

Comparison of the soil erosion estimation models in the Kardeh Dam watershed

Mobina Abbaspour¹, Masoomeh Delbari², Peyman Afrasiab², Hadi Galavi^{3*}

¹MSc Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

²Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

³Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Corresponding Author's E-mail: hadigalavi@uoz.ac.ir

Received: 03 Mar. 2025 Accepted: 25 Apr. 2025
Revised: 17 Apr. 2025 Published: 29 May 2025



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Soil erosion is one of the most serious environmental issues worldwide. Therefore, applied research aimed at estimating soil erosion, sediment yield, and managing erosion-prone lands is essential - which in turn requires the collection of field data and observations. However, due to the lack or insufficiency of statistical data on soil erosion in many watersheds across the country, the use of appropriate empirical methods for estimating soil erosion becomes inevitable. The objective of this study is to evaluate the spatial distribution of soil erosion risk using the Universal Soil Loss Equation (USLE), its Modified version (MUSLE), and the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) models, in combination with Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) technologies, in the Kardeh Dam watershed. Based on the results, the maximum estimated soil erosion across the entire watershed using the USLE, RUSLE, and MUSLE models was 1.18, 2.95, and 5.19 tons per hectare per year, respectively, in which the USLE had the lowest error. The differences in the models result indicate that the LS factor (slope length and steepness) has a greater influence compared with other factors (rainfall erosivity, soil erodibility, vegetation cover management, and conservation practices) in the RUSLE and MUSLE models. Substituting the rainfall erosivity factor in the MUSLE with the peak runoff discharge and total runoff volume, a broader spatial distribution of soil erosion risk was observed using MUSLE compared with the other models.

Keywords: Rain Erosion Factor, Sediment Load Delivery, USLE, RUSLE, MUSLE, NDVI.

Introduction: Soil erosion is the separation, transport, and successive destruction of soil on the surface of the earth by an erosive agent such as water, wind, or glacier. Therefore, reducing soil erosion and managing it in watersheds to reduce its losses is a very important task in the field of watershed management. Accordingly, many models have been developed to simulate soil erosion. In the present study, the effectiveness of each of the USLE, RUSLE, and MUSLE models in preparing a soil erosion zoning map of the Kardeh Dam catchment area in Khorasan Razavi province and identifying high-risk erosion areas has been investigated.

Methodology: In the present study, the amount of soil erosion in the Kardeh dam catchment is calculated using the Universal Soil Erosion Equation (USLE) model and its modified (MUSLE) and revised (RUSLE) versions. In the USLE and RUSLE, the amount of soil erosion is the product of six factors, rain erosion (R), soil erodibility (K), slope length (L), slope degree (S), vegetation management (C) and the protective operation (P). However, in the MUSLE, the rain erosion factor is replaced by the momentary flood peak discharge (qp) and the total volume of flood discharge (Q) to estimate the erosion magnitude. The above models were developed in ArcGIS software under the SATEEC system, and the sediment load of the basin and additional assessments were made.

Results and Discussion: The erosion map derived from rainfall data collected at eight stations indicates that the R coefficient in the Kardeh Dam catchment area ranges from 2.8 to 3.8 (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹). Approximately 65% of the Kardeh basin area, including the northern region as well as parts of the eastern, western, and central areas, exhibits a high erosion coefficient ranging from 3.41 to 3.78. Based on the K factor map, the soil erodibility coefficient in the Kardeh Dam catchment area varied from 0.21 to 0.42 (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹) and about 40% of

the northern and southern parts of the basin have a high erodibility coefficient. The LS coefficient in the three models varies between 0.76-12.42, 0.00-9.50 and 0.07-21.90, respectively. The observed NDVI index and C factor values in the Kardeh Dam basin showed that about 92 percent of the basin area has a low NDVI coefficient and high C, only about one percent has a high NDVI and low C coefficient, and about 92.2 percent of the Kardeh Dam basin has no vegetation cover. Integrating the above factors in ArcGIS, the range of soil erosion changes for the three models was obtained as 0.14-1.18, 0.00-2.95, and 0.01-5.19, respectively. In the USLE model, 33 percent of the basin, in RUSLE about 15 percent, and in MUSLE 30 percent of the basin showed high and very high erosion. In addition, the R2 coefficient value between the RUSLE and MUSLE models was 0.87, which indicates the correlation of these two models in overestimating the soil erosion rate of the Kardeh Dam basin. Based on the observed relative error, the USLE model based on the Boyce method had a better estimate of the sediment load compared to other applied models.

Conclusion: Comparison of the three models studied in estimating erosion and sediment load showed that the USLE model with the lowest relative error, the best performance and the erosion rate estimated with this model was also accepted. Performance evaluation of the soil erosion models RUSLE and MUSLE showed a large difference between the results of both models compared to the USLE model. The research findings will be useful for regional authorities to better analyze the soil protection measures in the Kardeh Dam catchment area.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مقایسه عملکرد مدل‌های تخمین فرسایش خاک در حوضه سد کارده

مبینا عباسپور^۱، معصومه دلبری^۲، پیمان افراسیاب^۲، هادی گلوی^{۳*}

^۱دانش‌آموخته، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران

^۲دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۳استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: hadigalavi@uoz.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸

چکیده: فرسایش خاک یکی از مسائل زیست‌محیطی جدی در جهان است؛ بنابراین لازم است تحقیقات کاربردی برای برآورد فرسایش و بار رسوب و مدیریت اراضی مستعد فرسایش انجام شود که این خود نیازمند جمع‌آوری اطلاعات و مشاهدات زمینی است. از طرفی عدم وجود و یا کمبود آمار و اطلاعات در زمینه فرسایش خاک در بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور، استفاده از روش‌های تجربی مناسب برای برآورد فرسایش خاک را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی توزیع مکانی خطر فرسایش خاک با استفاده از مدل‌های معادله جهانی هدررفت خاک (USLE)، نسخه اصلاح‌شده (MUSLE) و نسخه تجدیدنظر شده (RUSLE) آن با بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش‌ازدور (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در حوضه آبریز سد کارده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، حداکثر میزان فرسایش در کل سطح حوضه آبریز سد کارده توسط مدل‌های USLE، RUSLE و MUSLE به ترتیب برابر با ۱/۱۸، ۲/۹۵ و ۵/۱۹ (تن در هکتار در سال) برآورد شد که مدل USLE کمترین میزان خطا را نشان داد. تفاوت در نتایج مدل‌های فرسایش خاک میزان تاثیر بیشتر فاکتور LS به نسبت سایر فاکتورها (فاکتور فرساینده گیاهی باران، فرسایش‌پذیری خاک، مدیریت پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی) نشان می‌دهد. به علت جایگزینی فاکتور فرساینده گیاهی باران در مدل‌های USLE و RUSLE با دبی پیک لحظه‌ای سیلاب و حجم کل سیلاب در مدل MUSLE، پراکنده‌تری مکانی گسترده‌تری از خطر فرسایش خاک توسط مدل MUSLE در مقایسه با سایر مدل‌ها به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: عامل فرسایش باران، تحویل بار رسوب، USLE، RUSLE، MUSLE، NDVI

۱- مقدمه

داده‌های مکانی را فراهم می‌آورد، پرداخته‌اند (Shi et al., 2004; Dabral et al., 2008; Vemu and Pinnamaneni, 2011; Ganasri and Ramesh, 2016; Mohammadi et al., 2018).

همچنین تلفیق تکنیک‌های RS و GIS با مدل‌های USLE و RUSLE امکان برآورد پتانسیل فرسایش خاک به صورت شبکه‌ای (سلولی) را فراهم می‌کند (Abdelsamie et al., 2022; Li et al., 2023). بنابراین مدل‌های فوق؛ در قالب یک سیستم یکپارچه در GIS تحت عنوان سیستم⁸ SATEEC قابل مطالعه و استفاده برای محاسبه و بررسی ضریب نسبت تحویل رسوب بر اساس مساحت و میزان بار رسوب تولیدی حوضه می‌باشند (Rokhbin et al., 2014). در مطالعه‌ای به ارزیابی وضعیت فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در تلفیق با سامانه اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های نوین سنجش‌ازدور پرداختند و نتایج تحقیق را در مقیاس مطالعات موردی و ملی خوب ارزیابی کردند (Mohammadi et al., 2018). مطالعه‌ای نیز با هدف برآورد مکانی و زمانی فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در سال‌های ۱۹۹۴، ۱۹۹۹، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ در زیرحوضه مندرجان استان اصفهان با استفاده از تکنیک‌های RS و GIS صورت گرفت که در آن، اثرگذاری تکنیک‌های RS و GIS در شبیه‌سازی‌های زمانی برای تخمین دقیق‌تر، کمی و نقطه‌به‌نقطه میزان فرسایش خاک در کل منطقه تایید شد (Mohammadi et al., 2018). نتایج مشابه در سایر تحقیقات که از تصاویر پوشش زمین ماهواره لندست در کشور نیجریه استفاده شده بود نیز به دست آمده است (Nwaogu et al., 2017). ادغام مدل RUSLE با تکنیک‌های GIS و RS برای برآورد میانگین تلفات سالانه خاک و ارزیابی شدت فرسایش خاک می‌تواند به ارائه برنامه‌های حفاظتی بهتری برای کنترل فرسایش خاک در شرایط مختلف کاربری اراضی کمک کند و از این رو این روش تحقیق به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Zerihun et al.,

فرسایش خاک به جدا شدن، انتقال و از بین رفتن پی‌درپی خاک سطح زمین به وسیله یک عامل فرساینده مانند آب، باد یا یخچال می‌گویند (Olumuyiwa, 2019). این فرآیند باعث از بین رفتن خاک حاصلخیز، افزایش رواناب، کاهش نفوذپذیری خاک، کمبود آب در دسترس گیاهان، آلوده شدن منابع آب و وقوع سیلاب‌های مخرب می‌شود (Kuncheva and Dimitrov, 2020). سیلاب‌ها سبب ایجاد فرسایش و همچنین باعث از بین رفتن حجم بسیار زیادی از خاک مفید و مرغوب در بازه زمانی کوتاهی می‌شود. درحالی‌که برای تولید خاک به زمان بسیار طولانی حدود چند صدسال نیاز است. بنابراین، مدیریت فرسایش خاک در حوضه‌های آبریز به منظور کاهش خسارات ناشی از آن از اهمیت بالایی برخوردار است (Azizian and Kohi, 2019).

فرسایش خاک و تولید بار رسوب علاوه بر کاهش حاصلخیزی خاک و تخریب اراضی باعث انسداد آبراهه‌ها، تغییر در مورفولوژی رودخانه و مسیر حرکت آن، پر شدن مخازن ذخیره‌ای و کاهش کیفیت آب نیز می‌شود. به منظور کاهش این خسارات، مدیریت خاک و بار رسوب تولیدی ضروری است. باید در نظر داشت که پیش‌بینی میزان فرسایش خاک، یکی از متداول‌ترین روش‌ها در مدیریت منابع طبیعی برای کنترل بهره‌وری خاک در داخل حوضه و تخمین میزان رسوب و کیفیت آب در خارج از حوضه است (Ghosh et al., 2022; Malik, 2024) که مهم‌ترین آن‌ها شامل مدل معادله جهانی فرسایش خاک¹ USLE (Wischmeier and Smith, 1978)، مدل پیش‌بینی فرسایش آبی WEPP² (Flanagan and Nearing, 1995)، ابزار ارزیابی خاک و آب SWAT³ (Arnold et al., 1998)، و مدل اروپایی فرسایش خاک EUROSEM⁴ (Morgan et al., 1998) ارائه شده است. بر همین اساس محققان زیادی در سراسر جهان به برآورد فرسایش خاک حوضه از تلفیق مدل‌های USLE و RUSLE⁵ با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS⁶) و سنجش‌ازدور (RS⁷) که امکان تجزیه و تحلیل

⁵ Revised Universal Soil Loss Equation

⁶ Geographical Information System

⁷ Remote Sensing

⁸ Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control

¹ Universal Soil Loss Equation

² Water Erosion Prediction Project

³ The Soil and Water Assessment Tool

⁴ European Soil Erosion Model

نرم‌افزار ArcGIS تحت سیستم SATEEC توسعه یافت و میزان بار رسوبی حوضه و ارزیابی‌های تکمیلی صورت پذیرفت.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد کارده واقع در استان خراسان رضوی با مساحتی حدود ۴۴۷/۹۱ کیلومتر مربع است (شکل ۱). این حوضه جزء نواحی کوهستانی با شیب به‌نوبت تند و مرتفع در ۴۷ کیلومتری شمال شهرستان مشهد واقع شده و بیشتر سطح آن پوشیده از مراتع متوسط تا ضعیف است. مراتع با شرایط خوب فقط در ارتفاعات و در شرق منطقه هزار مسجد-کپه داغ واقع شده و در بین عرض‌های جغرافیایی "۳۶°۴۰'۱۰" تا "۳۶°۵۶'۰۵" شمالی و طول‌های جغرافیایی "۵۹°۲۸'۴۸" تا "۵۹°۴۴'۴۰" شرقی قرار دارد (شکل ۲). حدود ۲۶۱/۶۶ کیلومتر مربع از کل حوضه ارتفاعی بیشتر از ۲۰۰۰ متر را دارا است. کمترین نقطه ارتفاعی حوضه آبریز در پایین‌دست آبادی کارده و در قسمت خروجی آن با ارتفاع ۱۲۰۰ متر و بیشترین نقطه ارتفاعی در شمال غربی حوضه با ارتفاع ۲۹۳۷ متر از سطح دریا است. اقلیم این حوضه بر پایه روش طبقه‌بندی اقلیم آمبروژ از نوع نیمه‌خشک سرد است. سد کارده در سال ۱۳۶۱ بر روی رودخانه کارده با حجم آورد سالیانه ۲۱/۲۳ میلیون مترمکعب، به‌منظور استفاده از آب رودخانه برای مصارف شرب و کشاورزی احداث شد و در همان سال به بهره‌برداری رسید (Salimirad et al., 2020).

۲-۲- معرفی مدل‌های USLE و RUSLE

مدل USLE، دارای فرمول تجربی (Wischmeier and Smith, 1978) که برای تخمین میزان فرسایش خاک ورقه‌ای، شیاری و بین شیاری است و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. USLE اغلب با تکنیک‌های GIS ترکیب شده و به‌طور گسترده در سراسر جهان برای تعیین کمیت فرسایش خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد و بر اساس الگوی بارندگی،

به‌منظور (Mihi et al., 2020; 2018) به‌عنوان مثال، به‌منظور شبیه‌سازی اثر عملیات اصلاح و احیای مراتع بر هدررفت خاک با استفاده از مدل RUSLE در منطقه لار استان مازندران پژوهشی انجام شد که نشان داد متوسط فرسایش خاک بعد از انجام عملیات حفاظت خاک ۳۴٪ کاهش یافت (Jafarian et al., 2017).

در مطالعه‌ای به مقایسه نتایج میزان فرسایش آبی حاصل از سه مدل USLE، RUSLE و MUSLE^۱ پرداخته و در گزارش خود به عملکرد نسبتاً مشابه هر سه روش اشاره کردند. در این تحقیق مدل MUSLE به دلیل بهره‌وری بهتر از عامل باران تخمین بهتری از توزیع مکانی ریسک فرسایش در حوضه نشان داده است (Djoukbalala et al., 2019). در تحقیق دیگری نیز کارایی مدل MUSLE در برآورد رسوب در مقیاس رگبار در حوضه آبریز رودخانه دوبرج استان ایلام مورد ارزیابی قرار گرفت و عملکرد آن خوب گزارش شد (Karimi et al., 2013).

تهیه نقشه آسیب‌پذیری خاک در برابر فرسایش و تقسیم‌بندی مناطق بر اساس شدت فرسایش و میزان بار رسوب تولیدی گامی موثر در راستای برنامه‌ریزی‌های مهندسی رودخانه از جمله بررسی عملکرد و طراحی سازه‌های آبی و اقدامات حفاظتی از خاک و حریم رودخانه‌ها است. در ایران به علت وسعت زیاد اکثر حوضه‌های آبریز، امکان اجرایی شدن طرح‌های حفاظتی در کل حوضه وجود ندارد و بنابراین برای بهبود عملکرد طرح‌های حفاظتی حوضه، در ابتدا باید مناطق بحرانی و مستعد فرسایش و رسوب، شناسایی و تقسیم‌بندی شده و سپس با اعمال برنامه‌های صحیح مدیریتی به ترتیب اولویت، کاهش یا مهار فرسایش خاک منطقه انجام شود (Sadouq et al., 2015; Mohammadi et al., 2018).

بر اساس مقدمه فوق، در تحقیق حاضر به بررسی کارایی هر یک از مدل‌های USLE، RUSLE و MUSLE در تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش خاک در حوضه آبریز سد کارده در استان خراسان رضوی و شناسایی مناطق در معرض خطر فرسایش پرداخته شده است. بدین منظور مدل‌های فوق در

^۱ Modified Universal Soil Loss Equation

مدل RUSLE، نسخه تجدیدنظر شده معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) است که توسط (Renard, 1997) برای تخمین تلفات سالانه خاک برای شرایط پیچیده‌تر از فرسایش شیاری و بین شیاری در برنامه‌های حفاظت و کاربری اراضی ارائه شد یا به عبارتی RUSLE مشابه USLE است.

۲-۳- معرفی مدل MUSLE

این مدل نیز نسخه اصلاح‌شده مدل USLE که توسط (Williams, 1975) ارائه شده است. MUSLE فاکتور فرسایش شیاری و رواناب کل برای یک رگبار یا سیلاب جایگزین کرده و میزان رسوب تولیدی را محاسبه می‌کند. همچنین میانگین فرسایش خاک برای یک سیلاب (برحسب تن) را از رابطه (۲) محاسبه می‌کند.

$$A_{MUSLE} = 11.8(Q \times q_p)^{0.56} \times K \times LS \times \frac{R}{C \times P} \quad (2)$$

که Q حجم سیلاب، q_p دبی پیک سیلاب و K، LS، C و P فاکتورهای مدل است.

۲-۴- معرفی فاکتورهای مدل

عامل فرسایش شیاری باران (R)

این فاکتور در مدل USLE و RUSLE به‌عنوان شاخصی از فرسایش شیاری باران معرفی شده است که میزان پتانسیل و قدرت تراکمی باران را برای ایجاد فرسایش به‌صورت کمی گزارش می‌دهد (Renard, 1997). محاسبات فاکتور R برای بازه‌های زمانی مختلف از طریق حاصل ضرب انرژی جنبشی بارش (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I30) انجام می‌شود (Arekhi and Niazi, 2010). (Hui et al., 2010). اظهار داشتند در مناطقی که جزئیاتی از اطلاعات آب و هوایی در دسترس نیست، می‌توان شاخص F) Fournier را برای به دست آوردن فاکتور R مورد استفاده قرار داد.

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



Fig. 1 Location of the kardeh dam
شکل ۱ موقعیت کلی سد کارده

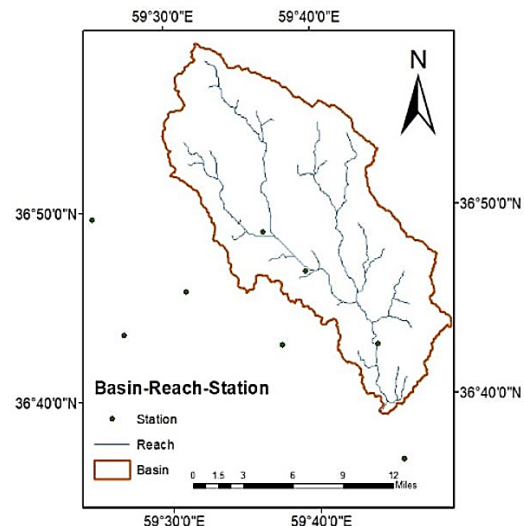


Fig. 2 Kardeh dam basin
شکل ۲ حوضه سد کارده

کاربری اراضی، توپوگرافی، فرسایش‌پذیری خاک و شیوه‌های مدیریتی فرسایش نوشته شده است (Djoukbal et al., 2019).

$$A_{USLE/RUSLE} = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

که در آن A_{USLE} مقدار فرسایش سالانه خاک، R فاکتور فرسایش شیاری باران، K فاکتور فرسایش‌پذیری خاک، LS فاکتور توپوگرافی، C فاکتور مدیریت پوشش گیاهی و P فاکتور عملیات حفاظتی می‌باشد.

جبری زیر محاسبه می‌شود.

$$K = 2.8 \times M^{1.14} \times 10^{-7}(12 - \%OM) + 4.3 \times 10^{-3}(S - 2) + 3.3 \times 10^{-3}(P - 3) \quad (5)$$

که در آن M (درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز) $\times (100 -$ درصد رس)، OM درصد ماده آلی، S کد ساختمان خاک و P کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک می‌باشند (Vaezi et al., 2010).

در شکل ۲ ساختمان خاک با اعداد ۱ تا ۴ نشان داده شده است که نشان‌دهنده خاکدانه‌های ریز تا ساختمان متراکم است. کد ساختمان خاک به صورت زیر است (Wischmeier et al., 1971):

الف) ساختمان خاک دانه‌ای و اسفنجی خیلی ریز (۱) < میلی‌متر)

ب) ساختمان خاک دانه‌ای و اسفنجی ریز (۲-۱ میلی‌متر)

ج) ساختمان خاک دانه‌ای و اسفنجی (۵-۲ میلی‌متر) و دانه‌ای درشت (۱۰-۵ میلی‌متر)

د) ساختمان متراکم (منشوری، ستونی و بلوکی)

در این نمودار نفوذپذیری با اعداد ۱ تا ۶ نشان داده شده است که کد نفوذپذیری به صورت زیر است:

♦ زیاد تا خیلی زیاد (بیشتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر در ساعت)

♦ متوسط تا زیاد (۶/۲۵ تا ۱۲/۵ سانتی‌متر در ساعت)

♦ متوسط (۲ تا ۶/۲۵ سانتی‌متر در ساعت)

♦ کم تا متوسط (۰/۵ تا ۲ سانتی‌متر در ساعت)

♦ کم (۰/۱۲۵ تا ۰/۵ سانتی‌متر در ساعت)

♦ خیلی کم (کمتر از ۰/۱۲۵ سانتی‌متر در ساعت)

در این تحقیق، مقدار فاکتور K بر اساس نقشه خاک حوضه برای لایه اول خاک‌های مختلف حوضه کارده از طریق نمودار ویشمایر به دست آمد (Salimirad et al., 2020). پس پهنه‌بندی آن بر اساس روش کریجینگ معمولی انجام شد.

که در آن P_i متوسط بارندگی ماهانه در ماه نام در کل دوره و P متوسط بارندگی سالانه در کل دوره است. سپس با استفاده از رابطه (۴) که توسط (Renard and Freimund, 1994) پیشنهاد شده است، مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌های مورد نظر برآورد می‌شود:

$$R \text{ Factor} = \begin{cases} 0.07397 \times F^{1.847}, & F < 55MM \\ 95.77 - \\ 6.081 \times F + 0.4770 \times F^2, & F \geq 55MM \end{cases} \quad (4)$$

در این مطالعه، فاکتور R برای ۸ ایستگاه بارندگی واقع در داخل و اطراف حوضه آبریز سد کارده در دوره زمانی مشاهداتی بر اساس داده‌های در دسترس ۲۰۰۰-۲۰۱۵ محاسبه و سپس با استفاده از روش میان‌یابی کریجینگ معمولی به کل حوضه مطالعاتی تعمیم داده شد.

علاوه بر این، فاکتور R در مدل MUSLE، عامل فرسایندهگی باران که توسط (Williams, 1975) ایجاد شده است که به حجم رواناب و دبی پیک لحظه‌ای تخمین زده می‌شود. دبی پیک لحظه‌ای با استفاده از یک معادله منطقی محاسبه می‌شود که فرض می‌کند؛ بارش، شدت یکنواختی در کل حوضه آبریز دارد. در مطالعه حاضر، از حجم رواناب (Q) و دبی پیک لحظه‌ای اندازه‌گیری شده (q_p) در ایستگاه کارده بالادست واقع در خروجی حوضه آبریز سد کارده طی بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۵ استفاده شده است.

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

فاکتور K معرف میزان حساسیت ذاتی خاک منطقه به عوامل فرساینده است و سهولت جدا شدن ذرات خاک به وسیله انرژی جنبشی قطرات باران و جابه‌جایی آن‌ها بر اثر نیروی رواناب سطحی را گزارش می‌کند (Mahdavi, 2002; Teng et al., 2016).

مقدار این فاکتور به وسیله تعیین خصوصیات فیزیکی خاک منطقه از پلات‌های فرسایشی در آزمایشگاه به دست می‌آید و سپس فاکتور فرسایش‌پذیری خاک به صورت غیرمستقیم از طریق نمودار (Wischmeier et al., 1971) که در شکل ۲ نشان داده شده و یا به صورت مستقیم از طریق رابطه

برای محاسبه فاکتور LS در مدل USLE از روابط (۶)، (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) استفاده می‌شود.

$$LS_{USLE} = (L/22.13)^m \times (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad (6)$$

$$L = \frac{D_i}{\cos \theta} \quad (7)$$

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

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

$$\sin \theta = \frac{s}{\sqrt{100^2 + s^2}} \quad (10)$$

از رابطه (۱۱) برای به دست آوردن مقدار فاکتور LS در مدل RUSLE استفاده می‌شود.

$$LS_{RUSLE} = \left(\frac{L}{22.13}\right)^m \times \begin{cases} (10.8 \sin \theta + 0.03), & L \geq 4.5 \text{ m}, s < 9\% \\ (16.8 \sin \theta - 0.5), & L \geq 4.5 \text{ m}, s \geq 9\% \\ (3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56), & L < 4.5 \text{ m} \end{cases} \quad (11)$$

همچنین مقدار فاکتور LS در مدل MUSLE از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$LS_{MUSLE} = (L/22.13)^m \times (0.065 + 0.045 \times S + 0.0065 \times S^2) \quad (12)$$

مقدار پارامتر m در رابطه‌های بالا بر اساس جدول ۱ به دست می‌آید.

بیشتر سطح حوضه آبریز کارده دارای شیب بیش از ۱۵٪ است.

عامل پوشش گیاهی (C)

فاکتور C بیانگر اثرگذاری و بازتاب روش‌های کشت و پوشش گیاهی و شیوه‌های مدیریتی بر رواناب و میزان فرسایش خاک است (Wischmeier and Smith, 1978; Alkharabsheh et al., 2013). میزان پوشش تاج گیاه، انواع

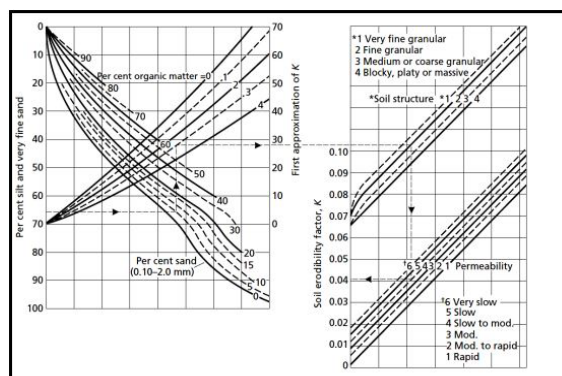


Fig. 3 The chart of Wischmeier
شکل ۳ نمودار ویشمایر

عامل توپوگرافی (LS)

فاکتور طول شیب (L) عبارت است از نسبت فرسایش در طول شیب به فرسایش در همان زمین و همان شیب ولی با طول ۷۲/۶ فوت یا ۲۲/۱۳ متر و فاکتور شیب (S) نیز نسبت میزان فرسایش شیب زمین به مقدار فرسایش در همان زمین و همان طول ولی با شیب ۹٪ است. فاکتور LS حاصل ضرب فاکتور طول شیب (L) در فاکتور درجه شیب (S) است که به‌عنوان فاکتور توپوگرافی معرفی شده و مهم‌ترین عامل برای تعیین کمی فرآیند هدررفت خاک است (Hui et al., 2010; Chen et al., 2011; Prasannakumar et al., 2011). به‌بیان دیگر، میزان فرسایش خاک به دلیل تجمع تدریجی رواناب در جهت پیمایشی با افزایش فاکتورهای L و S افزایش می‌یابد (Prasannakumar et al., 2011).

در مطالعه حاضر، از سه فرمول متفاوت برای هرکدام از مدل‌ها استفاده شد. به این صورت که مقدار این فاکتور با استفاده از DEM ۳۰ متری حوضه آبریز سد کارده و فرمول‌های مربوطه در محیط ArcGIS و با کمک ابزار Raster Calculator محاسبه و پهنه‌بندی شد. علاوه بر این برای پیش‌بینی فرسایش خاک در حوضه آبریز با استفاده از معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) یا نسخه تجدیدنظر شده آن (RUSLE) از فاکتور LS (توپوگرافی) به‌عنوان مهم‌ترین عامل در کنترل پتانسیل فرسایش خاک که توسط محققان بسیاری معرفی شده بود؛ استفاده گردید (Truman et al., 2001; Prasannakumar et al., 2011; Mohammadi et al., 2018).

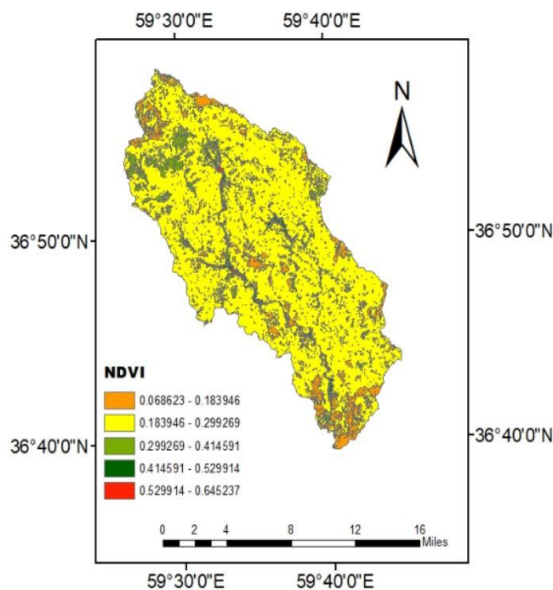


Fig. 4 Spatial distribution of NDVI index
شکل ۴ پهنه‌بندی شاخص NDVI

جدول ۲ کلاس‌بندی شاخص NDVI

Table 2 Distribution of NDVI index

Classes NDVI index	Area (km^2)	Area (%)
0.07-0.18	37.96	8.47
0.18-0.30	375.04	83.73
0.30-0.41	29.20	6.52
0.41-0.53	4.72	1.05
0.53-0.65	0.99	0.22
Total	447.91	100

عامل عملیات حفاظتی (P)

به نسبت میزان خاک فرسایش یافته در شرایط انجام عملیات حفاظتی به میزان فرسایش ایجاد شده در شرایط استاندارد یعنی شخم در جهت شیب، فاکتور P گفته می‌شود (Renard, 1997). عملیات حفاظتی شامل سیستم ترانس‌بندی، کشت روی خطوط تراز، آبراهه‌های پوشش‌دار و موارد مشابه است (Wischmeier and Smith, 1978). به‌طور کلی این عملیات به‌واسطه تغییر در شیب یا جهت رواناب سطحی، تغییر در الگوی جریان و کاهش مقدار و شدت رواناب سبب کاهش و کنترل میزان فرسایش خاک منطقه می‌شود. مقدار فاکتور P بین صفر تا یک متفاوت است که در صورت اجرا نشدن عملیات حفاظتی مقدار آن، یک در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به مقادیر پیشنهاد شده توسط Rao (۱۹۸۱) مقدار فاکتور P برای

جدول ۱ ارزش M نسبت به هر کلاس از درصد شیب (Wischmeier and Smith., 1978)

Table 1 Value of M relative to each class of slope (Wischmeier and Smith., 1978)

Slope (%)	m
>5	0.5
3-5	0.4
1-3	0.3
<1	0.2

مختلف گیاه و تعداد بوته در واحد سطح بر مقدار این فاکتور تاثیرگذار است. به‌طور کلی فاکتور C به مدیریت پوشش گیاهی اجرا شده در منطقه مورد مطالعه مربوط است. برای برآورد فاکتور C به دلیل تنوع پوشش گیاهی از لحاظ زمانی و مکانی، از تصاویر ماهواره‌ای سنجنش‌ازدور به‌طور گسترده استفاده می‌شود (Karydas et al., 2009). برای این کار از شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) که پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی است استفاده می‌شود. NDVI برای تصویر لندست از رابطه (۱۳) با استفاده از فن سنجنش‌ازدور به دست می‌آید.

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad (13)$$

در واقع شاخص NDVI انواع شرایط پوشش گیاهی را به‌وسیله انعکاس انرژی خورشید از سطح زمین نشان می‌دهد و مقدار آن بین ۱- (نشان‌دهنده پوشش گیاهی صفر درصد) و ۱+ (نشان‌دهنده پوشش گیاهی ۱۰۰ درصد) متغیر است.

با توجه به موارد اشاره شده؛ رابطه (۱۴) بهترین برآورد را از فاکتور C در مناطق خشک و نیمه‌خشک انجام می‌دهد (Durigon et al., 2014).

$$C = \frac{(-NDVI+1)}{2} \quad (14)$$

در این پژوهش، پهنه‌بندی NDVI بر اساس تصویر ماهواره‌ای Landsat8 در نرم‌افزار ENVI طی بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۰ به دست آمد (شکل ۴) و سپس پهنه‌بندی فاکتور C با استفاده از شاخص NDVI در سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید (جدول ۲).

رابطه (۱۸) به دست آمد.

$$SDR = SY/Er \quad (18)$$

که در آن، SY میزان رسوب تولیدی حوضه و Er میزان فرسایش به دست آمده از مدل‌های USLE و RUSLE است.

به طور کل در این تحقیق، نسبت تحویل رسوب برای دو مدل USLE و RUSLE با استفاده از سه روش بویس، USDA و وانونی محاسبه شد و سپس بر اساس میزان فرسایش به دست آمده توسط دو مدل و نسبت‌های تحویل رسوب در آن‌ها، مقدار بار رسوب حوضه محاسبه شده و بار رسوب مشاهداتی حوضه مقایسه گردید. در این راستا، مدل‌های فوق در محیط نرم‌افزار ArcGIS تحت سیستم SATEEC پیاده‌سازی شدند و به صورت هم‌زمان، برآورد بار رسوب حوضه و سایر تحلیل‌های تکمیلی انجام شد.

۳- نتایج و بحث

با توجه به **شکل ۵** و **جدول ۳** که میزان فرسایش حاصل از داده‌های بارندگی ۸ ایستگاه استفاده شده را نشان می‌دهد؛ مقدار فاکتور R در حوضه آبریز سد کارده از ۲/۸ تا ۳/۸ (مگاژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال) متغیر است. حدود ۶۵٪ یعنی ۲۹۰/۴۰۵ از سطح حوضه کارده که شامل قسمت شمالی و بخش‌هایی از شرق، غرب و مرکز حوضه است، دارای فاکتور فرسایشی زیاد از ۳/۴۱ تا ۳/۷۸ است. کمترین میزان این فاکتور در قسمت جنوبی حوضه است که ۱۴٪ یعنی ۶۲/۲۳ کیلومتر مربع از حوضه را تشکیل داده است.

بر اساس **شکل ۶** و **جدول ۴** ضریب فرسایش‌پذیری خاک در حوضه آبریز سد کارده از ۰/۲۱ تا ۰/۴۲ (تن ساعت در مگاژول در میلی‌متر) متغیر است. علاوه بر این، حدود ۵۸٪ یعنی ۲۶۱/۱۷ کیلومتر مربع از مساحت حوضه کارده شامل قسمت شرقی آن به طور کامل و بخش‌های پراکنده‌ای از شمال و غرب حوضه، دارای فاکتور فرسایش‌پذیری کم و ۴۰٪ یعنی ۱۷۹/۹۱ کیلومتر مربع از شمال و جنوب حوضه

مناطق تحت کشت شالی‌کاری ۰/۲۸ و برای مناطق دیگر مقدار یک در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق، به دلیل عدم وجود هیچ عملیات ضد فرسایشی قابل توجه در منطقه مورد مطالعه، مقدار یک برای فاکتور P در نظر گرفته شد.

۲-۵- برآورد بار رسوب در USLE و RUSLE

بر اساس نتایج مطالعات برخی از محققان میزان فرسایش خاک در یک منطقه با میزان بار رسوب در آن برابر نیست. به منظور تشریح میزان امکان رسوب، خاک فرسایش یافته در خروجی حوضه، نسبت تحویل رسوب (SDR^1) در سیستم SATEEC برآورد می‌شود. معادلات در مدل‌های USLE و RUSLE نسبت تحویل رسوب را برای برآورد میزان رسوب در خروجی حوضه محاسبه نکرده‌اند. بنابراین ابزار ارزیابی رسوب برای کنترل موثر فرسایش خاک (SATEEC) که تلفیقی از مدل‌های USLE و RUSLE با GIS است؛ جهت تعیین نسبت تحویل رسوب و میزان بار رسوب خروجی حوضه توسعه پیدا کرده‌اند

در این تحقیق، از سه روش محاسبه SDR که بر اساس مساحت حوضه (کیلومترمربع) هستند؛ به منظور محاسبه نسبت تحویل رسوب و سپس میزان رسوب تولیدی مورداستفاده قرار گرفتند (Lim et al., 2005). معادله‌های مربوط به این سه روش به شرح زیر است:

۱. روش وانونی (۱۹۷۵)

$$SDR = 0/4724A^{-0/125} \quad (15)$$

۲. روش ارائه شده توسط USDA (۱۹۷۵)

$$SDR = 0/4724A^{-0/11} \quad (16)$$

۳. روش بویس (۱۹۷۵)

$$SDR = 0/4724A^{-0/2382} \quad (17)$$

پس از محاسبه SDR، میزان رسوب تولیدی حوضه بر اساس

¹ Sediment Delivery Ratio

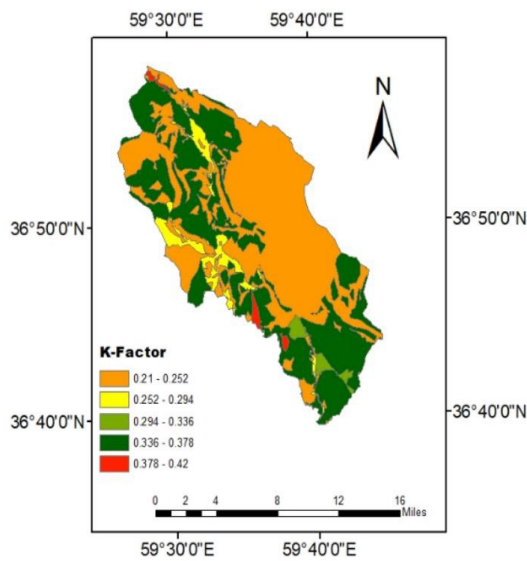


Fig. 6 Spatial distribution of the soil erodibility factor (k)
شکل ۶ پهنه‌بندی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K)

جدول ۴ کلاس‌بندی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک

Table 4 Distribution of the soil erodibility factor

Classes K factor	Area (km ²)	Area (%)
0.21-0.25	239.07	53.37
0.25-0.29	22.16	4.95
0.29-0.34	6.62	1.48
0.34-0.38	176.16	39.33
0.38-0.42	3.90	0.87
Total	447.91	100

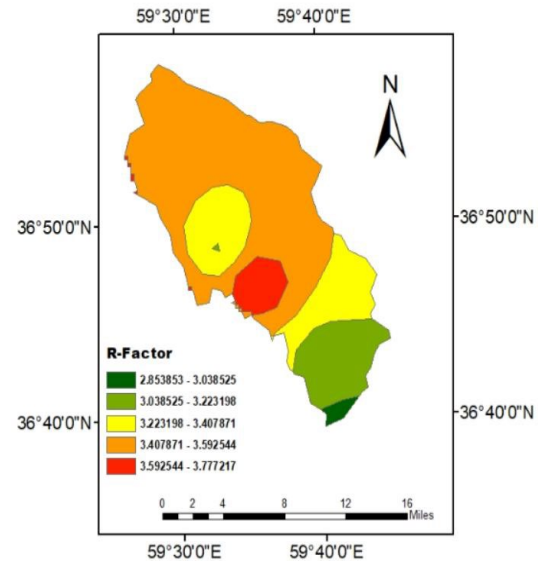


Fig. 5 Spatial distribution of the rainfall erosivity factor (R)
شکل ۵ پهنه‌بندی فاکتور فرسایش‌پذیری باران (R)

جدول ۳ کلاس‌بندی فاکتور فرسایش‌پذیری باران

Table 3 Distribution of the rainfall erosivity factor

Classes R factor	Area (km ²)	Area (%)
2.85-3.04	5.04	1.13
3.04-3.22	57.18	12.77
3.22-3.41	95.24	21.26
3.41-3.59	266.54	59.51
3.59-3.78	23.91	5.34
Total	447.91	100

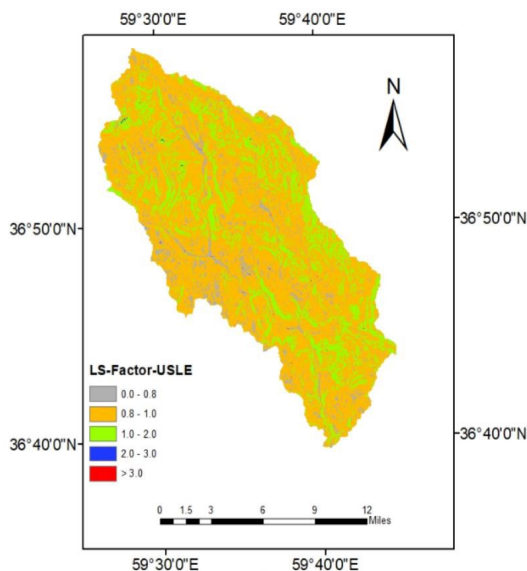


Fig. 7 Spatial distribution of the topographic factor (LS) in USLE model

شکل ۷ پهنه‌بندی فاکتور توپوگرافی (LS) مدل USLE

به‌صورت پراکنده دارای فاکتور فرسایش‌پذیری زیاد هستند.

طبق مقادیر جدول‌های ۵، ۶ و ۷ میزان فاکتور LS در سه مدل USLE، RUSLE و MUSLE در پنج کلاس بین صفر تا مقادیر بیش از ۳/۰ طبقه‌بندی شده است. در مدل MUSLE، ۶/۹۹٪ از مساحت حوضه دارای فاکتور LS بیش از ۳/۰ بود، درحالی‌که درصد مساحت متناظر در مدل‌های RUSLE و USLE تنها ۰/۱۸ و ۰/۰۲ بدست آمد که نمایانگر حساسیت بالای مدل MUSLE به شرایط توپوگرافی حوضه است.

همچنین شکل ۷ نشان داد که در مدل USLE کاملاً مشهود است حدود ۸۰٪ یعنی ۳۵۹/۲۳ کیلومترمربع و ۱۹/۶۲٪ یعنی ۸۷/۸۶ کیلومترمربع از مساحت حوضه به ترتیب دارای فاکتور توپوگرافی کم و متوسط می‌باشند و تنها حدود ۰/۰۴٪ یعنی ۰/۱۷ کیلومترمربع از مساحت حوضه دارای

جدول ۶ کلاس‌بندی فاکتور توپوگرافی برای RUSLE

Table 6 Distribution of the topographic factor for RUSLE model

Classes LS factor	Area (km ²)	Area (%)
0.0-0.8	325.00	72.56
0.8-1.0	50.02	11.17
1.0-2.0	68.50	15.29
2.0-3.0	3.59	0.80
> 3.0	0.80	0.18
Total	447.91	100

C مشاهده شده در حوضه سد کارده حدود ۹۲٪ یعنی ۴۱۲/۱۰ کیلومترمربع از مساحت حوضه دارای NDVI کم و فاکتور C زیاد و تنها حدود یک درصد یعنی ۵/۷۲ کیلومترمربع دارای NDVI زیاد و فاکتور C کم است. بنابراین مشهود است که میزان فاکتور C و شاخص NDVI کاملاً برعکس همدیگر هستند و حداکثر مساحت حوضه

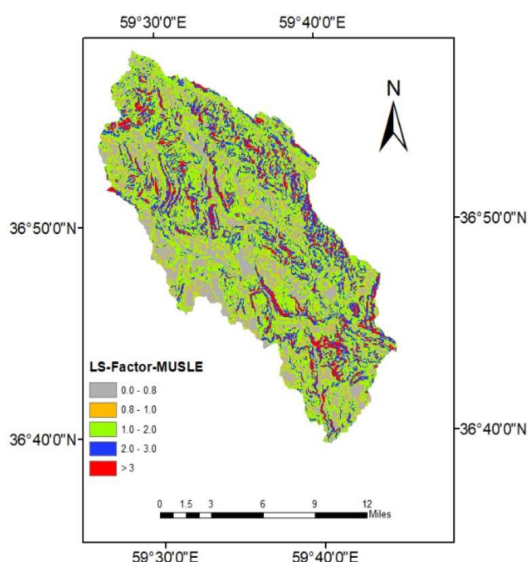


Fig. 9 Spatial distribution of the topographic factor (LS) in MUSLE model

شکل ۹ پهنه‌بندی فاکتور توپوگرافی (LS) مدل MUSLE

جدول ۷ کلاس‌بندی فاکتور توپوگرافی برای MUSLE

Table 7 Distribution of the topographic factor for MUSLE model

Classes LS factor	Area (km ²)	Area (%)
0.0-0.8	105.35	23.52
0.8-1.0	43.42	9.69
1.0-2.0	188.14	42.00
2.0-3.0	79.68	17.79
> 3.0	31.32	6.99
Total	447.91	100

جدول ۵ کلاس‌بندی فاکتور توپوگرافی برای USLE

Table 5 Distribution of the topographic factor for USLE model

Classes LS factor	Area (km ²)	Area (%)
0.0-0.8	29.16	6.51
0.8-1.0	330.72	73.84
1.0-2.0	87.86	19.61
2.0-3.0	0.10	0.02
> 3.0	0.08	0.02
Total	447.91	100

فاکتور توپوگرافی زیاد می‌باشد.

شکل ۸ پهنه‌بندی فاکتور توپوگرافی (LS) برای مدل RUSLE را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ حدود ۸۴٪ یعنی ۳۷۵/۰۲ از مساحت حوضه دارای فاکتور توپوگرافی کم و تنها یک درصد از مساحت حوضه یعنی ۴/۳۹ کیلومترمربع دارای فاکتور توپوگرافی زیاد است. همچنین بر اساس شکل ۹ که پهنه‌بندی فاکتور توپوگرافی (LS) در مدل MUSLE نشان می‌دهد؛ مشخص گردید که حدود ۴۲/۰۰٪ از مساحت حوضه دارای فاکتور توپوگرافی متوسط و ۳۳٪ دارای فاکتور LS کم و باقی مساحت حوضه، حدود ۲۵٪ دارای فاکتور LS زیاد است.

در ادامه، توزیع مکانی فاکتور مدیریت پوشش گیاهی C در حوضه سد کارده از نقشه NDVI و تحت نرم‌افزار ArcGIS تولید شد. بر اساس شکل ۹ مقدار شاخص NDVI و فاکتور

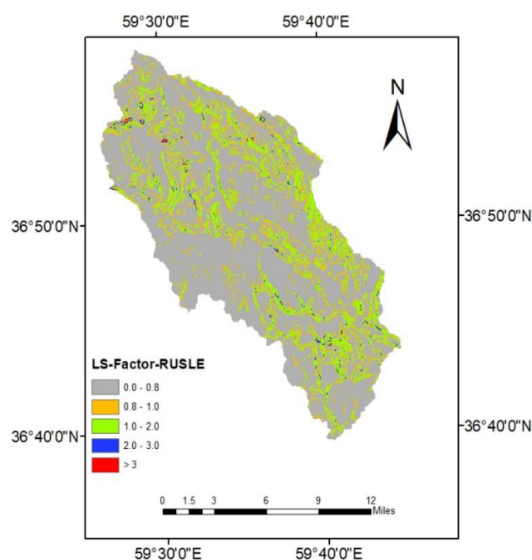


Fig. 8 Spatial distribution of the topographic factor (LS) in RUSLE model

شکل ۸ پهنه‌بندی فاکتور توپوگرافی (LS) مدل RUSLE

کارده حدود ۹۲/۲٪ از آن، فاقد پوشش گیاهی است.

۳-۱- ارزیابی و اندازه‌گیری فرسایش

تلفات سالانه خاک در حوضه آبریز سد کارده با استفاده از مدل‌های USLE، MUSLE و RUSLE محاسبه گردید. به این صورت که نقشه‌های نهایی با ادغام پهنه‌بندی‌های چهار فاکتور R، K، LS و C در محیط ArcGIS با دقت مکانی ۳۰ متر به دست آمدند. با توجه به شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ و جدول‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ مربوط به بررسی توزیع مکانی فرسایش خاک، پراکندگی زیادی در سطح حوضه سد کارده مشاهده می‌شود که در ادامه به تحلیل هر یک پرداخته شده است.

تحلیل مکانی فرسایش خاک در مدل RUSLE

بر اساس شکل ۱۲ و جدول ۱۰، حدود نیمی از مساحت حوضه فرسایش با درجه خیلی کم به وقوع پیوسته است و تنها حدود ۱۵٪ از حوضه دچار فرسایش زیاد و خیلی زیاد بوده است. در این مدل حداقل و حداکثر فرسایش به ترتیب برابر ۰/۰۰ و ۲/۹۵ تن در هکتار در سال برآورد گردیده است.

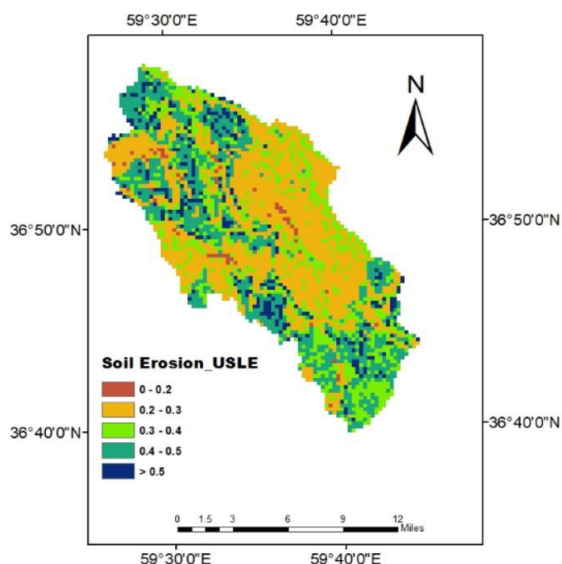


Fig. 11 Spatial distribution of soil erosion in USLE model

شکل ۱۱ پهنه‌بندی فرسایش خاک در مدل USLE

جدول ۹ کلاس‌بندی میزان فرسایش خاک برای USLE

Table 9 Distribution value of soil erosion for USLE

Soil loss USLE (ton/ha/year)	Area (km ²)	Area (%)
0.0-0.2	6.06	1.35
0.2-0.3	193.77	43.26
0.3-0.4	100.06	22.34
0.4-0.5	114.23	25.50
> 0.5	33.80	7.55
Total	447.91	100

تحلیل مکانی فرسایش خاک در مدل USLE

با توجه به شکل ۱۱ و جدول ۹ به‌طور کلی ۴۵٪ یعنی ۲۰۰

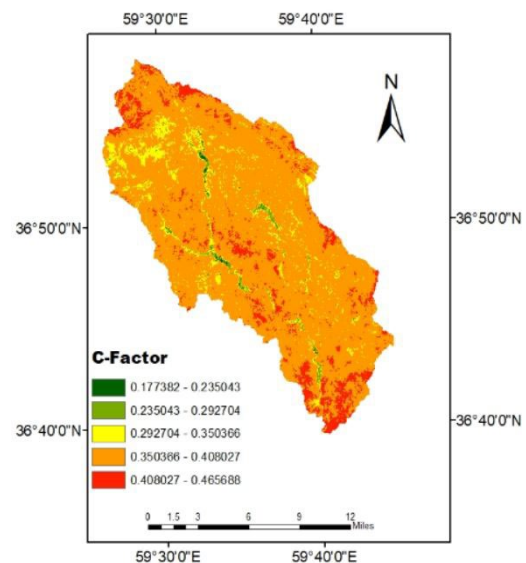


Fig. 10 Spatial distribution of the cropping management (C)

شکل ۱۰ پهنه‌بندی فاکتور مدیریت پوشش گیاهی (C)

جدول ۸ کلاس‌بندی فاکتور مدیریت پوشش گیاهی

Table 8 Distribution of the cropping management

Classes C factor	Area (km ²)	Area (%)
0.18-0.24	0.99	0.22
0.24-0.29	4.72	1.05
0.29-0.35	29.20	6.52
0.35-0.41	375.04	83.73
0.41-0.47	37.96	8.47
Total	447.91	100

کمی می‌باشند. همچنین مقدار ضریب R^2 بین دو مدل MUSLE و RUSLE، ۰/۸۷ به دست آمد که حاکی از همبستگی این دو مدل در بیش‌برآورد کردن میزان فرسایش خاک حوضه کارده است.

۳-۲- ارزیابی و اندازه‌گیری بار رسوبی

برای برآورد بار رسوب در ابتدا میزان نسبت تحویل بار رسوبی (SDR) در حوضه با استفاده از رابطه‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) که به ترتیب مربوط به روش‌های بویس، USDA و وانونی می‌باشند برای دو مدل USLE و RUSLE بر اساس مساحت حوضه کارده به دست آمد.

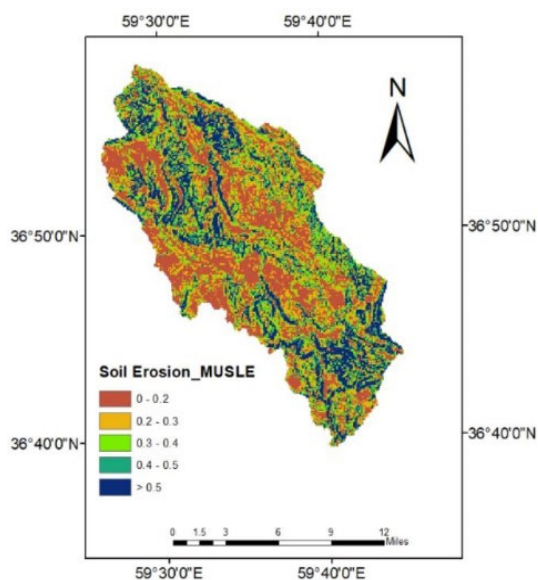


Fig. 13 Spatial distribution of soil erosion in MUSLE model

شکل ۱۳ پهنه‌بندی فرسایش خاک در مدل MUSLE

جدول ۱۱ کلاس‌بندی میزان فرسایش خاک برای MUSLE

Table 11 Distribution value of soil erosion for MUSLE

Soil loss MUSLE (ton/ha/year)	Area (km ²)	Area (%)
0.0-0.2	149.42	33.36
0.2-0.3	93.21	20.81
0.3-0.4	69.38	15.49
0.4-0.5	47.26	10.55
> 0.5	88.60	19.78
Total	447.91	100

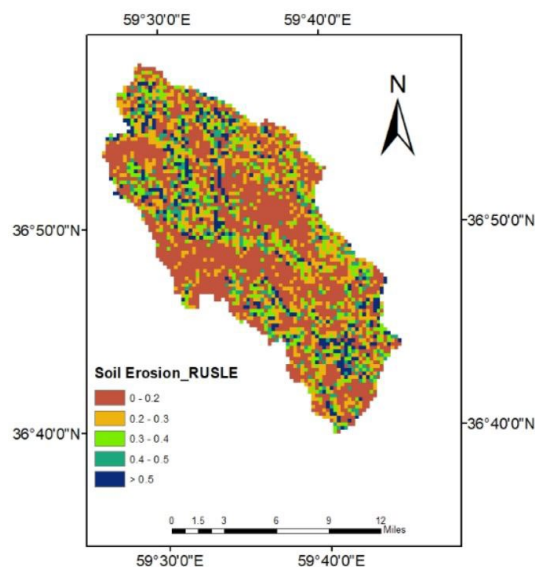


Fig. 12 Spatial distribution of soil erosion in RUSLE model

شکل ۱۲ پهنه‌بندی فرسایش خاک در مدل RUSLE

جدول ۱۰ کلاس‌بندی میزان فرسایش خاک برای RUSLE

Table 10 Distribution value of soil erosion for RUSLE

Soil loss RUSLE (ton/ha/year)	Area (km ²)	Area (%)
0.0-0.2	230.89	51.55
0.2-0.3	90.43	20.19
0.3-0.4	56.70	12.66
0.4-0.5	30.41	6.79
> 0.5	39.48	8.81
Total	447.91	100

تحلیل مکانی فرسایش خاک در مدل MUSLE

در شکل ۱۳ و جدول ۱۱ قابل‌مشاهده است که در حدود نیمی از مساحت حوضه، فرسایش با درجه کم و خیلی کم به وقوع پیوسته است که به‌طور تقریبی در مرکز مسیر آبراهه قرار دارد و حدود ۳۰٪ از حوضه دچار فرسایش زیاد و خیلی زیاد بوده است که در ابتدا وانت‌های مسیر آبراهه است. در این مدل حداقل و حداکثر فرسایش به ترتیب برابر ۰/۰۱ و ۵/۱۹ تن در هکتار در سال برآورد گردیده است. در نهایت جهت مقایسه فرسایش محاسبه‌شده در MUSLE، RUSLE و MUSLE بر اساس درصد مساحت کلاس‌بندی‌های فرسایش ترسیم شد که در شکل ۱۴ نشان داده‌شده است. بر اساس شکل ۱۳ مدل‌های RUSLE و MUSLE نسبت به مدل USLE، طبق شاخص ضریب تعیین R^2 به مقدار ۰/۲۷ و ۰/۲۰ دارای همبستگی بسیار

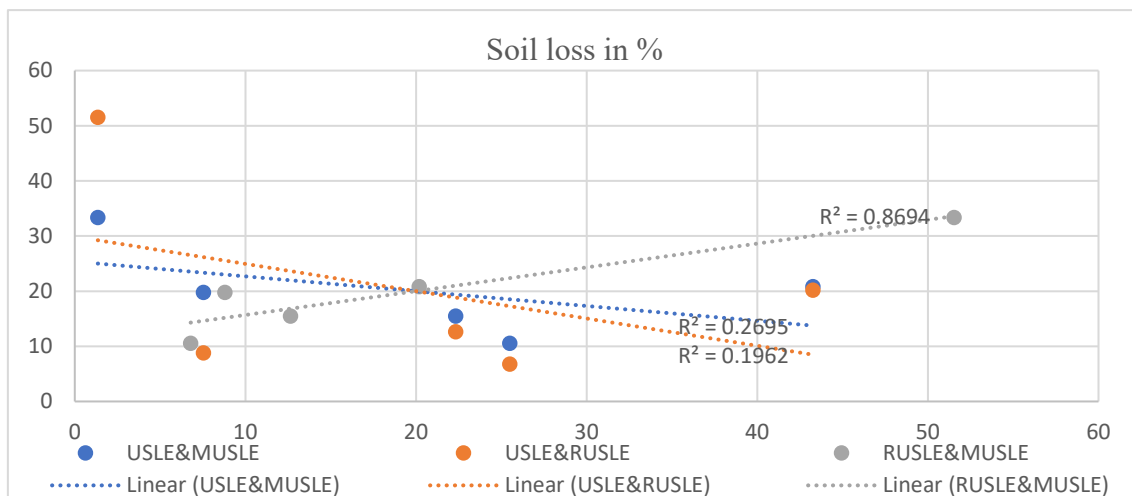


Fig. 14 soil erosion changes in USLE, MUSLE and RUSLE model
 شکل ۱۴ تغییرات فرسایش خاک در مدل‌های USLE و MUSLE و RUSLE

جدول ۱۲ مقایسه رسوب مشاهداتی با مقادیر برآورد شده در مدل‌های USLE و MUSLE

Table 12 Comparison of observed sediment with estimated values in USLE and MUSLE models

Methods of SDR	Models	Estimated sediment (ton/ha/year)	Observed sediment (ton/ha/year)	Relative error
بویس	USLE	0.26	0.26	-0.004
	MUSLE	0.65	0.26	-1.5
USDA	USLE	0.29	0.26	-0.12
	MUSLE	0.71	0.26	-1.7
وانونی	USLE	0.13	0.26	0.5
	MUSLE	0.33	0.26	-0.27

مدل‌ها در برآورد فرسایش و بار رسوبی نشان داد که مدل USLE با میزان خطای نسبی کمتر، بهترین عملکرد در برآورد مقدار بار رسوب را دارد. بر این اساس، نرخ فرسایش برآورد شده با این مدل نیز مورد قبول واقع شد. بررسی عملکرد مدل‌های فرسایش خاک MUSLE و RUSLE نشانگر تفاوت زیاد نتایج حاصل از هر دو مدل نسبت به مدل USLE بود. با این وجود، مدل MUSLE ضمن ارائه توزیع مکانی گسترده‌تر از فرسایش در حوضه در مقایسه با سایر مدل‌ها، میزان فرسایش بیشتری را نیز برآورد کرد که می‌تواند به علت جایگزینی فاکتور فرسایش باران در مدل‌های USLE و MUSLE با دبی پیک لحظه‌ای سیلاب و حجم کل سیلاب در مدل MUSLE باشد (Djoukbal et

سپس با جایگذاری مقدار SDR و فرسایش محاسباتی هر یک از مدل‌ها، مقدار رسوب برآورد شده برای هر دو مدل برآورد گردید (جدول ۱۲). طبق مقادیر جدول ۱۲ مدل USLE بر اساس روش بویس میزان بار رسوبی حوضه را تقریباً برابر با مقدار مشاهداتی برآورد کرد. خطای نسبی با مقادیر منفی در جدول ۱۲ نشان‌دهنده بیش‌برآورد رسوب تولیدی است.

۴- نتیجه‌گیری

مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی میزان فرسایش خاک توسعه یافته‌اند. در این پژوهش میزان فرسایش خاک در حوضه آبریز سد کارده طی بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۰ با استفاده از مدل معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) و نسخه‌های اصلاح‌شده RUSLE و MUSLE محاسبه شده است. در USLE و RUSLE میزان فرسایش خاک حاصل شش عامل فرسایش بارانی (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول شیب (L)، درجه شیب (S)، مدیریت پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی (P) است. با این حال، در MUSLE، ضریب فرسایش باران با دبی اوج سیل لحظه‌ای (Q_p) و حجم کل تخلیه سیل (Q) برای تخمین بزرگی فرسایش جایگزین می‌شود. مدل‌های فوق در نرم‌افزار ArcGIS تحت سیستم SATEEC توسعه داده شدند و بار رسوب حوضه و ارزیابی‌های آن انجام شد. مقایسه

P_i	که متوسط بارندگی ماهانه در ماه i در کل دوره (mm)	al., 2019). نتایج این تحقیق ضمن تبیین روش‌شناسی مطالعه برآورد رسوب در حوضه سد کارده می‌تواند برای برنامه‌ریزی اقدامات حفاظتی در این حوضه استفاده شود.
P	متوسط بارندگی سالانه در کل دوره	
θ	شیب هر سلول (mm)	
D_i	طول هر سلول	
S	شیب حوضه (%)	
SY	میزان رسوب تولیدی حوضه (t/ha/yr)	A_{USLE} مقدار فرسایش سالانه خاک (t/ha/yr)
Er	میزان فرسایش به‌دست‌آمده (t/ha/yr)	R فاکتور فرسایش‌دگی باران (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
Q	حجم سیلاب (m ³)	(yr ⁻¹)
q_p	دبی پیک سیلاب (m ³ /s)	K فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (t h MJ ⁻¹)
D_i	شیب هر سلول	(mm ⁻¹)
θ	طول هر سلول	LS فاکتور توپوگرافی
S	درصد شیب حوضه	C فاکتور مدیریت پوشش گیاهی
		P فاکتور عملیات حفاظتی

۵- فهرست نشانه‌ها

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Regional Water Company of Khorasan Razavi for providing data and facilitating the site visit.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M. D. and H. G.; methodology, H. G. and M. D.; software, H. G. and M. A.; data analysis, H. G. and M. A.; writing—original draft preparation, M. A.; writing—review and editing, H. G. and P. A.; supervision, H. G. and M. D.. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No financial support was received for this research.

Data Availability Statement

The data will be made available to readers upon request.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abdelsamie, E. A., Abdellatif, M. A., Hassan, F. O., El Baroudy, A. A., Mohamed, E. S., Kucher, D. E., & Shokr, M. S. (2022). Integration of RUSLE model, remote sensing and GIS techniques for assessing soil erosion hazards in arid zones. *Agriculture*, 13(1), 35. doi:<https://doi.org/10.3390/agriculture13010035>
- Alkharabsheh, M. M., Alexandridis, T., Bilas, G.,

- Misopolinos, N., & Silleos, N. (2013). Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS. *Procedia environmental sciences*, 19, 912-921. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.101>
- Arekhi, S., & Niazi, Y. (2010). Investigating application of GIS and RS to estimate soil erosion and sediment yield using RUSLE (Case study: Upper part of Ilam Dam Watershed, Iran). doi:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.138.9.17.2.1.0> (In Persian)
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Azizian, A., & Kohi, S. (2019). Evaluating the effect of different methods for calculating topographic factor on sediment delivery rate based on RUSLE model (Case study: Barajin catchment, Qazvin). *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 304-317.
- Chen, T., Niu, R.-q., Li, P.-x., Zhang, L.-p., & Du, B. (2011). Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: a case study in Miyun Watershed, North China. *Environmental Earth Sciences*, 63, 533-541. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-010-0715-z>
- Dabral, P., Baithuri, N., & Pandey, A. (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resources Management*, 22, 1783-1798. doi:[https://doi.org/10.1007/s11269-008-](https://doi.org/10.1007/s11269-008-1798-)

- 9253-9
Djoukbal, O., Hasbaia, M., Benselama, O., & Mazour, M. (2019). Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (NW of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(2), 725-743. doi:<https://doi.org/10.1007/s40808-018-0562-6>
- Durigon, V., Carvalho, D., Antunes, M., Oliveira, P., & Fernandes, M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International journal of remote sensing*, 35(2), 441-453. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081>
- Flanagan, D., & Nearing, M. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP): Hillslope profile and watershed model documentation, NSERL Report 10. *US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, National Soil Erosion Research Laboratory, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA*.
- Ganasri, B., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953-961. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
- Ghosh, A., Rakshit, S., Tikle, S., Das, S., Chatterjee, U., Pande, C. B.,... Mattar, M. A. (2022). Integration of GIS and remote sensing with RUSLE model for estimation of soil erosion. *Land*, 12(1), 116. doi:<https://doi.org/10.3390/land12010116>.
- Hui, L., Xiaoling, C., Lim, K. J., Xiaobin, C., & Sagong, M. (2010). Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao watershed, Jiangxi Province, China, Using USLE, GIS, and RS. *Journal of Earth Science*, 21(6), 941-953. doi:<https://doi.org/10.1007/s12583-010-0147-4>
- Jafarian, Z., Bashtar, V., & Kavian, A. (2017). Simulation of the effect of pasture improvement and restoration on soil loss using the RUSLE model. *Natural Geography Studies*, 49(1), 55-69. doi:<https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.61579>
- Karimi, h., fathizad, h., tavakoli, M., Bazgir, M., & graee, P. (2013). Evaluation the Efficiency of MUSLE Model in Sediment Load Estimation Resulting from Individual Rain Events in Doviraj River Sub-Basins, Ilam Province. *Environmental Erosion Research*, 3(3), 39-54. doi:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1392.3.3.2.8> (In Persian)
- Karydas, C. G., Sekuloska, T., & Silleos, G. N. (2009). Quantification and site-specification of the support practice factor when mapping soil erosion risk associated with olive plantations in the Mediterranean island of Crete. *Environmental Monitoring and Assessment*, 149, 19-28. doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-008-0179-8>
- Kuncheva, G. S., & Dimitrov, P. D. (2020). *Loss of Nutrients by Soil Water Erosion*. Paper presented at the 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE).
- Li, P., Tariq, A., Li, Q., Ghaffar, B., Farhan, M., Jamil, A.,... Freeshah, M. (2023). Soil erosion assessment by RUSLE model using remote sensing and GIS in an arid zone. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 3105-3124. doi:<https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2243916>
- Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., & Kim, K.-S. (2005). GIS-based sediment assessment tool. *Catena*, 64(1), 61-80. doi:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.013>
- Mahdavi, M. (2002). Applied hydrology. *Tehran university press*, 2, 437. (In Persian)
- Malik, A. (2024). Investigating the Impact of Agricultural Practices on Soil Erosion and Sedimentation in Water Bodies. *Ecology, Environment & Conservation (0971765X)*, 30.
- Mihi, A., Benarfa, N., & Arar, A. (2020). Assessing and mapping water erosion-prone areas in northeastern Algeria using analytic hierarchy process, USLE/RUSLE equation, GIS, and remote sensing. *Applied Geomatics*, 12(2), 179-191. doi:<https://doi.org/10.1007/s12518-019-00289-0>
- Mohammadi, S., Karimzadeh, H., Pourmanafi, S., & Soltani, S. (2018). Spatial and temporal evaluation of soil erosion using RUSLE model Landsat satellite image time series (Case study: Menderjan, Isfahan). *Journal of Range and Watershed Management*, 71(3), 759-774. doi:<https://doi.org/10.22059/jrwm.2018.221162.1073>
- Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K.,... Styczen, M. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(6), 527-544. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6%3C527::AID-ESP868%3E3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6%3C527::AID-ESP868%3E3.0.CO;2-5)
- Nwaogu, C., Okeke, O. J., Assuah Adu, S., Babine, E., & Pechanec, V. (2017). Land use—Land cover change and soil-gully erosion relationships: A study of Nanka, South-Eastern Nigeria using geoinformatics *Proceedings of GIS Ostrava* (pp. 305-319): Springer.
- Olumuyiwa, F. O. (2019). Soil erodibility potential of northern part of Ondo state, Southwestern Nigeria. *Int J Res Environ Sci (IJRES)*, 5(4), 1-10.

- doi:<http://dx.doi.org/10.20431/2454-9444.0504001>
- Prasannakumar, V., Shiny, R., Geetha, N., & Vijith, H. (2011). Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India. *Environmental Earth Sciences*, 64, 965-972. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-011-0913-3>
- Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of hydrology*, 157(1-4), 287-306. doi:[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Rokhbin, M., Nohegar, A., Kamali, A., & Habibollahian, M. (2014). Evaluating the amount of erosion and sediment in Lavarefin watershed (Hormozgan province) by using remote sensing (RS), geographic information system (GIS), and empirical model (RUSLE). *Geographical Research*, 29(3), 89-104. (In Persian)
- Sadouq, S. H., Hossein zadeh, M. M., & Azadi, F. (2015). Zoning of erosion in the Kahman watershed using three models: EPM, BLM and Fargas. *Hydrogeomorphol*, 2(2), 137-154. doi:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.2.8.7> (In Persian)
- Salimirad, Dehvari, A., Galavi, H., & Ebrahimian, M. (2020). Parameter identification and uncertainty analysis of SWAT in Kardeh streamflow simulation. *Iran. Water Resour. Res.*, 16(3), 212-221. doi:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.3.15.3> (In Persian)
- Shi, Z., Cai, C., Ding, S., Wang, T., & Chow, T. (2004). Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China. *Catena*, 55(1), 33-48. doi:[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00088-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00088-2)
- Teng, H., Rossel, R. A. V., Shi, Z., Behrens, T., Chappell, A., & Bui, E. (2016). Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia. *Environmental Modelling & Software*, 77, 156-167. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.024>
- Truman, C., Wauchope, R., Sumner, H., Davis, J., Gascho, G., Hook, J.,... Johnson, A. (2001). Slope length effects on runoff and sediment delivery. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56(3), 249-256. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/00224561.2001.12457388>
- Vemu, S., & Pinnamaneni, U. B. (2011). Estimation of spatial patterns of soil erosion using remote sensing and GIS: a case study of Indravati catchment. *Natural Hazards*, 59(3), 1299-1315. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9832-6>
- Williams, J. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 11(5), 965-974. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>
- Wischmeier, W. H., Johnson, C., & Cross, B. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*: Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- 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 regional*, 12, 83-90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.002>