



جغرافیا و روابط انسانی، زمستان ۱۴۰۳، دوره ۷، شماره ۳، صص ۵۱۷-۴۷۳

تجزیه و تحلیل خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با عوامل محیطی (مطالعه موردی:

حوضه آبخیز ویرمونی، استان گیلان)

طیبه بابایی اولم^۱، موسی عابدینی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی،

اردبیل، ایران.

Email: Tayebe.babaei.1365@gmail.com

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

*ایمیل نویسنده مسئول: Abedini@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۶

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، تجزیه و تحلیل شدت خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با عوامل محیطی در حوضه آبخیز ویرمونی در استان گیلان 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 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 عوامل محیطی که در رخداد فرسایش خاک موثر هستند شامل شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، انحناء دامنه، انحناء مقطع، انحناء سطح و شاخص تفاضل پوشش گیاهی عادی‌شده در محیط سامانه اطلاعات مکانی ایجاد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که متوسط نرخ فرسایش سالانه خاک برای کل حوضه در دامنه بین ۰ تا ۸۰/۱ تن در هکتار در سال برآورد شد همچنین در بین عوامل موثر مدل مورد مطالعه با فرسایش خاک عامل توپوگرافی بیش‌ترین هم‌بستگی (۰/۹۱) را نسبت به سایر عوامل را برخوردار بود. در بررسی دیگر ارتباط بین عوامل محیطی با میزان هدررفت سالانه خاک انجام شد که نتایج نشان داد شاخص تفاضل پوشش گیاهی عادی‌شده با ضریب تعیین ۰/۶۲ نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه دارای هم‌بستگی بیش‌تری است. هم‌چنین شاخص توان آبراهه با مقدار ۰/۱۱ کم‌ترین هم‌بستگی را دارا می‌باشند. این پژوهش امکان ادغام عوامل محیطی موثر بر فرسایش خاک را تأیید می‌نماید. کلیدواژه‌ها: توپوگرافی، پوشش گیاهی، شاخص‌های محیطی، مدل جهانی فرسایش خاک، حوضه ویرمونی.

مقدمه

فرسایش خاک به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب زمین، به معنای از بین رفتن لایه سطحی و مواد آلی خاک است که برای رشد گیاهان ضروری هستند (حسامی و همکاران، ۱۴۰۳؛ Olorunfemi et al., 2020). این پدیده به طور همزمان یا مستقل در قالب فرسایش پاشماني، ورقه‌ای، شیاری، بین‌شیاری، و غیره رخ می‌دهد (Hao et al., 2020). به عبارتی دیگر علاوه بر اثرات مخرب محلی، امنیت غذایی جوامع را نیز به خطر می‌اندازد به طوری که بر اساس برآوردهای جهانی سالانه بیش از ۲۳ میلیارد تن خاک حاصل‌خیز از اراضی زراعی از بین می‌رود که به معنای نابودی ۲۵ درصد از خاک‌های جهان طی نیم قرن آینده است از طرفی کشور ایران نیز از این معضل مستثنا نیست و افزایش جمعیت، گرایش به توسعه و عدم توجه کافی به مسائل زیست‌محیطی تشدید فرسایش خاک را در پی داشته است (ذاکری‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۱؛ عابدینی و همکاران، ۱۴۰۳). در طی ۴۰ سال گذشته مدل جهانی فرسایش خاک به دلیل محاسبات ساده، پرکاربردترین روش برای تخمین پتانسیل فرسایش خاک و برآورد اثرات عملیات‌های مدیریتی مختلف بوده است (Shin, 1999). این مدل توسط بخش کشاورزی ایالات متحده در سال ۱۹۷۸ برای پیش‌بینی میزان خاک فرسایش یافته در طول زمان ایجاد شد (Whittington, 2022). و میانگین بلندمدت فرسایش شیاری و ورقه‌ای را بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده ارزیابی می‌کند. محققان نسخه جدیدتری از مدل جهانی فرسایش خاک را با نام مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده ارائه داده‌اند که برآوردهای دقیق‌تری از عوامل موثر بر فرسایش خاک ارائه می‌دهد. علی‌رغم تجربی بودن این مدل، ترکیب آن با سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور برآوردهای دقیق‌تر و کم‌هزینه‌تر از فرسایش خاک و توزیع جغرافیایی آن را در مناطق بزرگ‌تر امکان‌پذیر می‌کند. آسانی استفاده و نیاز به داده‌های کم، مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده را به مناسب‌ترین روش برای ارزیابی خطر فرسایش خاک، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه تبدیل کرده است (Ammar et al., 2023). تاکنون مطالعات زیادی در خصوص خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با عوامل محیطی در داخل و خارج کشور انجام گرفته است. برای مثال Aslam و همکاران (۲۰۱۰) جهت برآورد خطر فرسایش خاک در ناحیه چیترال پاکستان را با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده و ترکیب آن با سنجش از دور و سیستم اطلاعات مکانی و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که متوسط فرسایش سالانه خاک برابر با ۴۵۰ تن در هر هکتار در سال بود هم‌چنین در بین عوامل موثر در مدل فاکتور توپوگرافی بیش‌ترین تاثیرگذاری را دارد. Imajjane و همکاران (۲۰۲۰)، پهنه‌بندی فرسایش خاک را با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده در منطقه آرگانا مراکش مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که منطقه مورد مطالعه در معرض خطر فرسایش زیادی قرار دارد به طوری که متوسط هدررفت سالانه خاک ۴۷/۵۲ تن در هکتار در سال و میزان فرسایش سالانه ۵۲۳۳۸۴۰ تن برآورد شد. Brini و همکاران (۲۰۲۱) ارتباط فرسایش خاک با عوامل محیطی و ژئومورفومتری منطقه کرت در یونان پرداختند. نتایج حاکی از این بود که عوامل محیطی زیادی از

جمله پوشش گیاهی و توپوگرافی تأثیر زیادی بر میزان فرسایش خاک دارند. هم‌چنین تجزیه و تحلیل پارامترهای مورفومتریک به عنوان یک ابزار مفید برای تعیین مناطقی که در برابر فرسایش خاک بسیار آسیب‌پذیر هستند در نظر گرفته می‌شود. Chi و همکاران (۲۰۲۲) اثرات تغییر پوشش گیاهی بر فرسایش خاک را در حوضه آسیای مرکزی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده هم‌بستگی بالاتری را با بارش دارد. Elsayed و همکاران (۲۰۲۳) مدل‌سازی فرسایش خاک در تونس را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تونس در معرض خطر جدی فرسایش خاک است و ۶/۴۳ درصد از مساحت کل کشور تحت تأثیر نرخ بسیار بالای هدررفت خاک است (بیش از ۳۰ تن در هکتار در سال) هم‌چنین مناطق جنوب غربی، مرکزی و غربی دارای بیش‌ترین میزان فرسایش خاک را به خود اختصاص دادند. در ایران نیز عابدینی و همکاران (۱۴۰۱) ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوزه آبریز کوزه توپراقی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از این بود که ارتباط میان مقادیر فرسایش و رسوب در زیرحوضه‌های مورد مطالعه معنی‌دار است. علاوه بر این، مقدار فرسایش و رسوب با مقادیر شیب نیز دارای رابطه معکوس و معنی‌دار هستند. اسفندیاری و همکاران (۱۴۰۱) با ادغام شاخص‌های محیطی و پوشش گیاهی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز عموقین استان اردبیل را مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیدند که متوسط فرسایش سالانه خاک برای کل حوزه در دامنه بین ۱/۱۲۱ تا ۵/۵۳ تن در هکتار در سال متغیر است. هم‌چنین هم‌بستگی بین فاکتورهای مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده با متوسط فرسایش خاک نشان داد که عامل توپوگرافی دارای ارتباط کم‌تری با میزان فرسایش سالانه خاک دارد. در پژوهشی دیگر طاهری بابادی و همکاران (۱۴۰۱) تأثیر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک را در شهرستان بهبهان مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که فرسایش خاک در دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۲۱ با گذر زمان بیشتر شده است از طرفی دیگر در بین عامل‌های موثر در فرسایش عامل فرساینده‌گی باران در بخش‌های شمالی منطقه بالادست زیاد بوده است. حسامی و همکاران (۱۴۰۳) به منظور برآورد میزان فرسایش خاک در حوزه آبخیز گاوشان با استفاده از مدل مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده سه بعدی مورد مطالعه قرار داده و به این نتایج دست یافتند که میانگین سالانه فرسایش خاک ۵/۰۲ تن در هکتار در سال برآورد گردید که عامل توپوگرافی به‌خوبی فرایش حوضه را برآورد می‌کند. صادقی و همکاران (۱۴۰۲) تغییرات مکانی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز بریموند در استان کرمانشاه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر این بود که حدود ۶۵/۵۷، ۲۳/۶۲ و ۱۰/۸۱ درصد از وسعت منطقه در محدوده پتانسیل فرسایش متوسط، کم و زیاد قرار گرفته است. کرمی و همکاران (۱۴۰۲) با هدف بررسی نقش لندفرم‌ها و لیتولوژی در میزان فرسایش خاک در حوضه آبریز نونزچای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که متوسط فرسایش خاک ۱/۷۱ تن در هکتار در سال است. از طرفی با تلفیق نقشه لندفرم‌ها و فرسایش خاک مشخص شد که بیش‌ترین فرسایش در مجموع به دره‌ها و بریدگی‌های واقع بر ارتفاعات و دامنه‌ها با مساحت ۹۴/۲۷ کیلومتر مربع اختصاص دارد. هم‌چنین

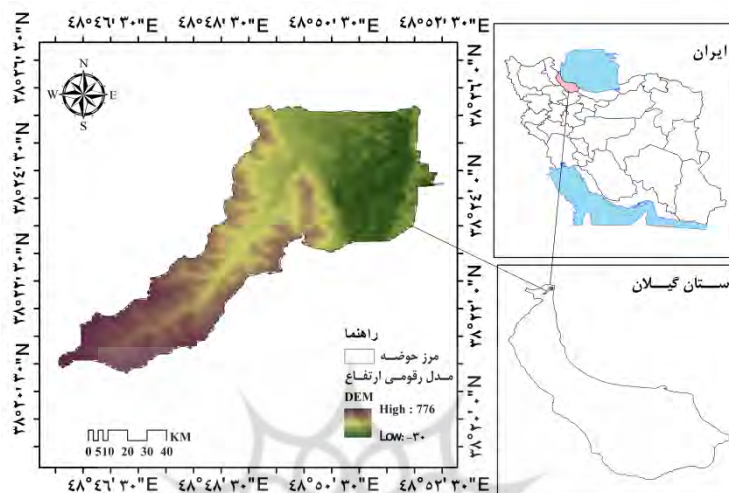
ضریب هم‌بستگی بین عوامل مدل مورد مطالعه و فرسایش خاک نشان داد که عامل توپوگرافی بیش‌ترین اثرگذاری را در محاسبه فرسایش حوضه زنوزچای دارد. در پژوهشی دیگر عابدینی و همکاران (۱۴۰۳) تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی در حوزه آبخیز خیابوچای مشکین شهر مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند مقدار فرسایش سالانه خاک بین ۰ تا ۱۵۰/۵۴ تن بر هکتار در سال در سطح حوزه برآورد شد. هم‌چنین نتایج ارتباط بین شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی با میزان فرسایش سالانه خاک نشان داد که شاخص‌های تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده و انحناء مقطع به‌ترتیب با ضریب هم‌بستگی ۰/۵۷ و ۰/۰۵ نسبت به شاخص‌های دیگر به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تاثیرگذاری را دارا می‌باشند. ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۴۰۳) به مدل‌سازی نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب با مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده در حوضه آبریز دیزگران پرداخته و به این نتیجه رسیدند که متوسط فرسایش خاک در منطقه ۴۵/۰۹ تن در هکتار در سال و متوسط تولید رسوب ۱۹/۴۲ تن در هکتار در سال محاسبه شد. هم‌چنین نتایج نشان‌دهنده این بود که دو عامل توپوگرافی با ضریب هم‌بستگی ۷۹ درصد و پوشش گیاهی با ضریب ۴۷ درصد به‌ترتیب بیش‌ترین هم‌بستگی را با نرخ فرسایش خاک در منطقه دارند. حوضه آبخیز ویرمونی در استان گیلان از جمله حوضه‌های آبخیز مهم شمال ایران است. این حوضه با دارا بودن شرایط اقلیمی و توپوگرافی خاص همواره در معرض خطر فرسایش خاک قرار دارد. بنابراین انجام این پژوهش می‌تواند در درک بهتر فرآیند فرسایش خاک در حوضه مورد مطالعه و ارائه راهکارهای مناسب برای کنترل و مدیریت آن به مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب و خاک کمک شایانی نماید. بنابراین با توجه به مباحث مطرح‌شده هدف از این پژوهش پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با برخی عوامل محیطی در حوضه آبخیز ویرمونی در استان گیلان می‌باشد.

روش تحقیق

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ویرمونی بین ۴۳° تا ۴۸° ۵۰' طول شرقی و ۲۱' تا ۳۸° ۲۷' عرض شمالی واقع شده است. این حوضه در تقسیم‌بندی جاماب یکی از زیرحوضه‌های بزرگ تالش و رودخانه‌های شمال‌غرب گیلان می‌باشد که از ارتفاعات غربی شهرستان آستارا و از ارتفاعات ۱۳۰۰ متری سرچشمه گرفته و از روستای لاتون عبور می‌کند و بعد از گذشتن از روستاهای لاتون، ترک محله، عوض‌لر، صیادلر، جبرئیل محله، شیخ محله، امیر محله و بیجاربین در ارتفاع صفر در نزدیکی روستای ویرمونی حوضه بسته می‌شود و ادامه شاخه از وسط شهر آستارا گذشته و در نهایت روان‌آب خود را به دریای خزر تخلیه می‌نماید. مساحت حوضه آبریز آن در مقطع ورود به دشت ۴۵ کیلومتر مربع و طول شاخه اصلی آن ۱۳ کیلومتر و شکل آن کشیده است و متوسط حجم سالیانه جریان رودخانه در مقطع ورود به دشت ۲۸ و در ایستگاه آستارا ۴۷ میلیون مترمربع می‌باشد.

جریان آب این رودخانه از سال ۱۳۶۴ تحت بررسی و کنترل می‌باشد و منبع تغذیه آن از بارندگی های سالیانه ناحیه در فصل بارش و ذوب شدن برف ارتفاعات در فصل گرما می‌باشد (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۲). در (شکل ۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز ویرمونی ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در سطح استان گیلان و ایران

روش پژوهش

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده در پژوهش شامل: لایه‌های رقومی ۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور، مدل رقومی ارتفاعی با تفکیک ۳۰ متری، آمار بارندگی ماهانه و سالانه از سازمان هواشناسی کشور، نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ بافت خاک ایران، تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ OLI مربوط به سال ۲۰۲۲ منطقه مورد مطالعه از سایت www.usgs.gov دریافت و در مرحله بعد تصحیحات رادیومتریکی شامل تصحیح اتمسفری Flaash روی این تصاویر اعمال شد. در این پژوهش از نرم افزارهای ArcGIS 10.8 جهت ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط به آن و همچنین از نرم افزار ENVI 5.6 جهت تهیه لایه پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. از نرم‌افزار Excel STAT و SPSS جهت محاسبات آماری و روابط رگرسیونی معادلات بهره‌گیری شده است.

مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده RUSLE

جهت محاسبه نرخ فرسایش در بازه زمانی مورد مطالعه از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده استفاده خواهد شد. این مدل توسعه‌یافته برای پیش‌بینی هدررفت سالانه خاک از یک سطح معینی به‌کار می‌رود (Renard and Freidmund et al, 1994) که از شش فاکتور شامل فرسایندها، باران، فرسایش‌پذیری خاک،

توپوگرافی، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی خاک استفاده می کند و به صورت رابطه (۱) است (Wischmeier and Smith, 1978).

$$A = R * K * C * LS * P \quad (1)$$

فرساینده گی باران تأثیر شدت بارندگی را بر فرسایش شیاری و ورقه ای تعیین می کند. فرسایش پذیری خاک به حساسیت خاک نسبت به فرسایش اشاره دارد و توسط آب و هوا، خواص خاک، کاربری زمین و پوشش گیاهی کنترل می شود و جزء ضروری در برآورد فرسایش خاک است. توپوگرافی هم به طول شیب و فاکتور شیب اشاره دارد. عملیات حفاظتی به عامل حفاظتی و پوشش گیاهی عامل مدیریت پوشش است. این دو عامل اثرات بدون بعد بر مدیریت و سیستم کشت دارند در حالی که عامل توپوگرافی تأثیر بدون بعد بر شیب و طول شیب دارد. همه این پارامترهای بدون بعد در یک واحد نسبی نرمال شدند (Dabral et al., 2008: 1788).

عامل فرساینده گی باران (R)

فرسایش بارندگی (R) از نظر کمی تأثیر بارندگی بر سطح خاک را منعکس می کند. 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. فرسایش ناشی از بارندگی را می توان به صورت رابطه (۲) بیان کرد (Choudhury and Nayak, 2003).

$$R = 79 + 0.363 * P_a \quad (2)$$

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 (کلارستاقی و همکاران، ۱۳۹۸). مورگان برای ضریب فرسایش پذیری خاک های مختلف اعدادی را پیشنهاد نموده است که در جدول (۱) 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.

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

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

توپوگرافی (LS)

عامل توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی دیجیتال^۱ محاسبه خواهد شد. طول شیب، فاصله‌ای را که در آن رسوب‌گذاری صورت می‌گیرد یا جریان زمینی به یک کانال مجزا برخورد می‌کند توصیف می‌کند. 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 (Olorunfemi et al., 2020). 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؛ 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 (۴) بیان کرد (Wang et al., 2020).

$$LS = \left[\frac{\text{Flow accumulation grid}}{\text{cell size} / 22.13} \right]^{0.4} \times \left[\frac{\sin(\text{slope grid} \times 0.01745)}{0.0896} \right]^{1.3} \quad (4)$$

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.

مدیریت پوشش گیاهی (C)

مدیریت پوشش گیاهی با اندازه‌گیری نسبت هدررفت خاک از زمین زراعی ارزیابی می‌شود. این الگوی کشت مناسب و اتخاذ شیوه‌های مدیریتی برای کاهش فرسایش خاک را نشان می‌دهد. بسیاری از محققان فاکتور C را بر اساس طبقات کاربری زمین/پوشش زمین ارزیابی کرده‌اند (Pandey et al., 2007). عوامل مدیریت زراعی بر اساس کلاس‌های کاربری و پوشش زمین^۲ به بررسی ماهیت متغیر فرسایش خاک در طول سال‌ها کمک می‌کند. نقشه کاربری/پوشش زمین با استفاده از تصویر لندست ۸ OLI تهیه خواهد شد. طبقات کاربری زمین/پوشش زمین مقادیر C را از ۰ تا ۱ اختصاص دادند (جدول ۲).

جدول ۲: ارزش‌های اجرایی مدیریت پوشش برای کلاس‌های مختلف کاربری/پوشش زمین (Pandey et al., 2007).

طبقات کاربری زمین/پوشش زمین	مسکونی	کشاورزی	پوشش گیاهی	زمین بایر	پهنه آبی
فاکتور C	۰/۰۰۲	۰/۲۸	۰/۰۰۰۸	۰/۱۳	۰

^۱- Digital Elevation Model (DEM)

^۲ - LandUse/LandCover

عامل عملیات حفاظت خاک (P)

عملکرد تولید رسوب و رواناب توسط شیوه‌های مختلف حفاظت از خاک کنترل می‌شود و C عوامل مهمی برای کاهش فرسایش خاک و رواناب سطحی هستند میزان فرسایش خاک با روش‌های حمایتی انجام شده در زمین‌های زیر کشت تعیین می‌شود. کشاورزی خطی، کشت نواری و روش‌های کشت تراس برای کنترل فرسایش خاک موثر است. جدول ۳ مقادیر عملیات حفاظتی شیب را نشان می‌دهد. هر چه ارزش عملیات حفاظتی بالاتر باشد، اقدامات انجام شده برای محدود کردن فرسایش خاک کم‌تر است (Shin, 1999).

جدول ۳. مقادیر عملیات حفاظتی در شیب‌های مختلف (Shin, 1999).

شیب (درصد)	۷-۰	۱۱-۷/۳	۱۱/۶-۳/۱۷	۱۷/۲۶-۶/۸	۲۸/۶ <
فاکتور P	۰/۲۷	۰/۳	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵

تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه فرسایش خاک

پس از تهیه لایه‌ها و طبقه‌بندی هر کدام از آن‌ها مطابق شرایط منطقه و دامنه اعداد به‌دست‌آمده، 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 سالیانه 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 محیطی

شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI^۳)

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی است که با استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور به دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به صورت رابطه ۶ می‌باشد (Ranagalage et al., 2018).

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

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 (پاسبان و همکاران، ۱۴۰۱؛ Ranagalage et al., 2018). برای محاسبه شاخص NDVI از باندهای ۴ و ۵ تصویر لندست ۸ OLI سال ۲۰۲۲ استفاده شد (رابطه ۶) و نقشه شاخص مذکور برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Envi 5.6 به دست

³- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

آمد.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI^۴)

شاخص رطوبت توپوگرافی اولین بار به وسیله بون و کرکبی در سال ۱۹۷۹ میلادی در مدل بارش-رواناب معرفی شد که می تواند تأثیر توپوگرافی را بر تولید رواناب به صورت کمی بیان کند و به عنوان یک شاخص فیزیکی، مکان مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می کند (ملکی و همکاران، ۱۳۹۳). رطوبت توپوگرافی در مقایسه با ویژگی های توپوگرافی ترکیبی دیگر، مانند شاخص قدرت جریان در بسیاری موارد در کاربردهای مربوط به کشاورزی دقیق استفاده می شود که نمونه هایی از این کاربردها شامل استفاده از نقشه رطوبت توپوگرافی به عنوان شاخصی برای الگوی رطوبت خاک در مزرعه به خصوص در اراضی تپه ماهوری، و ویژگی های توپوگرافی اصلی (مانند زاویه شیب، انحنای شیب) با یکدیگر به عنوان ورودی برای تهیه نقشه رقومی خاک برای پیش بینی توزیع مکانی نوع و ویژگی های خاک، در مقیاسی بهتر می باشد. شاخص رطوبت توپوگرافی به صورت رابطه ۷ ارائه شده است (Qin et al., 2009).

$$TWI = A_s / \tan \beta \quad (۷)$$

در رابطه ذکر شده A_s سطح ویژه حوضه برحسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)، β درجه شیب می باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از درجه شیب می باشد. 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 می کند.

شاخص توان آبراهه (SPI^۵)

توان آبراهه میزان زمان مصرف انرژی است و به طور گسترده در مطالعات فرسایش و محل رسوب به عنوان اندازه گیری قدرت فرسایش آب جاری استفاده می شود هم چنین این شاخص ظرفیت انتقال فضایی توزیع شده را محاسبه می کند و ممکن است برای ارزیابی چشم انداز فرسایش بیش از سایر رویکردها مناسب باشد، زیرا این امر منجر به انعطاف و انحراف جریان می شود. این توزیع فضایی، پتانسیل خسارت خاک را با استفاده از بارش رواناب و باران یکنواخت محاسبه می کند شاخص توان آبراهه به صورت رابطه ۸ محاسبه می شود (Sharma, 2010).

$$SPI = A_s \tan B \quad (۸)$$

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 می دهد که به نمایش فرایندهای فرسایش و

^۴- Topographic Wetness Index (TWI)

^۵-Stream Power Index (SPI)

رواناب کمک می‌کند. مقادیر انحنای نمایه، مورفولوژی توپوگرافی را نشان می‌دهد که دارای یک انحنای مثبت، منفی و یک مقدار صفر است 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 (Rejith et al., 2019). از این رو شاخص انحنای دامنه با استفاده از DEM با ابعاد ۲۰*۲۰ در محیط Arc Map تهیه گردید و در نهایت سه لایه شامل انحنای دامنه، انحنای سطح، انحنای مقطع ایجاد شد.

شاخص انحنای سطح (Profile Curvator)

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

$$n \times g(a \times d^2 + b \times e^2 + c + d \times e) / (d^2 + e^2)^{1.5} \quad (9)$$

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 (بابلی موخر، ۱۳۹۷).

شاخص انحنای مقطع (Plan Curvator)

انحنای مقطع، بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد بنابراین نشان‌دهنده واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحنای مقطع واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده خط الراس‌ها و ستیغ‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها یا دره‌ها را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحنای مقطع بر حسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد. شاخص انحنای مقطع به صورت 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.

پس از این که نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از عوامل محیطی به دست آمد. ارتباط این شاخص‌ها با میزان فرسایش سالانه خاک به صورت رابطه رگرسیونی در محیط ExcelStat به دست آمد تا میزان هم‌بستگی آن‌ها مشخص

شود. به عبارتی 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 به کار 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. در این مدل رگرسیونی متوسط فرسایش سالانه خاک به عنوان متغیر وابسته (Y) و شاخص‌های محیطی به دست آمده به عنوان متغیرهای مستقل (X) در نظر گرفته شدند.

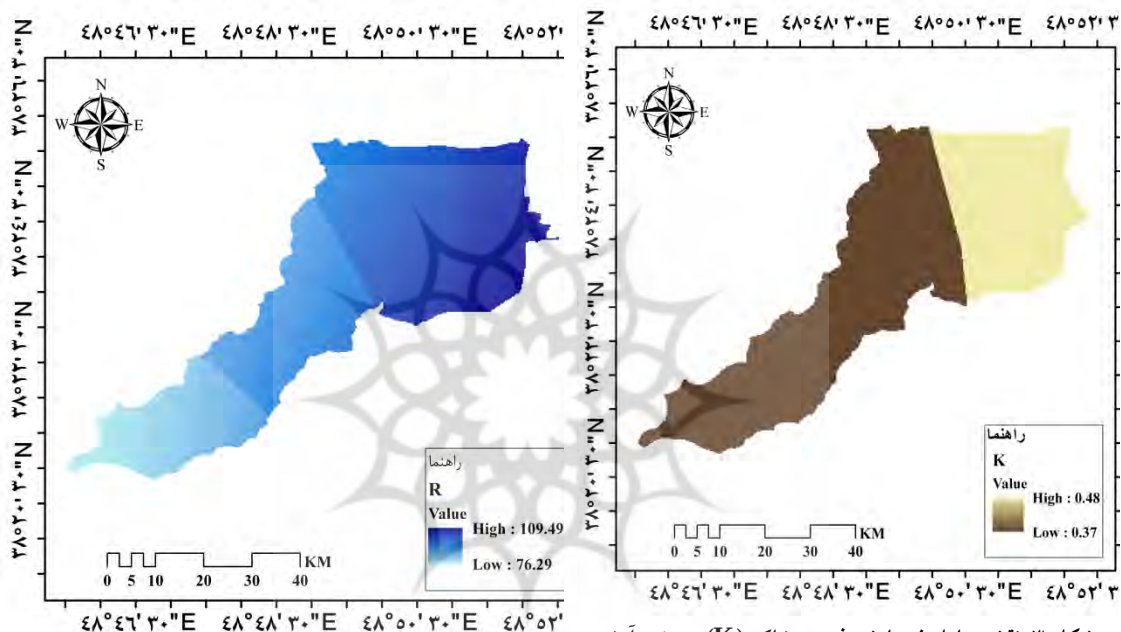
یافته‌ها

تحلیل عوامل مورد مطالعه

نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرساینده‌گی باران در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه (رابطه ۶) در طی دوره آماری ۱۰ ساله ایستگاه‌های باران‌سنجی شامل ۶ ایستگاه در داخل و اطراف حوضه مورد مطالعه به دست آمد سپس نقشه فاکتور فرساینده‌گی باران بر اساس اطلاعات به دست آمده تهیه شد که در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل (۲) مقدار متوسط عامل R در حوضه آبخیز ویرمونی بین ۷۶/۲۹ تا ۱۰۹/۴۹ مگاژول بر میلی‌متر بر هکتار در ساعت متغیر می‌باشد. بالاترین ارزش عامل فرساینده‌گی در قسمت شمالی حوضه است که بیش‌ترین بارندگی را دارد و کم‌ترین آن قسمت‌های جنوبی حوضه را شامل می‌شود. مقادیر فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از اطلاعات مورد نیاز از گزارش تفصیلی حوضه ویرمونی استخراج گردید سپس نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک با توجه به جدول ۱ و مطالعات سایر محققین در محیط ArcGIS تهیه شد. براساس شکل (۴) 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 حوضه مورد مطالعه نیز با تهیه و ایجاد لایه‌های لازم براساس رابطه ۶ به دست آمد که در شکل (۵) ارائه شده است. براساس شکل (۵) مقدار عامل LS برای حوضه مورد مطالعه در دامنه بین ۰ تا ۱۳/۴۱ در سطح پیکسل متغیر می‌باشد که در دامنه‌های پرشیب به خصوص 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 حوضه نیز براساس رابطه ۴ و ۵ تهیه شد که در شکل (۳) ارائه شده است. براساس شکل (۳) مقادیر عامل C از ۰/۰۷ الی ۰/۴۲ متغیر می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که نیمه شمالی حوضه مورد مطالعه به دلیل وسعت بیش‌تر اراضی جنگلی مقادیر بیش‌تری از مقدار C را دارد و کم‌ترین مقدار در نواحی مرکزی اراضی مرتعی دیده می‌شود. نقشه فاکتور عملیات حفاظتی از طریق طبقه‌بندی مجدد طبقات شیب و اختصاص عدد مربوطه براساس

اطلاعات جدول (۲) تهیه شد که در شکل (۶) ارائه شده است. مقدار این عامل بین ۰/۵ تا ۱ برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد.

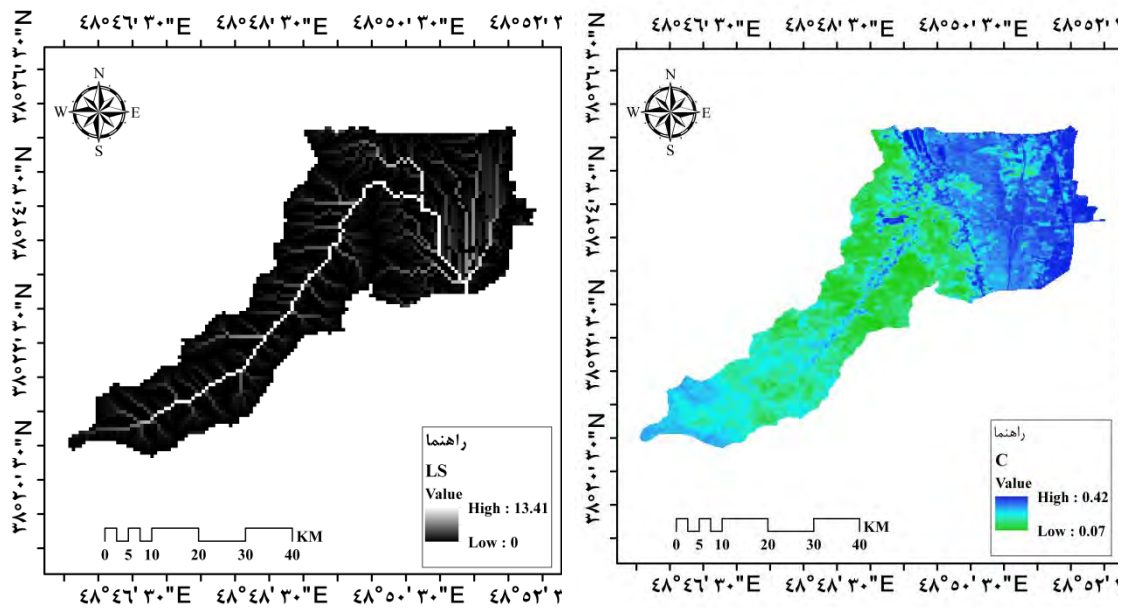
جهت تهیه نقشه فرسایش متوسط سالانه خاک از حاصل ضرب فاکتورهای فرساینده باران، فرسایش پذیری خاک، مدیریت پوشش گیاهی، توپوگرافی، و عملیات حفاظت براساس رابطه ۱ در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی محاسبه شد و مقادیر هدررفت سالانه خاک بر حسب تن در هکتار در سال به دست آمد. بر اساس شکل (۷) مقادیر نقشه فرسایش سالانه خاک در حوضه ویرمونی بین ۰ الی ۸۱/۱ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می باشد.



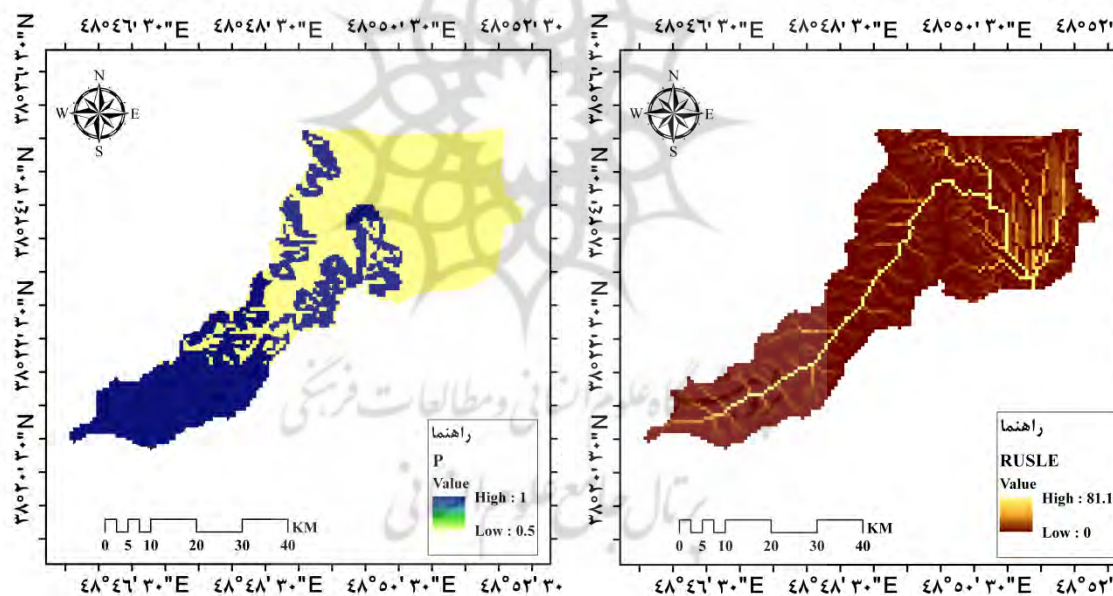
شکل ۳: نقشه عامل فرسایش پذیری خاک (K) حوضه آبخیز

شکل ۲: نقشه عامل فرساینده باران (R) حوضه

آبخیز ویرمونی



شکل ۵. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) حوضه آبخیز ویرمونی
شکل ۶. نقشه عامل توپوگرافی (LS) حوضه آبخیز ویرمونی



شکل ۷. نقشه فرسایش سالانه خاک (RUSLE) حوضه آبخیز ویرمونی
شکل ۸. نقشه عامل عملیات حفاظتی خاک (P) حوضه آبخیز ویرمونی

در نهایت 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 توپوگرافی با بیشترین همبستگی (۰/۹۱) در هدر رفت سالانه خاک حوضه آبخیز ویرمونی دارد. در جدول (۴) ضریب همبستگی عامل‌های مدل RUSLE با هدر رفت سالانه خاک ارائه شده است.

جدول ۴: ضریب همبستگی فاکتورهای مدل RUSLE با هدررفت سالانه خاک

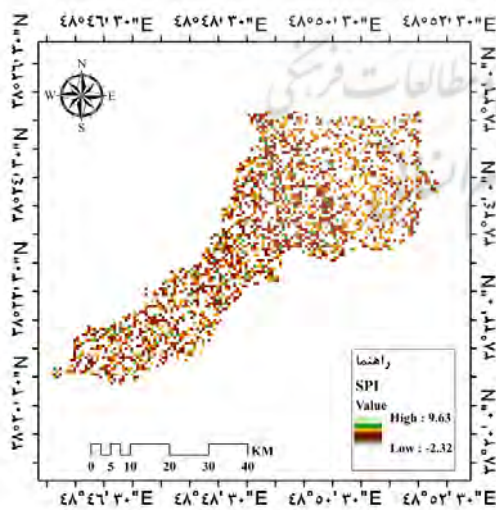
فاکتور	ضریب همبستگی (R^2)	رابطه رگرسیونی
R	۰/۵۲	$Y = 8.943605x + 0.01$
K	۰/۳۳	$Y = 2.851429x - 0.02$
LS	۰/۹۱	$Y = 4.591086x + 0.01$
C	۰/۳۵	$Y = 2.411682x - 0.01$
P	۰/۳۱	$Y = 5.795196x - 0.01$

دلیل استفاده از همبستگی بین این فاکتورها این است که این عوامل با یکدیگر در ارتباط هستند و تاثیرات متقابلی با یکدیگر دارند. به عبارتی دیگر تاثیر 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.

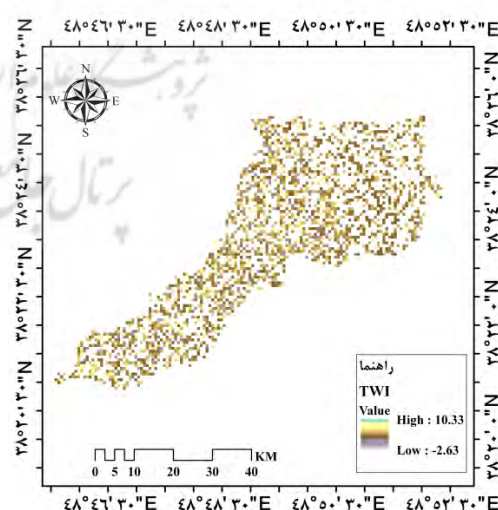
تحلیل عوامل محیطی

شاخص توان آبراهه فرایندی است که خطوط جریان مشابه را مانند شاخص رطوبت توپوگرافی پیش‌بینی می‌کند. با این حال مقادیر شبکه نشان‌دهنده شتاب جریان است که با افزایش سرعت شیب آب به سرعت در حال افزایش است. مقادیر توان آبراهه در حوضه آبریز مورد مطالعه در محدوده ۲/۳۲- تا ۹/۶۳ متغیر می‌باشد (شکل ۸). به عبارتی دیگر شاخص توان آبراهه 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. مقادیر بالای شاخص توان آبراهه بیش‌تر در قسمت‌هایی از شمال و مرکز حوضه هم‌چنین به صورت پراکنده در کل حوضه نیز مشاهده می‌شود. شاخص رطوبت توپوگرافی نیز 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 این شاخص در محدوده بین ۲/۶۳- تا ۱۰/۳۳ می‌باشد. مقدار بالای شاخص بیش‌تر به صورت پراکنده در قسمت‌های شمال حوضه (سطح نسبتاً شیب‌دار) و میانی حوضه یافت می‌شوند، درحالی‌که مقادیر کم در قسمت جنوبی حوضه (مناطق هموار و صاف)، معمول است. از این‌رو مناطقی که دارای شاخص رطوبت توپوگرافی بالا هستند دارای

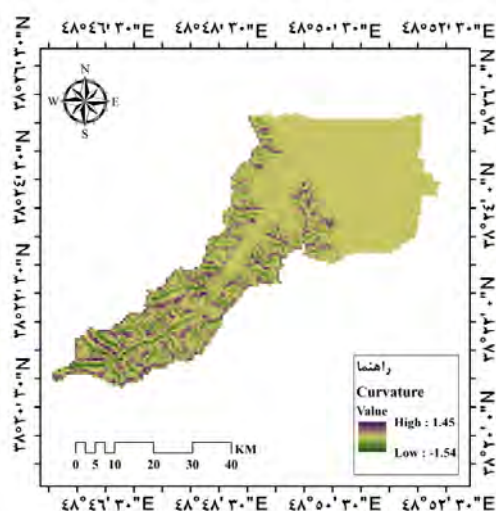
اهمیت هستند زیرا خطر فرسایش روان بیش‌تری را نسبت به مناطقی که دارای مقادیر پایین شاخص رطوبت توپوگرافی دارند دارا می‌باشد و بالعکس. شاخص انحناء دامنه نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به عبارتی دیگر محدب و مقعر بودن دامنه را نشان می‌دهد. از شاخص انحناء دامنه برای اندازه‌گیری میزان ناهمواری سطح زمین می‌توان استفاده نمود. از این‌رو شاخص انحناء دامنه برای حوضه آبخیز ویرمون در محیط سیستم اطلاعات مکانی تهیه شد که مقدار این شاخص در دامنه بین $1/54$ - الی $1/45$ متغیر می‌باشد شکل (۱۰). شاخص انحناء سطح نیز نشان‌دهنده واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحناء پلان واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده خط الراس‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء سطح برحسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد. شاخص انحناء سطح در دامنه بین $1/19$ - تا $1/10$ متغیر می‌باشد شکل (۱۱). شاخص انحناء مقطع هم بیانگر اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است. مقدار منفی این انحنا معرف سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد. از این‌رو شاخص انحناء مقطع حوضه مورد مطالعه بین $1/10$ - تا $1/12$ متغیر می‌باشد شکل (۱۲). با استفاده از شاخص تفاضل پوشش گیاهی عادی‌شده نیز به‌عنوان عاملی برای برآورد فرسایش خاک که بیش‌تر مربوط به مدیریت زمین بر کاهش خاک است استفاده می‌شود. در این مطالعه شاخص تفاضل پوشش گیاهی عادی‌شده به‌عنوان اندازه‌گیری میزان تراکم پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. تصویر این شاخص برای سال ۲۰۲۲ از داده‌های ماهواره لندست ۸ OLI به‌دست آمد. از این‌رو مقادیر این شاخص در حوضه آبخیز ویرمونی در دامنه بین $0/03$ - تا $0/58$ به‌دست آمد (شکل ۱۳).



شکل ۸: نقشه توان آبراهه (SPI) حوضه آبخیز ویرمونی

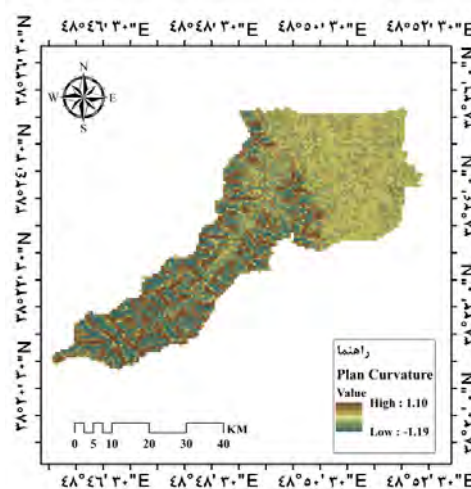


شکل ۹: نقشه رطوبت توپوگرافی (TWI) حوضه آبخیز ویرمونی



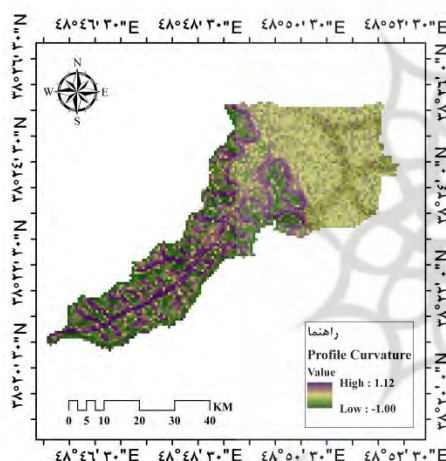
شکل ۱۰: نقشه انحناء دامنه (Curvature) حوضه

آبخیز ویرمونی



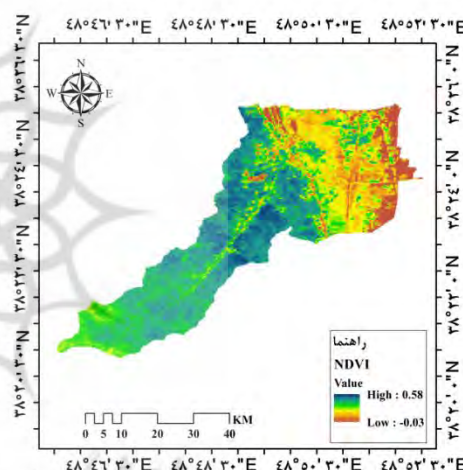
شکل ۱۱: نقشه انحناء سطح (Plan Curvature)

حوضه آبخیز ویرمونی



شکل ۱۲: نقشه انحناء مقع (Profile Curvature)

حوضه آبخیز ویرمونی



شکل ۱۳: نقشه تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده

(NDVI) حوضه آبخیز ویرمونی

با توجه به نتایج حاصل از شاخص‌ها که در جدول (۴) ارائه شده است می‌توان نتیجه گرفت که عامل تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده با ضریب تعیین 0.72 و شاخص توان آبراهه با مقدار 0.11 نسبت به سایر عوامل محیطی مورد مطالعه به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین هم‌بستگی را دارا می‌باشند. نتایج حاصل از هم‌بستگی میان فرسایش و شاخص‌های مورد مطالعه در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: هم‌بستگی میان فرسایش سالانه خاک با شاخص‌های محیطی در حوضه آبخیز ویرمونی

شاخص	ضریب هم‌بستگی (R^2)	رابطه رگرسیونی
TWI	۰/۱۶	$y = -0.3736x + 2.7268$
SPI	۰/۱۱	$y = -0.7699x + 4.6086$
NDVI	۰/۶۲	$y = 8.4982x - 3.1132$
Curvatore	۰/۲۴	$y = -64.182x + 2.4568$
Profil Curvator	۰/۱۹	$y = 89.938x + 2.3994$
Plan Curvator	۰/۲۹	$y = 96.806x + 2.2896$

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 محیطی در حوضه آبخیز ویرمونی 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 ۸۱/۱ تن در هکتار در سال متغیر است. که بیش‌ترین مقدار آن در قسمت شمالی حوضه و مقادیر کم‌تری به‌صورت پراکنده در قسمت‌های میانی حوضه قابل مشاهده است. 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 ۰/۹۱ بیش‌ترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک در مدل RUSLE دارد. در گام بعد نیز به تهیه و پهنه‌بندی نقشه شاخص‌های محیطی شامل توان آبراهه، رطوبت توپوگرافی، انحناء دامنه، انحناء سطح، انحناء مقطع و شاخص پوشش گیاهی عادی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی 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 ویرمونی پرداخته شد. نتایج بررسی نشان داد که شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده با مقدار ۰/۶۲ درصد نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه از ضریب هم‌بستگی بالایی برخوردار است. هم‌چنین کم‌ترین مقدار مربوط به شاخص توان آبراهه با مقدار ۰/۱۱ می‌باشد. براساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش انجام اقداماتی حفاظتی از قبیل جلوگیری از چرای بی‌رویه

و بوته‌کنی 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 آبخیز 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

- ابراهیم‌زاده، س.، ارگانی، م.، میردار هریجانی، ف. ۱۴۰۳. مدلسازی نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب با مدل RUSLE/SDR در حوضه آبریز دیزگران، مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳(۳۹): ۲۴-۱.
- احمدی، ح. ۱۳۸۸. ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)، چاپ ۶، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۰۷.
- اسفندیاری‌درآباد، ف.، مصطفی‌زاده، ر.، پاسبان، ا. ح.، نظافت تکه، ب. ۱۴۰۱. تلفیق شاخص‌های زمینی و پوشش گیاهی برای برآورد و شناسایی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز عموقین اردبیل، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۹(۱): ۷۷-۹۶.
- بابلی موخر، ح.، تقیان، ع.، شیرانی، ک. ۱۳۹۷. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش تلفیقی فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک با به‌کارگیری شاخص‌های ژئومورفیک، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷(۳): ۹۱-۱۱۶.
- پاسبان، ا. ح.، عابدینی، م.، فروتن، م. ۱۴۰۱. ارزیابی و تحلیل میزان تاثیر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از مدل تجربی RUSLE (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بالیخلوچای، استان اردبیل)، جغرافیا و روابط انسانی، ۵(۳): ۲۳۸-۲۵۸.
- ذاکری‌نژاد، ر.، فلاح، س. 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.
- صادقی، س. ح. ر.، کله هوئی، م.، نوری، ع.، نادری مرنگلو، ن.، هواسی، م.، پای فشرده، آ.، خیرپرست، م.، مصطفایی یونجالی، س.، پیروزی، ز.، حمزه بی بالانی، م. ۱۴۰۲. تغییرات مکانی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز بریموند استان کرمانشاه، آب و خاک، ۳۷(۳): ۴۴۳-۴۵۶.
- طاهری بابادی، ز.، متشفع، ب.، روشن، س. ح. ۱۴۰۱. تاثیر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از GIS و سنجش از دور بر مبنای مدل RUSLE (مطالعه موردی: شهرستان بهبهان)، خشک بوم، ۱۲(۱): ۷۷-۹۲.
- عابدینی، م.، بابایی، ط.، پاسبان، ا. ح. ۱۴۰۲. پهنه بندی مخاطرات زیست محیطی حوضه آبریز

- ویرمونی استان گیلان، مطالعات علوم محیط زیست، ۸(۴): ۷۳۴۴-۷۳۵۷.
- عابدینی، م.، جوادی علی بابالو، س.، مصطفی زاده، ر.، پاسبان، ا. ح. ۱۴۰۱. ارتباط شاخص های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوضه آبریز کوزه توپراقی، هیدروژئومورفولوژی، ۳۲، ۱۲۸-۱۰۵.
 - عابدینی، م.، فتحی جوکندان، ر.، پاسبان، ا. ح. ۱۴۰۳. برآورد فرسایش و رسوب از طریق ارزیابی متغیرهای تاثیرگذار در حوضه آبریز کرگانرود با استفاده از روش EPM، جغرافیا و روابط انسانی، [10.22034/GAHR.2023.414683.1934](https://doi.org/10.22034/GAHR.2023.414683.1934)
 - فتاح، پ.، حسینی، خ.، هاشمی، س. ع. ۱۴۰۲. بررسی اثرات الگوی رگبار و ویژگی های منطقه بر رسوبدهی حوزه آبخیز، مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۵(۲): ۲۶۴-۲۸۰.
 - کرمی، ف.، مختاری، د.، احمدی، ف. ۱۴۰۲. نقش لندفرم ها و لیتولوژی در میزان فرسایش خاک حوضه آبریز زنوزچای، هیدروژئومورفولوژی، ۱۰(۳۷): ۱-۲۴.
 - کلارستاقی، ع.، احمدی، ح.، جعفری، م.، قدوسی، ج. ۱۳۸۷. پیش بینی تغییرات احتمالی کاربری جنگل به دیم کاری با استفاده از مدل سازی احتمالاتی در حوضه آبخیز فریم صحرا استان مازندران، پژوهش و سازندگی، ۲۱(۳): ۵۲-۶۳.
 - ملکی، ص.، خرمالی، ف.، کریمی، ع. ۱۳۹۳. معرفی الگوریتم های مختلف جریان، برای تهیه نقشه شاخص خیزی و کربن آلی خاک در بخشی از اراضی لسی، منطقه توشن استان گلستان، پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۱(۱): ۱۴۱-۱۶۵.
 - Ammar, A.K., Alaa, M., Fadhil, K., Alzahrani, H., & Hamad, S. (2023). Predicting Soil Erosion Rate at Transboundary Sub-Watersheds in Ali Al-Gharbi, Southern Iraq, Using RUSLE-Based GIS Model. *Sustainability*. 15, 1776.
 - Aslam, B., Maqsoom, A., Alaloul, W., Musarat, M. A., Jabbar, T., & Zafar, A. (2010). Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: Case of district Chitral, Pakistan. *Ain Shams Engineering Journal*. 12(2), 1637-1649.
 - Brini, I., Dimitrios, D., & Kalaitzidis, Ch. (2021). Linking Soil Erosion Modeling to Landscape Patterns and Geomorphometry: An Application in Crete, Greece. *Applied Sciences*. 11(5684), 1-38.
 - Chi, W., Wang, Y., Lou, Y., Na, Y., & Luo, Q. (2022). Effect of Land Use/Cover Change on Soil Wind Erosion in the Yellow River Basin since the 1990s. *Sustainability*. 14(19), 1-16.
 - 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.
 - Elsayed, A., Mostafa, A., Farag, O., Ahmad, B., Dmitry, E., & Mohamad, S. (2023).

- Integration of RUSLE Model, Remote Sensing and GIS Techniques for Assessing Soil Erosion Hazards in Arid Zones. *Agriculture*. 13(35), 1-19.
- Hao, H.X., Wang, J.g., Guo, Z.L., & Hua, l. (2019). Water erosion processes and dynamic change of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow. *Catena*. 173, 494-504.
 - Imajjane, L., Belfoul, M., Elkadiri, R., & Stokes, M. (2020). Soil erosion assessment in a semi arid environment: a case study from the Argana Corridor, Morocco. *Environmental Earth Sciences*. 79, 409.
 - 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.
 - 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. (2010). Integrating Terrain and Vegetation Indices for Identifying Potential soil Erosion Risk Area. *Geo-Spatial Information Science*. 13(13), 201-209.
 - Whittington, D. (2022). Improving the Performance of Contingent Valuation Studies in Developing Countries. *Environ Resour Econ*. 22, 323–367.
 - 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی