



برآورد فرسایش - رسوب حوضه آبریز سراب سیکان با استفاده از مدل RUSLE

محمدحسین رضایی مقدم^{۱*}، اسداله حجازی^۲، مهدی مزبانی^۳

۱- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴

چکیده

امروزه فرسایش خاک به عنوان یکی از مباحث مهم مدیریت حوضه‌های آبریز در سطح ملی و جهانی مطرح می‌باشد. در این پژوهش به منظور شناسایی توزیع مکانی فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبریز سراب سیکان از معادله جهانی اصلاح شده هدر رفت خاک استفاده شده است. با استفاده از داده‌های بارندگی ۱۷ ساله (۱۳۹۷-۱۳۸۰)، اطلاعات خاک‌شناسی و مدل رقومی ارتفاعی با تفکیک ۱۰ متری هر یک از فاکتورهای فرسایش (R)، فرسایش‌پذیری (K)، شیب و طول شیب (LS) و حفاظت خاک (P) در محیط ArcGIS تهیه شدند. از سنجنده ماهواره سنتینل ۲ نیز جهت استخراج و تهیه فاکتور پوشش گیاهی حوضه (C) در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. در نهایت با ترکیب این فاکتورها در محیط نرم‌افزار ArcGIS مقدار فرسایش حوضه محاسبه گردید سپس با روش‌های مختلف نسبت تحویل رسوب (SDR) میزان رسوب تولید شده در حوضه به دست آمد. نتایج نشان داد که مقدار فرسایش در سطح حوضه از ۰/۰۰۳ تا ۲۴۸/۴ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر بوده و میانگین هدر رفت خاک در حوضه ۲۲/۳ تن در هکتار در سال می‌باشد. در بین فاکتورهای مدل، فاکتور LS با ضریب همبستگی $R^2=0/92$ بیش‌ترین تأثیرگذاری در فرسایش خاک را نشان داد. همچنین مقدار نسبت SDR با روش‌های مختلف بین ۰/۱۲ تا ۰/۳۶ محاسبه گردید که پس از تلفیق با نقشه فرسایش، بار رسوب حوضه محاسبه شد. میانگین بار رسوب با روش بویس ۲/۸ تن در هکتار در سال می‌باشد که نسبت به روش‌های دیگر به مقدار رسوب ایستگاه (۱/۶۵ تن در هکتار در سال) نزدیک‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: فرسایش‌پذیری، سنتینل ۲، نسبت تحویل رسوب، هدر رفت خاک، سراب سیکان، دره‌شهر.

۱- مقدمه

بر اساس آمار موجود فرسایش آبی حدود ۱۲۰ میلیون هکتار از اراضی کشور ایران را تحت تأثیر قرار داده است (شهریور و همکاران، ۱۳۹۶: ۳). یکی از جدیدترین بررسی‌ها در زمینه برآورد فرسایش خاک در مقیاس ایران نشان می‌دهد که میانگین فرسایش سالانه خاک در ایران ۲۴ تن در هکتار در سال است و سالانه حدود چهار میلیارد تن خاک از اراضی کشور فرسایش یافته که قسمتی از آن وارد سامانه آب‌های جاری و دریا می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۵۱). این مسئله‌ی جدی سبب کاهش کیفیت، آلودگی آب، کاهش حاصل‌خیزی خاک و کاهش سطح اراضی قابل کشت و در نهایت تخریب خاک می‌شود. با توجه به مسائل ذکر شده، ارزیابی و برآورد فرسایش خاک و رسوب امری مهم و ضروری برای توسعه روش‌های جلوگیری از فرسایش به منظور مدیریت پایدار اراضی و منابع آب است (ورلینگ و همکاران^۱، ۲۰۰۲: ۱۶۰). محاسبه میزان رواناب و رسوب در یک حوضه آبریز در صورت موجود بودن آمار کافی از دبی و رسوب، با به‌کارگیری روش‌های آماری امکان‌پذیر است ولی به دلیل کمبود آمار و فقدان ایستگاه‌های اندازه‌گیری در بسیاری از حوضه‌های کشور کاربرد مدل‌های تجربی را برای برآورد فرسایش خاک الزامی می‌کند. طی ۴۰ سال اخیر، مدل USLE به سبب داشتن محاسبات ساده، پرکاربردترین روش تخمین فرسایش خاک و برآورد تأثیرات عملیات‌های مدیریتی مختلف بر آن بوده است (کینل^۲، ۲۰۰۰: ۳۳۲).

پاناگوس و همکاران^۳ (۲۰۱۵) با استفاده از یک نسخه‌ی جدید از معادله تجدید شده جهانی فرسایش خاک تحت عنوان *RUSLE, 2015* و با استفاده از لایه‌های با وضوح بالا به برآورد فرسایش اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۰ پرداختند. میزان متوسط فرسایش خاک در مناطق مستعد فرسایش (کشاورزی، جنگل‌ها و نواحی نیمه طبیعی) اتحادیه اروپا ۲/۴۶ تن در هکتار در سال و در نتیجه هدر رفت کل خاک ۹۷۰ میلیون تن برآورد گردید. گاناسری و رامش^۴ (۲۰۱۶) با استفاده از مدل *RUSLE*، مجموع سالانه فرسایش حوضه آبریز ندراواتی در جنوب‌غربی هند را در حدود ۴۷۳/۳۳۹ تن در سال برآورد کردند. همچنین نرخ رشد سالانه فرسایش خاک به علت افزایش سطوح کشاورزی در حدود ۱۴/۶۷۳ تن در هکتار پیش‌بینی گردیده است.

گبی و همکارانش^۵ (۲۰۱۷) پژوهشی به‌منظور بررسی وضعیت فرسایش خاک با استفاده از مدل *RUSLE* در شمال تونس انجام دادند. آن‌ها مقدار متوسط فرسایش خاک را برای منطقه یادشده ۲۴ تن در هکتار در سال گزارش کردند. مغرووی و همکارانش^۶ (۲۰۱۷) در پژوهشی با عنوان "تعیین ارزیابی فرسایش خاک با استفاده

1- Vrieling et al.
 2- Kinnell
 3- Panagos et al.

4- Ganasri & Ramesh
 5- Gaubi et al.
 6- Meghraoui et al.

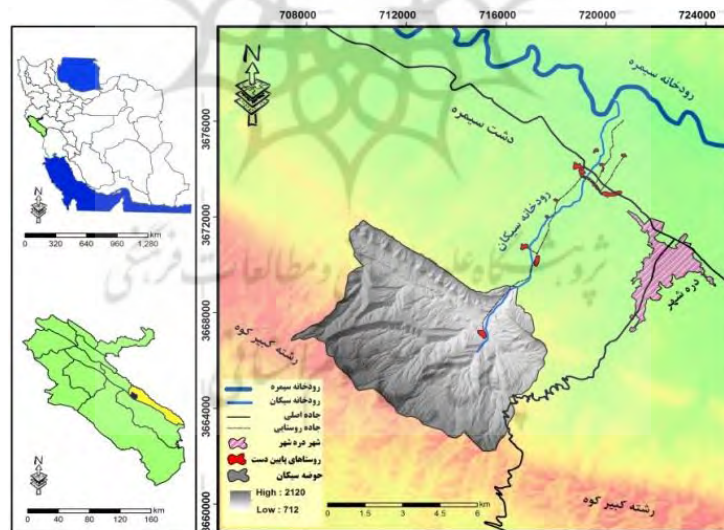
از فن سنجش از دور و سیستم اطلاعات مکانی " کشور الجزایر را بررسی کردند. که مقدار فرسایش خاک در منطقه را بین صفر تا ۲۰۰ تن در هکتار در سال برآورد نمودند. رضایی و همکاران (۱۳۹۳) با مدل تجدیدنظر شده‌ی جهانی فرسایش خاک وضعیت فرسایش و تولید رسوب در حوضه‌ی آبخیز گابریک هرمزگان را مورد مطالعه قرار دادند و متوسط فرسایش خاک حوضه گابریک را ۳۲۲/۹ تن در هکتار در سال برآورد کردند. در این پژوهش فاکتور توپوگرافی با بالاترین مقدار ضریب تبیین (۰/۸۷) بیش‌ترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک داشته است. بابایی و همکاران (۱۳۹۵) میانگین سالانه فرسایش حوضه کن سولقان را ۲۰/۲۲ تن در هکتار در سال برآورد کردند. همچنین برای محاسبه بار رسوب از روش‌های محاسبه نسبت تحویل رسوب^۱ استفاده کردند که متوسط سالانه رسوب در هر یک از روش‌ها، بسیار بیش‌تر از رسوب ویژه حوضه در ایستگاه سولقان بود. همچنین عامل LS با ضریب همبستگی ۰/۶۸ درصد بیش‌ترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک داشته است. مختاری و همکاران (۱۳۹۷) نیز در پژوهشی نشان دادند که عامل LS نقش بیش‌تری در فرسایش حوضه‌ی آبریز نورآباد ممسنی نسبت به سایر عوامل دارد. آرمین و همکاران (۱۳۹۹) نیز در حوضه‌ی سد آبریز تنگ سرخ با استفاده از مدل RUSLE نشان دادند که ۲۵ و ۹ درصد مساحت منطقه‌ی مورد مطالعه به ترتیب دارای میزان فرسایش بیش از ۱۰ و ۳۵ تن در هکتار در سال می‌باشد.

حوضه آبریز سراب سیکان شهرستان دره‌شهر یکی از مناطقی است که متحمل فرسایش فزاینده خاک می‌باشد. بررسی فرسایش و بار رسوب این حوضه، که یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی منطقه و همچنین تأمین آب شرب کلیه روستاهای ضلع غربی شهرستان به‌شمار می‌رود، از اهمیت بالایی برخوردار است. قرار گرفتن حوضه در منطقه کوهستانی و نسبتاً پرشیب، خشکیدگی تدریجی جنگل‌های بلوط، عدم اجرای عملیات‌های گسترده آبخیزداری در حوضه و همچنین فعالیت و اقدامات غیراصولی انسانی (توسعه راه‌های ارتباطی، سبک کشاورزی و دامداری سنتی و ...) باعث ایجاد اختلال در سامانه‌های طبیعی و به تبع آن تغییرات مکرر چشم‌اندازها و جابه‌جایی و توزیع مجدد خاک حوضه شده است. با توجه به اینکه این حوضه یکی از سرشاخه‌های سد کرخه می‌باشد، شناسایی زیرحوضه‌ها و سرشاخه‌های حساس به فرسایش در بالا دست سدهای استراتژیکی همچون سد کرخه نقش بسیار مهمی در مدیریت آب، کاهش رسوب ورودی به سدها و طول عمر آن‌ها خواهد داشت. بنابراین شناسایی سطوح حساس به فرسایش در این حوضه می‌تواند در مدیریت و کیفیت منابع آب نقش شایانی داشته باشد. بنابراین هدف این پژوهش بررسی میزان فرسایش و رسوب در حوضه سراب سیکان با استفاده از مدل RUSLE، شناسایی مناطق حساس از نظر فرسایش و همچنین تعیین عامل‌های مهم در ایجاد فرسایش خاک می‌باشد.

۲- مواد و روش

۲-۱- معرفی منطقه مورد پژوهش

حوضه آبریز سراب سیکان با مساحت ۵۰/۲۸ کیلومتر مربع در محدوده‌ی مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۲ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی در شهرستان دره‌شهر استان ایلام و در حد فاصل رشته کوه کبیرکوه در جنوب و رودخانه‌ی سیمره در شمال واقع شده است. حوضه سیکان بخش کوچکی است از حوضه رودخانه سیمره که متوسط سالیانه بارندگی آن ۵۳۰ میلی‌متر در سال است. حداکثر ارتفاع آن در منتهی‌الیه جنوب غربی قله رشته کبیرکوه ۲۱۲۰ متر و پست‌ترین نقطه آن ۷۱۲ متر می‌باشد. رودخانه‌ی سیکان نیز که سرچشمه اصلی آن یک چشمه بزرگ کارستی است از مرکز حوضه عبور نموده و در فاصله‌ای کوتاه وارد رودخانه سیمره می‌شود (مهندسین مشاور آبساران، ۱۳۸۸: ۱۰) (شکل ۱).

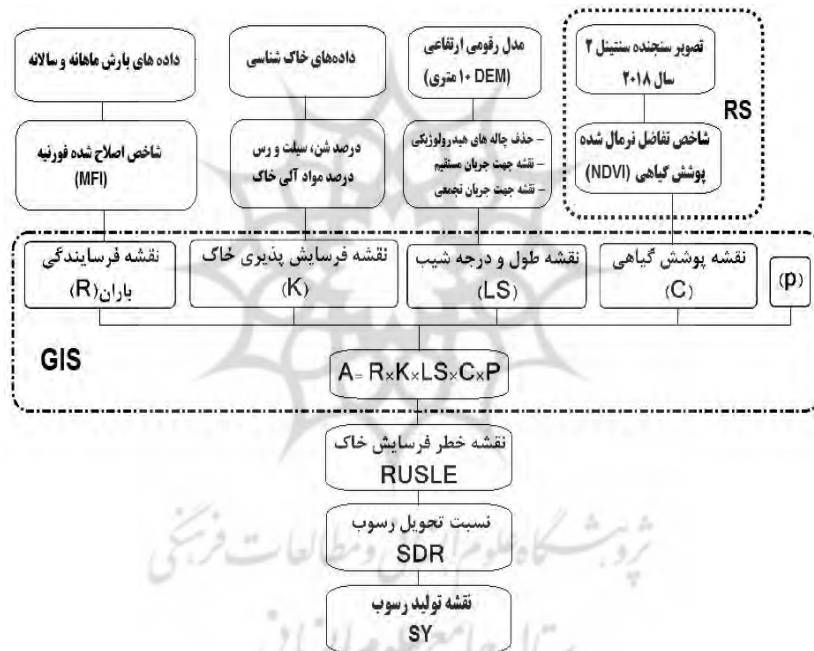


شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبریز سراب سیکان دره‌شهر
 Fig (1): Geographical location of Sarab Sikan Basin in Darrehshahr

۲-۲- داده‌ها و ابزارهای پژوهش

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده در پژوهش شامل: لایه‌های رقومی ۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور، مدل رقومی ارتفاعی با تفکیک‌پذیری ۱۰ متر، آمار ۱۷ ساله بارندگی ماهانه و سالانه منطقه از سازمان هواشناسی کشور، آمار دبی و رسوب ایستگاه هیدرومتری سیکان از اداره کل آب منطقه‌ای استان ایلام، تصویرماهواره‌ای

سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۸ آوریل ۲۰۱۸ از سایت سازمان زمین شناسی ایالات متحده^۱ و گزارش و اطلاعات مفصل خاک‌شناسی حوضه‌ی سیکان از شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو می‌باشد. در این پژوهش از نرم-افزارهای ArcGIS10.3 جهت تهیه، ترسیم و تحلیل لایه‌ها؛ از نرم‌افزار ENVI 5.3 جهت استخراج و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و از SPSS و Excel نیز جهت آماده‌سازی و تحلیل‌های آماری داده‌ها و همچنین جهت انجام روابط رگرسیونی معادلات بهره‌گیری شده است. شکل ۲ مراحل اجرای پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل (۲): نمودار جریانی مراحل پژوهش

Fig (2): Flowchart of research stages

۲-۳- روش تحقیق

۲-۳-۱- معادله RUSLE

رابطه جهانی فرسایش خاک اصلاح شده^۲ به عنوان مدل توسعه یافته مدل جهانی فرسایش خاک برای پیش‌بینی فرسایش خاک سالانه از یک سطح معین به‌شمار می‌آید (رنارد و فریدمن^۳، ۱۹۹۴: ۲۹۱). در مدل RUSLE، میزان هدر رفت خاک با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود (ویشمایر و اسمیت^۴، ۱۹۸۷: ۳۰).

1- United State Geological Survey (USGS)
2- Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

3-Renard & Freidmund
4- Wischmeier & Smith

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

مقدار خاک فرسایش یافته به وسیله فرسایش ورقه‌ای و شیاری بر حسب جرم در واحد سطح در واحد زمان، عامل فرساینده‌گی 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 بدون واحد هستند (رنارد و همکاران^۱، ۱۹۹۷: ۲۵).

- عامل فرساینده‌گی بارندگی (R):

برای محاسبه و تهیه‌ی فاکتور R، ابتدا انتخاب ایستگاه‌های مناسب از نظر طول دوره‌ی آماری، انتخاب پایه‌ی زمانی مشترک، همگن‌سازی و رفع نواقص قبل از محاسبه شاخص مبتنی بر مقدار بارندگی در ایستگاه‌های هواشناسی انجام شد. سپس بارندگی ماهانه و سالانه ۱۰ ایستگاه مجاور حوضه با دوره آماری ۱۷ ساله (۱۳۹۷-۱۳۸۰) استخراج شد. با توجه به کامل بودن داده‌ها در دوره‌ی آماری مدنظر بازسازی داده‌ها صورت نگرفت. در مرحله بعد با تقسیم مجموع مجذور بارندگی‌های ماهانه به متوسط بارندگی همان سال، مقدار شاخص فورنیر در هر سال با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه شد (رنارد و فریدموند، ۱۹۹۴: ۲۹۵). سپس برای به دست آوردن متوسط شاخص فورنیر در طول دوره‌ی آماری در هر ایستگاه، از مقادیر شاخص فورنیر سال‌ها میانگین‌گیری شد.

$$P = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P} \quad (2)$$

p_i : متوسط بارندگی (میلی‌متر) در ماه i

p: متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) است.

در نهایت براساس روابط (۳ و ۴) فاکتور R برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه شد.

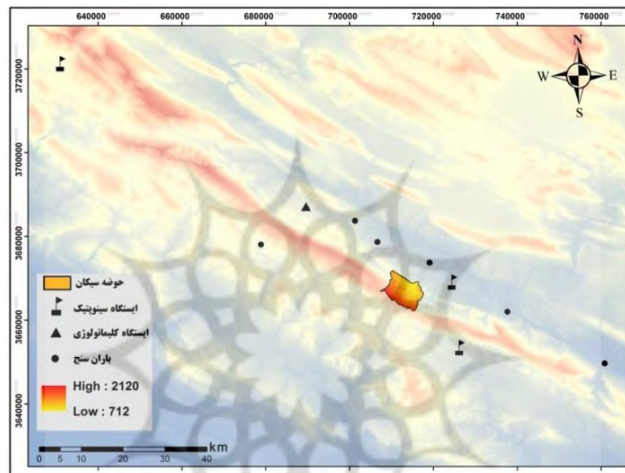
$$R - \text{Factor} = \frac{(0.07397 * F^{1.847})}{17.2} \quad (3)$$

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

$$R - \text{Factor} = \frac{(95.77 - 6.081 * F + 0.4770 * F^2)}{17.2} \quad (4)$$

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

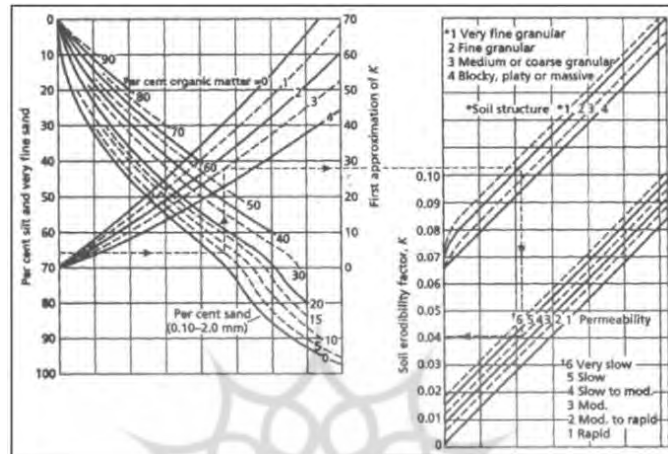
با توجه به دامنه‌ی تغییرات ارتفاع حوضه مورد مطالعه (۷۱۲ الی ۲۱۲۰ متر)، بین ارتفاع ایستگاه‌ها و مقدار فرسایش باران (R) محاسبه شده، یک رابطه رگرسیونی برقرار گردید. در نهایت در محیط ArcGIS مقدار R برای قسمت‌های مختلف حوضه براساس مدل رقومی ارتفاعی تعمیم و خروجی آن به صورت رستر تهیه شد.



شکل (۳): پراکنش ایستگاه‌های مجاور حوضه آبریز سیکان
Fig (3): Distribution of station round Sikan Basin

- عامل فرسایش پذیری خاک (K):

برای به دست آوردن ضریب K نیاز به پنج پارامتر خاک شامل نفوذپذیری، بافت خاک، درصد شن، درصد سیلت و درصد مواد آلی است. در این پژوهش مقدار K براساس نتایج حاصله از مطالعات خاک‌شناسی و اطلاعات آزمایشگاهی ۹ نمونه پروفیل خاک در اجزاء واحدهای اراضی حوضه‌ی سیمره و با استفاده از نمودار Soil Erodibility Nomograph که توسط ویشمایر در سال ۱۹۸۷ ارائه گردیده است، استخراج گردید (شکل ۴ و جدول ۱). برای تبدیل به واحد متریک، مقادیر K در ۰/۱۳۱۷ ضرب می‌شود (محمدی، ۱۳۹۷: ۵۵۶) که نهایتاً نقشه عامل فرسایش پذیری خاک برحسب $t h MJ^{-1} mm^{-1}$ (بر حسب تن ساعت بر مگاژول بر میلی‌متر) تهیه شد.



شکل (۴): نمودار تعیین حساسیت فرسایش پذیری خاک (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۱۱)
Fig (4): Soil Erodibility Nomograph (Wischmeier & Smith, 1978: 11)

جدول (۱): نتایج آزمایشگاه خاک پروفیل‌های حفر شده در منطقه مطالعه

Table (1): Laboratory results of soil profiles drilled in the study area

اجزاء واحدهای اراضی	عمق پروفیل cm	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	درصد مواد آلی	فرسایش پذیری خاک (K)
MRO-1	۰-۱۰	۴۵	۳۶	۱۹	۱/۰۶	۰/۰۴۷
QR-24	۰-۱۵	۴۲	۳۳	۲۵	۱/۷۷	۰/۰۴۴
Qt-20	۰-۱۵	۲۸	۴۴	۲۸	۲/۲۳	۰/۰۳۹
hro-11	۰-۱۷	۲۸	۳۸	۳۴	۳/۲۵	۰/۰۲۳
mio-7	۰-۱۵	۲۵	۳۷	۳۸	۱/۸۷	۰/۰۳۴
mic-10	۰-۱۶	۳۶	۴۹	۱۵	۰/۵۸	۰/۰۶۱
MIO-5	۰-۲۰	۷۰	۲۲	۸	۰/۵۰	۰/۰۷۱
hio-14	۰-۱۵	۲۹	۴۴	۲۷	۲/۷۳	۰/۰۳
LS-19	۰-۱۵	۳۶	۴۹	۱۵	۱/۶۰	۰/۰۵۷

- عامل توپوگرافی (LS):

برای تهیه نقشه فاکتور توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۱۰ متری منطقه استفاده شد. فاکتور توپوگرافی نیازمند نقشه‌های تجمع جریان و شیب می‌باشد. به همین منظور در محیط ArcGIS، ابتدا با ابزار Fill به حذف چاله‌های هیدرولوژیکی DEM اقدام شد و سپس با زیر ابزارهای Hydrology جهت جریان مستقیم و تجمعی ترسیم شد. در نهایت با اجرای روابط ۵ تا ۸ در ابزار Raster Calculator مقدار L و S محاسبه شدند.

$$L = \left[(\text{Flow Accumulation}) * \frac{\text{Cell Size}}{22.1} \right]^m \quad (5)$$

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

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

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

در اینجا θ زاویه شیب بر حسب درصد است (تنگ و همکاران^۱، ۲۰۱۶: ۱۵۸).

- عامل پوشش گیاهی (C):

پرکاربردترین معیار رویش گیاه، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) است که با فناوری سنجش از دور به دست می‌آید (حبشی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۶۹). برای تهیه فاکتور پوشش گیاهی از شاخص NDVI استخراج شده از تصویر سنجنده سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۸ آوریل ۲۰۱۸ با ردیف و گذر ۱۶۷ و ۳۷ استفاده شده است. شاخص NDVI بر اساس رابطه‌ی ۹ در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 محاسبه شده است.

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

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 ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده پوشش گیاهی بیش‌تری می‌باشد (ثنایی نژاد و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۳). بین شاخص NDVI و ضریب C یک رابطه‌ی کامل معکوس وجود دارد (کارابوران^۲، ۲۰۱۰: ۸۰) بدین معنی که با افزایش شاخص 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 که با استفاده از رابطه ۱۰ با ابزار Raster Calculate در محیط Arcmap محاسبه شده است.

$$C = \frac{1-NDVI}{2} \quad (۱۰)$$

- حفاظت خاک (P):

منظور از کارهای حفاظتی، بیش‌تر کشت در روی خطوط تراز، کشت نواری و ترانس‌بندی، درخت‌کاری، جلوگیری از قطع بی‌رویه درختان و جلوگیری از چرای بی‌رویه دام است (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۳۴). در مناطقی که

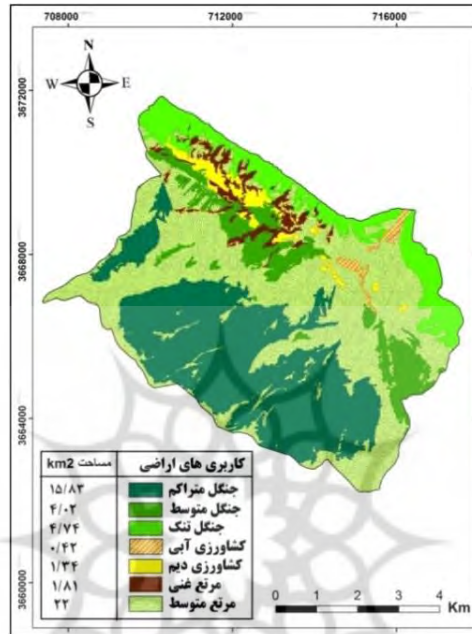
وسعت منطقه مطالعه زیاد باشد، عامل P از طریق اثر خطوط هم‌تراز شیب بر مقدار فرسایش خاک بررسی می‌شود. اگر هیچ‌گونه عملیات حفاظتی انجام نگردد P برابر با یک خواهد بود. برای به محاسبه مقادیر عامل حفاظت خاک، از طریق خطوط هم‌تراز شیب، ویشمایر و اسمیت (۱۹۸۷) جدول ۲ را ارائه دادند (تنگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۵۸ و درزویسکی^۲ و همکاران، ۲۰۱۴: ۸۸۱). در این پژوهش با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متری، لایه درصد شیب برای منطقه مورد مطالعه مطابق با جدول ۲ تهیه و طبقه‌بندی شد که براساس این طبقات ارزش‌های P به رای حوضه به صورت رستری تهیه شد.

جدول (۲): عامل حفاظتی در شیب‌های مختلف

Table (2): Protective factor based on different slopes

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

برای تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه نیز ابتدا تصویر ماهواره سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۸ آوریل ۲۰۱۸ از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده دانلود گردید. سپس تصحیحات رادیومتریک و هندسی لازم بر روی این داده‌ها صورت گرفت. در نهایت با روش طبقه‌بندی نظارت‌شده، الگوریتم حداکثر احتمال به طبقه‌بندی کاربری‌های موجود در محیط ENVI 5.3 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 ۷ طبقه برای حوضه آبریز سیکان استخراج گردید (شکل ۵).



شکل (۵): نقشه کاربری های اراضی سراب سیکان
 Fig (5): Land use map of Sarab Sikan basin

۲-۳-۲- نسبت تحویل رسوب و بار رسوب^۱:

اگر به مقدار کل خاکی که در یک حوضه فرسایش می یابد فرسایش ناخالص اطلاق شود، نسبت حمل رسوب به صورت زیر تعریف می شود:

$$SDR = \frac{Y}{E} \quad (11)$$

در این رابطه Y مقدار رسوب حمل شده در یک نقطه و E مقدار خاک فرسایش شده در بالادست آن نقطه می باشد. هر چه سطح حوضه بزرگ تر باشد فرسایش ناخالص زیادتر و نسبت حمل رسوب در آن کوچکتر خواهد بود (علیزاده، ۱۳۸۹: ۸۱۹). برای تخمین نسبت حمل رسوب (SDR) فرمول های تجربی مختلفی ارائه شده است که در این مطالعه با بکار بردن مدل های زیر مقادیر نسبت حمل رسوب برای حوضه محاسبه گردید. (بیات و مرادی، ۱۳۹۳: ۲۹).

$$SDR = 0.5656 * A^{-0.11} \quad (12) \text{ مدل USDA}^2 (1975)$$

1- Sediment yield (SY)

2- United State Department of Agriculture (SCS)

$$\text{SDR} = 0.4724 * A^{-0.125} \quad (13) \text{ مدل وانونی}^1 (1975)$$

$$\text{SDR} = 0.41 * A^{-0.3} \quad (14) \text{ مدل بويس}^2 (1975)$$

که در سه معادله‌ی فوق A: مساحت حوضه به کیلومتر مربع می‌باشد.

در مرحله بعد با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ با ضرب SDR در هدر رفت خاک، مقدار تولید رسوب سالانه محاسبه شد:

$$\text{SY} = \text{SDR} * \text{SE} \quad (15)$$

SY: تولید رسوب ($\text{ton ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)

SDR: نسبت تحویل رسوب

SE: هدر رفت سالانه خاک با روش RUSLE ($\text{ton ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) می‌باشد.

در نهایت مقدار رسوب ویژه حوضه با رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$\text{SY}_{\text{sp}} = \frac{\text{SY}}{A} \quad (16)$$

SY_{sp} = رسوب ویژه حوضه (تن/هکتار/سال)

SY = رسوب تولیدی (تن/هکتار/سال)

A = مساحت حوضه به هکتار.

۲-۳-۳- تهیه‌ی منحنی سنجه رسوب و اعتبارسنجی با داده‌های هیدرومتری

این مدل، ساده‌ترین مدل برای برآورد دبی رسوب است که در آن تمامی داده‌های رسوب معلق، بدون در نظر گرفتن زمان اندازه‌گیری آن‌ها و یا کلاسه‌بندی مقادیر دبی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر در این مدل، تفکیک داده‌ها صورت نمی‌گیرد. یعنی تنها از یک رابطه رگرسیونی بین تمامی مقادیر دبی رسوب اندازه‌گیری شده و دبی جریان استفاده می‌شود و در نتیجه برای برآورد هر مقدار دبی رسوب در هر زمان و در هر گونه وضعیت جریان تنها از یک رابطه استفاده خواهد شد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۵). بدین منظور از مقادیر نمونه‌برداری بار معلق ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی ایستگاه سیکان طی دوره‌ی آماری (۱۳۸۵ -

۱۳۹۷) حوضه استفاده گردید. لذا جهت برآورد مناسب میزان رسوب از منحنی سنج رسوب، از مقادیر دبی روزانه (مترمکعب بر ثانیه) و رسوب (بار معلق بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) استفاده گردید که معادله آن به صورت زیر می‌باشد.

$$Q_s = 01762 * Q_w^2 + 2.9449 * Q_w - 0.3897 \quad (17)$$

Q_s رسوب بر حسب تن بر روز

Q_w دبی بر حسب متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

با استفاده از معادله‌ی فوق مقادیر رسوب برای کل روزهای سال در ایستگاه سیکان محاسبه شد. در نهایت میانگین رسوب سالانه برای ایستگاه سیکان تخمین و با مقادیر رسوب برآوردی مدل RUSLE مقایسه شد.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- ارزیابی عامل‌های مدل RUSLE

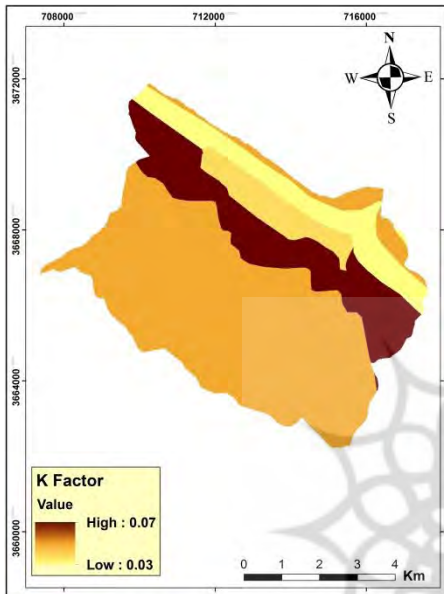
مقادیر فرسایش‌دهی باران و شاخص فورنیه با استفاده از رابطه‌های (۲، ۳ و ۴) برای ۱۰ ایستگاه منطقه طی یک دوره‌ی آماری ۱۷ ساله محاسبه شد (جدول ۳). مقادیر عامل R از ۱۱۶/۱۲ تا ۱۹۳/۸۴ بر حسب $MJ \text{ mm ha}^{-1} h^{-1} y^{-1}$ متغیر و متوسط آن ۱۴۶/۲۸ می‌باشد (جدول ۴). بالاترین ارزش عامل R در جنوب غربی و جنوب حوضه است که بیش‌ترین بارندگی را دارد و کم‌ترین مقادیر آن بر خروجی حوضه منطبق می‌باشد (شکل ۶). به طور کلی هر چه خروجی حوضه به سمت ارتفاعات بالا دست پیش می‌رویم مقادیر R بیش‌تر می‌شود بطوری‌که بین ارزش R و ارتفاع در حوضه مورد پژوهش همبستگی نسبتاً بالایی ($r^2 = 0.71$) برقرار است. بابایی و همکاران (۱۳۹۵: ۱۷۲) در پژوهشی در حوضه‌آبریز کن نشان دادند که مقادیر زیاد فرسایش‌دهی بیش‌تر در مناطقی دیده می‌شود که میزان بارش در منطقه زیاد باشد. همچنین (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹: ۱۳) در حوضه‌آبریز سد ایلام نشان دادند که افزایش و کاهش فاکتور R رابطه نزدیکی با افزایش و کاهش ارتفاع و میزان بارندگی منطقه دارد که همسو با نتایج پژوهش حاضر است. مقادیر فرسایش‌پذیری خاک (K) با استفاده از نمونه‌های پروفیل خاک حوضه آبریز سیمره (جدول ۱) و نمودار تعیین حساسیت فرسایش‌پذیری خاک (شکل ۴) برای هر کدام از اجزاء واحدهای اراضی خاک تعیین گردید که مقادیر آن از ۰/۰۳ تا ۰/۰۷ $t h MJ^{-1} mm^{-1}$ متغیر بوده و متوسط مقدار آن ۰/۰۵ می‌باشد (جدول ۴). بیش‌ترین مقدار K با روندی عرضی تقریباً در قسمت‌های میانی حوضه قرار دارد (شکل ۷). مقادیر بیش‌تر K نشان‌دهنده‌ی بیش‌تر بودن ذرات بسیار ریز شن و سیلت است که در نهایت سبب افزایش فرسایش‌پذیری خاک می‌شود. مقدار عامل LS در حوضه مورد مطالعه از ۰/۰۱ تا ۷۰ در سطح

پیکسل متغیر بوده و مقدار متوسط آن در حوضه ۸/۱۳ می‌باشد (شکل ۸؛ جدول ۴). بیش‌ترین ارزش LS در مناطق با شیب تند کوهستانی و شیب‌های تند مسلط بر آبراهه‌ها و کم‌ترین مقدار آن بر اراضی مسطح و هموار کشاورزی و خط‌القعر 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. ارزش عددی عامل C نیز که عکس مقادیر NDVI می‌باشد از ۰/۱۴ تا ۰/۵۱ متغیر بوده و متوسط آن در حوضه برابر با ۰/۳۸ می‌باشد (شکل ۱۰؛ جدول ۴). این عامل در اراضی کشاورزی که در پایین دست حوضه قرار دارند ارزش ۰/۱۴ تا ۰/۴۵ را نشان می‌دهد که نسبتاً از پوشش گیاهی مناسبی برخوردار می‌باشند. همچنین بیش‌ترین ارزش عامل C با مقدار ۰/۱۶ تا ۰/۵۱ مربوط به مراتع متوسط می‌باشد که از پوشش گیاهی کم‌تری برخوردار است. مقادیر تراکم پوشش گیاهی حوضه نیز از در دامنه ۰/۰۱- تا ۰/۷۱ قرار دارد (شکل ۹). مقادیر عامل حفاظت خاک (P) نیز از ۰/۵ تا ۱ می‌باشد (شکل ۱۱). متوسط مقدار این عامل در حوضه ۰/۹۶ است (جدول ۴). 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.

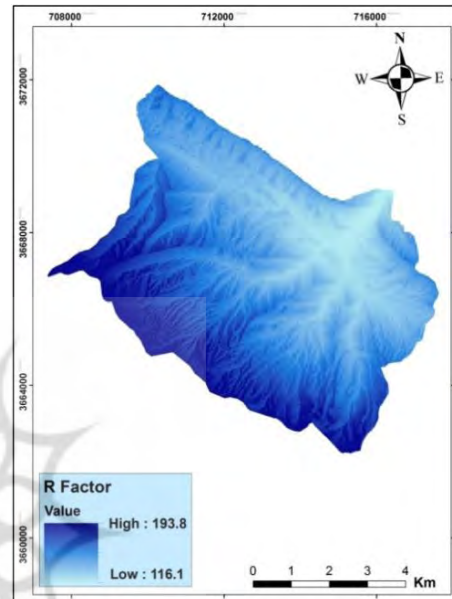
جدول (۳): مقادیر شاخص‌های F و R در ایستگاه‌های مختلف

Table (3): The values of F and R indices in different stations

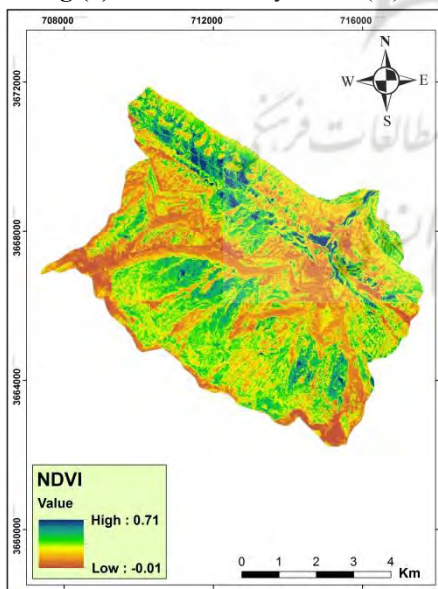
ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	میانگین بارندگی (mm)	MFI	R
ایلام	۴۶/۴۱	۳۳/۶۲	۱۳۶۲	۵۳۳/۹	۸۱/۰	۱۵۹/۱
آبدانان	۴۷/۴۲	۳۳/۰	۹۲۰	۵۳۹/۱	۸۰/۸	۱۵۸/۰
بدره	۴۷/۰۴	۳۳/۳۱	۱۰۶۰	۵۰۶/۲	۷۵/۲	۱۳۵/۸
چشمه شیرین	۴۷/۱۶	۳۳/۲۷	۸۹۳	۴۷۸/۰	۷۱/۵	۱۲۲/۱
زرانگوش	۴۷/۲۲	۳۳/۲۳	۶۹۷	۴۶۵/۵	۶۹/۸	۱۱۵/۹
دره شهر	۴۷/۴۱	۳۳/۱۴	۶۳۰	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



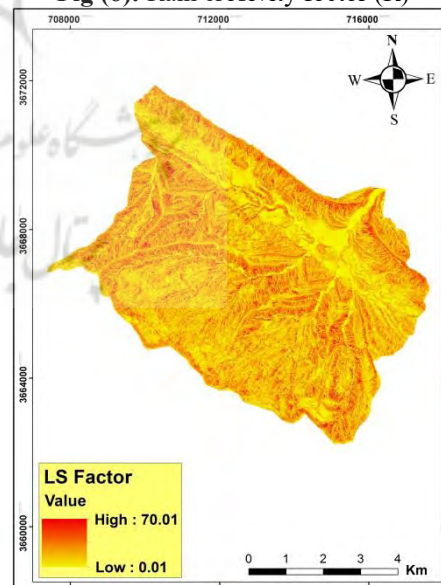
شکل (۷): عامل فرسایش پذیری خاک
Fig (7): Soil erodibility factor (K)



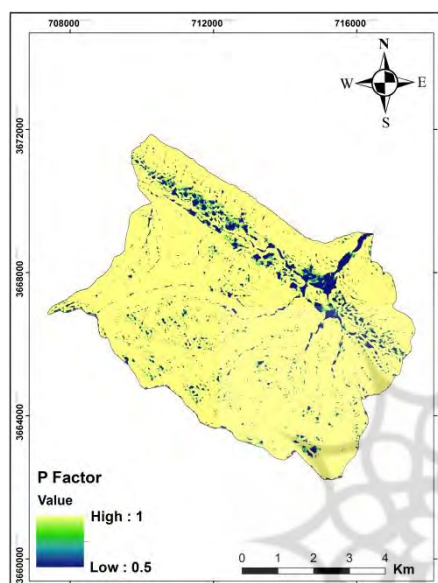
شکل (۶): عامل فرساینده‌گی باران
Fig (6): Rain erosivity factor (R)



شکل (۹): نقشه شاخص پوشش گیاهی
Fig (9): Normalized Difference Vegetation index

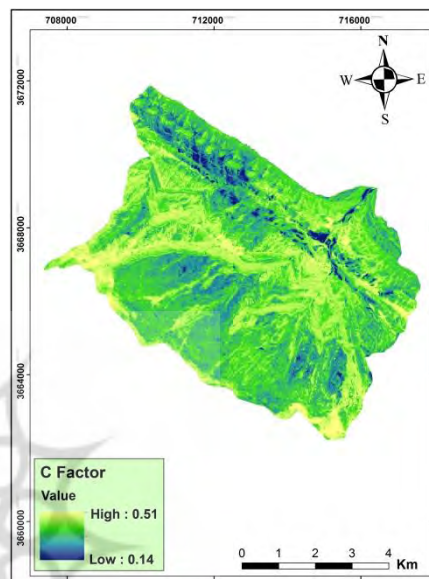


شکل (۸): عامل توپوگرافی
Fig (8): Ttopographic factor (LS)



شکل (۱۱): عامل حفاظت خاک

Fig (11): Soil protection factor (P)



شکل (۱۰): عامل پوشش گیاهی

Fig (10): Vegetation factor (C)

جدول (۴): آماره‌های مربوط به عامل‌های مدل RUSLE

Table (4): Statistics related to RUSLE equation factors in Sikan basin

RUSLE	عامل P	عامل C	عامل LS	عامل K	عامل R	
۰/۰۰۳	۰/۵	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۱۶/۱۲	حداقل
۲۴۸/۴۸	۱	۰/۵۱	۷۰	۰/۰۷	۱۹۳/۸۴	حداکثر
۲۲/۳۴	۰/۹۶	۰/۳۸	۸/۱۳	۰/۰۵	۱۴۶/۲۸	میانگین
۱۹/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۵	۶/۲۸	۰/۰۱	۱۷/۳۶	انحراف معیار

۳-۲- برآورد هدر رفت سالیانه خاک حوضه آبریز سراب سیکان

با توجه به مدل فرسایش حوضه، مقادیر فرسایش خاک در منطقه‌ی مورد مطالعه بین ۰/۰۰۳ تا ۲۴۸/۴۸ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می‌باشد (شکل ۱۲). میزان فرسایش در کل حوضه آبریز سیکان برابر با ۱۰۹۸۹۳۹۵/۷ تن در هکتار در سال، میانگین مقادیر فرسایش خاک ۲۲/۳۴ تن در هکتار در سال و انحراف معیار مقدار فرسایش برآوردی برابر با ۱۹/۰۵ تن در هکتار در سال می‌باشد (جدول ۴). نتایج برآورد فرسایش این پژوهش با نتایج محمدی و همکاران (۱۳۹۷: ۷۵۹) در حوضه آبریز مندرجان اصفهان نزدیک می‌باشد؛ آن‌ها مقدار فرسایش خاک در سال ۱۹۹۴، ۱۹۹۹، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ را به ترتیب ۰/۰۰۱ تا ۲۳۳، ۰/۰۰۱ تا ۲۹۷، ۰/۰۰۱ تا ۲۳۱ و ۰/۰۰۱ تا ۲۱۵ تن در هکتار در سال برآورد کردند. محمدی و همکاران (۱۳۹۷: ۵۵۹) نیز

میانگین فرسایش خاک در مقیاس ایران را حدود ۲۴ تن در هکتار در سال برآورد کردند؛ لذا با توجه به نتایج آن می‌توان گفت میانگین فرسایش در حوضه سیکان (۲۲/۳۴ تن در هکتار در سال)، به میانگین هدر رفت خاک کشور نزدیک می‌باشد. از لحاظ توزیع مکانی، اراضی کشاورزی منطقه که در پایین دست حوضه قرار دارند، با توجه به نقش متوسط حفاظت خاک و پوشش گیاهی مناسب از فرسایش کم‌تری نسبت قسمت‌های دیگر حوضه برخوردار می‌باشد. بیش‌ترین فرسایش حوضه در مراتع متوسط می‌باشد که به علت شیب نسبتاً زیاد و پوشش گیاهی ضعیف، بالاترین مقادیر فرسایش را به خود اختصاص داده است.

همچنین در این پژوهش با استفاده از یک رابطه رگرسیونی میزان اثرگذاری هر یک از عامل‌های مدل RUSLE بر روی هدر رفت خاک تعیین شد. به همین منظور با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.3 و جعبه ابزار Spatial / Band Collection Statistics / Multivariate Analyst Tools میزان رگرسیون خطی لایه‌های P,LS,K,R و C و تأثیر هریک از این پارامترها بر لایه هدر رفت خاک محاسبه شد. نتایج نشان داد که عامل توپوگرافی با ضریب همبستگی ۰/۹۱ بیش‌ترین تأثیر را در فرسایش خاک حوضه سیکان دارد (جدول ۵). اکثر پژوهش‌های صورت گرفته با مدل RUSLE، عامل LS را مهم‌ترین عامل در هدر رفت سالانه خاک معرفی کرده‌اند. میگوئل و همکاران (۲۰۱۱: ۹۲۳۰)، آرخی و نیازی (۱۳۸۹: ۱)، رضایی و همکاران (۱۳۹۳: ۹۷)، بابایی و همکاران (۱۳۹۵: ۱۶۵)، محمدی و همکاران (۱۳۹۷: ۵۵۱)، مختاری و همکاران (۱۳۹۷: ۲) و حبشی و همکاران (۱۳۹۷: ۱۶۱) از جمله پژوهشگرانی هستند که همبستگی بالای فاکتور توپوگرافی با هدر رفت خاک را نشان داده‌اند که همسو با نتایج این پژوهش می‌باشند.

جدول (۵): ضریب همبستگی عامل‌های مدل RUSLE با هدر رفت سالانه خاک

Table (5): Correlation between soil erosion and RUSLE model factors

عامل	ضریب همبستگی	رابطه‌ی رگرسیونی
R	۰/۱۸	$Y = 3.073096X + 001$
K	۰/۱۵	$Y = 1.489252X - 002$
LS	۰/۹۱	$Y = 5.613458X + 001$
C	۰/۳۴	$Y = 1.729394X - 001$
P	۰/۴۰	$Y = 4.480189X - 001$

۳-۳- برآورد بار رسوب حوضه سراب سیکان

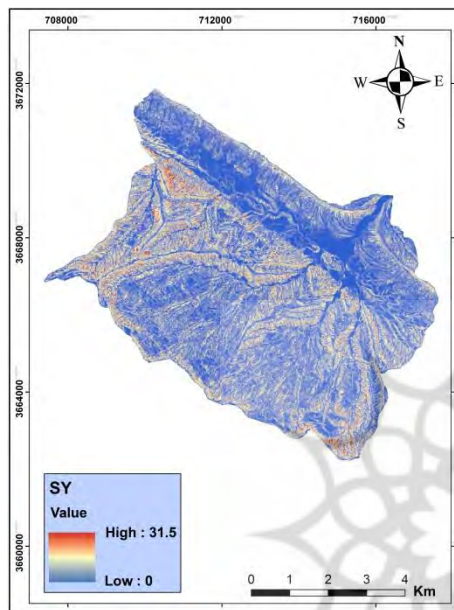
طبق محاسبات انجام گرفته از داده‌های رسوب و دبی روزانه ایستگاه سیکان (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۷) با روش منحنی سنجه رسوب، حوضه مورد مطالعه دارای رسوب‌دهی ۸۱۴۰ تن در سال می‌باشد که با جاگذاری در رابطه‌ی ۱۶ رسوب‌دهی ویژه حوضه به دست آمد. بر این اساس حوضه سیکان دارای متوسط تولید رسوب ۱/۶۵ تن در هکتار

در سال می‌باشد. در این پژوهش مقادیر رسوب برآوردی مدل با روش‌های مختلف SDR از $2/8$ تا $8/2$ تن در هکتار در سال متغیر می‌باشد. مقایسه بار رسوب برآوردی هر سه مدل با رسوب‌دهی ویژه ایستگاه، نشان می‌دهد هر سه مدل، رسوب بیش‌تری را نسبت به رسوب مشاهداتی ایستگاه برآورد کرده‌اند (جدول ۶). این مقدار اختلاف می‌تواند ناشی از خطای محاسباتی عامل توپوگرافی باشد که فرسایش حوضه را تحت تأثیر خود قرار داده است. بطور کلی عامل توپوگرافی در سایر تحقیقات انجام گرفته مقادیر بالایی را به خود اختصاص داده که در خروجی مدل نقش اغراق‌آمیزی را نشان می‌دهد. لذا اصلاح این عامل نیازمند بررسی بیش‌تر و دقیق‌تر روابط با توجه به توپوگرافی هر منطقه می‌باشد. مورد دیگر را می‌توان در خطای مقادیر SDR محاسبه شده، جستجو نمود. بر این اساس معیارهای تأثیرگذار زیادی در برآورد SDR اهمیت دارند که شامل بارندگی، خصوصیات چشم‌انداز (پوشش گیاهی، توپوگرافی و خصوصیات خاک) می‌باشد. در واقع نسبت تحویل رسوب، نمی‌تواند تنها به سطح زهکشی وابسته باشد؛ توپوگرافی، خاک، پوشش گیاهی و شرایط کاربری که همه ارتباط نزدیکی با فرایندهای هیدرولوژیکی دارند نیز، مؤثر هستند. بنابراین برآورد واقعی نسبت تحویل رسوب، زمانی امکان‌پذیر خواهد بود که مدل نسبت تحویل رسوب، همه عوامل مؤثر در ایجاد و تولید رسوب را در حوضه مورد مطالعه را در نظر بگیرد. متأسفانه برآورد واقعی نسبت تحویل رسوب بسیار مشکل بوده و در اغلب موارد به خاطر عوامل کنترلی متعدد، امکان‌پذیر نیست و سبب بروز خطا در نتیجه کلی محاسبات مربوط به نسبت تحویل رسوب خواهد شد (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۷۷). با این حال از بین مدل‌های ذکر شده مدل بویس مقدار نزدیک‌تری به مقدار رسوب ویژه حوضه سیکان را نشان می‌دهد که مقدار اختلاف رسوب برآوردی با رسوب مشاهداتی $1/18$ تن در هکتار در سال می‌باشد. لذا از مدل بویس برای تهیه نقشه بار رسوب استفاده شد (شکل ۱۳).

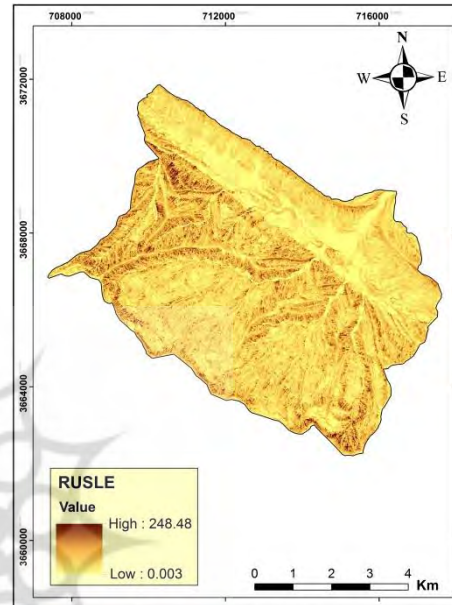
جدول (۶): مقادیر نسبت تحویل رسوب و بار رسوب حوضه‌ی آبریز سیکان

Table (6): The values of SDR and SY in Sikan basin

روش‌های نسبت تحویل رسوب	نسب حمل رسوب	بار رسوب (تن در هکتار در سال)
USDA	۰/۳۶۷	۸/۲۰
Vononi	۰/۲۸۹	۶/۴۶
Boice	۰/۱۲۷	۲/۸۳



شکل (۱۳): نقشه‌ی بار رسوب حوضه سیکان
Fig (13): Sediment Yield map in Sikan basin



شکل (۱۲): نقشه‌ی فرسایش خاک حوضه سیکان
Fig (12): Soil erosion map in Sikan basin

۴- نتیجه‌گیری

به منظور جلوگیری و یا کاهش اثرات فرسایش نیاز به برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات حفاظت خاک و کنترل رسوب در چارچوب طرح‌های آبخیزداری می‌باشد. اما لازمه برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیم درباره مهار فرسایش و رسوب؛ آگاهی از میزان فرسایش و تولید رسوب 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 پژوهش ارزیابی کمی فرسایش و رسوب خاک با استفاده از مدل معروف RUSLE در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی به کار گرفته شد. تمام لایه‌های R, K, LS, C و P جهت برآورد میزان فرسایش در محیط ArcGIS با هم تلفیق شدند و توزیع مکانی فرسایش در قسمت‌های مختلف حوضه به دست آمد. نتایج نشان داد که مقادیر فرسایش حوضه از ۰/۰۰۳ تا ۲۴۸/۴۸ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر است و میانگین فرسایش در حوضه مورد مطالعه ۲۲/۳۴ تن در هکتار می‌باشد. بیش‌ترین مقادیر هدر رفت سالانه خاک در مراتع متوسط با میانگین ۲۶/۷ تن در هکتار در سال و کم‌ترین مقدار هدر رفت خاک در اراضی کشاورزی پایین دست حوضه با میانگین ۴/۸ تن در هکتار در سال می‌باشد. همچنین میزان اثرگذاری هریک از عامل‌های مدل RUSLE بر روی هدر رفت خاک نشان داد که عامل توپوگرافی با ضریب همبستگی ۰/۹۱ بیش‌ترین سهم را در هدر رفت

سالانه خاک حوضه سراب سیکان دارد. در مرحله بعد به منظور تخمین رسوب تولیدی، سه روش USDA (سرویس حفاظت خاک آمریکا)، وانونی و بویس مورد استفاده قرار گرفت که با آمار رسوب ایستگاه سیکان مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مقادیر برآوردی بار رسوب در هر سه روش، از بار رسوب ویژه ایستگاه سیکان بیش تر می باشند؛ اما مدل بویس برآورد نزدیک تری را به رسوب ویژه ایستگاه سیکان نشان داد. به همین منظور از مدل بویس که رسوب کم تری را برآورد نموده نقشه بار رسوب حوضه تهیه گردید. از جمله کاربردهای مهم نقشه هدر رفت خاک و تولید رسوب، شناسایی مناطق بحرانی تخریب و جا به جایی خاک می باشد، به طوری که از طریق توزیع مکانی فرسایش خاک، می توان بخش های مختلف حوضه را جهت انجام عملیات های حفاظت خاک و آبخیزداری اولویت بندی نمود. لذا در این مطالعه سعی شد از اطلاعات به دست آمده از سنجش از دور، و قابلیت های سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ایجاد داده های مورد نیاز جهت ایجاد فاکتورهای مدل RUSLE استفاده شود که نتیجه آن به دست آمدن اطلاعات خروجی با کیفیت بالا و قابلیت به روزرسانی آسان بود. بنابراین سنجش از دور و GIS می توانند به صورت مؤثر، در توسعه راه کارهای مدیریتی و فراهم آوردن گزینه های انتخابی برای مدیران، جهت حل مسأله فرسایش خاک به کار گرفته شوند.

۵- منابع

- Absaran Consulting Engineers. (2010). Sikan reservoir dam studies, second stage. pp, 437.
- Alizadeh, A. (2010). Principles of Applied Hydrology. *Imam Reza University Press*, 30, pp. 912.
- Arekhi, S; & Niazi, Y. (2010). Investigating Application of GIS and RS to Estimate Soil Erosion and Sediment Yield Using RUSLE (Case Study: Upper Part of Ilam Dam Watershed, Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*, 17(2), 1-27.
- Armin, M; Valinejad, H; GHorbannia.kheybari, V. (2020). Estimation of Soil Erosion in the Tang-e-Sorkh Dam Watershed Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) Capabilities. *Hydrogeomorphology*, 6, No, 23, 159-183.
- Babaei, M., Hoseini, S.Z.A., Nazari Samani, A.A., & Almodaresi, S.A. (2015). Soil Erosion Zoning Using RUSLE 3D Model, Case study: Can basin. *Watershed Engineering and Management*, 8(2), 165-181.
- Bayat, R; Moradi, SH. (2014). Review of Research Conducted on the Sediment Delivery Ratio. *Extension and Development of Watershed Management*, 2 (5), 27-36.
- Drzewiecki, W; Wężyk, 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.
- Gaubi I, Chaabani A, Mammou AB, Hamza M. (2017). A GIS-based soil erosion prediction using RUSLE model (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). *Natural Hazards*, 86 (1), 219-239.
- Habashi, Kh; Mohammadi, Sh; Karimzadeh, H.R; Pourmanafi, S. (2018). Assessment soil erosion risk in Kohpayeh- segzi plain using Revised Universal Soil Loss Equation (RSLE). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7, (15):161-178.
- 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.
- Karimi, H; Fathizad, H; Tavakoli, M; Bazgir, M; Graee, P. (2013). Evaluation the Efficiency of MUSLE Model in Sediment Load Estimation Resulting from Individual Rain Events in Doviraj River Sub-Basins, Ilam Province. *Environmental Erosion Researches*, No, 11, 39-54.
- Kinnell, P.I.A. (2000). AGNPS-UM: applying the USLE-ithin the agricultural non-point source pollution model. *Environmental Modelling and Software*, 15(3), 331-341.

- Meghraoui M, Habi M, Morsli B, Regagba M, Seladji A. (2017). Mapping of soil erodibility and assessment of soil losses using the RUSLE model in the Sebaa Chioukh Mountains (northwest of Algeria). *Journal of Water and Land Development*, 34 (1), 205-213.
- Miguel P.A., Samuel-Rosa R., Simao Diniz Dalmolin F., ArajoPedron J., & MouraBueno A. (2011). The USLE model for estimating soil erosion in complex topography areas. *Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing*, (SBSR), Brasil, 9227-9230.
- Mohammadi, M; Falah, M; Kavian, A. A; GHolami, L; Omidvar, E. (2017). The Application of RUSLE Model in Spatial Distribution Determination of Soil loss Hazard. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 3 (4), 645-658.
- Mohammadi, SH; Karimzadeh, H.R; Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5 (2), 551-569.
- Mohammadi, SH; Karimzadeh, H.R; Pourmanafi, S; Soltani, S. (2018). Spatial and Temporal Evaluation of Soil Erosion using RUSLE model Landsat satellite image time series (Case Study: Menderjan, Isfahan). *Journal of Range and Watershed Management*, 71(3), 759-774.
- Mokhtari, L.G., Shafiei, N., & Rahmani, A. (2018). Estimation of soil erosion using RUSLE model, a case study of Noorabad Mamasani basin. *Hydrogeomorphology*, 17, 1-21.
- Panagos, P; Borrelli, P; Poesen, J; Ballabio, C; Lugato, E; Meusburgerb, K; Montanarella, L & Alewell, CH. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438- 447.
- 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, *Journal of Hydrology*. 157, 287-306.
- Rezaei, PY; faridi, P; Ghobani, M; Kazemi, M. (2014). Estimation of Soil Erosion Using RUSLE Model and Identification of the Most Effective Factor in the Erosion of the Gabrik Basin, *Quantitative Geomorphological Research*, 3 (1), 97-113.
- Sanaienejad, S. Shah Tahmasbi, A. Sadr Abadi Haghighi, R. Kelarestani, K. (2008), A Study of Spectral Reflection on Wheat Fields in Mashhad Using MODIS Data. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*, 12 (45), 11-19.
- Shahrivar, A; Noor, H; Khazaei, M. (2017). Environmental issues of soil erosion. *Arshadan publisher*, 1,pp 164.

- 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.
- Vrieling, A., G. Sterk., & N. Beaulieu. (2002). Erosion risk mapping: a methodological case study in the Colombian Eastern Plains. *Soil and Water Conserve*. 57(3), 158-163.
- Wischmeier, W.H; & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*. US Department of Agriculture. Washington DC, 537, 13-27.

