

Zoning Erosion Hazard and Sediment Estimation in Cham Gardalan basin (Ilam province) using the Revised Universal Soil Erosion Equation (RUSLE)

Saleh Arekhi^{1*}, Shahram Barani², Somia Emadaddian³

1. *Corresponding Author*, Assistant Prof., Faculty of Geography, Human Sciences College, Golestan University, Gorgan, Iran
2. MSc Student, Human Sciences College, Golestan University, Gorgan, Iran
3. Assistant Prof., Faculty of Geography, Human Sciences College, Golestan University, Gorgan, Iran

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 29 June 2021

Revised: 17 February 2022

Accepted: 14 March 2022

Keywords:

Soil erosion, Sediment yield, RS, GIS, RUSLE, Cham Gardalan basin.

ABSTRACT

Soil erosion is one of the environmental problems that pose a threat to natural resources, agriculture and the environment. Quantitative assessment of erosion and sediment using erosion and sediment estimation models is one of the solutions through which erosion and sediment can be controlled to some extent and its amount minimized. In the present study, the aim is to predict the annual soil loss potential and sediment load. To predict these cases, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) has been used in the context of the GIS. The amount of annual rainfall erosivity factor was calculated using 22-year monthly rainfall data at 18 stations around the basin. Its spatial variations were then estimated using conventional kriging. Soil erodibility index was obtained from soil map, which was prepared using field survey and remote sensing data. The topographic factor was extracted from the digital elevation model with a spatial resolution of 30 m. The annual vegetation factor was also estimated from remote sensing data. Since soil protection operations are insignificant in the study basin, the amount of soil protection factor was considered 1 throughout Basin. In this study, the mean values of R, K, LS, C and P factors were equal to 264 MJ mm ha-1h-1y-1, 0.35 Mg ha h ha-1MJ-1mm-1, 2.00, 0.51 and 1. The average annual sediment yield in the study basin was estimated to be 16.137 th-1y-1, which was close to the value obtained from the sediment measuring station of the basin outlet (16.58 tons per hectare per year). The results of the erosion map in this model show that most erosion is located in the western and middle part of the basin. Because this region is composed of unstable formations and prone to erosion. The steep slope of the region, in addition to rainfall and land use change in this area, has faced many areas with soil erosion crisis. According to the results, the largest area of the basin is related to the very low, low and medium erosion class, which is generally distributed throughout the basin, and the lowest basin area is in the high to very high erosion class (20%). Due to the fact that 20% of the study basin is in the high to very high erosion class, the need for protection measures in these areas is mandatory. The results of this study also showed that LS factor with a correlation coefficient of 0.81 had the greatest effect on estimating annual soil erosion by RUSLE model. This study proved the effectiveness of RS and GIS for quantitative estimation of soil erosion amounts, sediment yield and also erosion management.

Cite this article: Arekhi, S., Barani, S., & Emadaddian, S. (2022). Zoning Erosion Hazard and Sediment Estimation in Cham Gardalan basin (Ilam province) using the Revised Universal Soil Erosion Equation (RUSLE). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 35-56. DOI: 10.22111/jneh.2022.39063.1822



© Saleh Arekhi.

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2022.39063.1822

* Corresponding Author Email: s.arekhi@gu.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۱، شماره ۲۴، زمستان ۱۴۰۱

پهنه‌بندی خطر فرسایش و برآورد رسوب در حوضه چم‌گردلان (استان ایلام) با استفاده از مدل تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE)

صالح ارخی^{۱*}، شهرام بارانی^۲، سمیه عمادالدین^۳

۱. استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان (نویسنده مسئول)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان

۳. استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این مطالعه، هدف پیش‌بینی پتانسیل هدررفت سالیانه خاک و بار رسوب است. برای پیش‌بینی موارد یادشده، معادله تجدید نظر شده جهانی هدررفت خاک (RUSLE) در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی به کار رفته است. مقدار عامل فرسایش سالیانه باران با استفاده از داده‌های بارش ماهانه ۲۲ ساله در ۱۸ ایستگاه در اطراف حوضه محاسبه شد. سپس تغییرهای مکانی آن با استفاده از کریجینگ معمولی برآورد شد. شاخص فرسایش‌پذیری خاک از نقشه خاک که خود با استفاده از پیمایش صحرایی و داده‌های سنجش‌از-دور تهیه شد، به دست آمد. عامل توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج شد. عامل پوشش گیاهی سالیانه نیز از داده‌های سنجش‌ازدور 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. در این مطالعه، مقادیر متوسط فاکتورهای R ، K ، LS ، C و P به ترتیب برابر با $264 MJ\ mm\ ha^{-1}h^{-1}y^{-1}$ ، $0.35\ Mg\ ha^{-1}mm^{-1}$ ، 0.002 ، $51/0$ و 1 بودند. میانگین بار رسوب سالیانه در حوضه مورد مطالعه $137/16\ t\ h^{-1}\ y^{-1}$ برآورد شد که نزدیک به مقدار به دست آمده از ایستگاه رسوب‌سنجی خروجی حوضه ($16/58$ تن در هکتار در سال) بود. نتایج حاصل از بررسی نقشه فرسایش در این مدل نشان می‌دهد که بیشترین فرسایش در قسمت غرب و میانه حوضه قرار دارد؛ چون این منطقه از سازندهای ناپایدار و مستعد فرسایش تشکیل شده است. شیب زیاد منطقه به اضافه بارش باران و تغییر کاربری اراضی در این محدوده بسیاری از عرصه‌های آن را با بحران فرسایش خاک مواجه کرده است. بر اساس نتایج حاصل، بیشترین وسعت حوضه مربوط به کلاس فرسایشی خیلی کم، کم و متوسط است که عموماً در کل حوضه پراکنش دارد و کمترین مساحت حوضه در کلاس فرسایشی زیاد تا خیلی زیاد (۲۰ درصد) قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه ۲۰ درصد حوضه مورد مطالعه در کلاس فرسایش زیاد تا خیلی زیاد قرار دارد، لزوم اقدامات حفاظتی در این مناطق الزامی است. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد، فاکتور LS با ضریب همبستگی $0/81$ بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است. این پژوهش، مؤثر بودن RS و GIS را جهت تخمین کمی مقادیر فرسایش خاک، بار رسوب و همچنین مدیریت فرسایش اثبات نمود.

استناد: ارخی، صالح، بارانی، شهرام، عمادالدین، سمیه (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر فرسایش و برآورد رسوب در حوضه چم‌گردلان (استان ایلام) با استفاده

از مدل تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۴)، ۳۵-۵۶.

DOI: 10.22111/jneh.2022.39063.1822

© صالح ارخی^{*}، شهرام بارانی، سمیه عمادالدین.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان



مقدمه

متن فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی در جهان و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و تأثیر زیادی بر کیفیت، کمیت و بهره‌وری خاک و در نهایت فرآیندهای بیابان‌زایی دارد (کیریس^۱ و همکاران، ۲۰۱۳) که بیشتر ناشی از تغییر کاربری، چرای بی‌رویه، فعالیت‌های نامناسب کشاورزی و عمق کم خاک است (پوسن^۲، ۲۰۱۸).

فعالیت‌های انسانی و استفاده نامناسب از اراضی باعث تسریع فرسایش خاک در بسیاری مناطق سطح زمین شده است (احمدی، ۱۹۹۵؛ زانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۵). محافظت از فرسایش خاک به دلیل اثرات مستقیم آن بر حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی، کیفیت آب و وقوع سیلاب اهمیت بسیار دارد. با فرسایش خاک میلیون‌ها تن رسوبات وارد مخازن و دریاچه‌ها می‌شود که باعث آسیب به سدها، کاهش عمر مفید آنها، تغییر کیفیت آب و خسارت‌های زیادی از نظر اقتصادی می‌شود (وانگ^۴ و همکاران، ۲۰۰۳؛ رفاهی، ۲۰۱۵). در نتیجه پیشگیری و مهار فرسایش خاک در گستره حوضه‌های آبخیز و در چهارچوب طرح‌های بهره‌برداری آب‌و‌خاک و آبخیزداری یک نیاز اساسی است. به‌منظور اجرای برنامه‌های حفاظت و کنترل فرسایش خاک و کاهش رسوب‌دهی ضرورت دارد که حجم کل بار رسوبی و شدت فرسایش‌پذیری در یک حوضه آبخیز ارزیابی و برآورد گردد و عوامل مؤثر در فرسایش حوضه شناسایی گردند. به‌طوری‌که شناسایی این عوامل ما را در انتخاب راهکارهای مناسب جهت کنترل فرسایش و حفظ منابع طبیعی یاری نماید (علیزاده، ۱۹۹۰).

روش‌های اندازه‌گیری شدت فرسایش در حوضه‌های آبخیز شامل روش‌های تجربی، روش‌های ریاضی و نمونه‌برداری رسوب می‌باشد (بهرآوی^۵ و همکاران، ۲۰۱۶). روش‌های تجربی برآورد فرسایش و رسوب در ایران شامل معادله جهانی تلفات خاک (USLE)^۶ (ویشمایر و اسمیت^۷، ۱۹۷۸)، معادله اصلاحی تلفات خاک (MUSLE)^۸ (فورو^۹، ۱۹۹۱) یا معادله تغییر یافته تلفات خاک (RUSLE)^{۱۰} (رنارد^{۱۱} و همکاران، ۱۹۹۷)، MPSIAC^{۱۲} و EPM^{۱۳} (گاورلیویچ^{۱۴}، ۱۹۸۸) مهم‌ترین این روش‌ها می‌باشند.

در زمینه کاربرد مدل‌های فرسایش در دنیا پژوهش‌های متعددی صورت گرفته که در ادامه به برخی اشاره می‌گردد. میگوئل^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۱) گزارش دادند، پیش‌بینی تلفات خاک با مدل USLE در حوضه‌های آبخیز کوچک

-
- 1 - Kairis
 - 2 - Poesen
 - 3 - Zhang et al
 - 4 - Wang et al
 - 5 - Bahrawi
 - 6 - Universal Soil Loss Equation
 - 7 - Wischmeier & Smith
 - 8 - Modified Universal Soil Loss Equation
 - 9 - Ferro
 - 10 - Revised Universal Soil Loss Equation
 - 11 - Renard
 - 12 - Modified Pacific Southwest Inter-Agency Committee
 - 13 - Erosion Potential Model
 - 14 - Gavrilovic
 - 15 - Miguel

دارای یک سری محدودیت‌های قابل‌پذیرش می‌باشد. سان^۱ و همکاران (۲۰۱۲) از الگوریتم کریجینگ در درون‌یابی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در برآورد فرسایش پرداختند. بهارآوی و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی خطر فرسایش در عربستان سعودی فن‌های سنجش‌ازدور و مدل RUSLE را فن مناسبی جهت برآورد رسوب اعلام نمودند. دمیرسی و کارابرون^۲ (۲۰۱۲) فرسایش خاک حوضه آبخیز دریاچه بویوچک مس در شمال غرب ترکیه را با استفاده از مدل RUSLE برآورد کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بیان کردند که نزدیک به ۵۰ درصد حوضه آبخیز نیاز به اقدامات جفاظتی جهت کاهش خاک دارد. گاناسری و رامش (۲۰۱۵) فرسایش خاک حوضه نزاوازی هند را با استفاده از مدل RUSLE به‌دست آوردند. بر اساس نتایج، آنها مقدار فرسایش سالانه خاک ۴۷۳/۳۳۹ تن در سال برآورد شد که به مقدار رسوب اندازه‌گیری‌شده (۴۴۱/۸۷۰ تن در سال) نزدیک می‌باشد. زریهون^۳ و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای، فرسایش خاک را با استفاده از مدل RUSLE در اتیوپی موردارزیابی قرار دادند، یافته‌های آنها نشان می‌دهد که متوسط فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه، ۴۹ تن در هکتار در سال می‌باشد. فایس و همکاران^۴ (۲۰۱۹) مطالعه‌ای با هدف برآورد هدررفت خاک با مدل RUSLE برای اولویت‌بندی کنترل فرسایش در حوضه کلانی در سریلانکا انجام گرفت. نتایج یافته‌های آنها نشان می‌دهد که میزان فرسایش سالانه در این حوضه بین ۰ تا ۱۰۳/۷ تن در هکتار در سال تغییر می‌کند و میانگین فرسایش ۱۰/۹ تن در هکتار در سال برآورد شد. همچنین حدود ۷۰ درصد از حوضه مورد مطالعه شدت فرسایش کم تا متوسط را شامل می‌شوند (کمتر از ۱۲ تن در هکتار در سال).

در ایران نیز انصاری لاری و انصاری (۱۳۹۶) کاربرد GIS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از RUSLE را در حوضه قلعه‌چای بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان خطر فرسایش خاک در سطح دشت از صفر تا ۲/۲۲ تن در هکتار در سال متغیر است و منطقه مورد مطالعه جزء طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم قرار دارد. در پژوهشی (حبشی^۵ و همکاران، ۲۰۱۸) میزان فرسایش خاک شرق اصفهان را با استفاده از مدل RUSLE موردارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده میزان فرسایش سالانه خاک در کل منطقه مورد مطالعه صفر تا ۹۵ تن در هکتار در سال برآورد شد. مختاری و همکاران (۱۳۹۷) میزان فرسایش خاک را با استفاده از مدل RUSLE در حوضه آبریز نورآباد ممسنی برآورد کردند. نتایج نشان داد که میزان خطر فرسایش خاک در سطح حوضه بر حسب تن در هکتار در سال از ۸ تا ۷۵ متغیر است. عظیمی‌سردری و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای حال و آینده مقدار فرسایش خاک را در حوضه آبریز سد استقلال میناب با بهره‌گیری از مدل RUSLE-3D و سناریوهای تغییر اقلیم ارزیابی کردند. نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش در آینده نشان‌دهنده افزایش آن از ۱۴۶/۷ میلی‌متر به ۱۷۸/۶۱ میلی‌متر در دوره آینده و به تبع آن افزایش عامل فرساینده‌گی باران (R) و در نتیجه افزایش نرخ فرسایش خاک در حوضه سد استقلال میناب است. شرایط سطح خاک مانند پوشش گیاهی، زبری و پوشش قطعات سنگی تأثیر مهمی بر روی نرخ نفوذ، فرسایش و رواناب دارد (نوواکپو^۶ و همکاران، ۲۰۱۶). باگیو^۷ و همکاران (۲۰۱۷) فرسایش خاک را در زمان

1 - Sun

2 - Demirci & Karaburun

3- Zerihun et al

4 - Fayas et al

5 - Habashi et al

6 - Nouwakpo

7 - Bagio

بارندگی‌های طبیعی در شیب‌های با طول متفاوت بر روی خاک لخت اندازه‌گیری کرده و نتایج آن را با مقادیر تخمینی USLE و RUSLE مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مقادیر تخمینی به‌خصوص در مدل USLE کمتر از هدررفت خاک اندازه‌گیری شده بود.

حوضه آبخیز چم‌گردلان ایلام نیز یکی از مناطقی است که متحمل فرسایش فزاینده خاک می‌باشد و بررسی فرسایش و بار رسوب در آن به‌عنوان یکی از منابع تأمین آب شرب شهر ایلام از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، جلوگیری از این فرسایش، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل جهت حفاظت از منابع طبیعی به شمار می‌رود (مورگان^۱، ۱۹۹۵). در خصوص مطالعات و پژوهش‌های انجام‌شده در حوضه چم‌گردلان ایلام می‌توان به پایان‌نامه کارشناسی ارشد اعظمی (۱۳۸۰) تحت عنوان تعیین روش مناسب برآورد بار معلق رسوبی در حوضه سد چم‌گردلان ایلام، تخمین فرسایش و رسوب با استفاده از روش‌های کیفی ژئومورفولوژیکی (واحد‌های کاری) و EPM و مقایسه آن با آمار خروجی رسوب در حوضه سد چم‌گردلان ایلام آقای شهبازی (۱۳۷۸) و مقاله عسگری و جعفری (۱۳۸۵) تحت عنوان برآورد فرسایش و رسوب حوضه سد ایلام با استفاده از مدل MPSIAC اشاره کرد.

در دهه‌های اخیر مخاطرات محیطی اعم از طبیعی و انسانی مانند فرسایش خاک از جمله مسائلی است که در سطح جهان و ایران با آن روبرو هستند و سالانه هزینه‌های کلانی هم متحمل می‌شوند. از این‌رو، ابتدا مخاطرات محیطی از قبیل فرسایش خاک و تولید رسوب باید شناسایی شوند تا مدیران مربوطه با اطلاعات کامل و دقیقی برای مدیریت و کنترل آن، برنامه‌ریزی مناسبی انجام دهند (افضلی و همکاران، ۱۳۹۸). از آنجایی که مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب به‌عنوان ابزاری در راستای شناخت اولویت‌های فرسایش و رسوب حوضه‌های آبخیز هستند و مدل RUSLE بیشترین کاربرد را در مطالعات و تحقیقات آبخیزداری دارد، بنابراین ارزیابی صحت، دقت و نحوه پراکنش طبقات فرسایش و رسوب حاصل از آنها در سطح حوضه می‌تواند کمک مؤثری در نتیجه‌گیری بهتر از مدل‌ها و به‌کارگیری نتایج آنها در پیشگیری از وقوع مخاطرات زیست‌محیطی، اولویت‌بندی مناطق برای اقدامات اجرایی و برنامه‌های حفاظتی داشته باشد که در این زمینه مطالعات زیادی انجام نشده است. بنابراین هدف از پژوهش بالا، برآورد فرسایش و میزان رسوب در حوضه آبخیز چم‌گردلان با استفاده از مدل RUSLE، مقایسه برآورد این مدل با آمار رسوب مشاهده‌ای، بررسی راستی‌آزمایی و اعتبارسنجی این مدل نسبت به مقدار واقعی و درنهایت شناسایی مناطق حساس به فرسایش جهت اجرای عملیات حفاظتی آب و خاک می‌باشد.

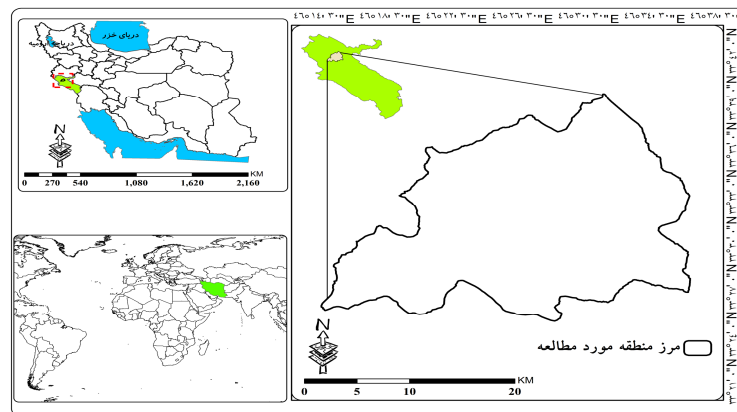
داده‌ها و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز چم‌گردلان در جنوب شرقی شهرستان ایلام در موقعیت بین $30^{\circ} 16' 46''$ تا $33^{\circ} 40' 46''$ طول شرقی و $32^{\circ} 23' 33''$ تا $33^{\circ} 40' 51''$ عرض شمالی قرار دارد. مهم‌ترین آبراهه اصلی در این حوضه رود کنجانچم (چم-گردلان) می‌باشد که از اتصال دو رود چاویز و گل‌گل با آبراهه متقاطع تشکیل شده است و سد ایلام نیز در محل رودخانه کنجانچم (چم‌گردلان) احداث شده است (عسگری و جعفری، ۱۳۸۵). مساحت و محیط حوضه به‌ترتیب برابر

¹ -Morgan

با ۵۸۳/۷ کیلومتر مربع و ۱۳۱/۷۶۰ کیلومتر برآورده شده است. سد مخزنی ایلام، مهم‌ترین منبع تأمین آب شرب شهر ایلام و روستاهای اطراف می‌باشد و بند انحرافی امیرآباد در خروجی حوضه و همچنین نیاز به منابع آبی فراوان در منطقه به علت وجود شهرستان مهران و اراضی زراعی مرغوب استان در این منطقه در برنامه‌ریزی توسعه اقتصادی و اجتماعی آینده این دو شهرستان نقش بسزایی خواهند داشت. این حوضه بر روی سازندهای سست زمین‌شناسی دوران سوم قرار گرفته، از فرسایش‌پذیری بالایی برخوردار است (شکل ۱) (عسگری و جعفری، ۱۳۸۵).



شکل ۱: موقعیت کشوری و استانی محدوده مورد مطالعه

داده‌ها

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل: لایه رقومی توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور، داده‌های سازمان هواشناسی کشور (بارندگی روزانه، ماهانه، سالانه)، تصویر ماهواره‌ای OLI به تاریخ ۱۳۹۸/۵/۱۵ از سایت www.glovis.usgs.com، لایه رقومی نقشه خاکشناسی و قابلیت اراضی ۱:۸۰۰۰۰ حوضه مورد مطالعه از سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، بررسی گزارش مطالعه تفصیلی حوضه آبخیز سد چم‌گردلان ایلام و نرم‌افزارهای ArcGIS10.3، ILWIS3.3 و ENVI5.3 و Excel می‌باشد. در این پژوهش از نرم‌افزار ArcGIS10.3 جهت ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط به آن؛ ENVI5.3 و IDRISI Terrset جهت استخراج و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و Excel جهت به‌دست آوردن روابط رگرسیونی معادلات بهره‌گیری شده است.

روش پژوهش

مدل RUSLE، یک مدل آماری بر پایه فرسایش آبی است که با شش فاکتور فرسایشی زیر رابطه دارد (ویشمایر و اسمیت^۱، ۱۹۷۸):

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

^۱ - Wischmeier & Smith

در این رابطه، A میانگین فرسایش خاک در واحد سطح ($\text{tonha}^{-1}\text{year}^{-1}$)، R، فاکتور فرساینده گی باران ($\text{MJmmha}^{-1}\text{h}^{-1}$)، K، فاکتور فرسایش پذیری خاک ($\text{Mghahha}^{-1}\text{MJ}^{-1}\text{mm}^{-1}$)، L، فاکتور طول شیب، S، فاکتور درجه شیب، C، فاکتور عملیات مدیریتی و پوشش و سرانجام P فاکتور عملیات حفاظتی می باشد. مقادیر L، S، C و P بدون واحد می باشند. در این پژوهش، روش بررسی کلی شامل استفاده از مدل RUSLE در محیط GIS می باشد. پاراگراف های بعدی نیز درباره نحوه برآورد فاکتورهای R، C، K، P و LS که به ترتیب از داده های بارش، نقشه های خاک، پردازش تصاویر ماهواره ای (فاکتورهای C و P) و مدل رقومی ارتفاعی به دست می آیند، توضیح می دهد.

فاکتور فرساینده گی باران (R)

فرساینده گی باران به صورت قدرت تراکمی باران در بروز فرسایش تعریف می شود (لال^۱، ۱۹۹۰). معمول ترین شاخص فرساینده گی باران، فاکتور R مربوط به مدل های USLE (یو و رزول^۲، ۱۹۹۶) و RUSLE (رنارد و فریموند^۳، ۱۹۹۴) می باشد. بررسی مقالات علمی نشان می دهد، در بسیاری از نقاط دنیا، فاکتور R همبستگی بالایی با فرسایش خاک دارد. فاکتور R برای دوره های مختلف، از حاصل ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه ای (I_{30}) به دست می آید. از آنجایی که نمودار بارندگی و داده های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به ندرت در ایستگاه های هواشناسی موجود می باشند، بیشتر از مقادیر متوسط بارندگی سالیانه و ماهیانه، جهت برآورد فاکتور R در مدل های USLE و RUSLE استفاده می شود. برای محاسبه فاکتور R، بعد از تعیین ایستگاه های شاخص در منطقه مورد مطالعه، بارندگی ماهیانه و سالیانه در این ایستگاه ها و در دوره زمانی مورد مطالعه بازسازی گردید (بر اساس اطلاعات ایستگاه ایلام که کامل ترین و بیشترین آمار را داشته است). در مرحله بعد با استفاده از معادله ذیل، شاخص فورنیر و فاکتور R برای تمام ایستگاه ها به دست آمد. رابطه شاخص فورنیر، F، به صورت ذیل است:

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

در این معادله، pi متوسط بارندگی (میلی متر) در ماه i و p متوسط بارندگی سالیانه (میلی متر) است. در این مطالعه، با استفاده از معادله (۲)، شاخص فورنیر برای تمامی ایستگاه ها، محاسبه گردید و سپس با جایگذاری شاخص فورنیر (رابطه ۲) در روابط زیر که توسط رنارد و فریموند (۱۹۹۴) برای مناطق فاقد داده های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) پیشنهاد شده، مقدار فاکتور R برای ایستگاه های شاخص برآورد شد.

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

اگر $F < 55 \text{ mm}$

$$R - factor = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times F^2) / 17.2 \quad (4)$$

اگر $F \geq 55 \text{ mm}$

1 - Lal

2 - Yu & Rosewell

3 - Renard, K.G. and Freimund

فاکتور فرسایش پذیری خاک (K)

فاکتور فرسایش پذیری خاک (K)، سرعت فرسایش پذیری خاک به ازای واحد شاخص فرسایش باران است که در پلات استاندارد اندازه گیری می شود و اغلب با استفاده از خصوصیت های خاک تعیین می شود (پریسو^۱ و همکاران، ۲۰۰۳). اگرچه فاکتور K با بافت خاک، میزان ماده آلی خاک، نفوذپذیری و سایر فاکتورها رابطه دارد، اما بیشتر با نوع تیپ خاک همبستگی بالایی دارد (ویشمایر^۲، ۱۹۷۱). فاکتور فرسایش پذیری خاک در مدل RUSLE از طریق نوموگراف تعیین می شود (ویشمایر، ۱۹۷۱). این نوموگراف متشکل از پنج پارامتر پروفیل خاک می باشد. رابطه جبری این نوموگراف به صورت ذیل است:

$$K = 2.73 \times 10^{-6} m^{1.14} (12 - a) + 3.25 \times 10^{-2} (b - 2) + 2.5 \times 10^{-2} (c - 3) \quad (5)$$

در این معادله، M قطر ذره (درصدسیلت + درصد شن خیلی ریز) × (درصد رس - ۱۰۰) درصد ماده آلی، b کد ساختمان خاک و c کلاسه نفوذپذیری پروفیل خاک می باشند. در این مطالعه، تمام پارامترهای اشاره شده در بالا از گزارش تفصیلی حوضه آبخیز چم گردلان ایلام استخراج و نقشه فاکتور K در محیط GIS تهیه شد.

فاکتورهای طول شیب (L) و درجه شیب (S)

فاکتورهای L و S در مدل RUSLE، تأثیر توپوگرافی را بر روی فرسایش خاک نشان می دهد. ثابت شده که افزایش در طول شیب و درجه شیب می تواند سرعت جریان آب را در سطح زمین افزایش دهد و باعث تشدید فرسایش خاک شود (هن^۳ و همکاران، ۱۹۹۴) و از اینها گذشته، فرسایش خالص خاک نسبت به تغییرات در درجه شیب در مقابل طول شیب حساس تر است (مک کول^۴ و همکاران، ۱۹۸۷). طول شیب فاصله بین نقطه بالایی آغاز سرایشی تا نقطه ای است که شیب به حداقل خود می رسد و در این نقطه رسوبات ته نشین می شوند. تأثیرهای ویژه توپوگرافی روی فرسایش خاک توسط فاکتور LS (بدون واحد) (طول شیب (L) و درجه شیب (S) برآورد می شود. برای محاسبه فاکتورهای L و S از فرمول های زیر استفاده می شود (مور و ویلسون^۵، ۱۹۹۳):

$$L = 1.4 \left[\frac{A_s}{22.13} \right]^{0.4} \quad (6)$$

$$S = \left[\frac{\sin \beta}{0.0896} \right]^{1.3} \quad (7)$$

در این معادله A_s مساحت دامنه بالادست در واحد عرض خطوط توپوگرافی (m^2/m) و β زاویه شیب برحسب درجه است. در این مطالعه، نقشه فاکتور LS از نقشه DEM با قدرت تفکیک ۳۰ متر از وب سایت سازمان نقشه برداری آمریکا به آدرس <http://earthexplorer.usgs.gov> دانلود و با استفاده از اکستنشن TOPOCROP آرک جی آی اس ۱۰،۳ استخراج شد که توسط اسمیت (۲۰۰۳) و براساس کار مور و ویلسون (۱۹۹۳) توسعه یافته است.

1 - Parysow

2 - Wischmeier

3 - Haan

4 - McCool

5 - Moore & Wilson

فاکتور مدیریت پوشش (C)

فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های کاشتی در مدیریت کشاورزی و اثر پوشش‌های درختی، درختچه‌ای، علفی و زمینی روی کاهش فرسایش خاک می‌باشد. با افزایش پوشش گیاهی، فرسایش خاک کاهش می‌یابد. بنکوبی^۱ و همکاران (۱۹۹۴) و بیسمنس^۲ و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند، فاکتور پوشش گیاهی به همراه درجه شیب و طول شیب در فرسایش خاک و تولید رسوب حساسیت بیشتری دارند. در مدل RUSLE، فاکتور پوشش گیاهی (C)، معمولاً^۳ براساس معادلات تجربی تعیین می‌گردد. اما پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده است که با استفاده از فناوری سنجش‌از‌دور به‌دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به‌صورت ذیل به‌دست می‌آید:

$$NDVI = \frac{NIR-IR}{NIR+IR} \quad (۸)$$

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر NDVI بین -۱ و +۱ در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه‌گیری‌شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر NDVI به صفر نزدیک می‌شود. پوشش گیاهی سالم (دارای فعالیت فتوسنتزی) در بخش طیفی مادون قرمز نزدیک (NIR) (باند ۵ لندست) در مقایسه با بخش طیف مرئی (قرمز، باند ۴ لندست) انعکاس بیشتری دارد. بنابراین مقادیر NDVI برای پوشش گیاهی سبز مثبت خواهد شد. مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی از قبیل مناطق شهری و اراضی بایر معمولاً مقادیر NDVI بین +۰/۱ و -۰/۱ را نشان می‌دهند. ابرها و منابع آبی مقادیر منفی یا صفر را نشان می‌دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) برای محاسبه داده‌های طیفی زمینی استفاده شده و نتایج آن نشان داده که این شاخص، همبستگی بالایی با زیست‌توده سطح زمین دارد (لین، ۱۹۹۷). بعد از انجام تبدیل خطی معکوس از نمونه‌های تعلیمی، رابطه بین C و NDVI می‌تواند به‌صورت زیر ایجاد گردد:

$$C = (1 - NDVI)/2 \quad (۹)$$

در نتیجه مقدار C در هر سلول می‌تواند مورد محاسبه قرار گیرد. از آنجایی که مقادیر فاکتور C، بین صفر و یک می‌باشد، مقدار صفر به پیکسل‌های با مقادیر منفی و عدد یک به پیکسل‌هایی با مقدار بیشتر از یک اختصاص خواهد یافت.

فاکتور عملیات حفاظتی (P)

کشت‌وکار در اراضی شیب‌دار نیاز به عملیات حفاظتی جهت حفظ آب و خاک دارد. این عملیات باعث کاهش سرعت هرزآب تا زیر حد آستانه بروز فرسایش می‌شود و بدین لحاظ از قدرت فرساینده‌گی آب و ظرفیت حمل آن می‌کاهد. عملیات حفاظتی شامل کشت کنتوری، سیستم ترانس‌بندی، آبراهه‌های پوشش‌دار و ... می‌باشد. فاکتور P، نسبت خاک فرسایش‌یافته در شرایط انجام عملیات حفاظتی به فرسایش ایجادشده در شرایط استاندارد یعنی شخم در

1 - Benkobi

2 - Biesemans

جهت شیب است (رنارد و همکاران، ۱۹۹۷). در این مطالعه، مقادیر فاکتور P، از طریق طبقه‌بندی مجدد هر تیپ پوشش زمین و بر اساس مقادیر پیشنهادی از سوی مؤسسه مرکزی تحقیقات حفاظت آب و خاک هند (جداول ۱ و ۲) تعیین شدند.

جدول ۱: ارزش P برای کاربری و پوشش اراضی مختلف

ارزش عددی P	کلاس کاربری/پوشش اراضی
۱	اراضی بایر
۰/۱۲	نیشکر
۰/۱	گندم
۰/۸	جنگل تنک
۱	اراضی آیش
۰/۸	جنگل با تراکم متوسط
۰/۸	جنگل باز
۱	بستر رودخانه

جدول ۲: ارزش P برای عملیات حفاظتی مختلف

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

محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR)

مطالعات با استفاده از معادلات USLE/RUSLE، نسبت رسوب‌دهی (تحویل رسوب) را جهت برآورد مقدار رسوب در خروجی حوضه به حساب نیاورده‌اند. نتایج پژوهش‌ها نشان داده که کل فرسایش خاک در یک منطقه با مقدار بار رسوب در همان منطقه یکسان نمی‌باشد. به‌منظور تشریح امکان رسوب مواد فرسایش یافته و حرکت آنها در شبکه کانال و درنهایت در خروجی حوضه، پراکنش مکانی نسبت تحویل رسوب محاسبه می‌گردد. در این مطالعه، سه روش بر اساس مساحت (USDA، ۱۹۷۲؛ بویس^۱، ۱۹۷۵؛ وانونی^۲، ۱۹۷۵) به‌منظور محاسبه نقشه نسبت تحویل رسوب، مورد استفاده قرار گرفتند. معادلات مربوط به این سه روش به شرح زیر می‌باشد:

1 - Boyce

2 - Vanoni

۱- مدل وانونی (ارائه شده در سال ۱۹۷۵) به شرح رابطه ۱۰

$$SDR = 0.4724A^{-0.125} \quad (10)$$

که $A =$ مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

۲- مدل ارائه شده توسط USDA در سال ۱۹۷۲ به شرح رابطه ۱۱

$$SDR = 0.5656A^{-0.11} \quad (11)$$

که $A =$ مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

۳- مدل بویس (۱۹۷۵) که به شرح رابطه ۱۲ است

$$SDR = 0.3750A^{-0.2382} \quad (12)$$

که $A =$ مساحت حوضه (کیلومتر مربع)

ارزیابی کارایی مدل RUSLE

ارزیابی دقت مدل برای اطمینان از صحت برآوردها ضروری است. ارزیابی مدل RUSLE با استفاده از داده‌های برآوردی رسوب و داده‌های حاصل از اندازه‌گیری رسوب در خروجی حوضه انجام گرفت. همچنین کارایی مدل که اغلب برای کالیبراسیون، صحت‌سنجی و برآورد دقت مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد از رابطه زیر تعیین شد (رابطه ۱۳). پس از برآورد رسوبات توسط مدل یادشده، برای ارزیابی کارایی مدل به‌کاررفته از رابطه زیر استفاده گردید.

$$R_E = (|S_O - S_E|/S_O) \times 100 \quad (13)$$

$R_E =$ درصد خطای نسبی مدل

$S_O =$ مقدار رسوب مشاهده‌ای

$S_E =$ مقدار رسوب برآوردی

مقدار R_E بیانگر میانگین انحراف است که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. به بیان دیگر مشخص می‌کند که مدل، متغیر موردنظر را کم یا زیاد برآورد می‌کند. از نظر تئوری، هرگاه این دو مقدار برابر با صفر شوند، نمایانگر این مطلب است که دقت روش صددرصد بوده و مقدار برآوردشده یک کمیت، دقیقاً برابر با مقدار واقعی آن است.

رگرسیون خطی ساده

تجزیه رگرسیون یک وسیله آماری است که برای برآورد ارزش یک متغیر کمی باتوجه به رابطه‌اش با یک یا چند متغیر کمی دیگر به‌کار می‌رود. این رابطه طوری است که با استفاده از یک متغیر می‌توان دیگری را پیش‌بینی کرد. برای انجام تحلیل رگرسیون در این پژوهش، بعد از تهیه لایه‌های موردنیاز، این لایه‌ها وارد محیط نرم‌افزار Terrset IDRISI شده و با استفاده از منوی GIS Analysis و ماژول Statistics روش REGRESS عمل رگرسیون انجام

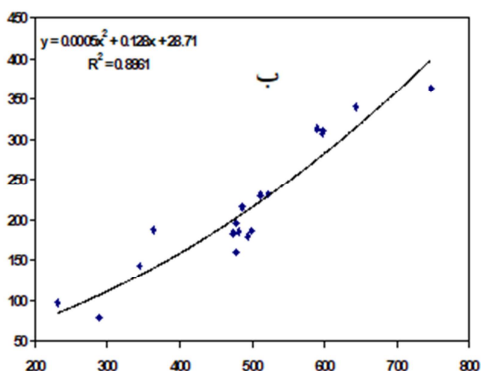
گردید. در این مدل رگرسیونی، فرسایش سالانه خاک به عنوان متغیر وابسته (y) و فاکتورهای R ، K ، LS ، C و P به- عنوان متغیرهای مستقل (x) در نظر گرفته شدند.

نتایج و بحث

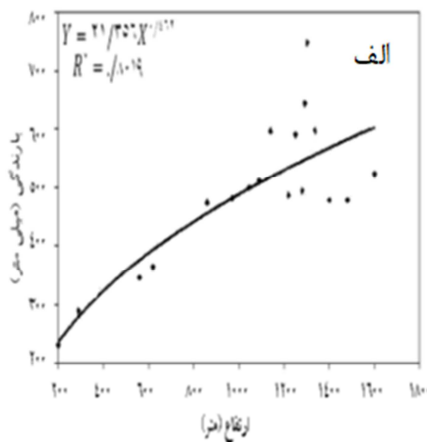
شاخص‌های فورنیر و مقادیر فرساینده‌ی باران با استفاده از معادلات (۲)، (۳) و (۴) برای ۱۸ ایستگاه در طی دوره آماری ۲۲ ساله (۱۳۷۶-۱۳۹۸) محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده شاخص فورنیر و فاکتور R در جدول ۳، نشان داده شده است. ابتدا بر اساس رابطه بین ارتفاع و بارش (شکل ۲) و سپس بر اساس رابطه بارش و فاکتور R (شکل ۳)، نقشه فاکتور R حوضه چم گردلان ایلام در محیط نرم افزار ILWIS3.3 به دست آمده است (شکل ۴). مقدار متوسط فاکتور R از ۱۳۶ تا $396 (h^{-1}y^{-1}MJ mm ha^{-1})$ متغیر بوده و مقدار متوسط ($264h^{-1}y^{-1}MJ mm ha^{-1}$) و انحراف معیار آن ($44h^{-1}y^{-1}MJ mm ha^{-1}$) می باشد. فرساینده‌ی باران در شمال شرقی و جنوب غربی حوضه مورد مطالعه که ارتفاع بالاتری داشتند بیشتر بوده که با رنگ قرمز نشان داده شده است یا به عبارت دیگر، کاهش ارتفاع و باران رابطه مستقیمی با کاهش فاکتور R دارد و از شمال غرب و جنوب غرب به مرکز حوضه داشته است.

جدول ۳: محاسبه و برآورد F و R برای ایستگاه‌های بارندگی

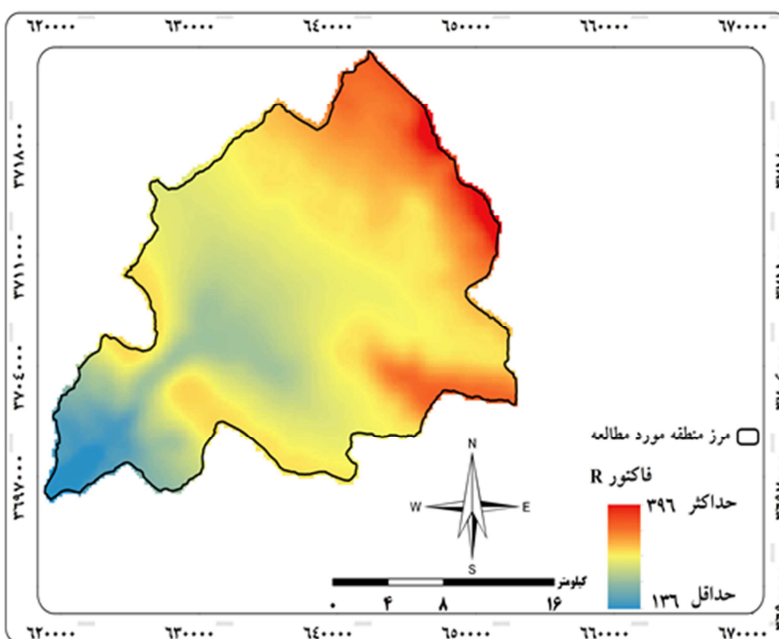
نام ایستگاه	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	ارتفاع (متر)	بارندگی (میلی متر)	F	R $MJ^{-1}mm^{-1}Mg ha h ha^{-1}$
ارکواز	۶۴۸۴۷۸	۳۶۹۵۸۱۹	۱۲۹۰	۶۴۳/۵۰	۱۱۶/۵۴	۳۴۱/۰۲
صالح آباد	۶۱۰۴۰۸	۳۷۰۴۱۲۹	۶۲۰	۳۶۳/۷۰	۸۷/۶۳	۱۸۷/۵۵
سراب کلان	۶۵۹۳۷۹	۳۷۱۶۲۷۰	۹۷۰	۴۸۱	۸۷/۱۷	۱۸۵/۴۶
شهید طالقانی	۶۵۱۹۰۰	۳۶۹۲۵۸۰	۱۴۰۰	۴۷۷/۹۰	۸۱/۳۱	۱۶۰/۱۸
طولاب	۶۴۷۰۴۹	۳۷۱۳۸۸۶	۱۶۰۰	۵۲۲/۵۰	۹۶/۸۶	۲۳۱/۵۱
قلندر علیا	۶۵۱۰۱۰	۳۷۲۳۹۶۶	۱۰۴۵	۴۹۹/۵۰	۸۷/۴۸	۱۸۶/۸۸
می‌شخص	۶۴۲۸۰۴	۳۷۰۸۶۳۶	۱۲۵۰	۵۹۰/۲۰	۱۱۲	۳۱۳/۸۳
کارزان	۶۴۱۸۶۰	۳۷۳۳۶۱۷	۱۲۸۰	۴۹۴	۸۵/۸۶	۱۷۹/۶۳
گناباد	۶۴۳۳۰۷	۳۶۸۰۴۵۹	۸۶۰	۴۷۴	۸۶/۷۴	۱۸۳/۵۵
درگه	۶۴۷۳۴۴	۳۶۸۶۹۶۹	۱۳۰۰	۷۴۷/۴۰	۱۲۰/۲۸	۳۶۴/۲۸
فجر	۶۳۸۷۶۸	۳۷۱۵۵۵۴	۱۴۸۰	۴۷۷/۷۰	۸۹/۵۴	۱۹۶/۲۵
بان رحمان	۶۲۶۳۵۵	۳۶۶۹۹۸۱	۲۹۰	۲۸۸/۷۰	۵۸/۱۸	۷۸/۸۶
سیاه آب	۶۳۹۰۹۰	۳۶۸۹۹۸۴	۱۲۲۰	۴۸۶	۹۳/۷۲	۲۱۶/۰۴
گل گل	۶۳۷۷۳۶	۳۷۰۳۸۲۶	۱۱۴۰	۵۹۷	۱۱۰/۹۰	۳۰۷/۴۴
گلان	۶۱۷۴۷۱	۳۶۹۸۵۱۴	۵۶۰	۳۴۴/۷۰	۷۷/۱۱	۱۴۳/۲۰
ایلام	۶۳۳۰۱۳	۳۷۱۶۸۷۹	۱۳۳۷	۵۹۷/۷۰	۱۱۱/۴۴	۳۱۰/۵۵
مهران	۶۰۸۷۱۳	۳۶۶۵۱۰۶	۲۰۰	۲۳۱	۶۴/۳۰	۹۷/۴۸



شکل ۳: رابطه بین بارندگی و فاکتور R



شکل ۴: رابطه بین ارتفاع و بارندگی



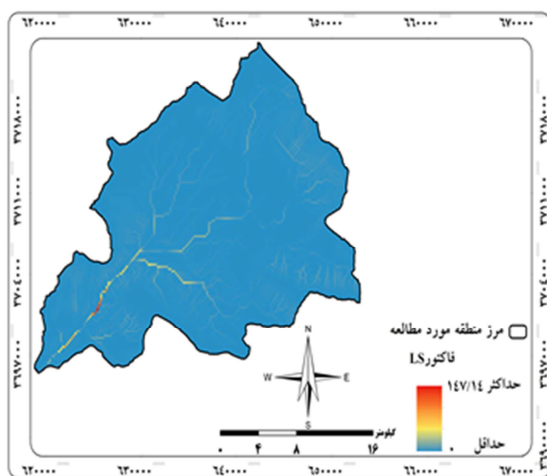
شکل ۵: نقشه عامل فاکتور R

جهت محاسبه فاکتور K اطلاعات موردنیاز از نقشه‌های تفصیلی حوضه چم‌گردلان و لایه‌های زمین‌شناسی، خاک-شناسی استفاده شده که متوسط مقدار K در حوضه مورد مطالعه بین ۰/۲۸ تا ۰/۶۶ متغیر بوده میانگین و انحراف معیار آن به ترتیب $MJ^{-1}mm^{-1}Mg\ ha\ h\ ha^{-1}$ ۰/۳۵ و ۰/۰۵ می‌باشد. شکل ۵ توزیع مکانی فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد.

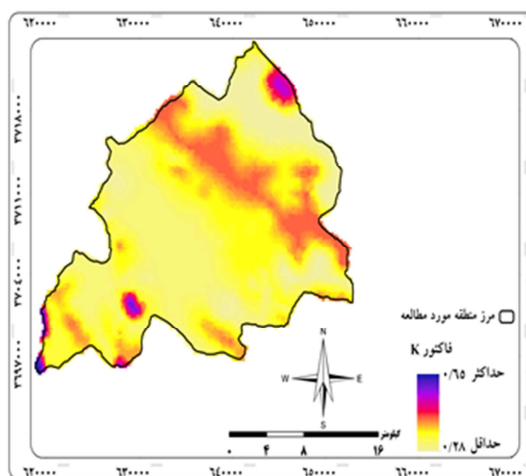
نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به منظور ایجاد طول شیب و درجه شیب (LS) مورد استفاده قرار گرفته است. فاکتور LS به وسیله معادله‌های مربوطه با استفاده از نقشه DEM حوضه و با در نظر گرفتن کنش متقابل بین توپوگرافی و تجمع جریان آب محاسبه شد. همان‌طور که از شکل ۶ بر می‌آید، فاکتور LS در منطقه مورد مطالعه

بین ۰ تا ۱۴۷ در سطح پیکسل متغیر بوده و مقدار متوسط آن ۲ می‌باشد. مقادیر LS در بعضی از مناطق با شیب-های تند مانند رودخانه‌ها و یال‌ها بیشتر است.

نقشه فاکتور C براساس NDVI تهیه گردید (شکل ۷). در حقیقت این فاکتور به‌طور کامل، رابطه معکوس با NDVI دارد. مقدار فاکتور C بین ۰/۳۵ تا ۰/۶۰ متغیر است و متوسط آن ۰/۵۱ می‌باشد. نقشه فاکتور C نشان می‌دهد این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی حداکثر است و کمترین مقدار آن در مناطقی است که پوشش متراکم وجود دارد که با رنگ روشن‌تر نشان داده شده است.

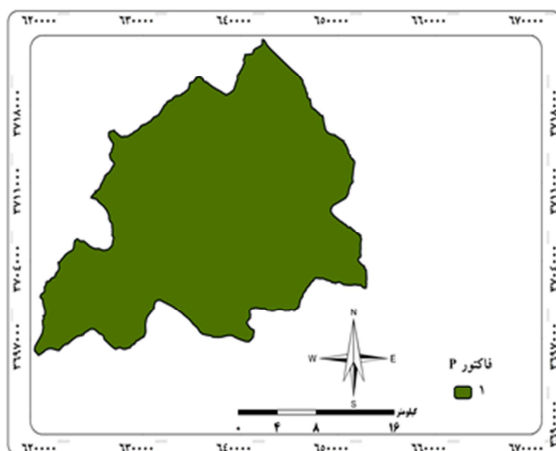


شکل ۶: نقشه فاکتور طول شیب و درجه شیب (LS)

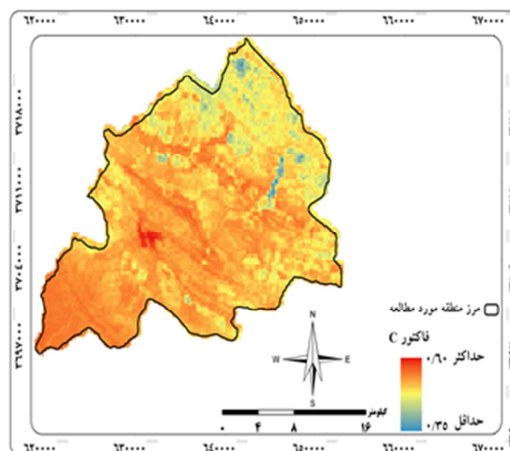


شکل ۵: نقشه فاکتور K سرعت فرسایش پذیری خاک

باتوجه به اینکه در حوضه تحت بررسی هیچگونه عملیات اصلاحی و مدیریتی صورت نگرفته، فاکتور عملیات حفاظتی (P)، یک در نظر گرفته می‌شود (شکل ۸). آمار مربوط به فاکتورهای R، K، LS، C و P در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۸: نقشه عملیات حفاظتی فاکتور (P)



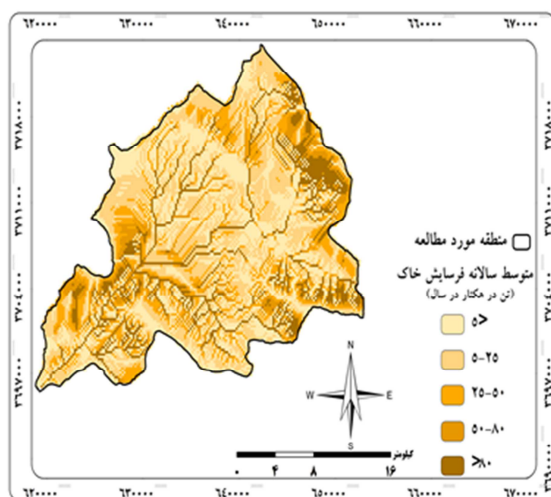
شکل ۷: نقشه فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C)

جدول ۴. آمار مربوط به فاکتورهای معادله RUSLE در حوضه چمگردلان ایلام

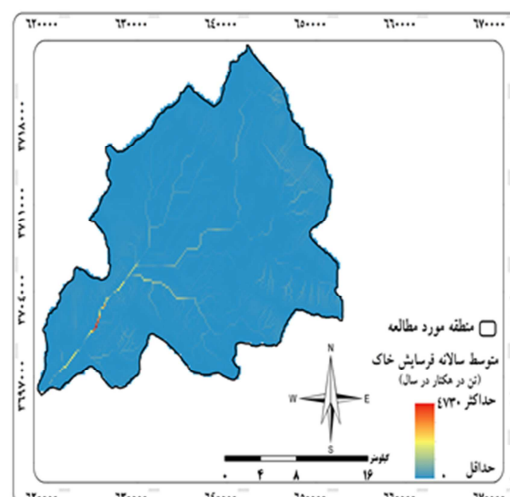
فاکتور P	فاکتور C	فاکتور LS	فاکتور K	فاکتور R	
۱	۰/۳۵	۰	۰/۲۸	۱۳۶	حداقل
۱	۱/۶۰	۱۴۷	۰/۶۶	۳۹۶	حداکثر
۱	۰/۵۱	۲	۰/۳۵	۲۶۴	میانگین
۰	۰/۰۳	۹	۰/۰۵	۴۴	انحراف معیار

فرسایش سالانه خاک

متوسط فرسایش سالیانه خاک به وسیله ضرب کردن فاکتورهای فرسایشی (R)، فاکتور فرسایش پذیری (k)، فاکتور توپوگرافی (LS)، فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C) و فاکتور عملیات حفاظتی (P) در محیط نرم افزاری ArcGIS 10.3 محاسبه شد. مقادیر فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه بین صفر (بدون فرسایش) تا $473 \text{ ton ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ در سطح پیکسل متغیر می‌باشد. متوسط و انحراف معیار آن نیز به ترتیب برابر با $86/50$ و $346/00$ تن در هکتار در سال تعیین شد. نقشه به دست آمده از این مدل، در شکل ۹ نشان داده شده است. در مرحله بعد نقشه فرسایش سالانه خاک به ۵ کلاس خطر طبقه بندی شده است (شکل ۱۰) (یاو کونگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۸). فراوانی هر یک از کلاس‌های خطر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بیشترین قسمت حوضه مورد مطالعه، جزء طبقه فرسایشی خیلی کم تا کم (۶۵ درصد) قرار داشت که بیشتر این کلاس‌ها در بخش میانی حوضه واقع شده بودند. حدود ۲۰ درصد حوضه نیز تحت خطر زیاد تا خیلی زیاد قرار داشت که از این بین، بیشترین مناطق تحت خطر فرسایش بالا تا شدید، در مناطق شمال غربی، غرب و شمال شرقی و جنوب شرقی حوضه قرار داشتند.

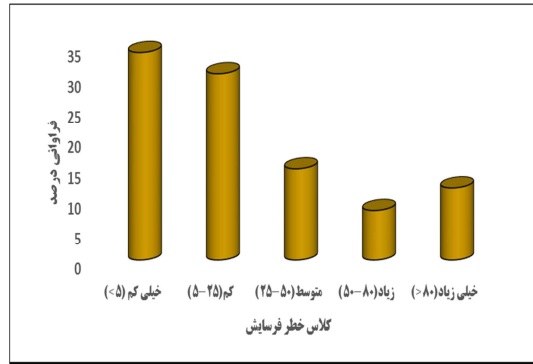


شکل ۱۰: نقشه کلاس خاک



شکل ۹: نقشه متوسط سالانه فرسایش

¹ - Yue-Qing

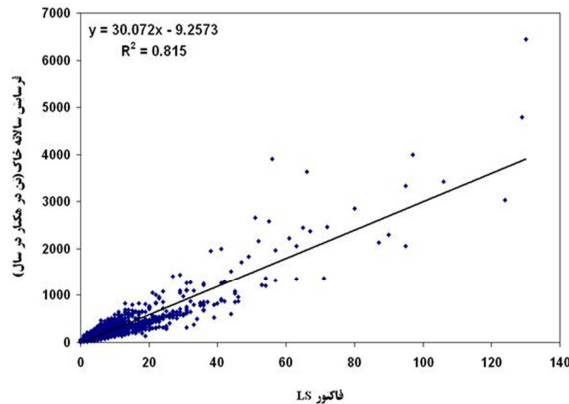


شکل ۱۱: فراوانی کلاس‌های خطر فرسایش

معادلات رگرسیونی ارائه شده در جدول ۵، ضریب هر یک از متغیرهای مستقل و عدد ثابت را نشان می‌دهد. ضریب ثابت نشان‌دهنده ارزش متغیر وابسته در زمانی که متغیر مستقل ارزش صفر داشته باشد. ضریب رگرسیونی نشان‌دهنده اثر متغیر مستقل بر متغیر وابسته می‌باشد. ضریب تعیین (R^2) میزان تغییرپذیری متغیر وابسته را بر مبنای متغیر مستقل نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مقدار R^2 دیده می‌شود، فاکتور LS با ضریب همبستگی ۰/۸۱ بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است (شکل ۱۲). این در حالی است که همبستگی بسیار پایینی بین سایر فاکتورها و فرسایش سالانه خاک وجود داشت (جدول ۵).

جدول ۵: میزان همبستگی و روابط رگرسیونی بین مقدار فرسایش سالانه خاک و پارامترهای مدل RUSLE

R^2	رابطه رگرسیونی	فاکتورهای مدل RUSLE
$R^2=0.024$	$Y=-0.3526X + 195/16$	R
$R^2=0.0151$	$Y=270.91X - 198/17$	K
$R^2=0.8111$	$Y=20.337X - 45/145$	LS
$R^2=0.0866$	$Y=50.3/16X - 67/268$	C
$R^2=0.0993$	$Y=1642/6X - 1071/3$	P



شکل ۱۲: رابطه فاکتور LS با متوسط سالانه فرسایش خاک

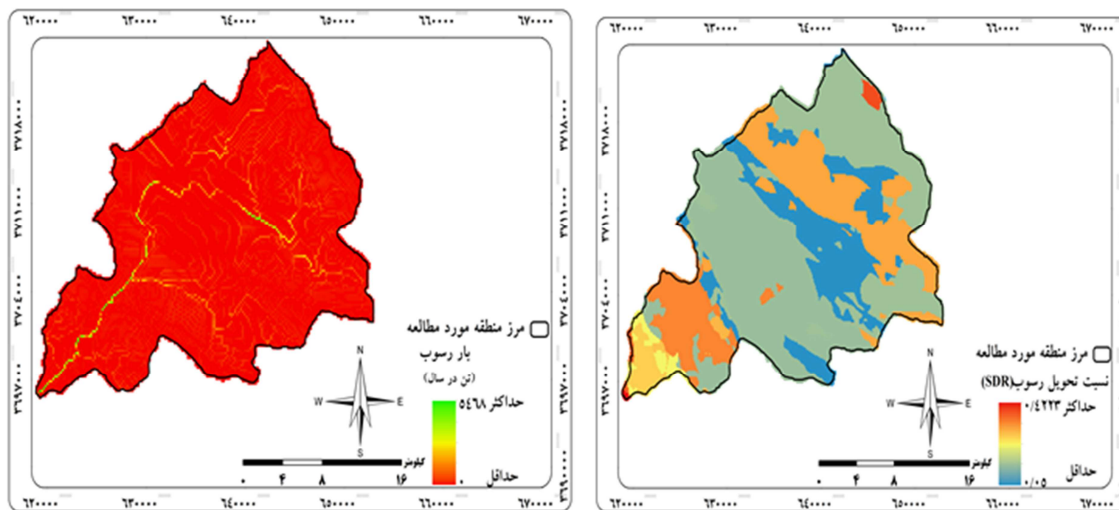
بار رسوب

برای دستیابی به میانگین خطر رسوب منطقه، باید میانگین خطر فرسایش محاسبه شده به وسیله مدل را در نسبت تحویل رسوب ضرب کرد تا به رسوبدهی حوضه رسید و سپس می توان آن را با آمار مشاهده ای ایستگاه رسوب-سنجی مقایسه کرد. در این مطالعه، متوسط مقادیر نسبت تحویل رسوب بین ۰/۱۲ تا ۰/۳۴ و متوسط بار رسوب در خروجی حوضه بین ۵/۳۶ تا ۱۶/۳۷ تن در هکتار در سال متغیر بود (جدول ۶). میزان رسوب مشاهده و محاسبه شده بر اساس ۱۶ سال آمار ایستگاه هیدرومتری با استفاده از منحنی های سنجه (حد وسط دسته ها) به طور متوسط معادل ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال (اعظمی، ۱۳۸۰) بوده و مقدار رسوب برآورد شده (متوسط رسوب برآورد شده) بر اساس مدل RUSLE با استفاده از روش نسبت تحویل رسوب USDA معادل ۱۶/۳۷ تن در هکتار در سال می باشد. در ضمن مقدار بار رسوبی برآورد شده در این حوضه توسط شهبازی (۱۳۷۸) با استفاده از روش EPM برابر ۱۸/۹۰ تن در هکتار در سال (آمار مشاهده ای معادل ۱۶ تن در هکتار در سال) و عسگری و جعفری (۱۳۸۵) با استفاده از مدل MPSIAC برابر ۱۴/۹۸ تن در هکتار در سال می باشد (آمار مشاهده ای ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال) (اعظمی، ۱۳۸۰). بنابراین اختلاف بین مقدار رسوب مشاهده شده با مقدار برآورد شده توسط مدل RUSLE در این مطالعه برابر ۰/۲۱ تن در هکتار در سال است. به عبارت دیگر، مقدار رسوب برآورد شده حدود ۱ درصد کمتر از مقدار رسوب اندازه گیری شده (مشاهده شده) (براساس محاسبه خطای نسبی) می باشد. بنابراین اختلاف معنی داری بین نتایج این مدل و آمار واقعی مشاهده نمی شود.

بنابراین، از آنجایی که مقدار بار رسوب برآوردی با استفاده از روش USDA (جدول ۶) تقریباً نزدیک به مقدار بار رسوب ثبت شده در ایستگاه رسوب سنجی حوضه چمگردلان ایلام (۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال) بود (اعظمی، ۲۰۰۱). از این رو، این روش به عنوان بهترین روش برای محاسبه نسبت تحویل رسوب انتخاب گردید و براساس آن، نقشه نسبت تحویل رسوب و بار رسوب تهیه شد (شکل ۱۳ و ۱۴). در این روش، متوسط نسبت تحویل رسوب و رسوب سالانه از ۰/۰۵ تا ۰/۴۲ و ۰ تا ۵۴۶۴ تن در سال به ترتیب متغیر است.

جدول ۶: روش های نسبت تحویل بار رسوب، مقادیر نسبت تحویل و بار رسوب در حوضه مورد مطالعه

روش های تحول بار رسوب	میزان نسبت تحویل	بار رسوب (تن در هکتار در سال)
وانونی	۰/۲۶	۱۱/۶۲
بویس	۰/۱۲	۵/۳۶
USDA	۰/۳۴	۱۶/۳۷



شکل ۱۴: نقشه بار رسوب

شکل ۱۳: نقشه نسبت تحویل رسوب

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری مقدار فرسایش و رسوب به دلایل فنی، حفاظتی و اقتصادی در تمامی نقاط امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این رو مناسب‌ترین راهکار، برآورد مقدار فرسایش و تولید رسوب است که لازمه آن آگاهی از مکانیسم‌های فرسایش و عوامل مؤثر بر آن است. در این مطالعه ارزیابی کمی فرسایش خاک و بار رسوب به صورت شبکه‌ای (توزیعی) با استفاده از مدل RUSLE در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی به کار گرفته شد. تمام نقشه‌های P ، C ، LS ، k و R جهت ایجاد نقشه خطر فرسایش و بار رسوب در محیط GIS با هم تلفیق شدند و توزیع مکانی فرسایش خاک و بار رسوب به دست آمد.

نتایج برآورد معیارهای مورد بررسی در روش RUSLE در حوضه آبخیز مورد مطالعه نشان داد، فاکتور فرسایش-پذیری از $0/28$ تا $0/66$ و معیار پوشش گیاهی از $0/35$ تا $0/60$ متغیر بوده که نشان‌دهنده تفاوت در ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در مناطق مختلف حوضه است. نقشه فاکتور پوشش گیاهی نشان می‌دهد این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی حداکثر است و کمترین مقدار آن در مناطقی است که پوشش متراکم وجود دارد. نتایج حاصل از فاکتور فرساینده‌گی در حوضه چم گردلان نشان داد، میزان این فاکتور از 136 در پایین‌دست تا 396 مگاژول در میلی‌متر در سال در هکتار در بالادست حوضه در نوسان است و میزان فاکتور فرساینده‌گی باران در نقطه خروجی حوضه به حداقل می‌رسد. طبق نظر عساکره (۲۰۰۸) تغییرهای زمانی و مکانی بارش تحت تأثیر توپوگرافی است، هر قدر توپوگرافی و پستی‌وبلندی بیشتر باشد، تغییرپذیری مکانی بارش بیشتر است. همچنین میگوئیل و همکاران (۲۰۱۱)؛ بهاروی و همکاران (۲۰۱۶) و رضائی و همکاران (۲۰۱۴) معتقدند افزایش ارتفاع از سطح دریا سبب افزایش فاکتور فرساینده‌گی باران می‌گردد، چون که میزان بارش زیاد می‌شود. فرساینده‌گی باران در شمال شرقی و جنوب غربی حوضه مورد مطالعه که ارتفاع بالاتری داشتند بیشتر بوده که با رنگ قرمز نشان داده شده است یا به عبارت دیگر، کاهش ارتفاع و باران رابطه مستقیمی با کاهش فاکتور R دارد. بررسی همبستگی آماری بین فاکتورهای RUSLE و

مقدار فرسایش سالیانه خاک در منطقه مورد مطالعه نیز نشان داد که فاکتور LS با ضریب همبستگی $0/81$ بیشترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک در مدل RUSLE دارد. بر اساس نتایج حاصل از روش RUSLE، بیشترین وسعت حوضه مربوط به کلاس فرسایشی خیلی کم، کم و متوسط است که عموماً در کل حوضه پراکنش دارد و کمترین مساحت حوضه در کلاس فرسایشی زیاد تا خیلی زیاد (۲۰ درصد) قرار می‌گیرد و بر این اساس مقدار رسوب سالانه در این روش $16/37$ تن در هکتار در سال برآورد گردید. باتوجه به اینکه ۲۰ درصد حوضه مورد مطالعه در کلاس فرسایش زیاد تا خیلی زیاد قرار دارد، لزوم اقدامات حفاظتی در این مناطق الزامی است. نتایج حاصل از بررسی نقشه فرسایش در این مدل نشان می‌دهد که بیشترین فرسایش در قسمت غرب و میانه حوضه قرار دارد. چون این منطقه از سازندهای ناپایدار و مستعد فرسایش تشکیل شده است. شیب زیاد منطقه به اضافه بارش باران و تغییر کاربری اراضی در این محدوده بسیاری از عرصه‌های آن را با بحران فرسایش خاک مواجه کرده است.

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر فرسایش و تولید رسوب، رژیم بارندگی و اقلیم حوضه است که با بررسی آن مشخص شد که قسمت عمده ریزش‌های جوی در حوضه آبخیز چم‌گردلان از نوع باران است و در فصل زمستان با برف همراه می‌شود و لیکن بارندگی به‌خصوص با شدت‌های بالا و زمان کم، باعث جریان سریع و شدت رواناب شده که با خود مقدار زیادی از خاک سطحی را تخریب و به‌صورت رسوب و بار معلق به مناطق پایین‌دست و خروجی حوضه حمل می‌کند.

از دیگر عوامل مؤثر بر فرسایش و تولید رسوب و ایجاد سیلاب حوضه، خصوصیت‌های فیزیوگرافی و توپوگرافی از- جمله شیب و ارتفاع است. شیب حوضه آبخیز چم‌گردلان در اکثر قسمت‌های آن چشمگیر است، به‌طوری‌که در بیشتر قسمت‌های این حوضه شیب بیشتر از ۲۰ درصد است که در سرعت بخشیدن به فرسایش و پارامترهای مؤثر در آن از جمله رواناب تأثیرگذار است. به‌طورکلی در حوضه‌های با شیب ملایم به‌دلیل اینکه قدرت آب جاری کاهش پیدا می‌کند، بنابراین اشکال مختلف فرسایش نیز کمتر دیده می‌شود؛ درحالی‌که در حوضه آبخیز چم‌گردلان به‌دلیل کوهستانی بودن قسمت‌های زیادی از آن، عکس این حالت اتفاق می‌افتد.

پوشش گیاهی و کاربری اراضی یکی دیگر از عوامل مؤثر در فرسایش و رسوب حوضه به شمار می‌رود. طبیعی است مناطقی که دارای پوشش گیاهی جنگلی و مرتعی مناسب باشد، کمتر در معرض تخریب و فرسایش قرار می‌گیرند. در حوضه آبخیز چم‌گردلان که حدود ۷۰ درصد از مساحت حوضه را جنگل و مرتع با تراکم‌های مختلف پوشانده است، انتظار می‌رود، وضعیت کنترل فرسایش در سطح حوضه آبخیز مناسب و میزان ضریب فرسایش در حد کم باشد؛ لیکن به دلایل مختلف از جمله چرای مفرط و دائم مرتع توسط دام‌های منطقه، عدم رعایت تعادل دام و مرتع توسط دامداران، اعمال روش‌های غلط شخم اراضی، قطع بی‌رویه درختان، درختچه‌ها و بوته‌ها، عدم رعایت اصول بهره‌برداری صحیح از اراضی، تبدیل جنگل‌ها و مراتع به اراضی کشاورزی، خاک و زمین‌شناسی و تأثیر عوامل اقلیمی به- خصوص پراکنش و شدت بارندگی، باعث شده است که وضعیت فرسایش حوضه آبخیز در حد شدید و بسیار شدید قرار گیرد. بنابراین اعمال روش‌های مختلف کنترل فرسایش در سطح حوضه ضروری است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که میزان رسوب برآوردی در روش RUSLE، $16/37$ تن در هکتار در سال که باتوجه به نزدیکتر بودن مقدار برآوردی مدل RUSLE به مقدار مشاهده‌ای $16/58$ تن در هکتار در سال، کارایی مدل RUSLE در برآورد رسوب منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. پژوهشگرانی چون بهاروی و همکاران (۲۰۱۶)؛

میگوئل و همکاران (۲۰۱۱)؛ واعظی و همکاران (۲۰۱۰)؛ رضائی و همکاران (۲۰۱۴) و تیموری و بذرافشان (۲۰۱۸) کارایی بالای مدل RUSLE را تأیید می‌نمایند.

ایجاد پایگاه داده از طریق روش‌های قدیمی بسیار وقت‌گیر، خسته‌کننده و غیرعملی می‌باشد. در این مطالعه سعی شد از اطلاعات به‌دست‌آمده از سنجش‌از‌دور، و قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ایجاد داده‌های موردنیاز جهت ایجاد فاکتورهای مدل RUSLE استفاده شود که نتیجه آن به‌دست‌آوردن اطلاعات خروجی با کیفیت بالا و قابلیت بروزسانی آسان بود. بنابراین سنجش‌از‌دور و GIS می‌توانند به‌صورت مؤثر، در توسعه راهکارهای مدیریتی و فراهم‌آوردن گزینه‌های انتخابی برای مدیران، جهت حل مسئله فرسایش خاک به‌کار گرفته شوند.

منابع

- احمدی، حسن. (۱۳۸۴). ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی - جلد ۱). انتشارات دانشگاه تهران.
https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0.5&cluster=9947268861899941313
- اعظمی، اعیاد. (۱۳۸۰). مقایسه روش‌های مختلف برای تخمین بار رسوب در حوضه آبخیز ایلام، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، افضل، کرامت‌الله؛ شاهرخی، محمدرضا؛ بیاتانی، فاطمه. (۱۳۹۸). برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز دهکمان (جنوب کرمان). مجله مخاطرات محیط طبیعی، (۲۰)، ۳۸-۲۱.
- https://jneh.usb.ac.ir/article_3943_d2bdb53e00553e9c17c34918e0a67523.pdf انصاری لاری، احمد؛ انصاری، مریم. (۱۳۹۵). بررسی کاربرد GIS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه قلعه‌چای). مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، (۲)۱۴، ۱۷۳-۱۵۵.
- https://jgrd.um.ac.ir/article_31988_11aac23bb9164425cd0c05e8028ef50c.pdf?lang=en
- تیموری، فاطمه؛ بذرافشان، ام‌البینین. (۱۳۹۷). مقایسه کارایی مدل RUSLE و EPM در برآورد فرسایش خاک و میزان رسوب‌دهی بر اساس منحنی سنج رسوب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز جاسک-گابریک). (۲۳)۱۲، ۶۲-۵۰.
- <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=692700>
- حبشی، خلیل؛ محمدی، شاهین؛ کریم‌زاده، حمیدرضا؛ پورمنافی، سعید. (۱۳۹۷). ارزیابی خطر فرسایش خاک در دشت کوهپایه-سگزی با استفاده از مدل تجدیدنظرشده جهانی فرسایش خاک (RUSLE). (۱۵)۷، ۱۶۱-۱۷۸.
- <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=649051>
- رفاهی، حسینقلی. (۱۳۹۴). فرسایش و حفاظت خاک. تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- رضائی، پیمان؛ فریدی، پروانه؛ قربانی، منصور؛ کاظمی، محمد. (۱۳۹۳). برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز گابریک -جنوب خاوری استان هرمزگان. مجله ژئومورفولوژی کمی، (۹)۱، ۹۷-۱۱۳.
- http://www.geomorphologyjournal.ir/article_77943_86aeec68df97ca72f2debb818af77412.pdf
- شهبازی، کاظم. (۱۳۷۸). تخمین فرسایش خاک و رسوب با روش‌های ژئومورفولوژیکی کیفی (واحد‌های همگن) و EPM و مقایسه آنها با آمار رسوبی خروجی در حوضه آبخیز سد ایلام. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۳۱ ص.
- عرب خدری، محمود. (۱۳۸۴). بررسی رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز ایران. تحقیقات منابع آب ایران. (۲)۱، ۶۰-۵۱.
- <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=27310>
- عساکره، حسین. (۱۳۸۷). کاربرد روش کریجینگ در میان‌یابی بارش (مطالعه موردی: میان‌یابی بارش ۲۶/۱۲/۱۳۷۶ در ایران زمین). مجله جغرافیا و توسعه. (۱۲)۶، ۴۲-۲۵.
- <https://www.sid.ir/fa/JOURNAL/ViewPaper.aspx?ID=81998>
- عسگری، شمس اله؛ جعفری، سید محمد رضا. (۱۳۸۵). برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب حوضه سد ایلام با استفاده از MPSIAC، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۴، ۲۹-۳۵.
- <https://www.sid.ir/FileServer/JF/51913876403.pdf>

- علیزاده، امین. (۱۳۷۹). فرسایش و حفاظت خاک. انتشارات آستان قدس رضوی. ۸۷۰ ص.
- قضاوی، رضا؛ ولی، عباسعلی؛ مقامی، یاسر؛ عبدی، یاسر؛ شرفی، سیامک. (۱۳۹۱). مقایسه مدل‌های EPM و MPSIAC و PSIAC در برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از GIS. جغرافیا و توسعه، شماره ۲۷، ۱۱۷-۱۲۶.
<https://www.sid.ir/FileServer/JF/66913912709.pdf>
- گلی‌مختاری، لیلا؛ شفیعی، نجمه؛ رحمانی، ابوالفضل. (۱۳۹۷). برآورد میزان فرسایش خاک با استفاد از مدل (RUSLE) (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ممسنی نورآباد). هیدروژئومورفولوژی. ۱۷(۵)، ۱-۲۱.
<https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=811437>
- واعظی، علیرضا؛ عباسی، محمد؛ حاجی‌ملکی، خالد. (۱۳۹۶). ارزیابی مدل RUSLE همراه‌شده با سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در عرصه‌های زهکش کوچک در منطقه نیمه خشک شمال غرب ایران. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱(۳۸)، ۱-۱۰.
<https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=652602>
- Azimi Sardari, M.R., Bazrafshan, O.A., Panagupulus, T., Rafiei Sardoei, E. (2019). Current and future assessment of soil erosion in the catchment area of Esteghlal Dam in Minab using RUSLE-3D model and climate change scenarios. Desert, 7 (14), 132-119.
https://journals.tabrizu.ac.ir/article_11157_f9cf377b04a3deda530eaa8863495756.pdf
- Bagio, B., Bertol, I., Wolschick, N.H., Schneiders, D., Santos, M.A.d.N.d. (2017). Water Erosion in Different Slope Lengths on Bare Soil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 41.
<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/sW6xvSNWZVrJ9SPvvtwgQkF/?lang=en>
- Bahrawi, A., Elhag, M., Aldhebiani, AY., Galal, K., Hegazy, AK., Alghailani, E. (2016). Soil Erosion Estimation Using Remote Sensing Techniques in Wadi Yalamlam Basin, Saudi Arabia, Hindawi Publishing Corporation, 15:1-8.
<https://www.hindawi.com/journals/amse/2016/9585962/>
- Benkobi, L., Trlica, M.J., and Smith, J.L. (1994). Evaluation of a refined surface cover subfactor for use in RUSLE. J Range Manage 47:74-78.
https://www.academia.edu/9175029/Evaluation_of_a_refined_surface_cover_subfactor_for_use_in_RUSLE
- Biesemans, J., Meirvenne, M.V., Gabriels, D. (2000). Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. J Soil Water Conserv 55:35-42.
<https://www.jswnonline.org/content/55/1/35>
- Boyce, R.C. (1975). Sediment routing with sediment delivery ratios. Present and Prospective Technology for ARS. USDA, Washington, D.C.
- Demirci, A., Karaburun, A. (2012). Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the Buyukcekmece Lake watershed, northwest Turkey. Environmental Earth Sciences, volume 66, number 3, pp. 903-913.
[https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1556168](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1556168)
- Fayas, C., Shantha Abeysingha, N. (2019). Soil loss estimation using rusle model toprioritize erosioncontrol in KELANI riverbasinin SriLanka. International Soil and Water Conservation Research. 7: 19. 130-137.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.003>
- Ferro, V., Giordano, G., Lovino, M. (1991). Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. Hydrol Sci J 36(6):549-564.
<https://doi.org/10.1080/02626669109492543>
- Gavrilovic, Z (1988) The Use of an Empirical Method (Erosion Potential Method) for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential streams International Conference of River regime, 17-20May, Wallingford, 422p. DOI: [10.1007/978-3-319-09054-2_73](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_73)
- Haan, C.T., Barfield, B.J., Hayes, J.C. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press, San Diego, 588pp.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780123123404/design-hydrology-and-sedimentology-for-small-catchments>
- Kairis, O., C. Karavitis, A., Kounalaki, L., Salvati, C. Kosmas. 2013. The effect of land management practices on soil erosion and land desertification in an olive grove. Soil Use and Management, 29(4): 597-606.
<https://doi.org/10.1111/sum.12074>
- Lal, R. (1990). Soil Erosion in the Tropics. Principles and Management. McGraw-Hill, New York. 580 pp.
<https://searchworks.stanford.edu/view/500524>
- Lin, C.Y. (1997). A study on the width and placement of vegetated buffer strips in a mudstone-distributed watershed. J.china. Soil water conserve. 29 (3), 250-266(in Chinese with English abstract).
<http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/cylin/research/1672.pdf>
- Miguel, PA., Samuel-Rosa, R., Simao, Dennis Dalmolin, F., Arajo Pedron, J., Moura Bueno, A. (2011). The USLE model for estimating soil erosion in complex topography areas. Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing, (SBSR), Brasil, 85: 9227-9230.
https://res.mdpi.com/d_attachment/sustainability/sustainability-12/08531/article_deploy/sustainability-12-08531-v2.pdf

- McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R. (1987). Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Trans Am Soc Agric Eng* 30:1387-1396.
<https://elibrary.asabe.org/login.aspx>
- Miguel, P.A., Samuel-Rosa, R., Simao Dennis Dalmolin, F., Arajo Pedron, J., Moura Bueno, A. (2011). The USLE model for estimating soil erosion in complex topography areas. *Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing, (SBSR), Brasil, 85: 9227-9230.*
https://jm.um.ac.ir/article_37021_fe128a88f8a05207ac4f5c0373846a3d.pdf
- Moore, I.D., Wilson, J.P. (1993). Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47:423-428.
<https://www.jswnonline.org/content/47/5/423>
- Morgan, R.P.C. (1995). *Soil erosion and conservation*. Longman, London, pp.23-37.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small atchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 527-544.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)
- Nouwakpo, S.K., Williams, C.J., Al-Hamdan, O.Z., Weltz, M.A., Pierson, F., Nearing, M. (2016). A review of concentrated flow erosion processes on rangelands: Fundamental understanding and knowledge gaps. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 4:75-86.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.003>
- Parysow, P., Wang, G.X., Gertner, G., Anderson, A.B. (2003). Spatial uncertainty analysis for mapping soil erodibility based on joint sequential simulation. *Catena* 53:65-78.
[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00198-4)
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43:64-84.
<https://doi.org/10.1002/esp.4250>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. (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.*
https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah_703.pdf
- Renard, K.G., Freimund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. *J Hydrol* 157:287-306.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, J.P. (1991). RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46 (1), 30- 33.
<https://www.jswnonline.org/content/46/1/30>
- Sun, W., Minasny, B., McBratney, A. (2012). Analysis and prediction of soil properties using local regression-Kriging. *Geoderma*, 23: 172-171 23.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.010>
- USDA. (1975). *Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios*. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation. http://irrigationtoolbox.com/NEH/Part632_SedimentationGeology/NEH3_06.PDF
- Vanoni, V.A. (1975). *Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54*. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y.
<https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0024348>
- Vaezi, AR., Bahrami, HA., Sadeghi, S.H.R., Mahdian, M.H. (2010). Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, 241-252.
<https://jast.modares.ac.ir/article-23-10275-en.pdf>
- Wischmeier, W.H. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J Soil and Water Conserv* 26:189 193.
<https://trid.trb.org/view.aspx?id=125184>
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion. losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook, vol. 537*. US Department of Agriculture, Washington,DC, 58 pp.
<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>
- Yu, B., Rosewell, C.J. (1996c). A robust estimator of the R factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans Am Soc Agric Eng* 39(2):559-561.
<https://elibrary.asabe.org/login.aspx>
- Yue-Qing, X., Shao, X-M., Kong, X-B. (2008). Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a Mountain Karst watershed, Guizhou Province, China, *Environ Monit Assess* 141: 275-286.
<https://doi.org/10.1007/s10661-007-9894-9>
- Zerihun, M., Mohammedyasin, M.S., Sewnet, D., Adem, A.A., Lakew, M. (2018). Assessment of soil erosion using RUSLE, GIS and remote sensing in NW Ethiopia. *Geoderma Reg.* 12, 83-90.

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.002>

Zhang, W., Zhou, J., Feng, G., Weindorf, D.C., Hu, G., Sheng J. (2015). Characteristics of water erosion and conservation practice in arid regions of Central Asia: Xinjiang Province, China as an example. *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 3(2), 97-111. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.06.002>.

References

References (in Persian)

- Afzali, K; Shahrokhi, M.R., Bayatani, F. (2019). Estimation of soil erosion using RUSLE model and identification of its most effective factor in Dehkan watershed (south of Kerman). *Journal of Environmental Hazards*, Volume 8, Number 20, 21-38.
https://jneh.usb.ac.ir/article_3943_d2bdb53e00553e9c17c34918e0a67523.pdf. [In Persian]
- Ahmadi, H. (1995). *Applied geo-morphology water erosion*, 1. Tehran University Press.
https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0.5&cluster=9947268861899941313. [In Persian]
- Alizadeh, A. (1990). *Soil Erosion and Conservation*. Astan Qods Razavi Publication, 870.)
- Ansari Iari, A., Ansari, M. (2017). Investigation of GIS application for estimating soil erosion and sediment load using RUSLE model (Case study: Qala-e-Chay basin). *Journal of Geography and Regional Development*, 14 (2), 155-173.
https://jgrd.um.ac.ir/article_31988_11aac23bb9164425cd0c05e8028ef50c.pdf?lang=en. [In Persian]
- Arab Khedri, M. (1384). Investigation of suspended sedimentation in Iranian watersheds. *Iran Water Resources Research*, 1 (2): .51-60.
<https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=27310>. [In Persian]
- Asgari, S., Jafari, S, M.R. (2006). Estimation of soil erosion and sediment production in Ilam dam basin using MPSIAC, *Geographical Research*, No. 64, pp. 29-35.
<https://www.sid.ir/FileServer/JF/51913876403.pdf>. [In Persian]
- Askareh, H. (2008). Application of Kriging method in precipitation intermediation, Case study: Precipitation intermediation 12/26/1376 in Iran. *Journal of Geography and Development*, No. 12, pp. 25-42.
https://gisj.sbu.ac.ir/index.php/GIS/about/?_action=article&au=823347&_au=H++Asakereh&lang=en. [In Persian]
- Azami, A. (2001). Comparison of various methods for estimating sediment yield in Ilam dam watershed. M.sc. Thesis, Gorgan University.
https://www.researchgate.net/.../Soil_Erosion. [In Persian]
- Azimi Sardari, M.R., Bazrafshan, O.A., Panagupulus, T., Rafiei Sardoei, E. (2019). Current and future assessment of soil erosion in the catchment area of Esteghlal Dam in Minab using RUSLE-3D model and climate change scenarios. *Desert Management*, 7 (14), 132-119.
https://journals.tabrizu.ac.ir/article_11157_f9cf377b04a3deda530eaa8863495756.pdf. [In Persian]
- Ghazavi, Reza., Wali, Abbas Ali., Maqami, Yasar., Abdi, Jaleh., and Sayamak, Sharfi. (2012). Comparison of EPM, MPSIAC and PSIAC models in estimating erosion and sediment using GIS. *Geography and Development*, 10 (27): 117-126. [In Persian]
- Goli Mokhtari, L.G. Shafiei, N., Rahmani, A. (2018). Estimation of soil erosion using RUSLE model, a case study of Noorabad Mamasani basin. *Hydrogeomorphology*, 17, 1-21
<https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=811437>. [In Persian]
- Refahi, H.G. (2015). *Water erosion and conservation*. Tehran: University of Tehran Publication. [In Persian]
- Rezaei, P., Faridi, P., Gorbani, M., Kazemi, M. (2014). Estimation of soil erosion using RUSLE model and identification of its most effective factor in Gabrik watershed-southeast of Hormozgan province, *Quantitative Geomorphological Research*, First Year, No. 3, pp. 97-113.
http://www.geomorphologyjournal.ir/article_77943_86aeec68df97ca72f2debb818af77412.pdf. [In Persian]
- Shahbazi, K. (1999). Estimation of erosion and sediment by qualitative geomorphology (homogenous units) and EPM methods and comparing them with outlet sediment data in Ilam dam basin. MS.C Thesis. School of Natural Resources, Tarbiat Modarres University. 131p.
<https://www.researchgate.net/publication/263125566>. [In Persian]
- Teymouri, F., Bazrafshan, O. (2018). Comparison of the efficiency of RUSLE and EPM models in estimating erosion and sedimentation rate based on sediment measurement curve (Case study: Jask-Gabrik watershed). *Journal of New Findings in Applied Geology*, Volume 12, Number 23, pp. 50-62.
<https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=692700>. [In Persian]
- Vaezi, A., Abasi, M., Haji Maleki, K.H. (2017). Evaluation of RUSLE model combined with remote sensing and GIS in small drainage areas in the semi-arid region, northwestern Iran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11 (38), 1-10.
<https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=652602>. [In Persian]

References (in English)

- Azimi Sardari, M.R., Bazrafshan, O.A., Panagupulus, T., Rafiei Sardoei, E. (2019). Current and future assessment of soil erosion in the catchment area of Esteghlal Dam in Minab using RUSLE-3D model and climate change scenarios. *Desert*, 7 (14), 132-119.
https://journals.tabrizu.ac.ir/article_11157_f9cf377b04a3deda530eaa8863495756.pdf
- Bagio, B., Bertol, I., Wolschick, N.H., Schneiders, D., Santos, M.A.d.N.d. (2017). Water Erosion in Different Slope Lengths on Bare Soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41.
<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/sW6xvSNWZVrJ9SPvvtwgQkF/?lang=en>
- Bahrawi, A., Elhag, M., Aldhebiani, AY., Galal, K., Hegazy, AK., Alghailani, E. (2016). Soil Erosion Estimation Using Remote Sensing Techniques in Wadi Yalamlam Basin, Saudi Arabia, *Hindawi Publishing Corporation*, 15:1-8.
<https://www.hindawi.com/journals/amse/2016/9585962/>

- Benkobi, L., Trlica, M.J., and Smith, J.L. (1994). Evaluation of a refined surface cover subfactor for use in RUSLE. *J Range Manage* 47:74–78.
https://www.academia.edu/9175029/Evaluation_of_a_refined_surface_cover_subfactor_for_use_in_RUSLE
- Biesemans, J., Meirvenne, M.V., Gabriels, D. (2000). Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. *J Soil Water Conserv* 55:35–42.
<https://www.jswnonline.org/content/55/1/35>
- Boyce, R.C. (1975). Sediment routing with sediment delivery ratios. Present and Prospective Technology for ARS. USDA, Washington, D.C.
- Demirci, A., Karaburun, A. (2012). Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the Buyukcekmece Lake watershed, northwest Turkey. *Environmental Earth Sciences*, volume 66, number 3, pp. 903-913.
[https://www.scrip.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1556168](https://www.scrip.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1556168).
- Fayas, C., Shantha Abeysingha, N. (2019). Soil loss estimation using rusle model toprioritize erosioncontrol in KELANI riverbasinin SriLanka. *International Soil and Water Conservation Research*. 7: 19. 130-137.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.003>
- Ferro, V., Giordano, G., Lovino, M. (1991). Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrol Sci J* 36(6):549–564.
<https://doi.org/10.1080/02626669109492543>
- Gavrilovic, Z. (1988) The Use of an Empirical Method (Erosion Potential Method) for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudded or Torrential streams International Conference of River regime, 17-20May, Wallingford, 422p.
DOI: [10.1007/978-3-319-09054-2_73](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_73)
- Haan, C.T., Barfield, B.J., Hayes, J.C. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press, San Diego, 588pp.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780123123404/design-hydrology-and-sedimentology-for-small-catchments>
- Kairis, O., C. Karavitis, A., Kounalaki, L., Salvati, C. Kosmas. 2013. The effect of land management practices on soil erosion and land desertification in an olive grove. *Soil Use and Management*, 29(4): 597-606.
<https://doi.org/10.1111/sum.12074>
- Lal, R. (1990). Soil Erosion in the Tropics. Principles and Management. McGraw-Hill, New York. 580 pp.
<https://searchworks.stanford.edu/view/500524>
- Lin, C.Y. (1997). A study on the width and placement of vegetated buffer strips in a mudstone-distributed watershed.J.china. *Soil water conserve*.29 (3), 250-266(in Chinese with English abstract).
<http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/cylin/research/1672.pdf>
- Miguel, P.A., Samuel-Rosa, R., Simao, Dennis Dalmolin, F., Arajo Pedron, J., Moura Bueno, A. (2011). The USLE model for estimating soil erosion in complex topography areas. *Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing, (SBSR), Brasil*, 85: 9227-9230.
https://res.mdpi.com/d_attachment/sustainability/sustainability-12_08531/article_deploy/sustainability-12-08531-v2.pdf
- McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.R. (1987). Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Trans Am Soc Agric Eng* 30:1387–1396.
<https://elibrary.asabe.org/login.aspx>
- Miguel, P.A., Samuel-Rosa, R., Simao Dennis Dalmolin, F., Arajo Pedron, J., Moura Bueno, A. (2011). The USLE model for estimating soil erosion in complex topography areas. *Annals XV Brazilian Symposium on Remote Sensing, (SBSR), Brasil*, 85: 9227-9230.
https://jm.um.ac.ir/article_37021_fe128a88f8a05207ac4f5c0373846a3d.pdf
- Moore, I.D., Wilson, J.P. (1993). Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47:423–428.
<https://www.jswnonline.org/content/47/5/423>
- Morgan, R.P.C. (1995). Soil erosion and conservation. Longman, London, pp.23-37.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small atchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 527–544.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)
- Nouwakpo, S.K., Williams, C.J., Al-Hamdan, O.Z., Weltz, M.A., Pierson, F., Nearing, M. (2016). A review of concentrated flow erosion processes on rangelands: Fundamental understanding and knowledge gaps. *Int. Soil Water Conserv. Res.*4:75-86.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.003>
- Parysow, P., Wang, G.X., Gertner, G., Anderson, A.B. (2003). Spatial uncertainty analysis for mapping soil erodibility based on joint sequential simulation. *Catena* 53:65–78.
[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00198-4)
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*,43:64-84.
<https://doi.org/10.1002/esp.4250>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. (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.
https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah_703.pdf

- Renard, K.G., Freimund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. *J Hydrol* 157:287–306.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, J.P. (1991). RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46 (1), 30– 33.
<https://www.jswnonline.org/content/46/1/30>
- Sun, W., Minasny, B., McBratney, A. (2012). Analysis and prediction of soil properties using local regression-Kriging. *Geoderma*, 23: 172-171 23.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.010>
- USDA. (1975). Sediment Sources, Yields, and Delivery Ratios. National Engineering Handbook, Section 3 Sedimentation. http://irrigationtoolbox.com/NEH/Part632_SedimentationGeology/NEH3_06.PDF
- Vanoni, V.A. (1975). Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y.
<https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0024348>
- Vaezi, A.R., Bahrami, H.A., Sadeghi, S.H.R., Mahdian, M.H. (2010). Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, 241-252.
<https://jast.modares.ac.ir/article-23-10275-en.pdf>
- Wischmeier, W.H. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J Soil and Water Conserv* 26:189 193.
<https://trid.trb.org/view.aspx?id=125184>
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion. losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*, vol. 537. US Department of Agriculture, Washington,DC, 58 pp.
<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>
- Yu, B., Rosewell, C.J. (1996c). A robust estimator of the R factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans Am Soc Agric Eng* 39(2):559–561.
<https://elibrary.asabe.org/login.aspx>
- Yue-Qing, X., Shao, X-M., Kong, X-B. (2008). Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a Mountain Karst watershed, Guizhou Province, China, *Environ Monit Assess* 141: 275-286.
<https://doi.org/10.1007/s10661-007-9894-9>
- Zerihun, M., Mohammedyasin, M.S., Sewnet, D., Adem, A.A., Lakew, M. (2018). Assessment of soil erosion using RUSLE, GIS and remote sensing in NW Ethiopia. *Geoderma Reg.* 12, 83–90.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.002>
- Zhang, W., Zhou, J., Feng, G., Weindorf, D.C., Hu, G., Sheng J. (2015). Characteristics of water erosion and conservation practice in arid regions of Central Asia: Xinjiang Province, China as an example. *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 3(2), 97-111.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.06.002>