



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و هفتم، بهار ۱۴۰۰

صص ۶۳-۴۱

doi: <https://dx.doi.org/10.22067/geoh.2021.67238.0>

مقاله پژوهشی

ارزیابی خطر فرسایش خاک در کاربری‌های اراضی با استفاده از معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیکان)

مهدی مزبانی^۱ - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
محمد حسین رضایی مقدم - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
اسداله حجازی - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۳ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱/۴

چکیده

نوع و شدت فرسایش خاک در یک منطقه، تابع شرایط اقلیمی، پستی و بلندی زمین، خاک و کاربری اراضی است که در این میان اهمیت کاربری اراضی به دلیل نقش مؤثر انسان بر آن نسبت به دیگر عوامل زیادتر است. در این پژوهش با استفاده از معادله جهانی فرسایش خاک و با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، میزان فرسایش خاک در کاربری‌های مختلف حوضه آبریز سیکان برآورد گردید. ابتدا هر یک از لایه‌های R (عامل فرساینده بارندگی)، K (عامل فرسایش پذیری)، LS (عامل توپوگرافی) و P (عامل حفاظت خاک) و تحلیل‌های مرتبط با آن در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شدند. از تصاویر سنجنده ماهواره Sentinel 2 نیز جهت تهیه عامل پوشش گیاهی (C) و کاربری‌های اراضی حوضه در محیط ENVI 5.3 استفاده گردید. نتایج نشان داد میزان کل فرسایش در حوضه برابر با ۱۲۸۱۱۰۰۴ تن در سال و میانگین فرسایش برابر ۱۷/۶۲ تن در هکتار در سال است. در بین کاربری‌ها، مراتع متوسط با میانگین فرسایش ۲۷/۹۸ تن در هکتار در سال بیشترین و مناطق کشاورزی آبی و مسکونی به ترتیب با میانگین فرسایش ۰/۴۳ و ۰/۴۴ تن در هکتار در سال کمترین فرسایش را نشان دادند. در بین عوامل تأثیرگذار در هدر رفت خاک حوضه، عامل LS با همبستگی $r = 0.9$ بیشترین سهم به خود اختصاص داد. بر اساس طبقه‌بندی هدر رفت خاک، ۴۲ درصد از حوضه با مقادیر بالاتر از ۱۶ تن در هکتار در سال در وضعیت شدیدی از لحاظ هدر رفت خاک قرار دارند که اجرای عملیات‌های حفاظت خاک و آبخیزداری به‌منظور

جلوگیری از تخریب خاک و تقویت پوشش گیاهی به‌ویژه در بالادست حوضه بیش از پیش ضرورت و اهمیت می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: فرسایش خاک، مدل RUSLE، سنجنده Sentinel 2، حوضه آبریز سیکان، دره‌شهر.

۱- مقدمه

فرسایش آبی از مهم‌ترین انواع تخریب زمین در بیشتر نقاط ایران است که سبب از بین بردن خاک‌های حاصلخیز و زمین‌های کشاورزی می‌شود (میرکر و همکاران^۱، ۲۰۱۷). گزارش‌ها نشان می‌دهد حدود ۳۵ میلیون مترمربع از اراضی کشور ایران تحت تأثیر فرسایش آبی قرار دارد (ذاکرنژاد و میرکر، ۲۰۱۵). به‌طور متوسط، فرسایش خاک در ایران سه برابر بیش‌تر از سایر کشورهای آسیایی و ۲۰ برابر میانگین جهانی است. فرسایش خاک در ایران هزینه زیادی دارد و تقریباً ۵۶ تا ۱۱۲ میلیارد دلار در سال است و بسته به میزان فرسایش خاک در هر سال این مقدار تغییر می‌کند. عوامل زیادی در نوع و میزان فرسایش خاک در یک حوضه آبخیز مؤثرند (صادقی، ۱۳۹۴). یکی از این عوامل استفاده از اراضی است که به‌ویژه در دهه‌های اخیر با تغییرات گسترده‌ای که در نتیجه پیشرفت‌های فن‌آوری در طبیعت انجام شده نقش زیادی در افزایش مقدار فرسایش داشته است (گارسیا رویز و همکاران^۲، ۱۹۹۶). واکنش رواناب و رسوب خروجی حوضه آبخیز به ویژگی‌های فیزیوگرافی، الگوی پراکنش کاربری اراضی، نوع خاک، شدت و مدت وقوع بارندگی و دخالت‌های انسانی بستگی دارد که در میان آن‌ها نقش کاربری اراضی دارای اهمیت بیش‌تری است (طالبی خیای، ۱۳۹۶). از طرفی نوع کاربری اراضی نیز به‌صورت مستقیم با فعالیت‌های انسانی از طریق تأمین رسوبات لازم برای حمل رسوب و ترسیب در ارتباط است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶). نرخ فرسایش خاک شاخصی جامع برای ارزیابی درجه توسعه‌یافتگی و پایداری برنامه‌های مدیریتی سرزمینی کشورها است و از طرفی داشتن اطلاعات مکانی در ارتباط با پدیده‌ها این امکان را فراهم می‌کند که همبستگی بین پدیده‌ها و الگوی فضایی بین آن‌ها شناسایی شود در نتیجه شناخت الگوی فضایی فرسایش خاک، یک کلید برای درک دینامیک و شناسایی دلایل زیستی و غیر زیستی فرسایش خاک هست و تعیین الگوی پراکنش شدت فرسایش و رسوب می‌تواند به ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش و مقابله با فرسایش و رسوب در حوزه آبخیز کمک کند (جوان‌دوست و همکاران، ۱۳۹۳)؛ بنابراین، تعیین عوامل مؤثر بر فرسایش و پیش‌بینی مقدار فرسایش خاک و رسوب در حوزه‌های آبخیز به‌منظور اجرای برنامه‌های حفاظت از خاک و تعیین روش‌های مبارزه با فرسایش و کاهش تولید رسوب ضروری و نخستین گام در ارائه راهکارهای حفاظت از خاک است (حاجی و همکاران، ۱۳۹۴؛ جوزی و مرادی مجد، ۱۳۹۴).

1 Maerker et al

2 Garcia-Ruiz et al

روش‌های مختلفی جهت برآورد فرسایش و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار وجود دارد که استفاده از هر یک از این روش‌ها بستگی به دقت روش و همچنین میزان اهمیت و نیز مدت‌زمان اجرای طرح دارد. تلاش‌های قابل توجهی در مورد توسعه مدل‌های فرسایش خاک صورت گرفته است (نیرینگ و همکاران^۱، ۲۰۰۵). یکی از مدل‌های خیلی کاربردی برای ارزیابی فرسایش ورقه‌ای و شیاری^۲، معادله جهانی فرسایش خاک^۳ (USLE) است که به وسیله ویشمایر و اسمیت^۴ (۱۹۷۸) توسعه داده شد. مدل USLE و نسخه‌های آن نمونه‌هایی از مدل‌های تجربی و مفهومی هستند. به‌طور کلی USLE اساساً برای برآورد فرسایش خاک در اراضی کشاورزی با شیب ملایم توسعه داده شد. با وجود نسخه‌های اصلاح شده و تجدیدنظر شده، USLE هنوز در مطالعات زیادی که در خصوص برآورد تلفات خاک انجام می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸؛ ریموتل و همکاران^۵، ۲۰۰۱). رابطه جهانی فرسایش خاک اصلاح شده^۶ که روش مورد استفاده در پژوهش حاضر است در دسترس‌ترین مدل عملی پیش-بینی فرسایش است که به سادگی در مقیاس محلی و منطقه‌ای اجرا می‌شود. مدل RUSLE می‌تواند پتانسیل فرسایش خاک را به صورت سلول به سلول پیش‌بینی کند که هنگام تلاش برای شناسایی الگوی مکانی تلفات خاک فعلی در یک منطقه بزرگ بسیار مفید است (شیندی و مان‌جاشری^۷، ۲۰۱۰). با استفاده از مدل RUSLE، فرسایش سطحی و شیاری ناشی از باران و روان‌آب، در سطوح تحت روان‌آب سطحی پیش‌بینی می‌شود. سطوح تحت روان‌آب، محدوده‌ای هستند که جریان‌های سطحی از ابتدای آن سرچشمه می‌گیرند و در انتهای آن تمرکز یافته یا به محدوده رسوب‌گذاری وارد می‌شوند. هدررفت خاک، متوسط سرعت فرسایش در این محدوده است (جونز و همکاران^۸، ۲۰۰۸).

پژوهش و همکاران (۱۳۹۰) اثر کاربری اراضی مختلف در فرسایش و تولید رسوب با استفاده از GIS را در حوضه سد زاینده‌رود علیا مطالعه نمودند. نتایج حاصل از پژوهش ایشان نشان داد که بیش‌ترین مقدار فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه مورد مطالعه، در کاربری‌های مرتع تراکم و بوته‌زارها صورت گرفته است. این افزایش تولید رسوب در این دو نوع کاربری، ناشی از تأثیر متقابل دو عامل، شیب و چرای بی‌رویه دام در اوایل فصل بهار است. بابایی و همکاران (۱۳۹۵) مقدار میانگین سالانه فرسایش حوضه آبخیز کن سولقان را ۲۰/۲۲ تن در هکتار در سال برآورد کردند و نشان دادند عامل LS با ضریب همبستگی ۰/۶۸ درصد بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالیانه خاک داشته است. فیضی‌زاده (۱۳۹۶) تغییرات کاربری اراضی و نقش آن را در حوضه علویان بررسی کرد که نشان

1 Nearing et al

2 Surface and Rill Erosion

3 Universal Soil Loss Equation (USLE)

4 Wischmeier & Smith

5 Remortel et al

6 Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

7 Shinde & Manjushree

8 Jones et al

داد تبدیل اراضی مرتعی پرتراکم به مراتع کم تراکم و زراعت دیم، مهم ترین عامل در فرسایش منطقه است. محمدی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل **RUSLE** میانگین فرسایش در مقیاس کشور ایران را ۲۴ تن در هکتار در سال برآورد نمود و نقش عامل توپوگرافی را بیش از سایر عوامل مشخص نمودند. مختاری و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل **RUSLE** میزان فرسایش خاک در سطح حوضه آبریز نورآباد ممسنی از ۸ تا ۷۵ تن در هکتار در سال برآورد کردند و نشان دادند که عامل **LS** نقش بیشتری در فرسایش نسبت به سایر عوامل دارد. سیبکاور و هوفیرکا^۱ (۲۰۰۷) با مطالعه تأثیر تغییر کاربری در اسلواکی (۱۹۹۰-۲۰۰۰) به این نتیجه رسید که تغییرات پوشش زمین و کشت نوبتی تأثیرات آشکاری بر روی الگوی فرسایش خاک در قسمت دره‌ها و نواحی کوهستانی داشته است. این تغییرات عمدتاً به دلیل تغییر مداوم مالکیت اراضی، تغییر نوع محصولات، جنگل زدایی و جنگل کاری است. شارما و کملاش^۲ (۲۰۱۰) با مطالعه اثر تغییر کاربری اراضی بر روی فرسایش با استفاده از معادله جهانی فرسایش خاک در حوضه آبریز مایتون در هند در طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۴ به این نتیجه رسیدند که تغییر کاربری‌ها باعث فرسایش قابل توجهی در حوضه شده است که در سال ۱۹۸۹ مقدار فرسایش از ۱۲/۱۱ تن در هکتار در سال به ۱۳/۲۱ تن در هکتار در سال ۲۰۰۴ رسیده است. انواگو و همکاران^۳ (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای تأثیر تغییر پوشش زمین بر مقدار فرسایش خاک در نیجریه را مطالعه کردند. آن‌ها در این پژوهش تصویر پوشش زمین را در چهار دوره بررسی کردند و نتایج نشان داد که در دامنه‌های شیبدار فرسایش خاک شدید و در مناطقی که پوشش گیاهی متراکم دارند فرسایش ناچیزی رخ می‌دهد. سانتوس و همکاران^۴ (۲۰۱۷) به بررسی تغییرات کاربری اراضی و نقش آن بر فرسایش خاک پرداختند. آن‌ها برای این امر از تصاویر ماهواره‌ای لندست طی سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ استفاده کردند. نتایج نشان داد که سطح زمین‌های کشاورزی و مراتع در این مناطق کاهش یافته و میزان فرسایش ۱۰ برابر افزایش یافته است.

در سال‌های اخیر عملیات اجرایی احداث سد خاکی سیکان به منظور تأمین آب شرب شهرهای مجاور و همچنین مشروب ساختن اراضی کشاورزی پایین دست در دستور کار وزارت نیرو قرار گرفته؛ لذا شناسایی سطوح حساس به فرسایش در این حوضه سیکان می‌تواند در مدیریت و کیفیت منابع آب، کاهش رسوب ورودی به سدها و طول عمر آن‌ها نقش شایانی داشته باشد؛ بنابراین ارزیابی و برآورد خاک با استفاده از مدل‌های بهینه برآورد فرسایش و رسوب، یکی از راهکارهایی است که از طریق آن می‌توان فرسایش خاک را تا حدود زیادی کنترل نمود و مقدار آن را با اقدامات مدیریتی و حفاظتی حوضه‌ای کاهش داد. با توجه به مسئله فوق هدف اصلی این پژوهش برآورد فرسایش خاک سالانه در حوضه آبریز سیکان با استفاده از مدل **RUSLE**، ارزیابی کاربری‌های مختلف اراضی از نظر پتانسیل هدر رفت خاک و اولویت‌بندی آن‌ها جهت انجام عملیات‌های حفاظتی و پروژه‌های آبخیزداری است.

1 Cebecauer & Hofierka

2 Sharma & Kamlesh

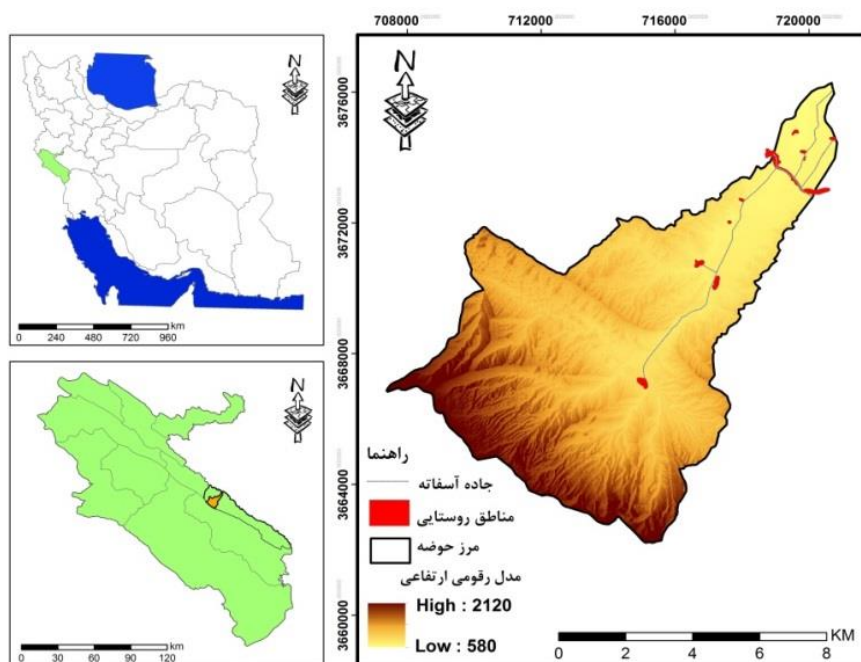
3 Nwaogu et al

4 Santos

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه سیکان با مساحت $74/5$ کیلومتر مربع و میانگین بارش سالانه $516/5$ میلی‌متر، در محدوده طول جغرافیایی $47^{\circ} 15'$ تا $47^{\circ} 22'$ و در عرض جغرافیایی $33^{\circ} 5'$ تا $33^{\circ} 10'$ در شهرستان دره‌شهر استان ایلام و در حد فاصل رشته‌کوه کبیرکوه در جنوب و رودخانه سیمره در شمال واقع شده است. این حوضه شامل رودخانه سیکان و اراضی شمال شهرستان دره‌شهر از حاشیه دشت تا محور رودخانه سیمره است. حوضه سیکان بخش کوچکی است از حوضه رودخانه سیمره بوده که خود از زیرحوضه‌های رودخانه کرخه می‌باشد. حداکثر ارتفاع حوضه رودخانه سیکان در منتهی‌الیه جنوب غربی قله رشته‌کوه کبیرکوه با ارتفاع 2190 متر از سطح دریاهای آزاد واقع شده است و پست‌ترین نقطه در شمال شرقی و حاشیه رودخانه سیمره با 562 متر قرار دارد. در این حوضه چند نقطه روستایی وجود دارد، که همگی در کنار رودخانه سیکان استقرار یافته‌اند. جاده ارتباطی نیز به موازات رودخانه نقاط روستایی را به هم متصل نموده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲-۲- مواد و روش

۲-۲-۱- داده‌ها و ابزارهای پژوهش

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده در پژوهش شامل: لایه‌های رقمی ۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، مدل رقمی ارتفاعی با تفکیک ۱۰^۱ متری، آمار بارندگی روزانه، ماهانه، سالانه از سازمان هواشناسی کشور، تصویر ماهواره‌ای سنجنده سنتینل ۲^۲ (۱۸ آوریل ۲۰۱۸) منطقه مورد مطالعه از سایت www.usgs.gov و گزارش و داده‌های آزمایشگاهی خاک حوضه مورد مطالعه از معاونت آبخیزداری سازمان جنگل‌ها مراتع و آبخیزداری کشور می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.3 جهت ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط به آن؛ ENVI 5.3 جهت تهیه لایه‌های پوشش گیاهی (NDVI) و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه و از نرم‌افزارهای آماری همچون Exell و Spss جهت محاسبات آماری و روابط رگرسیونی معادلات بهره‌گیری شده است. از نرم‌افزارها و ابزارهای جانبی دیگری همچون GPS، Google Earth نیز جهت برداشت نقاط کنترلی و تهیه برخی از اطلاعات مورد نیاز استفاده گردیده است.

۲-۲-۲- روش تحقیق

۲-۲-۲-۱- معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE)

این فرمول پس از ۳۰ سال مطالعه در مورد فرسایش آبی در ۴۶ ایستگاه تحقیقاتی در ۲۶ ایالات مختلف آمریکا با شرایط مختلف جغرافیایی و آب و هوایی، با در نظر گرفتن نتایج بررسی‌های دیگران به‌دست آمده است. این معادله به فرمول جهانی فرسایش خاک معروف است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \text{رابطه (۱)}$$

A: مقدار خاک فرسایش یافته به وسیله فرسایش ورقه‌ای و شیب‌ری بر حسب جرم در واحد سطح در واحد زمان، R: عامل فرسایش بارندگی، K: عامل فرسایش‌پذیری خاک است و حساسیت ذاتی خاک را مشخص می‌کند، L: عامل طول شیب، S: عامل درجه شیب زمین، C: عامل پوشش گیاهی و P: عامل حفاظت خاک می‌باشد. A: بر حسب تن در هکتار در سال، R: بر حسب مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال، K: بر حسب تن ساعت بر مگاژول بر میلی‌متر، و P, C, S, L نیز بدون واحد هستند (رنارد و همکاران، ۱۹۹۷).

1 Digital Elevation Model (DEM)

2 Sentinel-2

3 Renard et al

– عامل فرساینده‌گی بارندگی^۱ (R)

مفهوم فرساینده‌گی باران توسط ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) به منظور لحاظ نمودن تأثیر اقلیم بر فرسایش خاک ارائه گردید. پتانسیل باران در ایجاد فرسایش، فرساینده‌گی باران خوانده می‌شود که تابعی از خصوصیات فیزیکی بارندگی است و با انرژی مستقیم باران، انرژی جنبشی بارندگی و حداکثر شدت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در ارتباط است. از آنجایی که نمودار بارندگی و داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، R را می‌توان با استفاده از شاخص اصلاح شده فونیز تخمین زد (لی و همکاران^۲، ۲۰۱۰)؛ بنابراین برای محاسبه فاکتور R پس از تعیین ایستگاه‌های شاخص در منطقه مورد مطالعه، بارندگی ماهانه و سالیانه ۱۷ ساله در ۱۰ ایستگاه مجاور حوضه استخراج گردید. با توجه به کامل بودن داده‌ها در دوره آماری مدنظر بازسازی داده‌ها صورت نگرفت. در مرحله بعد با استفاده از معادله زیر، شاخص فونیز و فاکتور R برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه گردید. شاخص فونیز بر اساس رابطه شماره دو محاسبه می‌گردد: (رنارد و فریدموند، ۱۹۹۴).

$$P = \sum_{i=12}^{12} \frac{p_i^2}{\bar{p}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه p_i : متوسط بارندگی (میلی‌متر) در ماه i و \bar{p} : متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) است. در این مطالعه با استفاده از رابطه (۲)، شاخص فونیز برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه گردید و مقدار R برای هر یک از ایستگاه‌های شاخص بر اساس روابط زیر محاسبه گردید.

$$\text{R-Factor} = (0.07397 * F^{1.847}) / 17.2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$F < 55 \text{mm}$$

$$\text{R-Factor} = (95.77 - 6.081 * F + 0.4770 * F^2) / 17.2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$F \geq 55 \text{mm}$$

با توجه به دامنه تغییرات ارتفاع حوضه مورد مطالعه (۵۸۰ الی ۲۱۲۰ متر)، بین ارتفاع ایستگاه‌ها و مقدار R محاسبه شده، یک رابطه رگرسیونی برقرار گردید. در نهایت در محیط ArcGIS مقدار R برای قسمت‌های مختلف حوضه بر اساس مدل رقومی ارتفاعی تعمیم و خروجی آن به صورت رستر تهیه گردید.

– عامل فرسایش پذیری خاک^۳ (K)

فرساینده‌گی خاک، یعنی مقاومت خاک در برابر جدا شدن و مقاومت ذرات در برابر انتقال (شی^۴، ۲۰۰۲). اگر چه مقاومت خاک نسبت به فرسایش تا اندازه‌ای به وضعیت پستی و بلندی، درجه شیب، و اثر تخریبی انسان‌ها بستگی دارد؛ اما فرسایش پذیری به عواملی از قبیل بافت خاک، پایداری دانه خاکدانه‌ها، مقاومت برشی، ظرفیت نفوذ و مقدار

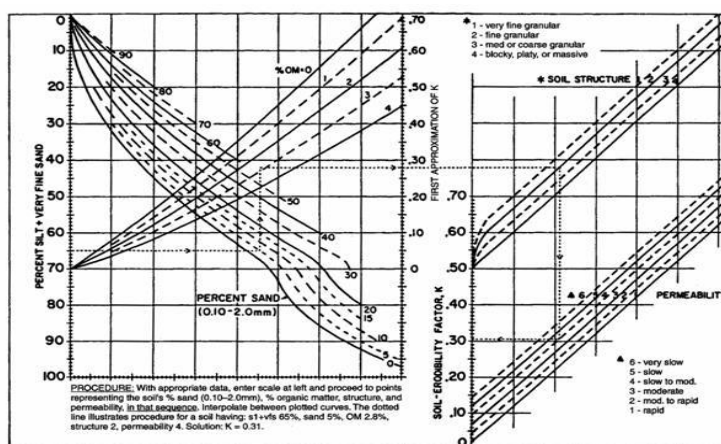
1 Rain erosivity factor

2 Li et al

3 Soil erodibility factor

4 Shi

مواد آلی و شیمیایی نیز بستگی دارد. بررسی‌ها نشان داده است که هرچه مقدار سیلت خاک بیشتر باشد فرسایش-پذیری خاک افزایش می‌یابد و هر چه ذرات خاک درشت‌تر باشند مقاومت بیشتری نسبت به انتقال نشان می‌دهند. محاسبه ضریب K نیاز به پنج پارامتر خاک شامل نفوذپذیری، بافت خاک، درصد شن، درصد سیلت و درصد مواد آلی می‌باشد. در این پژوهش مقدار K بر اساس نتایج حاصله از مطالعات خاکشناسی و اطلاعات آزمایشگاهی ۹ نمونه پروفیل خاک در اجزاء واحدهای اراضی حوضه سیمره و با استفاده از نمودار Soil Erodibility Nomograph که توسط ویشمایر در سال ۱۹۸۷ ارائه گردیده است، استخراج گردید (شکل ۲). برای تبدیل به واحد متریک، مقادیر K در $0/۱۳۱۷$ ضرب شد که در نتیجه مقدار فرسایش‌پذیری خاک برحسب $t h MJ^{-1} mm^{-1}$ به دست آمد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷).



شکل ۲- نمودار تعیین حساسیت فرسایش پذیری خاک

- عامل شیب و طول شیب^۱ (LS)

طول شیب به فاصله میان نقطه شروع رواناب سطحی در حوضه آبریز تا نقطه‌ای که شیب آنقدر کم می‌شود که مواد محموله آن ته نشست می‌کند و یا نقطه‌ای که جریانات سطحی به یک نهر طبیعی یا مصنوعی وارد می‌شود گفته می‌شود (خوزه و همکاران^۲، ۲۰۰۰). با بلندتر شدن شیب بنابر دلایل زیاد فرسایش افزایش پیدا می‌کند، پاشمان خاک به طرف پایین شیب زیاد شده، رواناب بیشتری جاری می‌گردد و این رواناب با سرعت بیشتری به سمت پایین می‌آید. همچنین عامل درصد شیب که تابعی از درجه شیب است، منعکس‌کننده اثر درجه شیب بر میزان فرسایش است. در معادله جهانی تجدید نظر شده خاک این دو عامل به عنوان تأثیر عامل توپوگرافی در فرسایش در نظر گرفته می‌-

1 Ttopographic factor

2 Jose et al

شود که افزایش میزان آن‌ها موجب تشدید فرسایش خاک می‌شود. است (گاناسری و رامش^۱، ۲۰۱۶). با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با اندازه سلول ۱۰ متری و روابط ۵ تا ۸ مقدار LS برای حوضه محاسبه می‌گردد (تنگ و همکاران^۲، ۲۰۱۶).

$$L = \left[(\text{Flow Accumulation}) * \frac{\text{Cell Size}}{22.1} \right]^m \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\beta = \frac{\sin \theta (\text{Slope} * 0.01745)}{[3 * (\sin \theta)^{0.8} + 0.56]} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03, & S < 9\% \\ 16.8 \sin \theta - 0.5, & S \geq 9\% \end{cases} \quad \text{رابطه (۸)}$$

θ زاویه شیب بر حسب درصد است. برای به دست آوردن عامل LS در محیط ArcMap از طریق مدل رقومی ارتفاعی (Dem) ۱۰ متری، دو لایه شیب و جریان تجمعی ایجاد گردید و با قرار دادن لایه‌های مذکور در روابط ۵ تا ۸ عامل LS به دست آمد.

- عامل پوشش گیاهی^۳ (C)

عامل C اثر گیاهان، پوشش خاک، هوموس خاک و فعالیت‌های موجودات خاک بر روی فرسایش را نشان می‌دهد. از این عامل برای انعکاس اثر کشت و مدیریت اراضی بر فرسایش استفاده می‌شود. این فاکتور بیانگر مقدار خاک از بین رفته از زمین زیر کشت، به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مداوم و عاری از پوشش و بقایای گیاهی می‌باشد. پرکاربردترین معیار رویش گیاه، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده^۴ است که با فناوری سنجش از دور به دست می‌آید (حبشی و همکاران، ۱۳۹۷). برای فاکتور پوشش گیاهی از شاخص NDVI استخراج شده از تصویر سنجنده ستینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۸ آوریل ۲۰۱۸ استفاده شده است. شاخص NDVI بر اساس رابطه شماره ۸ در محیط نرم‌افزار ENVI محاسبه گردید.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه RED مقدار بازتاب در محدوده باند قرمز و NIR مقدار بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک می‌باشد. دامنه تغییرات پوشش گیاهی بین +۱ و -۱ است که هر چه این عدد به نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده پوشش گیاهی بیشتری می‌باشد. +۱ نشان دهنده تراکم زیاد پوشش گیاهی و -۱ نشان دهنده تراکم کم می‌باشد. بین شاخص NDVI و ضریب C یک رابطه کامل معکوس وجود دارد (کارابارون^۵، ۲۰۱۰)؛ بدین معنی که با افزایش شاخص

1 Ganasri & Ramesh

2 Teng et al.

3 Vegetation factor

4 Normalized Difference Vegetation index (NDVI)

5 Karaburun

NDVI ضریب C کاهش می‌یابد. هر چه این ضریب کاهش پیدا کند بدین معنی است که در حوضه پوشش گیاهی آن بیشتر است و فرسایش کمتری در حوضه صورت می‌گیرد. مقادیر فاکتور C بین صفر و یک متغیر بوده و با استفاده از رابطه شماره (۱۰) محاسبه می‌گردد (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹).

$$C = ((1 - NDVI) / 2) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

عامل حفاظت خاک^۱ (P)

عامل حفاظت خاک عبارت است از نسبت مقدار خاک از بین رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت شده؛ به زمینی که لخت بوده و در جهت بالا و پایین تندترین شیب، شخم زده شود منظور از کارهای حفاظتی، بیشتر کشت در روی خطوط تراز، کشت نواری و تراس بندی، درختکاری، جلوگیری از قطع بی‌رویه درختان و جلوگیری از چرای بی‌رویه دام است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). اگر هیچ‌گونه عملیات حفاظتی انجام نگیرد P برابر با یک خواهد بود. در مناطقی که وسعت منطقه مطالعه زیاد باشد، عامل حفاظت خاک از طریق اثر خطوط هم‌تراز شیب بر مقدار فرسایش خاک بررسی می‌شود؛ زیرا مناطق هم‌تراز شیب از نظر مقدار عامل حفاظت خاک، ارزش یکسانی به خود اختصاص می‌دهند. برای به دست آوردن مقادیر عامل حفاظت خاک، از طریق خطوط هم‌تراز شیب، ویشمایر و اسمیت جدول (۱) را ارائه دادند (تنگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ دریوسکی و همکاران، ۲۰۱۴). در این مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با اندازه پیکسل ۱۰ متر، لایه شیب برای منطقه مورد مطالعه مطابق با جدول (۱) تهیه و طبقه‌بندی شد.

جدول ۱- عامل حفاظتی در شیب‌های مختلف (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸)

عامل P	شیب (درصد)
۰/۶	کمتر از ۳
۰/۵	۳-۶
۰/۵	۶-۹
۰/۶	۹-۱۲
۰/۷	۱۲-۱۵
۰/۸	۱۵-۲۰
۰/۹	۲۰-۲۵
۱	بیشتر از ۲۵

1 protection factor
2 Drzewiecki et al

برای تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه ابتدا تصویر ماهواره سستینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۸ آوریل ۲۰۱۸ دانلود گردید و سپس در محیط ENVI 5.3 با روش طبقه‌بندی نظارت شده، الگوریتم حداکثر احتمال به طبقه‌بندی کاربری‌های موجود در حوضه پرداخته شد. به منظور بالا بردن دقت کار، از نقاط برداشت‌شده در سطح حوضه به وسیله GPS، و همچنین تصاویر Google Earth سال ۲۰۱۸ جهت کنترل کاربری‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای و تطبیق نقاط میدانی با تصویر ماهواره‌ای استفاده گردید که در نهایت کاربری‌های اراضی در ۹ طبقه برای حوضه آبریز سیکان استخراج گردید. پس از آماده‌سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز بصورت رس‌تری، مقدار هدر رفت سالیانه خاک از طریق حاصل ضرب عامل‌های مدل RUSLE با توجه به رابطه (۱) با استفاده تابع Spatial Analyst و گزینه Raster Calculator در محیط ArcGIS بر حسب تن بر هکتار در سال محاسبه گردید. سپس در محیط Arcmap با استفاده از Extensions zonal statistic لایه فرسایش حوضه و نقشه کاربری اراضی روی هم قرار داده شده و مقادیر فرسایش در هر یک از کاربری‌ها مشخص گردید.

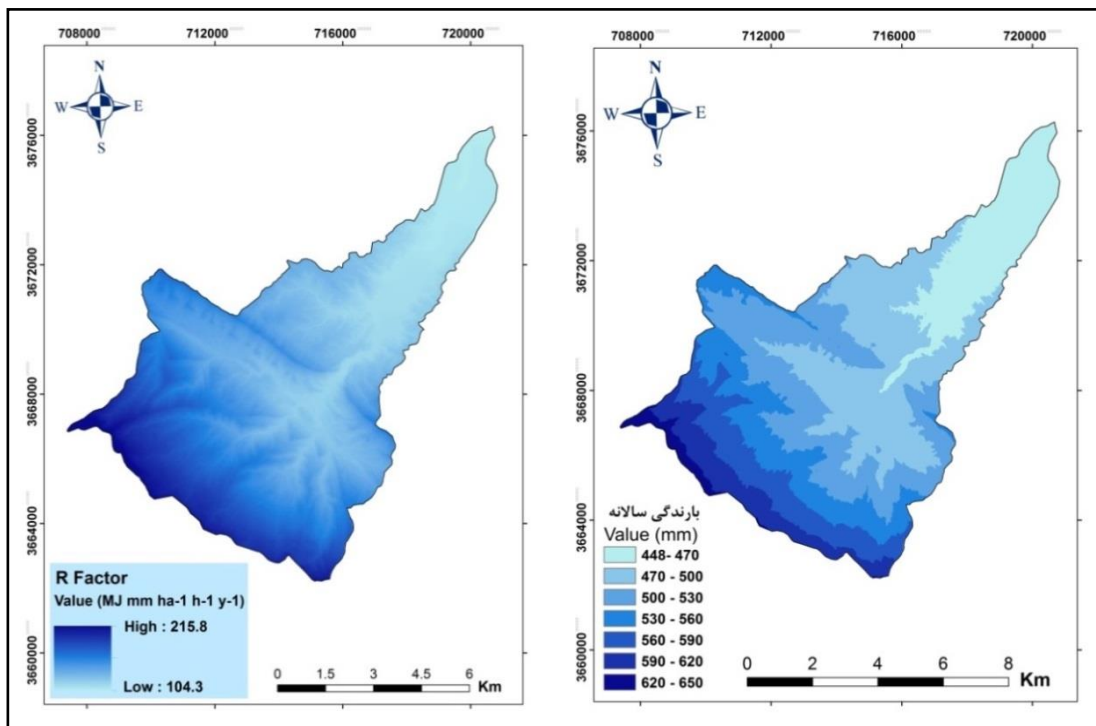
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقادیر فاکتورهای مدل RUSLE در حوضه آبریز سیکان

مقادیر شاخص فورنیه و فرساینده‌گی باران با استفاده از رابطه‌های (۲، ۳ و ۴) برای ۱۰ ایستگاه منطقه طی یک دوره آماری ۱۷ ساله محاسبه شد (جدول ۲). مقادیر عامل R از ۱۰۴/۳۲ تا ۲۱۵/۸۱ بر حسب $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$ متغیر و متوسط آن ۱۴۲/۰۸ می‌باشد. بالاترین ارزش عامل R در جنوب غربی و جنوب حوضه است که بیشترین بارندگی را دارد و کمترین مقادیر آن بر خروجی حوضه منطبق می‌باشد (شکل ۴). به طور کلی هر چه خروجی حوضه به سمت ارتفاعات بالا دست پیش می‌رویم مقادیر R بیشتر می‌شود ($r^2 = 0.73$). نتایج نشان می‌دهد که مناطق مرتفع کبیرکوه که دارای بیشترین مقادیر بارندگی هستند مقدار R بیشتری را به خود اختصاص داده است. بین بارش سالانه و مقادیر R نیز همبستگی ($r^2 = 0.74$) برقرار می‌باشد. بابایی همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی که در حوضه آبریز کن انجام دادند، نشان دادند که مقادیر زیاد فرساینده‌گی بیشتر در مناطقی دیده می‌شود که میزان بارش در منطقه زیاد باشد. البته این امر همیشه صادق نبوده و محققان دیگری در سایر مناطق با مقادیر بارندگی مشابه مقادیر کمتری را به دست آوردند. (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹) در حوضه آبریز سد ایلام نیز نشان دادند که افزایش و کاهش فاکتور R رابطه نزدیکی با افزایش و کاهش ارتفاع و میزان بارندگی منطقه دارد که با مقادیر R پژوهش حاضر مطابقت دارد. مقادیر شاخص فورنیه و فرساینده‌گی هر یک از ایستگاه‌ها در جدول (۲) ارائه گردیده است.

جدول ۲- مقادیر شاخص های R و F در ایستگاه های مختلف مجاور حوضه سیکان

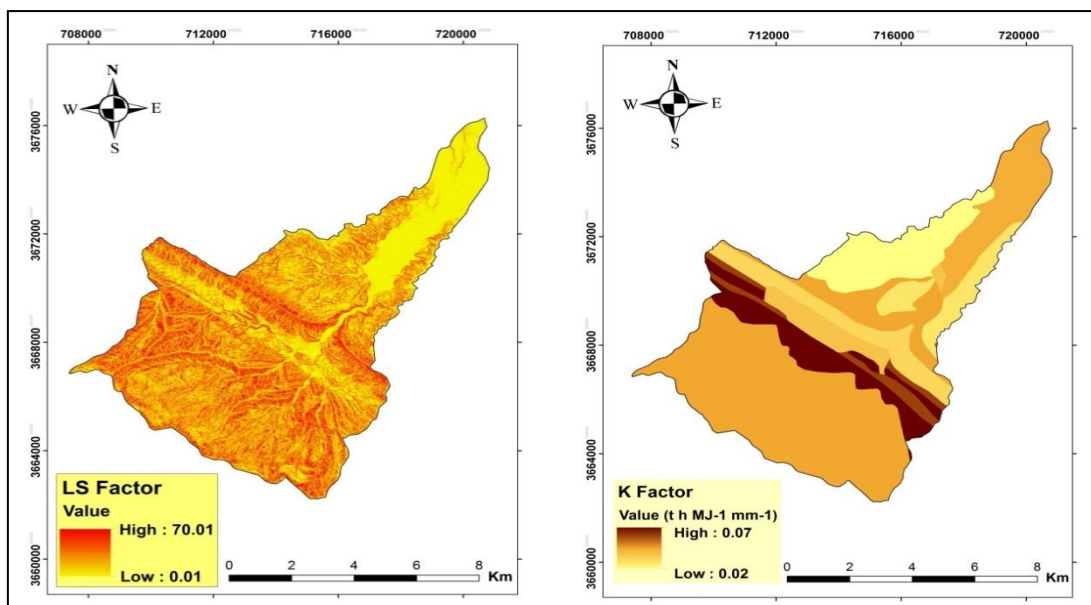
ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	میانگین بارندگی (mm)	MFI	R
ایلام	۴۶/۴۱	۳۳/۶۲	۱۳۶۲	۵۳۳/۹	۸۱/۰	۱۵۹/۱
آبدانان	۴۷/۴۲	۳۳/۰	۹۲۰	۵۳۹/۱	۸۰/۸	۱۵۸/۰
بدره	۴۷/۰۴	۳۳/۳۱	۱۰۶۰	۵۰۶/۲	۷۵/۲	۱۳۵/۸
چشمه شیرین	۴۷/۱۶	۳۳/۲۷	۸۹۳	۴۷۸/۰	۷۱/۵	۱۲۲/۱
زرانگوش	۴۷/۲۲	۳۳/۲۳	۶۹۷	۴۶۵/۵	۶۹/۸	۱۱۵/۹
دره شهر	۴۷/۴۱	۳۳/۱۴	۶۳۰	۴۲۸/۴	۶۳/۰	۹۳/۳
دشت چمران	۴۷/۵۵	۳۳/۰۷	۶۱۴	۴۶۴/۳	۶۸/۱	۱۱۰/۰
میمه	۴۶/۹۲	۳۳/۲۳	۱۲۳۰	۵۴۰/۰	۷۷/۳	۱۴۴/۰
ماژین	۴۷/۷۹	۳۲/۹۵	۴۵۵	۴۸۴/۹	۷۲/۱	۱۲۴/۲
گل زرد	۴۷/۳۵	۳۳/۱۸	۶۳۶	۴۵۱/۰	۶۶/۷	۱۰۵/۲



شکل ۴- نقشه فاکتور فرساینده باران

شکل ۳- نقشه بارندگی سالانه حوضه

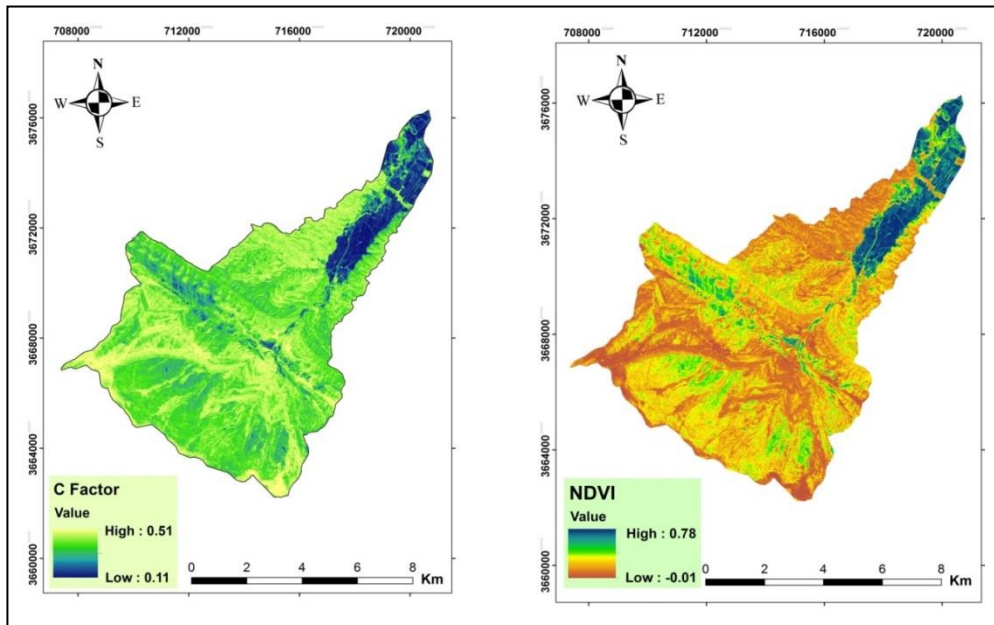
مقادیر فرسایش پذیری خاک (K) با استفاده از نمونه‌های پروفیل خاک حوضه آبریز سیمره و نمودار تعیین حساسیت فرسایش پذیری خاک برای هر کدام از اجزاء واحدهای اراضی خاک تعیین گردید که مقادیر آن از ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ $t h MJ^{-1} mm^{-1}$ متغیر بوده و متوسط مقدار آن ۰/۰۴ می‌باشد (شکل ۵). همچنین مقادیر انحراف از معیار این فاکتور ۰/۰۱ می‌باشد. بیشترین مقدار K با روندی عرضی در قسمت‌های میانی حوضه قرار دارد که بیشتر منطبق بر سازند زمین شناسی ایلام-سورگام می‌باشد. سازند سورگام از تناوب شیل‌های خاکستری روشن تا تیره و لایه‌های آهک تشکیل شده است. سازند ایلام نیز شامل آهک‌های رسی ریزدانه خاکستری روشن تا تیره و لایه‌های نازک شیل در لابلای آهک‌ها می‌باشد. مقادیر بیشتر K نشان‌دهنده بیشتر بودن ذرات بسیار ریز شن و سیلت است که در نهایت سبب افزایش فرسایش پذیری خاک می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). محمدی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی با استفاده از مدل RUSLE به برآورد مکانی فرسایش در مقیاس کشور ایران پرداختند و در آن مقادیر K را برای ایران از صفر تا ۰/۰۴ برآورد کردند. عامل LS با استفاده از روابط ۵ تا ۸ و مدل رقومی ارتفاعی حوضه با در نظر گرفتن کنش متقابل بین توپوگرافی جریان تجمعی آب محاسبه گردید. مقدار این عامل در حوضه مورد مطالعه از ۰/۰۱ تا ۷۰ در سطح پیکسل متغیر بوده و مقدار متوسط آن در حوضه ۶/۷۱ می‌باشد. بیشترین ارزش LS در مناطق با شیب تند کوهستانی و شیب‌های مجاور آبراهه‌ها 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.



شکل ۵- نقشه فاکتور فرسایش پذیری خاک

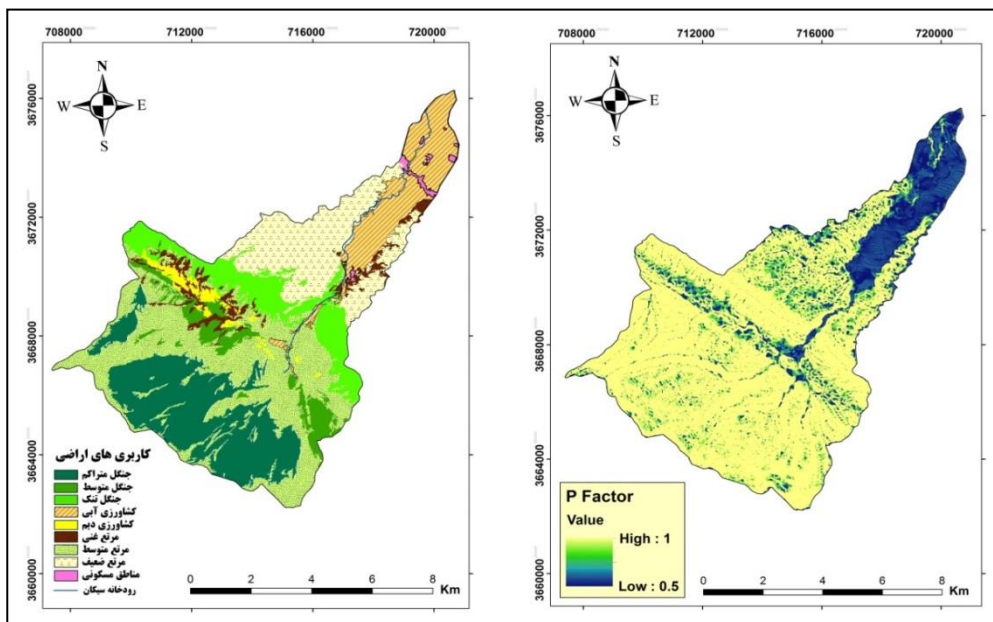
شکل ۶- نقشه فاکتور توپوگرافی

از تراکم پوشش گیاهی به دست آمده از ماهواره سنتینل ۲ و تطابق آن با کاربری‌های اراضی و با استفاده از رابطه‌های (۹ و ۱۰) عامل C محاسبه گردید. عامل C عکس مقادیر NDVI می‌باشد به عبارتی با افزایش در شاخص NDVI میزان فاکتور C کاهش می‌یابد. مقادیر عامل C از ۰/۱۱ تا ۰/۵۱ متغیر بوده و متوسط آن در حوضه برابر با ۰/۳۶ می‌باشد. این عامل در اراضی کشاورزی که در پایین دست حوضه قرار دارند دارای میانگین ۰/۲ و ارزش ۰/۱۱ تا ۰/۴۷ می‌باشد که نسبتاً از پوشش گیاهی مناسبی برخوردار می‌باشند (شکل ۸). همچنین بیشترین ارزش عامل C با میانگین ۰/۴۱ و ۰/۴ به ترتیب مربوط به مراتع متوسط و ضعیف می‌باشد که از پوشش گیاهی کمتری برخوردار می‌باشند. مقادیر تراکم پوشش گیاهی حوضه نیز از در دامنه ۰/۰۱- تا ۰/۷۸ قرار دارد و میانگین آن ۰/۲۸ می‌باشد (شکل ۷). بیشترین ارزش NDVI با میانگین ۰/۶ در اراضی کشاورزی و کمترین مقدار آن در با میانگین ۰/۱۷ در مراتع متوسط می‌باشد. عامل حفاظت خاک با استفاده از طبقه‌بندی لایه درصد شیب حوضه و بر اساس جدول شماره (۱)، محاسبه گردید که مقادیر آن از ۰/۵ تا ۱ می‌باشد. متوسط مقدار این عامل در حوضه ۰/۹۰ است. همانطور که نشان می‌دهد به دلیل کوهستانی و پرشیب بودن، بخش اعظم حوضه فاقد هرگونه عملیات حفاظتی می‌باشد. مناطق با مقادیر متوسط، منطبق بر اراضی کشاورزی پایین دست حوضه و خط‌القعرهایی است که شیب پروفیل طولی آنها ملایم می‌شود (شکل ۹). در نهایت هر یک از کاربری‌های اراضی با استفاده از تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ مربوط به آوریل ۲۰۱۸ و تطبیق با نقاط کنترلی و تصاویر Google Earth با روش حداکثر احتمال و طبقه‌بندی نظارت‌شده، در ۹ کاربری طبقه‌بندی شدند که کاربری مرتع متوسط با ۲۹/۶ درصد از مساحت حوضه بیشترین و مناطق مسکونی با ۰/۶ درصد کمترین کاربری را به خود اختصاص داده‌اند. اراضی کشاورزی آبی به موازات رودخانه سیکان در پایین دست حوضه استقرار دارند و مناطق مسکونی نیز در جوار رودخانه سیکان و اراضی کشاورزی کشیده شده‌اند (شکل ۱۰).



شکل ۸- نقشه فاکتور پوشش گیاهی

شکل ۷- نقشه شاخص پوشش گیاهی



شکل ۱۰- نقشه کاربری‌های اراضی حوضه سیکان

شکل ۹- نقشه فاکتور حفاظت خاک

جدول ۳- آماره‌های مربوط به عامل‌های مدل RUSLE

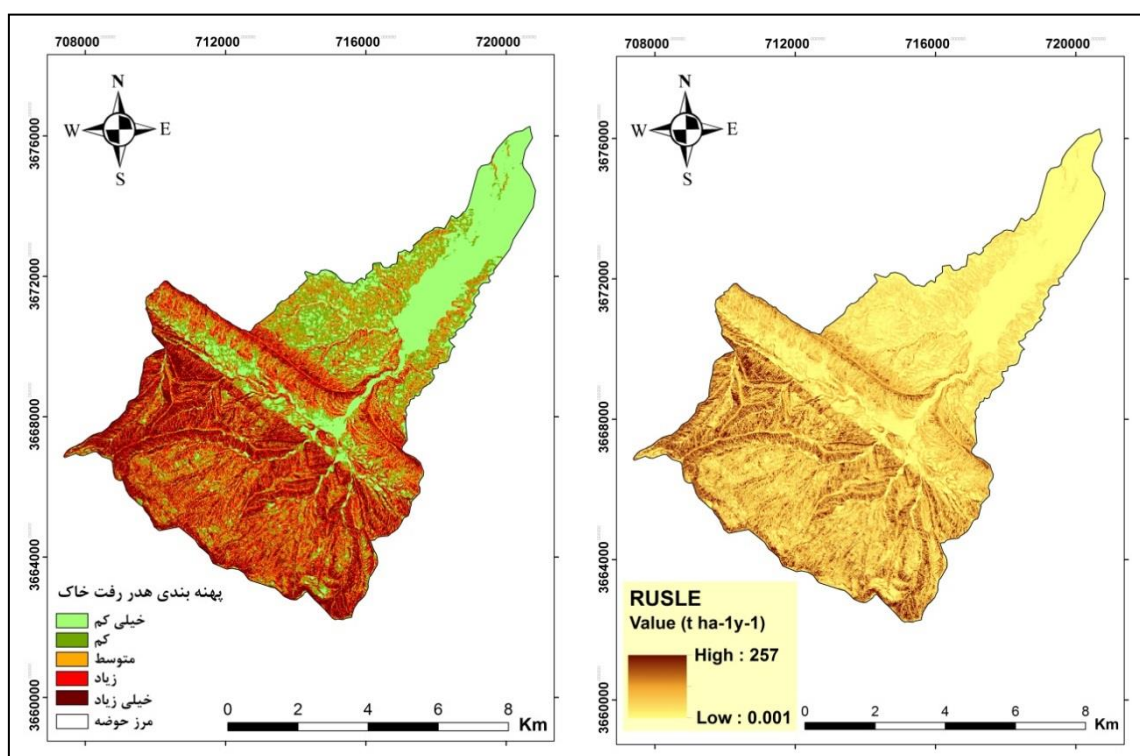
عامل P	عامل C	عامل LS	عامل K	عامل R	
۰/۵	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۱۰۴/۳	حداقل
۱	۰/۵۱	۷۰	۰/۰۷	۲۱۵/۸	حداکثر
۰/۹	۰/۳۶	۶/۷۱	۰/۰۴	۱۴۲/۰۸	میانگین
۰/۱۷	۰/۰۸	۶/۱۹	۰/۰۱	۲۵/۴۹	انحراف معیار

۳-۲- برآورد هدر رفت سالیانه خاک به تفکیک کاربری‌های اراضی

هدر رفت سالیانه خاک حوضه آبریز سیکان از طریق حاصل ضرب عامل‌های فرساینده‌گی (R)، فرسایش‌پذیری (K)، توپوگرافی (LS)، پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی (P)، در اکستنشن Raster Calculator محیط 10.3 ArcGIS با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (شکل ۱۱). با توجه به مدل فرسایش حوضه، مقادیر فرسایش خاک در حوضه مورد مطالعه بین ۰/۰۰۱ تا ۲۵۷ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می‌باشد. میزان کل فرسایش در کل حوضه آبریز سیکان برابر با ۱۲۸۱۱۰۰۴/۳ تن در سال در سطح پیکسل برآورد گردید؛ همچنین میانگین مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه ۱۷/۶۲ و انحراف معیار آن برابر با ۱۹/۱۲ تن در هکتار در سال می‌باشد. مهدیان (۱۳۸۴) در مطالعه‌ای مقدار متوسط فرسایش خاک را برای اغلب زیرحوضه‌های ایران بین ۸ تا ۱۶ تن بر هکتار در سال برآورد کرد که مقادیر آن تقریباً با پژوهش حاضر مطابقت دارد. همچنین بیگلربیگی و همکاران (۱۳۸۷) در سند توسعه طبیعی در افق ۱۴۰۴ فرسایش خاک را در سطح ۱۲۵ میلیون هکتار از حوضه‌های آبخیز کشور حدود ۲۵ تا ۳۰ تن در هکتار در سال تعیین کرد که تقریباً ۱/۵ تا ۲ برابر فرسایش برآورد شده در پژوهش حاضر می‌باشد. محمدی و همکاران (۱۳۹۷) نیز در پژوهشی فرسایش خاک را در مقیاس کشور ایران حدود ۲۴ تن در هکتار در سال و بیشترین مقدار فرسایش خاک را در بسیاری از مناطق زاگرس (لرستان، چهارمحال بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، ایلام و کرمانشاه) بالاتر از ۶۰ تن بر هکتار در سال برآورد نموده که بسیار بالاتر از مقداری است که در حوضه مورد مطالعه به دست آمده است. دامنه مقادیر فرسایش حوضه با استفاده از روش Quantile به پنج کلاس طبقه‌بندی گردید (شکل ۱۲). این روش که به روش هم فراوانی معروف است، طبقات را به گونه‌ای تقسیم‌بندی می‌کند که هر طبقه دارای فراوانی مساوی باشد. با تعیین تعداد طبقات، داده‌ها طوری تقسیم‌بندی می‌شوند که در هر طبقه فراوانی یکسان توزیع شده باشد؛ بنابراین ممکن است فواصل ستون‌ها با همدیگر مساوی نباشند. نتایج نشان می‌دهد که ۲۳/۴۲ درصد از حوضه با دامنه فرسایشی در طبقه با خطر فرسایش زیاد و ۱۷/۷۸ درصد از حوضه مورد مطالعه در طبقه خطر فرسایش کم قرار دارد.

جدول ۴- طبقه‌بندی هدر رفت خاک حوضه آبریز سیکان

طبقه‌بندی فرسایش	دامنه طبقه	مساحت (km ²)	درصد مساحت
کم خیلی	۰-۲	۱۶/۲۹	۲۱/۸۶
کم	۲-۸	۱۳/۲۵	۱۷/۷۸
متوسط	۸-۱۶	۱۴/۰۱	۱۸/۸
زیاد	۱۶-۳۲	۱۷/۴۵	۲۳/۴۲
خیلی زیاد	۳۲<	۱۳/۵۱	۱۸/۱۳



شکل ۱۱- نقشه فرسایش خاک حوضه سیکان شکل ۱۲- نقشه پهنه‌بندی هدر رفت خاک حوضه سیکان

با تلفیق لایه‌های مدل فرسایش و کاربری اراضی با استفاده از اکسترنشن zonal statistic as table در محیط Arcmap مقادیر هدر رفت خاک در هر کدام از کاربری‌های موجود در حوضه برآورد گردید (جدول ۵). نتایج نشان داد که کاربری کشاورزی آبی با میانگین ۰/۴۳ و انحراف معیار ۲/۱ تن در هکتار در سال و کاربری مراتع متوسط با میانگین ۲۸ و انحراف معیار ۲۲/۹ تن در هکتار در سال به ترتیب کمترین و بیشترین هدر رفت خاک را در بین کاربری‌های مختلف به خود اختصاص داده‌اند. مقادیر بالای فرسایش در اراضی جنگلی متوسط نیز با مقادیر ۲۳/۱۵ و انحراف معیار ۱۸/۹ تن در هکتار در سال نیز قابل توجه می‌باشد. مراتع متوسط به دو علت دارای مقادیر

بالای میانگین فرسایش هستند؛ یکی به علت شیب تند و به تبع آن سرعت رواناب در تخریب و حمل ذرات است که نقش فاکتور LS را تشدید و فاکتور پوشش گیاهی را تضعیف می‌کند و دیگری مقادیر بالای بارش به علت مرتفع بودن می‌باشد که نقش فاکتور فرساینده گیاهی باران (R) را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه تراکم پوشش گیاهی (NDVI) بیشترین مقدار NDVI مربوط به اراضی کشاورزی آبی می‌باشد همین باعث گردیده است که اراضی کشاورزی نسبت به کاربری‌های دیگر از میانگین فرسایش کمتری برخوردار باشد. در واقع پوشش گیاهی مهم‌ترین مانع در برابر فرسایش می‌باشد. بعد از اراضی کشاورزی آبی، اراضی دیمکاری نیز بدلیل پوشش گیاهی بهتر نسبت به سایر کاربری‌ها از میانگین فرسایش کمتری برخوردار می‌باشد. با توجه به نقشه تراکم پوشش گیاهی و عامل C، اراضی مرتعی متوسط و ضعیف در قسمت جنوبی حوضه دارای مقادیر NDVI پایین‌تری نسبت به سایر کاربرها می‌باشد که همین عامل باعث گردیده که مقادیر میانگین فرسایش در آنها بالا باشد. اراضی مرتعی و جنگلی بهترین مکان برای زیست‌عشاير منطقه می‌باشند به دلیل وجود علوفه جهت مصرف دام، خاک در سطح اراضی بسیار شکننده و حساس شده و همین امر باعث گردیده که با شروع بارش، رواناب با سرعت بیشتری تشکیل شود و خاک‌هایی که به وسیله دام‌ها و ساکنین منطقه تخریب شده‌اند به وسیله رواناب سریع‌تر انتقال پیدا کنند. از طرفی چون اراضی مرتعی و مشجر در شیب‌های تندتری قرار دارند نسبت به فرسایش بسیار حساس بوده و و این می‌تواند مهم‌ترین دلیل میانگین بالای فرسایش در اراضی مرتعی متوسط و تا حدودی اراضی جنگلی باشد که این امر نقش بالای فاکتور LS را به وضوح نشان می‌دهد.

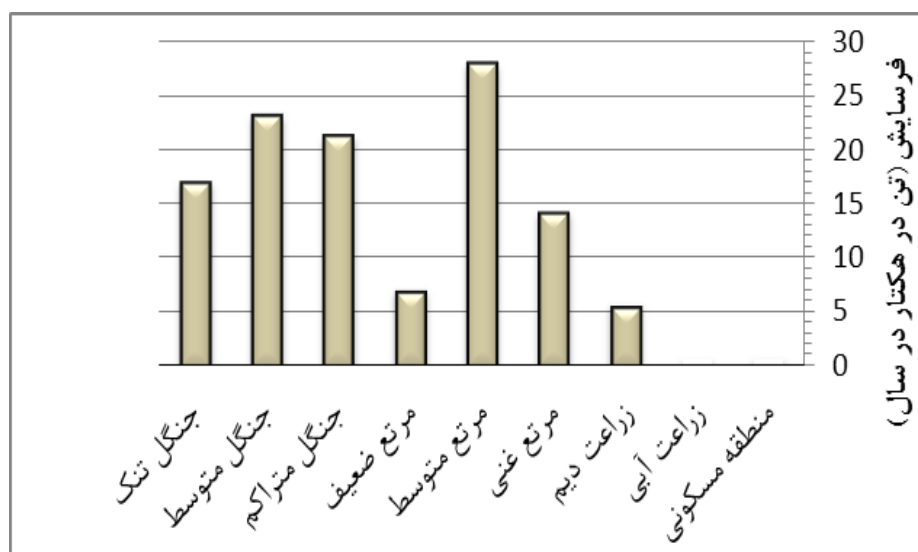
جدول ۵- مقادیر میانگین و کل فرسایش هر کدام از کاربری‌ها

کاربری‌های اراضی	مساحت (km ²)	درصد مساحت	میانگین میزان فرسایش بر حسب (تن در هکتار در سال)	مقدار کل فرسایش در هر کاربری (تن در سال)
اراضی مسکونی	۰/۴۵	۰/۶	۰/۴۴	۱۹۸۹/۶۰
کشاورزی آبی	۸/۲۷	۱۱/۰۹	۰/۴۳	۳۵۹۴۳/۵۳
کشاورزی دیم	۱/۳۵	۱/۸	۵/۵۷	۷۵۰۱۳/۵۷
مرتع غنی	۲/۶۷	۳/۵۸	۱۴/۲۲	۳۷۲۳۳۲/۱۹
مرتع متوسط	۲۲/۰۸	۲۹/۶	۲۷/۹۸	۶۱۴۶۱۱۹/۰۵
مرتع ضعیف	۱۲/۰۴	۱۶/۱۵	۶/۹۴	۸۳۴۴۲۰/۶۳
جنگل متراکم	۱۵/۸۳	۲۱/۲۳	۲۱/۲۵	۳۲۶۶۰۲۶/۰۵
جنگل متوسط	۴/۰۲	۵/۳۹	۲۳/۱۵	۸۹۱۲۷۲/۰۱
جنگل تنک	۷/۸۶	۱۰/۵۴	۱۷	۱۳۲۳۶۵۹/۱۴

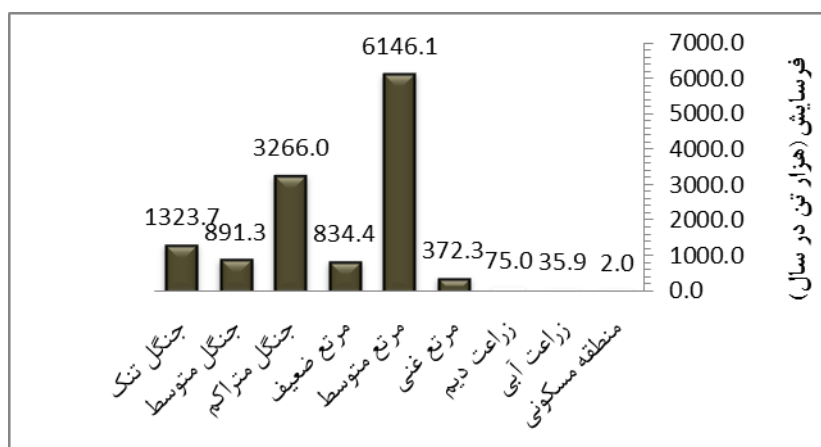
در نهایت با استفاده از یک رابطه رگرسیونی میزان اثرگذاری هریک از عامل‌های مدل **RUSLE** بر روی هدر رفت خاک تعیین گردید که هدر رفت خاک بعنوان متغیر وابسته و عامل‌های فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی، طول و درصد شیب و حفاظت خاک به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که عامل توپوگرافی با ضریب همبستگی ۰/۹ بیشترین تأثیر را در هدر رفت سالانه خاک حوضه سیکان دارد (جدول ۶).

جدول ۶- ضریب همبستگی عامل‌های مدل **RUSLE** با هدر رفت سالانه خاک

عامل	ضریب همبستگی	رابطه‌ی رگرسیونی
R	۰/۴۴	$Y = 8.543406x + 001$
K	۰/۳۱	$Y = 2.974429x - 002$
LS	۰/۹۰	$Y = 4.231086x + 001$
C	۰/۳۶	$Y = 2.131682x - 001$
P	۰/۵	$Y = 6.535196x - 001$



شکل ۱۳- نمودار ستونی میانگین هدر رفت خاک در کاربری‌های اراضی حوضه سیکان



شکل ۱۴- نمودار ستونی حجم هدر رفت سالانه خاک در هر کدام از کاربرهای اراضی حوضه سیکان

۴- نتیجه گیری

امروزه فرسایش خاک به عنوان یکی از مباحث مهم مدیریت حوضه‌های آبریز در سطح ملی و جهانی مطرح می‌باشد. لازمه برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیم درباره مهار فرسایش و رسوب، آگاهی از میزان فرسایش در یک حوضه آبخیز و شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی آنها برای اجرای برنامه‌ها و اقدامات آبخیزداری برای کاهش فرسایش و مهار تولید و حمل رسوب است. در این مطالعه ارزیابی خطر فرسایش خاک در واحدهای کاربری اراضی حوضه آبریز سیکان با استفاده مدل معروف RUSLE در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی و با کمک فناوری سنجش از دور به کار گرفته شد. ابتدا هر یک از فاکتورهای R, K, LS, C و P جهت برآورد میزان فرسایش در محیط ArcGIS محاسبه و تلفیق شدند و توزیع مکانی فرسایش در قسمت‌های مختلف حوضه به دست آمد. نتایج نشان داد که مقادیر فرسایش حوضه از $0/001$ تا 257 تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر است و میانگین فرسایش در حوضه مورد مطالعه $17/62$ تن در هکتار در سال می‌باشد. در گام بعدی با تلفیق لایه‌های مدل فرسایش و کاربری‌های اراضی مقادیر فرسایش خاک در هر کدام از کاربری‌های موجود در حوضه برآورد گردید. مراتع متوسط با میانگین فرسایش 28 تن در هکتار در سال و سطحی در حدود 30 درصد از حوضه، بالاترین مقادیر فرسایش را به خود اختصاص داده است. کاربرهای کشاورزی آبی و مناطق مسکونی نیز با میانگین $0/43$ و $0/44$ تن در هکتار در سال نیز کم‌ترین مقادیر فرسایش خاک را نشان دادند. در این مطالعه همچنین میزان اثرگذاری هر یک از عامل‌های مدل RUSLE بر روی هدر رفت خاک نشان داد عامل توپوگرافی با ضریب همبستگی $0/9$ بیش‌ترین سهم را در فرسایش سالانه خاک حوضه سیکان دارد. در نهایت با طبقه‌بندی مقادیر هدر رفت خاک مشخص گردید که $23/42$ درصد از حوضه سیکان در طبقه فرسایشی زیاد و $18/13$ درصد از سطح حوضه در طبقه فرسایشی خیلی زیاد قرار دارد که نشان می‌دهد جمعاً حدود 42 درصد از حوضه مورد مطالعه با مقادیر بالاتر از 16 تن در هکتار در سال در

وضعیت شدیدی از لحاظ هدر رفت خاک قرار دارند. از جمله کاربردهای مهم طبقه‌بندی فرسایش خاک، شناسایی مناطق بحرانی تخریب و جا به جایی خاک است؛ لذا با توجه به وضعیت فرسایش خاک حوضه سیکان، نقش مدیریت حوضه آبخیز از جمله عملیات‌های حفاظت خاک و آبخیزداری با تمرکز و اولویت کاری در بالادست حوضه و در مناطق با شیب زیاد بیش از پیش ضرورت می‌یابد.

کتابنامه

- آرخی، صالح؛ نیازی، یعقوب؛ ۱۳۸۹. بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام). *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۷ (۲): ۲۷-۱.
- بابایی، مهناز؛ حسینی، سید زین‌العابدین؛ نظری سامانی، علی اکبر؛ المدرسی، سیدعلی؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE 3D. *مطالعه موردی: حوزه آبخیز کن. مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۸ (۲): ۱۸-۱۶۵.
- بیگلربیگی، محمدرضا؛ کوچ‌پیده، نوراله؛ پاشاپور، میترا؛ ۱۳۸۷. سند توسعه منابع طبیعی و آبخیزداری در افق ۱۴۰۴. *پونه*، ۱، صص ۴۴.
- پژوهش، مهدی؛ گرجی، منوچهر؛ طاهری، محمود؛ سرمیدان، فریدون؛ محمدی، جهانگرد؛ صمدی، حسین؛ ۱۳۹۰. اثر کاربری اراضی مختلف حوضه سد زاینده رود علیا در تولید رسوب با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. *نشریه پژوهش آب/ایران*، ۸، صص ۱۵۲-۱۴۳.
- جوان‌دوست، هانیه؛ اونق، مجید؛ حسنعلی‌زاده، محسن؛ سکوتی، رضا؛ ۱۳۹۳. برآورد فاکتور فرسایش با استفاده از الگوریتم‌های زمین آمار برای برآورد فرسایش در مدل WaTEM/SEDEM در حوضه روضه چای. *پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه ارومیه، صص*، ۱۱.
- جوزی، سیدعلی؛ مرادی مجد، نسرين؛ ۱۳۹۴. ارزیابی عوامل مؤثر بر شدت فرسایش خاک در روش شش عامله فائو با استفاده از تکنیک TOPSIS. *نشریه حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی*، ۴ (۱): ۱۰۰-۷۹.
- حاجی، خدیجه؛ اسمعیلی عوری، اباذر؛ مصطفی‌زاده، رثوف؛ نظرزاد، حبیب؛ ۱۳۹۴. تهیه و ارزیابی نقشه فرسایش خاک حوزه آبخیز روضه پای ارومیه با استفاده از GIS و RUSLE. *دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه محقق اردبیلی*، ۱۳-۱۲ اسفند. ۱-۶.
- حبشی، خلیل؛ محمدی، شاهین؛ کریم‌زاده، حمیدرضا؛ پورمنافی، سعید؛ ۱۳۹۷. ارزیابی خطر فرسایش خاک در دشت کوهپایه - سگزی با استفاده از مدل تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۷ (۱۵): ۱۷۸-۱۶۱.
- صادقی، سید حمیدرضا؛ مصطفی‌زاده، رثوف؛ سعدالدین، امیر؛ ۱۳۹۴. پاسخ رسوب نمود و حلقه‌های سنج رسوب به نوع و توزیع مکانی کاربری اراضی. *نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۷ (۱): ۲۶-۱۵.

طالبی خیاوی، حسین؛ ذبیحی، محسن؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ ۱۳۹۶. تأثیر سناریوهای مختلف مدیریت کاربری اراضی بر میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل USLE و GIS در آبخیز سد یامچی اردبیل. علوم آب و خاک - علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۲۱ (۲): ۲۳۴-۲۲۱.

فیضی زاده، بختیار؛ ۱۳۹۶. مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر سیستم فرسایش در حوضه سد علویان با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS. هیدروژئومورفولوژی، ۳ (۱۱): ۳۸-۲۱.

محمدی، شاهین؛ کریم‌زاده، حمیدرضا؛ علیزاده، میثم؛ (۱۳۹۷). برآورد مکانی فرسایش خاک ایران با استفاده از مدل RUSLE. اکوهیدرولوژی، ۵ (۲): ۵۶۹-۵۵۱.

محمدی، مازیار؛ فلاح، مقدسه؛ کاویان، عطاءاله؛ غلامی، لیلیا؛ امیدوار، ابراهیم؛ ۱۳۹۵. کاربرد مدل RUSLE در تعیین توزیع مکانی خطر هدر رفت خاک. اکوهیدرولوژی، ۳ (۴): ۶۵۸-۶۴۵.

مختاری، لیلیا گلی؛ شفیعی، نجمه؛ رحمانی، ابوالفضل؛ ۱۳۹۷. برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE: مطالعه موردی حوضه آبریز نورآباد ممسنی. هیدروژئومورفولوژی، ۱۷، صص ۲۱-۱.

مصطفی‌زاده، رئوف؛ حاجی، خدیجه؛ اسمعیلی عوری، اباذر؛ نظرزاد، حبیب؛ ۱۳۹۶. اولویت‌بندی زیرحوضه‌های بحرانی از لحاظ فرسایش و رسوب با استفاده از مدل پاسخ فرسایش حوزه (WERM) و آنالیز مورفومتری (مطالعه موردی: حوزه آبخیز روضه چای استان آذربایجان غربی). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۸ (۱۶): ۱۵۶-۱۴۲.

مهدیان، محمد حسین؛ ۱۳۸۴. بررسی وضعیت تخریب اراضی در ایران. همایش ملی فرسایش و رسوب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور. ۶ تا ۹ شهریور. دوره ۳، صص ۶.

- Cebecauer T, Hofierka J., 2007. The consequences of land- cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology*. 98: 187-198.
- Drzewiecki W, Węzyk P, Pierzchalski M, Szafrńska B., 2014. Quantitative and qualitative assessment of soil erosion risk in Małopolska (Poland), supported by an object-based analysis of high-resolution satellite images. *Pure and Applied Geophysics*. 171: 867-895.
- Ganasri B.P, Ramesh H., 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS: A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*. 7 (6): 953-961.
- Garcia-Ruiz G.M, Lasanta T, Ruiz-Flano P, Ortigosa L, White S, Gonzalez C, Marti C., 1996. Land-use changes and sustainable development in mountain areas: A case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology*. 11(5): 267-277.
- Jones D.S, Kowalski D.G, Robert B.S., 2008. Calculating Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Estimates on Department of Defense Lands: A Review of RUSLE Factors and U.S. Army Land Condition-Trend Analysis (LCTA) Data Gaps. Center for Ecological Management of Military Lands Department of Forest Science, Colorado State University Fort Collins, CO 80523.
- Jose A, MartõÁnez C, IneÂs SaÁnchez B., 2000. Impact assessment of changes in land se/conservation practices on soil erosion in the PenedeÁs-Anoia vineyard region. *Soil & Tillage Research*. 57: 101-106.
- Karaburun A., 2010. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. *Ozean Journal of Applied Sciences*. 3 (1): 77-85.

- Li H, Chen X, Kyoung J.L, Cai X, Myung S., 2010. Assessment of Soil Erosion and Sediment Yield in Liao Watershed, Jiangxi Province, China, Using USLE, GIS, and RS. *Journal of Earth Science*. 21 (6): 941–953.
- Maerker M, Sommer C, Zakerinejad R, Cama E., 2017. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion: Case studies from South Africa and Iran. *EGU General Assembly Conference Abstracts*.
- Nearing M.A, Jetten V, Baffaut C, Cerdan O, Couturier A, Hernandez M, Le Bissonnais Y, Nichols M.H, Nunes J.P, Renschler C.S, Souchre V, Van Oost K., 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*. 61:131-154.
- Nwaogu C, Okeke OJ, Adu SA, Babine E, Pechanec V., 2017. Land use land cover change and soil-gully erosion relationships: A study of Nanka, South-Eastern Nigeria using geoinformatics. *Proceedings of GIS Ostrava: Dynamics in GIScience*. Pp. 305-319.
- Remortel Van R, Hamilton M, Hickey R., 2001. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography*, 30(1): 27-35.
- Renard K, Foster G, Weesies G, McCool D, Yoder D., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE). US Department of Agriculture (Ed.). *Agricultural Handbook*. US Department of Agriculture, Washington. 703: 1–251.
- Renard K.G, Freidmund J.R., 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE, *J. Hydro*. 157: 287-306.
- Sadeghi S.HR.2017. Soil erosion in Iran: state of the art, tendency and solutions. *Transcultural Studies*. 63(3).
- Santos J. C. N, Andrade E. M, Medeiros P. H. A, Joao M., 2017. Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid. *Revista Ciencia Agronomica*. 48(2): 251-260.
- Sharma A, Kamlesh N., 2010. Effect of land use land cover change on soil erosion potential in a agricultural watershed. *Environ Monit Assess*. 173: 789-801.
- Shi Z.H., 2002. Assessment of Erosion Risk with the Rusle and Gis in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River. 12th ISCO Conference Beijing. 73-78.
- Shinde K.N, Manjushree S., 2010. Prioritization of micro watersheds on the basis of soil erosion hazard using remote sensing and geographic information system. *International Journal of Water Resource and Environmental Engineering*. 2(3): 130-136.
- Teng H, Rossel RA, Shi Z, Behrens T, Chappell A, Bui E., 2016. Assimilating satellite imagery and visible_near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia. *Environmental Modelling & Software*. 77:156-167.
- Wischmeier W.H, Smith.D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *The USDA Agricultural Handbook*. No. 537, Maryland.
- Zakerinejad R, Maerker M., 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*. 79 (1): 25-50.