

پهنه‌بندی فرسایش خاک با استفاده از مدل **RUSLE 3D**، مطالعه موردی: حوزه آبخیز کن

مهناز بابایی^{۱*}، سید زین‌العابدین حسینی^۲، علی‌اکبر نظری سامانی^۳ و سید علی المدرسی^۴
^۱ کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی یزد، ^۲ استادیار، دانشکده منابع طبیعی و کوبرشناسی، دانشگاه یزد، ^۳ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران و ^۴ استادیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه آزاد اسلامی یزد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۹

چکیده

فرسایش خاک و تولید رسوب امروزه به یکی از معضلات مهم طبیعی تبدیل شده است. در گام نخست مبارزه با این معضل باید به ارزیابی کمی فرسایش خاک و تولید رسوب پرداخت. در این رابطه مدل‌ها و روش‌های مختلفی ارائه شده است. آنچه مسلم است، قبل از هر چیزی باید قابلیت این مدل‌ها مورد راست آزمایی قرار گیرند. بدین منظور از معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده سه بعدی در قالب ابزار سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبخیز کن سولقان استفاده شد. عامل فرساینده، با استفاده از اطلاعات بارش و با تکنیک درون‌یابی IDW پهنه‌بندی شد. مقادیر فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از اطلاعات نمونه‌برداری خاک در قالب نقشه واحدهای قابلیت اراضی محاسبه شد. تخمین عامل پوشش زمین با استفاده از شاخص تفکیک نرمال شده گیاهی NDVI انجام شد. عامل پستی و بلندی نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع محاسبه شد. پهنه‌بندی عامل عملیات حفاظتی نیز با استفاده از نقشه شیب منطقه به درصد صورت گرفت. با ترکیب این عوامل بر اساس مدل، مقدار میانگین سالانه فرسایش ۲۰/۲۲ تن در هکتار در سال به دست آمد. برای محاسبه بار رسوب از روش‌های محاسبه SDR استفاده شد که بر این اساس متوسط سالیانه رسوب در هر یک از روش‌ها بسیار بیشتر از رسوب ویژه حوضه در ایستگاه سولقان بود. رسوب ویژه حوضه محاسبه شده با استفاده از آمار ایستگاه هیدرومتری سولقان (۱/۸۲ تن در هکتار در سال) بود. این پژوهش همچنین نشان داد، عامل LS با ضریب همبستگی ۰/۶۸ درصد بیشترین تاثیر را در برآورد فرسایش سالیانه خاک داشته است. نتایج حاصل از این تحقیق در زمینه کاربرد مدل در این منطقه دلالت بر این داشت که مدل، میزان فرسایش حوضه را بسیار بیشتر از حد انتظار تخمین زده است. این تحقیق کارایی مدل **RUSLE 3D** را در بررسی وضعیت فرسایش حوزه آبخیز کن سولقان مناسب نمی‌داند.

واژه‌های کلیدی: رسوب، سامانه اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور، سولقان، IDW

مقدمه

یکی از اصلی‌ترین فرایندهای تخریب اراضی در مناطق مختلف دنیا به شمار می‌آید و در تمام نقاط زمین در حال پیشروی است و نقش اساسی در تغییر و تحول

خاک یکی از مهمترین منابع طبیعی هر کشور است. از طرفی فرسایش (اعم از آبی و بادی) به‌عنوان

در اتخاذ تدابیر مدیریتی برای بهبود وضعیت حفاظت خاک برای آینده یاری خواهد کرد. این محققان دقت بیشتر معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده سه بعدی در تخمین توزیع مکانی مناطق تولید رسوب و ارزیابی اثر پوشش گیاهی بر آن را از مزیت‌های این مدل برشمردند، بر اساس نتایج آن‌ها تمامی عوامل دخیل در مدل مهم‌اند، اما مناطق دارای پوشش گیاهی ضعیف به‌طور قابل ملاحظه‌ای شاهد افزایش میزان فرسایش نسبت به مناطق مشابه می‌باشند، پس بنابراین با توجه به کافی بودن پوشش گیاهی در منطقه باید در جهت حفظ و ارتقای آن برای اجتناب از افزایش فرسایش کوشید. Roşca و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه دو مدل معادله جهانی تلفات خاک و نسخه تجدید نظر شده سه بعدی آن پرداختند.

بر اساس مقایسات آماری آن‌ها با پلات‌های آزمایشی مقادیر به‌دست آمده از مدل معادله جهانی تلفات خاک در ارتباط با فرسایش ورقه‌ای بود، بر این اساس این مدل تنها برای استفاده در سطوح کوچک مانند پلات مناسب می‌باشد. اما معادله تجدید نظر شده سه بعدی با انعکاس بهتر میزان واقعی فرسایش قابلیت استفاده در سطوح بزرگ‌تر را دارا می‌باشد. آن‌ها همچنین، به مقایسه میزان فرسایش به‌دست آمده از روش‌های مختلف برآورد عامل پوشش گیاهی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که منابع اطلاعاتی به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی خوب مانند شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده در مقایسه با عکس‌های هوایی از کارایی و دقت بیشتری برخوردار می‌باشند.

Feghhe Hosseini (۲۰۱۴) با استفاده از معادله RUSLE 3D و تکنیک GIS به برآورد مقدار هدر رفت خاک در حوضه طالقان پرداخته است. او میانگین سالانه فرسایش خاک را در حوضه طالقان در حدود ۳۱/۹۶ تن در هکتار تخمین زد. همچنین، ایشان ذکر کردند که استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور برای برآورد عامل‌های مدل معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده سبب به‌دست آمدن اطلاعات خروجی با کیفیت بالا و قابل به روز رسانی بودن آن‌ها می‌شود، بنابراین سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌توانند به‌صورت مؤثر در

سطح زمین ایفا می‌کند. بنابراین تعیین عوامل مؤثر بر فرسایش و رسوب و پیش‌بینی مقدار فرسایش خاک، نخستین گام در ارائه راهکارهای حفاظت از خاک می‌باشد. تهیه نقشه پراکنش تلفات خاک در سطح وسیع، با روش سنتی بسیار مشکل و هزینه بر می‌باشد. دانشمندان بسیاری از جمله ویشمایر و اسمیت، نیرینگ و همکاران، و... مدت زیادی است که درگیر تحقیقات فرسایش خاک هستند، و تاکنون مدل‌های زیادی را برای تخمین فرسایش خاک ارائه داده‌اند. معادله جهانی فرسایش خاک و معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده به‌طور گسترده برای پیش‌بینی هدر رفت خاک به‌کار برده شده‌اند.

معادله جهانی فرسایش خاک در اصل برای پیش‌بینی تلفات خاک در اراضی زراعی با شیب ملایم ارائه شده است (Smith و Wischmeier, ۱۹۷۸)، اما معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده برای کاربری‌های مختلف گسترش یافته است که شامل جنگل، مراتع، زراعی، و اراضی بایر می‌باشد (Renard و همکاران, ۱۹۹۷). عوامل لازم برای این مدل به‌وسیله مشاهدات مزرعه‌ای محاسبه و یا تخمین زده می‌شوند. اخیراً Mitasova و همکاران (۱۹۹۶)، با ارائه فرمول دقیق‌تری جهت برآورد عامل LS، مدل معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده سه بعدی را معرفی کرد. کاربرد مدل‌های فرسایش و رسوب جهت انجام پروژه‌های مدیریتی و تحقیقاتی در سطوح وسیع مانند حوزه آبخیز، با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی امکان‌پذیر می‌باشد، زیرا در این صورت است که تخمین فرسایش خاک و توزیع مکانی آن با هزینه‌های پایین‌تر و دقت بیشتر انجام می‌پذیرد (Mersey و Millward, ۱۹۹۹).

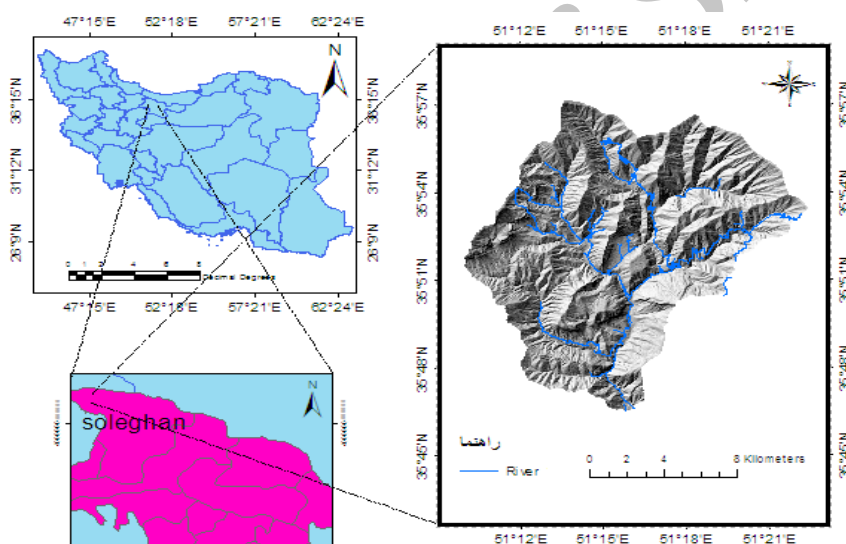
ترکیب سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی و معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده می‌تواند فرسایش خاک را سلول به سلول تخمین بزند (Mersey و Millward, ۱۹۹۹). Giménez Suárez (۲۰۱۲)، جهت بررسی وضعیت فرسایش در منطقه کاستلون اسپانیا از معادله جهانی تجدید نظر شده سه بعدی تلفات خاک بهره بردند، به گفته آن‌ها مدل‌های فرسایش از قبیل معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده سه بعدی با پیش‌بینی الگوی فرسایش، ما را

دریا می‌باشد. شیب متوسط کل حوضه ۴۳/۵ درصد می‌باشد. متوسط دمای گرم‌ترین ماه در حوضه کن ۱۹ درجه و متوسط دمای سردترین ماه ۴/۲- درجه سانتیگراد است. منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی در سیستم دوماتن قرار می‌گیرد و دارای آب و هوای خشک سرد تا مرطوب فرا سرد می‌باشد و میزان بارندگی سالانه منطقه حدود ۶۲۵ میلی‌متر است. مهمترین رودخانه این منطقه کوهستانی رودخانه کن می‌باشد. در این منطقه دو رده خاک تشخیص داده شده که عبارتند از رده انتی سول‌ها و رده اینسپتی سول که عمدتاً شامل رژیم رطوبتی زیرک و رژیم حرارتی خاک عمدتاً مزیک می‌باشد و در ارتفاعات بالا ممکن است، رژیم حرارتی خاک فریجید نیز باشد.

توسعه راهکارهای مدیریتی و فراهم آوردن گزینه‌های انتخابی برای مدیران، جهت حل مساله فرسایش خاک به‌کار گرفته شوند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی کارایی مدل در برآورد مقدار فرسایش جهت کاربرد در مناطق مشابه، پهنه‌بندی فرسایش خاک و به‌دست آوردن وضعیت کلی فرسایش در منطقه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی: حوضه آبخیز کن به مساحت ۲۰۵۷۱ هکتار بین طول‌های جغرافیایی $51^{\circ} 10'$ تا $51^{\circ} 23'$ طول شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ} 36'$ تا $35^{\circ} 5'$ عرض شمالی واقع شده است. بلندترین ارتفاع حوضه ۳۸۴۰ متر، کمترین ارتفاع منطقه ۱۲۶۰ متر و ارتفاع متوسط حوضه آبخیز کن ۲۴۱۱ متر از سطح



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران

ذرات خاک در ارتباط با فرسایش آبی است (Lal, ۱۹۹۴). معمول‌ترین شاخص فرسایش باران، عامل R مربوط به معادلات فرسایش جهانی خاک و فرسایش خاک تجدید نظر شده می‌باشد. بررسی مقالات علمی نشان می‌دهد، در بسیاری از نقاط دنیا، عامل R همبستگی بالایی با فرسایش خاک دارد (Smith و Wischmeier, ۱۹۷۸). عامل R برای دوره‌های مختلف، از حاصل‌ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I_{30}) به‌دست می‌آید. از آنجایی که نمودار بارندگی و

روش پژوهش: در مطالعه حاضر، هدف پیش‌بینی پتانسیل هدر رفت سالیانه خاک می‌باشد. بدین منظور، مدل تجدید نظر شده سه بعدی جهانی هدر رفت خاک، در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌کار رفته است. این مدل یک مدل برآورد فرسایش آبی است که با شش عامل فرسایشی زیر رابطه دارد (Smith و Wischmeier, ۱۹۷۸).

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

عامل فرسایش باران: فرسایش باران، نیروی محرکه یا توان عوامل فرسایش‌زا در جداسازی و انتقال

داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، اغلب از مقادیر متوسط بارندگی ماهانه و سالیانه، جهت برآورد عامل R در مدل‌های USLE و RUSLE استفاده می‌شود (Ferreira و Renard، ۱۹۹۳).

برای محاسبه انرژی جنبشی باران از داده‌های مربوط به بارندگی که از باران نگار به دست می‌آید، استفاده می‌شود. برای این منظور مدت بارندگی به تعدادی فاصله‌های کوچک تقسیم می‌شود. با مشخص بودن شدت بارندگی در هر فاصله مقدار انرژی جنبشی باران به وسیله یکی از فرمول‌های مرسوم محاسبه و در مقدار بارندگی آن جزء زمانی ضرب می‌شود. بدین ترتیب انرژی جنبشی در هر دوره محاسبه می‌شود. با جمع انرژی جنبشی در تمام فواصل انرژی جنبشی رگبار به دست می‌آید. در واقع ترکیب انرژی جنبشی باران KE و بزرگ‌ترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای در طول زمان بارندگی، I_{30} ، که شاخص EI_{30} یا شاخص ویشمایر نامیده می‌شود، توانایی هر باران را در جداسازی ذرات خاک و انتقال آن نشان می‌دهد (Smith و Wischmeier، ۱۹۷۸). در این صورت شاخص فرسایش‌دگی باران برای یک سال عبارت است از مجموع EI_{30} رگبارهای به وقوع پیوسته در طول یک سال و متوسط سالیانه شاخص R عبارت است از:

$$F = \sum_{i=1}^{12} P_i^2 / \sum_{i=1}^{12} P \quad (3)$$

که در آن، P_i متوسط بارندگی بر حسب (میلی‌متر) در ماه i و p متوسط بارندگی سالانه بر حسب (میلی‌متر) است. با جاگذاری شاخص فورنیه در روابط (۴) و (۵) که برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار پیشنهاد شده، عامل R برای ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه می‌شود (Renard و Ferreira، ۱۹۹۳).

$$R\text{-factor} = (0.07397 \times F1.847) / 17.2$$

$$F < 55 \quad (4)$$

$$R\text{-factor} = (95.77 - 6.081 \times F + 0.447F_2) / 17.2$$

$$F \geq 55 \quad (5)$$

برای تبدیل مقادیر برآورد نقطه‌ای عامل فرسایش‌دگی باران به سطح نقشه از یک از روش‌های میان‌یابی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. در این تحقیق روش میان‌یابی IDW نسبت به روش‌های میان‌یابی اسپیلاین و کریجینگ از میزان RMSE خطای کمتری برخوردار بود، به همین دلیل به عنوان روش میان‌یابی مناسب انتخاب شد.

عامل فرسایش‌پذیری خاک: در این مطالعه، جهت پهنه‌بندی نقشه فرسایش‌پذیری خاک از نقشه ارزیابی و قابلیت اراضی ۱:۲۵۰۰۰ و داده‌های مربوط به نوع خاک‌های نمونه‌برداری شده به صورت تصادفی (۳۶) پروفیل خاک، عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در قالب نقشه قابلیت اراضی، استفاده شد (شرکت جهاد آب و انرژی، ۱۳۸۲). مقادیر K از صفر تا یک متغیر است. بدین صورت که مقادیر زیاد برای خاک‌های دارای سیلت یا شن خیلی ریز است و خاک‌هایی با مقادیر بالای رس که خود یک عامل پایداری است، دارای میزان K حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ می‌باشند. جهت محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک از رابطه (۷)

داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، اغلب از مقادیر متوسط بارندگی ماهانه و سالیانه، جهت برآورد عامل R در مدل‌های USLE و RUSLE استفاده می‌شود (Ferreira و Renard، ۱۹۹۳).

برای محاسبه انرژی جنبشی باران از داده‌های مربوط به بارندگی که از باران نگار به دست می‌آید، استفاده می‌شود. برای این منظور مدت بارندگی به تعدادی فاصله‌های کوچک تقسیم می‌شود. با مشخص بودن شدت بارندگی در هر فاصله مقدار انرژی جنبشی باران به وسیله یکی از فرمول‌های مرسوم محاسبه و در مقدار بارندگی آن جزء زمانی ضرب می‌شود. بدین ترتیب انرژی جنبشی در هر دوره محاسبه می‌شود. با جمع انرژی جنبشی در تمام فواصل انرژی جنبشی رگبار به دست می‌آید. در واقع ترکیب انرژی جنبشی باران KE و بزرگ‌ترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای در طول زمان بارندگی، I_{30} ، که شاخص EI_{30} یا شاخص ویشمایر نامیده می‌شود، توانایی هر باران را در جداسازی ذرات خاک و انتقال آن نشان می‌دهد (Smith و Wischmeier، ۱۹۷۸). در این صورت شاخص فرسایش‌دگی باران برای یک سال عبارت است از مجموع EI_{30} رگبارهای به وقوع پیوسته در طول یک سال و متوسط سالیانه شاخص R عبارت است از:

$$R = 1/n \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (E)_K (I_{30})_K \right] \quad (2)$$

که در آن، n شماره سال، n تعداد سال‌های آماری مورد استفاده، k شماره رگبار و m تعداد رگبارهای اتفاق افتاده در سال زام می‌باشد.

در این مطالعه جهت محاسبه عامل فرسایش‌دگی باران، بعد از تعیین ۱۳ ایستگاه شاخص (شکل ۲) ابتدا داده‌های رگبار حاصل از ایستگاه‌های ثابت که در فواصل ۱۵ دقیقه‌ای موجود بود (ایستگاه‌های سنگان، امامزاده داوود و زندان) با دوره آماری مشترک تهیه شد و طبق روابط ذکر شده در بالا عامل فرسایش‌دگی باران برای این ایستگاه‌ها محاسبه شد. برای محاسبه عامل فرسایش‌دگی باران، برای ایستگاه‌هایی که دارای باران‌سج معمولی هستند، از شاخص فورنیه استفاده شده که همبستگی بالای این شاخص در تحقیقات زیادی به اثبات رسیده است. از این‌رو آمار بارندگی

میانگین نقاط برآورد شده در هر واحد اراضی به کل آن واحد در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تعمیم داده شد. با توجه به اینکه مناطق با بیرون زدگی بیش از ۷۰ درصد دارای فرسایش پذیری نزدیک به صفر و بدون فرسایش پذیری می باشند، برای اصلاح اثر آنها از تصاویر ماهواره ای لندست استفاده شد. در نهایت پس از لحاظ این موارد، نقشه نهایی عامل فرسایش پذیری خاک در سطح حوضه تهیه شد.

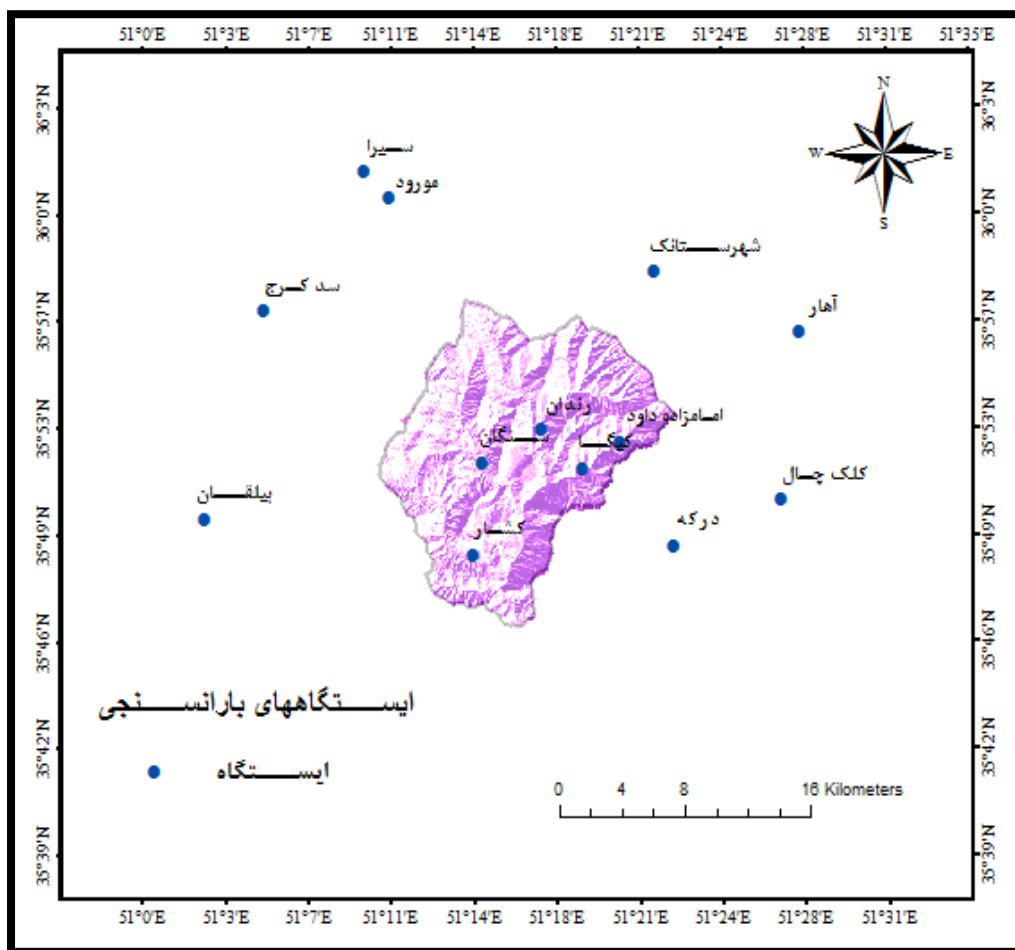
استفاده شد (Romkens و همکاران، ۱۹۸۹).

$$K = 0.0035 \times 0.0388 \times \exp[-0.5 \times \left(\frac{\log Dg + 1.519}{0.7584} \right)^2] \quad (۶)$$

$$Dg = \exp a \quad (۷)$$

$$a = \exp \left[\sum 0.01 \times f_i \times \ln(m_i) \right] \quad (۸)$$

که در آن، Dg میانگین هندسی قطر ذره های خاک به (میلی متر) می باشد. f_i درصد فراوانی هر یک از اجزای بافت خاک (شن، سیلت و رس) است. سپس



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه های باران سنجی داخل و اطراف حوضه کن سولقان

از فناوری سنجش از دور به دست می آید. برای محاسبه این شاخص گیاهی از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۱۳ استفاده شد. بدین ترتیب که با شناسایی منطقه مورد نظر تصاویر ماهواره ای مربوط به پنج ماه اردیبهشت، خرداد، شهریور، مهر و آذر برای سال مورد نظر از سایت سازمان زمین شناسی ایالات متحده دانلود شد. برای محاسبه عامل پوشش زمین از

عامل پوشش زمین: در مدل جهانی فرسایش خاک تجدید نظر شده، عامل پوشش گیاهی (c)، معمولاً بر اساس معادلات تجربی تعیین می شود (Wischmeier و Smith، ۱۹۷۸). روش پر کاربرد دیگری با استفاده از فن سنجش از دور در تخمین و پهنه بندی این عامل توصیه می شود. این روش پر کاربرد، استفاده از شاخص تفکیک پوشش گیاهی نرمال شده است که با استفاده

پارامترهای مدل هستند. m و n به ترتیب برابر با $0/4$ و $1/3$ می‌باشند. برای محاسبه عامل توپوگرافی ابتدا با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی به محاسبه رستر شیب حوضه به درجه پرداخته شد.

برای محاسبه مساحت ویژه حوضه با استفاده از ابزار الحاقی Arc hydro 10 در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی ابتدا به محاسبه رستر تجمع جریان پرداخته شد. بدین صورت که ابتدا مدل رقومی منطقه با دقت ۱۰ متر به وسیله ابزار پرکننده گودی‌ها اصلاح شده، سپس از مدل رقومی اصلاح شده رستر جهت جریان تهیه و در نهایت از آن رستر تجمع برای کل حوضه به دست آمد. برای محاسبه مساحت بالادست خطوط تراز، رستر تجمع جریان در قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع ضرب شد و در نهایت از تقسیم آن بر قدرت تفکیک مکانی، مساحت ویژه (As) به دست آمد (Terranova و همکاران، ۲۰۰۹).

عامل عملیات حفاظتی: بر حسب تعریف، عامل P ، نسبت خاک فرسایش یافته در شرایط انجام عملیات حفاظتی به فرسایش ایجاد شده در شرایط استاندارد یعنی شخم در جهت شیب است (Renard و همکاران، ۱۹۹۷).

در حال حاضر، عملیاتی از قبیل شخم روی خطوط تراز، کشت نوری بر روی خطوط تراز، تراسبندی و ایجاد آبروهای دائمی، درخت‌کاری، جلوگیری از چرای بی‌رویه دام متداول بوده و بسته به شرایط محیط، به کار گرفته می‌شوند. چون در منطقه مورد مطالعه عملیات حفاظتی تراسبندی انجام شده است. با استفاده از جدول ۱ و ایجاد نقشه شیب به درصد عامل P در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی محاسبه و تهیه شد.

تهیه نقشه فرسایش خاک: فرسایش متوسط سالیانه خاک از طریق حاصل ضرب عامل‌های فرسایش‌دهی باران، عامل فرسایش‌پذیری، عامل توپوگرافی، عامل مدیریت پوشش گیاهی و عامل عملیات حفاظتی و با استفاده از ابزار محاسباتی سامانه اطلاعات جغرافیایی محاسبه شد.

تصاویر سالی استفاده شده است که میزان بارندگی در آن سال نرمال باشد و از آنجا که مقدار پوشش به زمان در سال بستگی دارد، از ماه‌هایی استفاده شد که میزان پوشش خوب و تقریباً متراکم باشد. سپس مقادیر شاخص گیاهی NDVI برای هر یک محاسبه شد. این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد.

$$NDVI = IR - R / IR + R \quad (9)$$

سپس عامل C از نمایه گیاهی NDVI با استفاده از معادله (۱۰) تخمین زده شد.

$$C = (1 - NDVI) / 2 \quad (10)$$

در نتیجه با استفاده از روابط بالا مقدار C در هر سلول می‌تواند مورد محاسبه قرار گیرد. از آنجایی که مقادیر عامل C ، بین صفر و یک می‌باشد، مقدار صفر به پیکسل‌هایی با مقادیر منفی و عدد یک به پیکسل‌هایی با مقدار بیشتر از یک اختصاص خواهد یافت. بین مقادیر NDVI و عامل C به‌طور کامل رابطه معکوس وجود دارد.

عامل پستی و بلندی: عامل‌های L و S در مدل جهانی فرسایش تجدید نظر شده سه بعدی، بیانگر تاثیر توپوگرافی بر روی فرسایش خاک می‌باشد. تاثیرات ویژه توپوگرافی روی فرسایش خاک به‌وسیله عامل LS (بدون واحد) برآورد می‌شود. اخیراً محققان برای استفاده در سطوح وسیع مانند حوضه با جایگزینی مساحت شیب بالادست به جای طول شیب معادله اصلاح شده‌ای را ارائه کرده‌اند که اثر توپوگرافی را در شیب‌های پیچیده بهتر منعکس می‌کند (Mitasova و همکاران، ۱۹۹۶). با استفاده از رابطه (۱۱) که جایگزین معادله عامل توپوگرافی در مدل جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده شده است، این عامل محاسبه شد.

$$LS(r) = (m+1) [A_s(r)/a_0]^m [\sin B(r)/\sin b_0]^n \quad (11)$$

که در آن، As مساحت ویژه حوضه، r زاویه شیب (درجه)، a_0 طول کرت استاندارد (که برابر $22/13$ متر می‌باشد)، b_0 شیب کرت استاندارد و m و n

جدول ۱- مقادیر عامل عملیات حفاظتی بر اساس کشت در منطقه

شیب (درصد)	کشت روی خطوط تراز	کشت نواری	تراس بندی	بدون اقدامات حفاظتی
۰-۱	۰/۸	-	-	۱
۱-۲	۰/۶	۰/۳	-	۱
۲-۷	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱	۱
۷-۱۲	۰/۶	۰/۳	۰/۱۲	۱
۱۲-۱۸	۰/۸	۰/۴	۰/۱۶	۱
۱۸-۲۴	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۹	۱

بررسی کلی مدل: جهت بررسی مدل روش‌های گوناگونی وجود دارد. این بررسی هم می‌تواند کمی باشد، مانند استفاده از داده‌های کرت‌های آزمایشی در حوضه و یا استفاده از داده‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی باشد. به دلیل وسعت منطقه امکان ایجاد کرت آزمایشی در حوضه کن وجود نداشت. اما این حوضه دارای یک ایستگاه رسوب‌سنجی در سولقان می‌باشد که می‌توان از داده‌های آن جهت بررسی کمی مدل استفاده کرد.

مقایسه با رسوب خروجی: بر اساس تحقیقات صورت گرفته، کل فرسایش خاک در یک منطقه با میزان بار رسوب در همان منطقه یکسان نمی‌باشد. در این پژوهش به منظور محاسبه نسبت تحویل رسوب از روش‌ها و رابطه‌های جدول ۲ استفاده شد. سه روش اول بر اساس مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع پایه‌ریزی شده‌اند. در مدل ویلیامز و برنت SLP شیب آبراهه اصلی می‌باشد. در مدل رنفرو R/L شاخص

پستی و بلندی می‌باشد و عبارت است از نسبت اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقطه (نقطه خروجی) حوضه به حداکثر طول حوضه به موازات زهکش اصلی. برای ارزیابی رسوب برآورد شده مدل‌ها، از داده‌های ایستگاه هیدرومتری سولقان با دوره آماری بلندمدت ۴۰ ساله استفاده شد. بدین ترتیب که با استفاده از داده‌های دبی جریان روزانه و رسوب ایستگاه هیدرومتری کن سولقان، رسوبدهی کل حوضه به روش منحنی حد وسط دسته‌ها محاسبه شد. برای به‌دست آوردن رسوبدهی ویژه، به‌طور قراردادی از رابطه (۱۲) استفاده شد.

$$SY_{sp} = SY / A \quad (12)$$

که در آن، SY_{sp} رسوبدهی ویژه (تن بر هکتار در سال)، SY رسوبدهی کل (تن در هکتار در سال) و A مساحت (هکتار) می‌باشد. بدیهی است، مدلی که کمترین خطا را با مقدار به‌دست آمده از فرمول بالا را داشته باشد، بهترین مدل خواهد بود.

جدول ۲- روابط مربوط به محاسبه SDR

شماره	مدل	رابطه
۱	مدل بویس (۱۹۷۵)	$SDR = 0.5656A^{(-0.11)}$
۲	مدل وزارت کشاورزی امریکا (۱۹۷۲)	$SDR = 0.3750A^{(-0.2382)}$
۳	مدل وانونی (۱۹۷۵)	$SDR = 0.4724A^{(-0.125)}$
۴	مدل ویلیامز و برنت (۱۹۷۲)	$SDR = 0.627 \times SLP^{0.403}$
۵	مدل مانفرو و رنفرو (۱۹۷۵)	$LOGSDR = 0.294259 - 0.82362 LOG(R/L)$

اعتبارسنجی با داده‌های هیدرومتری: اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده گام مهمی در ارزیابی فرسایش خاک است. با توجه به این‌که خالص فرسایش خاک با مقدار فرسایش یکی نیست و تنها بخشی از خاک فرسایش یافته به‌صورت رسوب در خروجی حوضه

مشاهده می‌شود. بنابراین باید برای دستیابی به مقدار میانگین فرسایش منطقه، آن را در نسبت تحویل رسوب ضرب کرد تا به رسوبدهی حوضه رسید و سپس می‌توان آن را با آمار ایستگاه هیدرومتری کن سولقان مقایسه کرد.

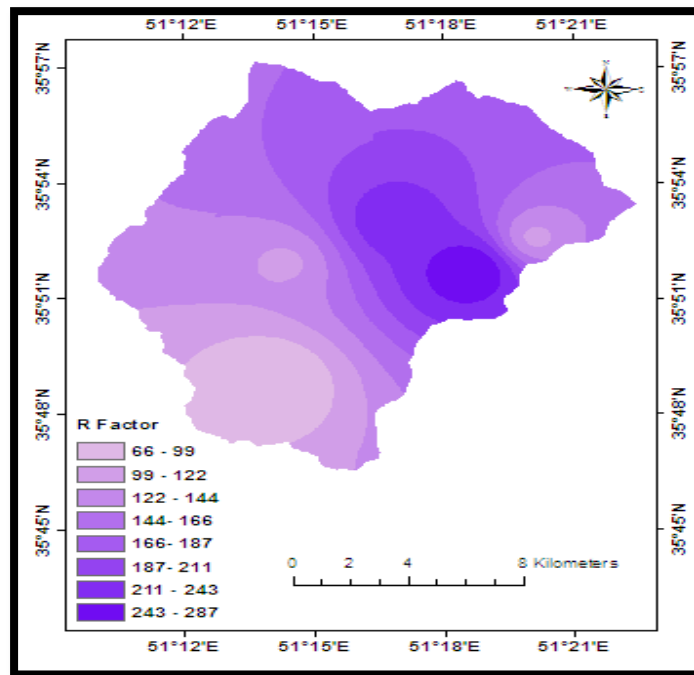
نتایج و بحث

مناطقى که بارندگى منطقه کمتر است، باید اتفاق افتد. بر این اساس با این که مقادیر به دست آمده از داده‌های بارش برای عامل فرسایشی درست و منطقی به نظر می‌رسد، ولی محققان دیگر در سایر مناطق با همین میزان بارندگی مشابه با حوضه کن سولقان مقادیری کمتری را به دست آوردند. به طور مثال، Feghhe Hosseini (۲۰۱۴) برای حوضه طالقان مقادیر عامل فرسایشی باران را از ۴۲ تا ۷۹ (بارندگی متوسط ۵۰۰ تا ۶۵۰ میلی‌متر) تخمین زد. میانگین عامل فرسایشی در منطقه طالقان برابر با $(67 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1})$ به دست آمد که به طور متوسط از مقادیر عامل فرسایشی حوضه کن سولقان با بارندگی متوسط ۶۲۵ میلی‌متر کمتر است. مهدی پژوهش و همکاران در سال ۱۳۹۰ نیز عامل فرسایشی را برای سد زاینده‌رود علیا برای کل حوضه با میزان بارندگی متوسط ۶۵۶ میلی‌متر در سال معادل ۷۴ برآورد کردند که باز هم در مقایسه با حوضه کن سولقان مقدار کمتری را نشان می‌دهد.

عامل فرسایشی باران: بر اساس آمار ۱۲ ساله، ۱۳ ایستگاه در محدوده مورد مطالعه عامل R محاسبه شد. مقادیر عامل فرسایشی باران در حوضه از ۶۶ تا ۲۸۸ متغیر بوده و مقدار متوسط و انحراف معیار آن به ترتیب برابر ۱۵۶/۴۶ و ۴۳/۲۹ می‌باشد. مقادیر محاسبه شده عامل فرسایشی باران و موقعیت جغرافیایی هر ایستگاه در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، قسمت‌های شرقی، مرکزی و شمالی حوضه به علت عدم توزیع زمانی متعادل بارندگی بیشترین مقادیر عامل فرسایشی باران را به خود اختصاص می‌دهند که ارتفاع بالاتری داشتند و قسمت‌های شمال شرقی، غربی و جنوبی حوضه کمترین میزان از این عامل را به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۳). به طور معمول، مقادیر زیاد فرسایشی باران بیشتر در مناطقی دیده می‌شود که میزان بارش در منطقه زیاد باشد و به همین ترتیب مقادیر کمتر در

جدول ۳- مقادیر محاسبه شده عامل فرسایشی باران برای ایستگاه‌های باران‌سنجی در منطقه کن سولقان

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	بارندگی (mm)	شاخص فرسایشی باران $\text{MJmmha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{y}^{-1}$
کیگا	۵۲۸۰۱۰	۳۹۶۸۶۲۸	۱۸۰۰	۴۴۵	۲۸۸
رندان	۵۲۵۳۹۸	۳۹۷۰۹۸۷	۲۰۲۶	۳۱۴	۲۳۳
سنگان	۵۲۱۵۷۷	۳۹۶۹۰۰۱	۱۹۶۹	۲۶۱	۱۱۸
امامزاده داوود	۵۳۰۳۳۰	۳۹۷۰۲۴۷	۲۵۲۱	۲۴۲	۱۱۷
کشار	۵۲۱۰۷۹	۳۹۶۳۴۱۴	۱۷۷۸	۲۱۸	۶۶
آهار	۵۴۱۷۵۶	۳۹۷۶۸۸۰	۲۱۰۰	۴۲۷	۲۰۶
شهرستانک	۵۳۲۵۱۷	۳۹۸۰۵۲۷	۲۱۵۰	۴۱۲	۱۷۱
درکه	۵۳۳۷۵۰	۳۹۶۴۰۰۰	۱۷۰۰	۲۵۵	۹۹
کلک چال	۵۴۰۶۳۷	۳۹۶۶۷۳۹	۲۵۵۸	۲۹۳	۱۷۸
سیرا	۵۱۴۱۳۸	۳۹۸۶۵۴۹	۱۷۹۰	۳۷۳	۱۶۵
مورود	۵۱۵۷۵۰	۳۹۸۵۰۰۰	۲۱۵۰	۳۲۷	۱۶۸
سد کرج	۵۳۲۵۱۷	۵۰۷۷۵۲	۱۶۱۳	۲۸۱	۱۰۵
بیلقان	۵۰۳۹۸۹	۳۹۶۵۵۵۸	۱۳۶۰	۱۸۴	۳۹



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی فرسایندگی باران در منطقه کن سولقان

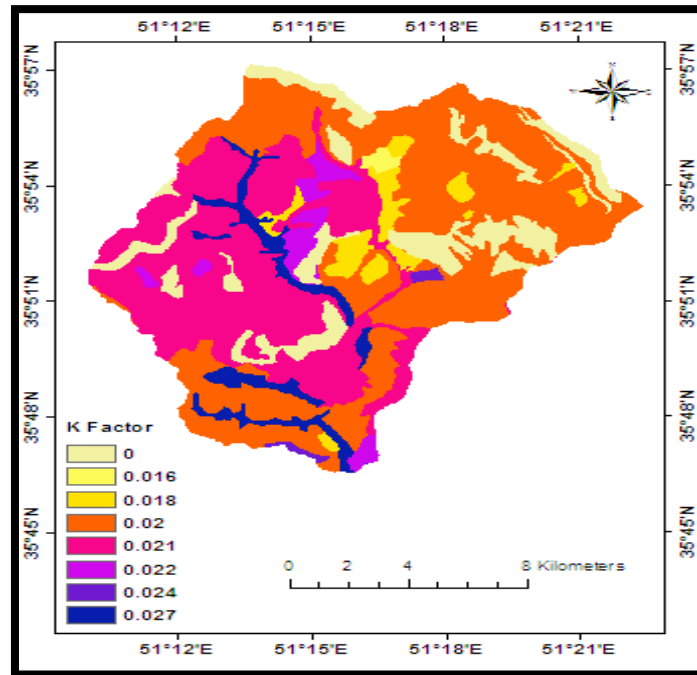
در منطقه می‌باشند (شکل ۴).

عامل پوشش زمین: مقادیر عامل پوشش گیاهی برای منطقه کن سولقان از ۰/۲۹ برای مناطق با پوشش گیاهی بالا و ۰/۵ برای مناطق با پوشش گیاهی ضعیف متغیر می‌باشد و میانگین آن برای حوضه ۰/۴۵ به‌دست آمد (شکل ۵). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کمترین مقادیر عامل C در مناطق پایین‌دست شیب‌ها می‌باشند. بر این اساس پوشش گیاهی منطقه به شدت تحت تاثیر پستی و بلندی می‌باشد و با افزایش شیب در منطقه از میزان این عامل کاسته می‌شود.

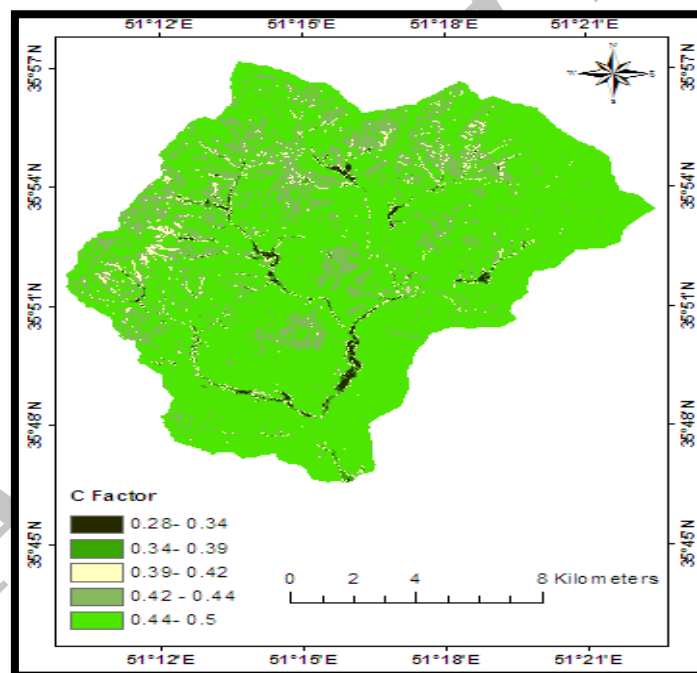
عامل فرسایش‌پذیری خاک: متوسط مقدار k در منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۰/۰۲۷ متغیر بوده و مقدار متوسط و انحراف معیار آن به ترتیب ۰/۰۱۸ و ۰/۰۷ Mghahha⁻¹MJ⁻¹mm⁻¹ متغیر می‌باشد. مقادیر عامل k برای انواع مختلف خاک و واحدهای قابلیت اراضی در جدول ۴ آمده است. خاک‌های مناطق مرکزی و قسمتی از جنوب حوضه مورد مطالعه به‌دلیل عبور رودخانه کن سولقان حساس به فرسایش بوده و از فرسایش‌پذیری بیشتری برخوردارند. قسمت‌های شمالی و شرقی دارای کمترین میزان فرسایش‌پذیری

جدول ۴- مقادیر عامل فرسایش‌پذیری خاک برای واحدهای قابلیت اراضی حوضه کن سولقان

درصد وسعت	میزان فرسایش‌پذیری Mghahha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹	واحد اراضی	تیپ اراضی
۴۹/۴۹	۰/۰۲	۱/۱	
۳۴/۹۴	۰/۰۲۱	۱/۲	کوه
۰/۴۹	۰/۰۱۶	۱/۳	
۴/۷	۰/۰۱۸	۲/۱	
۳/۹۴	۰/۰۲۲	۲/۲	تپه
۰/۵۳	۰/۰۲۴	۲/۳	
۵	۰/۰۲۷	۳/۱	فلات‌ها و تراس‌های فوقانی



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک حوزه کن سولقان

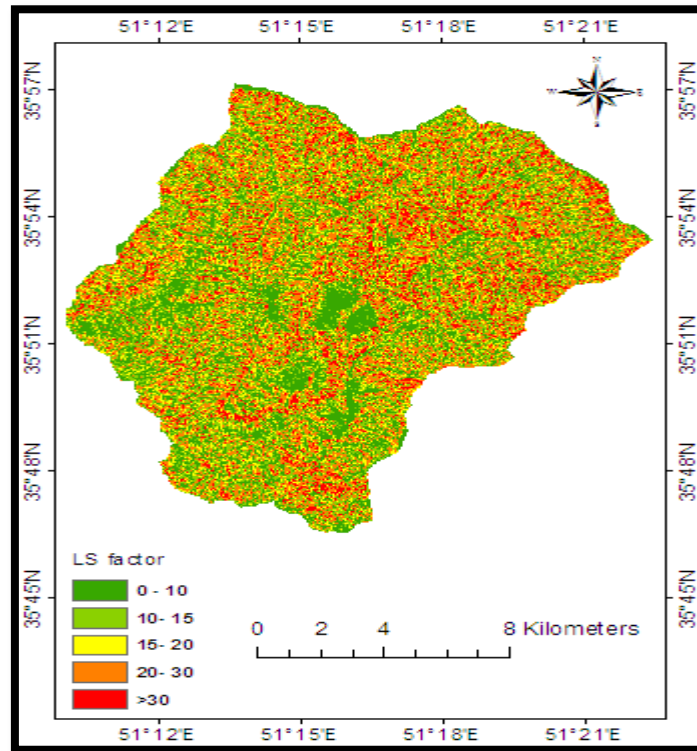


شکل ۵- نقشه عامل پوشش زمین حوزه کن سولقان

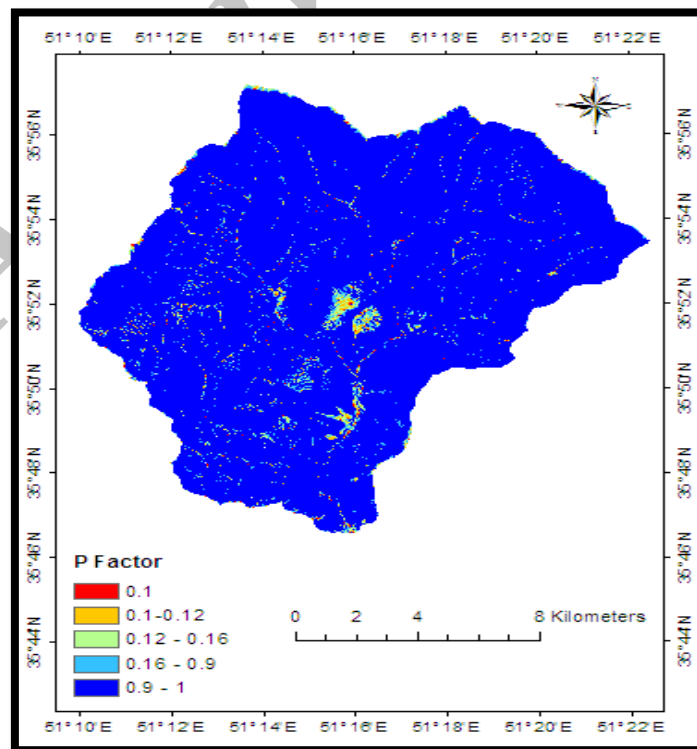
مطالعه و دارا بودن توپوگرافی شدید قسمت‌های مرکزی، شمالی و شرقی بیشترین مقادیر این عامل را به خود اختصاص می‌دهند و فقط قسمت‌های کوچکی از مرکز و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه مقادیر کمی از این عامل را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین، مقادیر بالای این عامل در مناطقی که تجمع

عامل پستی و بلندی: ارزش مقادیر عامل پستی و بلندی بین صفر تا ۶۵ تخمین زده شده است. بیشترین مقادیر این عامل در شیب‌های بیشتر از ۱۰ درصد ملاحظه می‌شود که این نشان تاثیر بالای شیب در محاسبه است (شیب منطقه از صفر تا ۶۴ درجه متغیر می‌باشد). به دلیل کوهستانی بودن حوزه مورد

جریان اتفاق افتاده است دیده می شود (شکل ۶).
 عامل عملیات حفاظتی: با استفاده از نقشه شیب
 حوضه به درصد از صفر تا ۲۰۸ درصد محاسبه شد و
 مقادیر این عامل از ۰/۱ تا یک متغیر می باشد (شکل
 ۷).



شکل ۶- نقشه عامل پستی و بلندی حوضه کن سولقان



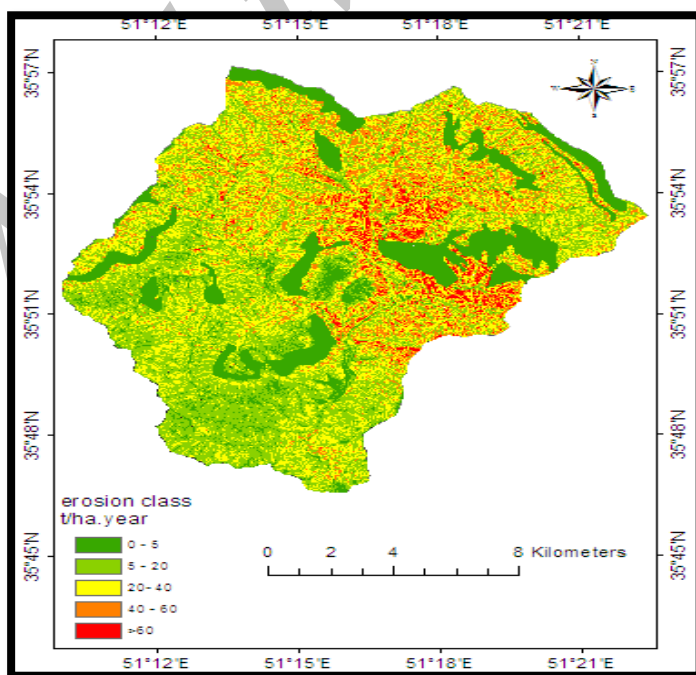
شکل ۷- نقشه عامل حفاظتی حوضه کن سولقان

میزان رستر تجمع جریان در آبراهه‌ها، عامل توپوگرافی به شدت افزایش می‌یابد (Niazi و Arekhi، ۲۰۱۲). قسمت‌های جنوبی و جنوب غربی و همچنین قسمت‌های کم شیب دارای خطر کمتری از فرسایش در حوضه هستند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و آماری SPSS به بررسی روابط رگرسیونی بین عوامل مدل و میزان فرسایش به‌عنوان متغیر وابسته به پارامترهای مدل پرداخته شد (جدول ۵). بر این اساس عامل پستی و بلندی با داشتن ضریب همبستگی ۰/۸۶ بیشترین تاثیر را در برآورد سالیانه خاک داشت. با توجه به این همبستگی زیاد با تلفات خاک، این عامل نقش اساسی در توزیع مکانی فرسایش بازی می‌کند.

فرسایش سالیانه خاک: متوسط هدر رفت سالانه خاک حوضه کن سولقان، از طریق محاسبات هم‌پوشانی پنج نقشه عامل‌های 3D RUSLE در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی محاسبه شد. مقادیر فرسایش از صفر تا ۱۲۱ تن در هکتار متغیر است (شکل ۹). بر طبق نتایج به‌دست آمده از مدل، متوسط هدر رفت سالانه خاک منطقه در حدود ۲۲/۲۰ تن در هکتار در سال محاسبه شد. در قسمت‌های شمالی و مرکزی حوضه به‌دلیل تاثیر توپوگرافی شدید، فرساینده‌گی بالا و فقر پوشش گیاهی شاهد افزایش فرسایش در این مناطق هستیم. همچنین، در این مناطق تاثیر عبور جریان تجمعی رودخانه کن سولقان نیز مشخص است و با افزایش

جدول ۵- روابط رگرسیونی بین هر یک از عوامل مدل و میزان هدر رفت خاک

رابطه رگرسیونی	ضریب همبستگی با تلفات خاک	
$Y = 346.04x + 36.75$	۰/۰۶	فرسایش پذیری خاک
$Y = 6.25 + 1.239x$	۰/۳۹	فرساینده‌گی باران
$Y = 6.822x + 0.915$	۰/۶۸	پستی و بلندی
$Y = 558.291x - 133.119$	۰/۱۳	پوشش زمین
$Y = 146.91x - 22.86$	۰/۲۲	عملیات حفاظتی



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی و کلاس‌بندی شده فرسایش خاک حوضه کن سولقان

به دست می‌آید. بر این اساس حوضه کن سولقان دارای متوسط تولید رسوب $1/82$ تن در هکتار در سال می‌باشد. آنچه مسلم است، داده‌های مورد تحلیل بیشتر بر اساس جدول تقویم زمانی از رودخانه‌های ایران اخذ می‌شوند و این امر موجب نادیده گرفتن عوامل جدی حمل رسوب می‌شود. به طوری که در سیلاب اخیر (تابستان ۱۳۹۴) حجم جریان منتقل شده معادل چندین ده برابر مقدار متوسط سالانه بوده است (۳۰۰ مترمکعب در ثانیه بر اساس برآوردهای اداره منابع طبیعی تهران). بنابراین در عمل نیز مقدار رسوب خارج شده از این حوضه بیشتر از مقدار برآوردی می‌باشد. میزان مقادیر برآوردی تولید رسوب در تمام مدل‌های وانونی، بویس، وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا، ویلیامز و برنت و مانفرو و رنفرو، جدول ۶ بیشتر از مقدار رسوب مشاهداتی است.

بررسی اعتبارسنجی مدل با داده‌های هیدرومتری: برای دستیابی به میانگین خطر فرسایش منطقه، باید میانگین خطر فرسایش محاسبه شده به وسیله مدل را در نسبت تحویل رسوب ضرب کرد تا به رسوبدهی حوضه رسید و سپس می‌توان آن را با آمار مشاهده‌ای ایستگاه رسوب‌سنجی مقایسه کرد. بدین منظور میانگین خطر فرسایش که برابر با $22/20$ تن در هکتار در سال می‌باشد، در نسبت تحویل رسوب برآورد شده از هر یک از مدل‌ها ضرب شد. طبق محاسبات انجام گرفته از داده‌های رسوب و دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری کن سولقان (دوره آماری ۱۳۴۸-۱۳۹۰) با روش منحنی سنج رسوب حد وسط دسته‌ها، حوضه مورد مطالعه دارای رسوبدهی سالانه $37379/32$ تن در سال است که با جاگذاری در رابطه (۱۲) رسوبدهی ویژه حوضه

جدول ۶- میزان رسوب برآوردی (تن در هکتار در سال) حوضه کن سولقان برای ایستگاه سولقان

برآورد رسوب*	نسبت تحویل رسوب	مدل تخمین نسبت تحویل رسوب
۶/۹۳	۰/۳۱	بویس
۲/۳۲	۰/۱۰	وانونی
۵/۳۴	۰/۲۴	وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا
۵/۵۶	۰/۲۵	ویلیامز و برنت
۱۰/۵۵	۰/۴۷	مانفرو و رنفرو

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، در این میان توپوگرافی، خاک، پوشش گیاهی و شرایط کاربری که همه ارتباط نزدیکی با فرایندهای هیدرولوژیکی دارند نیز، موثر هستند.

بنابراین نتایج به دست آمده می‌تواند گمراه کننده باشد. بنابراین برآورد واقعی نسبت تحویل رسوب، زمانی امکان‌پذیر خواهد بود که مدل نسبت تحویل رسوب، همه عوامل موثر 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

علت اختلاف رسوب مشاهده‌ای با مقادیر برآوردی مدل می‌تواند ناشی از وجود خاک کم عمق در بسیاری از نقاط حوزه آبخیز و یا وجود توده‌های سنگی فراوان در منطقه کن سولقان باشد. چرا که در این صورت با وجود خاک‌های بسیار کم عمق و یا نبود خاک در منطقه، فرسایش و رسوب قابل توجهی مشاهده نخواهد شد. طبق گزارشات موجود در طرح تفصیلی حوزه آبخیز کن سولقان اراضی صخره سنگی حدود $35/92$ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین، انجام اقدامات حفاظتی مانند ترانس‌بندی، درخت‌کاری، کپه‌کاری و ... توسط اهالی منطقه در سال‌های اخیر از میزان فرسایش و رسوب به میزان قابل توجهی کم نموده است. مورد دیگر را می‌توان در خطای مقادیر SDR محاسبه شده، جستجو نمود. بر این اساس معیارهای تاثیرگذار زیادی در

مطالعه و تاثیر این امر در ایجاد خطاهای فراوان در درون‌یابی دانستند.

عامل پستی و بلندی (LS): روش‌های مختلفی برای محاسبه عامل پستی و بلندی وجود دارد. اگرچه مناسب بودن این معادله مورد استفاده، در مدل‌های فرسایش و رسوب به اثبات رسیده است، ولی محدودیت‌هایی را هم شامل می‌شود. مقادیر m و n که در معادله استفاده شدند. تنها نتایج رضایت‌بخش در شیب‌های کمتر از ۱۴ درجه خواهد داشت (Moore و Wilson، ۱۹۹۲).

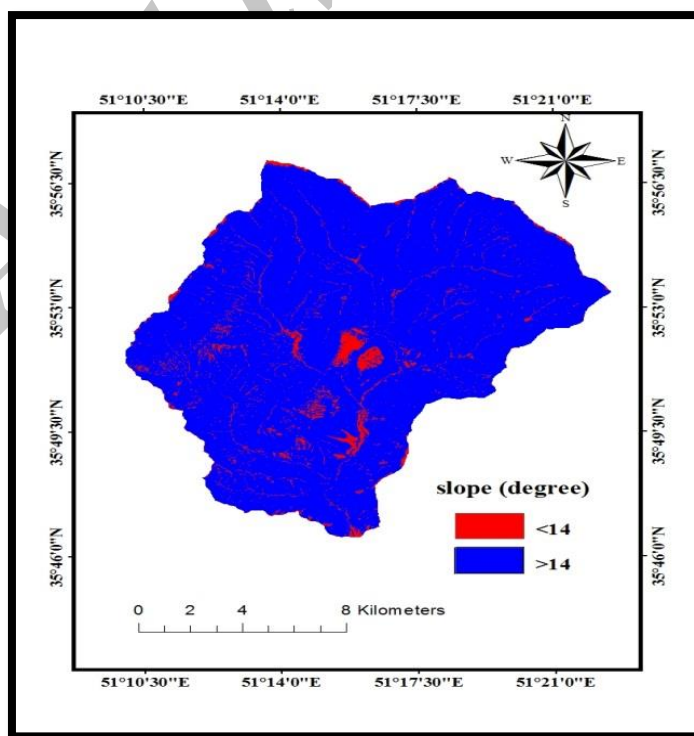
بیشتر زوایای شیب (شکل ۹) در منطقه کن (به‌ویژه شمال حوضه) بیشتر از ۱۴ درجه می‌باشد (مقادیر شیب در منطقه از صفر تا ۶۴ درجه متغیر می‌باشد). همین مورد باعث می‌شود، نتایج قابل قبول نباشد. با توجه به شکل ۱۰، ۲۶/۶۱۱ درصد از ارزش‌های عامل پستی و بلندی در منطقه مورد مطالعه بین ۲۰ تا ۳۰ بوده است و با توجه به روابط رگرسیونی بالاترین همبستگی ۰/۶۸ را عامل پستی و بلندی با میزان فرسایش داشته است که باعث تاثیر زیاد این عامل در برآورد فرسایش شده است.

مربوط به نسبت تحویل رسوب خواهد شد.

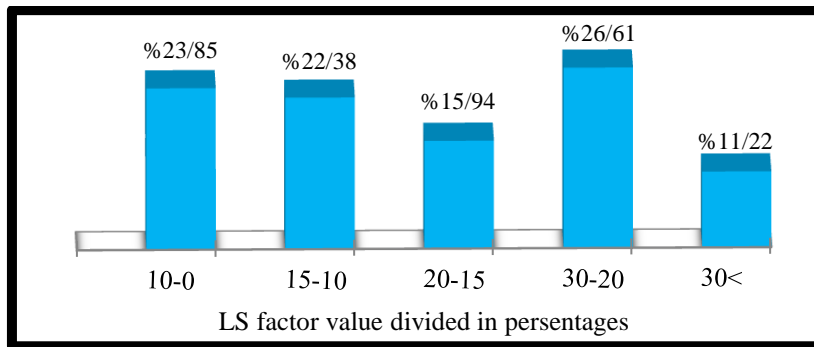
اعتبارسنجی داده‌ها و روش‌های به‌کار رفته در مدل

عامل فرساینده‌گی باران (R): به‌طور معمول عامل فرساینده‌گی باران از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و یا باران‌نگارها محاسبه می‌شوند. از آنجا که از این ایستگاه‌ها، داده‌های نقطه‌ای به‌دست می‌آید، تکنیک‌های درون‌یابی برای ایجاد نقشه عامل فرساینده‌گی باران مورد نیاز می‌باشند. در واقع درون‌یابی، هنگامی که نقاط نمونه به‌طور مساوی در منطقه توزیع شده باشند و ترجیحا در فاصله کمی از یکدیگر قرار گیرند، نتایج قابل اطمینانی می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده شد، در منطقه مورد مطالعه نقاط مربوط به مقادیر فرساینده‌گی باران به‌طور نامنظم در منطقه توزیع شده‌اند که همین امر ممکن است، در برآورد عامل فرساینده‌گی باران ایجاد خطا نماید. You و Lu در سال ۲۰۰۲ در مطالعه‌ای در استرالیا تفاوت زیادی را بین مقادیر برآوردی (حاصل از داده‌های باران) و پیش‌بینی شده (درون‌یابی) عامل فرساینده‌گی باران یافتند. آن‌ها این خطاها و تفاوت‌ها را بیشتر ناشی از پراکنده بودن ایستگاه‌ها در منطقه مورد



نقشه ۹- نقشه طبقه‌بندی شیب حوضه کن سولقان



شکل ۱۰- عامل پستی و بلندی (LS) به درصد

آمد.

عامل اقدامات حفاظتی (P): با توجه به این که مقادیر این عامل با توجه به شیب منطقه محاسبه شده است. ممکن است به دلیل کوهستانی بودن منطقه در نقاط با شیب بالا کمتر اقدامات حفاظتی صورت گیرد. بنابراین در نظر گرفتن مقادیر یکسان برای یک سطح وسیع در منطقه ممکن است، ایجاد خطا در محاسبات کلی را موجب شود. در حوضه کن سولقان بسیاری اقدامات حفاظتی سنتی نظیر درخت کاری و سکوبندی توسط اهالی محل صورت می گیرد که مقادیر P برای این چنین اقداماتی تعیین نشده است.

نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل RUSLE 3D برای محاسبه فرسایش آبی در منطقه کن سولقان استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان فرسایش از صفر تا ۱۲۱ تن در هکتار در سال متغیر می باشد. با توجه به نقشه سالیانه فرسایش، به دلیل وجود مناطق پرشیب در قسمت های شرقی، شمالی و مرکزی حوضه و به دلیل تاثیر زیاد عامل پستی و بلندی بر فرسایش حوضه این عامل نسبت به سایر عوامل و همچنین، تاثیر زیاد عامل فرسایش باران بعد از عامل توپوگرافی این قسمت ها دارای میانگین فرسایش بیشتری هستند.

پس با توجه به رسوب برآوردی از ایستگاه هیدرومتری سولقان و با توجه به نتایج بخش اعتبارسنجی، مدل تجدید نظر شده سه بعدی برای محاسبه فرسایش در منطقه سولقان مدل مناسبی نیست. مدل جهانی فرسایش خاک تجدید نظر شده سه بعدی برای مناطق کوهستانی نظیر منطقه کن

عامل فرسایش پذیری خاک: اندازه گیری مقدار واقعی عامل فرسایش پذیری خاک با استفاده از کرت های آزمایشی در منطقه امکان پذیر خواهد بود، که اجرای چنین روش هایی، بسیار هزینه بر، زمان بر و مشکل می باشد. طبق تحقیقات به عمل آمده مقدار برآوردی عامل فرسایش پذیری خاک همواره از مقدار واقعی بیشتر می باشد. واعظی و صادقی در سال ۲۰۱۱ در دو منطقه، شمال آند و ناحیه ای نیمه خشک در شمال غربی ایران به مقایسه مقدار عامل فرسایش پذیری واقعی و برآوردی پرداختند. آن ها دریافتند که میزان عامل فرسایش پذیری برآوردی بیشتر از مقدار واقعی است. در محاسبه مقدار واقعی این عامل کلیه عوامل تاثیرگذار در فرسایش مانند عوامل آب و هوایی، فیزیکی و شیمیایی خاک دخیل می باشند.

عامل پوشش گیاهی (C): امروزه، تکنیک های سنجش از دور رایج ترین روش برای محاسبه عامل پوشش گیاهی می باشد. برای این پژوهش، ضریب c با کمک نقشه NDVI محاسبه شده است که همبستگی زیادی با پوشش گیاهی و بیومس دارد (Saavedra, 2005). برای به دست آوردن نتایج قابل اعتماد باید تصاویر با درصد پوشش ابر کمتر انتخاب شود. با این حال، نه تنها پوشش ابر بلکه دوره زمانی تصاویر مورد استفاده نیز در صحت نتایج موثر می باشد. از آنجا که مقدار پوشش به زمان در سال بستگی دارد. تصاویر ترجیحا باید مربوط به ماه های متوالی در یک سال باشد. در این مطالعه، شش تصویر برای محاسبه نقشه NDVI استفاده شده است. هر چه تعداد تصاویر در یک سال بیشتر باشد، نتایج بهتری به دست خواهد

می‌کند، زیرا این مدل در ایالات متحده آمریکا توسعه یافته است و در کل به این مناطق اختصاص دارد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود، جداولی در رابطه با اقدامات حفاظتی سنتی که توسط اهالی محل انجام می‌شود، برای عامل حفاظتی برای هر منطقه تهیه شود. اندازه‌گیری و برآورد میزان SDR به‌طور دقیق برای مناطق مختلف کشور انجام شود تا میزان خطا در تحقیقاتی از این دست کاهش یابد. ایجاد یک پایگاه داده از وضعیت فرسایش در حوضه و بررسی تغییرات آن در دوره‌های زمانی مختلف، جهت کمک به روند تصمیم‌گیری مدیران و مسئولان منطقه می‌تواند موثر باشد. آنچه مسلم است، ترکیب مدل فوق در سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌تواند ابزار مفیدی برای پایش و ارزیابی شرایط فرسایش خاک در منطقه باشد.

سولقان نتایج قابل قبولی را برای میزان فرسایش برآورد نمی‌کند. بنابراین فرض مناسب بودن مدل RUSLE 3D برای منطقه کن سولقان رد خواهد شد. نتایج تحقیقات Kessler و همکاران (۲۰۰۸) در منطقه‌ای دیم‌زار در بولیوی نشان داد که مقادیر هدر رفت خاک در ۵۰ درصد از منطقه مورد مطالعه کمتر از پنج تن در هکتار در سال بوده است، آن‌ها با استفاده از مدل تجدید نظر شده سه بعدی میزان فرسایش خاک را نسبت به مطالعات قبلی که در منطقه انجام شده بسیار کمتر از حد انتظار برآورد نمودند و آن‌ها علت را در صحت داده‌ها و روش‌های محاسبه بیان نمودند. بر طبق اظهارات Renard و Ferreira (۱۹۹۳)، مدل RUSLE 3D مقادیر کم فرسایش خاک را بیشتر و مقادیر بیشتر فرسایش خاک را کمتر محاسبه

منابع مورد استفاده

1. Arekhi, S. and Y. Niazi. 2010. Soil erosion and sediment yield modeling using RS and GIS techniques: a case study, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(2): 285-296.
2. Feghhe Hosseini, H. 2014. Study capability of RUSLE 3D Model with GIS techniques, case study: Taleghan Watershed. PhD Thesis, 121 pages.
3. Giménez Suárez, M.C. 2012. Current and potential water erosion estimation with RUSLE3D in Castellon province (Spain). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 44: 279-288.
4. Kessler, C.A. 2008. Laying a solid foundation for sustainable development in Bolivian mountain villages. *Environment, Development and Sustainability*, 10(2): 233-247.
5. Lal, R. 1994. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 17(4): 319-464.
6. Lu, D., G. Li, G. Valladares and M. Batistella. Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: Using RUSLE, Remote sensing and GIS. *Land Degradation and Development*, PP 499-512(2004).
7. Millward, A.A. and J.E. Mersey. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena*, 38: 109-129.
8. Mitasova, H., J. Hofierka, M. Zlocha, and L.R. Iverson. 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(5): 629-641.
9. Moore, I.D. and J.P. Wilson. 1992. Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 43(3): 264-266.
10. Omuto, C.T. 2008. Assessment of soil physical degradation in Eastern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128: 199-211.
11. Refahi, H.Gh. 2009. Water erosion and conservation. University of Tehran Press, 671 pages.
12. Renard, K.G and V.A. Ferreira. 1993. RUSLE model description and database sensitivity. *Journal of Environmental Quality*, 22(3): 458-466.
13. Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook, No. 703, USDA-ARS*.
14. Romkens, M.J.M., J.W.A. Poesen and J.Y. Wang. 1989. Relationship between the USLE soil erodibility factor and soil properties. 371-385 in: Rimwanich ed. 1989.
15. Roşca, B., I. VASILINIUC and G. TOPŞA. 2012. Models for estimating soil erosion in the middle and lower Vasluiet Basin. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca, Agriculture*, 69(1): 163-172.

16. Saavedra, D. 2005. Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques: a case study in Cochabamba, Bolivia. PhD Thesis, Wageningen University, the Netherlands.
17. Terranova, O., L. Antronico, R. Coscarelli and P. Iaquina. 2009. Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology*, 112(3-4): 228-245.
18. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion. Losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*, Vol. 537, US Department of Agriculture, Washington, DC, 58 pages.

Archive of SID

Assessment of soil erosion using RUSLE 3D, case study: Kan-Soleghan Watershed

Mahnaz Babaei^{*1}, Seyed Zeynalabedin Hosseini², Aliakbar Nazari Samani³ and Seyed Ali Almodaresi⁴

¹ MSc, Yazd Unit, Islamic Azad University, Iran, ² Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Iran, ³ Associate Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran and ⁴ Assistant Professor, Yazd Unit, Islamic Azad University, Iran

Received: 09 May 2015

Accepted: 25 September 2015

Abstract

Recently soil erosion and sediment yield have become one of the most important problems of the environment. Soil erosion risk assessment and sediment yield are first steps to confront with this problem. In this regard, various models and methods have been proposed. Certainly, first of all, the functionality of these models must be verified. Present study is carried out in Kan-Soleghan watershed in order to estimate the soil erosion risk and sediment yield. RUSLE 3D was used in geographical information system platform. Rainfall Erosivity (R), was obtained from monthly and annual data and IDW techniques, Soil Erodibility (K) was obtained from soil data and region map, Land cover management (C) was calculated using remote sensing techniques (with use of NDVI), LS was obtained by using digital elevation model and soil conservation practice was gained with using slope percent map. Eventually, based on RUSLE 3D model, combining these factors, annual average risk of soil erosion was obtained by $22.2 \text{ t.ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$. Several models were used to estimate the sediment delivery ratio, accordingly, the estimated annual sediment yield was overestimated in all models. Sedimentation of basin, was calculated using statistics of Soleghan gauging station ($1.82 \text{ t.ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$). This study indicated that LS factors of the RUSLE 3D model ($r^2=0.68$) was the most effective factors controlling soil erosion in the region. In general, it can be said that the reliability of the used data and methods is too low and too many uncertainties exist for reliable calculation of soil loss amounts in Kan-Soleghan watershed using the RUSLE 3D Model.

Keywords: GIS, IDW, Remote sensing, Sediment, Kan-Soleghan

* Corresponding author: pariya_999@yahoo.com