



Comparison and evaluation of spatial changes of sediment connectivity and sediment delivery ratio in Marcheshme watershed (Semnan province)

Marziye Kayhanpanah¹, Ali Najafinejad^{2✉}, Hamidreza Pourghasemi³, Ali Mohammadian Behbahani⁴

1. Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: m.kayhanpanah@yahoo.com
2. Corresponding Author, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: najafinejad@gau.ac.ir
3. Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir
4. Department of Arid Zone Management, Faculty of Rangeland and watershed management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: mohammadian@gau.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 19, 2021

Revised: Nov. 30, 2022

Accepted: Dec. 3, 2022

Published online: Jan. 22, 2022

Keywords:

Structural sediment connectivity,
Sediment delivery ratio,
WaTEM/SEDEM Model.

ABSTRACT

Watershed sediment yield estimation is an important process in watershed management. Because of limited information on sediment yield in small watersheds, empirical methods are developed in different watersheds. Sediment connectivity is an important characteristic of watershed sediment yield and is compared for better estimation of sediment delivery ratio (SDR). This research aims to compare and evaluate the spatial changes of SDR values and connectivity index on a small watershed scale. This study was conducted in the Marcheshme watershed of Semnan province with an area of 2418 ha. At the outlet of this watershed, an earthen dam was built by the natural resources and watershed management organization of the province (1995). No conservation and management measures were carried out in the watershed. In 2013, the amount of sediment trapped behind the dam was measured by the research center of Semnan province. It should be noted that there isn't any overflow of the earth dam between 1995 and 2013. The WaTEM/SEDEM model was calibrated to calculate the SDR using the measured amount of sediment, and the SDR values for the entire watershed were distributed. A distribution map of the sediment connectivity index was prepared. The highest value of the SDR map was close to 0.5, the lowest value was close to zero, and the sediment connectivity index varied from -6.71 to 3.04. SDR and IC indices show that the amount of sediment transport and delivery near the outlet is higher than the average value in the watershed area. In the upper part of the watershed, erosion is more than the one in other parts, although SDR and the possibility of sediment connection are less than the ones in other parts. These two indicators and distribution of them can be important for prioritizing areas in terms of soil erosion and sediment management. This study shows the up-to-date application of available data and develops their potential for further analysis.

Cite this article: Kayhanpanah, M., Najafinejad, A., Pourghasemi, H. R., Mohammadian Behbahani, A. (2023). Comparison and evaluation of spatial changes of sediment connectivity and sediment delivery ratio in Marcheshme watershed (Semnan province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2655- 2670. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345966.669322>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345966.669322>

مقایسه و ارزیابی تغییرات مکانی اتصال رسوبی و نسبت تحویل رسوب در آبخیز مارچشمه (استان سمنان)

مرضیه کیهان پناه^۱، علی نجفی نژاد^۲، حمیدرضا پورقاسمی^۳، علی محمدیان^۴

۱. دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، ایمیل: m.kayhanpanah@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، ایمیل: najafinejad@gau.ac.ir

۳. دانشکده کشاورزی، مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ایمیل: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir

۴. گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، ایمیل: mohammadian@gau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱

واژه‌های کلیدی:

اتصال ساختاری رسوب،

نسبت تحویل رسوب،

مدل WaTEM/SEDEM.

برآورد رسوب‌دهی آبخیز، یک فرآیند مهم در مدیریت آبخیز است. به دلیل محدودیت اطلاعات تولید رسوب در آبخیزهای کوچک، روش‌هایی تجربی برای برآورد مقادیر آن در آبخیزهای مختلف توسعه داده شده‌است. اتصال رسوبی یکی از مشخصه‌های مهم تولید رسوب حوضه است و برای تخمین بهتر با نسبت تحویل رسوب (SDR) مقایسه می‌شود. هدف از پژوهش حاضر مقایسه و ارزیابی تغییرات مکانی مقادیر SDR و شاخص اتصال در مقیاس آبخیز کوچک است. این مطالعه در آبخیز مارچشمه استان سمنان با مساحت ۲۴۱۸ هکتار، انجام گردید. در خروجی این آبخیز یک بند خاکی توسط مدیریت آبخیزداری سازمان جهاد سازندگی سابق استان (۱۳۷۳)، احداث شده و در آبخیز بالادست آن هیچ‌گونه عملیات آبخیزداری اجرا نشده است. در سال ۱۳۹۱ توسط مرکز تحقیقات استان سمنان مقدار رسوب به تله افتاده در پشت بند اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است تا زمان اندازه‌گیری رسوب تمامی رسوب رسیده به خروجی آبخیز در مخزن بند به تله افتاده و رسوبی از بند سرریز ننموده است. با استفاده از مقدار رسوب اندازه‌گیری شده، واسنجی مدل WaTEM/SEDEM برای محاسبه SDR انجام شد و مقادیر SDR برای کل حوضه به صورت توزیعی برآورد شد. نقشه توزیعی شاخص اتصال رسوبی تهیه شد. بیشترین مقدار نقشه SDR نزدیک به ۰/۵ و کمترین مقدار آن نزدیک به صفر و شاخص اتصال رسوبی از ۶/۷۱- تا ۳/۰۴ متغیر بود. براساس هر دو شاخص SDR و IC، نزدیک خروجی آبخیز میزان تحویل رسوب و انتقال رسوب بیشتر از میانگین کل آبخیز است؛ اما در قسمت‌های شمالی آبخیز، تمرکز حوضه بر تحویل و انتقال رسوب نیست. در نظر گرفتن این دوشاخص و نحوه پراکندگی آنها می‌تواند برای اولویت‌بندی مناطق از نظر مدیریت فرسایش خاک و رسوب مورد اهمیت باشد. این مطالعه، کاربرد به‌روز داده‌های در دسترس و توسعه پتانسیل تحلیل آنها را نشان می‌دهد.

استناد: کیهان پناه؛ مرضیه، نجفی نژاد؛ علی، پورقاسمی؛ حمیدرضا، محمدیان؛ علی، (۱۴۰۱) مقایسه و ارزیابی تغییرات مکانی اتصال رسوبی و نسبت تحویل رسوب در آبخیز مارچشمه (استان سمنان)، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۱)، ۲۶۷۰-۲۶۵۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345966.669322>



© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345966.669322>

مقدمه

فرسایش خاک و جابجایی رسوب یکی از مشکلات مهم در اکثر مناطق جهان است که موجب کاهش توان تولید خاک، افزایش جریان‌های سیلابی، کاهش سلامت سامانه‌های آبی، افزایش رسوب در مخازن سدها و به‌طور کلی مشکلات درون و برون منطقه‌ای^۱ می‌شود (Sandercock & Hooke, 2011; De Walque et al., 2017). بنابراین شناخت تغییرات مکانی فرسایش و رسوب، در مدیریت فرسایش، رسوب و آلاینده‌های آبخیز ضرورت دارد.

نسبت تحویل رسوب^۲، نسبت رسوب خروجی به فرسایش ناخالص است که از یک آبخیز معین در فاصله زمانی مشخصی منتقل می‌شود و مقدار آن بین صفر و یک است. برای زمانی طولانی، SDR از پارامترهای ثابت مورد استفاده در مدل‌سازی بوده است؛ اما، طی زمان استفاده از SDR^۳ که بتواند در کل آبخیز و نه تنها در خروجی آن بیان شود، افزایش یافت (De Boer & Ali, 2010). چرا که به‌واسطه شناسایی مناطق با SDR بیش‌تر، اولویت بندی سرمایه‌گذاری‌های مدیریت منابع طبیعی (Lenhart et al., 2005; De Vente et al., 2008) و در نتیجه ارزیابی مدل از مقدار رسوب تولید شده بهبود می‌یابد (Borselli et al., 2008). برای برآورد SDR توزیعی مدل WaTEM/SEDEM یکی از مدل‌هایی است که به‌طور همزمان قادر به برآورد هدررفت خاک و ظرفیت انتقال^۴ به‌صورت توزیعی می‌باشد. اما اتصال رسوبی^۵ شاخصی است که متغیر SDR را منطقه‌ای کرده و تخمینی از پتانسیل اتصال بین رسوبات، با توجه به مشخصات زمین و ویژگی‌های توپوگرافی ارائه می‌دهد (Borselli et al., 2008).

شاخص اتصال^۵ (IC) توسط Borselli et al. (2008) توسعه داده شد و بعد از آن توسط Cavalli et al. (2016) اصلاح شد. شاخص اتصال رسوبی شاخصی متناسب با ویژگی‌های فیزیکی آبخیز است. بنابراین شاخص اتصال، پتانسیل و احتمال انتقال رسوب را بیان می‌کند و افزایش یا کاهش آن بیان‌گر افزایش یا کاهش احتمال انتقال رسوب، فارغ از مقدار رسوب در آبخیز است. بنابراین تحلیل تأثیر میزان تغییر در شاخص اتصال، سبب درک از تغییر معادل در انتقال رسوب خواهد شد.

Hashemi & Arabkhedri (2009) در پژوهشی در استان سمنان به‌بررسی کارایی مدل MPSIAC با رسوب‌سنجی مخازن^۹ سدخاکی از جمله مارچشمه پرداختند. رسوبات در مخازن سدهای خاکی از طریق نقشه‌برداری و اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل MPSIAC برای مناطق مورد بررسی کارایی مناسبی ندارد. در مطالعه دیگری که توسط Hashemi et al. (2015) انجام شد، نتایج نشان داد که تخمین مدل‌های PSIAC و MPSIAC از مقدار رسوب‌دهی آبخیز مارچشمه، حدوداً ۴۵ درصد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود.

Zhao et al. (2015) تولید و تحویل رسوب منطقه‌ای در بندهای مهار رسوب بخش شمالی چین را با استفاده از مدل WATEM/SEDEM، مدل‌سازی کردند. نسبت تحویل رسوب رسیده به پشت بندها و خروجی ۳۸ درصد و ضریب کارایی مدل مذکور در شبیه‌سازی رسوب بیش از ۹۰ درصد بود. ایشان اظهار داشتند استفاده از این مدل برای بررسی کمی تولید و انتقال رسوب در آبخیزهای فاقد ایستگاه رسوب‌سنجی اما دارای سازه‌های مهار رسوب مفید است.

López-Vicente et al. (2017) در زیرحوضه‌ای جنگل‌کاری شده، اثر فعالیت‌های انسانی ۷۰ ساله بر اتصال رواناب را تعیین کردند. بیش‌ترین اتصال مربوط به شبکه‌های جاده و پیاده‌رو، همین‌طور آبراهه‌ها و خندق‌ها بود، اما جنگل‌های دست‌کاشت باعث کاهش اتصال شده بود. آن‌ها با دقت مکانی یک متر نتیجه گرفتند تغییر در اتصال عمدتاً به تغییر در عامل پوشش گیاهی وابسته است. López Vicente & Ben-Salem (2019) اتصال رسوبی، ساختاری و عملکردی را با یک شاخص جدید در یک حوضه مدیترانه‌ای بزرگ از کشور اسپانیا محاسبه کردند. آن‌ها با مقایسه این شاخص جدید و شاخص اتصال اولیه Borselli et al. (2008) به این نتیجه رسیدند که شاخص جدید کارایی بیشتری نسبت به شاخص اتصال اولیه دارد. آن‌ها از مدل رقومی ارتفاع تصاویر Lidar با دقت ۵ متر استفاده کردند.

Pearson et al. (2020) کاربرد جدیدی از تئوری گراف و معیارهای اتصال را برای تغییرات اتصال ساحلی در هلند به‌کار بردند. آن‌ها

1 On-and Off-Site Problems

۲ Sediment Delivery Ratio (SDR)

۳ Transport Capacity (TC)

۴ Sediment Connectivity

۵ Index connectivity (IC)

منطقه مورد مطالعه را به سلول‌های ژئومورفیک^۱ تقسیم کردند و سپس انتقال رسوب را بین این سلول‌ها با استفاده از یک مدل عددی ارزیابی کردند. در نهایت اعلام کردند اتصال می‌تواند یک تکنیک قابل اعتماد برای پیش‌بینی پاسخ سواحل به تغییر اقلیم فراهم کند. Najafi *et al.* (2021) مفاهیم دسترسی و دست‌یابی به رسوب را در آبخیزی در استان زنجان تحلیل کردند. آنها شاخص IC و SDR را به ترتیب با روش Borselli *et al.* (2008) و SCA^۲ محاسبه و در نهایت ۴ حالت مختلف را برای بیان IC و SDR ارائه کردند که ترکیبی از دو مفهوم اتصال ساختاری و عملکردی است و برای مدیریت آبخیز به کار می‌آید. شناخت الگوی مکانی اتصالات برای مدیریت صحیح منابع زمین و آب و برای درک اثرات محیطی تغییرات اقلیم ضروری است. مرور منابع انجام شده نشان داد بررسی SDR تنها در خروجی حوزه نمی‌تواند برآورد مناسبی از شرایط کل حوزه ارائه کند، لذا شاخصی مثل IC و SDR توزیعی می‌تواند برآورد دقیق‌تری از شرایط حوزه ارائه کنند. هدف از پژوهش حاضر مقایسه و ارزیابی تغییرات مکانی مقادیر SDR و شاخص اتصال در مقیاس آبخیز کوچک است. نوآوری این مطالعه نسبت به مطالعات پیشین انجام شده ارزیابی هم‌زمان SDR و IC با استفاده از داده‌های موجود و مشاهداتی در آبخیز مارچشمه است که این مطالعه را هم از نظر روش محاسبه‌ی هر یک از این مقادیر و هم از نظر استفاده بهینه از داده‌های موجود از دیگر مطالعات متمایز نموده است و راهی برای تخمین دقیقتر رسوب در مناطق بدون آمار و اطلاعات رسوب، پیش‌روی مطالعات بعدی قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

آبخیز مارچشمه در محدوده شهرستان دامغان (با طول جغرافیایی ۵۴/۳۳۵۵۵۵ و عرض جغرافیایی ۳۶/۱۶۳۳۳۳) در استان سمنان واقع شده است. مساحت این حوضه ۲۴۱۸ هکتار می‌باشد و در سال ۱۳۷۳ در خروجی آن توسط مدیریت آبخیزداری سازمان جهاد سازندگی سابق استان، یک بند خاکی، در طول جغرافیایی ۵۴/۴۱۶۹۴۴ درجه و عرض جغرافیایی ۳۶/۲۷۷۲۲۲ درجه احداث و در آبخیز بالادست آن هیچ‌گونه عملیات آبخیزداری اجرا نشد. این بند از نوع خاکی همگن و بدون هسته بوده و هدف از احداث آن کنترل سیلاب و تغذیه منابع آب زیرزمینی است. در سال ۱۳۹۱ توسط مرکز تحقیقات استان سمنان مقدار رسوب به تله افتاده در پشت بند با بررسی وضعیت سرریز، شواهد داغاب و استفاده از اوگر اندازه‌گیری شد. طبق گزارش آنها از زمان احداث تا اندازه‌گیری رسوب پشت بند، سیل از آن سرریز نشد. به‌همین دلیل کل رسوبات تولیدی از آبخیز بالادست آن به تله افتاد. در گزارش نهایی طرح واسنجی مدل‌های تجربی PSIAC و MPSIAC از طریق بررسی رسوب مخازن بندهای کوچک در ایران-استان سمنان که توسط Hashemi *et al.* (2015) به‌انجام رسید، مقدار رسوب ویژه اندازه‌گیری شده پشت بند، ۰/۲۱ (تن بر هکتار بر سال) اعلام شد.

بارندگی متوسط سالانه شهرستان دامغان ۱۳۹ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه آن ۱۲/۹ درجه سانتی‌گراد است. براساس روش دومارتن این حوضه، جزو طبقه اقلیمی خشک محسوب می‌شود (Hashemi *et al.*, 2015). از جمله خصوصیات بارز این حوضه می‌توان، وجود ارتفاعات همراه با شیب‌های نسبتاً تند در نواحی مرزی شمالی را نام برد. در ادامه نقشه راقومی ارتفاع آن ارائه شده است (شکل ۱). از نظر سازند زمین‌شناسی، آبخیز مارچشمه از سازندهای لار، روته، میلا و لالون با درصد‌های مختلف تشکیل شده است. بررسی سنگ شناسی آن وجود نهشته‌های آبرفتی قدیمی، توف و توفیت به همراه شیل و جریان‌ات گدازه‌ای، سنگ آهک خاکستری ضخیم لایه و توده‌ای را نشان می‌دهد. کاربری اراضی آن عمدتاً مرتع فقیر است. ارتفاع بند آن کمتر از ۱۲ متر و مساحت رسوبات مخزن ۷۵۴۵ (مترمربع) می‌باشد.

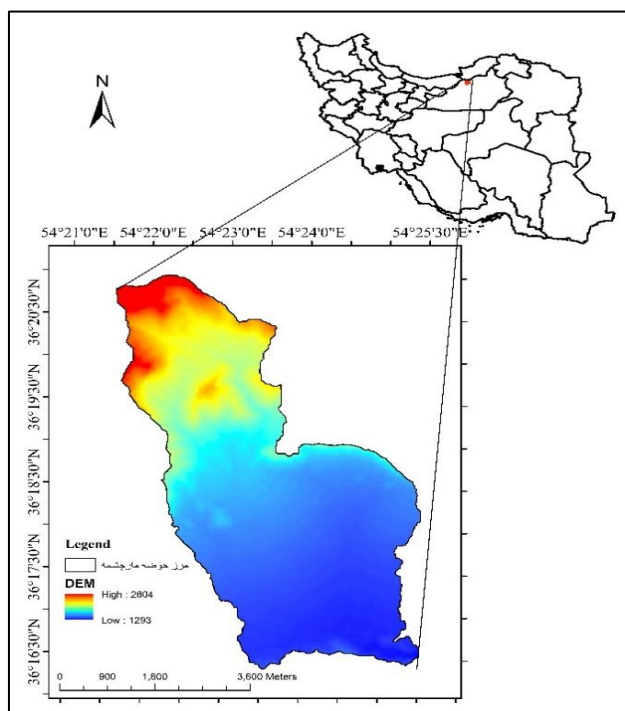
مدل راقومی ارتفاع ۱۲/۵ متری آبخیز مارچشمه از سایت تاسیسات ماهواره‌ای آلاسکا^۳ و ماهواره Alos Palsar استخراج شده است. برای تعیین عامل پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره لندست پنج و هفت، به‌دلیل زمان‌بندی مناسب و دسترسی رایگان، استفاده شد. دلیل دیگر انتخاب این تصاویر هم‌پوشانی آنها با تاریخ احداث بند مارچشمه از سال ۱۳۷۳ و اندازه‌گیری رسوب پشت بند در سال ۱۳۹۱ می‌باشد. روش تحقیق این مطالعه به‌این صورت است که بعد از جمع‌آوری و تهیه داده‌های ورودی مدل WaTEM/SEDEM که شامل مدل راقومی ارتفاع، مرز حوزه، نقشه فرساینده‌ی باران، نقشه فرسایش‌پذیری خاک، نقشه توپوگرافی، نقشه پوشش گیاهی، نقشه پارسل بندی کاربری اراضی، نقشه آبراهه‌ها، نقشه شیب برحسب درجه و درصد، این مدل اجرا شد. این مدل به برآورد هدررفت خاک حاصل از

^۱ Geomorphic cells

^۲ Sediment Contribution Area

^۳ <https://search.asf.alaska.edu/>

فرسایش آبی و همچنین عملیات خاکورزی به‌طور همزمان می‌پردازد. در این رابطه در صورتی که ورودی‌های لازم برای برآورد هدررفت خاک حاصل از خاکورزی در اختیار مدل قرار داده نشود، خروجی نهایی مدل فقط شامل هدررفت خاک حاصل از فرسایش آبی و با استفاده از معادله جهانی هدررفت خاک اصلاح شده خواهد بود. در ادامه واسنجی مدل با ضریب K_{tc} انجام شد و بعد از تهیه ورودی‌ها و اجرای نرم افزار IC، نقشه‌های SDR و IC ارزیابی و بایکدیگر مقایسه شدند.



شکل ۱. مدل رقومی ارتفاع و موقعیت جغرافیایی آبخیز مارچشمه در کشور

ورودی‌های مدل WaTEM/SEDEM

به منظور برآورد مقدار خاک از دست رفته از مدل WaTEM استفاده شد که اساس آن معادله جهانی هدررفت خاک اصلاح شده (RUSLE) است (رابطه ۱):

$$A = R.K.L.S.C.P$$

رابطه ۱)

که در آن، A : میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال)، R : فاکتور فرساینده باران ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$)، K : فاکتور فرسایش‌پذیری خاک ($Mg\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)، L : فاکتور طول شیب، S : فاکتور درجه شیب، C : فاکتور عملیات مدیریتی و پوشش و P : فاکتور عملیات حفاظتی می‌باشد. مقادیر S ، L و C بدون واحد می‌باشند. برای محاسبه هر یک از این عوامل به منابع آنها مراجعه شد (Troeh *et al.* 1996؛ Renard *et al.* 1996؛ Wischmeier & Smith, 1978؛ Moore & Burch, 1986؛ Wischmeier & Smith, 1978؛ Troeh *et al.* 1999). از آنجایی که مدل جهانی هدررفت خاک مدل شناخته شده‌ای است، توضیحات درمورد عوامل آن به‌صورت خلاصه در جدول ۱ آمده است و عوامل ورودی دیگر مدل WaTEM/SEDEM به‌صورت کامل‌تری توضیح داده شده است. جدول ۲ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک تهیه شده در مطالعه Hashemi *et al.* (2015) به‌علاوه مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک محاسبه شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱ نحوه محاسبه عوامل مدل جهانی فرسایش خاک

نام عامل	نماد	نحوه محاسبه (عملی)	اندازه سلول (متر)
فرساینده باران	R	اقتباس از نقشه فرساینده‌گی (EI_{30}) کل کشور (Nikkami <i>et al.</i> 2012). با استفاده از ماژول Topo To Raster به نقشه‌های رستری تبدیل و میان‌یابی شد.	۱۲/۵



۱۲/۵	۱۱ نقطه نمونه برداری از خاک در سطح حوضه مارچشمه وجود داشت که جدول ۲ نشان دهنده آن است و در مطالعه Hashemi <i>et al.</i> (2015) انجام شده است. برای تهیه نقشه رستری فاکتور K در محیط GIS از روش میان‌یابی وزن فاصله معکوس ^۱ (IDW) استفاده شد.	K	فرسایش‌پذیری خاک
۱۲/۵	نقشه فاکتور LS از نقشه DEM و با استفاده از ماژول‌های <i>Flow accumulation</i> و <i>Slope</i> در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.	LS	توپوگرافی
۳۰	از تصاویر ماهواره‌های سری لندست پنج و هفت، سنجنده‌های TM و ETM ^۲ ارائه شده در GEE ^۳ استفاده شده است.	C	مدیریت پوشش گیاهی

مدل WaTEM/SEDEM علاوه بر محاسبه مقدار فرسایش آبی، نسبت تحویل رسوب را به‌عنوان مقداری از رسوب که با آب سطحی منتقل می‌شود، از طریق محاسبه ظرفیت انتقال برای هر پیکسل محاسبه می‌کند و لذا نیاز به ورودی‌های مختلف در سامانه اطلاعات جغرافیایی دارد. از آنجایی که مدل جهانی هدررفت خاک مدل شناخته شده‌ای است، توضیحات در مورد عوامل ورودی دیگر مدل WaTEM/SEDEM در ادامه آمده است.

جدول ۲ - خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک حوضه مارچشمه (Hashemi *et al.*, 2015)

ردیف	درصد سیلت	درصد شن خیلی ریز	درصد شن	درصد رس	درصد ماده آلی	کلاس نفوذپذیری	کلاس ساختمان خاک	بافت خاک	عامل فرسایش - پذیرگی خاک (K)
۱	۱۹	۲	۷۲	۷	۱/۱	۳	۴	لوم شنی	۰/۱۹
۲	۱۹	۷	۶۶	۸	۰/۳	۳	۴	لوم شنی	۰/۲۴
۳	۱۸	۶	۶۲	۱۴	۰/۳	۳	۴	لوم شنی	۰/۲۱
۴	۱۸	۶	۶۲	۱۴	۰/۳	۳	۴	لوم شنی	۰/۲۱
۵	۱۵	۱۸	۵۰	۱۷	۰/۰۳	۲	۴	لوم	۰/۲۵
۶	۱۸	۱۸	۶۰	۴	۰/۱۵	۲	۴	لوم شنی	۰/۳۱
۷	۲۰	۲	۶۹	۹	۰/۲۲	۲	۴	لوم شنی	۰/۱۸
۸	۱۲	۳	۷۶	۱۱	۰/۰۶	۲	۴	لوم شنی	۰/۱۳
۹	۱۳	۱	۷۷	۹	۰/۰۶	۲	۴	لوم شنی	۰/۱۳
۱۰	۱۶	۱	۷۵	۸	۰/۰۶	۲	۴	لوم شنی	۰/۱۵
۱۱						فاقد خاک			۰/۰۰۱

نقشه پارسل^۳

نقشه پارسل یک نقشه طبقه‌بندی شده است که مبنای آن نقشه کاربری اراضی است. این نقشه در حقیقت یک نقشه کاربری اراضی دوباره طبقه‌بندی شده است که براساس مشخصه‌ای که به هر عرصه داده می‌شود تفاوتی بین زمین‌های زراعی، جنگل، مرتع، جاده و اراضی مسکونی ایجاد می‌کند. بنابراین با استفاده از تصاویر لندست پنج و هفت و با استفاده از طبقه‌بندی نظارت شده، نقشه کاربری اراضی استخراج گردید.

محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR)

همان‌طور که گفته شد اساس مدل WaTEM/SEDEM در بخش برآورد هدررفت خاک بر مبنای RUSLE استوار است و لذا عامل‌های زیادی از آن نیز همان لایه‌های تهیه شده برای مدل RUSLE هستند. بخش SEDEM میانگین ظرفیت حمل رسوب سالانه را با استفاده از رابطه ۶ برآورد می‌کند. این مدل مبتنی بر توزیع مکانی است که مقدار جریان ورودی، جریان خروجی و مقدار رسوب و فرسایش را در هر سلول محاسبه می‌کند. ظرفیت حمل حاصل از رابطه ۲ به فرسایندهای باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و کاربری زمین بستگی

^۱ Inverse Distance Weighted

^۲ Google Earth Engine

^۳ Parcel

داشته و با فرسایش شیبی نسبت مستقیم دارد (Van Oost *et al.*، 2000). در این مطالعه ظرفیت حمل بر اساس رابطه ۶ محاسبه شد (Verstraeten *et al.*، 2007):

$$TC = Ktc \times R \times K \times A^{1.4} \times S^{1.4} \quad \text{رابطه ۲}$$

TC یا همان ظرفیت حمل (کیلوگرم بر مترمربع بر سال)، Ktc ضریب ظرفیت حمل (بدون واحد)، R و K فاکتورهای فرسایشی باران و فرسایش پذیری خاک در مدل *RUSLE*، A مساحت آبخیز بالادست (مترمربع) و S مقدار شیب (متر بر متر) است. ضریب ظرفیت حمل (Ktc) اثرات پوشش گیاهی بر ظرفیت انتقال رسوب را منعکس می کند و برای واسنجی استفاده می شود. ضریب ظرفیت حمل رسوب اصلی ترین ضریب برای واسنجی مدل WaTEM/SEDEM است و در بسیاری از منابع از تغییر این ضریب برای واسنجی مدل استفاده شده است (Alatorre *et al.*، 2012؛ Quijano *et al.*، 2016؛ Borrelli، 2018). برای واسنجی مدل بر اساس نتایج پژوهش (Bezak *et al.*، 2015) مقدار ضریب ظرفیت حمل رسوب می تواند از ۷۵ تا ۲۵۰ برای شرایط مختلف توپوگرافی و کاربری اراضی متفاوت باشد. لذا با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای این ضریب، مقدار متوسط رسوب دهی سالانه حوضه برآورد شده و با رسوب دهی اندازه گیری شده مقایسه گردید تا در نهایت مقدار بهینه برای این ضریب در آبخیز انتخاب و به کمک آن نتایج مدل WaTEM/SEDEM واسنجی شد.

به منظور محاسبه متوسط رسوب دهی از نقشه TC حاصل از مدل WaTEM/SEDEM استفاده گردید. در این روش در نرم افزار Arc GIS ابتدا نقشه TC مربوط به حوضه به دست آمد و سپس در قسمت Histogram مربوط به آن عدد میانگین به عنوان متوسط رسوب دهی برای حوضه بالادست بند مارچشمه بر حسب تن در هکتار در سال به دست آمد. پس از تعیین مقدار بهینه ضریب ظرفیت حمل رسوب و تهیه لایه های مختلف مورد نیاز مدل، تمامی لایه های تهیه شده با فرمت Grid در محیط نرم افزار ArcGIS ابتدا به فرمت ASCII و سپس در نرم افزار TerrSet به فرمت IDIRSI تبدیل شدند تا قابل خواندن برای مدل باشد.

تهیه نقشه شاخص اتصال (IC)

تئوری و رویکرد ارائه شده توسط (Cavalli *et al.*، 2013) برای محاسبه شاخص اتصال در ابزار SedInConnect استفاده شده است. شاخص اتصال (IC) از رویکرد (Borselli *et al.*، 2008) مشتق شده است که IC را به این صورت تعریف کرده اند:

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

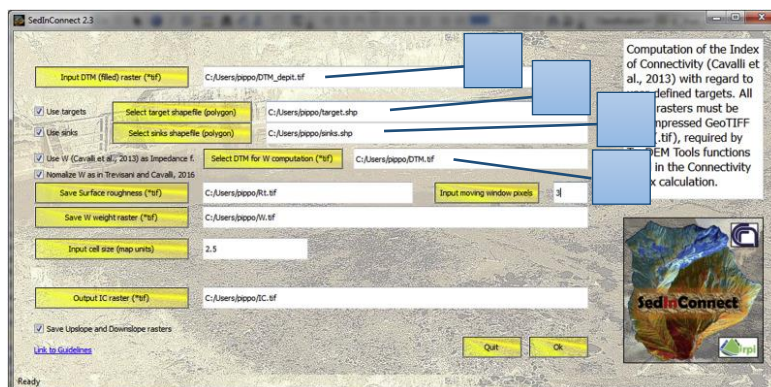
که در آن D_{up} و D_{dn} از طریق روابط ۴ و ۵ به دست می آید:

$$D_{up} = \bar{W} \bar{S} \sqrt{A} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{W_i S_i} \quad \text{رابطه ۵}$$

بر اساس رابطه ۲، شاخص اتصال رسوبی از نظر ریاضی بدون حد بوده و در دامنه $\pm \infty$ قرار میگیرد. هرچه این شاخص مثبت تر باشد، احتمال اتصال ساختاری برای انتقال رسوب بیشتر است و هر چه به سمت منفی میل کند، احتمال اتصال کاهش خواهد یافت. عامل وزنی ابتدا توسط (Borselli *et al.*، 2008) معرفی شد تا خصوصیات سطح که بر جریان رواناب و رسوب تاثیر می گذارد، در نظر گرفته شود. آنها این پارامتر را با استفاده از عامل پوشش گیاهی در مدل جهانی فرسایش خاک تخمین زدند اما بعد از آن مطالعات (Cavalli *et al.*، 2013) نشان داد استفاده از زبری سطحی یا شاخص زبری^۱ (RI)، خصوصیات سطحی را بهتر شبیه سازی می کند. مقادیر مثبت نقشه IC، افزایش احتمال اتصال، مقادیر منفی کاهش احتمال اتصال و مقدار صفر عدم اتصال را نشان می دهند. نرم افزار SedInConnect توسط (Cavalli & Crema، 2018) تهیه و به صورت رایگان در اختیار همگان قرار دارد. ورودی هایی که برای اجرای این نرم افزار استفاده شد شامل، نقشه مدل رقومی ارتفاع ۱۲/۵ متر، نقشه مدل رقومی ارتفاع پر شده ۱۲/۵ متر (شماره یک در شکل ۲) و عامل وزنی پیش فرض (Cavalli *et al.*، 2013) بود.

در این نرم افزار (نسخه ۲/۳) می توان به ترتیب مرز حوزه آبخیز و مخزن های مصنوعی رسوب (مانند دریاچه سدها) را تعریف کرد (شماره های دو و سه در شکل ۲). کاربر می تواند به صورت اختیاری تصمیم بگیرد که محاسبات را با عامل وزنی ارائه شده توسط Cavalli که از شاخص زبری به دست آمده است، انجام دهد و یا می تواند هر عامل وزنی دیگری را انتخاب کند (شماره چهار در شکل ۲). به استثنای خروجی های اصلی (IC، زبری سطحی و عامل وزنی)، نرم افزار SedInConnect یک نمایش کلی از نقشه IC را نیز ارائه می دهد (Cavalli



شکل ۲- نرم افزار SedInConnect

مقایسه مقادیر SDR و IC

برای مقایسه مستقیم مقادیر SDR و IC علاوه بر محاسبه نقشه پهنه‌بندی آنها، لازمه مقایسه این پارامترها یک مقیاس مشترک می‌باشد. درحالی‌که SDR عددی بین صفر و یک و بدون واحد است، اما IC می‌تواند عددی مثبت یا منفی و بدون واحد به دست آید. بنابراین لازم داریم IC را به عددی بین صفر و یک استاندارد کرده تا قابل مقایسه با SDR گردد. Zhao, et al. (2006) رابطه زیر را برای استانداردسازی^۱ ارائه کرده‌اند:

$$Y = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه Y مقدار استاندارد شده‌ی شاخص مورد نظر، x_i مقدار واقعی، x_{max} و x_{min} هم مقادیر حداقل و حداکثر شاخص مورد نظر در کل آبخیز است. براساس این رابطه اگر $x_i = x_{min}$ باشد $Y=0$ خواهد بود و اگر $x_i = x_{max}$ باشد $Y=1$ خواهد بود. بنابراین مقدار Y همیشه بین صفر و یک خواهد بود. مقدار بیشتر Y به معنای اتصال بیشتر و احتمال بیشتر آن در آبخیز خواهد بود، درحالی‌که مقدار کمتر Y اتصال کمتر را نشان می‌دهد. هرچه مقادیر SDR و IC استاندارد شده به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده انتقال رسوب بیشتر در منطقه است. در ادامه برای اینکه بتوان مقادیر این دو نقشه را که هر دو بدون بعد و بین صفر و یک هستند مقایسه کرد از انحراف معیار^۲ هر کدام از این دو پارامتر استفاده کرده و مقادیرشان را به تعداد طبقات یکسان تقسیم کردیم. روش طبقه‌بندی با استفاده از انحراف معیار نشان می‌دهد که مقدار آن طبقه چقدر از میانگین متفاوت است (Baumeister et al. 2022؛ Rall et al. 2017). برای انجام این روش از ماژول Reclassify استفاده شد و در نهایت در برنامه Excel نمودارهای آن رسم شد.

نتایج و بحث

نقشه فرسایش خاک (RUSLE)

در بررسی عامل فرسایش باران (شکل ۴) مشاهده شد که تغییرات آن از جنوب شرقی به شمال غربی آبخیز روند افزایشی دارد که اتفاقاً تغییرات ارتفاع آبخیز هم در همین راستا به صورت افزایشی است. به عبارتی می‌توان گفت میزان فرسایش باران با عوامل ارتفاع و بارندگی رابطه مستقیم دارد، یعنی با افزایش ارتفاع میزان بارندگی و میزان فرسایش باران نیز افزایش می‌یابد (Javandoost et al. 2014). باتوجه به این که حوضه مورد نظر دارای وسعت کمی می‌باشد بنابراین از نظر تغییرات مکانی عامل فرسایش باران ناچیز است. مقدار این عامل بین ۲/۲۹ و ۲/۸۵ مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت بود. بیشترین مقدار فرسایش باران در ارتفاعات حوضه و کمترین آن در نواحی کم ارتفاع حوضه بود. اما مقدار فرسایش‌پذیری خاک (شکل ۵) برای آبخیز مورد مطالعه از نزدیک به صفر تا ۰/۳ تن هکتار ساعت بر مگاژول میلی‌متر هکتار تعیین شد. تغییرات مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک بدین صورت بود که بخش‌های مرتفع و خاک‌های کم عمق کوهستانی دارای بیشترین مقدار فرسایش‌پذیری بودند و نواحی کم‌شیب داخلی با عمق خاک بیشتر فرسایش‌پذیری کم‌تری داشتند. Niazi & Arekhi (2010) نیز دامنه مقدار فرسایش‌پذیری خاک را برای حوضه سد ایلام برابر با ۰/۰۸ تا ۰/۳۴ به دست آوردند. فرسایش‌پذیری خاک را Faraji

^۱ Standardization

^۲ Standard Deviation

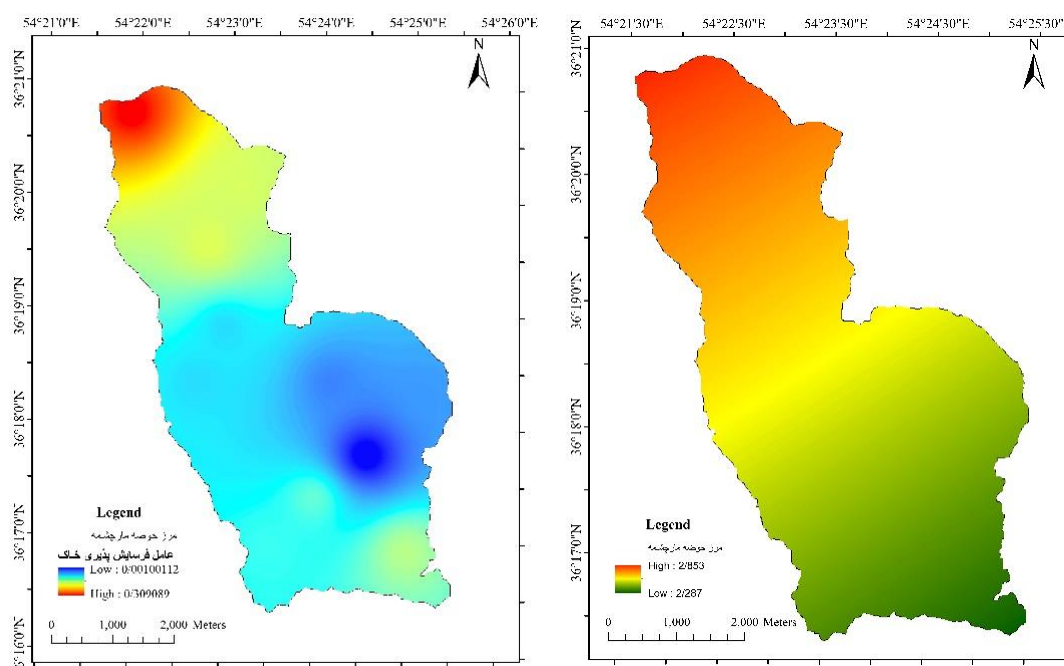
(2019) صفر تا ۰/۰۵ برای آبخیز خامسان گزارش داده است. در مطالعه Issaka *et al.* (2021) میزان فرسایش پذیری از ۰/۱ تا ۰/۵ برای آبخیزی در چین محاسبه شد. ملاحظه می شود مقادیر این عامل بسته به موقعیت منطقه مورد مطالعه متفاوت است.

مقادیر عامل توپوگرافی که در شکل ۶ ارائه شده، از صفر تا ۲۲۰/۶۸ متغیر است که دامنه تغییرات بزرگی را نشان می دهد. اختلاف ارتفاع بین پست ترین و بلندترین نقطه در حوضه ۱۳۱۱ متر است. مقایسه نقشه عامل توپوگرافی با نقشه های نهایی WaTEM/SEDEM نشان می دهد که با افزایش طول و درصد شیب منطقه شدت و میزان هدررفت خاک نیز افزایش یافته که با نتایج پژوهش های Faraji (2019) و Almouctar *et al.* (2021) همخوانی دارد. در واقع این عامل به دلیل دامنه تغییرات زیادی که دارد بیشترین تأثیر را در روند تغییرات الگوی مکانی فرسایش خاک دارد (Jayappa & Markose, 2016; Khorsand *et al.*, 2016).

مقادیر عامل مدیریت زراعی یا پوشش گیاهی در آبخیز مارچشمه (شکل ۷) از ۰/۰۷۶ تا ۰/۲۱۲ متغیر است. نیمه پایینی حوضه مقدار کمتری از عامل مدیریت زراعی را نشان دادند که با توجه به این که تصاویر استفاده شده برای کل سال ها و روزهای احداث تا سرریز بند بود نشان می دهد این مناطق مستعد کشاورزی و باغداری هستند. نبود پوشش گیاهی می تواند باعث فرسایش بیش تر خاک شود که با مقایسه نقشه عامل مدیریت زراعی و نقشه فرسایش مشاهده می شود نیمه بالایی حوضه که پوشش گیاهی کمتری هم دارد، فرسایش بیش تری در آن رخ داده است. مطالعات بسیاری رابطه تنگاتنگ بین اثر پوشش زمین بر میزان هدررفت خاک را بیان کرده اند (Saffari *et al.*, 2018; Rawat & Singh, 2018). براساس مطالعات تفصیلی اجرایی آبخیز مارچشمه، عملیات حفاظتی در حوضه انجام نشده و در خروجی حوضه یک بند خاکی احداث شده است. بنابراین عامل مدیریت اراضی برای آبخیز مارچشمه که بدون عملیات حفاظتی بود برابر واحد (یک) در نظر گرفته شد.

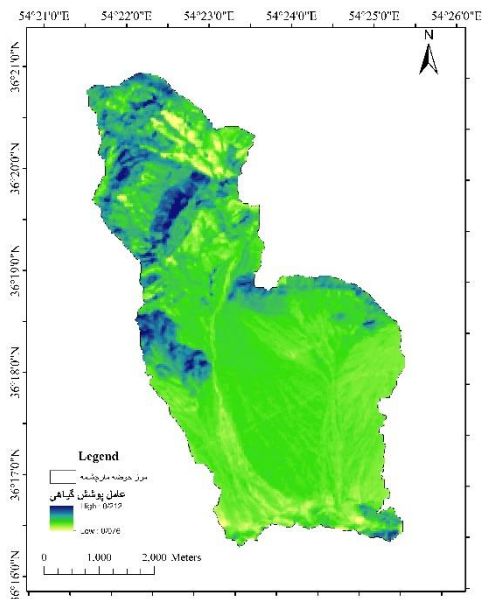
میزان فرسایش برآورد شده بر اساس ۱۸ سال آمار ایستگاه هواشناسی، تصاویر ماهواره های لندست پنج و هفت و نقشه رقومی ارتفاع ۱۲/۵ متر، از زمان احداث بند (۱۳۷۳) تا زمان اندازه گیری رسوب پشت بند (۱۳۹۱) - که تا آن زمان سرریزی اتفاق نیفتاده - به طور متوسط براساس مدل WaTEM/SEDEM معادل ۰/۳۱ تن در هکتار در سال بوده است. مقادیر فرسایش از صفر تا ۶ تن در هکتار در سال متغیر بود. در ادامه نقشه های عوامل فرسایش پذیری، فرسایش پذیری، توپوگرافی، مدیریت اراضی و فرسایش خاک ارائه شده است. همان طور که در شکل ۸ ارائه شده است، نیمه شمالی خطر بیش تری از فرسایش نسبت به نیمه جنوبی حوضه دارد.

همان طور که در شکل های ۳ تا ۷ مشخص است بخش های مرتفع و پرشیب حوضه دارای بیش ترین مقادیر عوامل فرسایش پذیری باران، توپوگرافی و همزمان کم ترین مقادیر فرسایش پذیری خاک و مدیریت اراضی هستند؛ بنابراین کاملاً منطقی است که هدررفت خاک در بخش های مرتفع و پرشیب حوضه بیش تر از ناحیه داخلی کم شیب برآورد شود.

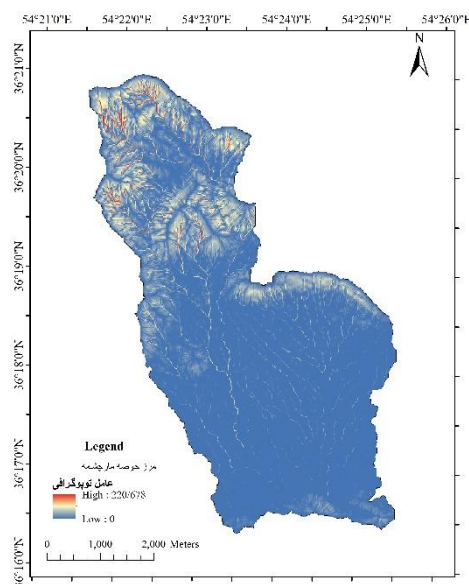


شکل ۴- عامل فرسایش پذیری آبخیز مارچشمه

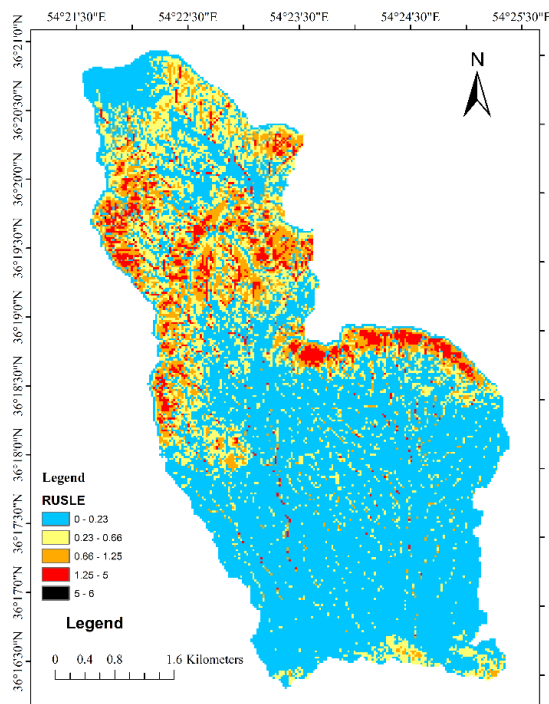
شکل ۳- عامل فرسایش پذیری آبخیز مارچشمه



شکل ۶- فاکتور مدیریت اراضی آبخیز مارچشمه



شکل ۵- فاکتور توپوگرافی آبخیز مارچشمه



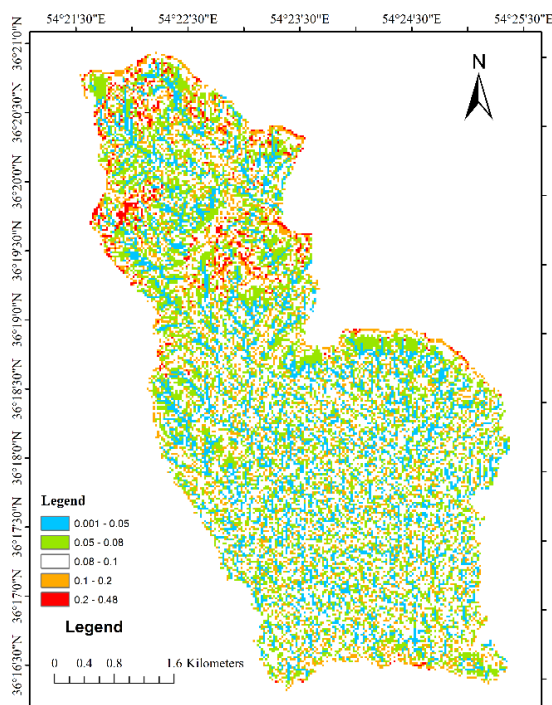
شکل ۷- فرسایش ویژه خاک (تن بر هکتار بر سال) آبخیز مارچشمه

نسبت تحویل رسوب (SDR)

رسوب ویژه مشاهداتی در انتهای آبخیز و بند مارچشمه توسط Hashemi *et al.* (2015)، ۰/۲۱ تن بر هکتار بر سال اندازه‌گیری شده است. روش اندازه‌گیری به این ترتیب بود که در ابتدا نقشه توپوگرافی بعد از احداث بند (۱۳۷۳) تهیه شد، در سال ۱۳۹۱ و قبل از سرریز بند نیز نقشه برداری جدید صورت گرفت و با بررسی وضعیت سرریز، شواهد داغاب و حفر اوگر (با استفاده از نرم‌افزار Surfer) حجم رسوبات نهشته شده در مخزن به‌دست آمد. در نهایت با ضرب مقدار وزن مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده در حجم رسوبات، میزان رسوبات نهشته شده به‌دست آمد.

واسنجی مدل WaTEM/SEDEM براساس مقدار مشاهده‌ای صورت گرفته و در نهایت نقشه نسبت تحویل رسوب در شکل ۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است خروجی نقشه نسبت تحویل رسوب در نهایت توسط مدل ارائه شد اما با توجه به مقدار مشاهداتی اندازه‌گیری شده در انتهای آبخیز، این نقشه واسنجی شده و مقدار Ktc برابر ۱۰۱ به‌دست آمده است.

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار میانگین نسبت تحویل رسوب در کل حوضه برابر با ۶ درصد است. این مقدار از هیستوگرام نقشه نسبت تحویل رسوب اقتباس شده است. این نقشه نشان می‌دهد حداقل نسبت تحویل رسوب نزدیک به صفر و حداکثر آن در حوضه نزدیک به ۰/۵ است و به عبارتی حوضه مارچشمه در شرایط بحرانی قرار ندارد چرا که نسبت تحویل رسوب نزدیک به یک مشاهده نمی‌شود. اما قسمت‌های شمالی و شمال غربی آبخیز دارای مقادیر بالاتری از نسبت تحویل رسوب در مقایسه با دیگر قسمت‌های حوضه هستند. علت این موضوع می‌تواند ارتفاع بیش‌تر و شیب بیش‌تر این قسمت‌ها نسبت به دیگر مناطق حوضه باشد و به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که در ارتباط با نسبت تحویل رسوب این حوضه، عامل توپوگرافی تأثیرگذاری بیشتری نسبت به سایر عوامل دارد.



شکل ۸- پهنه‌بندی نسبت تحویل رسوب حوضه مارچشمه

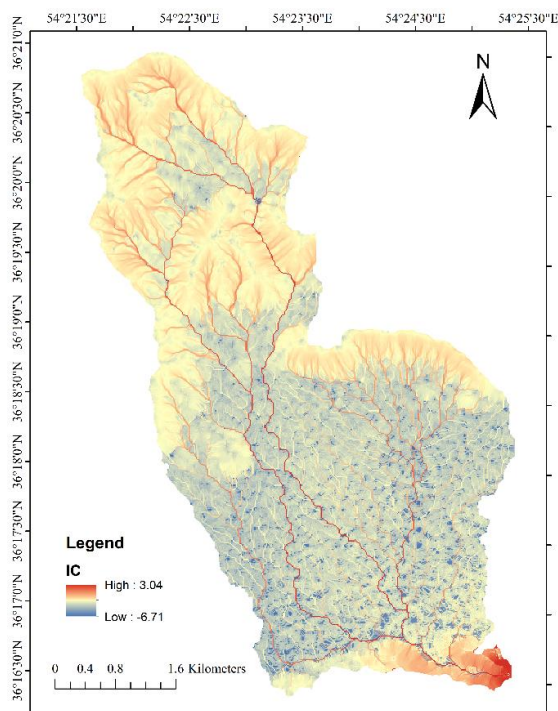
تمام نتایج مطالعاتی که بر روی این مدل صورت گرفته نشان می‌دهد که ساختار مدل مناسب بوده و توانایی بالایی در برآورد فرسایش و رسوب در حوضه‌های مورد مطالعه را دارد. به‌طورمثال Kenderessy & Lieskovsky (2012) میزان فرسایش در باغات انگور در اسلواکی را با استفاده از مدل WATEM/SEDEM تخمین زدند و بیان کردند که نتایج حاصل از مدل دارای دقت کافی بوده و مدل به خوبی وضعیت منطقه را توصیف کرده است. هم‌چنین Shi et al. (2012) در منطقه سه جورجس چین نیز از این مدل استفاده کرده است. در مطالعه Alinejad & Hosseinalizadeh (2020) بیان شد مدل نسبت به مقادیر واقعی (اندازه‌گیری CS₁₃₇) دچار کم تخمینی است و البته عنوان کردند چون در پژوهش ایشان واسنجی مدل صورت نگرفته است، ممکن است واسنجی مدل به‌رفع این نقیصه کمک کند.

اتصال رسوبی (IC)

با استفاده از نرم‌افزار SedInConnect نقشه اتصال ساختاری رسوب برای کل حوضه به‌دست آمد. با توجه به نقشه حاصله (شکل ۱۰)، دامنه شاخص از ۶/۷۱- تا ۳/۰۴ متغیر بود و به‌طور متوسط ۵/۵۹- است. درمطالعات مختلف مقادیر این شاخص متفاوت بوده، مثلاً در مطالعه Martini et al. (2022) مقادیر شاخص اتصال در محاسبات آنها از ۱۲- تا ۲/۵ متغیر بود و تغییر روش محاسبه زبری سطحی و عامل وزنی دلیل این تفاوت بود. در مطالعه Wang et al. (2022) مقادیر این شاخص از ۲۵/۳- تا ۲/۲۶ در سال‌های مختلف تغییر کرده است. آنها تغییرات پوشش گیاهی و به‌دنبال آن تغییرات خندق‌های منطقه را دلیل اصلی این تفاوت در سال‌های مختلف بیان کردند.

براساس نقشه حاصل و مفهوم شاخص اتصال رسوبی، هرچه مقدار آن به‌سمت عدد کوچک‌تر میل کند بیان‌گر کاهش احتمال انتقال رسوب است. بخش مرکزی آبخیز اتصال ساختاری کم‌تر و مناطق شمالی، شمال غربی و جنوبی اتصال ساختاری بیش‌تری نسبت به سایر بخش‌های آبخیز دارند. دلیل این امر برای بخش مرکزی توپوگرافی ملایم و برای مناطق با اتصال بالا علاوه بر شیب نسبی بیش‌تر و

پوشش گیاهی کم‌تر، نزدیکی به خروجی آبخیز می‌باشد که پتانسیل انتقال رسوب را افزایش و تله‌اندازی آن را کاهش داده است. باتوجه به نتایج و متغیرهای دخیل در محاسبه اتصال ساختاری می‌توان نتیجه گرفت که عامل توپوگرافی در مقایسه با عامل پوشش گیاهی تأثیر بیشتری بر اتصال رسوبی در آبخیز مورد بررسی داشته است. نتایج Mahmoudi (2019) در مورد شاخص اتصال رسوبی بیانگر کاهش آن در بخش‌های داخلی حوضه به دلیل کاهش شیب است. همین‌طور این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های Calsamiglia *et al.* (2018) و Mishra *et al.* (2019) منطبق است.



شکل ۹. اتصال ساختاری رسوب آبخیز مارچشمه

همان‌طور که ملاحظه می‌شود دامنه‌های مشرف به شبکه آبراهه‌ی اصلی، مناطق مستعد انتقال رسوب به شبکه آبراهه‌ای را تشکیل داده‌اند. نقشه اتصال رسوبی محل‌های مستعد از نظر انتقال رسوب را نشان می‌دهد و برآوردی اولیه از مناطق در اولویت اقدامات مدیریتی کنترل رسوب را نشان می‌دهد.

ارزیابی و مقایسه نتایج مقادیر SDR و IC

همان‌طور که مشاهده شد براساس هر دو شاخص SDR و IC نزدیک خروجی آبخیز میزان تحویل رسوب و انتقال رسوب بیشتر بوده درحالی‌که در قسمت‌های شمالی آبخیز تمرکز حوضه بر تحویل رسوب نیست و احتمال اتصال رسوبی کمتر است. در نظر گرفتن این دو شاخص و نحوه پراکندگی آنها می‌تواند برای اولویت‌بندی مناطق از نظر مدیریت فرسایش خاک و رسوب به‌خصوص در مقیاس زیر سیستم مورد اهمیت باشد (Liu & Fu, 2016; Zhao *et al.*, 2020).

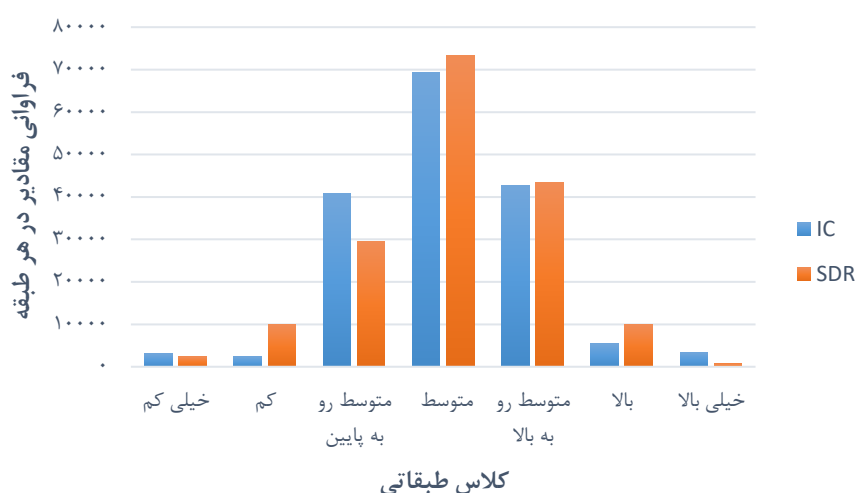
برای ترسیم مقایسه‌ای بین اتصال رسوبی و نسبت تحویل رسوب، مقادیر محاسبه شده و استاندارد شده اتصال رسوبی با مقادیر نسبت تحویل رسوب به هفت کلاس طبقه‌بندی شدند (جدول ۳). بالاتر یا پایین‌تر از طبقه‌ی دارای مقدار میانگین است. مقدار میانگین برای شاخص اتصال 0.18 و برای نسبت تحویل رسوب برابر 0.25 است ملاک این طبقه‌بندی، انحراف معیار^۱ هر کدام از این شاخص‌ها است که آنها را به هفت طبقه جداگانه تقسیم می‌کند. برای این منظور در نرم‌افزار Arc GIS و قسمت classify Method برای طبقه‌بندی Standard deviation انتخاب شد.

نتایج طبقه‌بندی به‌صورت خلاصه در شکل ۱۰ ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی در هر دو شاخص مربوط به طبقه متوسط است و هرچه به طبقات با مقادیر کمتر و بیشتر نزدیک می‌شویم فراوانی کاهش می‌یابد. به‌علاوه روند کلی هر دو شاخص

شباهت بسیار زیادی با یکدیگر دارند. نتایج مطالعه Najafi et al. (2021) تطابق بالایی با نتایج مطالعه حاضر دارد. آنها نیز با طبقه‌بندی مقادیر دو شاخص و مقایسه آنها به این نتیجه رسیدند که به طور کلی توافق منطقی‌ای بین این دو شاخص در کل آبخیز وجود دارد.

جدول ۳ - طبقات مقادیر SDR و IC در آبخیز مارچشمه

توضیح طبقه	کلاس طبقاتی	مقادیر نسبت تحویل رسوب (SDR)	مقادیر استاندارد شده اتصال رسوبی (IC)
خیلی کم	۱	۰/۱۳ - ۰/۱۹	۰/۰۵
کم	۲	۰/۱۹ - ۰/۲۲	۰/۱۰ - ۰/۰۵
متوسط رو به پایین	۳	۰/۲۲ - ۰/۲۴	۰/۱۶ - ۰/۱۰
متوسط	۴	۰/۲۴ - ۰/۲۵	۰/۲۱ - ۰/۱۶
متوسط رو به بالا	۵	۰/۲۵ - ۰/۲۶	۰/۲۶ - ۰/۲۱
بالا	۶	۰/۲۶ - ۰/۲۸	۰/۳۱ - ۰/۲۶
خیلی بالا	۷	۰/۲۸ - ۰/۳۴	۱ - ۰/۳۱



شکل ۱۰. مقایسه فراوانی کلاس‌های مختلف در دو شاخص SDR و IC

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رویکردی برای ارزیابی اتصال رسوبی به صورت ساختاری و اتصال رسوبی به صورت عملکردی، به ترتیب با استفاده از شاخص‌های IC و SDR ارائه شد. برای ارزیابی SDR از مدل WaTEM/SEDEM استفاده شد. استفاده از مدل WaTEM/SEDEM با توجه به این که جز مدل‌های زمین مرجع است، ابزاری کارآمد برای برآورد فرسایش آبی و بالاحص رسوب در سطح حوضه محسوب می‌شود. هم‌چنین ورودی‌های مدل به صورت نقشه‌های زمین مرجع شده هستند، در نتیجه توزیع مکانی رسوب را به صورت پیکسل به پیکسل نمایش می‌دهد و می‌تواند برای شناسایی دقیق کانون‌های بحرانی تولید فرسایش و رسوب استفاده شود که این موضوع در دیگر تحقیقات هم اشاره شده است. علاوه بر آن، قابلیت واسنجی مدل با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده، قطعیت نتایج را افزایش می‌دهد. اطلاع از مقادیر اتصال رسوبی بیشتر می‌تواند اقدامات مدیریتی را در جهت کاهش این اتصال و افزایش زبری سطحی جهت دهی کند. با اطلاع از مقادیر نسبت تحویل رسوب بالا در هر منطقه باید به دنبال کاهش رسوب گذاری و کاهش فرسایش در آن منطقه و مناطق اطراف آن بود. به بیان دیگر یکی انتقال رسوب بالقوه (اتصال رسوبی) و دیگری انتقال رسوب بالفعل (نسبت تحویل رسوب) را نشان می‌دهد. لذا پیشنهاد می‌شود در تمامی مطالعات مرتبط با رسوب و فرسایش، هر دو این موارد مورد ارزیابی قرار گیرند.

با توجه به اینکه آبخیز مارچشمه دارای اقلیم خشک و توپوگرافی مرتفع است، و از طرف دیگر عامل توپوگرافی بر میزان نسبت تحویل رسوب و شاخص اتصال رسوبی بیش‌ترین تأثیر را دارد، بنابراین با افزایش ارتفاع و شیب نسبت تحویل رسوب و شاخص اتصال رسوبی افزایش یافته‌اند. در مناطق پست و کم شیب احتمال انتقال رسوب و به تبع آن میزان نسبت تحویل رسوب هم کم‌تر است. با توجه به نقشه‌های خروجی، نقشه اتصال رسوبی، شبکه آبراه‌های را بهتر نشان داد.



از نظر آماری تفاوت چندانی بین نتایج این دو شاخص وجود نداشت و هر دو برای طبقه متوسط بیشترین فراوانی را نشان دادند. البته برای در اولویت قرار دادن مناطق از نظر مدیریتی، مناطقی که از نظر هر دو شاخص شرایط بحرانی‌تری دارند در اولویت قرار دارند. در مواردی که ارزیابی اتصال به صورت عملکردی با شاخص SDR ممکن نیست، شاخص اتصال رسوبی ساختاری (IC) به دلیل ورودی‌های کمتر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت پیشنهاد می‌شود برای اولویت‌بندی و طراحی مؤثر و جامع استراتژی‌های مدیریت آبخیز، اتصال رسوبی و نسبت تحویل رسوب، به‌طور هم‌زمان تفسیر شوند تا باعث کاهش اثرات اقتصادی هدررفت خاک درون منطقه‌ای شوند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله تشکر و قدردانی خود را از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، به‌خصوص جناب آقای دکتر عرب‌خدری که در راستای انجام این مطالعه، نویسندگان را یاری کردند، اعلام می‌دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Alatorre, L. C., Beguería, S., Lana-Renault, N., Navas, A., & García-Ruiz, J. M. (2012). Soil erosion and sediment delivery in a mountain catchment under scenarios of land use change using a spatially distributed numerical model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(5), 1321-1334.
- Ali, K. F., & De Boer, D. H. (2010). Spatially distributed erosion and sediment yield modeling in the upper Indus River basin. *Water Resources Research*, 46(8).
- Arekhi S. and Niazi Y. (2010) Investigating application of GIS and RS to estimate Soil Erosion and Sediment Yield Using RUSLE (Case study: Upper part of Ilam Dam Watershed, Iran). *J. of Water and Soil Conservation, Vol. 17(2)*. (In Persian)
- Benkobi, L., Trlica, M. J., & Smith, J. L. (1994). Evaluation of a refined surface cover subfactor for use in RUSLE. *Journal of Range Management*, 47(1), 74-78.
- Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., & Mikoš, M. (2015). Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 5245-5261.
- Biesemans, J., Meirvenne, M.V., and Gabriels, D. (2000). Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. *J. Soil Water Conservation*, 55: 35-42.
- Borrelli, P., Van Oost, K., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Panagos, P. (2018). A step towards a holistic assessment of soil degradation in Europe: Coupling on-site erosion with sediment transfer and carbon fluxes. *Environmental Research*, 161, 291-298.
- 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.
- Calsamiglia, A., Fortesa, J., García-Comendador, J., Lucas-Borja, M. E., Calvo-Cases, A., & Estrany, J. (2018). Spatial patterns of sediment connectivity in terraced lands: Anthropogenic controls of catchment sensitivity. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1198-1210.
- Cavalli, M., Crema, S., Marchi, L., & PP, C. I. P. (2014). Guidelines on the Sediment Connectivity ArcGis Toolbox and stand-alone application. *Project Report, Alpine Space Programme-SedAlp Project*, 31.
- Cavalli, M., Tarolli, P., Dalla Fontana, G., & Marchi, L. (2016). Multi-temporal analysis of sediment source areas and sediment connectivity in the Rio Cordon catchment (Dolomites). *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 39, 27-30.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31-41.
- Crema, S., & Cavalli, M. (2018). SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. *Computers & Geosciences*, 111, 39-45.
- De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., & Govers, G. (2008). Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and planetary change*, 60(3-4), 393-415.
- Durigon, V. L., Carvalho, D. F., Antunes, M., Oliveira, P. and Fernandes, M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal Remote*

Sensing, 35(2), 441-453.

- Faraji, J. (2019) Estimating Spatial Variations of Sediment Delivery Ratio in Khamsan Representative Watershed using WaTEM/SEDEM. MSc. dissertation, Tarbiat Modares University, Iran. (In Persian)
- Hashemi, A. Arabkhedri, M. (2009) Sediment measurement in reservoirs of small dams for evaluation of MPSIAC model in Semnan province. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 2(1), 25-34. (In Persian)
- Hashemi, A. Ghodrati, M. Arastou, B. Jafari, A. Gholami, H. (2015) *Calibration of PSIAC and MPSIAC empirical model using sediment survey of small reservoirs in Iran- semnan province*. Final Report of Research Plan. Agriculture and Natural Resources Research Center of semnan province. (In Persian)
- Hashemi, A. & Arabkhedri, M. (2009). Sediment measurement in reservoirs of small dams for evaluation of MPSIAC model in Semnan province. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 2(1), 25-34. (In Persian)
- Hosseinalizadeh, M., & Alinejad, M. (2020). Assessment of WaTEM/SEDEM model for water and tillage induced soil erosion (Case study: Sample sub catchment of Kachik-, Golestan Province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(2), 163-178. (In Persian)
- Javandoost, H. Onagh, M. Hoseinalizade, M. Sokuti, R. (2014) Estimation of rain erosion factor using geostatistical algorithms to estimate erosion in WaTEM / SEDEM model in Rozechai basin. *15th Civil Students Conference Nationwide*. (In Persian)
- Khorsand, M., Khaledi Darvishan, A., Gholamalifard, M. (2016). Comparison between estimated annual soil loss using RUSLE model with data from the erosion pins and plots in Khamsan representative watershed. *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(4), 669-680. (In Persian)
- Lenhart, T., Van Rompaey, A., Steegen, A., Fohrer, N., Frede, H. G., & Govers, G. (2005). Considering spatial distribution and deposition of sediment in lumped and semi-distributed models. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 785-794.
- Lieskovský, J., & Kenderessy, P. (2014). Modelling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in vineyards: a case study in Vráble (Slovakia) using WATEM/SEDEM. *Land Degradation & Development*, 25(3), 288-296.
- Liu, Y., & Fu, B. (2016). Assessing sedimentological connectivity using WATEM / SEDEM model in a hilly and gully watershed of the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 66, 259-268.
- 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.
- López-Vicente, M., Nadal-Romero, E., & Cammeraat, E. L. (2017). Hydrological connectivity does change over 70 years of abandonment and afforestation in the Spanish Pyrenees. *Land degradation & development*, 28(4), 1298-1310.
- Markose, V. J., & Jayappa, K. S. (2016). Soil loss estimation and prioritization of sub-watersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS. *Environmental monitoring and assessment*, 188(4), 1-16.
- Martini, L., Cavalli, M., & Picco, L. (2022). Predicting sediment connectivity in a mountain basin: A quantitative analysis of the index of connectivity. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- 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.
- Moore, I. D., Burch, G. J., (1986). Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*. 50(5): 1294- 1298.
- Najafi, S., Sadeghi, S. H., & Heckmann, T. (2021). Analysis of sediment accessibility and availability concepts based on sediment connectivity throughout a watershed. *Land degradation & development*, 32(10), 3023-3044.
- Nikkami, D. Arabkhedri, M. Ranjbar, A. Parezkar, M. Sarreshtehdari, A. Lotfalizadeh, D. Hakimkhani, SH. Razmjoo, P. Hemmati, M. Sharifi, M. (2012) *Investigating and determining the best rainfall erosivity index in different regions of Iran*. Final report of national research project. Soil conservation and watershed management research institute. (In Persian)
- Pearson, S. G., van Prooijen, B. C., Elias, E. P., Vitousek, S., & Wang, Z. B. (2020). Sediment connectivity: a framework for analyzing coastal sediment transport pathways. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(10), e2020JF005595.
- Quijano, L., Beguería, S., Gaspar, L., & Navas, A. (2016). Estimating erosion rates using ¹³⁷Cs measurements and WATEM/SEDEM in a Mediterranean cultivated field. *Catena*, 138, 38-51.



- Rawat, K. S., & Singh, S. K. (2018). Appraisal of soil conservation capacity using NDVI model-based C factor of RUSLE model for a semi-arid ungauged watershed: a case study. *Water Conservation Science and Engineering*, 3(1), 47-58.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. coordinators. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *US Department of Agriculture, Agriculture Handbook*, 703, 404.
- Saffari, A. Nouri, A. Karami, J. (2018). Investigating the effect of land cover and land use changes on soil erosion capability - a case study of Gharasoo Gorganrood basin. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 5 (1), 83-96. (In Persian)
- Shi, Z. H., Ai, L., Fang, N. F., & Zhu, H. D. (2012). Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: a case study in the Three Gorges Area, China. *Journal of Hydrology*, 438, 156-167.
- Sidi Almouctar, M. A., Wu, Y., Zhao, F., & Dossou, J. F. (2021). Soil Erosion Assessment Using the RUSLE Model and Geospatial Techniques (Remote Sensing and GIS) in South-Central Niger (Maradi Region). *Water*, 13(24), 3511.
- Troeh, F.R., Hobbs, A.J., and Donahue, R.L., (1999) Soil and Water Conservation: Productivity and Environment Protection. New Jersey: Prentice - Hall.
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P., (2000) Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, 15(6): 577-589.
- Verstraeten, G., Prosser, I. P., & Fogarty, P. (2007). Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee catchment, Australia. *Journal of Hydrology*, 334(3-4), 440-454.
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L. T. H., McInnes, J., & Roberts, A. M. (2012). Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138(1), 74-88.
- Vigiak, O., Newham, L. T. H., Whitford, J., Melland, A., & Borselli, L. (2009). Comparison of landscape approaches to define spatial patterns of hillslope-scale sediment delivery ratio. In *Proceedings of the 18th World IMACS Congress and International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM09)* (pp. 4064-4070).
- Wang, C., & Zhang, G. (2022). Spatial variation in sediment connectivity of small watershed along a regional transect on the Loess Plateau. *CATENA*, 217, 106473.
- Wang, C., Zhang, G., Zhu, P., Wang, Z., & Xing, S. (2022). Sediment connectivity of small watershed affected by gully development and vegetation restoration on the loess plateau. *Geoderma*, 410, 115663.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Department of Agriculture, Science and Education Administration*. (No. 537).
- Zhao, G., Gao, P., Tian, P., Sun, W., Hu, J., & Mu, X. (2020). Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China. *Catena*, 185, 104284.
- Zhao, G., Klik, A., Mu, X., Wang, F., Gao, P., & Sun, W. (2015). Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China. *Geomorphology*, 241, 343-352.
- Zhao, G., Zou, X., Cheng, H., Jia, H., Wu, Y., H., Wang, G., Zhang, C., & Gao, S. (2006). Assessing the ecological security of the Tibetan plateau: Methodology and a case study for Lhaze County. *Environmental Management*, 80, 120-131.