

تلفیق شاخص‌های ژئومورفومتری و پوشش گیاهی برای برآورد خطر فرسایش خاک در حوضه
آبخیز سامیان، استان اردبیل
عقیل مددی^۱، زهرا شریفی^{۲*}

۱- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

Email: Zahra_sharifi1364@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۶

چکیده

یکی از مرسوم‌ترین انواع تخریب خاک که اثرات مخرب بر محیط‌زیست و زندگی انسان دارد پدیده فرسایش خاک است. شدت فرسایش خاک معمولاً با استفاده از مدل‌های مختلف تخمین زده می‌شود. بنابراین هدف از این پژوهش، تلفیق شاخص‌های ژئومورفومتری و پوشش گیاهی برای برآورد خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز سامیان در استان اردبیل است. برای دست یافتن به هدف تحقیق از مدل تجربی فرسایش خاک اصلاح‌شده جهانی که شامل عامل‌های فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی خاک است استفاده شد. بدین منظور به ترتیب با استفاده از داده‌های باران‌سنجی اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور، لایه بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران، مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر استر و هم‌چنین تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ OLI مربوط به سال ۲۰۲۳ در محیط سامانه اطلاعات مکانی تهیه شده‌اند و پس از روی هم‌گذاری لایه‌ها مقدار فرسایش سالانه خاک در سطح حوضه برآورد شد. در گام بعد شاخص‌های ژئومورفومتری که در رخداد فرسایش خاک موثر هستند شامل شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، انحنا دامنه، انحناء سطح، انحناء مقطع و شاخص تفاضل پوشش گیاهی عادی‌شده در محیط سامانه اطلاعات مکانی ایجاد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که نرخ فرسایش خاک برای کل حوضه در دامنه بین ۰ تا ۳۲۱/۱۴ تن در هکتار در سال برآورد شد همچنین در بین عوامل موثر مدل مورد مطالعه با فرسایش خاک عامل توپوگرافی بیش‌ترین هم‌بستگی (۰/۹۶) را نسبت به سایر عوامل را برخوردار بود. در بررسی دیگر ارتباط بین عوامل ژئومورفومتری با میزان هدررفت سالانه خاک انجام شد که نتایج نشان داد شاخص تفاضل پوشش گیاهی عادی‌شده با ضریب تعیین ۰/۷۵ نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه دارای هم‌بستگی بیش‌تری است. هم‌چنین شاخص انحناء مقطع با مقدار ۰/۰۹ درصد کم‌ترین هم‌بستگی را دارا می‌باشند. این پژوهش امکان ادغام عوامل ژئومورفومتری موثر بر فرسایش خاک را تأیید می‌نماید.

کلیدواژه: هدررفت خاک، رطوبت توپوگرافی، انحناء دامنه، RUSLE، حوضه سامیان.

مقدمه

خاک یکی از ثروت‌های ملی با ارزش هر کشور است. اگر استفاده از خاک بر اساس استعداد و قدرت تولیدی آن و با رعایت اصول علمی و بهداشتی صورت گیرد، می‌تواند منجر به کاهش حداقلی فرسایش خاک شود. (زنگی‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۹: ۷۳۷). نرخ جهانی فرسایش خاک سالانه حدود ۷۵ میلیارد تن است. در ایران، سالانه بیش از دو میلیارد تن خاک از دست می‌رود، که تقریباً سه برابر میزان سایر کشورهای آسیایی است. حدود ۱۲۵ میلیون هکتار از ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی کشور با فرسایش خاک روبرو هستند. میانگین فرسایش خاک در ایران حدود ۳۰ تا ۳۲ تن در هکتار در سال است که $\frac{4}{3}$ برابر میانگین جهانی است. (عرب‌عامری^۱ و همکاران، ۲۰۲۰: ۲). پایش فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز پرهزینه و زمان‌بر است، بنابراین تحلیل ژئومورفومتری اغلب با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) صورت می‌گیرد (پری‌تو آمپاران^۲ و همکاران، ۲۰۱۹: ۲). تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های ژئومورفومتری در داخل و خارج کشور انجام شده است برای مثال، شارما^۳ و همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهشی فرسایش خاک را با ادغام شاخص‌های زمین و پوشش گیاهی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نقشه پتانسیل فرسایش خاک با استفاده از مدل USLE توافق خوبی را نشان می‌دهد و بیان نمودند تغییر قابل توجهی در پتانسیل فرسایش حوضه و انتقال تدریجی کلاس پتانسیل فرسایش پایین‌تر به کلاس پتانسیل فرسایش بالاتر در طول دوره مورد مطالعه وجود دارد. پراساناکومار^۴ و همکاران (۲۰۱۲)، به برآورد خطر فرسایش خاک در یک زیرحوضه کوهستانی کوچک را با استفاده از معادله جهانی تلفات خاک (RUSLE) پرداختند. و به این نتیجه رسیدند که حداکثر هدررفت خاک برابر $\frac{17}{73}$ تن در هکتار در سال به‌دست آمد. فابگوئون^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، به برآورد نرخ فرسایش خاک و شناسایی مناطق بحرانی در زیرحوضه آنامبرا، نیجریه پرداختند و کار آن‌ها نشان داد که حدود $\frac{1804}{39}$ کیلومتر مربع (۳۹.۴۹ درصد) از منطقه مورد مطالعه دارای نرخ فرسایش خفیف ۰-۱۰ تن در هکتار در سال است. خان و رحمان^۶ (۲۰۲۱)، به برآورد خطر فرسایش خاک با استفاده از مدل (RUSLE) در ناحیه دیر پایین، در پاکستان پرداختند. نتایج نشان داد که فرسایش خاک بین ۰ تا ۲۵۴۰۷ تن در هکتار در سال به‌دست آمد. همچنین ۲۲ درصد منطقه تحت تأثیر فرسایش کم تا متوسط و ۶۷ درصد منطقه تحت تأثیر فرسایش بسیار زیاد قرار گرفت. قوش^۷ و همکاران (۲۰۲۲)، برآورد تلفات خاک در حوضه رودخانه مایوراکشی در هند را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد تلفات سالانه خاک در حوضه $\frac{4629714}{8}$ تن بوده، در نتیجه نرخ فرسایش خاک از بسیار خفیف تا خفیف در اکثریت منطقه متغیر بود و بخش دشت پایینی حوضه کم‌ترین آسیب را تحت تأثیر از دست دادن خاک داشته است. کونگ^۸ و همکاران (۲۰۲۲)، توزیع کمی فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز کوچک در فلات لس را با مدل RUSLE بررسی و نتایج کارشان نشان داد نسبت مساحت فرسایش در منطقه مورد مطالعه $\frac{36}{33}\%$ است. همچنین فرسایش قوی اغلب در مناطق کشاورزی با پوشش گیاهی کم مشاهده می‌شود. در ایران نیز قاضی‌زاده

1- Arabameri

2- Prieto-Amparán

3- Sharma

4- Prasannakumar

5- Fagbohun

6- Khan and Rahman

7- Ghosh

8- Kong

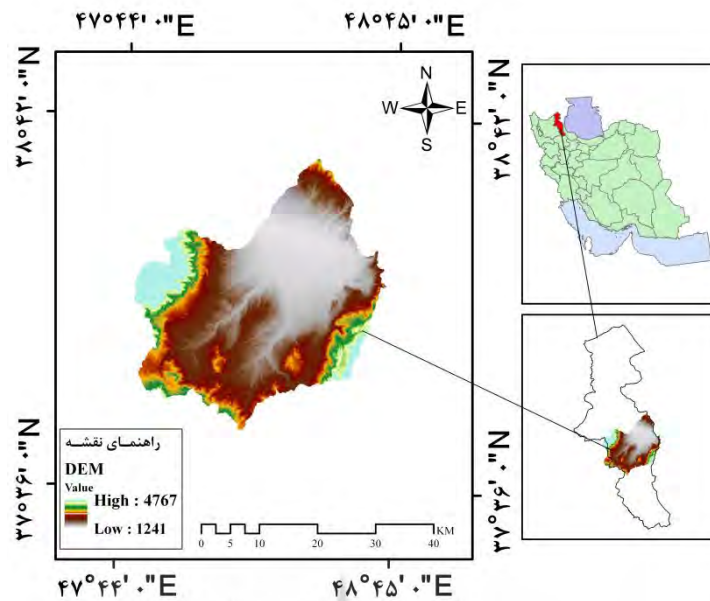
و همکاران (۱۳۹۳)، به بررسی رابطه بین شاخص‌های محیطی و فرسایش‌پذیری خاک در حوضه آبخیز راونگ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ۷۴/۵۷ درصد مساحت حوضه برابر ۷۹۸۰/۳۸ هکتار حوضه در کلاس رسوبدهی III قرار دارد. همچنین رابطه معنی‌داری بین همه عوامل محیطی در تولید رسوب و فرسایش حوضه دارد. محمودی و نقشبندی (۱۳۹۸)، به برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوضه آبخیز سد گاوشان پرداختند آن‌ها پس از بررسی پارامترهای مدل RUSLE به این نتیجه دست یافتند که متوسط مقدار فرسایش سالانه خاک در این حوضه ۲/۳۵ تن در هکتار است و در نیمی از مناطق حوضه مقدار فرسایش سالانه از ۰/۹۲ تن در هکتار کمتر است. معتمدی‌راد و همکاران (۱۴۰۲)، به بررسی میزان فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبریز کال اسماعیل دره شهرستان شاهرود استان سمنان با استفاده از مدل (RUSLE) و روش پسیاک اصلاح شده پرداختند و پس از بررسی فاکتورهای RUSLE و عوامل ۹ گانه مدل پسیاک به این نتیجه رسیدند که براساس مدل پسیاک میزان برداشت رسوب ۳/۵۴ تن در هکتار بوده و میزان فرسایش رسوب در منطقه مورد مطالعه ۱۷/۱۹۷ تن در هکتار برآورد شده است. مددی و همکاران (۱۴۰۲)، میزان هدررفت خاک در کاربری‌های اراضی حوضه آبخیز آتشگاه را با استفاده از مدل تجربی فرسایش خاک جهانی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که متوسط فرسایش خاک در حوضه مورد مطالعه بین ۰/۰۹ تا ۱۱/۰۲ تن در هکتار در سال متغیر است. عابدینی و پاسبان (۱۴۰۲)، به تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک در حوضه آبخیز خیاوچای، مشکین شهر پرداختند. و به این نتیجه رسیدند که فرسایش سالانه خاک بین ۰ تا ۱۵۰/۵۴ تن بر هکتار در سال در سطح حوضه است. هم‌چنین در بین شاخص‌هایی که در رخداد فرسایش خاک موثر بودند عامل توپوگرافی با ضریب همبستگی ۰/۹۲٪ بیش‌ترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است. ذاکری‌نژاد و فلاح (۱۴۰۲)، خطر فرسایش را با استفاده از RUSLE و نقشه تراکم خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت استان فارس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ۵۴/۴۴ درصد حوضه مورد مطالعه در طبقه فرسایش خیلی زیاد (بیش از ۷۵ تن در هکتار در سال) قرار دارد که بیش‌تر در نواحی شمال شرق، شرق و بخش‌هایی از نواحی مرکزی حوضه را دربر می‌گیرد. نورائی‌صفت و همکاران (۱۴۰۲)، با هدف بررسی روند تغییرات هدررفت خاک در حوضه آبریز رودخانه کل در استان هرمزگان پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از این بود که مقدار بیشینه هدررفت سالانه خاک در شش سال مذکور در مناطق خاصی از حوضه بین ۱۴۰ تا ۴۶۳ تن در هکتار در سال متغیر بود. بنابراین هدف از این پژوهش تلفیق شاخص‌های ژئومورفومتری و پوشش گیاهی برای برآورد خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز سامیان در استان اردبیل می‌باشد.

روش تحقیق

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سامیان جزء مجموعه حوضه‌های رودخانه ارس بوده و مساحتی معادل ۴۲۰۰ کیلومتر مربع دارد. این حوضه در محدوده جغرافیایی بین ۴۷ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. قسمت‌های مرکزی حوضه از واحدهای اراضی دشت‌های دامنه‌ای تشکیل شده که بخشی از فعالیت‌های کشاورزی استان اردبیل در این قسمت متمرکز است. ارتفاع بلندترین نقطه (قله

کوه سبلان) نسبت به سطح دریا برابر با ۴۸۱۱ متر و ارتفاع پست‌ترین نقطه واقع در پل سامیان برابر ۱۲۰۰ متر است (ایزدی‌فرد و همکاران، ۱۴۰۲). در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز سامیان ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز سامیان

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده (RUSLE) برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک استفاده شده است. در این راستا داده‌ها و ابزارهایی که مورد استفاده قرار گرفته است شامل: لایه‌های رقومی با مقیاس ۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۳۰ متری (Aster)، آمار بارندگی ماهانه و سالانه اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور (سال‌های ۱۳۹۳ - ۱۴۰۲)، نقشه بافت خاک ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، تصویر ماهواره‌ای لندست 8 OLI مربوط به سال ۲۰۲۳ منطقه مورد مطالعه از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا www.usgs.gov دریافت شد و در گام بعد تصحیحات رادیومتریکی شامل تصحیح اتمسفری Flaash روی این تصاویر اعمال شد. همچنین در این پژوهش از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8، ENVI 5.6 جهت استخراج و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و ترسیم نقشه‌ها بهره گرفته شد. همچنین از نرم‌افزار Excel Stat جهت محاسبات آماری و روابط رگرسیونی معادلات استفاده شده است.

مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده (RUSLE)

به‌منظور برآورد میزان هدررفت خاک در دوره زمانی مورد مطالعه از مدل RUSLE استفاده شده است. مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده به‌عنوان مدل توسعه یافته مدل جهانی فرسایش خاک برای پیش‌بینی فرسایش سالانه خاک از یک سطح معین به‌کار می‌رود (رنارد و فریموند^۱، ۱۹۹۴: ۲۹). مدل RUSLE از ۶ فاکتور شامل عامل فرسایش

¹ - Renard and Freidmund

باران (R)، فرسایش پذیری خاک (K)، توپوگرافی (L.S)، پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی خاک (P) تبعیت می کند که به صورت رابطه (۱) است (ویشمایر و اسمیت^۱، ۱۹۸۷: ۳۱).

$$A = R * K * C * LS * P \quad (۱)$$

فرسایش باران (R) تأثیر شدت بارندگی را بر فرسایش شیاری و ورقه ای تعیین می کند. فرسایش پذیری خاک (K) به حساسیت خاک نسبت به فرسایش اشاره دارد و توسط آب و هوا، خواص خاک، کاربری زمین و پوشش گیاهی کنترل می شود. این یک جزء ضروری در برآورد فرسایش خاک است. LS به طول شیب و فاکتور شیب اشاره دارد. P به عامل حفاظتی و C عامل مدیریت پوشش است. P و C اثرات بدون بعد بر مدیریت و سیستم کشت دارند در حالی که عامل LS تأثیر بدون بعد بر شیب و طول شیب دارد. همه این پارامترهای بدون بعد در یک واحد نسبی نرمال شدند (دابرل^۲ و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۷۸۸).

عامل فرسایش پذیری باران (R)

فرسایش بارندگی (R) از نظر کمی تأثیر بارندگی بر سطح خاک را منعکس می کند (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۳۱). شرایط فرسایشی خاک با برخورد قطرات باران با خاک سطحی و تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل تعیین می شود. بنابراین فرسایش بارندگی با افزایش شدت بارندگی افزایش می یابد (آرنولدز^۳، ۱۹۸۰: ۱۳۱). فرسایش ناشی از بارندگی را می توان به صورت رابطه (۲) بیان کرد (چادهوری و نیاک^۴، ۲۰۰۳: ۳۸۸).

$$R = 79 + 0.363 * P_a \quad (۲)$$

که در آن، P_a میانگین بارندگی سالانه است.

عامل فرسایش پذیری خاک (K)

عامل فرسایش پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آن ها به وسیله نیروی رواناب را نشان می دهد (کلار ستاقی و همکاران، ۱۳۹۸: ۵۷). مورگان برای ضریب فرسایش پذیری خاک های مختلف اعدادی را پیشنهاد نموده است که در نشان داده شده است (احمدی، ۱۳۸۶). به منظور تهیه نقشه عامل فرسایش پذیری خاک (K) از نقشه بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران و اطلاعات جدول (۱) استفاده گردید.

^۱- Wischmeier and Smith

^۲- Dabral

^۳- Arnoldus

^۴- Choudhury and Nayak

جدول ۱: ضریب فرسایش پذیری خاک (K) (منبع: احمدی، ۱۳۸۶).

وضعیت خاک	K	وضعیت خاک	K
خاک سطحی با پوشش سنگریزه‌ای	۰/۵	اراضی مقاوم به فرسایش	۰/۱
خاک‌های ماسه‌ای	۰/۱۶	خاک‌های ماسه‌ای نرم	۰/۴۲
خاک‌های لومی شنی	۰/۱۲	خاک‌های لومی با ماسه بسیار ریز	۰/۴۲
خاک‌های سیلتی لومی	۰/۴۸	خاک‌های لومی	۰/۳۷
خاک‌های سیلتی رسی	۰/۲۵	خاک‌های لومی رسی	۰/۳۷

توپوگرافی (LS)

فاکتورهای طول شیب (L) و شیب (S) با استفاده از مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM^۱) محاسبه شده است. طول شیب، فاصله‌ای را که در آن رسوب‌گذاری صورت می‌گیرد یا جریان زمینی به یک کانال مجزا برخورد می‌کند توصیف می‌کند (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۳۱). تاثیر طول و شیب بر فرسایش توسط عوامل L و S بیان می‌شود. شیب تند مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده هدررفت خاک نسبت به طول شیب است. طول شیب به‌عنوان فاصله بین منبع نقطه جریان زمینی و نقطه رواناب در یک کانال مجزا با شیب ملایم اندازه‌گیری می‌شود (اولرانمی^۲ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۰۸). هدررفت خاک در واحد سطح با افزایش طول شیب افزایش یافته و علاوه بر این، ویژگی‌های سه‌بعدی زمین به‌طور متناسب بر افت خاک تاثیر می‌گذارد (هانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۸۰). این نشان می‌دهد که شیب‌ها افت خاک را در تسکین پیچیده کنترل می‌کنند و بنابراین، یک پارامتر ضروری برای محاسبه ضریب LS در نظر گرفته می‌شود. عامل L و S را می‌توان به‌صورت رابطه (۳) بیان کرد (ویز^۴ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۳۶۹).

$$LS = [(Flow \text{ accumulation grid}) \times (cell \text{ size}/22.13)]^{0.4} \times [Sin (\text{slope grid}) \times 0.01745]/0.0896]^{1.3} \quad (3)$$

که در آن Flow Accumulation تجمع جریان به سمت بالای شیب برای هر سلول، Cell Size اندازه سلول‌های شبکه و Slope شیب، به‌دست آمده از نقشه شیب (برحسب درجه) می‌باشد. از عدد ۰/۰۱۷۴۵ برای تبدیل واحد به رادیان در محیط GIS استفاده می‌گردد.

ضریب مدیریت پوشش گیاهی (C)

روش‌های مختلفی برای برآورد عامل C با استفاده از شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) برای ارزیابی هدر رفت خاک توسط محققان مختلف توسعه داده شده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵) بنابراین، به‌منظور تهیه نقشه

^۱- Digital Elevation Model

^۲- Olorunfemi

^۳- Huang

^۴- Vijith

عامل C ابتدا باید مقادیر شاخص NDVI برای کل حوضه محاسبه شود. بدین منظور برای تهیه نقشه NDVI از تصویر ماهواره‌ای Landsat 8 OLI سال ۲۰۲۳ منطقه مطالعه شده با استفاده از رابطه (۴) استفاده شد. نقشه شاخص پوشش گیاهی NDVI منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ENVI از رابطه (۶-۳) به دست آمد.

$$NDVI = (P_{NIR} - P_{Red}) / (P_{NIR} + P_{Red}) \quad (۴)$$

در این رابطه P_{Red} باند قرمز و P_{NIR} باند مادون نزدیک است.

پس از محاسبه NDVI برای کل حوضه، در نهایت توزیع مکانی مقادیر C در حوضه نیز با استفاده از رابطه (۵) (Nearing et al., 1989) و توسط تحلیل گر مکانی نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد.

$$C = 0.407 - 0.5953 * NDVI \quad (۵)$$

عامل عملیات حفاظتی خاک (P)

در مدل RUSLE عامل P نشان‌دهنده هدررفت خاک در شرایط اجرای عملیات حفاظتی (کشت روی خطوط تراز، کشت نواری، ترانس‌بندی و زهکشی زیرسطحی) نسبت به هدررفت خاک تحت زراعت شخم در جهت شیب است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). این عملیات حفاظتی به دلیل تأثیر بر سرعت رواناب، زمان تمرکز و نیروی هیدرولیکی رواناب بر خاک سبب کاهش فرسایش می‌شوند و ارزش عددی این عامل از صفر (نشان‌دهنده عملیات حفاظتی کامل) تا یک (بدون عملیات حفاظتی) متغیر است.

تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه فرسایش خاک

پس از تهیه لایه‌ها و طبقه‌بندی هر کدام از آن‌ها مطابق شرایط منطقه و دامنه اعداد به دست آمده، نقشه نهایی فرسایش خاک با هم‌پوشانی لایه‌های مذکور تهیه و به کلاس‌های مختلف فرسایش طبقه‌بندی شد. آماده‌سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز به صورت رستری، مقدار هدررفت سالانه خاک از طریق حاصل ضرب عامل‌های مدل RUSLE با توجه به رابطه ۱ و با استفاده از ابزار Spatial Analyst و گزینه Raster Calculator در محیط ArcGIS بر حسب تن بر هکتار در سال محاسبه خواهد شد.

شاخص‌های ژئومورفومتری

شاخص پوشش گیاهی نرمال شده ($NDVI^1$)

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده ($NDVI$) پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی است که با استفاده از فن‌آوری سنجش از دور به دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به صورت رابطه ۶ می‌باشد (Oliveira et al., 2023).

¹- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R) \quad (6)$$

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر NDVI بین ۱- و ۱+ در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه‌گیری شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر NDVI به صفر نزدیک می‌شود. برای محاسبه شاخص NDVI از باندهای ۴ و ۵ تصویر لندست ۸ OLI سال ۲۰۲۳ استفاده شد (رابطه ۶) و نقشه شاخص مذکور برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Envi 5.6 به دست آمد.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI^۱)

شاخص رطوبت توپوگرافی تأثیر توپوگرافی بر تولید رواناب را به صورت کمی بیان می‌کند و به عنوان یک شاخص فیزیکی، مکان مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می‌کند (ملکی و همکاران، ۱۳۹۳). TWI در مقایسه با ویژگی‌های توپوگرافی ترکیبی دیگر، مانند شاخص قدرت جریان در بسیاری موارد در کاربردهای مربوط به کشاورزی استفاده می‌شود که نمونه‌هایی از این کاربردها شامل استفاده از نقشه TWI به عنوان شاخصی برای الگوی رطوبت خاک در مزرعه به خصوص در اراضی تپه ماهوری، ترکیب TWI و ویژگی‌های توپوگرافی اصلی (مانند زاویه شیب، انحنای شیب) با یکدیگر به عنوان ورودی برای تهیه نقشه رقومی خاک، پیش‌بینی توزیع مکانی، نوع و ویژگی‌های خاک، در مقیاسی بهتر می‌باشد (کین^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). شاخص رطوبت توپوگرافی به صورت رابطه ۷ ارائه شده است (مور و گریسون^۳، ۱۹۹۱: ۸).

$$TWI = A_s / \tan \beta \quad (7)$$

در رابطه ذکر شده A_s سطح ویژه حوضه برحسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)، β درجه شیب می‌باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از درجه شیب می‌باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (برحسب A_s) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست (برحسب $\tan \beta$ به عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی) توصیف می‌کند.

شاخص توان آبراهه (SPI^۴)

توان آبراهه میزان زمان مصرف انرژی است و به طور گسترده در مطالعات فرسایش و محل رسوب به عنوان اندازه‌گیری قدرت فرسایش آب جاری استفاده می‌شود هم‌چنین این شاخص ظرفیت انتقال فضایی توزیع شده را محاسبه می‌کند و ممکن است برای ارزیابی چشم‌انداز فرسایش بیش از سایر رویکردها مناسب باشد، زیرا این امر منجر به انعطاف و

^۱- Topographic Wetness Index (TWI)

^۲- QIN

^۳- Moore and Grayson

^۴-Stream Power Index (SPI)

انحراف جریان می‌شود. این توزیع فضایی، پتانسیل خسارت خاک را با استفاده از بارش رواناب و باران یکنواخت محاسبه می‌کند شاخص توان آبراهه (SPI) به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود (شارما^۱، ۲۰۱۰: ۲۰۵).

$$SPI = A_s \tan B \quad (۸)$$

در رابطه ذکر شده A_s و $\tan B$ هستند به ترتیب منطقه خالص حوضه و شیب محلی هستند.

شاخص انحناء دامنه (Curvator)

انحنای دامنه یا انحنای شیب حوضه زهکشی را درجایی نشان می‌دهد که به نمایش فرایندهای فرسایش و رواناب کمک می‌کند. مقادیر این شاخص مورفولوژی توپوگرافی را نشان می‌دهد که دارای یک انحنای مثبت، منفی و یک مقدار صفر است که انحنای مثبت به صورت یک مقعر رو به بالا و انحنای منفی نشانگر محدب رو به پایین است هم‌چنین مقدار صفر نشان‌دهنده سطوح صاف است (رژ^۲ و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۵۴). از این رو شاخص انحناء دامنه با استفاده از DEM با ابعاد ۲۰*۲۰ در محیط ArcMap تهیه گردید و در نهایت سه لایه شامل curvature, profile Curvatur, Plan curvature ایجاد گردید.

شاخص انحناء سطح (Profile Curvator)

انحناء سطح معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است و بنابراین انحناء سطح نشان‌دهنده شدت جریان آب و فرایندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌شود. به طوری که مقدار منفی این انحناء سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد (بابلی‌موخر، ۱۳۹۷: ۹۷). شاخص انحناء سطح به صورت رابطه ۹ ارائه شده است.

$$n \times g(a \times d^2 + b \times e^2 + c + d \times e) / (d^2 + e^2)(1 + (d^2 e^2)^{1.5}) \quad (۹)$$

در این رابطه n : برای تبدیل واحدها از $m^{3/2}$ به $m^{1/2}$ استفاده می‌شود. g : تأثیر گرانش زمین را در نظر می‌گیرد. b : تأثیر شیب جانبی را در نظر می‌گیرد. شیب جانبی، زاویه بین یک سطح شیب‌دار و یک سطح افقی است. a : تأثیر شیب طولی را در نظر می‌گیرد. شیب طولی، زاویه بین یک خط شیب‌دار و یک خط افقی است. c : این پارامتر تأثیر تغییر جهت شیب را در نظر می‌گیرد. تغییر جهت شیب، زاویه بین دو خط شیب‌دار مجاور است. d : فاصله بین نقطه مورد نظر و نقطه مرجع است. e : ارتفاع نقطه مورد نظر نسبت به نقطه مرجع است (Guzzetti et al., 2000; 14).

شاخص انحناء مقطع (Plan Curvator)

انحناء مقطع، بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد بنابراین نشان‌دهنده واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحناء مقطع واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده خط الراس‌ها و ستیغ‌ها است و مقادیر

^۱- Sharma

^۲- Rejith

منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء برحسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد (بابلی‌موخر، ۱۳۹۷؛ ۹۷). شاخص انحناء مقطع به‌صورت رابطه ۱۰ ارائه شده است.

$$n \times g(b \times d^2 + a \times e^2 - c \times d \times e) / (d^2 + e^2)^{1.5} \quad (10)$$

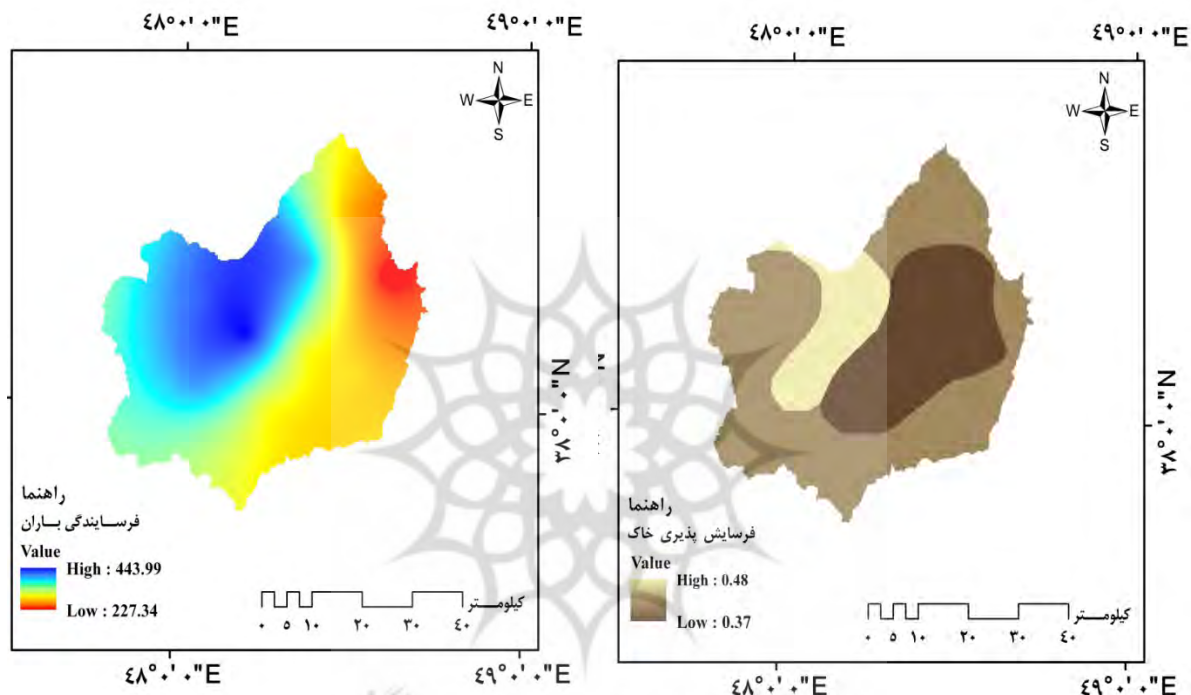
در این معادله n : ضریب مقیاس، g : شتاب گرانش، b : منبع اصلی *Curvator* اصلی، a : منبع فرعی *Curvator* اصلی، c : منبع *Curvator* فرعی، d : مقدار مشتق اول تابع Z نسبت به x ، e : مقدار مشتق اول تابع Z نسبت به y می‌باشد (Guzzetti et al., 2000; 14).

پس از این‌که نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از شاخص‌های *TWI*, *SPI*, *Curvature*, *Plan Curvature*, *Profile Curvature* به‌دست آمد. ارتباط این شاخص‌ها با میزان فرسایش سالانه خاک به‌صورت رابطه رگرسیونی در محیط *ExcelStat* به‌دست آمد تا میزان همبستگی آن‌ها مشخص شود. به‌عبارتی دیگر رگرسیون یک وسیله آماری است که برای برآورد ارزش یک متغیر کمی با توجه به رابطه‌اش با یک متغیر یا یک یا چند متغیر کمی دیگر به‌کار می‌رود. این رابطه طوری است که با استفاده از یک متغیر می‌توان دیگری را پیش‌بینی کرد هم‌چنین این رابطه همیشه بین ۰ تا ۱ درصد است که ۰ نشان‌دهنده این است که مدل مورد استفاده هیچ یک از تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین نمی‌کند و مقدار ۱ درصد نیز نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده تغییرپذیری داده‌ها را در اطراف میانگین آن تبیین می‌کند (آرخی و همکاران، ۱۴۰۱؛ ۴۴). برای انجام تحلیل رگرسیون در این پژوهش، بعد از تهیه لایه‌های مورد نیاز، مقادیر متوسط این لایه‌ها وارد محیط نرم‌افزار *ExcelStat* شده و با استفاده از ماژول *Statistics* روش *REGRESS* عمل رگرسیون انجام گردید. در این مدل رگرسیونی متوسط فرسایش سالانه خاک به‌عنوان متغیر وابسته (Y) و شاخص‌های *TWI*, *SPI*, *Slope*, *Curvature*, *Plan Curvature*, *Profile Curvature*, *NDVI* به‌عنوان متغیرهای مستقل (X) در نظر گرفته شدند.

یافته‌ها

نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرسایندگی باران در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه (رابطه ۶) در طی دوره آماری ۱۰ ساله ایستگاه‌های بارانسنجی داخل و اطراف حوضه مورد مطالعه به‌دست آمد سپس نقشه فاکتور فرسایندگی باران (R) بر اساس اطلاعات به‌دست آمده تهیه شد که در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل (۲) مقدار متوسط عامل R در حوضه آبخیز سامیان بین ۲۲۷/۳۴ تا ۴۴۳/۹۹ مگاژول بر میلی‌متر بر هکتار در ساعت متغیر می‌باشد. بالاترین ارزش عامل R در قسمت‌های شمال‌غربی حوضه است که بیش‌ترین بارندگی را دارد و کم‌ترین آن قسمت‌های شرقی حوضه را شامل می‌شود. مقادیر فرسایش‌پذیری خاک (K) با استفاده از اطلاعات مورد نیاز از گزارش تفصیلی حوضه آبخیز مورد مطالعه استخراج گردید سپس نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک با توجه به جدول ۱ در محیط *ArcGIS* تهیه شد. براساس شکل (۳) مقدار شاخص فرسایش‌پذیری خاک برای حوضه مورد مطالعه بین ۰/۳۷ تا ۰/۴۸ تن بر هکتار مگاژول بر میلی‌متر متغیر می‌باشد. نقشه عامل توپوگرافی (LS) حوضه مورد مطالعه نیز با تهیه و ایجاد لایه‌های لازم براساس رابطه ۳ به‌دست آمد که در شکل (۴) ارائه شده است. براساس شکل (۴) مقدار عامل LS برای حوضه مورد مطالعه در دامنه بین ۰ تا ۵۷/۹۶ در سطح پیکسل متغیر می‌باشد که در دامنه‌های پرتیب به‌خصوص اطراف آبراهه‌ها این مقدار بیش‌تر است. و کم‌ترین مقدار آن بر اراضی مسطح و

نسبتاً هموار کشاورزی و خط القعر آبراهه‌ها منطبق است. این عامل در مطالعات مختلف با توجه به توپوگرافی هر منطقه و همچنین بی بعد بودن آن دامنه‌های متفاوتی را نشان می‌دهد. نقشه عامل پوشش گیاهی C حوضه نیز براساس رابطه ۴ و ۵ تهیه شد که در شکل (۵) ارائه شده است. براساس شکل (۵) مقادیر عامل C از ۰/۰۶ الی ۰/۵۴ متغیر می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که نیمه شمالی و مرکزی حوضه مورد مطالعه به‌دلیل وسعت بیشتر اراضی مقادیر بیشتری از مقدار C را دارد و کم‌ترین مقدار در بخش‌های از شمال و جنوب حوضه دیده می‌شود. از آنجا که عامل P در صورت نبود اطلاعات کافی درباره چگونگی مدیریت اراضی می‌تواند از معادله حذف شود (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). در این تحقیق نیز به دلیل نبود اطلاعات کافی عامل P محاسبه نشده است و برابر ۱ در نظر گرفته شد.

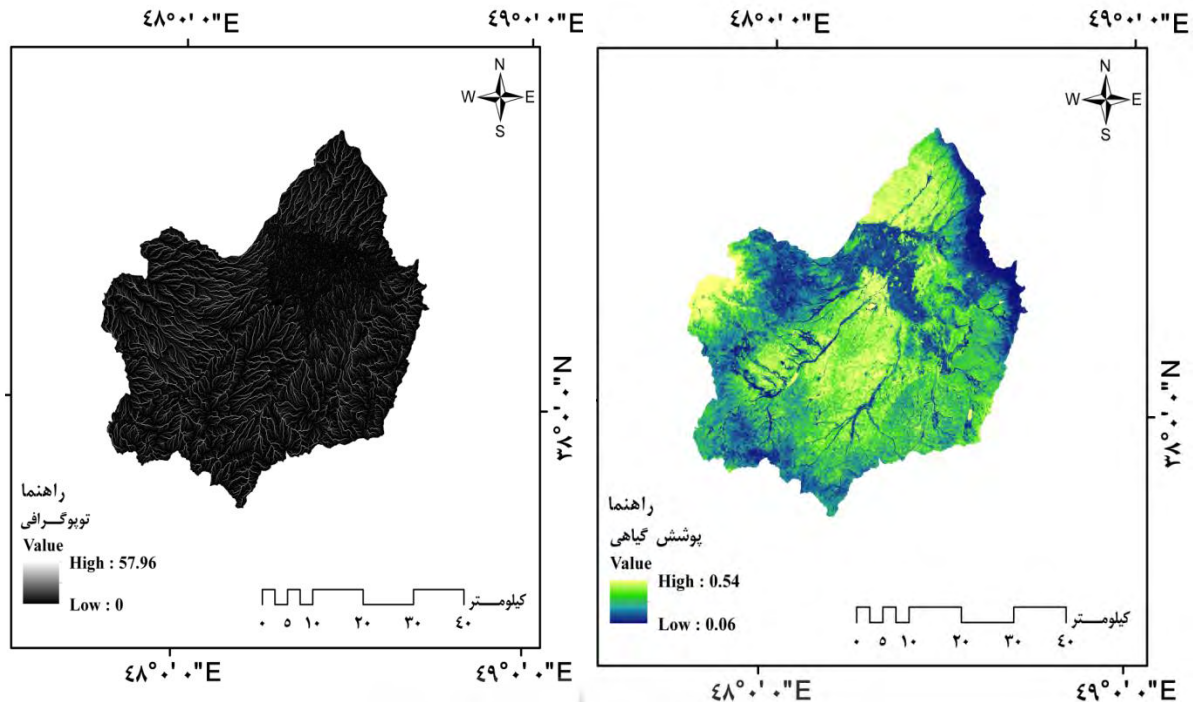


شکل ۲: نقشه عامل فرساینده‌گی باران (R) در حوضه

آبخیز سامیان (منبع: نویسنده‌گان، ۱۴۰۳)

شکل ۳: نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) در حوضه

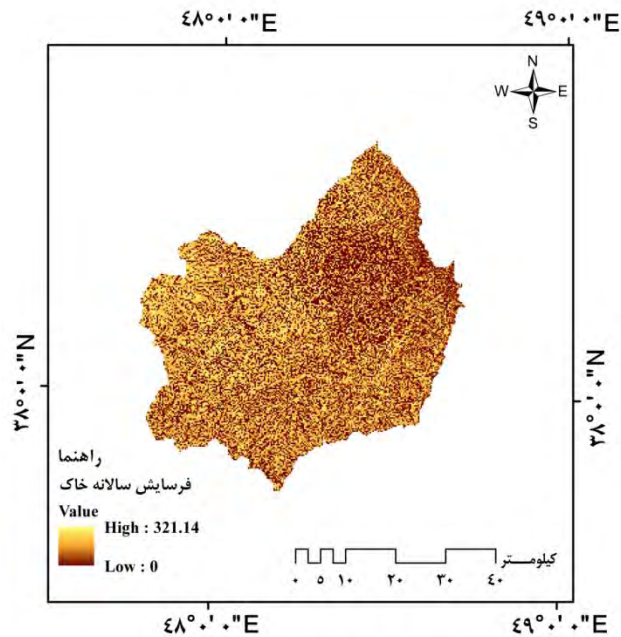
آبخیز سامیان (منبع: نویسنده‌گان، ۱۴۰۳)



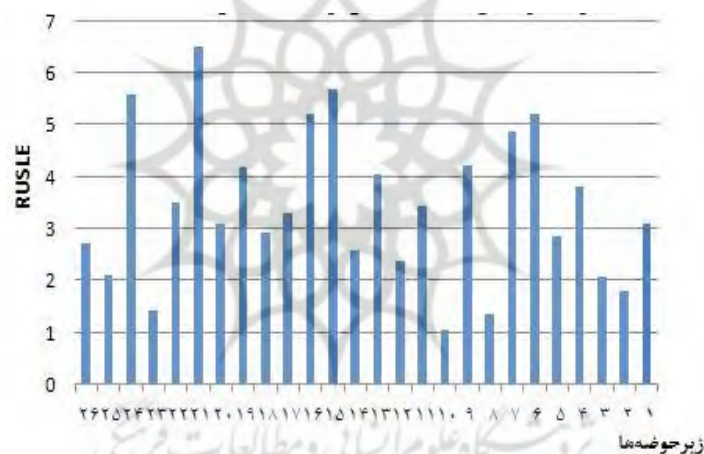
شکل ۴: نقشه عامل توپوگرافی (LS) در حوضه آبخیز سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

شکل ۵: نقشه عامل مدیریت پوشش گیاهی (C) در حوضه آبخیز سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

جهت تهیه نقشه فرسایش متوسط سالانه خاک از حاصل ضرب فاکتورهای فرساینده باران (R)، فرسایش پذیری خاک (K)، مدیریت پوشش گیاهی (C)، توپوگرافی (LS)، و عملیات حفاظت (P) براساس رابطه ۱ در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) محاسبه شد و مقادیر هدررفت سالانه خاک (A) بر حسب تن در هکتار در سال به دست آمد. بر اساس شکل (۶) مقادیر نقشه فرسایش سالانه خاک در حوضه آبخیز سامیان بین ۰ الی ۳۲۱/۱۴ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می باشد. از طرفی نتایج ارزیابی نقشه متوسط هدر رفت خاک در مقیاس زیرحوضه ها نشان داد بیشترین مقدار فرسایش خاک مربوط به زیرحوضه ۲۱ (۶/۵ تن در هکتار در سال) و کمترین مقدار نیز مربوط به زیرحوضه ۱۰ با مقدار (۱/۰۵ تن در هکتار در سال) می باشد که در شکل (۷) متوسط فرسایش سالانه خاک به تفکیک زیر حوضه ها ارائه شده است.



شکل ۶: نقشه فرسایش سالانه خاک (RUSLE) در حوضه آبخیز سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)



شکل ۷: نمودار متوسط فرسایش سالانه خاک (RUSLE) به ازای زیر حوضه‌ها (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

در گام بعد با استفاده از یک رابطه رگرسیونی میزان اثرگذاری هریک از عامل‌های مدل RUSLE بر روی هدر رفت خاک تعیین گردید که هدر رفت خاک به عنوان متغیر وابسته و عامل‌های فرساینده باران، فرسایش پذیری خاک، پوشش گیاهی، توپوگرافی و حفاظت خاک به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که عامل LS با بیشترین همبستگی در هدر رفت سالانه خاک حوضه آبخیز مورد مطالعه دارد. در جدول (۲) ضریب همبستگی عامل‌های مدل RUSLE با فرسایش سالانه خاک ارائه شده است.

جدول ۲: ضریب همبستگی فاکتورهای مدل **RUSLE** با هدررفت سالانه خاک

فاکتور	ضریب همبستگی (R^2)	رابطه رگرسیونی
R	۰/۵۲	$Y = 8.743605x + 0.01$
K	۰/۳۳	$Y = 2.591429x - 0.02$
LS	۰/۹۶	$Y = 4.631086x + 0.01$
C	۰/۳۵	$Y = 2.611682x - 0.01$

دلیل استفاده از همبستگی بین این فاکتورها این است که این عوامل با یکدیگر در ارتباط هستند و تأثیرات متقابلی با یکدیگر دارند. به عبارتی دیگر تأثیر هر فاکتور می‌تواند توسط فاکتورهای دیگر تغییر کند. برای مثال افزایش شیب در کنار کاهش پوشش گیاهی می‌تواند فرسایش خاک را افزایش دهد. به دلیل این تعاملات، بررسی همبستگی بین این فاکتورها کمک می‌کند تا ما مکانیسم‌های دقیق‌تری را که در مدل **RUSLE** قرار دارند درک کنیم و در بهبود کارایی مدل بهتر عمل کنیم. از طرفی دیگر در برخی موارد ممکن است به دلیل شرایط خاص افزایش پوشش گیاهی همراه با افزایش فرسایش خاک رخ دهد. این امر می‌تواند ناشی از عواملی مثل نوع خاک، شیب، گونه گیاهان و شدت بارندگی در آن شرایط باشد.

تحلیل عوامل ژئومورفومتری

شاخص توان آبراهه (**SPI**)، فرایندی است که خطوط جریان مشابه را مانند شاخص رطوبت توپوگرافی (**TWI**)، پیش‌بینی می‌کند. با این حال مقادیر شبکه نشان‌دهنده شتاب جریان است که با افزایش سرعت شیب آب به سرعت در حال افزایش است. مقادیر **SPI** در حوضه آبریز مورد مطالعه در محدوده بین $-۸/۳۱$ تا $۱۶/۰۳$ متغیر می‌باشد (شکل ۸). به عبارتی دیگر شاخص قدرت جریان مستقیماً با پتانسیل فرسایش سازگار است از این‌رو مناطقی که با شدت زیاد **SPI** همراه است دارای پتانسیل فرسایش بالا خواهد بود درحالی‌که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده سطح پتانسیل رسوب است.

شاخص رطوبت توپوگرافی (**TWI**) نشان‌دهنده تأثیرات چندگانه زمین در فرایندهای رواناب اضافی اشباع است و از مرتب‌سازی مواد رسوب معلق مرتبط است. توزیع همگن از شرایط خاک برای محاسبه رطوبت توپوگرافی خاک صورت گرفت. توزیع فضایی شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضه مورد مطالعه در شکل (۹) ارائه شده است. مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی (**TWI**) در دامنه بین $-۷/۶۶$ تا $۱۳/۹۳$ می‌باشد. مقدار بالای شاخص رطوبت توپوگرافی بیش‌تر در قسمت غربی حوضه (سطح نسبتاً شیب‌دار) یافت می‌شوند، درحالی‌که مقادیر کم در قسمت‌هایی از مرکز حوضه (مناطق هموار و صاف)، معمول است. از این‌رو مناطقی که دارای شاخص رطوبت توپوگرافی بالا هستند دارای اهمیت هستند زیرا خطر فرسایش روان بیش‌تری را نسبت به مناطقی که دارای مقادیر پایین شاخص رطوبت توپوگرافی دارند دارا می‌باشد و بالعکس.

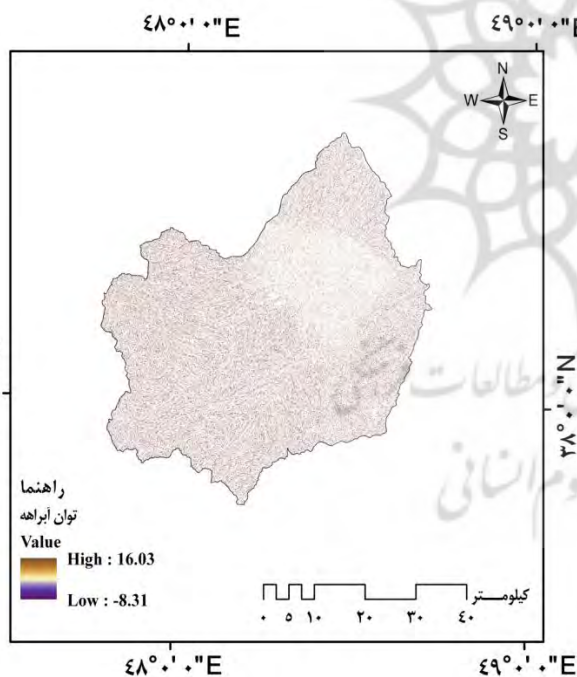
با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی عادی (**NDVI**) به عنوان عاملی برای برآورد فرسایش خاک که بیش‌تر مربوط به مدیریت زمین بر کاهش خاک است استفاده می‌شود. در این مطالعه شاخص پوشش گیاهی عادی به عنوان اندازه‌گیری میزان و تراکم پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. تصویر شاخص پوشش گیاهی عادی برای سال ۲۰۲۳ از داده‌های

ماهواره لندست ۸ OLI به دست آمد. از این رو مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال شده در حوضه مورد مطالعه در دامنه بین ۰/۲۱- تا ۰/۵۸ می باشد (شکل ۱۰).

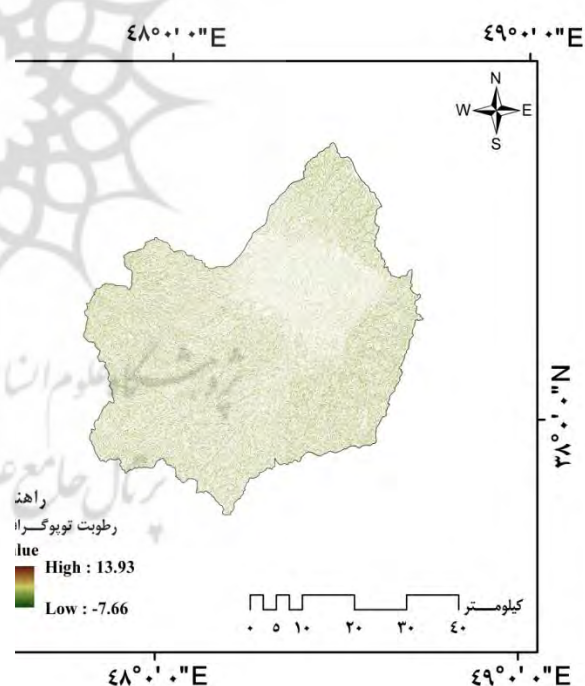
شاخص انحناء دامنه (Curvator) نشان دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به عبارتی دیگر محدب و مقعر بودن دامنه را نشان می دهد. از شاخص انحناء دامنه برای اندازه گیری میزان ناهمواری سطح زمین می توان استفاده نمود. از این رو شاخص انحناء دامنه برای حوضه آبریز خیاوچای در محیط ArcMap تهیه شد که مقدار این شاخص در دامنه بین ۱/۹۴- الی ۲/۸۹ متغیر می باشد (شکل ۱۱).

شاخص انحناء سطح (Plan Curvator) این شاخص نشان دهنده واگرایی و هم گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحناء پلان واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده خط الراس ها است و مقادیر منفی آن هم گرایی جریان ها (دره ها) را نشان می دهد. واحد اندازه گیری انحناء سطح برحسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می گردد. شاخص انحناء سطح در دامنه بین ۱/۰۴- تا ۱/۵۰ متغیر می باشد (شکل ۱۲).

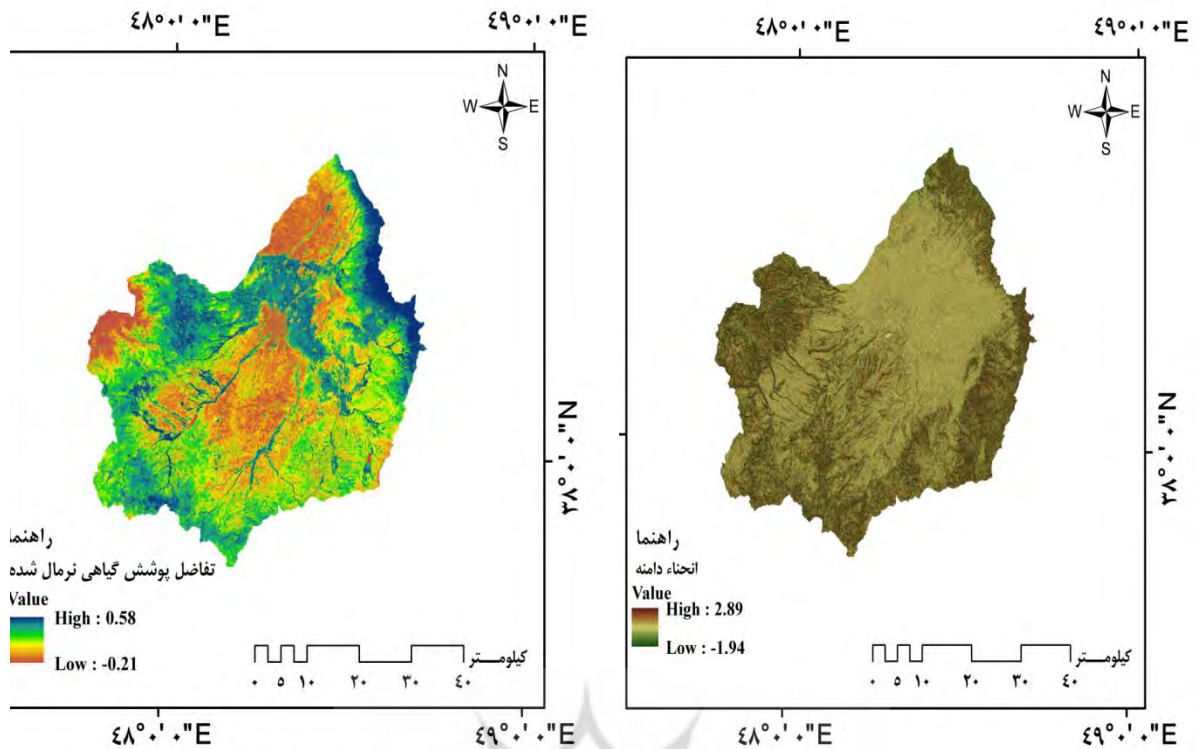
شاخص انحناء مقطع (Profil Curvator) معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است. مقدار منفی این انحناء معرف سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می دهد. از این رو شاخص انحناء مقطع حوضه مورد مطالعه بین ۱/۷۰- تا ۱/۳۴ متغیر می باشد (شکل ۱۳).



شکل ۸: نقشه شاخص توان آبراهه (SPI) حوضه آبخیز
سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

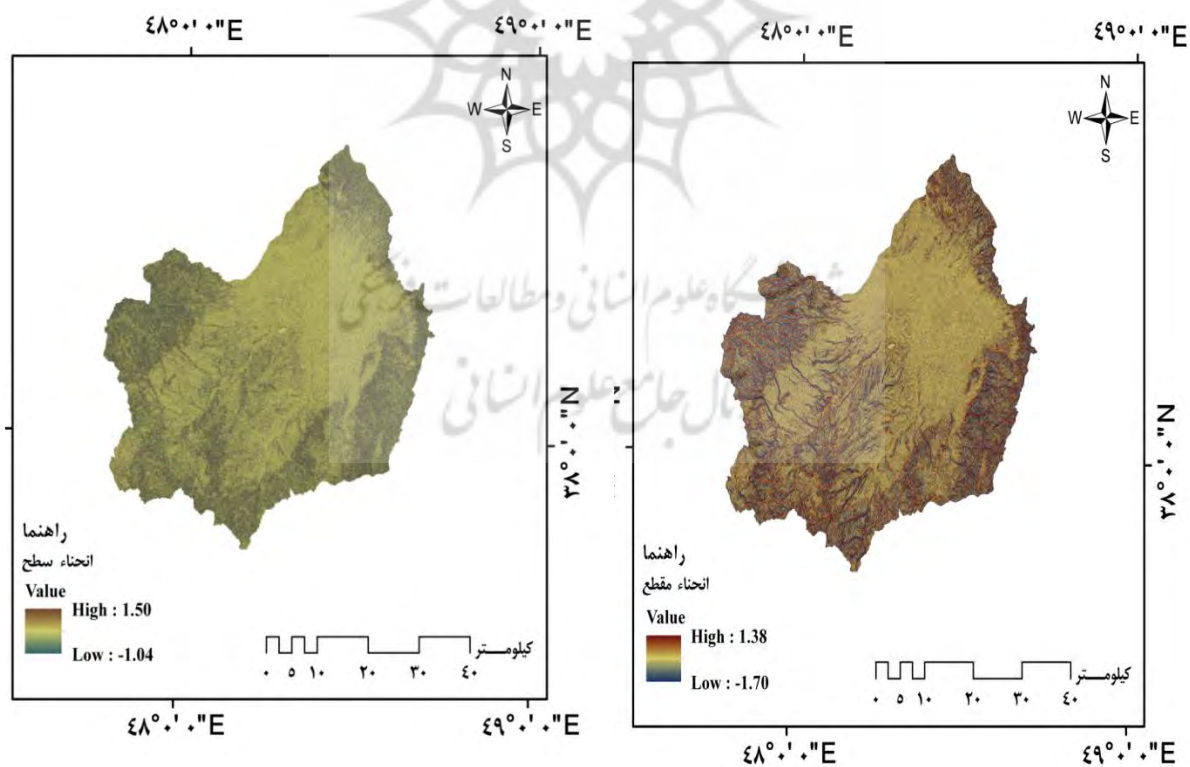


شکل ۹: نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)
حوضه آبخیز سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)



شکل ۱۱: نقشه شاخص انحناء دامنه (Curvator) حوضه آبخیز سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

شکل ۱۰: نقشه شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) حوضه آبخیز سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)



شکل ۱۲: نقشه شاخص انحناء سطح (Plan) حوضه آبخیز سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

شکل ۱۳: نقشه شاخص انحناء مقطع (Profile) حوضه آبخیز سامیان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

ارتباط میان شاخص‌های استخراج‌شده با مقادیر فرسایش در نشان داد که عامل تفاضل پوشش گیاهی عادی (NDVI) با ضریب تعیین ۰/۷۵ و شاخص انحناى مقطع با ۰/۰۹ نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین هم‌بستگی را دارا می‌باشند. نتایج حاصل از همبستگی میان فرسایش و شاخص‌های مورد مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳: همبستگی میان فرسایش سالانه خاک با شاخص‌های ژئومورفومتری در حوضه آبخیز سامیان

شاخص	ضریب همبستگی (R^2)	رابطه رگرسیونی
TWI	۰/۱۵	$y = -0.5736x + 2.7268$
SPI	۰/۱۱	$y = -0.9699x + 4.6086$
NDVI	۰/۷۵	$y = 9.1982x - 3.1132$
Curvature	۰/۱۷	$y = -74.182x + 2.4568$
Profil Curvature	۰/۰۹	$y = 81.938x + 2.3994$
Plan Curvature	۰/۲۸	$y = 95.786x + 2.2896$

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه فرسایش خاک به‌عنوان یکی از مباحث مهم مدیریت حوضه‌های آبخیز در سطح ملی و جهانی مطرح است. بنابراین لازمه برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیم درباره مهار فرسایش و رسوب، آگاهی از میزان فرسایش در یک حوضه آبخیز شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی آن‌ها برای اجرای برنامه‌ها و اقدامات آبخیزداری برای کاهش فرسایش است. بنابراین بررسی و پایش صحیح هدررفت خاک می‌تواند در جهت کنترل فرسایش مفید و سودمند باشد. در این پژوهش جهت پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده و ارتباط آن با عوامل ژئومورفومتری در حوضه آبخیز سامیان با استفاده از فناوری‌های RS و GIS انجام شد. برای اجرای مدل RUSLE، لایه‌های فرساینده‌گی باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، توپوگرافی (LS)، پوشش گیاهی (C)، و عملیات حفاظتی خاک (P) در محیط ArcMap تهیه و با هم‌پوشانی هم‌دیگر نقشه فرسایش سالانه خاک (RUSLE) تهیه شد. نتایج حاصل از اجرای مدل RUSLE نشان داد که مقادیر فرسایش سالانه خاک در حوضه بین ۰ تا ۳۲۱/۱۴ تن در هکتار در سال متغیر است. از طرفی نتایج ارزیابی نقشه متوسط هدر رفت سالانه خاک در مقیاس زیرحوضه‌ها نشان داد بیش‌ترین مقدار فرسایش خاک مربوط به زیرحوضه ۲۱ (۶/۵ تن در هکتار در سال) و کم‌ترین مقدار نیز مربوط به زیرحوضه ۱۰ با مقدار (۱/۰۵ تن در هکتار در سال) می‌باشد بررسی همبستگی آماری بین فاکتورهای مدل RUSLE با میزان فرسایش سالانه خاک در منطقه مورد مطالعه نیز نشان داد که عامل توپوگرافی (LS) با ضریب همبستگی ۰/۹۶ بیش‌ترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک در مدل RUSLE دارد. در گام بعد نیز به تهیه و پهنه‌بندی نقشه شاخص‌های ژئومورفومتری شامل توان آبراهه، رطوبت توپوگرافی، انحنا دامن، انحنا سطح، انحنا مقطع و شاخص پوشش گیاهی عادی در محیط GIS صورت گرفت. سپس با استفاده از رابطه رگرسیونی میزان همبستگی هر یک از شاخص‌ها در محیط Excel Stat با مقدار فرسایش سالانه خاک در حوضه آبخیز سامیان پرداخته شد. نتایج بررسی نشان داد که شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده با مقدار ۰/۷۵ درصد نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه از ضریب همبستگی بالایی برخوردار است. همچنین کم‌ترین مقدار مربوط به شاخص انحنا مقطع با مقدار

۰/۰۹ درصد می‌باشد. نتایج این پژوهش مشابه نتایجی است که سایر محققین از جمله عابدینی و پاسبان (۱۴۰۲)، شارما (۲۰۱۰)، راوات و همکاران (۲۰۱۸) بررسی آن‌ها نشان داد که عامل توپوگرافی و شاخص پوشش گیاهی بیش‌ترین تاثیر گذاری را در برآورد فرسایش خاک دارند. براساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش اقداماتی حفاظتی از قبیل بذرپاشی گونه‌های بومی در عرصه‌های مرتعی، جلوگیری از چرای بی‌رویه و بوته‌کشی جهت تقویت پوشش گیاهی منطقه، شخم زدن زمین‌های کشاورزی عمود بر جهت شیب منطقه مورد مطالعه ضروری می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده برای برآورد فرسایش خاک در حوضه‌های آبریز مورد مطالعه از سایر شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی استفاده گردد تا میزان تاثیر گذاری هر یک از این شاخص‌ها در برآورد فرسایش سالانه خاک مشخص گردد.

منابع

- آرخی، صالح، بارانی، شهرام، عمادالدین، سمیه. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر فرسایش و برآورد رسوب در حوضه چم کردلان (استان ایلام) با استفاده از مدل تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE)، مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۴): ۳۵-۵۶.
- احمدی، حسین. ۱۳۸۶. ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)، چاپ ۶، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۵۰۷.
- بابلی موخر، ح، تقیان، ع، ر، شیرانی، ک، ۱۳۹۷. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از روش تلفیقی فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک با به‌کارگیری شاخص‌های ژئومورفیک، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۷، شماره ۳، ص ۹۱-۱۱۶.
- ایزدی‌فرد، هادی، راثی نظامی، سید سعید، مصطفی‌زاده، رئوف، خاوریان، حسن. (۱۴۰۲). ارتباط تغییر ضریب رواناب سطحی با تغییر کاربری / پوشش اراضی حوضه سامیان استان اردبیل، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۴(۵۱): ۲۴-۴۱.
- قاضی‌زاده، منا، نوحه‌گر، احمد، عبدی نژاد، فهیمه. (۱۳۹۳). بررسی رابطه بین شاخص‌های محیطی و فه پایدار (مطالعه موردی: حوضه آبخیز راوند)، پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۳(۱۵): ۱-۱۸.
- زنگی‌آبادی، مهدی، رنگ‌آور، عبدالصالح، رفاهی، حسینقلی، شرفا، مهدی، بی‌همتا، محمدرضا. (۱۳۸۹). بررسی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرآیند فرسایش خاک در مراتع نیمه خشک کلات، نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، صص ۷۳۷-۷۴۴.
- طاهر بابادی، زینب، متشفع، بهزاد، روشن، سیدحسین. (۱۴۰۱). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از GIS و سنجش از دور بر مبنای مدل RUSLE (مطالعه موردی: شهرستان بهبهان)، خشکبوم، ۱۲(۱)، ۷۷-۹۲.
- عابدینی، موسی، پاسبان، امیرحسام. (۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خیاوچای، مشکین شهر)، هیدروژئومورفولوژی، <https://doi.org/10.22034/hyd.2023.58528.1708>

- کلارستاقی. ع، احمدی. ح، جعفری. م و قدوسی. ج. ۱۳۸۷. پیش‌بینی تغییرات احتمالی کاربری جنگل به دیم کاری با استفاده از مدل‌سازی احتمالاتی در حوضه آبخیز فریم صحرا استان مازندران، پژوهش و سازندگی، ۲۱(۳): ۵۲-۶۳.
- نورائی صفت، ا، بختیاری کیا، م، اکبریان، م. ۱۴۰۲. روند تغییرات هدررفت خاک با تأکید بر نقش فرسایشی رواناب در حوضه آبریز رودخانه کل (استان هرمزگان)، پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱(۱۳): ۷۰-۹۵.
- ذاکری‌نژاد، ر، سلمان، ف. ۱۴۰۱. ارزیابی خطر فرسایش آبی با استفاده از ترکیب مدل تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و نقشه تراکم خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت استان فارس، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۴): ۱۸۹-۲۰۹.
- محمودی، محمدعلی، نقشبندی، سیده پریا. (۱۳۹۸). برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و داده‌های سنجش از دور در حوضه آبخیز سد گاوشان، مجله آب و خاک، دوره ۳۳، شماره ۶، صص ۸۴۵-۸۵۶.
- معتمدی‌راد، محمد، زنگنه‌اسدی، محمدعلی، عجم، حسین. (۱۴۰۲). بررسی میزان فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از مدل (RUSLE) و روش پسیاک اصلاح شده (مطالعه موردی: حوضه آبریز کال اسماعیل دره شهرستان شاهرود استان سمنان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال یازدهم، شماره ۴، صص ۱۴۷-۱۶۵.
- ملکی، ص، خرمالی، ف، کریمی، ع، ر، ۱۳۹۳. معرفی الگوریتم‌های مختلف جریان، برای تهیه نقشه شاخص خیزی و کربن آلی خاک در بخشی از اراضی لسی، منطقه توشن استان گلستان، پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، جلد ۲۱، شماره ۱، صص ۱۶۵-۱۴۱.
- مددی، ع، پا سبان، ا. ح، نظافت تکل، ب. ۱۴۰۲. بررسی و ارزیابی میزان هدررفت خاک در کاربری‌های اراضی حوضه آبخیز آتشگاه با استفاده از مدل RUSLE و تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده OLI)، مطالعات علوم محیط زیست، ۸(۲): ۶۶۱۲-۶۶۲۵.
- Arabameri, A., Tiefenbacher, J., Blaschke, T., Pradhan, B., Tien Bui, D. (2020). Morphometric Analysis for Soil Erosion Susceptibility Mapping Using Novel GIS-Based Ensemble Model, Remote Sens, 12(5): 1-24.
- Arnoldus, H.M.J. (1980). approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. Assessment of Erosion. 12(21), 127-132.
- Borji Hassangavyar, M., Nazari Samani, A., Rashidi, Sh., Tiefenbacher, J. (2020). Catchment-scale soil conservation: Using climate, vegetation, and topohydrological parameters to support decision making and implementation, 712: 136124.
- Choudhury, M.K., & Nayak, T. (2003). Estimation of soil erosion in Sagar Lake catchment of Central India Proc. International Conference on Water and Environment. 387-392.
- Dabral, p.p., Baithuri, N., & Pandey, A. (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. Water Resources Management. 22(12), 1783-1798.

- Fagbohun, B., Anifowose, A., Odeyemi, Ch., Aladejana, O., Aladeboyeje, A. (2016). GIS-based estimation of soil erosion rates and identification of critical areas in Anambra sub-basin, Nigeria, *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(159): 1-10.
- Ghosh, A., Rakshit, S., Tikle, S., Das, S., Chatterjee, U., Pande, Ch., Alataway, A., Alataway, A., Dewidar, A., Mattar, M. (2022). Integration of GIS and Remote Sensing with RUSLE Model for Estimation of Soil Erosion, *Land*, 12(1), 116.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., & Galli, M. (2000). Probabilistic landslide hazard assessment: A review of methods and applications. *Natural Hazards*. 22(1), 1-59.
- Huang, L., McDonald-Buller, E.C., McGaughey, G., Kimura, Y., & Allen, D.T. (2016). The impact of drought on ozone dry deposition over eastern Texas *Atmos. Environ.* 127, 176-186.
- Khan, A., Rahman, A. (2021). Quantification of Soil Erosion by Integrating Geospatial and Revised Universal Soil Loss Equation in District Dir Lower, Pakistan, *B. Life and Environmental Sciences* 58(4): 17-28.
- Kong, H., Wu, D., Yang, L. (2022). Quantification of soil erosion in small watersheds on the Loess Plateau based on a modified soil loss model, *Water Supply*, 22 (7): 6308–6320.
- Moore, I.D., & Grayson, R.B. (1991). Digital terrain Modeling: A review of hydrological, Geomorphological and Biological application. *Hydrol.* 5, 3-30.
- Nearing M, Foster G, Lane L., 1989. A process-based soil erosion model for USDA water erosion prediction project. *Transactions of ASAE*. 32(5):1587–1593.
- Oliveira, V., Vick, E., Bacani, V. 2023. Analysis of seasonal environmental fragility using the normalized difference vegetation index (NDVI) and soil loss estimation in the Urutu watershed, Brazil, DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2557676/v1>.
- Olorunfemi, I.E., Komolafe, A.A., Fasinmirin, J.T., Olufayo, A.A. & Akande, S.O. (2020). A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models CATENA. *Land*. 194, 104725.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., Geetha, N. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology, *Geoscience Frontiers*, 3(2): 209-215.
- Prieto-Amparán, J., Pinedo-Alvarez, A., Vázquez-Quintero, G., Valles-Aragón, M., Rascón-Ramos, A., Martínez-Salvador, M., Villarreal-Guerrero, F. (2019). A Multivariate Geomorphometric Approach to Prioritize Erosion-Prone Watersheds, *Sustainability*, 11(18), 1-21.
- Qin, Ch. Z., Zhu, A. X., Pei, T., Li, B. L., Scholten, T., Behrens, T., & Zhou, CH. H. (2009). An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision Agriculture*. 12(1), 32-43.

- Rejith, R.G., & Anirudhan, s. (2019). Delineation of Groundwater Potential Zones in hard rock Terrain Using Integrated Remote Sensing GIS and MCDM Techniques A Case Study From Vamanapuram River Basin, Kerala, India. *Gis and Geostatistical Techniques for Groundwater science*. 349-364.
- Renard, K.G. & Freidmund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE. *Journal of Hydrology*. 157, 287-306.
- Sharma, A. (2022). Integrating terrain and vegetation indices for identifying potential soil erosion risk area, *Geo-spatial Information Science*, 13(3).
- Vijith, H., Seling, L.W., & Dodge-Wan, D. (2018). Estimation of soil loss and identification of erosion risk zones in a forested region in Sarawak, Malaysia, Northern Borneo, *Environment. Development and Sustainability*. 20(3), 1365-1384.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion, losses: a guide to conservation planning, United States Department of Agriculture Handbook, Washington DC, 537, 13-27.

