

ارزیابی و پهنه‌بندی محیط‌زیستی پتانسیل فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو)

میر مهرداد میرسنجری^{۱*}، سحر عابدیان^۲

۱. استادیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر

Sahar.abedian@gmail.com

۲. دانشجوی دکترا محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸

چکیده

آگاهی از میزان فرسایش و پهنه‌بندی مناطق، نقش مؤثری در امر حفاظت از خاک دارد. هدف از تحقیق، تهیه نقشه پتانسیل هدررفت خاک براساس معادله تجدیدنظر شده جهانی هدررفت خاک در حوضه آبخیز قره‌سو است. میزان هدررفت خاک از تلفیق فاکتورهای فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی حاصل شد. نتایج نشان داد که مقادیر فرسایش از صفر تا بیش از ۶۵۰ تن در هکتار در سال متغیر است. همچنین ۶۵/۹ درصد از وسعت حوضه در فرسایش متوسط (۹/۱ درصد) تا زیاد (۵۶/۸ درصد) قرار می‌گیرد. براساس نتایج، در نواحی شمالی به دلیل کاهش تراکم پوشش گیاهی و کاربری کشاورزی آبی به‌رغم کاهش فاکتور طول و درجه شیب و نواحی جنوبی به علت تراکم پوشش گیاهی متوسط و طول و درجه شیب زیاد، میزان فرسایش افزایش پیدا کرده است. همچنین نواحی میانی حوضه به دلیل پوشش جنگلی پرتراکم کمترین میزان فرسایش خاک را داشته است، اگرچه این مناطق شیب ۱۰ تا ۳۰ درجه داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد فاکتور پوشش گیاهی با ضریب تبیین (۰/۶۹) بیشترین تأثیر را در برآورد پتانسیل هدررفت خاک داشته است. نتایج این پژوهش می‌تواند در پیاده‌سازی اهداف مدیریت خاک و اقدامات حفاظتی در حوضه آبخیز مؤثر باشد.

کلیدواژه

پتانسیل هدررفت خاک، پهنه‌بندی فرسایش خاک، فاکتور فرساینده باران، RUSLE.

۱. سرآغاز

بهره‌وری زمین‌های زراعی، شور شدن تدریجی خاک‌ها، رسوب در آبراه‌ها و تأثیر بر اکولوژی آب‌های شیرین منطقه، کاهش عمر مفید و ظرفیت آبیگری سدها، هدر رفت خاک و ... را به‌وجود آورد (Eftthimiou et al., 2014; Tamene et al., 2017; Wang et al., 2013; Alkharabsheh et al., 2013)

البته فرسایش، فرایند مستمری است که از زمان شکل‌گیری خشکی‌ها و پرداختن انسان به دامداری و کشاورزی وجود داشته و موجب تغییر شکل ظاهری

در عصر حاضر آب و خاک از مهم‌ترین منابع طبیعی هر کشور و از پارامترهای اساسی در زمینه مدیریت حوضه محسوب می‌شوند. در صورت نادیده گرفتن این عرصه، مشکلات عدیده‌ای برای بشر امروزی به‌وجود خواهد آورد. یکی از مسائل مطرح در این زمینه، مسئله فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه است که می‌تواند مشکلات چالش برانگیزی در مسائل محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی همچون کاهش حاصلخیزی و

حوضه می‌پردازند. اما از آنجا که چنین آمار و اطلاعاتی برای همه رودخانه‌ها وجود ندارد، مهندسان با استفاده از مدل‌سازی این کمیت را ارزیابی می‌کنند. مسئله مهم دیگر در تشویق محققان به توسعه و استفاده از مدل‌های ریاضی فرسایش و رسوب آن است که استفاده از آمار رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری هیچ نوع اطلاعاتی از جزئیات فرسایش و نقش بخش‌های مختلف حوضه در تولید رسوب ورودی به رودخانه به دست نمی‌دهند (شکوهی و بهشتی، ۱۳۹۳). به دلیل اهمیت بررسی میزان فرسایش حوضه‌های آبخیز و از طرفی نبود آمار دقیق از میزان کمی فرسایش، مدل‌های کمی و کیفی فراوانی برای برآورد فرسایش خاک در طی سالیان متمادی به جامعه جهانی معرفی شده‌اند (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ شکوهی و بهشتی، ۱۳۹۳؛ Nigel & Rughooputh, 2010). این مدل‌ها براساس پارامترهای طبیعی همچون ویژگی‌های خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، توپوگرافی، کاربری اراضی و همچنین فعالیت‌های انسانی ارائه شدند تا میزان این پدیده را در سطح حوضه شبیه‌سازی نمایند (Efthimiou et al., 2014). در پژوهش حاضر، تلاش شد مدلی استفاده شود که با توجه به محدودیت‌هایی نظیر کمبود داده و هزینه، متغیرهای محیط‌زیستی و مدیریتی را نیز در پهنه‌بندی میزان فرسایش اعمال نماید. به همین منظور در این پژوهش از معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک^۱ استفاده شد.

ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک، از مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی متوسط سالانه هدر رفت خاک حاصل از فرسایش ورقه‌ای و شیاری را طراحی کردند و در کتابچه راهنمای کشاورزی با شماره ۷۰۳، اطلاعات جامعی در رابطه با برآورد میزان فرسایش با استفاده از معادله RUSLE ارائه دادند. آن‌ها پس از ارزیابی‌های گسترده در عوامل مؤثر بر فرسایش، مدل فرسایش خاک را به صورت ترکیبی از شش عامل نیروی فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول شیب، درجه شیب، پوشش گیاهی و عملیات مدیریتی معرفی کرد

خشکی‌ها به صورتی که امروز دیده می‌شود، شده است. بدیهی است با توجه به عدم امکان مهار و توقف فرسایش زمین‌شناسی از یکسو و ادامه دخالت‌های بی‌رویه انسان در بهره‌برداری از منابع خاک، آب و گیاه از سوی دیگر، در آینده نیز این روند ادامه خواهد یافت. در این میان فرسایش تشدیدشونده پدیده‌ای است که مسائل و مشکلات زیادی را ایجاد می‌کند. این پدیده در اثر دخالت ناآگاهانه و سودجویانه بشر در طبیعت ایجاد و به طور عملی موجب تخریب خاک می‌شود که بستر تولید در کره زمین است. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته درباره فرسایش خاک و براساس آمار و اطلاعات موجود مشخص شده است که با فرسایش هر ۱ سانتی‌متر از خاک حدود ۴ درصد از حاصلخیزی آن کم می‌شود. به همین سبب تخمین و پیش‌بینی رسوبات فرسایش یافته در مدیریت منابع آب و خاک و پایداری محیط‌زیست نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند (احمدی، ۱۳۷۴).

ارزیابی شدت فرسایش‌پذیری یکی از اقدامات اساسی در مدیریت پایدار منابع آب و خاک در حوضه آبخیز محسوب می‌شود (Asadi et al., 2017). آگاهی از الگوهای توزیع فضایی و زمانی فرسایش، اقدامی مؤثر به منظور تعیین برنامه‌ها و اولویت‌بندی راهکارها در جهت اجرای برنامه‌های حفاظت و کنترل فرسایش خاک در سطح حوضه آبخیز است (Uddin et al., 2016). در ارزیابی شدت فرسایش‌پذیری هدف تقسیم سطح حوضه آبخیز به نواحی مختلف از لحاظ میزان هدر رفت خاک و اولویت‌بندی آن‌ها بر اساس پتانسیل خطر فرسایش است که می‌تواند ابزاری اساسی برای اجرای بهتر طرح‌های جامع آبخیزداری، حفاظت خاک و کاهش خسارات ناشی از فرسایش باشد (Parveen & Kumar, 2012; Uddin et al., 2016).

در حال حاضر به منظور برآورد میزان رسوب رودخانه از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری موجود استفاده می‌شود و به کمک روش‌های آماری به برآورد میزان رسوب در

استفاده شده است (Ganasri & Ramesh, 2016; Gelagay & Minale, 2016; Wang et al., 2003; Chen et al., 2008).

در منطقه مورد مطالعه، موقعیت ویژه و حساس طبیعی، خاک حاصلخیز و وجود رودخانه قره‌سو باعث شده است که این حوضه جاذب خوبی برای جمعیت شود. وجود چند شهر پرجمعیت مانند گرگان، کردکوی و بندرترکمن به استفاده بیش از حد توان اراضی در این حوضه آبخیز منجر شده است که فقدان مدیریت درست، کشاورزی بدون وقفه و کشت چندنوبته بر این مشکل افزوده است. این امر باعث ایجاد اختلال در سامانه‌های طبیعی حوضه و عدم تعادل طبیعی آن شده است به طوری که خاک نمی‌تواند مثل گذشته مقاومت خود را حفظ کند و این امر باعث شده خاک در برابر عوامل فرسایش، بسیار شکننده و حساس شود و روزه‌روز از توان خاک منطقه کاسته شده و بر میزان فرسایش افزوده شود. بنابراین، با توجه به مسئله فوق هدف از این تحقیق پهنه‌بندی میزان فرسایش حوضه آبخیز قره‌سو با داده‌های ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات جغرافیایی با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مناطق حساس از نظر فرسایش است.

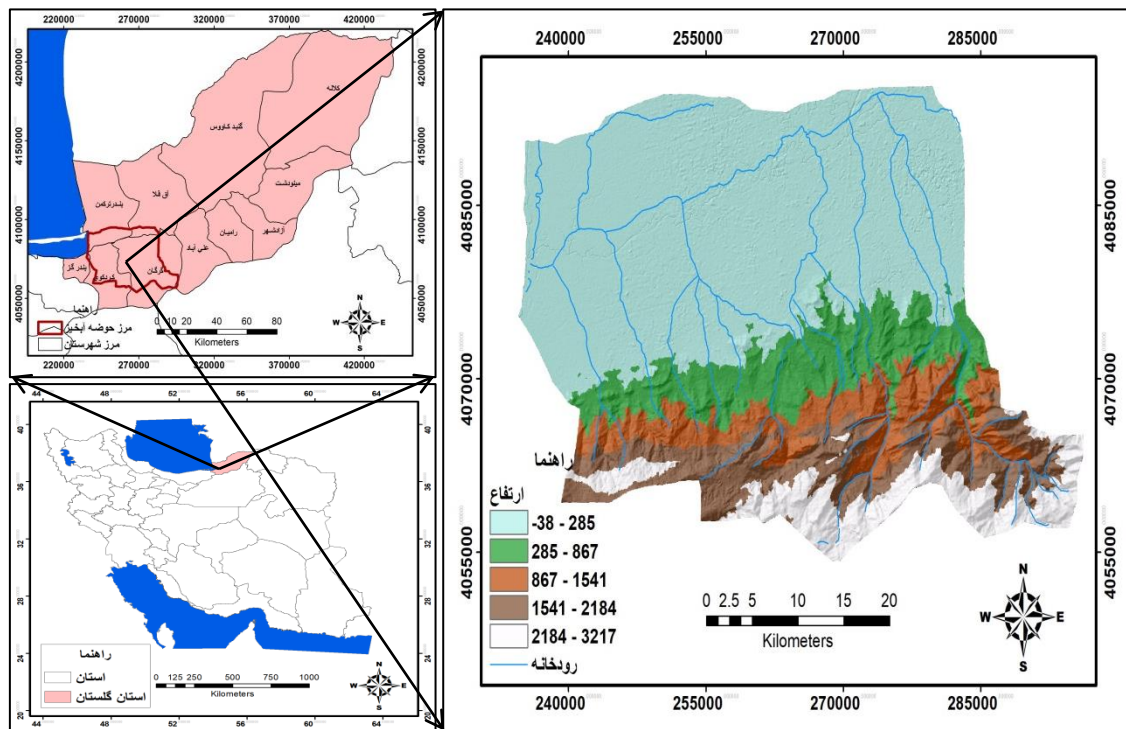
۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه قره‌سو یکی از سه حوضه اصلی در استان گلستان است که در جنوب باختر این استان در حدفاصل عرض‌های $33^{\circ} 36'$ تا $37^{\circ} 00'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $54^{\circ} 00'$ تا $54^{\circ} 45'$ شرقی جای دارد. این حوضه از شمال و شرق به حوضه رودخانه اترک و گرگان‌رود، از جنوب به حوضه‌های آبریز شاهرود و دامغان و از جنوب غربی به حوضه رودخانه نکا محدود می‌شود (داوری و همکاران، ۱۳۸۹). رودخانه قره‌سو با حوضه آبریزی به مساحت ۱۷۶۹ کیلومتر مربع و آبدهی ۵۴/۹ میلیون مترمکعب، از ارتفاعات کوه قلعه ماران سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسیری به طول ۱۶۰ کیلومتر به خلیج گرگان می‌ریزد (شکل ۱).

که تحقیقات انجام شده در سال‌های بعد به توسعه معادله جهانی تلفات خاک اصلاح شد (Kouli et al., 2009; Ganasri & Ramesh, 2016; Igwe et al., 2017; Benavidez et al., 2018). مدل RUSLE از لحاظ نوع و تعداد فاکتورهای مؤثر در فرسایش مشابه مدل USLE بوده اما برآوردهای دقیق‌تری را در پارامترهایی همچون فرسایش‌پذیری خاک، فرساینده‌گی باران، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی لحاظ کرده است (Renard & Freimund, 1994; Eftthimiou et al., 2014) که پس از اصلاح معادله جهانی تلفات خاک، این روش قابلیت استفاده در شرایط مختلف همچون اراضی زراعی، مراتع، معادن و مناطق انسان ساخت را نیز دارد (Nikolova, 2016).

مشکلی که در ارزیابی پتانسیل فرسایش با مدل RUSLE وجود دارد این است که این مدل نمی‌تواند توزیع مکانی و زمانی فرسایش خاک را نشان دهد و این به علت پیچیدگی فاکتورهای دخیل در مدل و تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد آن‌ها است. به منظور غلبه بر این مشکل، از ترکیب مدل با تکنولوژی سنجنش از دور (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده می‌شود. استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجنش از دور، تخمین پتانسیل فرسایش خاک را با دقت زیاد و هزینه‌های قابل قبول در مناطق بزرگ امکان‌پذیر می‌سازد (Wang et al., 2003; Alkharabsheh et al., 2013; Ghosh et al., 2013; Tshikeba Kabantu et al., 2018). سامانه اطلاعات جغرافیایی، تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی را با سرعت بیشتر و به سادگی امکان‌پذیر ساخته و ترکیب اطلاعات گسترده در زمینه‌های مختلف و از منابع مختلف را ممکن و مدیریت اطلاعات را ساده می‌سازد (Shi, 2004). به طور کلی، در ارزیابی پتانسیل فرسایش با مدل RUSLE، داده‌های سنجنش از دور به عنوان منبع تأمین نقشه عامل پوشش گیاهی (Asadi et al., 2017; Uddin et al., 2016; Chen et al., 2008) و GIS به عنوان سامانه‌ای برای استخراج لایه‌های توپوگرافی از لایه رقمی ارتفاع، درون‌یابی داده‌ها، محاسبه میزان فرسایش خاک و مدیریت و تحلیل داده‌ها



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز قره‌سو در استان گلستان

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)

مدل برآورد فرسایش آبی است که برای نخستین بار براساس مفهومی از فرآیند جداسازی و انتقال ذرات خاک در اثر بارندگی توسط ویشمیر و اسمیت (۱۹۷۸) به‌منظور برآورد متوسط سالانه تلفات خاک حاصل از فرسایش سطحی، شیباری و بین شیباری در یک قطعه زمین یا دامنه طراحی شد و به‌صورت زیر ارائه شده است (واعظی و همکاران، ۱۳۹۶).

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

که A: متوسط سالانه تلفات خاک (تن هکتار در سال); R: نشان‌دهنده نیروی فرساینده باران (میلی ژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال); K: فرسایش‌پذیری خاک (تن در هکتار در میلی ژول در میلی‌متر); L: طول شیب; S: درجه شیب; C: پوشش گیاهی و P: عملیات مدیریتی است که در آن چهار فاکتور L، S، C و P بدون واحد هستند. در ادامه روش تعیین هر یک از فاکتورها شرح داده می‌شود.

این رود با امتداد شرقی- غربی در جنوب استان گلستان جریان دارد ولی منشأ بیشتر شعبات آن پیش از پیوستن به رود قره‌سو از رشته‌کوه البرز و در راستای جنوبی- شمالی است. مهم‌ترین رودهای حوضه، رودهای کردکوی، شصت‌کلا، زیارت و گرمابدشت است که پس از الحاق به یکدیگر در مجاورت روستای قره‌سو، به خلیج گرگان جریان می‌یابد (مهندسان مشاور خزرآب، ۱۳۷۷). ارتفاع متوسط حوضه ۵۷۲ متر از سطح آب‌های آزاد است که حداقل آن ۲۶- متر در ساحل دریای خزر و حداکثر حدود ۳۰۷۱ متری در ارتفاعات جنوبی حوضه است. تا ارتفاع حدود ۱۱۰۰ متری به‌غیر از مناطق اولیه، دامنه‌ها پوشیده از جنگل است و با افزایش ارتفاع، از تراکم جنگل کاسته می‌شود (معصوم‌پور، ۱۳۸۴).

۲.۲. تعیین فاکتورهای مدل RUSLE

معادله جهانی هدر رفت خاک اصلاح شده (RUSLE) یک

(۴)

$$R = (95.77 - 6.081 \times MFI + 0.477 \times MFI^2)/17.2$$

$$MFI \geq 55$$

که در آن R نشان‌دهنده نیروی فرسایشی باران (میلی ژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال) است.

۲.۲.۲. فاکتور فرسایش‌پذیری خاک

فرسایش‌پذیری خاک، در واقع حساسیت ذاتی ذرات خاک نسبت به جدا شدن و انتقال آن‌ها توسط نیروی باران و رواناب بر سطح بستر را نشان می‌دهد (Uddin et al., 2016). فرسایش‌پذیری خاک را می‌توان با روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برآورد کرد. در روش مستقیم نیاز به شبیه‌سازی نیروی بارندگی در کرت‌های استاندارد با طول ۲۲ متر و شیب ۹ درصد است، درحالی‌که در روش‌های غیرمستقیم با استفاده از نمودار اراضی شده توسط ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) و براساس داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک همچون درصد سیلت + شن خیلی ریز، درصد شن، میزان مواد آلی خاک، ساختمان و نفوذپذیری خاک میزان فرسایش‌پذیری خاک (رابطه ۵) برآورد می‌شود (De Oliveira et al., 2011; Ganasri & Ramesh, 2016).

(۵)

$$K = [2.1 \times 10^{-4} \times (12 - a) \times [Ss \times (100 - Sc)]^{1.14} + 3.25 \times (b - 2) + 2.5 \times (c - 3)] / 100 \times 0.1317$$

در این معادله M: قطر ذره (درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز) × (درصد رس - ۱۰۰)؛ a: درصد ماده آلی؛ b: کد ساختمان خاک و c: کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک است. البته ویشمایر و اسمیت براساس این رابطه نموداری تهیه کرده‌اند که براساس آن می‌توان میزان فرسایش‌پذیری خاک را بدون انجام محاسبات بالا محاسبه کرد. در این پژوهش با در دسترس بودن نقشه خاک با اطلاعات ذکر شده و با استفاده از دو نموداری که ویشمایر و اسمیت تهیه کردند (شکل ۲)، ضریب K به دست آمد.

۲.۲.۱. فاکتور فرسایشی باران

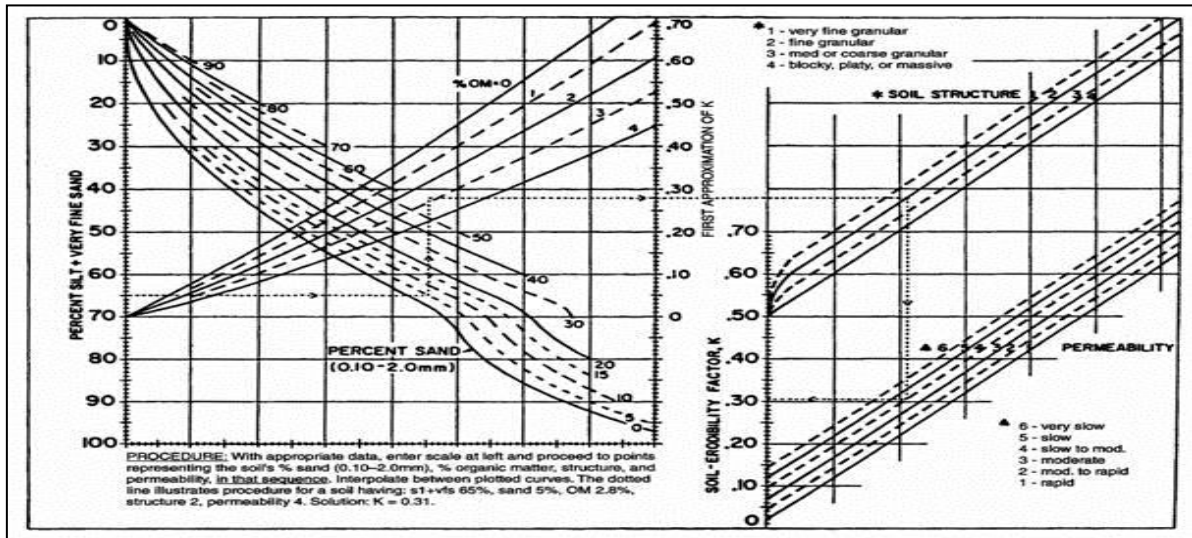
باران ویشمایر و اسمیت (۱۹۵۸) مفهوم عبارت فرسایشی را ارائه کردند. این عامل بیانگر فاکتور فرسایش‌دهندگی باران یا معیار فرسایش برای مدت بارندگی مورد نظر است و قدرت فرسایش یک باران مشخص را تعیین می‌کند. این شاخص از ترکیب انرژی جنبشی باران و بیشترین شدت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای منطقه به دست می‌آید (صالحی و همکاران، ۱۳۹۴). به طور کلی شاخص‌های فرسایشی باران به دو گروه تقسیم می‌شوند: دسته نخست شاخص‌های مبتنی بر انرژی جنبشی یا شدت بارندگی است که از پارامترهای اقلیمی (شدت بارندگی یا انرژی جنبشی) استفاده می‌کنند و دسته دوم شاخص‌های مبتنی بر آمار سهل‌الوصول بارندگی است (حکیم‌خانی و همکاران، ۱۳۸۶). متأسفانه در اکثر حوضه‌های آبخیز کشور از جمله آبخیز مورد مطالعاتی، تعداد ایستگاه‌های هواشناسی مجهز به باران‌نگار که قادر به اندازه‌گیری میزان انرژی جنبشی باران در ۳۰ دقیقه نخست باشد، به تعداد کافی وجود ندارد (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳؛ فریدی و همکاران، ۱۳۹۲). در چنین شرایطی معمولاً از شاخص‌های مبتنی بر مقادیر بارش‌های سالانه (Renard & Freimund, 1994; Tošić et al., 2013) و ماهانه (Ganasri & Ramesh, 2016; Ferro et al., 1991) در معادله جهانی فرسایش خاک استفاده می‌شود. به همین منظور با استفاده از رابطه (۲)، شاخص اصلاح شده فورنیه (MFI) برای تمامی ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود.

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

در این معادله P_i متوسط بارندگی (میلی‌متر) در ماه i ام و P متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) است. سپس با قرار دادن این شاخص در رابطه (۳) و (۴) (Renard & Freimund, 1994)، مقدار فاکتور فرسایشی باران برای ایستگاه‌های هواشناسی فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) برآورد می‌شود.

$$R = (0.07397 \times MFI^{1.847}) / 17.2 \quad (3)$$

$$MFI < 55$$



شکل ۲. نمودار برآورد میزان فرسایش پذیری خاک در مدل RUSLE

(منبع: Wischmeier and Smith, 1978)

منطقه با اندازه پیکسل ۳۰ متر استفاده شد. سپس با استفاده از دستور Fill در تابع Spatial Analysis چاله‌های هیدرولوژیکی موجود در نقشه Dem حذف شد. در گام بعد با استفاده از دستور Flow Direction مسیر جریان آب به سمت سلول مرکزی و با دستور Flow Accumulation نقشه تجمعی جریان آب حاصل شد. همچنین با استفاده از ابزار Raster Surface در محیط نرم‌افزار ArcGIS نقشه شیب برحسب درجه از نقشه مدل رقومی ارتفاع استخراج شد. در نهایت با استفاده از فاکتورهای تهیه شده، نقشه فاکتور LS با استفاده از رابطه (۶) ارائه شده توسط Moore و Burch در سال ۱۹۸۶ محاسبه و استخراج شد.

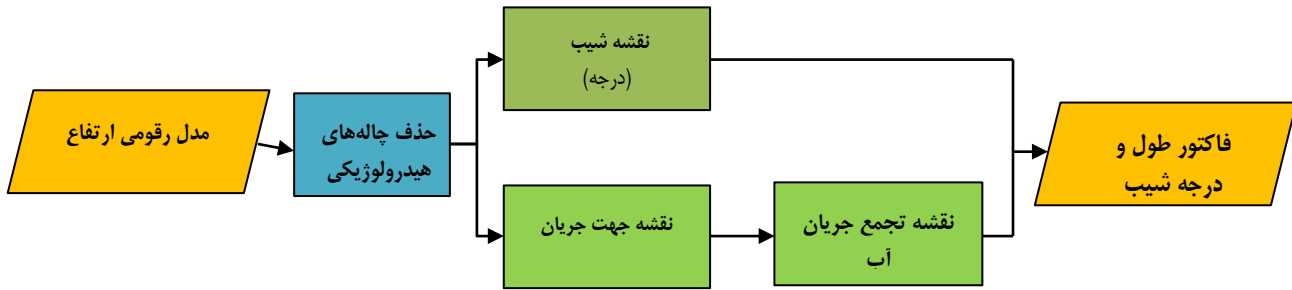
(۶)

$$LS = \frac{\text{Flow Accumulation grid} \times \text{Cell size}^{0.4} (\text{Sin}(\text{Slope grid}) \times 0.01745)^{1.3}}{22.13 \times 0.0896}$$

که در آن Flow Accumulation تجمع جریان به سمت بالای شیب برای هر سلول، Cell size اندازه سلول‌های شبکه (در این مطالعه ۳۰ متر) و Slope نقشه شیب به درجه است. همچنین از عدد ۰/۰۱۷۴۵ برای تبدیل واحد به رادیان در سیستم GIS استفاده می‌شود (شکل ۳).

۲.۲.۳. فاکتورهای طول شیب (L) و درجه شیب (S) در معادله جهانی تجدیدنظر شده خاک، به منظور لحاظ تأثیر توپوگرافی بر فرسایش خاک از دو عامل طول و درجه شیب به شکل ترکیبی و در قالب یک پارامتر استفاده شده است. طول و تندی شیب (LS) میزان، سرعت و پتانسیل فرسایش را نشان می‌دهد. طول شیب عبارت است از فاصله افقی از مبدأ جریان بالادست دامنه تا جایی که تندی شیب به مقدار چشمگیری تغییر یافته به طوری که عمل رسوب‌گذاری آغاز شود یا جریان‌ها روی یک دامنه در یک کانال معین (کانال ترانس، آبراهه‌ها و غیره) ادغام و متمرکز شوند (USDA, 1972). همچنین عامل درصد شیب که تابعی از درجه شیب است و منعکس‌کننده اثر درجه شیب بر میزان فرسایش است. در معادله جهانی تجدیدنظر شده خاک این دو عامل به عنوان تأثیر عامل توپوگرافی در فرسایش شناخته می‌شود که افزایش میزان آن‌ها موجب تشدید فرسایش می‌شود (Ganasri & Ramesh, 2016).

به منظور تحلیل‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی از جمله طول شیب حوضه از تابع الحاقی Archydro استفاده شد. برای این منظور از نقشه مدل رقومی ارتفاع



شکل ۳. فرایند تهیه فاکتورهای طول و درجه شیب

منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷

نشان می‌دهند. ابرها و منابع آبی مقادیر منفی و صفر را نشان می‌دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده برای محاسبه داده‌های طیفی زمینی استفاده شده و نتایج آن نشان داده که این شاخص، همبستگی بالایی با زیست توده سطح زمین دارد (Lin, 1997). در نهایت با استفاده از نقشه فوق و با استفاده از رابطه ارائه شده توسط واندرنایف و همکاران (۲۰۰۰)، فاکتور C استخراج می‌شود.

$$C = \exp \left[-\alpha \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right] \quad (8)$$

که در آن α و β پارامترهای بدون واحد هستند و مقادیر آن به ترتیب برابر ۲ و ۱ است.

۲.۲.۵. فاکتور عملیات حفاظتی (P)

ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) عامل کارهای حفاظتی را به عنوان مقدار خاک از بین رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت شده، به زمینی که لخت باشد و در جهت تندترین شیب شخم خورده باشد، تعریف کردند. به طور عمده منظور از کارهای حفاظتی، کشت در روی خطوط تراز، کشت نواری و تراس‌بندی است. هر چه مقدار این عامل کمتر باشد، کارهای حفاظتی مؤثرتر و هدر رفت خاک کمتر است. چنانچه منطقه‌ای فاقد هر گونه عملیات حفاظتی باشد، مقدار این فاکتور یک در نظر گرفته می‌شود. پس از تشکیل پایگاه داده‌ها و آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز مدل به صورت لایه‌های رستری، نقشه مقدار هدر رفت سالانه خاک از طریق حاصل ضرب لایه‌ها با توجه به رابطه (۱) با

۲.۲.۴. فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C)

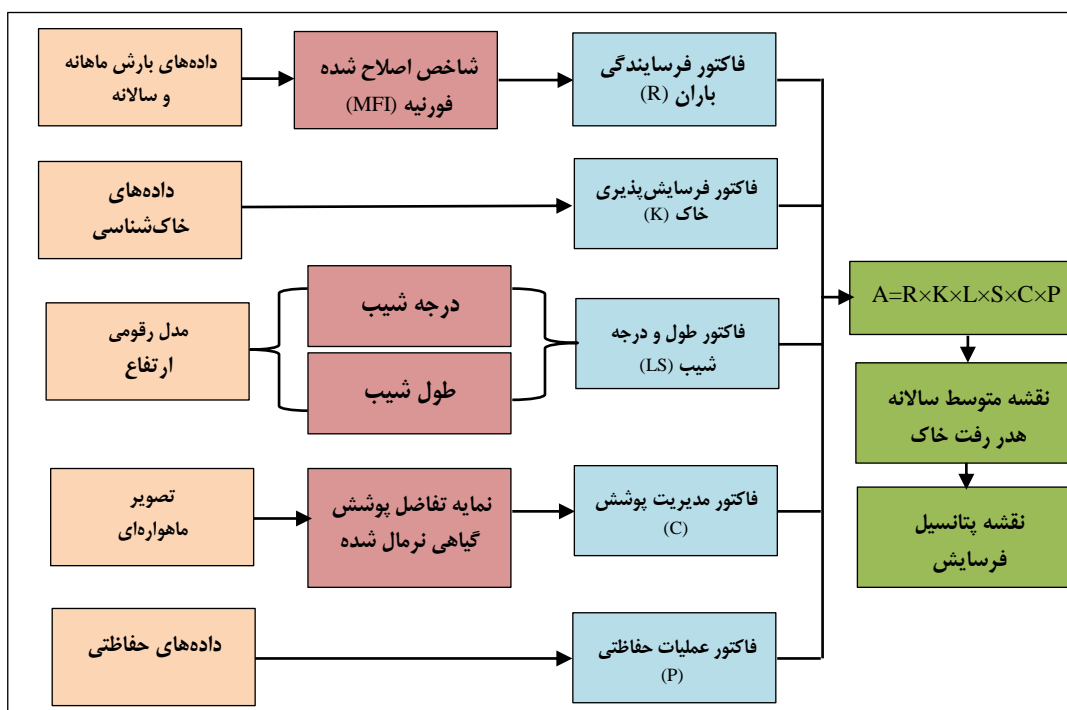
پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های بیوفیزیکی در فرسایش خاک است. پوشش گیاهی از طریق کاهش انرژی بارندگی قبل از رسیدن به سطح خاک و افزایش نفوذپذیری آب در خاک، هدر رفت خاک را کاهش می‌دهد (Lakkad, Shrivastava, 2016; Uddin et al., 2016) در مدل RUSLE فاکتور پوشش گیاهی معمولاً براساس معادلات تجربی تعیین می‌شود (Wischmeier & Smith, 1978). یکی از معیارهای پرکاربرد در بررسی پوشش گیاهی، نمایه تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده^۳ است (Loh, 2012; Durigon et al., 2014). این نمایه بیشترین حساسیت را به تغییرات پوشش گیاهی داشته و در مقابل آثار جوی و زمینه خاک (به جز در مواردی که پوشش گیاهی کم باشد) حساسیت کمتری دارد (فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). نمایه NDVI براساس میزان انرژی بازتابی در باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز و براساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad (7)$$

ارزش عددی این شاخص بین -۱ و +۱ در نوسان است. پوشش گیاهی سالم (دارای فعالیت فتوسنتزی) در بخش طیفی مادون قرمز (IR) در مقایسه با بخش طیفی مرئی قرمز (R) انعکاس بیشتری دارد. بنابراین مقادیر NDVI برای پوشش گیاهی سبز مثبت خواهد شد. مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی مانند مناطق شهری و اراضی بایر معمولاً مقادیر NDVI بین +۰/۱ و -۰/۱ را

نشان‌دهنده پتانسیل بالا فرسایش در آن پیکسل است و هر چه این ضریب به سمت صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری کم آن است.

استفاده از تابع Spatial Analyst و گزینه Raster Calculator در محیط نرم‌افزاری ArcGIS تهیه شد که در شکل ۴ مراحل انجام کار نشان داده شده است. در این نقشه هر چه ضریب حاصل شده در هر پیکسل بیشتر باشد



شکل ۴. مراحل انجام مدل در معادله جهانی تجدیدنظر شده خاک (RUSLE)

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)

تعیین مجموعه‌ای از معیارها، نیاز است که هر معیار به صورت یک لایه نقشه در پایگاه داده‌های مبتنی بر GIS نشان داده شوند. از این رو تمامی نقشه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به صورت لایه‌های رستری با اندازه سلول ۳۰ × ۳۰ متر رقومی شدند. همچنین داده‌های جدولی همانند موقعیت و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی به صورت نقطه به محیط نرم‌افزار وارد شده و سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی به نقشه همباران تبدیل شد که در (جدول ۱) نقشه‌های مورد استفاده ارائه شده است. سپس تمامی نقشه‌ها در محیط نرم‌افزار GIS به منظور تهیه نقشه متوسط سالیانه هدر رفت خاک براساس رابطه (۱) با یکدیگر تلفیق و ترکیب شدند.

۳. نتایج

۳.۱. تهیه داده‌های مورد نیاز

در پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری منطقه، سطح زمین به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل یا بالقوه فرسایش از خیلی کم تا بسیار زیاد تقسیم می‌شود. این فرایند که بر مبنای شناخت ویژگی‌های طبیعی و مدل‌سازی کمی بر پایه داده‌های ناحیه مورد مطالعه است، مبنایی برای اقدامات بعدی و برنامه‌ریزی‌های توسعه و عمران محسوب می‌شود (رامشت و شاه‌زیدی، ۱۳۷۵). براساس مدل RUSLE فرایند فرسایش، نتیجه روابط متقابل سنگ مادر، خاک، توپوگرافی و نوع بهره‌برداری از اراضی و میزان حفاظت از آن، میزان بارندگی و تراکم پوشش گیاهی است. حال با

میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال متغیر است که نشان‌دهنده میزان تغییرات زیاد این عامل است. همچنین مقادیر فرساینده‌گی به سمت مرکز و جنوب حوضه آبخیز قره‌سو که ارتفاعات بیشتری دارند و میزان بارش در این نواحی بیشتر بوده است، روند افزایشی داشته و در قسمت شمالی حوضه که ارتفاعات کمتری دارد و میزان بارندگی کمتر است، قدرت فرساینده‌گی باران نیز کمتر شده است.

۳.۱.۱. فاکتور فرساینده‌گی باران (R)

مشخصات ایستگاه‌های بارندگی و نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرساینده‌گی باران در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه رابطه (۲) و رابطه ناراد و فریموند رابطه (۳) در جدول ۲ آمده است. نقشه فاکتور فرساینده‌گی باران با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی تهیه شد (شکل ۵). مطابق نقشه، مقدار فرساینده‌گی باران از ۳/۹ تا ۲۷۴/۲ میلی‌ژول

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی شدت فرسایش منطقه مورد مطالعه

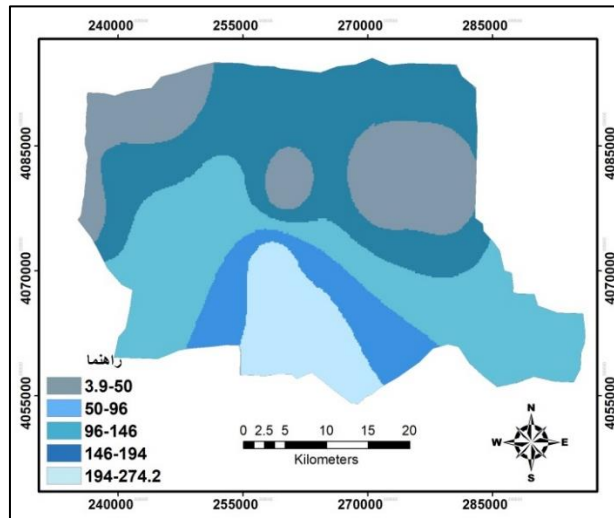
منبع	تشریح	لایه داده
از نقشه توپوگرافی در محیط رستر پایه	شامل داده‌های ارتفاعی به صورت متوسط برای هر پیکسل	نقشه رقومی ارتفاع
برگرفته از نقشه مدل رقومی ارتفاع	شامل میزان شیب به صورت متوسط برای هر پیکسل	نقشه شیب
سازمان هواشناسی استان گلستان	شامل داده‌های آماری ایستگاه‌های هواشناسی	نقشه بارندگی
سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	شامل انواع بافت خاک در منطقه مورد مطالعه	نقشه خاک‌شناسی
نگارندگان	دربردارنده میزان تراکم پوشش گیاهی	نقشه NDVI

منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷

جدول ۲. محاسبه و برآورد شاخص اصلاح شده فورنیه و ضریب فرساینده‌گی باران برای ایستگاه‌های بارندگی

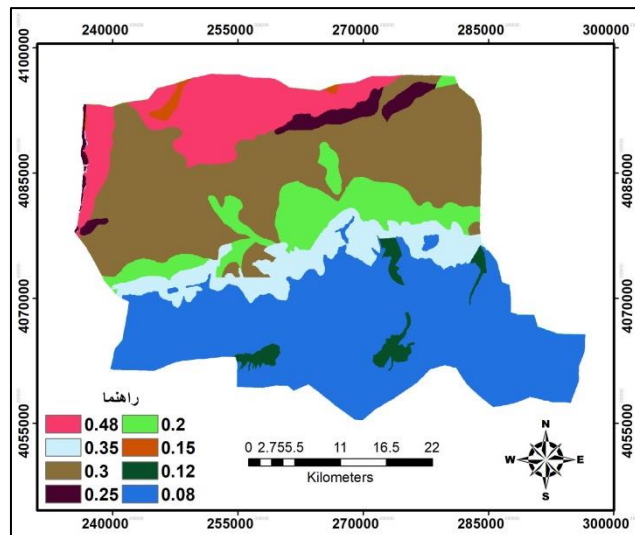
R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ y ⁻¹)	MFI	ارتفاع (m)	عرض جغرافیایی (utm)	طول جغرافیایی (utm)	نام ایستگاه
۲۷۴/۲	۱۰۵	۲۵۱۳	۴۰۵۷۳۸۶	۲۶۱۵۰۳	حاجی‌آباد
۲۴۸/۶	۱۰۰/۲	۱۶۱۸	۴۰۶۴۹۲۶	۲۶۱۸۴۶	جهان‌نما
۲۴۰/۳	۹۸/۶	۳۰۰	۴۰۷۲۴۶۷	۲۵۸۹۹۰	نوچمن
۲۱۲/۵	۹۲/۹	۲۴۵	۴۰۸۰۶۹۴	۲۹۳۳۸۰	جعفرآباد
۱۲۷/۹	۷۳/۱	۲۴۰	۴۰۶۹۲۶۸	۲۳۷۹۶۷	سرکلاته
۱۱۷/۴	۷۰/۲	۱۰	۴۰۷۶۴۶۶	۲۴۵۶۲۲	النگ
۶/۸	۵۴	۸۲	۴۰۸۱۳۷۹	۲۶۰۵۸۹	ورسن
۶/۶۹	۵۳/۴	۱۳۵	۴۰۸۰۹۲۲	۲۸۰۱۲۷	جلین
۶/۱	۵۱	-۲۴	۴۰۷۸۷۵۱	۲۳۵۲۲۵	قره‌سو
۴/۸۶	۴۵	-۱۸	۴۰۹۳۰۳۳	۲۴۶۳۰۷	پنج‌پیکر
۴/۵	۴۳/۷	۱۴۹	۴۰۸۱۴۹۳	۲۷۲۴۷۲	هاشم‌آباد
۳/۹	۴۰	-۲۶	۴۰۹۷۰۳۲	۲۳۷۳۹۵	چارقلی

منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷



شکل ۵. فاکتور فرساینده‌گی باران (R) حوضه آبخیز قره‌سو

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)



شکل ۶. فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K) حوضه آبخیز قره‌سو

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)

۳.۱.۲. فاکتور فرسایش‌پذیری خاک

در این پژوهش، ویژگی‌های خاک از طریق گزارش خاک‌شناسی منطقه استخراج شد. پس از آنکه این پنج پارامتر استخراج و نقشه خاک‌شناسی رقومی شد، از طریق نمودار تعیین حساسیت فرسایش‌پذیری خاک که توسط ویشمایر و اسمیت ارائه شده، مقدار K برآورد شد. مقدار فاکتور فرسایش‌پذیری در سطح حوضه از ۰/۰۸ تا ۰/۴۸ متغیر است (شکل ۶). نواحی با مقادیر فرسایش‌پذیری

خیلی کم (۰/۰۸ تا ۰/۱۲) که نیمی از وسعت حوضه را در بر گرفته است، در محدوده جنوبی حوضه آبخیز قرار دارد. مقادیر فرسایش‌پذیری کم (۰/۱۲ تا ۰/۲) در محدوده میانی حوضه آبخیز پراکنش بیشتری داشته و در این نواحی بیشتر مشاهده می‌شود. نواحی با فرسایش‌پذیری متوسط (۰/۲ تا ۰/۳) پراکنش بیشتری در نقاط میانی و شمالی حوضه دارد که از نظر وسعت در حدود نواحی با فرسایش‌پذیری کم بوده است. همچنین نواحی با فرسایش‌پذیری زیاد (۰/۳ تا

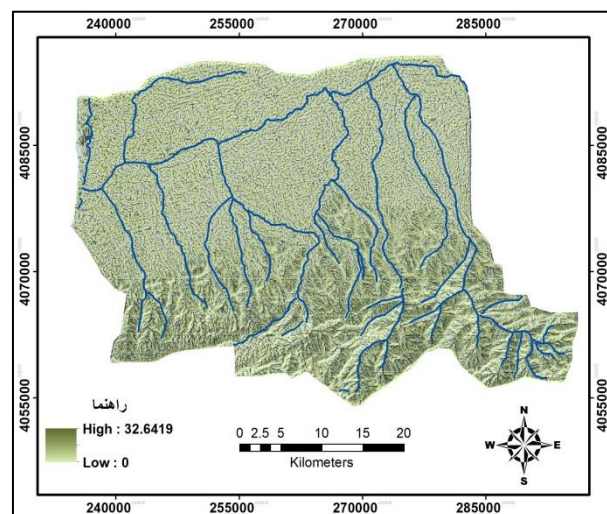
۳. ۱. ۴. فاکتور پوشش گیاهی (C)

نقشه فاکتور پوشش گیاهی (C) با استفاده از نقشه NDVI تولید شد. همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود مقدار C با NDVI رابطه معکوس دارد. به عبارتی، با افزایش در شاخص NDVI میزان فاکتور C کاهش می‌یابد. کاهش ضریب C به معنای تراکم پوشش گیاهی بیشتر است که این مسئله می‌تواند در کاهش فرسایش تأثیرگذاری بیشتری داشته باشد. در این پژوهش، مقادیر فاکتور پوشش گیاهی از ۰/۰۰۲ برای نواحی با پوشش جنگلی متراکمی تا ۱ برای نواحی عاری از پوشش متغیر است. کمترین مقادیر فاکتور C (۰/۰۹ - ۰/۰۰۱) در نواحی میانی تا جنوبی حوضه به علت پوشش جنگلی انبوه مشاهده می‌شود (شکل ۹). نواحی با تراکم پوششی اندک و نواحی مرتعی که در انتهای جنوبی حوضه آبخیز وجود دارند، دارای مقادیر فاکتور C در محدوده ۰/۰۹ تا ۰/۹۲ هستند. همچنین بیشترین مقادیر این فاکتور (۱ - ۰/۹۲) در شمال، شرق و غرب حوضه مشاهده می‌شود که مربوط به اراضی بدون پوشش متراکم و اراضی کشاورزی است.

۰/۴۸) به‌طور پراکنده در قسمت‌های میانی، شمالی و غربی حوضه هستند. اکثر نواحی دارای فرسایش‌پذیری زیاد خاک‌هایی با بافت سیلتی و سیلتی رسی دارند. همچنین مقادیر فرسایش‌پذیری خیلی کم مربوط به خاک‌هایی با بافت لوم شنی و رخنمون‌های سنگی، فرسایش‌پذیری کم مربوط به خاک‌هایی با بافت متوسط و رسی و رسی لومی و فرسایش‌پذیری متوسط مربوط به خاک‌های لومی و لوم رسی هستند.

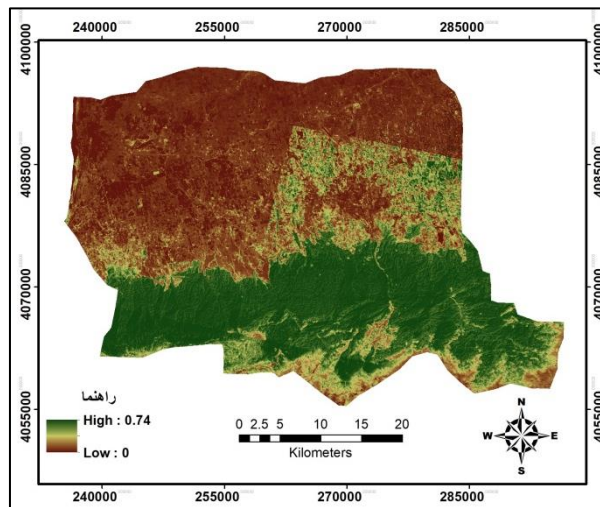
۳. ۱. ۳. فاکتور طول و درجه شیب حوضه (LS)

برای تهیه نقشه درصد و طول شیب از نقشه مدل رقومی ارتفاع منطقه با اندازه پیکسل ۳۰ متر استفاده شد. سپس با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع و تابع‌های Arc Hydro و Spatial Analyst، ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبخیز از جمله طول و درجه شیب به‌دست آمد. سپس فاکتور LS با جای‌گذاری نقشه‌های فوق در رابطه (۶) محاسبه شد. مقدار فاکتور LS در منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۳۲/۶ در سطح پیکسل متغیر است (شکل ۷). مقادیر LS در بعضی نواحی با شیب‌های تند، مانند امتداد رودخانه‌ها بیشتر است که این مسئله در نواحی جنوبی حوضه بیشتر مشاهده می‌شود

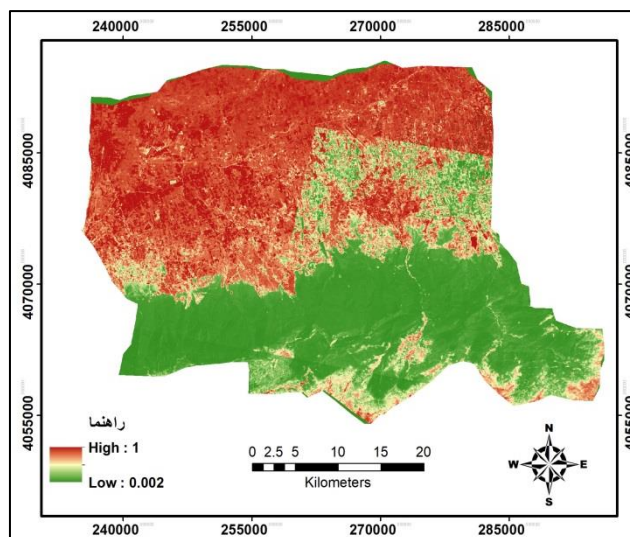


شکل ۷. فاکتور طول و درجه شیب (LS) حوضه آبخیز قره‌سو

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)



شکل ۸. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) حوضه آبخیز قره‌سو
(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)



شکل ۹. فاکتور مدیریت پوشش (C) حوضه آبخیز قره‌سو
(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)

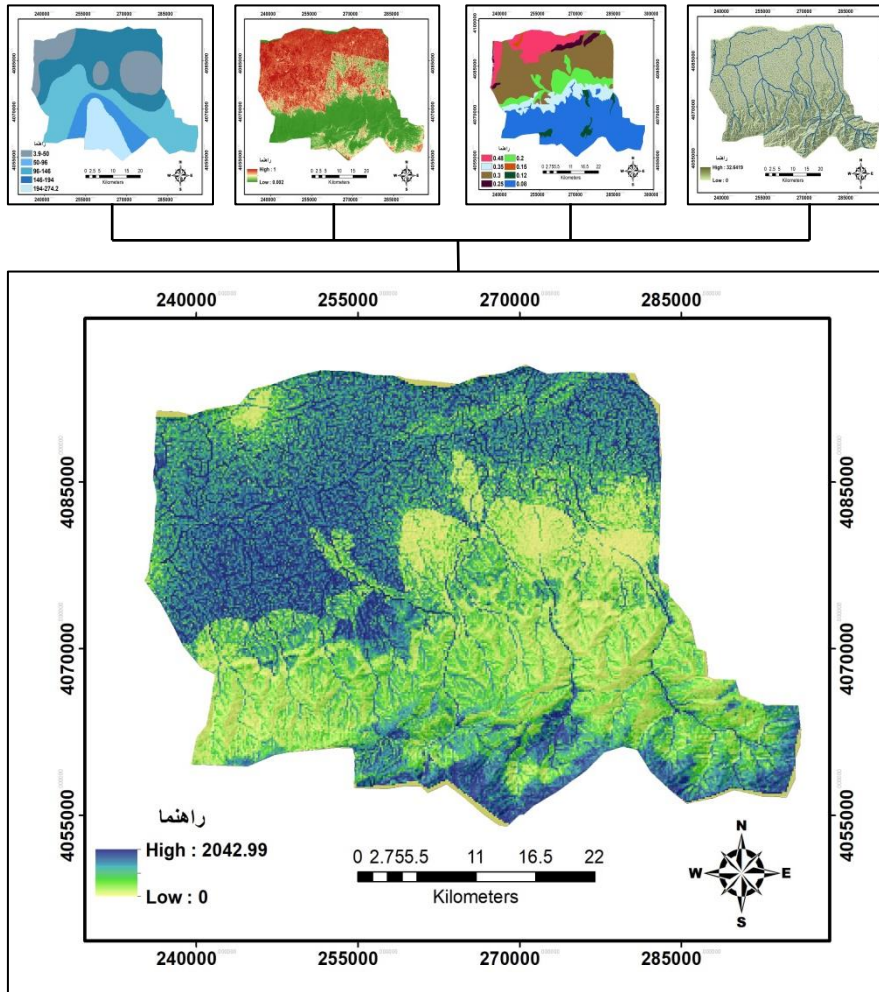
شامل لایه‌های فرساینده‌ی باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی و طول و درجه شیب بر مبنای مدل RUSLE در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی با یکدیگر هم‌پوشانی شده و نقشه پتانسیل فرسایش خاک حوضه آبخیز قره‌سو تهیه شد. مقادیر احتمال فرسایش در سطح حوضه آبخیز از ۰ تا بیش از ۶۵۰ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر است (شکل ۱۰).

۳.۱.۵. فاکتور عملیات حفاظتی (P)

عامل عملیات حفاظتی می‌تواند در صورت نبود اطلاعات کافی درباره نحوه مدیریت اراضی از معادله حذف شود. در این پژوهش به علت نبود اطلاعات کافی از عملیات حفاظتی در حوضه آبخیز، P محاسبه نشده است.

۳.۲. تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک

برای تعیین پتانسیل فرسایش خاک، پنج لایه تولید شده



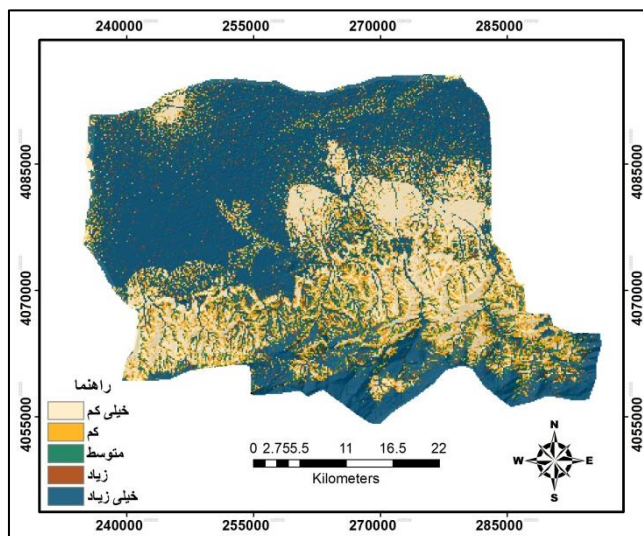
شکل ۱۰. فرسایش سالانه خاک حوضه آبخیز قره‌سو

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)

جدول ۳. درصد و مساحت کلاس‌های طبقه‌بندی شده فرسایش

مساحت (%)	مساحت (Km ²)	مقدار هدر رفت خاک (تن در هکتار در سال)	طبقه
۲۰/۶	۳۶۴/۱	۰ - ۸	۱
۱۳/۵	۲۳۸/۱۸	۸ - ۱۵	۲
۹/۱	۱۶۱/۷	۱۵ - ۲۳	۳
۴/۲	۷۳/۶۷	۲۳ - ۶۰	۴
۵۲/۶	۹۳۱/۳۵	۶۰ <	۵

منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷



شکل ۱۱. نقشه طبقه‌بندی شده فرسایش سالانه خاک حوضه آبخیز قره‌سو

(منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷)

است که پوشش گیاهی با تراکم کم دارند، به‌ویژه در نواحی جنوب‌غربی حوضه که علاوه بر پوشش ضعیف مرتعی، توان فرساینده‌گی باران نیز در افزایش روند فرسایش نقش مؤثری دارد.

تحلیل رگرسیون فضایی کاربرد وسیعی در زمینه‌های مختلف پژوهشی دارد و یکی از ابزارهای مهم آماری در تجزیه و تحلیل روابط بین متغیرها است (علی‌محمدی و مختاری‌پور، ۱۳۹۶؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۳). در این مدل رگرسیونی، میانگین هدر رفت سالانه خاک، متغیر وابسته و فاکتورهای توان فرساینده‌گی باران، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، فاکتور توپوگرافی و فاکتور پوشش گیاهی، متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. R^2 میزان تغییرپذیری متغیر وابسته را بر مبنای متغیر مستقل نشان می‌دهد (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳). همان‌طور که نتایج مقدار R^2 در جدول ۴ نشان می‌دهد، فاکتور پوشش گیاهی با بالاترین مقدار R^2 یعنی ۰/۶۹، بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک بر اساس مدل RUSLE داشته است. به‌عبارتی، ۶۹ درصد از میزان هدررفت سالانه خاک در سطح حوضه آبخیز تحت تأثیر این فاکتور است و فرسایش‌پذیری خاک، توان فرساینده‌گی باران و فاکتورهای توپوگرافی به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به پنج کلاس فرسایش‌پذیری طبقه‌بندی شد (شکل ۱۱)، که میزان مساحت و درصد هر یک از کلاس‌های فرسایش در جدول ۳ آمده است. کمترین میزان فرسایش (۰ تا ۸) در نواحی شرقی حوضه مشاهده شد که در کلاس بدون خطر فرسایش قرار دارند. در نواحی شرقی و غربی حوضه آبخیز، نواحی با پتانسیل فرسایش کم (۸ تا ۱۵) گسترده شده است که بیشترین پراکنش را در نواحی میانی حوضه دارند. همچنین در کل سطح حوضه نواحی با پتانسیل فرسایش متوسط با مقادیر فرسایش (۱۵ تا ۲۳) و نواحی با پتانسیل فرسایش زیاد (۲۳ تا ۶۰)، کمترین مساحت را داشته‌اند و به‌صورت پراکنده در سطح حوضه دیده می‌شوند. بیشترین وسعت فرسایش در سطح حوضه مربوط به نواحی با پتانسیل فرسایش خیلی زیاد است که مقادیر فرسایش بیش از ۶۰ تن در هکتار در سال را شامل می‌شود و در نواحی جنوبی و شمالی حوضه گسترده است. نواحی با پتانسیل فرسایش متوسط تا زیاد، عمدتاً در مسیر آبراهه‌ها قرار دارند. همچنین می‌توان به تأثیر نواحی با تراکم پوششی کم در افزایش پتانسیل فرسایش‌پذیری نواحی شمالی حوضه که در کلاس متوسط تا زیاد قرار دارند، اشاره کرد. نواحی با پتانسیل فرسایش زیاد و خیلی‌زیاد شامل نواحی

جدول ۴. روابط رگرسیونی بین هدر رفت خاک و فاکتورهای RUSLE

R ²	رابطه رگرسیونی	فاکتورهای RUSLE
۰/۱۵	$Y = 21.53 X + 41.3$	K
۰/۱۱	$Y = 0.43 X + 40.36$	R
۰/۰۴	$Y = 66.43 X + 16.06$	LS
۰/۶۹	$Y = 170.65 X + 7.97$	C

منبع: نگارندگان، ۱۳۹۷

۴. نتیجه‌گیری و بحث

فرسایش خاک یکی از چالش‌های مهم محیط‌زیستی در کشورهای در حال توسعه است که می‌تواند آثار منفی درون منطقه‌ای و بیرون منطقه‌ای همچون کاهش حاصلخیزی خاک، شور شدن تدریجی خاک‌ها، رسوب مواد فرسایش یافته در اراضی کشاورزی، تأسیسات ذخیره و انتقال آب بگذارد. در این پژوهش ارزیابی کمی پتانسیل فرسایش با توجه به کارایی مدل تجربی RUSLE و توانایی سیستم اطلاعات جغرافیایی برای نمایش توزیع مکانی میزان هدر رفت خاک در حوضه آبخیز قره‌سو صورت گرفت. بررسی نتایج نشان داد که فاکتور توان فرساینده‌گی باران از ۳/۹ تا ۲۷۴/۲ میلی‌ژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال در سطح حوضه آبخیز متغیر است. توان فرساینده‌گی باران به سمت مرکز و جنوب حوضه آبخیز قره‌سو که ارتفاعات بیشتری دارند و میزان بارش در این نواحی بیشتر بوده است روند افزایشی داشته است. میزان فرسایش‌پذیری خاک حوضه از ۰/۰۸ تا ۰/۴۸ واحد متغیر بوده است. از آنجا که بیشتر خاک‌های منطقه خاک حوضه بافت سیلتی و سیلتی رسی دارد، خاک حوضه فرسایش‌پذیری متوسط تا زیاد دارد. نتیجه بررسی فاکتور پوشش گیاهی نشان داد که مقادیر این فاکتور از ۰/۰۰۲ تا ۱ متغیر است که بیانگر متغیر بودن منطقه از لحاظ تراکم پوشش گیاهی است و در نواحی میانی تا جنوبی حوضه به‌علت پوشش جنگلی انبوه، کمترین مقادیر فاکتور C (۰/۰۹ - ۰/۰۰۱) را داشته و بیشترین مقدار این فاکتور (۱ - ۰/۹۲) در شمال، شرق و غرب حوضه مشاهده می‌شود که مربوط به اراضی بدون پوشش

متراکم و اراضی کشاورزی است. بررسی نقشه پتانسیل فرسایش خاک که از هم‌پوشانی لایه‌های فرساینده‌گی باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی در محیط GIS تولید شده، نشان داد که مقادیر میزان هدر رفت خاک در سطح حوضه از صفر تا بیش از ۶۵۰ تن در هکتار در سال متغیر است. در پژوهش حاضر، بررسی‌های انجام شده درباره پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک در حوضه آبریز قره‌سو با روش RUSLE نشان می‌دهد که در بخش شمالی و جنوبی حوضه پتانسیل فرسایش خاک بالاست که در بخش شمالی به دلیل کاهش تراکم پوشش گیاهی و کاربری کشاورزی آبی به‌رغم کاهش فاکتور طول و درجه شیب، بالاترین میزان فرسایش دیده می‌شود و در نواحی جنوبی که پوشش استپی دارد به‌علت تراکم پوشش گیاهی متوسط و طول و درجه شیب زیاد، میزان فرسایش افزایش پیدا کرده است. همچنین نواحی میانی حوضه آبخیز قره‌سو کمترین میزان فرسایش خاک را داشته‌اند. اگرچه این مناطق شیب ۱۰ تا ۳۰ درجه را داشته‌اند اما به دلیل وجود پوشش جنگلی پرتراکم میزان فرسایش خاک این منطقه کم است. بررسی روابط رگرسیونی میان متغیرهای لایه‌های فرساینده‌گی باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی در مدل RUSLE و میزان هدررفت خاک فرسایش سالیانه نشان داد که فاکتور پوشش گیاهی با بالاترین ضریب تبیین (۰/۶۹)، بیشترین اهمیت و تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک در سطح حوضه آبخیز قره‌سو دارد و فاکتورهای فرسایش‌پذیری خاک، فرساینده‌گی

خسارات احتمالی، از هر گونه فعالیت‌های مخرب انسانی همچون بهره‌برداری بی‌رویه و تغییر کاربری اراضی در مناطق حساس و مستعد به فرسایش اجتناب شود.

یادداشت‌ها

1. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)
2. Universal Soil Loss Equation (USLE)
3. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

باران و توپوگرافی به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. نتایج نقشه پهنه‌بندی فرسایش تولید شده با روش RUSLE و GIS می‌تواند در پیاده‌سازی اهداف مدیریت خاک و اقدامات حفاظتی در کاهش فرسایش خاک در حوضه مورد مطالعه مؤثر باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود با توجه به نحوه پراکنش پهنه‌هایی با پتانسیل فرسایشی بالا در نواحی شمالی و جنوبی حوضه آبخیز، به‌منظور کاهش آثار منفی فرسایش خاک و جلوگیری از

منابع

- احمدی، ح. ۱۳۷۴. ژئومورفولوژی کاربردی، جلد ۱ فرسایش آبی، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۶۸ ص.
- داوری، م.ج.، علیزاده س. و غلامی غ. ۱۳۸۹. گزارش شناسایی سازند سخت (کارست) حوضه قره‌سو، مطالعات زمین‌شناسی، ۷۰ ص.
- رامشت، م.، شاه‌زیدی، س. ۱۳۷۵. کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی ملی، منطقه، اقتصادی، توریسم، چاپ اول، انتشارات دانشگاه اصفهان، ۳۹۲ ص.
- رضایی، پ.، فریدی، پ.، قربانی، م. و کاظمی، م. ۱۳۹۳. برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز گابریک - جنوب خاوری استان هرمزگان، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۱): ۹۷-۱۱۳.
- حکیم‌خانی، ش.، مهدیان، م. ح. و عربخدری، م. ۱۳۸۶. تهیه نقشه فرسایش‌دگی باران برای حوضه دریاچه نمک. نشریه دانشکده منابع طبیعی، ۶۰(۳): ۷۱۳-۷۲۶.
- شکوهی، ع. و بهشتی، س. ۱۳۹۳. استفاده از یک مدل ژئومورفولوژیکی مبتنی بر توان جریان برای پهنه‌بندی فرسایش و رسوب‌خیزی حوضه‌های آبریز، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۵(۴): ۵۰۹-۵۱۸.
- صالحی، م.، اسفندیارپور بروجنی، ع.، مهاجر، ر. و باقری بداغ‌آبادی، م. ۱۳۹۴. حفاظت آب و خاک تکمیلی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه پیام‌نور.
- عرفانیان، م.، قهرمانی ساعتلو، پ. و سعادت، ح. ۱۳۹۳. ارزیابی خطر فرسایش خاک با استفاده از یک مدل فازی در آبخیز قرناوه گلستان، مجله پژوهش‌های آب و خاک، ۲۱(۶): ۱۳۵-۱۵۴.
- علی‌محمدی، ر. و مختارپور، م. ۱۳۹۶. مقایسه‌ای بر دقت برآورد اسپلین‌های رویه نازک و کروی با رگرسیون چندگانه، مجله پژوهش‌های ریاضی، ۳(۱): ۷۵-۸۴.
- فریدی، پ.، رضایی، پ.، قربانی، م. و کاظمی، م. ۱۳۹۲. کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی در مدلینگ فاکتور فرسایش‌دگی باران (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گابریک - جنوب خاوری استان هرمزگان)، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۳(۱۰): ۳۹-۵۱.
- فیضی‌زاده، ب.، دیده‌بان، خ. و غلام‌نیا، خ. ۱۳۹۵. برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم پنجره مجزا (مطالعه موردی: حوضه آبریز مهاباد)، مجله پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۵(۹۸): ۱۷۱-۱۸۱.
- معصوم‌پور، ج. ۱۳۸۴. مطالعه سینوپتیکی خشکسالی‌های فراگیر در سواحل جنوبی خزر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی دانشگاه تهران.

- مهندسان مشاور خزرآب. ۱۳۷۷. گزارش مطالعات منابع آب حوضه آبریز قره‌سو و گرگانرود، جلد دوم، وزارت نیرو، ۹ ص.
- واعظی، ع.، عباسی، م. و حاجی ملکی، خ. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل RUSLE همراه شده با سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در عرصه‌های زهکش کوچک در منطقه نیمه‌خشک، شمال‌غربی ایران. مجله پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱(۳۸): ۱-۱۰.
- Alkharabsheh, M. M., Alexandridis, T. K., Bilas, G., Misopolinos, N. and Silleos, N. 2013. Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS. *Procedia Environmental Sciences.*, 19: 912-921.
- Asadi, H., Honarmand, M., Vazifedoust, M. and Mousavi, A. 2017. Assessment of Changes in Soil Erosion Risk Using RUSLE in Navrood Watershed, Iran. *Agricultural Science Technology.*, 19: 231-244.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, M. and Norton, K. 2018. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation (RUSLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/hess-2018-68>.
- Chen, T., Li, P.X. and Zhang, L.P. 2008. Retrieving vegetation cover by using BP neural network based on "Beijing-1" microsatellite data. In: the International conference on earth observation data processing and analysis (ICEODPA2008), 28-30 December, 2008, China.
- De Oliveira, P.T.S., Sobrinho, T.A., Rodrigues, D.B.B. and Panachuki, E. 2011. Erosion risk mapping applied to environmental zoning. *Water Resources Management.*, 25(3): 1021-1036.
- Durigon, V.L., Carvalho, D.F., Antunes, M.A.H., Oliveira, P.T.S. and Fernandes, M. M. 2014. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International journal of remote sensing.*, 35(2): 441-453.
- Efthimiou, N., Lykoudi, E. and Karavitis, C. 2014. Soil erosion assessment using the RUSLE model and GIS. *European Water.*, 47: 15-30.
- Ferro, V., Giordano, G. and Iovino, M. 1991. Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrological Sciences Journal.*, 36(6):549-564.
- Ganasri, B. P. and 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.
- Gelagay, H.S. and Minale, A. S. 2016. Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research.*, 4(2):126-136.
- Ghosh, K., De, S. K., Bandyopadhyay, S. and Saha, S. 2013. Assessment of soil loss of the Dhalai river basin, Tripura, India using USLE. *International Journal of Geosciences.*, 4(1):11.
- Igwe, P.U., Onuigbo, A.A., Chinedu, O.C., Ezeaku, I.I. and Muoneke, M.M. 2017. Soil Erosion: A review of models and applications. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science.*, 4(12): 138-150.
- Kouli, M., Soupios, P. and Vallianatos, F. 2009. Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology.*, 57(3): 483-497.
- Lakkad, A.P. and Shrivastava, P.K. 2016. Estimation of cover management factor of RUSLE at sub-watershed level. *AGRES.*, 4(5): 406-412.
- Lin, C.Y. 1997. A study on the width and placement of vegetated buffer strips in a mudstone-distributed watershed. *Journal of China Soil Water Conservation.*, 29(3): 250-266.
- Loh, S.K. 2012. Estimation of USLE's C-factor using vegetation indices (VIs) for soil erosion modelling in Lake Bosumtwi Basin, Ghana (Doctoral dissertation).
- Moore, I. and Burch, G. 1986. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal.*, 50: 1294-1298.
- Nigel, R. and Rughooputh, S.D. 2010. Soil erosion risk mapping with new datasets: An improved identification and prioritisation of high erosion risk areas. *Catena.*, 82(3):191-205.
- Nikolova, E. 2016. Soil erosion modeling using Rusle and Gis on Republic of Macedonia. Politecnico Di Milano Como Campus. M.Sc in Environmental and Geomatic Engineering.
- Parveen, R. and Kumar, U. 2012. Integrated approach of universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil loss risk assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand. *Journal of Geographic Information System.*, 4(06):588-596.

- Renard, K. G., and Freimund, J.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE, J. Hydrology., 157: 287-306.
- Shi, Z. 2004. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the three Gorge Area of China, Journal of Catena. 55: 33-48.
- Tamene, L., Adimassu, Z., Aynekulu, E. and Yaekob, T. 2017. Estimating landscape susceptibility to soil erosion using a GIS- based approach in Northern Ethiopia. International Soil and Water Conservation Research., 5(3): 221-230.
- Tošić, R., Kapović, M., Dragičević, S. and Lovrić, N. 2013. Assessment of soil erosion potential using RUSLE and GIS: A case study of Bosnia and Herzegovina. Fresenius Environmental Bulletin., 22(11): 3415-3423.
- Tshikeba Kabantu, M., Muamba Tshimanga, R., Kileshye, O., Marie, J., Gumindoga, W. and Tshimpampa Beya, J. 2018. A GIS-based estimation of soil erosion parameters for soil loss potential and erosion hazard in the city of Kinshasa, the Democratic Republic of Congo. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 378:51-57.
- Uddin, K., Murthy, M. S. R., Wahid, S. M. and Matin, M. A. 2016. Estimation of soil erosion dynamics in the Koshi basin using GIS and remote sensing to assess priority areas for conservation. PloS one: 11(3), 1-19.
- USDA. 1972. Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation.
- Van der Knijff, J. M., Jones, R.J.A. and Montanarella, L. 2000. Soil Erosion Risk Assessment in Europe, EUR 19044 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 34.
- Wang, G., Gertner, G., Fang, S. and Anderson, A B. 2003. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing., 69: 889-898.
- Wang, B., Zheng, F.L., Darboux, F. and Römken, M. J. M. 2013. Soil erodibility in erosion by water: a perspective and the Chinese experience. Geomorphology., 187: 1–10.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion. losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook, Vol. 537. US Department of Agriculture, Washington, DC, 58 p.