

برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و داده‌های سنجش از دور در حوضه آبخیز سد گاوشان

محمد علی محمودی^{۱*} - سیده پریا نقشبندی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷

چکیده

فرسایش خاک یک تهدید زیست‌محیطی جدی است. یکی از مدل‌های تجربی پرکاربرد برای تخمین فرسایش خاک معادله جهانی فرسایش خاک بازنگاری شده موسوم به مدل RUSLE می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش تلفیق داده‌های بدست آمده از پیمایش صحرایی با داده‌های سنجش از دور جهت برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوزه آبخیز سد گاوشان در استان کردستان بود. مقدار عامل فرسایش سالیانه باران با استفاده از داده‌های بارش ماهانه ۱۱ ساله در ۷ ایستگاه در اطراف حوضه محاسبه شد. سپس تغییرات مکانی آن با استفاده از کریجینگ معمولی برآورد شد. شاخص فرسایش‌پذیری خاک از نقشه خاک، که خود با استفاده از پیمایش صحرایی و داده‌های سنجش از دور تهیه شد، بدست آمد. عامل توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج شد. عامل پوشش گیاهی سالیانه نیز از داده‌های سنجش از دور برآورد شد. از آنجایی که در حوضه مورد مطالعه عملیات حفاظت خاک ناچیز است، مقدار عامل حفاظت خاک در سرتاسر حوضه ۱ در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان داد که متوسط مقدار فرسایش سالیانه خاک در این حوضه ۲/۳۵ تن در هکتار است. با اینحال در نیمی از مناطق حوضه مقدار فرسایش سالیانه از ۰/۹۲ تن در هکتار کمتر است. نواحی با فرسایش خیلی زیاد در حدود ۴ درصد از حوضه را در بر می‌گیرند که عمدتاً در شیب‌های زیاد در قسمت‌های جنوب غربی حوضه واقع شده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده درجه شیب مهمترین عامل کنترل‌کننده شدت فرسایش خاک در این حوضه است.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبخیز سد گاوشان، سنجش از دور، فرسایش خاک، مدل RUSLE

مقدمه

کاربرد این مدل‌ها در سراسر دنیا موفقیت آمیز بوده است، با این‌حال به دلیل ماهیت فیزیکی‌شان این مدل‌ها دارای ورودی‌های زیادی می‌باشند که فراهم کردن آنها معمولاً در مقیاس‌های بزرگ امکان‌پذیر نیست.

یکی از مدل‌های تجربی که کاربرد بسیار زیادی در تخمین فرسایش ورقه‌ای و شیاری دارد معادله جهانی فرسایش خاک موسوم به مدل USLE می‌باشد^۳ که توسط ویشمایر و اسمیت در سال ۱۶۶۵ ارائه شد (۸). مدل USLE در اصل برای تخمین فرسایش خاک در اراضی کشاورزی یا با شیب کم ارائه گردید. این مدل پس از حدود ۳۰ سال مطالعه در مورد فرسایش آبی در ۴۶ ایستگاه تحقیقاتی در ۲۶ ایالت مختلف آمریکا با شرایط مختلف جغرافیایی و آب و هوایی و با در نظر گرفتن نتایج بررسی‌های دیگران بدست آمده است (۲۲). نسخه‌های بازنگاری شده (RUSLE) و اصلاح شده (MUSLE) این مدل در مطالعات زیادی جهت تخمین فرسایش خاک استفاده شده‌اند. مدل RUSLE توسعه یافته مدل USLE است که در آن عوامل کنترل‌کننده فرسایش بهبود یافته‌اند (۲۳ و ۲۸). این مدل یک معادله

فرسایش خاک در تمام دنیا یکی از مهمترین تهدیدات برای محیط زیست می‌باشد که اثرات نامطلوبی بر روی کیفیت خاک، تولید محصولات کشاورزی، کیفیت آب، سیستم‌های هیدرولوژیکی و اکوسیستم دارد. از اینرو برآورد فرسایش خاک و شناسایی نواحی بحرانی از نظر فرسایش کلید موفقیت برنامه‌های حفاظت خاک به شمار می‌رود.

مدل‌های فرسایش خاک ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی فرسایش خاک، شناسایی نواحی مستعد فرسایش و نیز ارزیابی برنامه‌های عملیات حفاظت خاک می‌باشند. در چند دهه گذشته مدل‌های مختلفی برای برآورد میزان فرسایش خاک ارائه شده‌اند که می‌توان به پروژه پیش‌بینی فرسایش خاک (WEPP) (۱۸)، ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) (۱۹) و EROSION 3D (۲۵) اشاره کرد. هر چند که

۱ و ۲- به ترتیب استادیار و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(Email: a.mahmoodi@uok.ac.ir)

*- نویسنده مسئول

DOI: 10.22067/jsw.v33i6.76446

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز سد گاوشان در غرب ایران با مساحتی در حدود ۲۰۶ هزار هکتار است، که در محدوده جغرافیایی ۴۶/۹۷ تا ۴۷/۹۸ درجه طول شرقی و ۳۴/۷۴ تا ۳۵/۰۹ درجه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). بخش‌هایی از این حوضه به همراه دریاچه سد در جنوب استان کردستان و بخش‌های بیشتری از آن در شمال استان کرمانشاه واقع شده است. اراضی این منطقه عمدتاً تپه‌ای، رژیم حرارتی خاک‌های آن مزیک و رژیم رطوبتی آنها زیریک است.

در شکل ۲ نقشه کاربری اراضی حوضه که توسط محمودی و همکاران (۱۶)، با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان تهیه شده، نشان داده شده است. بر اساس این نقشه بخش بزرگی از مناطق حوضه را اراضی کشاورزی تشکیل می‌دهند (۵۲/۸ درصد) و پس از آن مرتع علوفه‌ای (۲۶/۸ درصد) و مراتع بوت‌های (۱۲/۵ درصد) قرار دارند. تنها بخش کوچکی از اراضی حوضه از درخت پوشیده شده‌اند که شامل باغ‌های مثمر (۱/۵ درصد) و جنگل‌های بافر (۱/۲ درصد) می‌باشند. همچنین مناطق مسکونی ۰/۸ درصد، جاده‌ها ۳ درصد و آب ۱/۳ درصد از اراضی حوضه را در بر گرفته‌اند.

مدل RUSLE

در مدل RUSLE مقدار فرسایش سالیانه خاک در یک دامنه توسط معادله زیر بدست می‌آید (۸):

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

که در آن A مقدار خاک فرسایش یافته به وسیله فرسایش ورقه‌ای، بین‌شیاری و شیاری ($t \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$)، عامل بارندگی (MJ $\text{h}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$)، K ضریب فرسایش‌پذیری خاک ($\text{mm} \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$)، L عامل طول شیب (بی‌بعد)، S عامل درجه شیب (بی‌بعد)، C عامل مدیریت پوشش گیاهی (بی‌بعد) و p عامل عملیات حفاظت خاک (بی‌بعد) است.

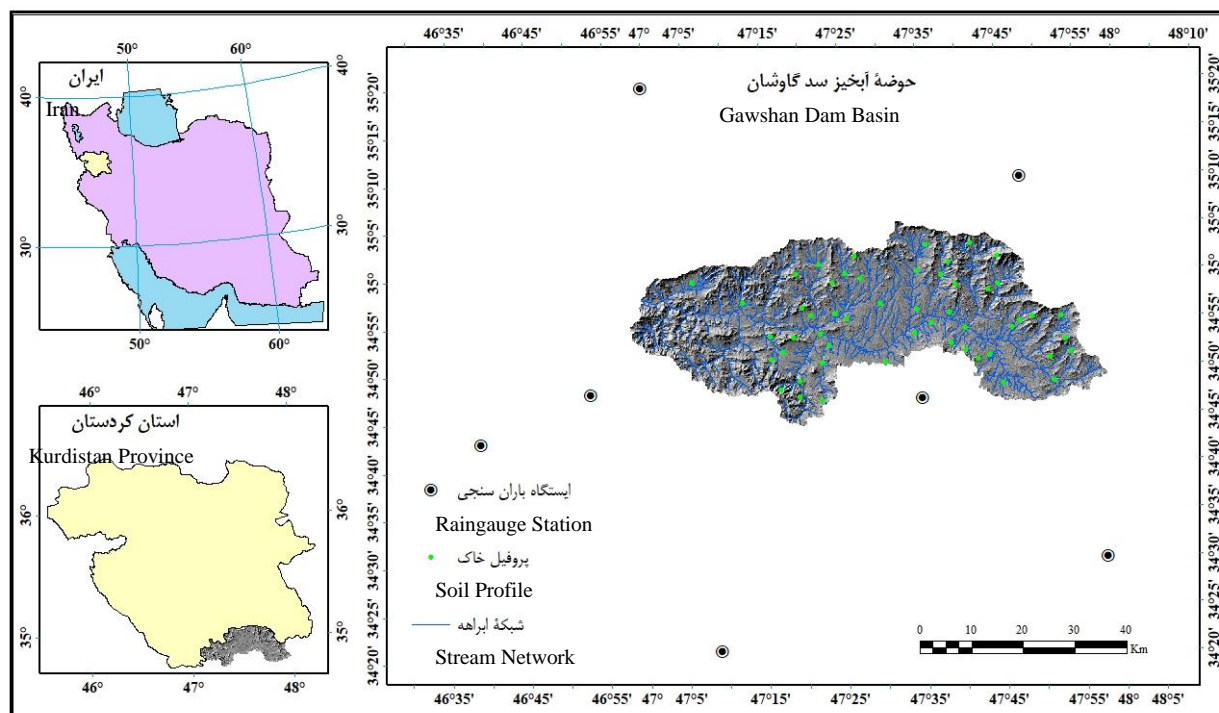
عامل بارندگی (R)

عامل بارندگی (R) شاخصی از قدرت فرسایش‌پذیری باران است که اثرات شدت و مدت بارندگی را در ایجاد فرسایش خاک نشان می‌دهد. عامل بارندگی حاصلضرب انرژی جنبشی یک رخداد (E) و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای (I30) آن است که به صورت زیر محاسبه می‌شود (۴ و ۲۰):

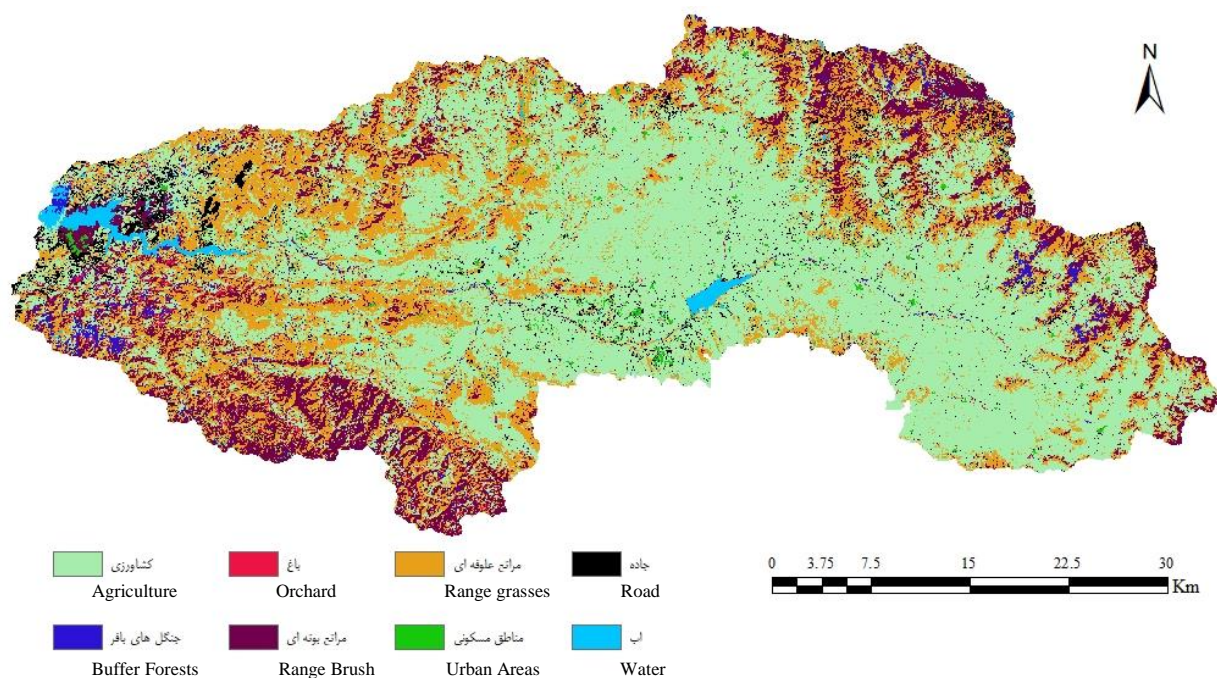
$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI_{30})_k \quad (2)$$

خطی است که در آن عوامل مختلف کنترل‌کننده فرسایش شامل بارندگی، فرسایش‌پذیری خاک، شیب، پوشش گیاهی و اقدامات حفاظتی در هم ضرب می‌شوند. از اینرو پارامتر بندی کردن نسبتاً ساده است. سادگی مدل امکان بکارگیری آن را در مقیاس بزرگ که در آنها حجم داده‌ها و محاسبات بالاست فراهم می‌سازد.

برای اجرا کردن مدل RUSLE در مقیاس‌های بزرگ اطلاعات دقیقی از پراکنش مکانی بارندگی، نوع خاک، توپوگرافی، پوشش زمینی و کاربری اراضی مورد نیاز است. اگر تعداد کافی نمونه جمع‌آوری گردد، می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی نقشه تغییرات مکانی این عوامل را تهیه کرد. روش‌های درون‌یابی مختلفی تا به امروز ارائه شده است. این روش‌ها بطور کلی شامل روش‌های آماری کلاسیک و روش‌های زمین‌آماري می‌باشند. در مقایسه با روش‌های آمار کلاسیک روش‌های زمین‌آماري ضمن در نظر گرفتن موقعیت مکانی نقاط اندازه‌گیری شده و ارتباط بین آن‌ها و همچنین همبستگی بین خصوصیات مختلف معمولاً کارایی بیشتری برای توصیف الگوی تغییرپذیری خصوصیات خاک دارند (۵، ۶ و ۱۷). تکنیک اصلی در روش‌های زمین‌آماري کریجینگ است که بهترین تخمین خطی غیراریب از یک متغیر مکانی را بدست می‌دهد. نتایج روش کریجینگ زمانی رضایت‌بخش است که تعداد نمونه‌ها کافی باشند. این امر هزینه و زمان نقشه‌برداری را افزایش می‌دهد. معمولاً برای اجتناب از این مشکل از دیگر روش‌های زمین‌آماري مانند کوکریجینگ یا رگرسیون کریجینگ استفاده می‌شود. در این روش‌ها علاوه بر متغیر اصلی از یک یا چند متغیر کمکی زودیافت، که دارای رابطه تبعی بالایی با متغیر اصلی بوده و تراکم نقاط آنها نیز در منطقه بالاست، جهت توصیف تغییرات مکانی متغیر اصلی استفاده می‌شود (۱۵). داده‌های سنجش از دور، که از ماهواره‌ها بدست می‌آیند، متغیر کمکی مفیدی برای پیش‌بینی برخی از ویژگی‌های خاک‌ها است. این امر به دلیل قابلیت ماهواره‌ها در فراهم کردن اطلاعات سطح زمین در مقیاس‌های متفاوت زمانی و مکانی است. یکی از داده‌های سنجش از دور داده‌های طیفی بدست آمده از ماهواره لندست است. امروزه بطور فزاینده‌ای از این داده‌ها برای تهیه نقشه پوشش/کاربری اراضی استفاده می‌شود. از دیگر داده‌های کمکی نقشه‌های رقومی ارتفاع (DEM) می‌باشد که یکی از مهمترین داده‌های ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی فرسایش خاک است. از اینرو می‌توان با ترکیب داده‌های بدست آمده از پیمایش صحرایی و اطلاعات سنجش از دور به همراه روش‌های زمین‌آماري و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) داده‌های ورودی مورد نیاز برای اجرای مدل RUSLE را در مقیاس‌های بزرگ بدست آورد. لذا با در نظر گرفتن جوانب فوق هدف از انجام این پژوهش تلفیق داده‌های بدست آمده از پیمایش صحرایی با داده‌های سنجش از دور جهت برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوزه آبخیز سد گاوشان در استان کردستان بود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location map of the study area



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه (۱۶)
Figure 2- Land use/Land cover (LULC) map of the study area (16)

مورد نیاز است که از ارقام ثبت شده توسط باران سنجها بدست می آید. در مواردی که این اطلاعات در دسترس نباشد می توان از روابط تجربی که برای محاسبه R، از روی میانگین تجمعی بارندگی ماهانه و سالانه ارائه شده اند، استفاده کرد.

که در آن R متوسط عامل بارندگی سالیانه ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$)، n تعداد سالهای آماری، m تعداد رخدادهای فرساینده در سال z و EI30 شاخص فرساینده رخدادهای ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$) است. برای محاسبه شاخص R اطلاعات دقیق و پیوسته ای از هر رخداد

جدول ۱- برخی از معادلات ارائه شده برای محاسبه عامل بارندگی سالیانه
Table 1- Summary of different equations developed for calculating rainfall erosivity factor

شماره No.	معادله Equation	نویسنده (گان) Author(s)	محل تکوین Original location
1	$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.51 \log_{10}(P_i^2 / P) - 0.08188)}$	Wischmeier and Smith (28) as cited in Ganasri and Ramesh (8)	USA
2	$R = 0.562P - 8.12$	Hurni (10)	Ethiopia
3	$R = 81.5 + 0.375P \quad 340 \leq P \leq 3500$	Ram et al. (21), as cited in Jain and Das (12)	Jharkhand, India
4	$R = \begin{cases} 0.07397MFI^{1.847} & MFI < 55 \text{ mm} \\ 95.77 - 6.081MFI + 0.4770MFI^2 & MFI > 55 \text{ mm} \end{cases}$	Renard and Freimund (23)	West coast of USA
5	$R = \sum_{i=1}^{12} -1.15527 + 1.792P_i$	Zhou et al. (29) as cited in Li et al. (14)	Southern China
6	$R = -823.8 + 5.213P$	Fernandez et al. (7)	USA
7	$R = 0.1215MFI^{2.2421}$	Irvem et al. (11)	Turkey

که در آن NDVI شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده و $\alpha=2$ و $\beta=1$ پارامترهایی هستند که شکل رابطه منحنی بین NDVI و C را مشخص می‌کنند. شاخص NDVI شاخصی از سبزیگی گیاهی و فعالیت فتوسنتزی است و یکی از پرکاربردترین شاخص‌های پوشش گیاهی است که به صورت زیر تعریف می‌شود (۱):

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (5)$$

که در آن NIR مقدار باند مادون قرمز نزدیک و Red مقدار باند قرمز در تصاویر ماهواره‌ای است. از نظر بیوفیزیکی NDVI بخشی از انرژی تابشی است که می‌تواند صرف فعالیت‌های فتوسنتزی گردد. مقدار NDVI می‌تواند بین -۱ تا +۱ تغییر کند. مقادیر منفی آن عموماً مفهوم اکولوژیکی خاصی ندارد. مقادیر بزرگتر آن با پوشش گیاهی فعال از نظر فتوسنتزی همبستگی دارد (۱).

در این پژوهش برای محاسبه شاخص NDVI از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ استفاده شد. این تصاویر از سایت سازمان نقشه‌برداری جغرافیایی ایالات متحده آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) در سطح تصحیحات LIT دریافت شدند که در آنها تصحیحات هندسی ضمن رفع اثر جابجایی ناشی از پستی و بلندی‌ها (تصحیحات ارتو) انجام شده است. علاوه به منظور اطمینان از هندسه تصویر از نقشه‌های جاده‌ها و آبراه‌ها با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شد و تطابق دقیق این تصاویر مورد تأیید قرار گرفت. قبل از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لازم است تصحیحات دیگری نیز بر روی آنها انجام شود. یکی از این موارد تصحیحات اتمسفری می‌باشد. تصحیحات اتمسفری برای کاهش و یا حذف خطای اتمسفری است. برای انجام تصحیح اتمسفری از نرم‌افزار ENVI 5.3 و روش FLAASH استفاده شد. از آنجایی که مقادیر

در جدول ۱ برخی از معروفترین این روابط، که در مناطق مختلف دنیا بدست آمده و استفاده شده‌اند، آورده شده‌اند. در این فرمول‌ها MFI شاخص اصلاح شده فورنیه است که مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود (۲):

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

که در آن P_i میانگین بارندگی تجمعی ماهانه و P میانگین بارندگی تجمعی سالانه می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از هر کدام از فرمول‌های مذکور مقدار R برای هفت ایستگاه مختلف، شامل ایستگاه‌های روانسر، سنقر، قروه، سنندج، کرمانشاه، کنگاور و کامیاران، در داخل و مجاورت حوضه محاسبه شد. آمار این ایستگاه‌ها از سازمان هواشناسی کشور تهیه شدند. دوره آماری این داده‌ها ۱۱ ساله بوده و مربوط به سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۵ می‌باشد. در نهایت پس از مطابقت مقادیر R بدست آمده از هر فرمول با واقعیت‌های عینی حوضه و نظرات کارشناسی بهترین رابطه انتخاب شد. با در دست داشتن مقادیر R برای ایستگاه‌های مختلف با استفاده از کریجینگ معمولی نقشه R برای تمام منطقه مورد مطالعه بدست آمد.

عامل پوشش گیاهی (C)

این عامل اثرات پوشش گیاهی و بقایای پوشش گیاهی سطح خاک را بر میزان فرسایش خاک نشان می‌دهد. مقدار عامل پوشش گیاهی از رابطه زیر محاسبه شد (۲۶):

$$C = \exp\left(-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right) \quad (4)$$

زیرسطحی نظیر رنگ، عمق، ساختمان، تجمع آهک و غیره پروفیل-های مختلف تشریح گردیده و ضمن درج مشخصات آنها در برگه‌های تشریح پروفیل نسبت به تهیه نمونه‌های خاک جهت انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی در آزمایشگاه اقدام گردید. در آزمایشگاه توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتر (۹)، جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها به روش استوانه (۳)، ضریب آبگذری اشباع خاک‌ها به روش بار ثابت (۱۳) و ماده آلی خاک‌ها به روش والکلی و بلک (۲۷) اندازه‌گیری شدند. عصاره اشباع خاک‌ها نیز به روش رودز و اوستر (۲۴) بدست آمد و سپس pH و EC آنها اندازه‌گیری شد. در نهایت با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده خاک‌های مختلف در سیستم جامع رده‌بندی خاک آمریکایی تا سطح فامیل رده‌بندی شدند. سپس با در دست داشتن نتایج حاصل از رده‌بندی خاک‌ها و پیمایش صحرایی منطقه نسبت به ویرایش و تدقیق مرز واحدهای جدا شده بر روی نقشه اولیه خاک اقدام و پس از اصلاحات لازم نقشه نهایی خاک‌های منطقه تهیه شد.

عامل توپوگرافی (LS)

عامل توپوگرافی اثرات طول شیب (L) و درجه شیب (S) را بر میزان فرسایش خاک نشان می‌دهد. مقدار عامل طول شیب از رابطه زیر محاسبه شد (۲۸):

$$L = \left(\frac{Q_a^{m+1} - (Q_a - 1)^{m+1}}{n^m} \right) \left(\frac{M}{22.12848} \right)^m \quad (7)$$

که در آن Q_a مقدار تجمع جریان، M اندازه سلول نقشه تجمع جریان (30×30)، n حداقل تجمع جریان در شبکه آبراهه حوضه (مقدار تجمع جریان در ابتدای هر آبراهه) و m یک توان است که به نسبت فرسایش شیاری به بین شیاری (β) بستگی دارد. در نسبت‌های متوسط مقدار m برابر است با:

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (8)$$

و

$$\beta = \frac{(\sin \theta / 0.0896)}{[3(\sin \theta^{0.8}) + 0.56]} \quad (9)$$

که در آن θ زاویه شیب است. از آنجایی که طول شیب برابر است با فاصله از نقطه شروع رواناب تا نقطه‌ای که در آن رواناب به یک ابراهه وارد می‌شود، لذا مقدار طول شیب در هر دامنه بستگی به تراکم آبراهه دارد. به منظور تشخیص و ترسیم آبراهه‌ها در این پژوهش از نقشه تجمع جریان استفاده شد؛ بدین‌صورت که پیکسل‌هایی که تجمع جریان در آنها از ۱۰۰۰ عدد بیشتر بود ($n=1000$) بعنوان آبراهه جریان در نظر گرفته شدند (شکل ۱). این مقدار n از طریق آزمون و خطا با همپوشانی و مطابقت نقشه‌های آبراهه بدست آمده با تصاویر گوگل ارث و نیز بازدیدهای صحرایی بدست آمد. رابطه (۷) برای محاسبه عامل L از اصلاح رابطه‌ای که

عامل NDVI در فصول مختلف سال تغییر می‌کند، لذا مقادیر آن در فصول مختلف سال محاسبه شد و میانگین آن بعنوان NDVI سالانه در نظر گرفته شد که برای محاسبه C سالانه با استفاده از رابطه (۵) مورد استفاده قرار گرفت.

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

ضریب فرسایش‌پذیری خاک حساسیت ذاتی خاک به فرسایش را نشان می‌دهد. مقدار این عامل از رابطه زیر محاسبه شد (۲۸):

$$K = [2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25 (s - 2) + 2.5 (p - 3)] / 100 \quad (6)$$

که در آن M برابر است با حاضارب درصد سیلت اصلاح شده (مجموع درصد سیلت و شن ریز) در مجموع درصدهای سیلت و شن، OM درصد ماده آلی خاک، s کلاس ساختمان خاک و p کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک است. رابطه فوق مقدار K را در سیستم آمریکایی بدست می‌دهد که با تقسیم مقدار بدست آمده از این رابطه بر ضریب ۷/۵۹ مقدار K در سیستم بین‌المللی ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) بدست می‌آید (۲۸). برای تهیه نقشه فرسایش‌پذیری خاک پس از تهیه نقشه خاک با استفاده از رابطه فوق مقدار K برای هر سری خاک محاسبه و نقشه فرسایش‌پذیری خاک بدست آمد.

نقشه خاک‌های حوضه با استفاده از نتایج حاصل از پیمایش صحرایی و نیز کمک گرفتن از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های توپوگرافی تهیه شد. در مقیاس‌های کوچک می‌توان تأثیر اقلیم، مواد مادری و زمان را بر تشکیل و تحول خاک‌های یک منطقه یکنواخت فرض کرد و تغییرات و تنوع خاک‌ها را به تغییرات موجودات زنده و توپوگرافی نسبت داد. در این مطالعه اثرات موجودات زنده بر روی تغییرات خاک‌ها به کمک نقشه NDVI و اثرات توپوگرافی به کمک شاخص خیزی توپوگرافی و جهت شیب پیمایش شد. نقشه NDVI با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (بخش قبلی) و نقشه‌های جهت شیب و شاخص خیزی با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع (DEM) و نرم‌افزار ArcGIS بدست آمدند. سپس نقشه NDVI در دو کلاس (مناطق با پوشش گیاهی کم و زیاد)، نقشه شاخص خیزی در دو کلاس (مناطق با شیب زیاد و تجمع جریان کم در مقابل مناطق با شیب کم و تجمع جریان زیاد) و نقشه جهت شیب نیز در دو کلاس (شیب‌های آفتابگیر و سایه) طبقه‌بندی شدند. با انطباق این سه نقشه نقشه اولیه خاک بدست آمد. این نقشه مناطقی را که از نظر عوامل خاکساز و احتمالاً نوع خاک کم و بیش مشابه هستند از همدیگر تفکیک می‌کند. پس از تهیه نقشه اولیه خاک جهت شناسایی نهایی خاک‌ها و ویرایش و تعیین مرز واحدهای خاک، مطالعات صحرایی و حفر پروفیل در واحدهای اولیه خاک صورت گرفت. در این مرحله مشاهدات حاصل از ۵۰ عدد پروفیل خاک و بالغ بر ۱۰۰ مورد مشاهده صحرایی (مقاطع طبیعی و ترانشه‌ها) مورد بررسی قرار گرفت؛ بدین‌صورت که با در نظر گرفتن خصوصیات افق‌های سطحی و

روابط مشابهی را برای شرایط اقلیمی کشور روشن می‌سازد. در این پژوهش با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و واقعیت‌های عینی موجود در حوضه و نیز تشابه اقلیمی نسبی حوضه مورد مطالعه با کشور ترکیه از فرمول ارائه شده توسط ایروم و همکاران (۱۱) برای محاسبه R استفاده شد. در شکل ۳ نقشه‌های تغییرات مکانی میانگین بارندگی تجمعی سالیانه (P) و نیز عامل بارندگی (R) سالیانه در حوضه مورد مطالعه نشان داده شده‌اند. بر اساس نقشه‌های بدست آمده با حرکت از شرق به غرب در حوضه مقدار بارندگی سالیانه و به تبع آن مقدار شاخص فرسایش باران افزایش می‌یابد. در جدول ۳ دامنه تغییرات و توزیع برخی از پارامترهای مورد مطالعه در حوضه ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر این پارامترها در حوضه تغییرات نسبتاً زیادی داشته بطوری که مقدار P بین ۳۳۳ تا ۴۶۸ میلی‌متر و مقدار R بین ۵۶۴ تا $1311 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ متغیر است. همچنین میانگین بارندگی سالیانه در این حوضه ۳۸۹ میلی‌متر و میانگین عامل بارندگی سالیانه $862 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ می‌باشد. در شکل ۴ نقشه خاک‌های منطقه مورد مطالعه و نیز نقشه فرسایش‌پذیری آنها در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ نشان داده شده است. براساس این نقشه خاک‌های این حوضه شامل ۸ واحد می‌باشند. در جدول ۴ سری خاک‌های غالب در هر واحد به همراه رده‌بندی مربوط به آنها در سیستم جامع رده‌بندی خاک آمریکایی تا سطح فامیل آورده شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در بین خاک‌های حوضه خاک‌های سری حیدرآباد با ضریب فرسایش‌پذیری ۰/۰۴۵ حساس‌ترین خاک‌ها به فرسایش و خاک‌های سری حسین‌آباد دهبه با ضریب فرسایش‌پذیری ۰/۰۲۰ مقاوم‌ترین خاک‌ها در برابر فرسایش می‌باشند. همچنین میانگین این ضریب برای کل سطح حوضه برابر ۰/۰۳ است.

برای محاسبه عامل توپوگرافی در یک شیب نامنظم ارائه شده است (۲۲) بدست آمده است. مقدار عامل درجه شیب (S) از رابطه زیر محاسبه شد (۲۸):

$$S = \begin{cases} 10 \sin \theta + 0.03 & S_g < 9\% \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & S_g \geq 9\% \end{cases} \quad (10)$$

که در آن S_g درصد شیب است. نقشه‌های شیب و تجمع جریان با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع (DEM) حوضه و به کمک نرم‌افزار Arc GIS تهیه شدند. نقشه DEM استفاده شده در این مطالعه دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر بود که از سایت سازمان نقشه‌برداری جغرافیایی ایالات متحده آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) بدست آمد.

عامل حفاظت خاک (P)

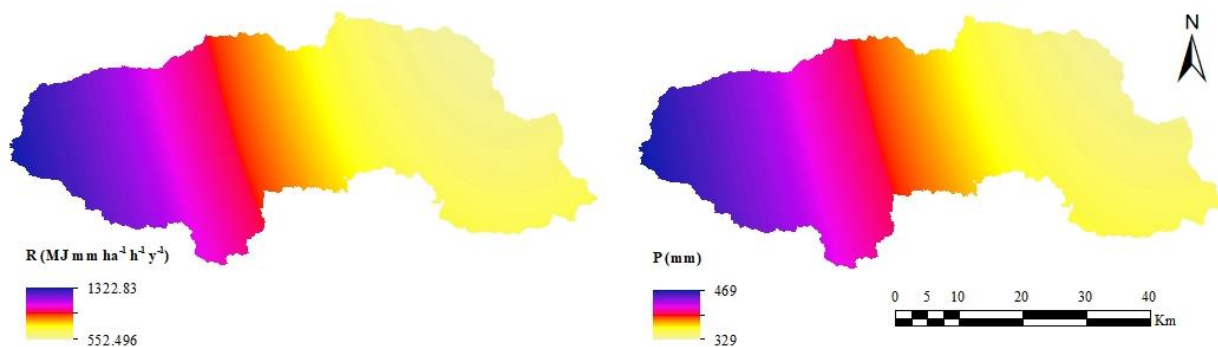
این عامل اثرات عملیات حفاظت خاک مانند کشت نواری و کشت در روی خطوط تراز را بر میزان فرسایش خاک نشان می‌دهد. مقدار این عامل بین صفر تا ۱ متغیر است. هر چه مقدار عملیات حفاظت خاک بیشتر باشد مقدار این عامل به صفر نزدیکتر می‌شود. از آنجایی که در حوضه مورد مطالعه عملیات حفاظت خاک ناچیز است، مقدار این عامل در سرتاسر حوضه ۱ در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

در جدول ۲ مقادیر ضریب R، که با استفاده از روابط مختلف ارائه شده در جدول ۱ برای ایستگاه‌های مختلف بدست آمده‌اند، آورده شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که مقادیر R بدست آمده برای هر ایستگاه توسط فرمول‌های ارائه شده اختلاف نسبتاً زیادی با هم دارند. این موضوع ناشی از شرایط اقلیمی متفاوتی است که هر کدام از روابط فوق در آنجا تکوین یافته‌اند. این مسأله ضرورت ایجاد

جدول ۲- مقادیر میانگین سالیانه بارندگی و عامل بارندگی محاسبه شده بر اساس روابط ارائه شده در جدول ۱ برای ایستگاه‌های مختلف
Table 2- Annual average rainfall and rainfall erosivity factor calculated using equations given in table (1) for different stations

ایستگاه Station	P (mm)	R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ y ⁻¹)							CV (%)
		Eq. 1	Eq. 2	Eq. 3	Eq. 4	Eq. 5	Eq. 6	Eq. 7	
قروه Ghorveh	309.0	154	166	197	655	540	787	508	55
کامیاران Kamyaran	501.9	289	274	270	1748	886	1793	1439	68
کنگاور Kangavar	400.2	224	217	232	1160	703	1262	932	63
کرمانشاه Kermanshah	460.6	284	251	254	1595	811	1577	1306	66
روانسر Ravansar	439.5	268	239	246	1434	774	1467	1166	65
سندج Sanandaj	462.3	268	252	255	1520	815	1586	1240	66
سقز Songhor	351.5	185	189	213	859	616	1008	678	59

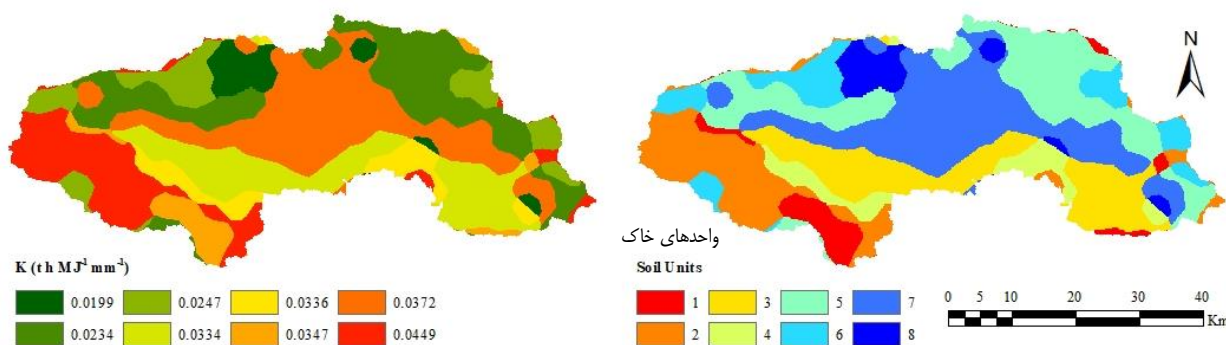


شکل ۳- نقشه‌های میانگین سالانه مقدار و عامل بارندگی در منطقه مورد مطالعه
Figure 3- Maps of annual average rainfall and rainfall erosivity factor of the study area

جدول ۳- آماره‌های توصیفی برخی از پارامترهای مورد مطالعه

Table 3- Descriptive statistics of selected parameters

پارامتر Parameter	کمترین Minimum	بیشترین Maximum	میانگین Mean	میانه Median	انحراف معیار Standard deviation	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis
P (mm)	333	468	389	383	41	0.32	1.69
R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ y ⁻¹)	564	1311	862	817	224.9	0.39	1.74
K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01	-0.02	1.91
H (m)	1456	3230	1938	1921	209	0.77	4.50
S _g (%)	0	210	20	15	16	1.27	4.71
LS	0.03	15.89	0.22	0.10	0.41	7.52	102.24
C	0.00	1.00	0.39	0.40	0.22	0.04	2.23
A (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	0	461.97	2.35	0.92	5.16	10.73	242.26



شکل ۴- نقشه خاک و فرسایش پذیری خاک‌های منطقه مورد مطالعه
Figure 4- soil and soil erodibility map (K) of the study area

جدول ۴- رده‌بندی آمریکایی و مقادیر ضریب فرسایش پذیری خاک‌های حوضه

Table 4- Taxonomic classification and respective K factor of the watershed soils

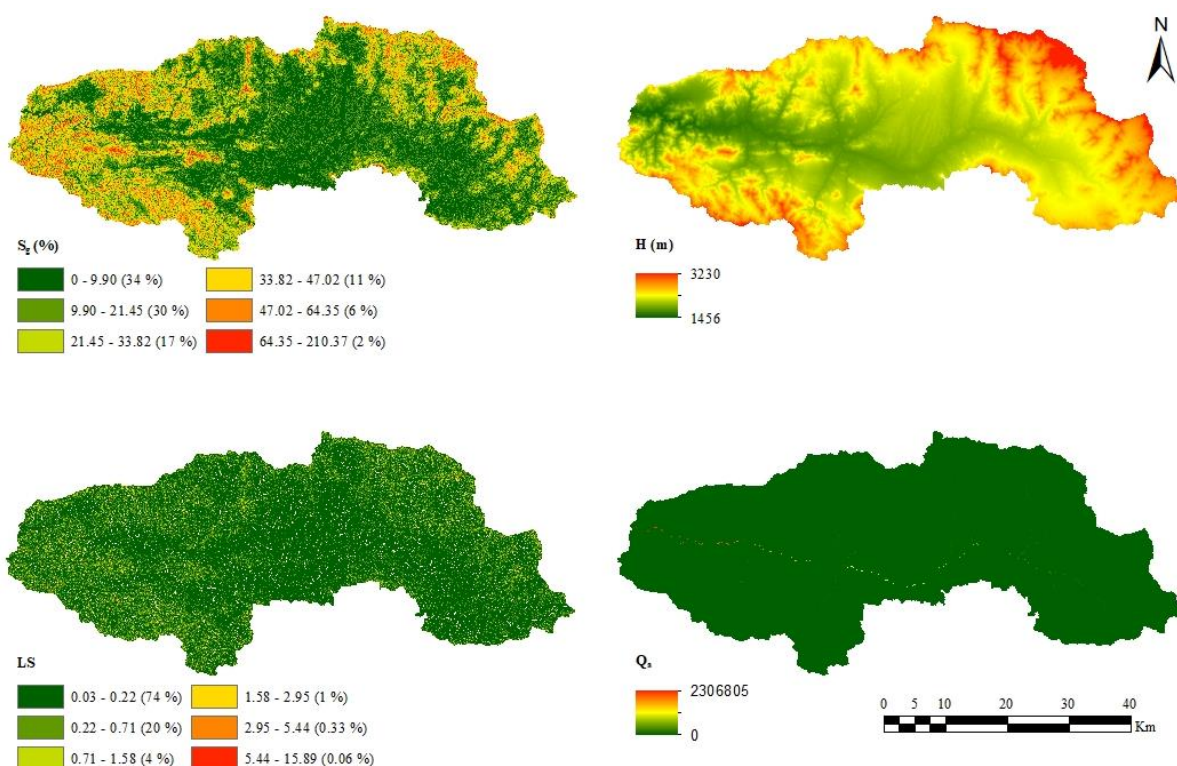
واحد‌های خاک Soil units	سری خاک غالب Dominant series name	رده‌بندی آمریکایی Taxonomic classification	K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	مساحت (%) Area (%)
1	Lanjab	Clay Skeletal, Mixed, Mesic, Typic Xerorthents	0.034	8.2
2	Heydarabad	Fine Silty, Mixed, Mesic, Typic Haploxerepts	0.045	12.4
3	Agaholia	Loamy Skeletal, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts	0.033	13.8
4	Meyvaleyh	Fine, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts	0.034	8.9
5	Sarkhom	Very Fine, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts	0.024	17.4
6	Gerdekaneholia	Fine, Mixed, Mesic, Typic Haploxerolls	0.025	8.2
7	Kallepa	Clay Skeletal, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts	0.037	22.2
8	Hosainabaddehbaneh	Fine, Mixed, Mesic, Typic Calcixerolls	0.020	8.9

خاک محسوب شده و منجر به افزایش عامل شیب در معادله جهانی فرسایش خاک می‌گردد.

نقشه عامل توپوگرافی (LS) که از همپوشانی نقشه‌های شیب و تجمع جریان به کمک معادلات ۷ تا ۱۰ بدست آمده است، مقدار این عامل را برای حوضه بین ۰/۰۳ تا ۱۶ نشان می‌دهد. البته توزیع این عامل در سطح حوضه به شدت نامتقارن بوده بطوریکه مقدار آن در ۷۴ درصد از اراضی حوضه از ۰/۲۲ کمتر است. همچنین میانگین این عامل در سطح حوضه ۰/۲۲ و میانه آن ۰/۱ است که بیانگر چولگی این عامل به سمت مقادیر کم در منحنی توزیع فراوانی آن است (جدول ۳).

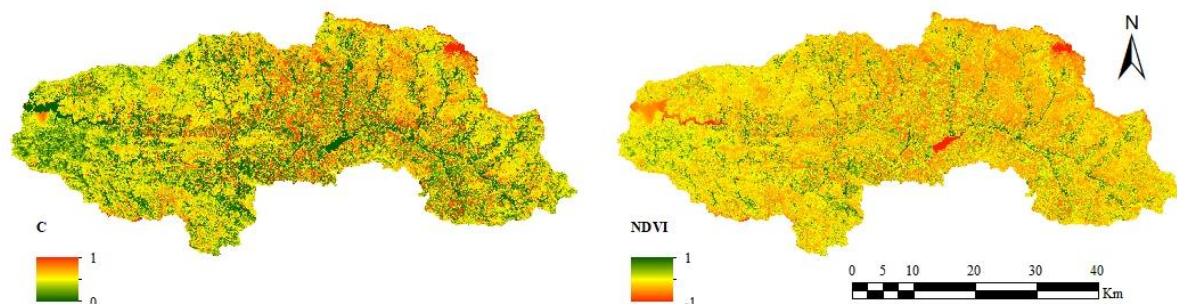
در شکل ۵ نقشه‌های رقومی ارتفاع، شیب، تجمع جریان و عامل توپوگرافی (LS) نشان داده شده‌اند. بر اساس نقشه رقومی ارتفاع ارتفاع اراضی حوضه بین ۳۲۳۰ متر در بلندترین نقطه تا ۱۴۵۶ متر در خروجی حوضه متغیر است. ارتفاع میانگین حوضه ۱۹۳۸ و ارتفاع میانه آن ۱۹۲۱ متر می‌باشد (جدول ۳).

بر اساس نقشه شیب در حدود ۳۴ درصد از اراضی حوضه دارای شیبی بین ۰ تا ۱۰ درصد، ۳۰ درصد از آن دارای شیب بین ۱۰ تا ۲۱ درصد و مابقی اراضی حوضه دارای شیبی بیشتر از ۲۱ درصد می‌باشند. همچنین شیب متوسط حوضه ۲۰ درصد و شیب میانه آن ۱۵ درصد می‌باشد (جدول ۳). همگی این نتایج بیانگر شیب نسبتاً زیاد اراضی حوضه می‌باشند، که خود یک عامل بالقوه در ایجاد فرسایش



شکل ۵- نقشه‌های رقومی ارتفاع (H)، شیب (Sg)، تجمع جریان (Qa) و عامل توپوگرافی (LS) منطقه مورد مطالعه

Figure 5- Maps of elevation (H), slope (Sg), flow accumulation (Qa) and topographic factor (LS) of the study area



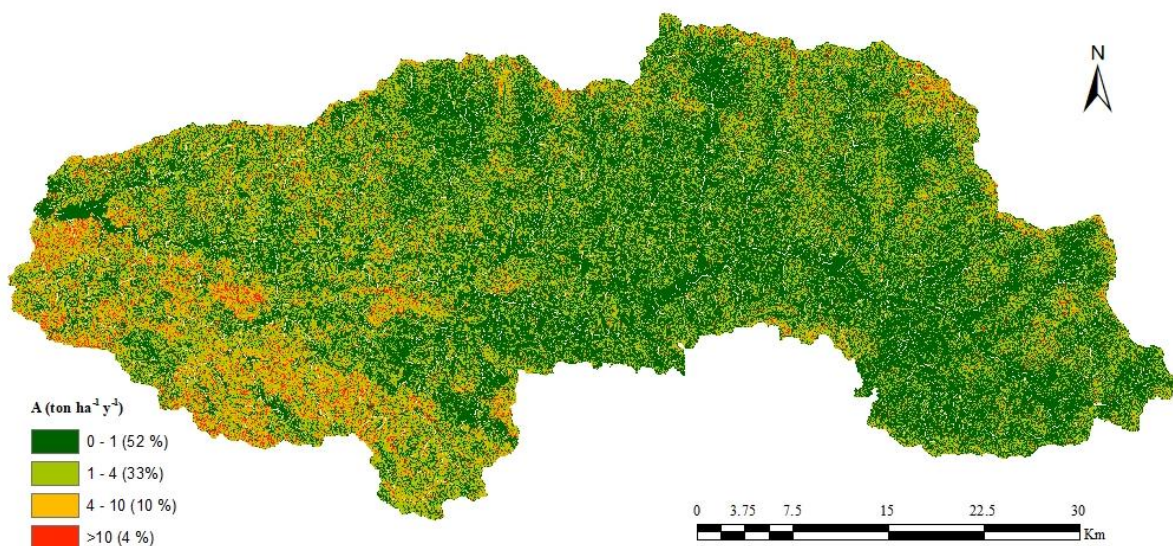
شکل ۶- نقشه‌های شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و عامل پوشش گیاهی (C) سالانه منطقه مورد مطالعه

Figure 6- Maps of normalized difference vegetation index (NDVI) and annual crop cover management factor (C) of the study area

۰/۳۹ می‌باشد (جدول ۳).

در شکل ۷ نقشه مقدار فرسایش سالیانه خاک حوضه، که با استفاده از معادله (۱) و از حاصلضرب نقشه‌های عوامل مربوط به آن بدست آمده است، نشان داده شده است. در این نقشه مقدار فرسایش خاک در ۴ کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شده است. نواحی با فرسایش کم در حدود ۵۲/۵ درصد از خاک‌های حوضه را در بر می‌گیرند (جدول ۵). میزان فرسایش سالیانه در این مناطق بین صفر تا ۱ تن در هکتار متغیر و بطور متوسط ۰/۴۳ تن در هکتار می‌باشد. این خاک‌ها عمدتاً در ارتفاعات پایین‌تر حوضه در تراس‌های آبرفتی کنار رودخانه‌ای واقع شده‌اند که به دلیل شیب کم و حاصلخیزی بالا غالباً دارای کاربری کشاورزی می‌باشند.

در شکل ۶ نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و عامل پوشش گیاهی (C) سالیانه در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) سالیانه از نقشه NDVI با استفاده از معادله (۴) بدست آمده است. لازم به ذکر است که در محاسبه عامل C در حوضه در مناطقی که از آبهای روباز پوشیده شده است مقدار این عامل، بدون در نظر گرفتن معادله (۴)، صفر در نظر گرفته شده است. بطوری‌که ملاحظه می‌شود مقدار NDVI در اراضی اطراف رودخانه‌های حوضه بیشتر از سایر بخش‌های حوضه است که خود بیانگر وجود پوشش گیاهی بیشتر (درختان کنار رودخانه‌ای) در این قسمت‌هاست. از طرف دیگر به دلیل تراکم بیشتر پوشش گیاهی کمترین مقدار C مربوط به اراضی اطراف رودخانه‌ها است. همچنین میانگین مقدار C در سطح حوضه برابر



شکل ۷- نقشه میانگین مقدار فرسایش سالیانه خاک‌های منطقه مورد مطالعه

Figure 7- map of mean annual soil erosion of the study area

جدول ۵- میانگین برخی از پارامترهای مورد مطالعه در کلاس‌های مختلف فرسایش خاک

Table 5- Mean of some selected parameters in different erosion classes

کلاس فرسایش Erosion class	دامنه فرسایش Erosion range (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	A (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	H (m)	S _g (%)	R	مساحت در کل حوضه Area in the Watershed (%)	مساحت در هر کلاس کاربری* (%) Area in each LULC* (%)						
							1	2	3	4	5	6	7
کم Low	0 - 1	0.43	1918	14.2	204	52.5	67	1	2	8	19	1	2
متوسط Moderate	1 - 4	2.03	1958	25.2	212	33.2	41	1	1	16	35	1	4
زیاد High	4 - 10	6.10	1982	31.6	220	10.3	32	1	1	21	39	1	5
خیلی زیاد Very high	> 10	20.13	1982	32.2	226	4.1	30	1	1	23	39	1	5

* اعداد ۱ تا ۷ به ترتیب بیانگر کاربری‌های کشاورزی، جنگل‌های بافر، باغ، مراتع بوته‌ای، مراتع علوفه‌ای، مناطق مسکونی و جاده می‌باشند.

* Numbers 1 to 8 are correspond to agriculture, buffer forests, orchard, range brush, range grasses, urban areas and roads LULC, respectively.

کمتر است (جدول ۳).

نتیجه گیری

در این پژوهش میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز سد گاشان با استفاده از مدل RUSLE برآورد شد. پارامترهای مدل به کمک پیمایش صحرایی، داده‌های بارندگی ماهانه و نیز داده‌های سنجش از دور محاسبه شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که در داخل حوضه با حرکت از شرق به غرب مقدار عامل بارندگی افزایش می‌یابد. وجود باران‌های فرسایش‌زا به همراه توپوگرافی شدیدتر باعث شده است تا در قسمت‌های جنوب غربی حوضه شدت فرسایش بسیار زیاد باشد. با اینحال در بیش از ۵۲/۵ درصد از اراضی حوضه شدت فرسایش کم است. نواحی با شدت فرسایش کم عمدتاً بر روی تراس-های کنار رودخانه‌ای واقع شده‌اند. با گذر از این تراس‌ها به دشت‌های دامنه‌ای و مناطق بالاتر شدت فرسایش به دلیل افزایش شیب و کاهش پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. این مسأله لزوم انجام عملیات حفاظت خاک را در این مناطق نشان می‌دهد. متوسط مقدار فرسایش سالیانه خاک در این حوضه در حدود ۲/۳۵ تن در هکتار برآورد شده است. با اینحال شدت فرسایش خاک در داخل حوضه توزیع بسیار نامتقارنی دارد؛ بطوریکه در نیمی از مناطق حوضه مقدار فرسایش سالیانه از ۰/۹۲ تن در هکتار کمتر است. بر اساس نتایج بدست آمده درجه شیب مهمترین عامل کنترل‌کننده شدت فرسایش خاک در این حوضه است. همچنین یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که تلفیق داده‌های بدست آمده از پیمایش صحرایی با داده‌های سنجش از دور به همراه سامانه اطلاعات جغرافیایی امکان خوبی برای برآورد پارامترهای معادله جهانی خاک فراهم می‌کنند. نتایج این مطالعه می‌تواند جهت شناسایی نواحی مستعد فرسایش و اولویت‌بندی آنها به منظور انجام عملیات حفاظت خاک مورد استفاده قرار گیرد.

نواحی با فرسایش متوسط در تراس‌های مرتفع‌تر و با شیب بیشتر قرار گرفته‌اند. بخش‌های زیادی از این مناطق نیز دارای کاربری کشاورزی می‌باشند (جدول ۵). شیب بیشتر زمین در این مناطق باعث شده است تا متوسط فرسایش در آنها افزایش یافته و به حدود ۲/۰۳ تن در هکتار برسد. این مناطق در حدود یک سوم از کل سطح حوضه را در بر گرفته‌اند.

مناطق با فرسایش زیاد عمدتاً در دامنه کوهها و تپه‌ها قرار گرفته‌اند. شیب متوسط این مناطق بسیار بیشتر از دو کلاس قبلی بوده و به حدود ۳۲ درصد می‌رسد. پوشش غالب این اراضی مراتع کم‌پشت تا متوسط می‌باشد؛ با اینحال بخش‌های قابل توجهی از این مناطق (در حدود ۳۲ درصد) نیز دارای کاربری کشاورزی است (جدول ۵)، که به دلیل دارا بودن شیب زیاد و استفاده از روش‌های سنتی خاکورزی این اراضی در زمره پرخطرترین اراضی از نظر فرسایش و تخریب می‌باشند. همگی این عوامل باعث شده‌اند که شدت فرسایش در این مناطق بسیار بیشتر شده و به حدود ۶ تن در هکتار در سال برسد.

مناطق با فرسایش خیلی زیاد عمدتاً در بخش‌های جنوب غربی حوضه قرار گرفته‌اند. این مناطق در حدود ۴ درصد از سطح حوضه را در بر می‌گیرند که در شیب‌های خیلی زیاد در ارتفاعات کوهها، که خاک‌های کم عمقی دارند، قرار گرفته‌اند. پوشش غالب این مناطق مراتع کم‌پشت و یا زمین‌های عاری از پوشش گیاهی است (جدول ۵). وجود پوشش گیاهی کم و شیب زیاد باعث شده است تا این مناطق در گروه فرسایش‌پذیرترین مناطق حوضه قرار بگیرند. بطور کلی بر اساس تجزیه و تحلیل نقشه فرسایش خاک بدست آمده متوسط مقدار فرسایش سالیانه خاک در این حوضه ۲/۳۵ تن در هکتار است. با اینحال به دلیل توزیع بسیار نامتقارن آن شدت فرسایش خاک در بخش‌های زیادی از حوضه بسیار کمتر از این مقدار است؛ بطوریکه در نیمی از مناطق حوضه مقدار فرسایش سالیانه از ۰/۹۲ تن در هکتار

منابع

- 1- Anderson G.L., Hanson J.D., and Hass R.H. 1993. Evaluating landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. *Remote Sensing of the Environment* 45(2): 165-175.
- 2- Arnoldus H.M.J. 1977. Methodology Used to Determine the Maximum Potential Average Annual Soil Loss due to Sheet and Rill Erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin* 34: 39-51.
- 3- Blake G.R., and Hartge K.H. 1986. Particle density. P.377-381. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 4- Brown L.C., and Foster G.R. 1987. Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30: 379-386.
- 5- Burgess T.M., and Webster R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: the semivariogram and punctual kriging. *Soil Science* 31: 315-331.
- 6- Burrough P.A. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press, New York.
- 7- Fernandez C., Wu J., McCool D., and Stoeckle C. 2003. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. *Journal of Soil and Water Conservation* 58: 128-136.
- 8- 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: 953-961.
- 9- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. P.383-409. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis*.

- Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 10- Hurni H. 1985. Soil Conservation Manual for Ethiopia: A Field Manual for Conservation Implementation. Soil Conservation Research Project, Addis Ababa.
 - 11- Irvem A., Topaloglu F., and Uygur V. 2007. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan river basin in Turkey. *Journal of Hydrology* 336(1): 30–37.
 - 12- Jain M.K., and Das D. 2010. Estimation of sediment yield and areas of soil erosion and deposition for watershed prioritization using GIS and remote sensing. *Water Resources Management* 24(10): 2091-2112.
 - 13- Klute A., and Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. P.687-734. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
 - 14- Li L., Wang Y., and Liu C. 2014. Effects of land use changes on soil erosion in a fast developing area. *International Journal of Environmental Science and Technology* 11(6): 1549–1562.
 - 15- Liao K., Xu S., Wu J., and Zhu Q. 2013. Spatial estimation of surface soil texture using remote sensing data. *Soil Science and Plant Nutrition* 59(4): 488-500.
 - 16- Mahmoodi M.A., Momeni S., and Davari M. 2018. Application of support vector machines for land use and land cover classification from Landsat ETM imagery. *Journal of Water and Soil*. Under publishing. (In Persian with English abstract)
 - 17- McBratney A.B., and Webster R. 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science* 37: 617–639.
 - 18- Nearing M.A., Foster G.R., and Lane L.J. 1989. A process-based soil erosion model for USDA water erosion prediction project technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 32(5): 1587-1593.
 - 19- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams J.R. 2011. *Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation, Version 2009*. Texas Water Resources Institute.
 - 20- Panagos P., Ballabio C., Borrelli P., Meusburger K., Klikc A., Rousseva S., Tadić M.P., Michaelides S., Hrabalíková M., Olsen P., Aalto J., Lakatos M., Rymaszewicz A., Dumitrescu A., Beguería S., Alewell C. 2015. Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment* 511: 801–814.
 - 21- Ram B., Dhyani B.L., and Kumar N. 2004. Assessment of erodibility status and refined iso-erodent map of India. *Indian Journal of Soil Conservation* 32(2): 171–177.
 - 22- Refahi H.Gh. 2015. *Water Erosion and Conservation*. University of Tehran Press, Tehran.
 - 23- Renard K.G., and Freimund J.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157: 287-306.
 - 24- Rhoades J.D., and Oster J.D. 1986. Solute Content. P.985-1006. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
 - 25- Schmidt J. 1990. A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena Supplement* 19: 101–109.
 - 26- van der Knijff J.M., Jones R.J.A., and Montanarella L. 2000. *Soil Erosion Risk Assessment in Europe*. European Soil Bureau.
 - 27- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29–38.
 - 28- Wischmeier W.H., and Smith D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Science and Education Administration, USDA.
 - 29- Zhou F.J., Chen M.H., Lin F.X., Huang Y.H., and Lu C.L. 1995. The rainfall erosivity index in Fujian Province. *Journal of Soil and Water Conservation* 9(1): 13–18.

Estimation of Soil Erosion by RUSLE and Remote Sensing Data of Gawshan Dam Basin

M.A. Mahmoodi^{1*}- P. Naghshbandi²

Received: 21-11-2018

Accepted: 28-12-2019

Introduction: Soil erosion is a serious environmental threat leading to loss of nutrient from surface soil, increased runoff, lake and reservoir sedimentation, and water pollution. Thus, estimation of soil loss and identification of critical area for implementation of best management practice is central to success of soil conservation programs. Soil erosion modeling is an efficient method to simulate soil erosion, to identify sediment source areas, and to evaluate soil conservation measures. One of the most widely applied empirical models for assessing the sheet and rill erosion is the Universal Soil Loss Equation (USLE). Originally, USLE was developed mainly for soil erosion estimation in croplands or gently sloping topography. The RUSLE is an extension of the original USLE with improvements in determining the factors controlling erosion. It is an empirical model commonly used to estimate soil loss potential by water from hillslopes across large areas of land. RUSLE is a linear equation that estimates the annual soil loss as the product of environmental factors include rainfall, soil erodibility, slope length, slope steepness, cover management and conservation practices as inputs. To implement RUSLE over large areas, detailed sets of spatially explicit data are needed for precipitation, soil type, topographic slope, land cover and land use type. Conventionally, the collection of all these data from field studies is time-consuming and expensive. The integration of field data and data provided by remote sensing technologies through the use of geographic information systems (GIS) offers potential to estimate spatially input data for RUSLE over large and relatively sparsely sampled areas. Keeping in view of the above aspects, the objectives of the present study were 1) to integrate the field data and data provided by Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM) imagery with RUSLE through the use of GIS to estimate spatial distribution of soil erosion at Gawshan dam basin in west of Iran and 2) to delineate soil erosion probability zones by reclassifying of the prepared soil erosion map.

Materials and Methods: The annual rainfall erosivity factor (R) was determined from monthly rainfall data of 11 years (2005-2015) for 7 rain gauge stations in the the study area. Spatial distribution of R was estimated using ordinary kriging method of interpolation. The soil erodibility factor (K) was estimated on the basis of soil map prepared from land survey and Landsat ETM remote sensing data. The physical and chemical parameters required to calculate K were measured in the different soil units, and its spatial distribution was coincident with the soil unit boundaries. The topographic factor (LS) was derived from digital elevation model (DEM) of 30 m resolution. The annual crop management factor (C) was calculated from normalized difference vegetation index (NDVI) derived from Landsat ETM imagery for different seasons. Since there is a lack of field data regarding the conservation practices that have been taken place in the study area, the conservation support practice factor (P) value was taken as 1. Finally, average annual soil loss was estimated as the product of the mentioned factors, and categorized into four classes viz., low, moderate, high and very high erosion.

Results and Discussion: The estimated R, K, LS and C range from 564 to 1311 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹, 0.02 to 0.04 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, 0 to 2436 and 0 to 1, respectively. The results indicate the estimated mean annual potential soil loss of about 2.35 t ha⁻¹, however in the 50% of the basin area annual soil loss is lower than 0.92 t ha⁻¹. Based on categorized soil erosion map about nearly 52.5% of the basin area produces low erosion of 0.43 t ha⁻¹ annually, whereas very high probability zone covers about 4% of the basin area, located dominantly in the southwestern part of the basin. Our results showed that slope steepness factor is the most important factor that controls soil erosion rate in the basin.

Conclusion: This study demonstrates the integration of field data and Landsat ETM imagery data with RUSLE through the use of GIS to estimate spatial distribution of soil erosion in Gawshan dam basin. The results of this study can be helpful for identifying critical areas for implementation of conservation practice and provide options to policy makers for prioritization of different regions of the basin for treatment.

Keywords: Gawshan dam basin, Remote sensing, RUSLE, Soil erosion

1 and 2- Assistant Professor and M.Sc. Student, Department of Soil Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: a.mahmoodi@uok.ac.ir)