبیین (R = ۰/۷۴) برآورد شد. نتایج اثبات می‌نماید که پراکنش مکانی شاخص اتصال رسوب با فرسایش‌پذیری منطبق می‌باشد. بدین‌ترتیب آگاهی از میزان فرسایش‌پذیری خاک و نحوهٔ پراکنش مکانی روند انتقال رسوب تولیدی، نقش مهمی در مدیریت پایدار حوضه دارد.

استناد: جلالی، سعیده؛ نصرتی، کاظم؛ بهرامی، شهرام (۱۴۰۴). ارزیابی ارتباط بین فرسایش‌پذیری خاک و اتصال رسوب و کاربرد آن در مدیریت پایدار حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۵ (۱)، ۸۳-۹۶. https://doi.org/10.22126/GES.2025.11295.2796

© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2025.11295.2796
ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

از مهم‌ترین پیامدهای استفادهٔ نادرست از منابع طبیعی کشور، فرسایش خاک و تولید رسوب است که این معضل در حوضه‌های آبخیز سبب اثرات محلی (on-site) و برون محلی (off-site) مانند هدررفت خاک قابل‌کشت، کاهش توان تولید و پایداری خاک، افزایش رسوب در سامانه‌های آبی و آسیب به تأسیسات آبی، کاهش کیفیت آب و همچنین کاهش حجم مخازن سدهای ذخیره آب می‌شود (Nosrati et al., 2019). آگاهی و شناخت منابع تولید رسوب و اتصال رسوب از منبع به رسوب هدف، می‌تواند در انتخاب روش و کنترل فرسایش و تولید رسوب در راستای مدیریت پایدار منابع آب‌وخاک مفید باشد.

اتصال هیدرولوژیک به‌عنوان ارتباط بین رواناب و منابع رسوب در بالادست حوضه با رسوبات هدف در پایین‌دست حوضه، یکی از مفاهیم مهم در ارزیابی فرایندهای فرسایش و هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز در مقیاس زمانی و مکانی می‌باشد. اتصال هیدرولوژیک به دو نوع شامل اتصال مستقیم (از طریق لندفرم‌های خطی مانند آبراهه و گالی) و انتشاری (از طریق اتصال رواناب سطحی به شبکه آبراهه) تقسیم‌بندی می‌شود (Croke et al., 2005). اتصال رسوب به انتقال رسوب از یک بخش به بخش دیگر و امکان بالقوه جابه‌جایی برای یک‌ذرهٔ رسوب در سراسر سیستم آبخیز (درون دامنه‌ای، بین دامنه با آبراهه و درون آبراهه‌ای) گفته می‌شود (Cislaghi & Bischetti, 2018). شاخص اتصال رسوب (ISC[1]) عمدتاً بر اساس معیارهای فیزیوگرافی آبخیزها تعیین شده است؛ درحالی‌که ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و بارندگی از عوامل اصلی کنترل‌کننده آن هستند (Feng et al., 2023).

آنچه در اتصال رسوب اهمیت ویژه‌ای دارد، انتخاب عامل وزنی مناسب است. ازاین‌رو، باید خصوصیات سطحی که در فرایندهای رواناب و جریان رسوبات در یک حوضه آبخیز یا دامنه مؤثرند، اخذ شود. عامل وزنی، باید موانع حرکت آب و رسوب را نشان دهد و با ویژگی‌های قابل‌مشاهده و قابل‌اندازه‌گیری کاربری، خاک و مدیریت اراضی مرتبط باشد و همچنین باید در قسمت‌های بالا و پایین‌دست شیب هر نقطه مشخص در امتداد هر شیب قابل‌اجرا باشد (Heckmann & Vericat., 2018). عامل وزنی به دلیل ویژگی‌های کاربری اراضی و سطح خاک، مقاومت در برابر رواناب و رسوب را نشان می‌دهد که کارایی تحویل رسوب به رودخانه‌ها را کنترل می‌کند (Borselli et al. 2008;Liu et al. 2022; Zanandrea et al. 2021). محققان بسته به ویژگی‌ها و اطلاعات موجود و مقیاس موردمطالعه، ویژگی‌های متفاوتی مانند عوامل مانند فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، بارش‌های پیشین، رواناب سطحی تجمعی و نفوذپذیری را در تعیین اتصال رسوب استفاده نموده‌اند (Foerster et al., 2014; Gartner et al., 2015; Cavalli et al., 2013).

نجفی و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی به بررسی تغییرات زمانی و مکانی اتصال رسوب آبخیز تهم‌چای استان زنجان پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که امکان شناسایی مناطق همگن ازنظر میزان احتمال انتقال رسوب در سرتاسر حوضه آبخیز وجود دارد. عربخدری و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی رابطه بین رسوب‌دهی و شاخص اتصال رسوب در آبخیزهای کوچک و با امکان بالقوه رسوب مشابه پرداختند، نتایج آن‌ها نشان داد که بین رسوب‌دهی خروجی آبخیزها و شاخص اتصال رسوب تطابق قابل‌قبولی ($R = 0.84$) وجود دارد؛ همچنین محققان این تحقیق با توجه به نتایج به‌دست‌آمده تسریع کردند که امکان استفاده از این شاخص جهت کمی‌سازی توزیعی مکانی SDR در سرتاسر حوضه آبخیز وجود دارد که نشان از قابلیت بالای این شاخص در تحلیل‌های مکانی و زمانی انتقال رسوب دارد (Arabkhedri et al., 2021).

اسدی و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از شاخص رطوبت خاک و عامل پوشش گیاهی و ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه، اتصال رسوب ساختاری و کارکردی را ارزیابی و مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند عامل فیزیوگرافی، با واقعیت وضع موجود منطقه مطابقت بیشتری دارد (Asadi et al., 2023). وستر و همکاران (۲۰۱۴)، اتصال ساختاری و عملکردی رواناب در یک حوضه آبخیز آتش‌سوزی شده در کالیفرنیا را بررسی کردند، نتایج نشان داد بارندگی با شدت و مقدار کمتر، اتصال رسوبی پایین‌تری دارد (Wester et al., 2014).

1. Index of Sediment Connectivity

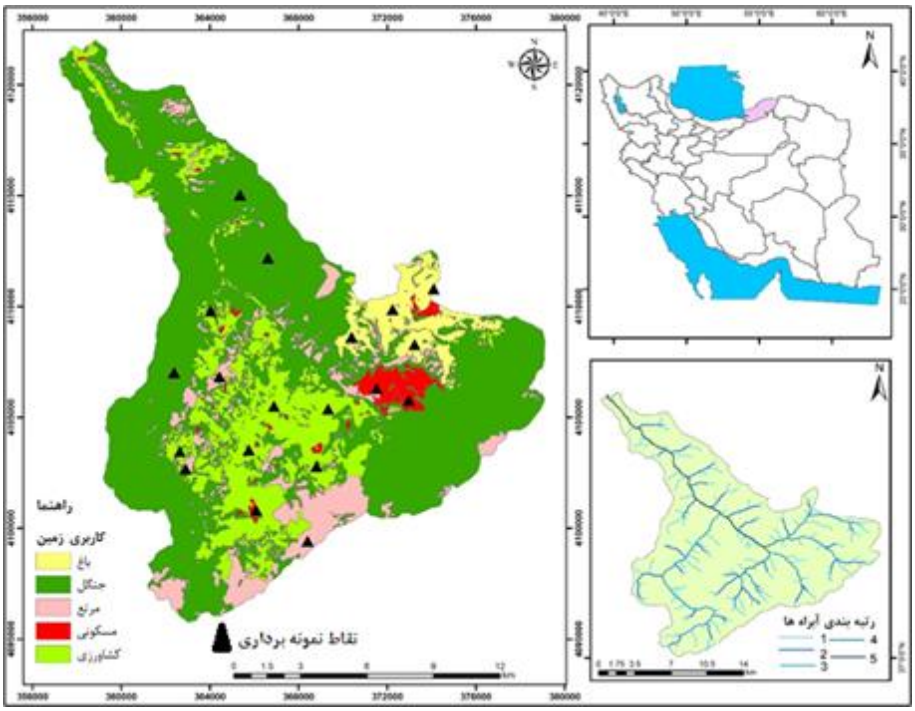
فرسایش‌پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک نسبت به فرسایش و سهولت جداشدن ذرات آن براثر انرژی جنبشی، قطرات باران و انتقال آن‌ها توسط نیروی رواناب است و درواقع ناشی از تأثیر بسیاری از خصوصیات خاک و اثرات متقابل بین آن‌ها است (Nosrati et al., 2011).

مرور پیشینه پژوهش نشان داد که اگرچه شاخص‌های متنوعی در مدل‌های اتصال رسوب مورداستفاده قرار گرفته است؛ اما ویژگی فرسایش‌پذیری خاک کمتر موردتوجه قرار گرفته است. تغییر کاربری شدید حوضه چهل چایی از جنگل به مرتع و کشاورزی که منجر به از بین خاک شده است از مشکلات قابل‌توجه در حوضه محسوب می‌شود، ازآنجاکه با آگاهی از میزان فرسایش‌پذیری و اتصال رسوب می‌توان به قابلیت خاک در پایداری یا عدم پایداری محیط پی برد؛ بنابراین هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی عامل فرسایش‌پذیری خاک به‌عنوان عامل وزنی در محاسبهٔ شاخص اتصال رسوب و بررسی پراکنش مکانی آن می‌باشد. بدین ترتیب در این پژوهش، علاوه بر شاخص‌های فیزیوگرافیک حوضه آبخیز، فرسایش‌پذیری خاک نیز بر اساس نمونه‌های برداشت شده از انواع کاربری اراضی تعیین و به‌عنوان عامل وزنی در محاسبهٔ شاخص اتصال رسوب به کار گرفته شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

حوضه آبخیز چهل چای با مساحت حدود ۲۵۶۸۰ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیایی ′ ۲۲ , °۵۵ الی ′ ۳۷, °۵۵ طول شرقی ′ ۵۷, °۳۶ الی ′ ۱۵, °۳۷ عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع حوضه بین ۱۸۸ تا ۲۴۵۴ متر و میانگین شیب منطقه بین ۴۰-۳۵ درصد است. بر اساس داده‌های اقلیمی، میانگین ۳۰ ساله بارش در دورهٔ زمانی ۶۸-۹۸، ۷۵۰ میلی‌متر است. پوشش گیاهی قالب حوضه در بخش شمالی، جنگل و در جنوب به تیپ مرتعی تغییر می‌یابد. در حال حاضر ۵۰ درصد حوضه را جنگل، ۳۶/۵ درصد کشاورزی، ۹/۸ درصد مرتع و ۴ درصد مسکونی تشکیل می‌دهد. شکل ۱، موقعیت کاربری حوضه را نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر با توجه به روند رو به افزایش جمعیت و برخورداری حوضه چهل چایی از شرایط آب و هوایی مناسب، تغییر شدید کاربری جنگل به کشاورزی دیم، افزایش قابل توجهی پیدا کرده است، به‌طوری‌که بر اساس گزارش مطالعات شرکت مهندسی مشاور، بار کل رسوب معلق و رسوب کف در ایستگاه لزوره، ۲۱/۱۴۴۸۴ تن در سال برآورد شده است.



شکل ۱. موقعیت استان گلستان، حوضه آبخیز چهل چایی و نقاط نمونه‌برداری خاک

نمونه‌برداری

ازآنجاکه نمونه‌برداری باهدف محاسبهٔ فرسایش‌پذیری خاک انجام شد، در معرض فرسایش بودن کاربری‌ها، عامل مهم در انتخاب نقاط نمونه‌برداری به شمار می‌آید. بر اساس بازدیدهای میدانی و مطابقت با نقشه کاربری اراضی، نقاط نمونه‌برداری که شامل اراضی کشاورزی، جنگل، مرتع و باغ بود، تعیین گردید. نمایی از تغییرات گسترده کاربری اراضی از جنگل به کشاورزی در شکل ۲، نمایش‌داده شده است.

از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک به جهت اینکه معرف کاملی از تأثیر فرسایش بارانی یا پاشمانی[1] باشد، با استفاده از بیلچه و رینگ آهنی، در هر کدام از کاربری‌ها نمونه‌برداری انجام شد و در داخل پاکت زیپ دار قرار گرفت. با توجه به هدف نمونه‌برداری و وضعیت کاربری و وسعت حوضه، ۷۵ نمونه برداشت شد.

شکل ۲. نمایی از تغییر کاربری گسترده در حوضه از جنگل به کشاورزی

عملیات آزمایشگاهی

بنا به تعریف، شاخص اتصال رسوب به خصوصیات فیزیکی نواحی بالادست و پایین‌دست وابسته است. شاخص فرسایش‌پذیری خاک می تواند ارتباط مستقیمی با نحوهٔ اتصال رسوب پیدا کند؛ چراکه فرسایش‌پذیری خصوصیات فیزیکی خاک را بررسی می‌کند، یعنی اعدادی که حاصل فرسایش‌پذیری هستند، میزان پتانسیل یا توان آن نمونه در فرسایش و انتقال همان نمونه خاک دارد (گرامی و همکاران، ۱۴۰۱). به عنوان مثال، هرچه سرعت نفوذپذیری خاک بیشتر باشد، روان‌آب و رسوب کمتر است، یکی از روش‌های افزایش نفوذپذیری، اضافه کردن مواد آلی به خاک است.

مواد آلی هم یکی از پارامترهای کلیدی شاخص فرسایش‌پذیری است. همچنین بین مقدار سیلت و فرسایش‌پذیری آن ارتباط نزدیکی وجود دارد، هرقدر سیلت خاک بیشتر باشد، فرسایش‌پذیری افزایش پیدا می‌کند چون سیلت چسبندگی ندارد و در نتیجه روان‌آب و رسوب کمتری تولید می شود، سیلت هم یکی از پارامترهای اصلی در شاخص فرسایش‌پذیری خاک محسوب می شود (رفاهی، ۱۳۸۸: ۱۵۵). با توجه به اهمیت فرسایش‌پذیری خاک و نقش مهمی که در پایداری خاک می‌تواند ایفا کند، با استفاده از تکنیک میدانی و آزمایشگاهی، فرسایش‌پذیری خاک محاسبه و به بررسی ارتباط با شاخص اتصال رسوب پرداخته شد.

در آزمایشگاه، نمونه‌ها در آون با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و عوامل موردنیاز در شاخص فرسایش‌پذیری که شامل کربن آلی با استفاده از روش تیتراسیون و استفاده از محلول سولفات آمونیوم (Walkley & Black,1934) و درصد شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری (Kroetsch,2011)، اندازه‌گیری شدند.

شاخص اتصال رسوب

فاصلهٔ عوارض از مخزن رسوب، ویژگی‌های مسیر حرکت رسوب در آبراه‌ها و جریان تجمعی رواناب خروجی حوزه به‌عنوان پارامترهای مؤثر در اتصال رسوب هستند. مدل رقومی ارتفاعی عامل مهم در محاسبهٔ شاخص اتصال رسوب است. به‌منظور نزدیک‌شدن به واقعیت هیدرولوژیکی، DEM pre-processing اجرا شد (Najafi et al., 2021). در گام بعدی، برای رفع

1. Splash erosion

خطاهای مدل رقومی زمین از Sink Filling استفاده شد. جهت تهیهٔ نقشه پوشش گیاهی از شاخص NDVI، مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ به تاریخ خرداد ۱۴۰۲ استفاده شد. سپس بر اساس لایه ارتفاعی رقومی تولید شده، لایه‌های شیب (دستور Slope)، جهت جریان (دستور Flow direction) و جریان تجمعی (دستور Flow accumulation) تهیه شد.

پارامترهای Dup[1] (اجزای تشکیل‌دهنده عامل اتصال رسوب در بالادست حوضه) و Ddn[2] (اجزای تشکیل‌دهنده عامل اتصال رسوب در پایین‌دست حوضه) دو بخش اصلی در محاسبهٔ شاخص اتصال رسوب هستند که در ادامه به‌تفصیل بیان می‌شود.

عوامل Dup به شرح ذیل هستند: $\overline{W}$ میانگین عامل وزنی سطح مشارکت بالادست به‌دست‌آمده در مراحل قبل (بدون بعد)؛ $\bar{S}$ میانگین شیب بالادست (متر بر متر)؛ A مساحت بالادست (متر مربع).

Ddn شامل: di طول مسیر آبراهه به سمت پایین‌دست دامنه در سلول i ام نقشه شبکه‌ای مورداستفاده (به متر)؛ Wi عامل وزنی سلول i ام که در این پژوهش نقشهٔ فرسایش‌پذیری که بر اساس داده‌های میدانی و آزمایشگاهی تهیه گردید، استفاده شده است، Si تندی شیب مربوط به سلول i ام. برای جلوگیری از نتایج غیرواقعی در (IC) حداقل و حداکثر تندی شیب ۰/۰۰۵ و ۱ متر بر متر در معادله در نظر گرفته‌شده است .(Cavalli et al., 2013)

عامل وزنی W، مقاومت محلی به جریان رواناب و انتقال رسوب ناشی از ویژگی‌های پوشش و سطح زمین را نشان می‌دهد که در این پژوهش از نقشه فرسایش‌پذیری خاک استفاده شد. ازاین‌رو، این عامل از ویژگی‌های سطحی که فرایندهای تولید رواناب و رسوب در یک آبخیز یا دامنه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند، مشتق می‌شود. رابطه ۱، فرمول محاسبه را نشان می‌دهد.

$$IC_k = \log 10\left(\frac{D_{up.k}}{D_{dn.k}}\right) = \log_{10}\left[\frac{\overline{W}_k \overline{S_k}\sqrt{A}}{\sum_{i=k.n_k}^{n} \frac{d_i}{WS_{i_i}}}\right] \qquad \text{رابطه (۱)}$$

ازآنجاکه تلفیق و ارتباط سازی و فراهم‌آوردن نقشه از داده‌های مکانی و زمانی مربوط به ویژگی‌های سطح زمین در سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام می‌پذیرد، برای محاسبه IC و تهیه نقشهٔ آن از ابزاری که در نرم‌افزار Connectivity (Toolbox for ArcGIS 10.3 ArcGIS 10.7.1) قابل افزودن است و بر اساس برنامه‌نویسی که برای محاسبهٔ شاخص صورت‌گرفته توسط (Cavalli et al., 2013) منتشر شده، استفاده گردید. همچنین برای بررسی کمی شاخص اتصال بر اساس طبقه‌بندی کاربری اراضی، با استفاده از افزونهٔ Zonal statistics as a table در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 استفاده شد. شاخص اتصال مقادیر بین مثبت بی‌نهایت تا منفی بی‌نهایت را شامل می‌شود. از محدودیت‌های استفاده از شاخص اتصال رسوب، می‌توان به مدل رقومی ارتفاع در فاصلهٔ ۳۰ متری اشاره کرد که ممکن است خطای ناچیزی در نتایج ایجاد کند.

شاخص فرسایش‌پذیری خاک

با توجه به آنچه که در بخش عملیات آزمایشگاهی شرح داده شد، بعد از به‌دست‌آوردن مواد آلی و بافت خاک هر نمونه، فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از رابطه زیر برآورد گردید (Nosrati et al., 2011)، رابطه ۲، فرمول محاسبه فرسایش‌پذیری را ارائه می‌کند.

$$K = \frac{\{2.1*(10)^{-4}(M)^{1.14}(12-a)+3.25(b-2)+2.5(c-3)\}}{7.593} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

a= میزان مواد آلی هر نمونه خاک؛ b= کد ساختمان خاک (دانه‌ای بسیار ریز ۱-۲ میلی‌متر)، (دانه‌ای ریز ۲-۵ میلی‌متر)، (دانه‌ای متوسط تا درشت ۲-۵ میلی‌متر)، (بسیار درشت <۱۰ میلی‌متر)، c= کد نفوذپذیری خاک (۱= نفوذپذیری بسیار سریع)، (۲= نفوذپذیری متوسط تا سریع)، (۳= نفوذپذیری متوسط)، (۴= نفوذپذیری آهسته تا متوسط)، (۵= نفوذپذیری آهسته)، (۶= نفوذپذیری بسیار آهسته)،

1. Upslope component
2. Downslope component

M از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود، رابطه ۳:

رابطه (۳) M= (درصد رس-۱۰۰) * (درصد شن ریز+ درصد لای)

شن خیلی ریز = ذرات خاک با قطر (۰/۱-۰/۰۵ میلی متر)، درصد لای= ذرات خاک با قطر (۰/۰۵-۰/۰۰۲ میلی‌متر)، رس= ذرات خاک با قطر (کمتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر)

نتایج

شکل ۳، نقشه‌های خروجی حاصل از اعمال شاخص‌های اتصال رسوب را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۳ الف، گرادیان شیب حوضه در بازهٔ حداکثر ۱ و حداقل ۵ ۰/ قرار گرفته است که شامل بخش‌های شمال غرب و شمال شرق حوضه بوده که پوشش گیاهی آن شامل جنگل‌های بومی و دست‌کاشت است و عوارض مرتفع از جمله تیغه‌های بزرگ ساختمانی و دره های وی شکل در این محدوده گسترش پیدا کرده اند. شکل ۳ ب، خروجی نقاط ارتفاعی حوضه را نشان می‌دهد. بالاترین نقطه با ارتفاع ۲۴۵۴ متر در منتهی الیه جنوب قرار گرفته و هم‌مرز با استان سمنان است، کمترین ارتفاع ۱۸۸ متر بوده و در خروجی حوضه آبخیز قرار دارد. در شکل ۳ ج، الگوی مکانی فرسایش‌پذیری خاک قابل مشاهده است. در بخش مرکزی حوضه که با رنگ زرد و قهوه‌ای قابل رویت بوده و کاربری کشاورزی و مرتع غالب است، فرسایش‌پذیری خاک در حداکثر میزان ۲۶ ۰/ (تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول بر میلی متر) در کاربری مرتع و ۲۳ ۰/ (تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول بر میلی متر) در کاربری کشاورزی قرار دارد و در مقابل کمترین میزان فرسایش‌پذیری در کاربری جنگل با عدد ۰/۰۱۴ (تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول بر میلی‌متر) قرار دارد، همچنین کاربری باغ نیز با مقدار فرسایش‌پذیری ۰/۰۱۹ (تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول بر میلی‌متر) که از مرتع و کشاورزی کمتر و از جنگل بیشتر است، قرار دارد.

همان‌طور که در شکل ۳ د مشخص است، بر اساس طبقه‌بندی صورت گرفته، میانگین نرخ اتصال رسوب در کاربری جنگل ۱/۹-، باغ ۱/۳، مرتع ۴/۶ و کشاورزی ۵/۹ است. هرچه این شاخص به‌سوی مثبت باشد، اتصال کارکردی یا پتانسیل منابع برای انتقال رسوب بیشتر است و هرچه به سمت منفی میل کند، این اتصال و پتانسیل کاهش پیدا خواهد کرد. الگوی پراکنش مکانی اتصال رسوب نشان داد آن دسته از کاربری‌هایی که فرسایش‌پذیری بالاتری دارند، به همان میزان قابلیت بالاتری در اتصال رسوب را به خود اختصاص داده‌اند.

در آبراهه‌های منتهی به زمین‌های کشاورزی و مراتع که با رنگ آبی مشخص است، اتصال رسوب بالا بوده و در محدوده‌های منتهی به کاربری جنگل، اتصال رسوب پایین است. فرسایش‌پذیری خاک به‌عنوان یک فاکتور مؤثر در اتصال رسوب تأیید شده است.

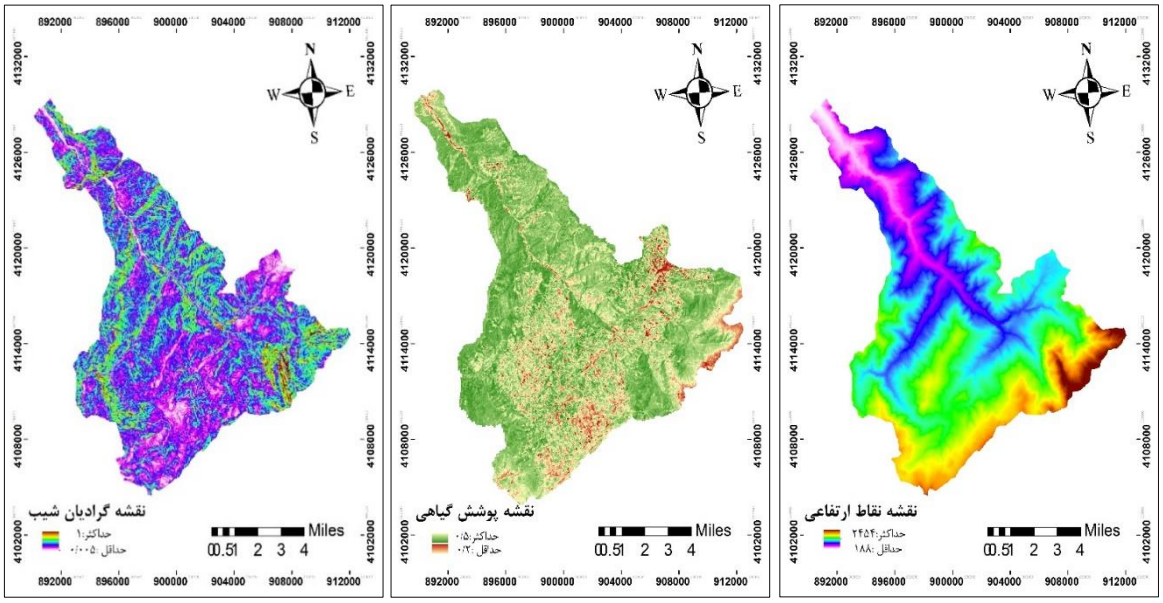
جدول ۱، خلاصهٔ ویژگی‌های مستخرج از نقشه‌های به دست آمده را ارائه می‌دهد. فاکتور پوشش گیاهی در کاربری جنگل نسبت به سایر کاربری‌ها بالاتر است که ناشی از وجود تاج بلند درختان بوده و ضریب را بالاتر برده است. علی‌رغم اینکه از لحاظ ارتفاع، کاربری جنگل نسبت به سایر کاربری ها بالاتر بوده، اما این عمل در فرسایش‌پذیری و اتصال رسوب تأثیری نداشته و کاربری جنگل، کمترین قابلیت را برای فرسایش‌پذیری دارد و میزان اتصال رسوب در آن از تمام کاربری‌های موجود کمتر است. در مقابل کاربری کشاورزی، علی‌رغم اینکه از لحاظ عامل پوشش گیاهی در وضعیت مطلوبی قرار دارد و نرخ به دست آمده بر اساس تصاویر لندست، تفاوت معنی‌داری با جنگل ندارد، اما بر اساس عملیات میدانی صورت گرفته، فرسایش‌پذیری بسیار بالاتری از جنگل و باغ داشته و تحت تأثیر عامل شیب، اتصال رسوب بالاتری نسبت به سایر کاربری‌ها دارد.

بر اساس مشاهدات میدانی صورت گرفته، فرسایش شدید سطحی در اراضی کشاورزی باعث به وجود آمدن گالی شده که اتصال رسوب را بالاتر برده، چراکه وجود گالی باعث تخریب دامنه‌ها شده و خاک فرسایش یافته سریع تر وارد آبراهه های اصلی می شود. انسان با ایجاد تغییرات در سطح زمین و با تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز که کاربری کشاورزی دارند، بر اتصال اثر می‌گذارد، تحقیقات بسیاری در ارتباط با فرایندهای فرسایش خاک در دامنه‌های زراعی انجام شده است که نقش عامل انسانی در تولید رسوب در زمین‌های زراعی را اثبات می‌کند. متأسفانه به جنبه‌های مختلف تأثیرات انسانی، در فرایندهای مؤثر دامنه‌ها از طریق ایجاد زیرساخت‌های کشاورزی (جاده‌های خاکی، خاکریزها)، عمل خاک‌ورزی و مدیریت

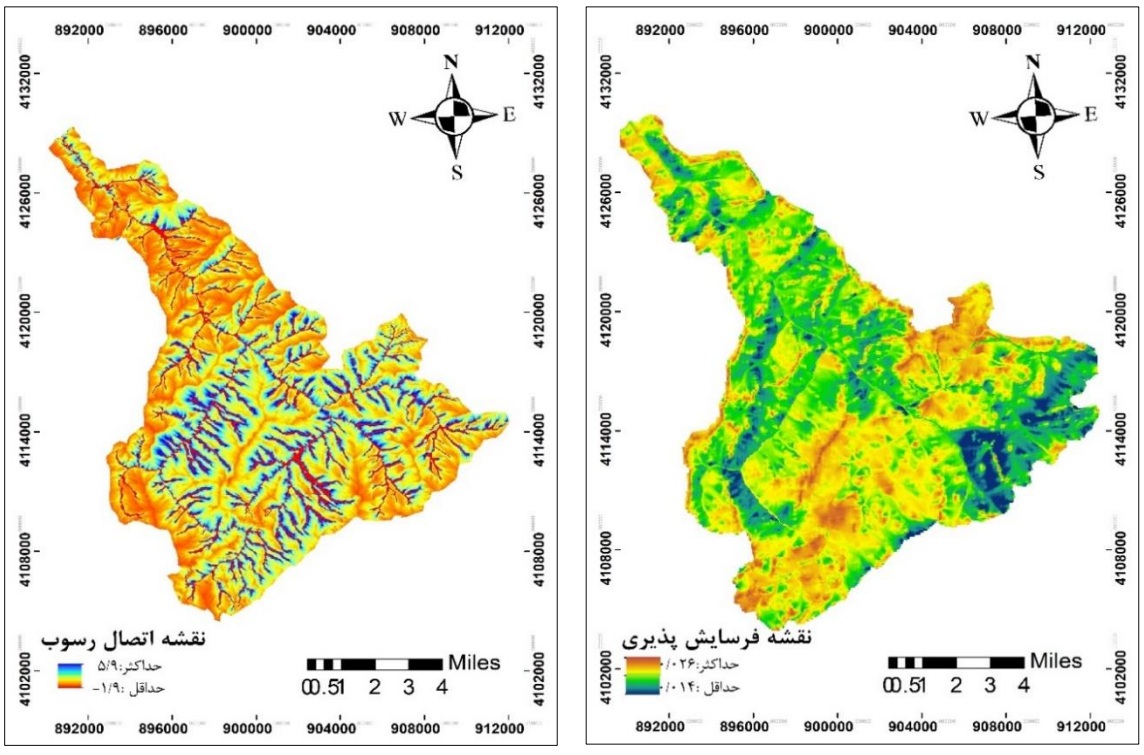
زمین که باعث افزودن غیرطبیعی رسوبات به جریان‌های دامنه‌ای شده است، کمتر توجه شده است (Ventura et al., 2002).

جدول ۱. میانگین عوامل اندازه گیری شده بر اساس کاربری اراضی

پوشش‌گیاهی	فرسایش‌پذیری	ارتفاع (متر)	شیب (درصد)	اتصال رسوب	کاربری
۰/۳۴۴	۰/۰۱۴	۲۳۰۳	۲۹	۹.۱-	جنگل
۰/۳۲۷	۰/۰۲۳	۱۶۱۲	۴۸	۹.۵	کشاورزی
۰/۲۸۴	۰/۰۱۹	۱۵۶۴	۱۲/۳	۳.۱	باغ
۰/۱۴۴	۰/۰۲۶	۲۳۰۸	۱۹/۷۷	۶.۴	مرتع



الف ب ج



د هـ

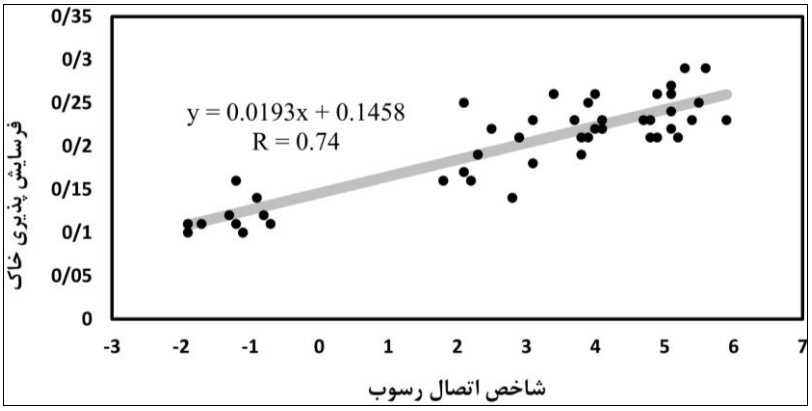
شکل ۳. نقشه‌های پراکنش مکانی نقاط ارتفاعی (الف)، پوشش گیاهی (ب)، گرادیان شیب (ج) فرسایش‌پذیری (د) اتصال رسوب (هـ)

جدول ۲، میانگین عوامل بافت خاک و مواد آلی و فرسایش‌پذیری خاک را در کاربری‌ها نشان می‌دهد. کاربری جنگل بیشترین میزان مواد آلی (۵/۵ کیلوگرم در مترمکعب) و کمترین نرخ فرسایش‌پذیری را به خود اختصاص داده است و در کاربری مرتع بیشترین میزان فرسایش‌پذیری وجود دارد و مواد آلی کاربری مذکور ۳/۸ کیلوگرم در مترمکعب بوده که نسبت به سایر کاربری‌ها، در کمترین میزان است. مطالعات متعدد ثابت کرده اند که میزان مواد آلی خاک با مدیریت کاربری اراضی ارتباط دارد. مراتع حوضه اکثرا از نوع رهاشده هستند. در سال‌های گذشته تحت تأثیر چرای دام گسترده بوده‌اند که متاسفانه احیا نشدند و نرخ کربن آلی کمتری دارند. همچنین میزان مواد آلی کاربری کشاورزی علی‌رغم اضافه کردن مواد آلی به خاک توسط کشاورزان، نسبت به جنگل کمتر است. عملیات کشاورزی با تغییر مقدار اکسیژن ورودی به خاک بر مادهٔ آلی آن تأثیر می‌گذارد. نوع شخم برگردان که در اراضی کشاورزی حوضه صورت می‌گیرد باعث اختلاط کامل مواد اولیه آلی با خاک و ورود مقدار زیادی هوا به اعماق خاک می‌شود. در مقایسه با دیگر روش‌های خاک‌ورزی، مادهٔ آلی خاک را بیشتر کاهش می‌دهد که با نتایج مطالعات (نصرتی و همکاران، ۱۳۹۶) ، (De Laurentii et al., 2019) و (Guimarães et al., 2013) مشابهت دارد.

جدول ۲. میانگین عوامل بافت خاک و مواد آلی و فرسایش‌پذیری خاک

پارامتر	مرتع	کشاورزی	جنگل	باغ
رس(%)	۳۸	۴۴	۴۸	36
ماسه (%)	۱۵	۱۱	۷	۲۶
سیلت (%)	۴۷	۴۸	۴۵	۳۸
مواد آلی (g/kg^{-1})	۳/ ۲	۴/۱	۵/۵	۹/۴
فرسایش‌پذیری (تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول بر میلی‌متر)	۰/۲۶	۲۳/۰	۱۴/۰	۰/۱۹

رگرسیون خطی و ضریب همبستگی شاخص اتصال رسوب و فاکتور فرسایش‌پذیری محاسبه شد. نتیجهٔ به‌دست‌آمده حدود ۷۴ درصد همبستگی را نشان می‌دهد. روند کلی بیانگر این است که ویژگی فرسایش‌پذیری خاک و اتصال رسوب رابطهٔ مستقیم با یکدیگر دارند. همان‌طور که در این پژوهش مشخص شد که کاربری جنگل با توجه به اینکه کمتر تحت تأثیر قدرت عوامل فرسایش‌زا از جمله بارش مستقیم باران و عملیات کشاورزی بوده، اتصال رسوب کمتری دارد بدین معنی که احتمال انتقال رسوب کمتر است. اراضی کشاورزی و مراتع با توجه میزان فرسایش‌پذیری بالا و نفوذپذیری کمتر آنها، اتصال رسوب بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند. نتیجهٔ برازش مقادیر شاخص اتصال رسوب (IC) با شاخص فرسایش‌پذیری در ۵۰ نقطه در شکل ۴، نشان داده شده است. رابطهٔ این دو شاخص از نوع خطی بوده و ضریب تبیین (R =۰/۷۴) به دست آمد که نشان از دقت نسبتا بالای نتایج حاصل از شاخص اتصال رسوب با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است.



شکل ۴. نمودار برازش شاخص اتصال رسوب و فرسایش‌پذیری خاک در حوضه آبخیز چهل‌چایی

در این پژوهش، از شاخص فرسایش‌پذیری خاک به‌عنوان عامل وزنی در محاسبهٔ اتصال رسوب استفاده شد. بر اساس نتایجی که از محاسبهٔ فرسایش‌پذیری خاک به دست آمد، زمین‌های کشاورزی و مراتع فرسایش‌پذیری بالاتری نسبت به

کاربری جنگل و باغ دارند، نقشه‌های خروجی اتصال رسوب نشان داد، بخش‌هایی که در معرض فرسایش‌پذیری بالاتر هستند، اتصال رسوبی بیشتری دارند؛ یعنی هر چه مقاومت ذرات خاک این کاربری‌ها در برابر جدایش و انتقال کمتر باشد، اتصال رسوب آنها بالاتر می‌رود. ازآنجا که ضروری است نتایج به‌دست‌آمده در محیط نرم‌افزار با واقعیت میدانی مطابقت بالا داشته باشد، به نظر می‌رسد، میزان فرسایش‌پذیری خاک عامل وزنی مناسبی برای مطالعات اتصال رسوبی باشد؛ چراکه داده‌های فرسایش‌پذیری خاک بر مبنای مطالعات میدانی و آزمایشگاهی به دست می‌آید و دو پارامتر مهم مادهٔ آلی و بافت خاک که نقش مهمی در استحکام و پایداری خاک دارند، شدت فرسایش‌پذیری را تعیین می‌کند.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد کاربری جنگل و مرتع به ترتیب بیشترین مقدار آلی را به خود اختصاص داده‌اند. مواد آلی از عوامل اصلی شکل‌گیری و تکامل خاک به شمار می‌آید و آگاهی از وضعیت و مقدار این مادهٔ مهم در کیفیت خاک و فرسایش‌پذیری و در نتیجه پایداری خاک ضروری است. مواد آلی انرژی بسیاری از فرایندهای مهم خاک را تأمین می‌کند که بدون آن پایداری خاک امکان‌پذیر نیست. هرچه مادهٔ آلی بیشتری داشته باشیم و خاک‌ورزی و درنتیجه ورود دی‌اکسیدکربن به خاک کاهش یابد، مقدار مادهٔ آلی بیشتری در خاک حفظ می‌شود. حفظ و بهبود مادهٔ آلی خاک مزیتی چندجانبه دارد، زیرا علاوه بر پایداری خاک، آثار منفی گرم‌شدن جهانی را نیز تا حد زیادی تعدیل می‌کند. اکسیژن تا حد زیادی عامل تفاوت مقدار مادهٔ آلی خاک‌های با بافت متفاوت است. شن که به دلیل خلل‌وفرج زیادش مقدار هوای زیادی دارد، معمولاً کمترین مقدار مواد آلی را در بین خاک‌های گوناگون دارد. خاک‌های لومی که در مقایسه با خاک‌های شنی خلل‌وفرج کمتری دارند، ازلحاظ مقدار مادهٔ آلی، در حد واسط خاک‌های شنی و رسی (که کمترین خلل‌وفرج و بیشترین ماده آلی را دارند) قرار می‌گیرند.

به‌طورکلی بر اساس نتایج پژوهش حاضر، امکان بررسی اتصال ساختاری و تغییرات مکانی آن در گستره آبخیز وجود دارد و از طریق آن می‌توان به پهنه‌بندی اولیه و فیزیکی از بخش‌های مختلف ازنظر احتمال انتقال رسوب دست‌یافت. کاربری جنگل کمترین و کاربری‌های کشاورزی و مرتع به ترتیب کمترین و بیشترین پتانسیل انتقال رسوب را به خود اختصاص داده‌اند. این موضوع از این نظر اهمیت دارد که تشخیص مناطق همگن ازنظر میزان احتمال انتقال رسوب تولیدی، سبب اتخاذ تصمیمات و برنامه‌های اصلاحی و مدیریتی هدفمند در مورد تولید و انتقال رسوب شود. اهمیت دیگر این روش، استفاده از آن در ارزیابی تأثیر اقدامات مدیریتی و اصلاحی در کاهش پتانسیل انتقال رسوب در زمان و مکانی مشخص است که منجر به تقویت یا اصلاح رویکردهای اتخاذشده قبلی خواهد شد. تحقیقات بسیاری بر فرایندهای فرسایش خاک در دامنه‌های زراعی انجام‌شده است که نقش عامل انسانی در تولید رسوب در زمین‌های زراعی را اثبات می‌کند (Haddadchi et al., 2014; Montgomery, 2007; Bracken et al., 2015).

متأسفانه در تحقیقات اتصال رسوب، به جنبه‌های مختلف تأثیرات انسانی، در فرایندهای مؤثر دامنه‌ها از طریق ایجاد زیرساخت‌های کشاورزی (جاده‌های خاکی، خاک‌ریزها)، عمل خاک‌ورزی و مدیریت زمین که باعث افزودن غیرطبیعی رسوبات به جریان‌های دامنه‌ای شده است، کمتر توجه شده است. علی‌رغم افزایش قابل‌توجه تحقیقات اتصال رسوب، بیشتر مطالعات تا به امروز بر اتصال ساختاری (فیزیکی) متمرکز بوده و توجه کمتری به اتصال کارکردی (مبتنی بر فرایند) شده است (Himmelstoss et al., 2024). در مطالعه‌ای دیگر نویسندگان به این نتیجه رسیدند، بین عامل پوشش گیاهی و اتصال رسوب همبستگی بالایی وجود دارد، آن قسمت از حوضه که پوشش متراکم و مدیریت شده و دست‌نخورده بود اتصال منفی و کمتر وجود دارد و بالعکس در آن بخش از حوضه که پوشش در معرض آسیب و مدیریت نادرست مانند کشاورزی نامناسب با موقعیت حوضه انجام می‌شود، اتصال بالاتر و مثبت بود (ذرتی‌پور و حیدری ۱۴۰۱؛ Zanandrea., 2021). همچنین، نجفی و همکاران (۱۳۹۶)، تغییرات زمانی و مکانی الگوی اتصال ساختاری رسوب در حوزه آبخیز تهمچای زنجان را تحت دو سناریوی اتصال رسوبی دامنه و خروجی آبخیز و دامنه و شبکه آبراهه‌ای سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ بررسی کردند، نتایج نشان داد، شاخص اتصال در طی این سه سال از ۵- به ۷- کاهش‌یافته است که می‌تواند ناشی از اجرای اقدامات

آبخیزداری مناسب در جهت کاهش فرسایش و رسوب در حوضه باشد.

نتیجه‌گیری

درک اتصال، فهم ما از فرایندهای چشم‌انداز را افزایش می‌دهد و امکان توسعه روش‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی بهتر را فراهم می‌کند. این رویکردهای اندازه‌گیری و مدل‌سازی به نوبه خود منجر به پتانسیل بهتری برای اجرای مفهوم اتصال رسوب به‌عنوان یک ابزار مدیریت پایدار منابع طبیعی در حوضه آبخیز می‌شود و موجب دردسترس‌بودن و کاربرد واقعی شاخص‌های اتصال رسوب در مدیریت پایدار آبخیزها شود. شناسایی اتصال رسوب، پتانسیل راه‌حل‌هایی جامع‌تر را در حوضه آبخیز فراهم می‌کند و می‌تواند به طراحی اقدامات حفاظت خاک در دامنه‌ها کمک کند. شاخص اتصال رسوبی به‌عنوان یکی از ابزارهای کاربردی در ارتباط با خدمات اکوسیستم می‌باشد، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، از سایر شاخص‌های این مجموعه از جمله نرخ نگهداشت خاک در جهت درک بهتر وضعیت پایداری حوضه استفاده کرد. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به نقشه نقاط ارتفاعی ۳۰ متر اشاره کرد، پیشنهاد می‌شود در صورت امکان از نقشه نقاط ارتفاعی با وضوح ۱۰ متر استفاده کرد یا با انتخاب حوضه کوچک‌تر با ابزارهای تصویربرداری از جمله کوادکوپتر یا هلی‌شات، با دقت چندسانتی متری، تصویربرداری کرد.

سپاسگزاری

این پژوهش در راستای حمایت از رسالهٔ دکتری با همکاری بنیاد ملی علم ایران، با شماره قرارداد ۹۹۰۱۹۴۸۸ انجام شده است که نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

منابع

ذرتی‌پور، امین؛ حیدری، کهزاد (۱۴۰۱). بررسی تغییرات سلولی رسوب با استفاده از شاخص اتصال ساختاری حوضه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ابوالعباس خوزستان). *مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۵ (۶)*، ۱۲۱۳-۱۲۲۶ .doi: 10.22059/ijswr. 2022.340158.669224

رفاهی، حسین‌قلی (۱۳۸۸). *فرسایش آبی و کنترل آن تهران*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

گرامی، زهرا؛ عرب‌خدری، محمود؛ کریمی، احمد؛ اسدی، حسین (۱۴۰۱). مروری بر مبانی و کاربرد شاخص اتصال رسوبی در مطالعات فرسایش خاک. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۹)، ۲۳۰۸-۲۱۹۱. doi: 10.22059/ijswr.2022. 345385.669310

نجفی، سعید؛ صادقی، سید حمیدرضا؛ هکمن، توبیاس (۱۳۹۶). تغییرات زمانی و مکانی الگوی اتصال ساختاری رسوب در حوضهٔ آبخیز تهم‌چای زنجان. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک*، ۲۴(۳)، ۱۳۱-۱۴۷. doi: 10.22069/jwfst.2017. 112220.2557

نصرتی، کاظم؛ زارع، محمدرضا؛ جلالی، سعیده (۱۳۹۶). تعیین سهم سازندهای زمین‌شناسی در تولید رسوب معلق با استفاده ازروش منشایابی رسوب حوزه آبخیز زیارت استان گلستان، *تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۲)*، ۳۷۹-۳۸۷. doi: 10.22059/ijswr.2018.254423.667874

References

Arabkhedri, M., Heidary, K., & 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)*,1-10. doi: 10.107/s11368-021-02978-z

Asadi, H., Dastorani, M. T., & Sidle, R. C. (2023). Estimating index of sediment connectivity using a smart data-driven model. *Journal of Hydrology,620.129467*. doi: 10.106/j.jhydrol. 12.9467

Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA,75*(3), 268-277. doi: 10.1016/j. catena

Bracken, L. J., Turnbull, L., Wainwright, J., & Bogaart, P. (2015). Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales. *Earth Surface Processes and Landforms,40(2)*.177-188. doi: 10.1002/esp.3635

Cavalli, M., Trevisani, S. Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology, 188*, 31–41. doi: 10.106/

j.geomorph.2012.05.007

Cislaghi, A., & Bischetti., G. B. (2018). Source areas, connectivity, and delivery rate of sediments in mountainous-forested hillslopes: A probabilistic approach. *Science of The Total Environment, 652*. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.318

Croke, J., Mockler, S., Fogarty, P., & Takken, I. (2005). Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology, 68,* 257–268. doi: 10.1016j.geomorph. 2004.11.020

De Laurentiis, V., Secchi, M., Bos, U., Horn, R., Laurent, A., & Sala, S. (2019). Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA. *Journal of Cleaner Production, 215,* 63-74. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.238

Feng, R., Chen, J., Xie, Z., Li ,D., & Yuan, Z. (2023). Experimental determination of sediment transport capacity of rill flow over sandified loess slope. *International Soil and Water Conservation Research,11(*2*)*,301-310. doi: 10.116/j.iswcr2022.

Foerster, S., Wilczok, C., Brosinsky, A., & Segl, K. (2014). Assessment of sediment connectivity from vegetation cover and topography using remotely sensed data in a dryland catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Soils and Sediments,14(*12*),* 1982-2000. doi: 10.1007/ s11368-014-0992-3.

Gartner, J. D., Magilligan, F. J., & Renshaw, C. E. (2015). Predicting the type, location and magnitude of geomorphic responses to dam removal: Role of hydrologic and geomorphic constraints. *Geomorphology,251,*20-30. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.02.23

Gerami, Z., Arabkhedri, M., Karimi, A., & Asadi, H. (2022). 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)

Haddadchi, A., Nosrati, K., & Ahmadi, F. (2014). Differences between the source contribution of bed material and suspended sediments in a mountainous agricultural catchment of western Iran. *CATENA,116,*105-113. doi: 10.1016/j.catena.2013.12.011

Heckmann, T., & 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*, 1547-1554. doi: 10.1002/esp.4.334

Himmelstoss, T., Haas, F., Becht,M., & Heckmann, T. (2024). Catchment-scale network analysis of functional sediment connectivity during an extreme rainfall event in the Grastal catchment, Austrian Central Alps. *Geomorphology, 465.109419*. doi: 10.1016j.geomorph.

Kroetsch, D. J., Geng, X., Chang, S. X., & Saurette, D. D. (2011). Organic soils of Canada: Part 1. Wetland organic soils. *Canadian journal of soil science, 91*(5), 807-822. doi: 10.4141/cjss 10043

Liu, W., Shi, C., Ma, Y., & Wamg, 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

Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences,104*(33), 13268-13272. doi: 10.1073/pnas.0611508104.

Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., & Sadeghi, S. H. (2021). Sediment connectivity concepts andapproaches.*CATENA,196.104880.* doi: 10.1016/j.catena.2020.104880

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) doi: 10.22069/jwfst.2017.112220. 2557

Nosrati , K., Feiznia ,S., Eeckhaut, M.V.D., & Duiker S.J.(2011). Assessment of Soil Erodibility in Taleghan Drainage Basin, Iran, Using Multivariate Statistics, *Physical Geography*, *32(*1*),* 78-96. doi: 10.2747/0272-3646.32.1.78

Nosrati, K., & Collins, A. L. (2019). A soil quality index for evaluation of degradation under land use and soil erosion categories in a small mountainous catchment, Iran. *Journal of Mountain* Science, *16(*11*),* 2577-2590. doi: 10.1007s11629-019-5567-8.

Nosrati, K., Zare, M.R., & Jalali S. (2019). Determining Geological Formation Contribution in Suspended Sediment Yield Using Sediment Fingerprinting Technique (Ziarat basin Golestan Province*). Iranian Journal of Soil and Water Research.50*(2), 397-382. doi: 10.22059/ijswr. 2018.254423.667874. (In Persian)

Refahi, H. GH. (2011). *Water erosion and conservation.* Tehran University press. (In Persian)

Ventura, E., Nearing, M. A., Amore, E., & Norton, L. D. (2002). The study of detachment and deposition one hillslope using a magnetic tracer. *Catena, 48,* 149-161. doi: 10.1016/ S0341-8162(02)00003-6

Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and A Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method: SOIL. http:/journals.lww.com/soilsci/citation/1934/01000

Wester, T., Wasklewicz, T., & Staley, D. (2014). Functional and structural connectivity within a recently burned drainage basin. *Geomorphology,206,*263-372. doi: 10.1016/j.geomorph. 2013.10.011

Zanandrea, F., Michel, G. P., Kobiyama, M., Censi, G., & Abatti, B. H. (2021). Spatial-temporal assessment of water and sediment connectivity through a modified connectivity index in a subtropical mountainous catchment. *CATENA,204.105380*. doi: 10..1016/j.catena.2021. 105380

Zoratipour, A., & Heydari, K. (2022). Monitoring of sediment cell changes in rivers, using basin structural connectivity index (Case study: AbolAbbas Basin in Khuzestan). *Iranian Journal of Soil and Water Research, 53 (*6*),*1213-1226. (In Persian). doi: 10.22059/ijswr.2022.340158. 669224