

Erosion risk assessment using Revised Universal Soil Loss Equation and Digital Soil Mapping in Damghan Rood watershed.

Fatemeh Zahra Heydariyeh ^a , Ali Asghar Zolfaghari ^{b,*} , Seyed Hasan Kaboli ^c , Shima Nikoo ^c 

^a Master's degree graduated, Desertification Department, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan

^b Associate professor, Desertification Department, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan

^c Assistant professor, Desertification Department, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan

Research Full Paper

Article History (Received: 2024/12/24

Accepted: 2025/02/25)

Extended abstract

1- Introduction

Soil erosion is one of the major global environmental challenges that threatens soil quality, natural resources, ecosystems, agriculture, and water resources. This phenomenon has particularly severe negative impacts on environmental sustainability and food security in arid and semi-arid regions such as Iran. Numerous models have been developed to predict and manage soil erosion, and the RUSLE model has gained widespread use due to its effective performance in Iran's dry and semi-arid areas. Implementing this model at large scales requires accurate spatial data, which can be obtained by combining ground data with remote sensing and applying geostatistical methods such as Digital Soil Mapping (DSM).

DSM, by integrating field data, remote sensing, and auxiliary variables, provides high accuracy in identifying spatial patterns of erosion and facilitates the production of maps with reduced uncertainty. The aim of this study is to improve the accuracy of soil erosion hazard assessment in the Damghan Rud watershed using the RUSLE model and integrating it with DSM and machine learning methods. This approach can help identify erosion-prone areas and enhance natural resource management.

2. Methodology

The present study was conducted in the Damghan Rud watershed area, located in the northwest of Damghan along the Damghan-Kiasar road, with an area of 1300 square kilometers. This region exhibits topographic diversity, including mountainous areas in the north and plains in the south, with an elevation range between 1390 and 1538 meters. The annual precipitation in the watershed varies between 57.75- and 249.22-mm. Soil sampling was performed using the Cubic Latin Hypercube Sampling (cLHS) method, and auxiliary variables such as Landsat 8 spectral bands, vegetation indices, and topographic features were utilized. In this study, 112 soil samples were collected from the depth of 0 to 30 cm, and physical and chemical analyses including clay, silt, sand, pH, EC, and organic matter content were conducted. To predict soil properties and the erodibility factor (K), Digital Soil Mapping (DSM) was employed using remote sensing data from Landsat 8, Digital Elevation Model (DEM), and Random Forest models. Model evaluation using statistical indicators such as R^2 , RMSE, MAE, and ME showed that combining local data and remote sensing improved modeling accuracy and reduced errors. In estimating soil loss using the RUSLE model, the main formula $A=RKLSCP$ was applied, where the rainfall factor (R) was calculated from the regional precipitation map and synoptic data, the soil erodibility factor (K) was determined based on the clay, silt, sand, organic matter content, and soil structure, the topographic factor (LS) was extracted using the DEM and empirical relations, and the vegetation cover factor (C) was assessed using the NDVI index and field data.

3- Results

The results of the present study in the region indicate that the factors of rainfall (P), rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), and vegetation cover (C) play a key role in the extent of soil erosion. The average annual precipitation is 285 mm, and the average rainfall erosivity index is $226 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$, increasing from east to west and from south to north. The soil in the region has a high sand content (52.93%) and low organic carbon content (0.42%), which increases its erodibility (with an average K value of 0.038). The region's topography, with an average slope of 12.96% and an average elevation of 2018 meters, plays an important role in the intensity of erosion. Vegetation cover, with a C factor ranging from 0.54 to 1 and an

average of 0.92, is effective in reducing erosion in areas with adequate vegetation cover. Overall, the erosion mapping revealed that the erosion risk class exceeding 30 tons per hectare covers the largest area (40.97%), while areas with less than 4 tons of erosion per hectare are primarily concentrated in the central and lower parts of the watershed. These findings highlight the importance of sustainable soil management and conservation measures in the region.

4- Discussion & Conclusions

The present study was conducted to assess the potential of Digital Soil Mapping (DSM) in improving the accuracy of soil erosion hazard evaluation in the Damghan Rud watershed using the RUSLE model. The findings indicated that soil erosion is significantly influenced by various factors such as soil texture, topography, vegetation cover, and conservation practices. The RUSLE model estimated soil loss to be approximately 19.81 tons per hectare per year. However, when compared with the actual conditions of the region, it was observed that this model overestimates the erosion rates. The use of more accurate data, including vegetation cover percentage maps and gravel percentage, improved the model's accuracy.

The study confirmed the significant impact of high sand content, slopes exceeding 10%, and reduced vegetation cover on increasing soil erosion. Additionally, conservation practices such as terracing and cultivation along contour lines reduced the P factor and were effective in controlling erosion. The results demonstrated that the RUSLE model has a high capability in estimating erosion, and combining field data with Digital Soil Mapping (DSM) enhances the modeling accuracy. This approach is recommended for similar regions.

Key Words: Climate change, Climate disasters, Erosion projection, Minab basin, RUSLE.

Cite this article: Heydariyeh, F.Z., Zolfaghari, A.A., Kaboli, S.H., & Nikoo, S., (2025). Erosion risk assessment using Revised Universal Soil Loss Equation and Digital Soil Mapping in Damghan Rood watershed. *Journal of Environmental Erosion Research*. 2025; 15 (1):57-81. <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.57>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.57>

Published by Hormozgan University Press.

URL: <http://magazine.hormozgan.ac.ir>

سنجش قابلیت نقشه برداری رقومی خاک در ارزیابی خطر فرسایش با استفاده از معادله‌ی جهانی تلفات خاک اصلاح شده در حوضه آبخیز دامغانرود

فاطمه زهرا حیدریه: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، رشته مدیریت و کنترل مناطق بیابانی، دانشکده کویرشناسی و گردشگری، دانشگاه سمنان

علی اصغر ذوالفقاری*: دانشیار گروه مدیریت و کنترل مناطق بیابانی، دانشکده کویرشناسی و گردشگری، دانشگاه سمنان

سید حسن کابلی: استادیار گروه مدیریت و کنترل مناطق بیابانی، دانشکده کویرشناسی و گردشگری، دانشگاه سمنان

شیما نیکو: استادیار گروه بیابانزدایی، دانشکده کویرشناسی و گردشگری، دانشگاه سمنان

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴)

DOI: <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.57>

چکیده

فرسایش خاک، تحت تأثیر عواملی چون تغییر اقلیم، تخریب جنگل‌ها، کشاورزی نامناسب و مدیریت نادرست منابع، یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی است. این پژوهش باهدف سنجش قابلیت نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) در افزایش دقت ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز دامغانرود با استفاده از مدل RUSLE به منظور رفع محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی خطر فرسایش در مقیاس‌های محلی انجام شد. تعداد ۱۱۲ نقطه با استفاده از روش مکعب لاتین (CLHS) انتخاب و نمونه‌برداری از خاک و پوشش گیاهی صورت گرفت. نقشه‌های عوامل K , LS , P , C و R در نرم‌افزارهای QGIS و R-STUDIO تهیه شد. نتایج اولیه مدل‌سازی نشان داد که میانگین فرسایش سالانه در حوضه برابر با ۳۶/۵۸ تن در هکتار است. بررسی شرایط منطقه و داده‌های واقعی نشان‌دهنده بیش‌برآورد مدل بود. از این‌رو عامل C مجدداً با استفاده از نقشه‌ی درصد پوشش و سنگ‌وسنگ‌ریزه محاسبه شد و وارد مدل گردید. این‌بار مقدار فرسایش ۱۹/۸۱ تن در هکتار برآورد گردید و دقت مدل‌سازی نزدیک به ۵۰ درصد افزایش یافت. طبقه‌بندی نقشه خطر فرسایش نشان داد که ۱۹/۸۶ درصد مساحت حوضه در کلاس فرسایش شدید (بیش از ۳۰ تن در هکتار)، ۵۳ درصد در کلاس فرسایش متوسط (۱۰ تا ۳۰ تن در هکتار) و ۲۸ درصد در کلاس فرسایش کم (کمتر از ۴ تن در هکتار) قرار دارد. بررسی بافت خاک نشان داد که درصد بالای سیلت عامل اصلی فرسایش زیاد در برخی مناطق است، درحالی که مناطق دارای خاک شنی یا پوشش گیاهی مناسب، فرسایش کمتری را تجربه می‌کنند. این یافته‌ها نشان می‌دهد استفاده از DSM برای تهیه نقشه‌های ورودی مدل RUSLE و محاسبه عامل C با استفاده از داده‌های درصد پوشش و سنگ‌وسنگ‌ریزه، می‌تواند به‌طور دقیق‌تری دینامیک واقعی فرسایش را نشان‌دهنده و راهنمای مؤثری برای استراتژی‌های حفاظتی خاک ارائه دهد.

واژگان کلیدی: فرسایش خاک، نقشه برداری رقومی، RUSLE، ارزیابی خطر فرسایش خاک.

بررسی نتایج مطالعات نشان می‌دهد که بسیاری از مدل‌های موجود فاقد دقت لازم برای پیش‌بینی فرسایش در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای هستند و اغلب اطلاعات کافی برای تصمیم‌گیری دقیق در مدیریت منابع طبیعی فراهم نمی‌کنند و تلفیق روش‌های پیشرفته و داده‌های ژئومورفولوژیکی و سنجش از دور با داده‌های زمینی، کمتر در این حوضه مورد بررسی قرار گرفته است که این موضوع نیازمند تحقیق بیشتر است. از بین مدل‌های نام‌برده شده مدل RUSLE در کشور ایران عملکرد بهتری در برآورد فرسایش در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشته است و به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن، توانایی بالایی در استفاده در مناطق با مقیاس‌های بزرگ دارد (Fredj et.al, 2024). اجرای مدل RUSLE در مقیاس‌های بزرگ به اطلاعات دقیقی از پراکنش مکانی بارندگی، نوع خاک، توپوگرافی، پوشش زمینی و کاربری اراضی نیاز دارد (Fredj et.al, 2024 & Aouichaty et al, 2024). اگر تعداد نمونه کافی در

دسترس باشد، با استفاده از روش‌های مختلف درونیابی می‌توان نقشه تغییرات مکانی این پارامترها را با دقت بالایی تهیه کرد (Madhukar et al, 2023 & Kenny et al, 2022). تاکنون روش‌های درونیابی مختلفی برای تهیه نقشه‌ها ارائه شده است که شامل روش‌های کلاسیک از جمله IDW (Kumar et al, 2022)، روش چندجمله‌ای چندک (Zhang et al, 2023) و روش‌های زمین‌آمار مانند کریجینگ (Chen et al, 2022)، کوکریجینگ (Mahdavi et al, 2023) و DSM (Fernández et al, 2022 & Wang et al, 2023) است.

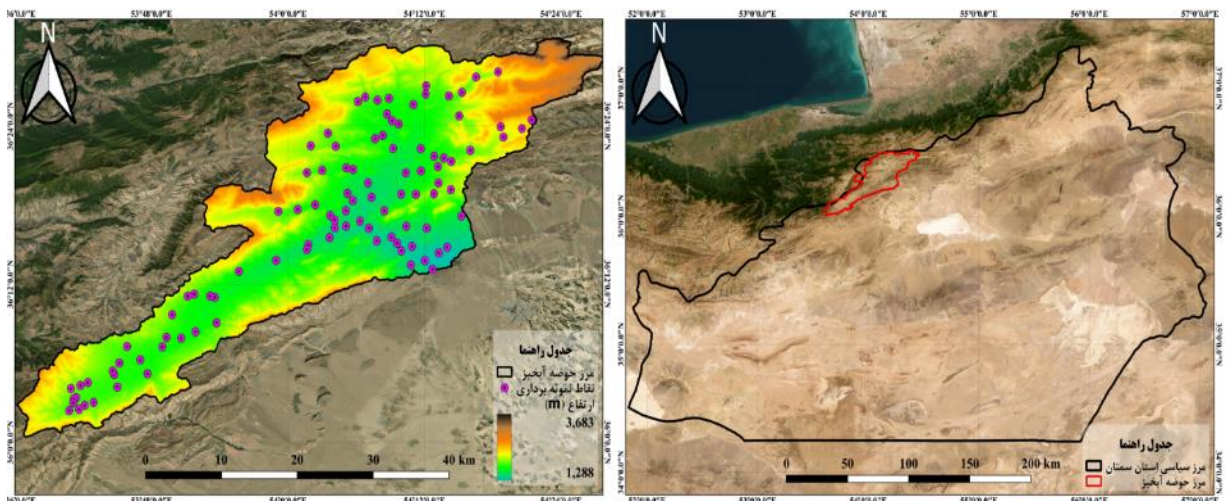
روش‌های زمین‌آمار به دلیل در نظر گرفتن موقعیت مکانی نقاط اندازه‌گیری و ارتباط بین آن‌ها و همچنین همبستگی بین خصوصیات مختلف معمولاً کارایی بیشتری برای توصیف الگوی تغییرپذیری خصوصیات دارند (Zhan et al, 2020). نقشه‌برداری رقومی خاک یکی از روش‌های زمین‌آمار است که به دلیل ترکیب داده‌های سنجش از دور و متغیرهای کمکی با مدل‌های زمین‌آمار، دقت بالاتری در تهیه نقشه‌های خاک دارد و توانایی بهتری در شناسایی و توصیف الگوهای پیچیده تغییرات مکانی خاک نسبت به روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ دارد (Singh and Sarma, 2023 & Li et al, 2023). DSM امکان تحلیل چندگانه داده‌ها و تولید نقشه‌های با عدم قطعیت کمتر را فراهم می‌کند (Rongjun et al, 2022). DSM با ایجاد و جمع‌آوری سیستم‌های اطلاعات مکانی خاک با استفاده از روش‌های مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی با سیستم‌های استنتاج مکانی و غیرمکانی خاک همراه شده و منجر به ایجاد خروجی به‌صورت نقشه رستری همراه با عدم قطعیت می‌شود (Chen et al, 2024). در این روش‌ها علاوه بر متغیرهای اصلی از متغیرهای کمکی نیز استفاده می‌شود که این متغیرها جهت توصیف تغییرات مکانی متغیر اصلی استفاده می‌شوند (Chui et al, 2021). از جمله متغیرهای کمکی می‌توان به داده‌های سنجش از دور (Zhang et al, 2022)، مدل رقومی ارتفاع و داده‌های مستخرج از آن (Kumar et al., 2022)، شاخص‌های پوشش گیاهی (Wang et al, 2023) و شاخص‌های توپوگرافی (Martin et al, 2024) اشاره کرد. بنابراین با ترکیب داده‌های زمینی به‌دست آمده در نمونه‌برداری صحرائی و داده‌های سنجش از دور با استفاده از روش‌های زمین‌آمار (R-STUDIO) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (QGIS) می‌توان داده‌های ورودی مورد نیاز برای اجرای مدل RUSLE را در مقیاس‌های بزرگ به‌دست آورد. تاکنون مطالعات متعددی در رابطه با استفاده از مدل RUSLE برای ارزیابی و برآورد فرسایش در مناطق مختلف انجام شده است. نتایج این مطالعات عوامل مختلفی را در مناطق با شرایط محیطی متفاوت عامل بروز فرسایش دانسته‌اند. عواملی مانند تاثیر تغییرات اقلیمی نسبت به تغییرات کاربری اراضی (Feng, 2022)، عوامل محیطی مانند شیب زمین و کاهش پوشش گیاهی (Romdania et al, 2023) و مجموعه عملیات حفاظتی (Madhukar et al, 2023) در مدل RUSLE کارایی بالاتر و خطای کمتری در برآورد فرسایش خاک دارد.

هدف این پژوهش سنجش قابلیت نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) در بهبود و افزایش دقت ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز دامغان رود با استفاده از مدل RUSLE است. در این راستا، از ترکیب مدل‌های رقومی خاک با روش‌های یادگیری ماشینی، داده‌های سنجش از دور و داده‌های مشاهداتی برای پیش‌بینی دقیق‌تر الگوهای فرسایش و ارائه روشی کارآمد برای شناسایی مناطق حساس به فرسایش بهره گرفته شده است. استفاده از این رویکرد، علاوه بر رفع محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی خطر فرسایش در مقیاس‌های محلی، می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از فرسایش و بهبود مدیریت منابع طبیعی کمک شایانی کند.

۳- مواد و روش

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز دامغانرود، واقع در شمال غربی شهرستان دامغان و در امتداد مسیر جاده‌های دامغان و کیاسر، واقع شده و فاصله آن از شهر دامغان حدود ۳۲ کیلومتر است. این حوضه حدود ۱۳۰۰ کیلومتر مربع مساحت دارد. حوضه در محدوده عرض شمالی $36^{\circ}48'22''$ تا $36^{\circ}21'36''$ و طول شرقی $68^{\circ}21'48''$ تا $69^{\circ}18'36''$ قرار دارد. این منطقه به دلیل قرارگیری در ارتفاعات و دارا بودن توپوگرافی متنوع، شامل مناطق کوهستانی در شمال و شمال شرقی و دشت‌های پهناور در بخش‌های جنوبی است. ارتفاع این منطقه از حدود ۱۵۳۸/۵۸ متر در شمال تا ۱۳۹۰/۳۵ متر در جنوب متغیر است. میزان بارندگی در این منطقه از حدود ۵۷/۷۵ میلی‌متر تا ۲۴۹/۲۲ میلی‌متر در سال متغیر است، که این امر باعث ایجاد تنوع در شرایط اقلیمی و تاثیرات مختلف بر فرآیندهای فرسایش خاک می‌شود. در شکل (۱)، موقعیت حوضه آبخیز دامغانرود در کشور ایران و استان سمنان به همراه موقعیت نقاط نمونه‌برداری در حوضه مطالعاتی نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز دامغانرود در استان سمنان و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

۳-۲- نمونه‌برداری

در این مطالعه، تعیین نقاط نمونه‌برداری با بهره‌گیری از روش نمونه‌برداری مکعب لاتین (CLHS) انجام گرفت. این روش به وسیله تحلیل تغییرات توزیع جمعیتی متغیرهای کمکی، نقاط نمونه‌برداری را تعیین می‌کند. در پژوهش حاضر، متغیرهای ورودی کمکی شامل باندهای طیفی و شاخص‌های تصویری ماهواره‌ای لندست ۸ و همچنین خصوصیات استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع بودند. این متغیرها عبارتند از باندهای مرئی، مادون قرمز کوتاه، شاخص‌های پوشش گیاهی و ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع مانند نقشه رقومی ارتفاع، شیب، جهت و شاخص همواری دره با تفکیک فضایی بالا. با استفاده از روش CLHS، تعداد ۱۱۲ نقطه نمونه‌برداری انتخاب شد و نمونه‌ها از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر از سطح خاک جمع‌آوری گردید.

پس از جمع‌آوری نمونه‌ها، آنها به آزمایشگاه منتقل و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شامل درصد رس، سیلت، شن، pH، هدایت الکتریکی (EC)، و مواد آلی اندازه‌گیری شد. این داده‌ها به منظور تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفتند تا رابطه بین ویژگی‌های خاک و دیگر عوامل محیطی بررسی شود.

این روش نمونه‌برداری به‌طور خاص به‌گونه‌ای طراحی شده است که تنوع محیطی منطقه را به‌خوبی پوشش داده و از دقت بالایی در نتایج تحقیق برخوردار باشد.

۳-۲- متغیرهای کمکی

متغیرهای کمکی نقش مهمی در تحلیل و مدل‌سازی فرسایش خاک دارند. این متغیرها با ارائه اطلاعات بیشتر درباره ویژگی‌های محیطی، دقت و صحت نتایج نهایی را بهبود می‌بخشند. در این مطالعه، از شاخص‌های مختلفی برای بهبود تحلیل و پیش‌بینی خصوصیات خاک استفاده شده است. متغیرهای استفاده شده در این مطالعه عبارتند از داده‌های سنجش از دور (سنجنده Land sat-8) با دقت مکانی ۳۰ متر، مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های استخراج شده از آن که برای برآورد خصوصیات خاک مانند ذرات شن، سیلت، رس، مواد آلی، وزن مخصوص ظاهری و عمق پروفیل خاک استفاده شدند. از آنجایی که خصوصیات خاک در دوره‌های کوتاه‌مدت پایدارند، برای بهبود ارتباط بین ویژگی‌های خاک و تصاویر، از میانگین یا میانه تصاویری که در بازه زمانی خاص و در سال‌های متوالی از منطقه اخذ شدند، استفاده شد. در این مطالعه، تصاویر میانه مربوط به ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیرماه ۵ ساله استفاده گردید. پردازش تصاویر و محاسبه شاخص‌ها در پلتفرم GEE انجام شد و تصاویر دانلود شده و تحلیل آن‌ها انجام شد.

۳-۳- نقشه برداری رقومی خاک (DSM)

در این پژوهش برای محاسبه عامل K (فرسایش‌پذیری خاک) نیاز به پهنه‌بندی خصوصیات خاک (شن، رس، سیلت و ماده آلی) در منطقه مورد مطالعه می‌باشد، که بدین منظور از روش نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) استفاده شد که یک روش مبتنی بر داده کاوی و سنجش از دور است و به‌طور گسترده برای مدل‌سازی و پیش‌بینی خصوصیات خاک به کار گرفته می‌شود. روش DSM با استفاده از متغیرهای محیطی نظیر توپوگرافی، کاربری زمین، و داده‌های سنجش از دور، به پیش‌بینی الگوی مکانی خصوصیات خاک می‌پردازد. در این روش، ابتدا داده‌های محیطی مرتبط از طریق سنجش از دور و نقشه‌برداری رقومی جمع‌آوری شده و سپس مدل‌های داده کاوی مانند مدل جنگل تصادفی برای تحلیل و پردازش این داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس یافته‌های (Stumpf et al, 2024 & Nozari et al, 2024)، روش DSM با به کارگیری داده‌های سنجش از دور و مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشینی، دقت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی در تهیه نقشه‌های خاک ارائه می‌دهد. در این تحقیق، روش DSM با ترکیب داده‌های سنجش از دور و داده‌های جمع‌آوری شده محلی برای پیش‌بینی خصوصیات خاک منطقه به کار گرفته شد و نتایج به دست آمده حاکی از دقت بالای این روش در تهیه نقشه‌های دقیق و جامع از خصوصیات خاک بود.

۳-۴- ارزیابی عملکرد مدل

در فرآیند تهیه هر یک از نقشه‌های رقومی خصوصیات خاک و برای ارزیابی عملکرد مدل، از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین خطا (ME) استفاده شد. روابط ۱ تا ۴ نحوه محاسبه این آماره‌ها را نشان می‌دهد:

رابطه (۱):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i) (P_i - \bar{P}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}$$

رابطه (۲):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

رابطه (۳):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

رابطه (۴):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$$

در روابط معرفی شده، P_i مقدار مشاهداتی (مقادیر واقعی) و O_i مقدار تخمین زده شده توسط مدل را نشان می‌دهند. علاوه بر این، n تعداد داده‌ها است.

مقدار R^2 بین ۰ تا ۱ متغیر است، به طوری که هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل توانایی بیشتری در توضیح واریانس داده‌ها دارد. آماره $RMSE$ ، هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد دقت بیش‌تر بوده و هماهنگی بهتری بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده واقع شده است. ME نشان‌دهنده تمایل مدل به بیش یا کم‌برآورد کردن است. اگر ME برابر با صفر باشد، مدل به طور متوسط بدون بایاس پیش‌بینی کرده است. MAE مقدار خطای مطلق بین پیش‌بینی‌ها و مشاهدات را محاسبه می‌کند و هرچه مقدار آن کمتر باشد، مدل بهتر عمل کرده است.

۵-۳- برآورد هدر رفت خاک توسط مدل $RUSLE$

مدل $RUSLE$ برای برآورد فرسایش آبی در اراضی کشاورزی و همچنین مرتعی به کار می‌رود که در آن شش عامل مؤثر بر فرسایش دخالت دارد (رابطه ۵) و می‌تواند به منظور برآورد فرسایش در پایه‌های زمانی مختلف به کار برده شود (Renard, 1997).

رابطه (۵):

$$A = RKLSCP$$

که در این معادله A متوسط سالانه تلفات خاک بر حسب (تن در هکتار در سال)^۱ به صورت ترکیبی از ۶ فاکتور می‌باشد که R نشان‌دهنده‌ی فرساینده‌ی باران بر حسب (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال)^۲، K ضریب فرسایش‌پذیری خاک (تن هکتار بر مگاژول میلی‌متر)، L عامل طول شیب (بی‌بعد)، S عامل درجه شیب (بی‌بعد)، C عامل مدیریت پوشش گیاهی (بی‌بعد) و P عامل عملیات حفاظت خاک (بی‌بعد) است.

۱-۵-۳- عامل بارندگی (R)

عامل بارندگی (R) شاخصی از قدرت فرساینده‌ی باران است. فرساینده‌ی باران تابعی از خصوصیات فیزیکی باران می‌باشد. این عامل به انرژی مستقیم باران، انرژی جنبشی باران و حداکثر شدت باران در بازه ۳۰ دقیقه ارتباط دارد (Wischmeier, 1971). فاکتور R به عنوان شاخص فرساینده‌ی باران (EI_{30})، توانایی بارش باران در ساییدن خاک را

^۱ $t \text{ ha}^{-1} y^{-1}$

^۲ $MJ \text{ mm ha}^{-1} h^{-1} y^{-1}$

توصیف می‌کند (Wischmeier, 1971). EI از حاصل ضرب انرژی کل رگبار (E) در حداکثر شدت باران در بازه ۳۰ دقیقه (I_{30}) به دست می‌آید (Renard, 1997).
رابطه (۶):

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

در این رابطه R متوسط عامل بارندگی سالانه بر حسب ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$)، n تعداد سال‌های آماری، m_j تعداد رخدادهای با قدرت فرساینده در سال j و EI_{30} شاخص فرساینده رخدادهای k ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$) است. برای محاسبه شاخص فرساینده می‌بایست اطلاعات با دقت بالا و پیوسته از هر رخداد به دست آورد که از اطلاعات ثبت شده ایستگاه‌های سینوپتیک دارای باران‌نگار با طول دوره آماری مشترک ۵ سال (از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰) به دست می‌آید. در این مطالعه بارش منطقه مورد مطالعه از نقشه بارش تهیه شده برای استان سمنان توسط Amini و همکاران (۲۰۲۲) استخراج گردید. در این مطالعه، برای تهیه نقشه متوسط بارندگی استان سمنان، بر اساس مفاهیم اسکورپن، متغیرهای محیطی که همبستگی معنی‌داری با بارندگی ایستگاه‌ها دارند انتخاب کرده و سپس ارتباط بین متغیرها با بارش ایستگاه‌ها را با استفاده از روش جنگل تصادفی ارزیابی کرده و نهایتاً با استفاده از متغیرهای محیطی میزان بارش استان را در نقاط فاقد داده تعیین کرده و نقشه بارش استان سمنان را تهیه نمودند.

۲-۵-۳- عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

شاخص K فرسایش‌پذیری خاک برحسب ($\text{t ha MJ}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) می‌باشد و عبارت است از میزان هدررفت خاک در هر بارش در واحد شاخص فرسایش که به میزان مواد آلی خاک، دانه‌بندی خاک، نفوذپذیری و ساختار مقطعی عرض آن بستگی دارد (Renard et al, 1997). Williams و همکاران (۱۹۸۳)، برای بررسی ارتباط بین بهره‌وری خاک و فرسایش خاک، یک مدل به نام EPLC را معرفی کردند. این مدل شامل اجزاء مختلفی از جمله هیدرولوژی، علم خاک‌ورزی، رشد گیاه، دینامیک مواد مغذی، درجه حرارت خاک و اقتصاد است. از این اجزاء فیزیکی مختلف برای توضیح بهره‌وری خاک و پدیده‌های فرسایش استفاده شده است. مطابق با معادله زیر، با استفاده از مدل EPIC، عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) به درصد اندازه ذرات خاک (شن، سیلت و رس) و کربن آلی خاک وابسته است.
رابطه (۷):

$$K = \frac{3.25(S - 2) + 2.5(P - 3) + (2.1M^{1.14}(10^{-4})(12 - OM)0.1317}{100}$$

در این معادله M برابر است با حاصل ضرب درصد سیلت اصلاح شده (مجموع درصد سیلت و شن ریز) در مجموع درصد‌های سیلت و شن، OM درصد مواد آلی خاک، S کلاس ساختمان خاک و P کلاس نفوذپذیری پروفیل خاک است. رابطه مذکور مقدار K را در سیستم آمریکایی می‌دهد و برای به دست آوردن آن در سیستم بین‌المللی مقدار به دست آمده را بر ۷/۵۹ تقسیم کرده و حاصل آن برحسب ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$) به دست می‌آید. در مطالعه حاضر نقشه خاک با استفاده از اطلاعات حاصل از پیمایش صحرایی و تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های توپوگرافی تهیه شد. در مناطق با وسعت کم می‌توان تغییرات و تنوع خاک‌ها را یکسان در نظر گرفت. اما در منطقه‌ای با وسعت بالا مانند منطقه

مورد مطالعه در این تحقیق باید فاکتورهای تاثیرگذار در تنوع خاک منطقه مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور اثرات موجودات زنده بر روی خاکها با استفاده از شاخصهای NDVI با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸، شاخصهای مستخرج از مدل رقومی ارتفاع (شیب، جهت و شاخص خیزی) با استفاده از نرم افزار R-STUDIO محاسبه شد.

۳-۵-۳- عامل توپوگرافی (LS)

LS عامل توپوگرافی است که فاکتور طول و درجه شیب را در مدل RUSLE شامل می‌شود، فاکتورهای L و S به عنوان نمایانگر تأثیر توپوگرافی بر فرسایش خاک شناخته می‌شوند. اثر طول و تندی شیب (LS) به عنوان یک عامل توپوگرافی، اثر پتانسیل، میزان و سرعت فرسایش را نمایان می‌کند. طول شیب به فاصله بین نقطه بالایی آغاز سراسیمه تا نقطه‌ای که شیب به حداقل خود می‌رسد اطلاق می‌شود و در این نقطه رسوبات ته‌نشین می‌شوند (Wischmeier & Smith, 1978).

رابطه (۸):

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

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

رابطه (۹):

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

رابطه (۱۰):

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

که در آن θ زاویه شیب است. از آنجایی که طول شیب برابر است با فاصله از نقطه شروع رواناب تا نقطه‌ای که در آن رواناب به یک آبراهه وارد می‌شود، لذا مقدار طول شیب در هر دامنه بستگی به تراکم آبراهه دارد. به منظور تشخیص و ترسیم آبراهه‌ها در این پژوهش از نقشه تجمع جریان استفاده شد؛ بدین صورت که پیکسل‌هایی که تجمع در آنها از ۱۰۰۰ عدد بیشتر بود ($n=1000$) به عنوان آبراهه جریان در نظر گرفته شدند. این مقدار n از طریق آزمون و خطا با هم‌پوشانی و مطابقت نقشه‌های آبراهه بدست آمده با تصاویر گوگل ارث و نیز بازدیدهای صحرایی بدست آمد. رابطه (۴) برای محاسبه L از اطلاق رابطه‌ای که برای محاسبه عامل توپوگرافی در یک شیب منظم ارائه شده است بدست آمده است. مقدار عامل درجه شیب (S) از رابطه زیر محاسبه شد :

رابطه (۱۱):

$$S = \begin{cases} 10 \sin \theta + 0.33 & S_g = 9\% \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & S_g = 9\% \end{cases}$$

که در این رابطه S_g درصد شیب است. نقشه‌های شیب و تجمع جریان با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع (DEM) حوضه و به کمک نرم‌افزارهای R-STUDIO و QGIS تهیه شدند. تفکیک مکانی نقشه DEM در این مطالعه ۳۰ متر بود که از منبع Earth data گرفته شد.

۴-۵-۳- عامل پوشش گیاهی (C)

برآورد پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از شاخص NDVI به دلیل محدودیت‌های ذاتی این شاخص، اغلب با دقت کافی همراه نیست (Li et al, 2024). به منظور افزایش دقت برآورد عامل C (پوشش گیاهی) و کاهش خطاهای ناشی از استفاده صرف از داده‌های سنجش از دور، در این مطالعه از دو روش محاسبه شامل داده‌های NDVI و داده‌های زمینی (شامل درصد پوشش گیاهی و میزان سنگ و سنگ‌ریزه) استفاده شد. در روش اول، از شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) برای محاسبه عامل C استفاده گردید. نقشه‌های NDVI از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 استخراج شده و با استفاده از پلتفرم Google Earth Engine پردازش شدند. این پردازش شامل تصحیحات اتمسفری و تهیه تصاویر میانگین سالانه بود. سپس، با استفاده از رابطه زیر، عامل C بر اساس NDVI محاسبه شد: معادلات مختلفی برای توصیف عامل پوشش گیاهی ارائه شده‌اند. در این مطالعه، از معادله شماره ۱۲ استفاده شده است:

رابطه (۱۲):

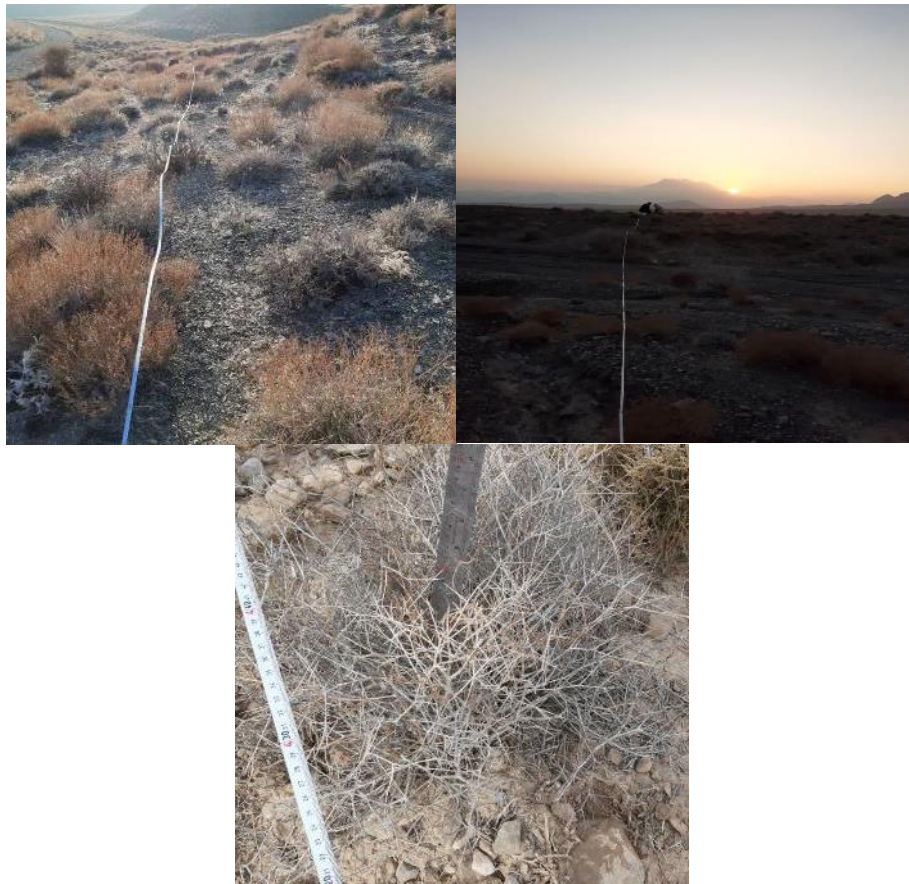
$$C = \exp(-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI})$$

در این رابطه، NDVI شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی است. پارامترهای $\alpha=2$ و $\beta=1$ ، شکل منحنی ارتباط بین NDVI و C را تعیین می‌کنند. رابطه شماره ۱۳ نحوه محاسبه NDVI را نشان می‌دهد:

رابطه (۱۳):

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

در این رابطه NIR مقدار باند مادون قرمز نزدیک و Red مقدار باند قرمز در تصاویر ماهواره‌ای است. مقادیر NDVI در بازه ۱- تا ۱+ متغیر است و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده پوشش گیاهی فعال با فعالیت فتوسنتزی بیشتر است. روش دوم مبتنی بر داده‌های میدانی بود. در این روش، درصد تاج پوشش و مقدار سنگ و سنگ‌ریزه در سطح زمین به عنوان عوامل مؤثر در کاهش فرسایش خاک اندازه‌گیری شدند. داده‌ها از طریق استقرار ترانسکت‌های خطی ۲۵ متری در چهار جهت جغرافیایی اصلی (شمال، جنوب، شرق و غرب) ثبت شدند (شکل ۲-۲). میزان سنگ و سنگ‌ریزه به عنوان عاملی کلیدی در زبری سطح زمین و کاهش شدت برخورد قطرات باران، به طور دقیق اندازه‌گیری شد. سپس این داده‌ها با استفاده از مدل Random Forest برای تهیه نقشه عامل C مدل‌سازی شدند.



شکل ۲- تصویری از ترانسکت خطی جهت اندازه‌گیری درصد پوشش و سنگ‌وسنگ‌ریزه در منطقه مورد مطالعه

۵-۳-عامل حفاظت خاک (P)

عامل P در معادله RUSLE، فاکتور عملیات حفاظتی است که با کاهش سرعت جریان آب و توانایی فرسایش آن، به حفظ خاک و آب در اراضی شیب‌دار کمک می‌کند. این عملیات شامل کشت نواری، کن‌توربندی، تراس‌بندی و آبراهه‌های پوشش‌دار است. مقدار P نشان‌دهنده نسبت فرسایش در شرایط حفاظتی به فرسایش در شرایط استاندارد و اثر شخم در جهت شیب است (Renard, 1997). پس از تهیه و تکمیل داده‌های ورودی موردنیاز، مدل برای منطقه مورد مطالعه اجرا شد و با داده‌های اندازه‌گیری شده فرسایش خاک مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه، برای دستیابی به نتایج با دقت بالاتر، از مدل‌های یادگیری ماشین بین مقادیر مشاهداتی و برآورد شده فرسایش خاک رگرسیون برقرار شد. قابلیت اعتماد هریک از مدل‌ها با استفاده از آماره‌های RMSE و R^2 مورد بررسی قرار گرفت و دقت مدل دربرآورد فرسایش خاک تعیین شد.

۴- یافته‌ها

فاکتورهای بارندگی (P)، فرساینده‌ی باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و درجه شیب (LS)، و فاکتور پوشش گیاهی (C) نقش کلیدی در میزان فرسایش خاک دارند. در ادامه، نتایج حاصل از تحلیل پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر فرسایش خاک ارائه شده است. این پارامترها به‌طور گسترده‌ای در مدل‌های فرسایش خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند و تحلیل آن‌ها می‌تواند بینشی جامع‌تر از روند فرسایش در منطقه مطالعه‌شده فراهم آورد. با توجه به توزیع

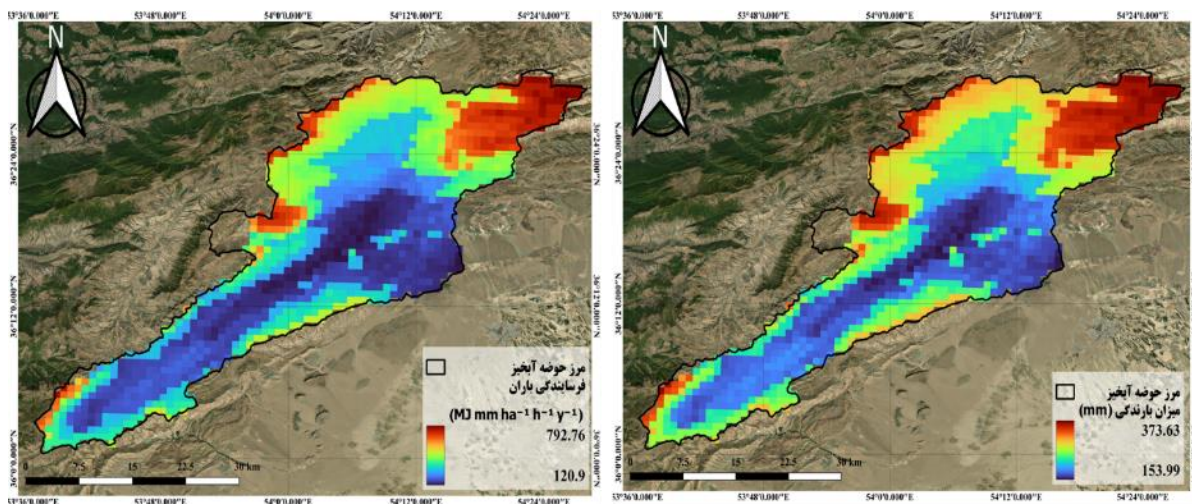
آماري و ميانگين‌هاي به‌دست‌آمده، اين نتايج زمينه‌ساز مقايسه با مطالعات مشابه و ارزيابي نقش هر پارامتر در فرايند فرسايش خاک خواهند بود. در جدول ۲ آماره‌هاي پارامترهاي بررسي شده در حوضه مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۱- آماره‌هاي توصيفي پارامترهاي مورد مطالعه

پارامتر	ميانگين	ميانه	حداقل	حداکثر	چارک اول	چارک دوم	چارک سوم
بارندگي (P)	۲۸۵/۷۴	۲۳۶/۱۶	۱۸۱/۷۶	۳۹۰/۳۵	۱۵۳/۱۹	۲۳۶/۱۶	۲۴۲/۵۱
فرسايندگي باران (R)	۲۲۶/۳۶	۱۷۷/۲۹	۱۲۶/۷۳	۲۴۹/۲۲	۵۷/۷۴	۱۳۸/۴۲	۱۴۳/۸۵
فرسايش پذيري خاک (K)	۰/۰۳۸	۰/۰۳۷	۰/۰۳۵	۰/۰۴۹	۰/۰۲۷	۰/۰۳۷	۰/۰۳۷
طول و درجه شيب (LS)	۱/۰۶۵	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۰۴۵	۲۸/۳۷	۰	۲/۸۴	۴/۱۰
فاكتور پوشش گياهي (C)	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹۱	۱	۰/۵۳	۰/۹۲۸	۰/۹۲۳

فرسايندگي باران (R)

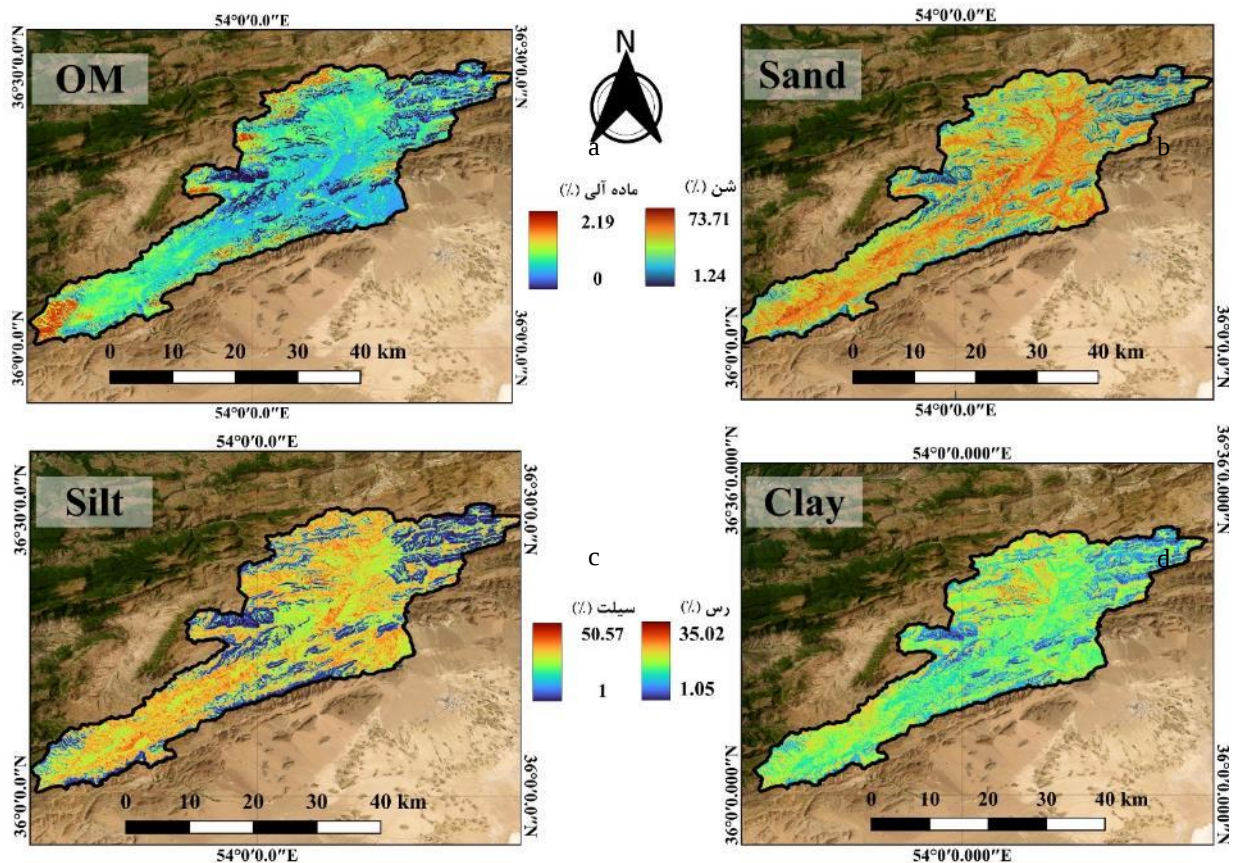
شکل ۳ تغييرات مكاني ميانگين بارندگي سالانه و شاخص فرسايندگي باران در حوضه مورد مطالعه را نشان مي‌دهند. بر اساس اين نقشه‌ها، به‌طور كلي با حركت از شرق به غرب و از جنوب به شمال، ميزان بارندگي و شاخص فرسايندگي باران افزايش مي‌يابد كه مي‌تواند نتيجه شرايط اقليمي و ويژگي‌هاي جغرافيايي خاص اين حوضه باشد (Smith et al, 2024). همچنين مشاهده مي‌شود كه مقدار اين پارامترها در كل منطقه بسيار متغير است؛ به‌طوري كه ميزان بارندگي از ۱۵۳/۹ تا ۳۷۳/۶ ميلي‌متر و شاخص فرسايندگي (R) بين ۱۲۰/۹ تا ۷۹۲/۷ مگاژول ميلي‌متر بر هكتار بر ساعت بر سال ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$) تغيير مي‌كند. ميانگين سالانه بارندگي در اين حوضه ۲۸۵ ميلي‌متر و ميانگين شاخص فرسايندگي باران ۲۲۶ ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$) است.



شکل ۳- نقشه ميزان بارش و شاخص فرسايندگي باران EI30 حوضه آبخيز دامغان رود

خصوصيات خاک (درصد شن، رس، سيلت و ماده آلي)

بر اين اساس با افزايش بارندگي، فرسايندگي باران نيز بالا مي‌رود؛ به اين معنا كه باران در مناطق با بارش بيشتر، انرژي بيشترى دارد و تاثير فرسايشي بالاتري از خود بر جاي مي‌گذارد (Al-Khreisat et al, 2022 & Ivanov et al, 2023). شكل ۴ نقشه خصوصيات خاک‌هاي منطقه مورد مطالعه و هم‌چنين نقشه فرسايش پذيري خاک منطقه را نشان مي‌دهد. براساس اين نقشه و با توجه به جدول ۳ درصد شن، سيلت، رس و مواد آلي براي منطقه ارائه شده است.



شکل ۴- درصد شن، سیلت، رس و مواد آلی در منطقه مورد مطالعه

جدول ۳- آماره‌های اندازه‌گیری شده و خصوصیات بافت خاک

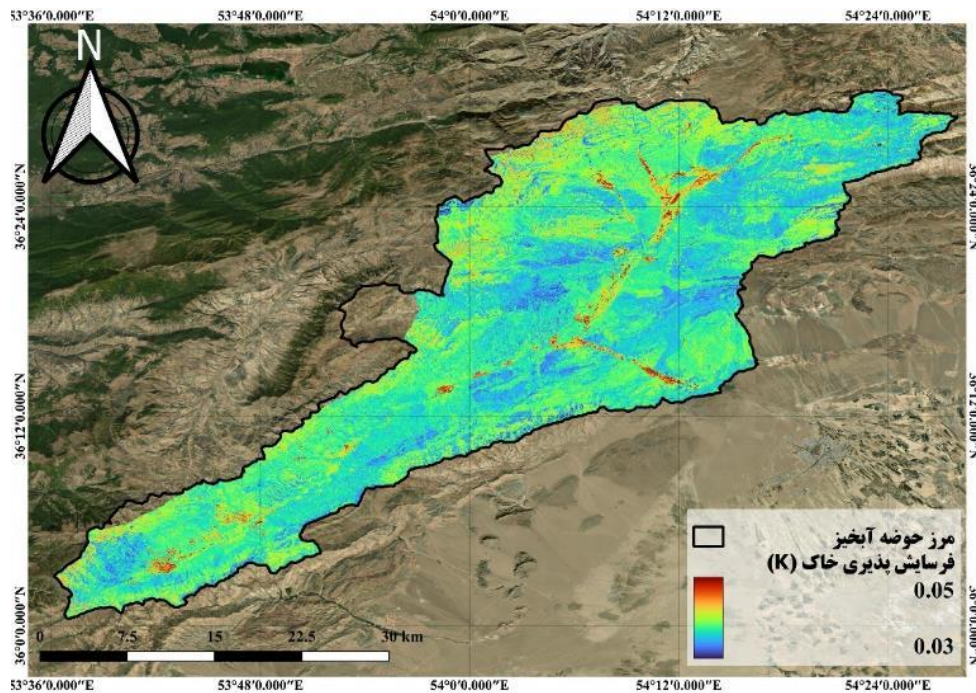
ذرات خاک	میانگین (%)	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	حداکثر	حداقل
شن	۵۲/۹۳	۱۸/۳۵	۳۵	۸۸	۵
سیلت	۳۱/۶۳	۱۱/۷۱	۳۷	۶۰/۶۹	۱۰/۰۷
رس	۱۵/۲۷	۹/۹۵	۶۵	۵۲/۸۲	۱/۳۶
کربن آلی	۰/۴۲	۰/۳۳	۰/۷۸	۱/۶۷	۰/۰۱

بررسی مقادیر جدول ۳ نشان می‌دهد که خاک منطقه عمدتاً دارای درصد بالایی از شن (میانگین ۵۲/۹۳٪) و مقدار متوسطی از سیلت و رس به ترتیب با میانگین ۳۱/۶۳٪ و ۱۵/۲۷٪ است. مقدار کربن آلی با میانگین ۰/۴۲٪ پایین بوده که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی میزان کم مواد آلی و تأثیر آن بر فرسایش‌پذیری خاک باشد. درصد بالای شن همراه با مقادیر پایین کربن آلی ممکن است فرسایش‌پذیری خاک را افزایش دهد، زیرا این ویژگی‌ها معمولاً به کاهش پایداری ساختار خاک منجر می‌شوند.

عامل فرسایش‌پذیری خاک K

نقشه فرسایش‌پذیری خاک (شکل ۵) به‌خوبی نشان می‌دهد که بیشترین فرسایش‌پذیری خاک در نزدیکی آبراهه‌ها رخ می‌دهد و مقدار آن حدود ۰/۰۵ $t\ ha\ h^{-1}\ mj^{-1}\ mm^{-1}$ است. با دور شدن از آبراهه‌ها و نزدیک شدن به دامنه‌های

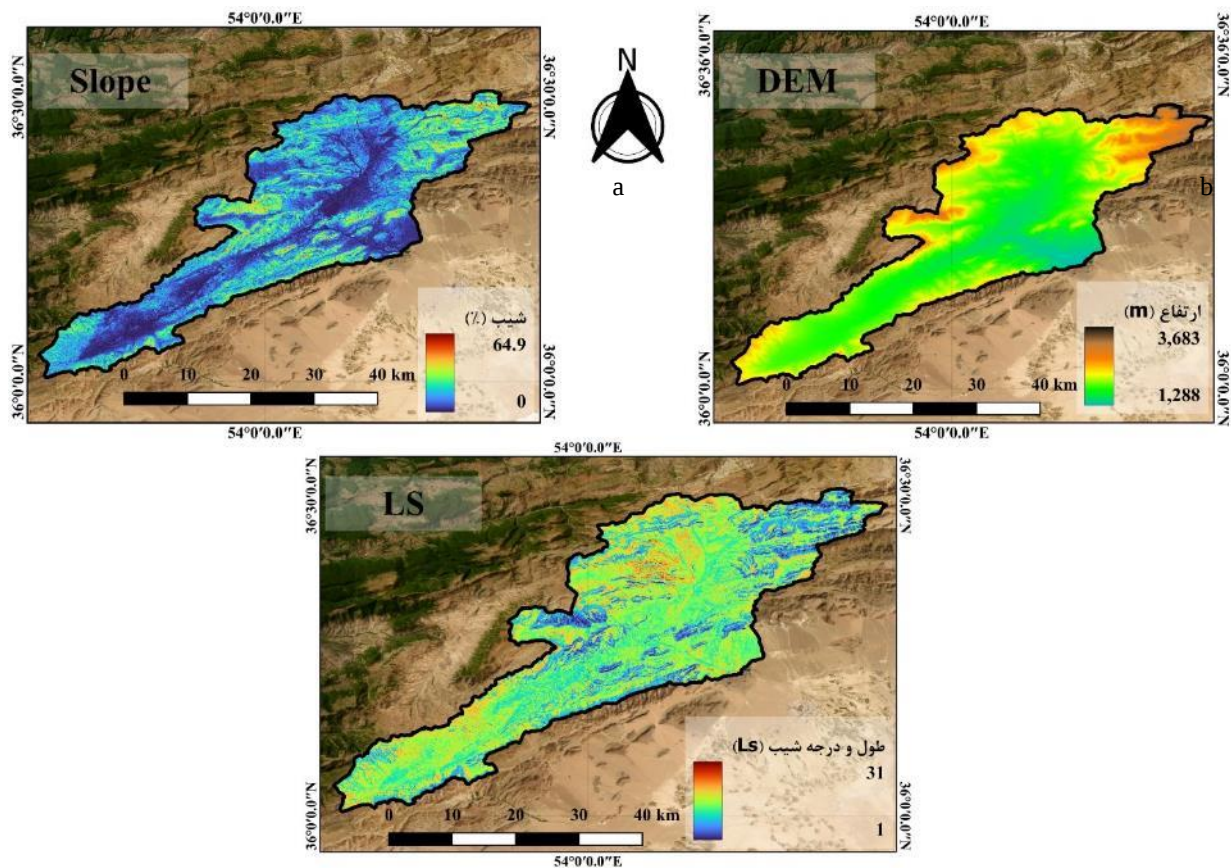
بالاتر، فرساینده‌گی خاک کاهش می‌یابد و به حداقل مقدار خود، یعنی حدود $0.3 \text{ t ha h}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ می‌رسد. در این نقشه، خاک‌های دارای مقادیر زیاد سیلت یا شن ریز و خاک‌های با درصد رس بالا (که باعث پایداری بیشتر خاک می‌شود) شاخص فرسایش‌پذیری (K)، بین 0.05 تا 0.15 دارند. کم‌ترین، بیش‌ترین و متوسط ارزش عددی این شاخص به ترتیب 0.00045 ، $28/37$ و 0.38 می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که خاک‌های با درصد بالای شن، سیلت و مواد آلی معمولاً فرسایش‌پذیری بیشتری دارند (Smith et al, 2021 & Peters et al, 2022) همچنین، به نظر می‌رسد که تغییرات در مقدار شن، سیلت، رس و مواد آلی خاک تأثیر قابل توجهی بر فرساینده‌گی آن دارند (Fisher et al, 2024).



شکل ۵- فرسایش‌پذیری خاک در منطقه مورد مطالعه

عامل توپوگرافی

شکل ۶ نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع، عامل توپوگرافی، و شیب منطقه را نشان می‌دهد. براساس نقشه مدل رقومی ارتفاع، بیش‌ترین ارتفاع منطقه 3683 متر و کمترین ارتفاع 1288 متر است، در حالی که ارتفاع میانگین حوضه برابر با 2018 متر و ارتفاع میانه آن معادل 1960 متر است. نقشه شیب حوضه نیز نشان می‌دهد که حدود 30 درصد منطقه دارای شیب کمتر از 5 درصد، 50 درصد حوضه با شیب 5 تا 10 درصد، و تقریباً 30 درصد دیگر دارای شیب بین 10 تا 18 درصد است. میانگین شیب حوضه حدود $12/96$ درصد و شیب میانه آن $10/56$ درصد برآورد شده که به‌طور کلی نشان‌دهنده‌ی شیب متوسط در حوضه است. این میزان شیب، می‌تواند به‌عنوان عاملی مهم در تشدید فرسایش خاک در منطقه عمل کند، به‌ویژه در مناطقی که شیب بالاتر از 10 درصد دارند.

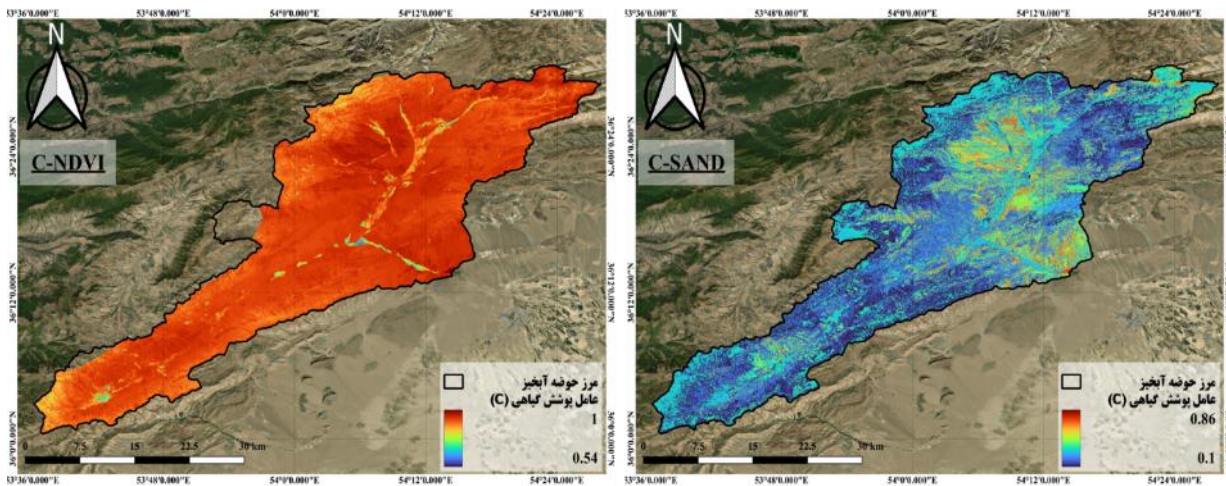


شکل ۶- نقشه طول و درجه شیب، مدل رقومی ارتفاع و درصد شیب حوضه آبخیز دامغان رود

در منطقه مورد مطالعه، مقادیر طول و درجه شیب در بازه‌ی ۱ تا ۳۱ درصد متغیر است که نشان‌دهنده‌ی توپوگرافی بسیار ملایم حوضه آبخیز دامغان رود است. این ویژگی‌ها در مقایسه با نواحی دارای شیب‌های تندتر، مانند امتداد رودخانه‌ها، کم‌تر مشهود بوده و عمدتاً با شیب‌های ملایم‌تر شناخته می‌شوند. به‌طور کلی، در این حوضه با افزایش شیب، مقدار شاخص‌های مرتبط با فرسایش نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه، شدت فرسایش بیشتر می‌شود.

عامل پوشش گیاهی C

شکل ۷ نقشه عامل C تهیه شده با استفاده از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و درصد پوشش گیاهی و سنگ و سنگ‌ریزه سطحی می‌باشد. مقادیر عامل C تهیه شده با استفاده از شاخص NDVI از ۰/۵۴ تا ۱ متغیر می‌باشد و متوسط آن در حوضه برابر با ۰/۹۲ است. این مقدار در اراضی کشاورزی که در نزدیکی خط القعرهای حوضه قرار دارند و از پوشش گیاهی نسبتاً خوبی برخوردار هستند بین ۰/۵۸ تا ۰/۷۴ متغیر می‌باشند. بیش‌ترین مقدار عامل C بین ۰/۸ تا ۱ می‌باشد که اغلب در در مناطق کوهستانی و پرشیب منطقه دیده می‌شود. مقدار عامل C در مناطق با پوشش گیاهی کم و در شیب‌های زیاد بیشتر است و در مناطق با پوشش گیاهی بالا کاهش می‌یابد (Davis et al, 2022 & Peterson et al, 2024 & Lopez et al, 2022).

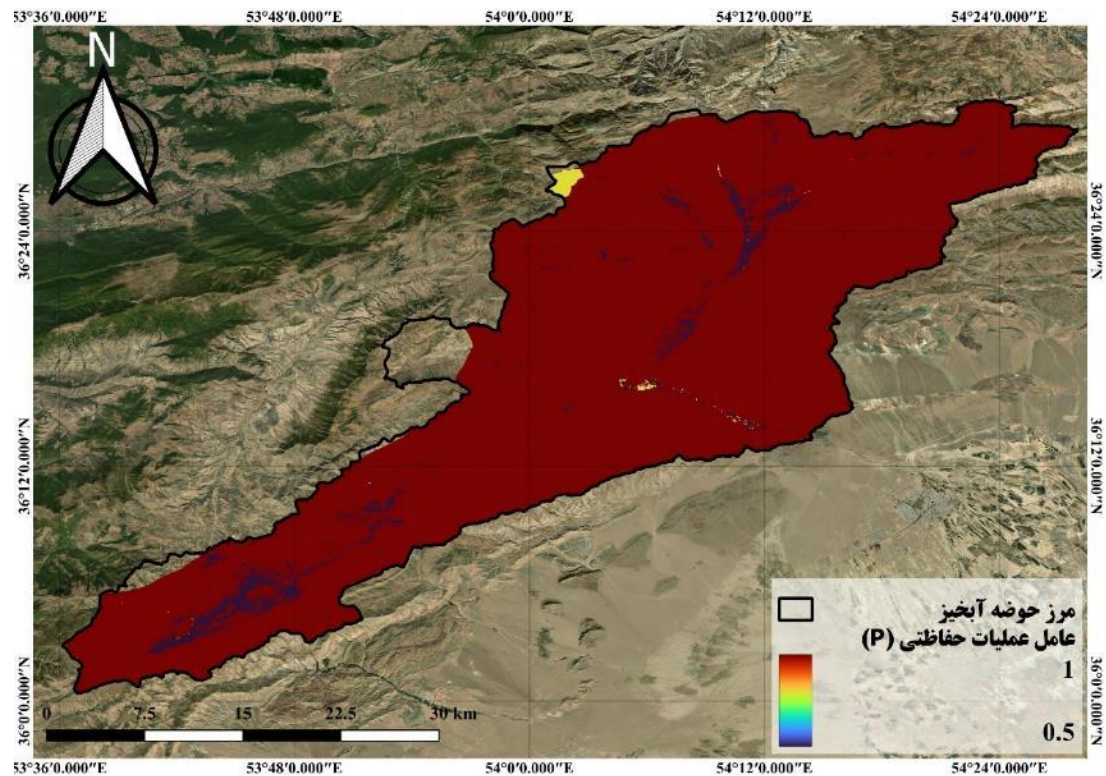


شکل ۷- نقشه عامل C تهیه شده با استفاده از داده‌های NDVI و درصد پوشش گیاهی و سنگ و سنگریزه سطحی

عامل C بر اساس درصد پوشش گیاهی و درصد سنگریزه سطحی در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. مقادیر آن بر اساس درصد در حوضه مورد مطالعه از ۰/۱ تا ۰/۸۶ متغیر بوده و متوسط آن در حوضه برابر با ۰/۲۳ است. میانگین درصد پوشش گیاهی حوضه معادل ۰/۲۷ می‌باشد. ۲۵ درصد منطقه دارای درصد پوشش گیاهی کم‌تر از ۰/۱۵ و ۲۵ درصد منطقه دارای درصد پوشش گیاهی بیش از ۰/۳۶ می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده انطباق مطلوب نقشه با شرایط واقعی منطقه است، به این معنا که توزیع مکانی پوشش گیاهی و مقادیر عامل C که در نقشه مدل‌سازی شده‌اند، به‌خوبی وضعیت مشاهده‌شده در منطقه را بازتاب می‌دهند. این انطباق می‌تواند اعتبار روش به‌کاررفته در تعیین عامل C را تأیید کند و نشان می‌دهد که نقشه تهیه‌شده ابزار مناسبی برای تحلیل و مدل‌سازی فرسایش در منطقه است (Xiong et.al, 2023).

عامل عملیات حفاظتی P

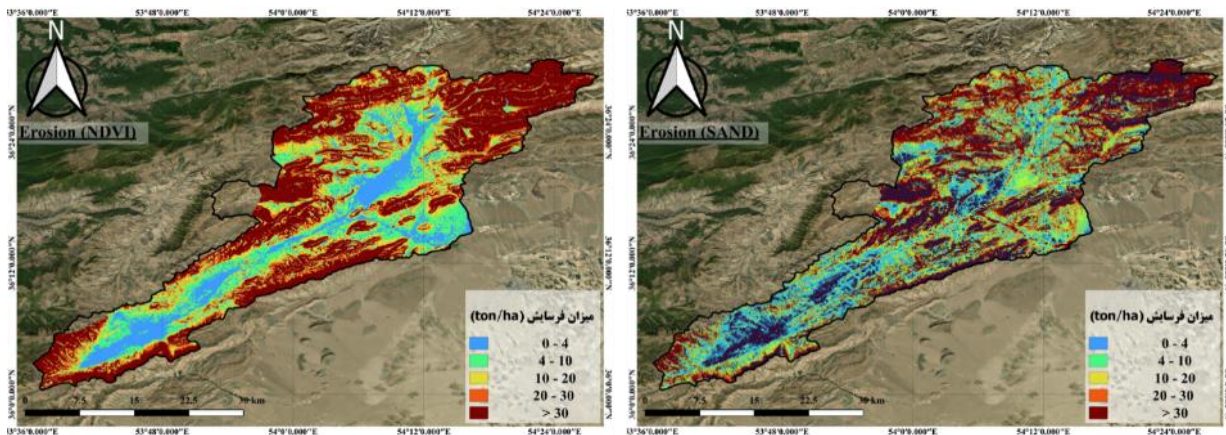
شکل ۸ عملیات حفاظتی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این شاخص با استفاده از طبقه‌بندی لایه درصد شیب حوضه و بر اساس روش ویشمایر-اسمیت محاسبه شده است. مقادیر این شاخص در منطقه بین ۰/۵ تا ۱ متغیر بوده و میانگین آن در حوضه برابر با ۰/۹۸ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بخش عمده‌ای از حوضه به‌خاطر کوهستانی و پرشیب بودن، هیچ‌گونه عملیات حفاظتی ندارد. مناطق با مقادیر متوسط معمولاً روی اراضی کشاورزی یا باغات قرار دارند. در این مناطق، خط‌العمل‌هایی وجود دارد که شیب پروفیل طولی آن‌ها کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در زمین‌های کشاورزی این شیب ۰/۵ و در جنگل‌های پهن‌برگ ۰/۸ برآورد شده است. در سایر نقاط، این شیب برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۸- نقشه عملیات حفاظتی حوضه آبخیز دامغان رود

نقشه فرسایش آبی حوضه آبخیز دامغان رود

بر اساس معادله Wischmeier & Smith، نقشه‌ی فرسایش‌پذیری خاک حوضه‌ی آبخیز دامغان‌رود از طریق ضرب لایه‌های بارندگی، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی تهیه شده است. در شکل ۹، نقشه‌ی کلاس‌بندی خطر فرسایش که دارای ۵ کلاس می‌باشد ارائه شده است. کلاس اول (۰ تا ۴ تن)، کلاس دوم (۴ تا ۱۰ تن)، کلاس سوم (۱۰ تا ۲۰ تن)، کلاس چهارم (۲۰ تا ۳۰ تن)، و کلاس پنجم (بیش از ۳۰ تن). در نقشه تهیه شده با استفاده از عامل C محاسبه شده با شاخص NDVI درصد مساحت هر یک از این کلاس‌ها به ترتیب ۱۷/۳، ۱۱/۵۷، ۴۰/۹۷ و ۱۷/۴ درصد از کل حوضه را شامل می‌شود. کلاس پنجم، که فرسایش بیش از ۳۰ تن در هکتار را نشان می‌دهد، بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. در این حوضه، میزان فرسایش در اکثر مناطق حاشیه‌ای بیش از ۳۰ تن در هکتار است، در حالی که مناطق با فرسایش کمتر از ۴ تن در هکتار عمدتاً در بخش‌های مرکزی و نواحی کم‌ارتفاع‌تر حوضه قرار دارند. همچنین، برخی مناطق فرسایش متوسط بین ۱۰ تا ۲۰ تن و ۲۰ تا ۳۰ تن در هکتار را دارند که وسعت کمتری نسبت به سایر کلاس‌ها دارند.



شکل ۹- نقشه پتانسیل خطر فرسایش خاک با استفاده از نقشه عامل C محاسبه شده با شاخص NDVI و درصد پوشش گیاهی و سنگ و سنگریزه سطحی

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در نقشه خطر فرسایش تهیه شده با استفاده از عامل C محاسبه شده با داده‌های درصد پوشش و سنگ و سنگریزه، درصد مساحت مرتبط با فرسایش کم‌تر از ۴ تن در هکتار، حدود ۲۷/۲۹ درصد است، در حالی که فرسایش بین ۴ تا ۱۰ تن در هکتار ۱۸/۲۹ درصد از مساحت را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین، نواحی با فرسایش بین ۱۰ تا ۲۰ تن و ۲۰ تا ۳۰ تن در هکتار به ترتیب ۲۲/۵۴ درصد و ۱۲ درصد از کل مساحت را در بر می‌گیرند. در نهایت، نواحی با فرسایش بیش از ۳۰ تن در هکتار ۱۹/۸۶ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شوند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که بیشتر مناطق واقع در شمال و شمال شرقی حوضه دارای فرسایش بالای ۳۰ تن در هکتار هستند، در حالی که نواحی با فرسایش کمتر از ۱۰ تن در هکتار عمدتاً در اراضی پایین دست حوضه و در ارتفاعات پایین تر قرار دارند. برخی مناطق نیز دارای فرسایش حد واسطه بین ۱۰ تا ۳۰ تن در هکتار هستند، که وسعت این نواحی نسبت به سایر کلاس‌ها کمتر است.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که فرسایش خاک تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله بارندگی، نوع خاک و شیب زمین است. به عنوان مثال، در حوضه شط العرب، ۳۳ درصد از مساحت دچار فرسایش شدید بوده که این امر بر اهمیت ارزیابی و مدیریت فرسایش خاک تأکید می‌کند (Hossain et al, 2021). همچنین، در منطقه ماراتی نیجر، نرخ فرسایش خاک به ۹۴۴/۹ تن در هکتار در سال رسیده است که ضرورت اجرای اقدامات کنترلی را نمایان می‌سازد (Almouctar et al, 2021). این نتایج می‌تواند به عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی و مدیریت زمین در حوضه‌های آبخیز مشابه مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، این نقشه به خوبی با واقعیت‌های موجود در منطقه انطباق دارد و می‌تواند به عنوان مبنایی برای مدیریت پایدار خاک و اقدامات حفاظتی در حوضه‌های آبخیز مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف سنجش قابلیت نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) در بهبود و افزایش دقت ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز دامغان‌رود با استفاده از مدل RUSLE به منظور رفع محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی خطر فرسایش در مقیاس‌های محلی انجام شد. برای رسیدن به این هدف اطلاعات مختلفی از جمله پیمایش صحرائی و نمونه‌برداری، داده‌های بارندگی ایستگاهی و نیز داده‌های سنجش از دور استفاده شد. با استفاده از مدل

اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE)، تلفات خاک و نواحی حساس به فرسایش حوضه آبخیز دامغان‌رود برآورد گردید که مقادیر سالانه هدررفت سالانه خاک حدود ۱۹/۸۱ تن در هکتار در سال برآورد شد.

پس از بررسی شرایط واقعی منطقه و مقایسه با نتایج حاصل از مدل RUSLE مشخص شد که این مدل میزان فرسایش را بیشتر از مقدار واقعی آن در منطقه برآورد کرده است. بدین منظور برای تطبیق نقشه با شرایط واقعی منطقه، در مدل به جای نقشه پوشش گیاهی از نقشه درصد پوشش گیاهی و درصد سنگ‌ریزه که با جمع‌آوری داده‌های زمینی تهیه شده بود، مجدداً فرسایش خاک محاسبه گردید که نتایج حاصل به شرایط واقعی منطقه بسیار نزدیک‌تر می‌باشد.

یافته‌های این مطالعه نشان داد که فرسایش خاک در حوضه آبخیز دامغان‌رود به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر عوامل بافت خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی قرار دارد. بررسی بافت خاک منطقه نشان داد که درصد بالای شن (۵۲/۹۳٪) و مقادیر پایین رس (۱۵/۲۷٪) و مواد آلی (۰/۴۲)، پایداری خاک را کاهش داده و خطر فرسایش‌پذیری را افزایش داده است. این نتایج با یافته‌های پیشین، مانند تحقیقات Zhan و همکاران (۲۰۲۱) که بیان داشته‌اند شن به‌طور موثری می‌تواند از تولید رسوب جلوگیری کند اما مقادیر بالای آن در شیب‌های بالا ساختار خاک را بی‌ثبات می‌کند Chen و همکاران (۲۰۱۸)، که مقادیر کم رس را عامل کاهش انعطاف‌پذیری خاک دانسته و آن را یک عامل مهم در حفظ ساختار خاک می‌دانند و Odoh و همکاران (۲۰۲۴) که عدم وجود کافی ماده عالی را عامل اصلی افزایش خطر فرسایش می‌دانند همسو است.

عامل توپوگرافی و شیب نیز در این پژوهش نقش مهمی در تشدید فرسایش ایفا کرده است. نتایج نشان داد که مناطق با شیب بیش از ۱۰ درصد، خصوصاً در شمال و شمال‌شرقی حوضه، فرسایش بالاتری را تجربه می‌کنند. شیب متوسط منطقه حدود ۱۲/۹۶ درصد برآورد شده و این ویژگی، همسو با نتایج مطالعاتی نظیر Majewski و همکاران (۲۰۲۳) و Liu و همکاران (۲۰۲۱)، که بیان داشته‌اند که به ازای هر ۱ درصد افزایش شیب و به‌دنبال آن افزایش سرعت رواناب، میزان فرسایش می‌تواند بین ۷ تا ۱۵ درصد افزایش یابد و افزایش شیب به افزایش سرعت رواناب و شدت فرسایش منجر می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های دیگر (Sharma et al, 2021 & Meyer et al, 2022 & Alvarez et al, 2024) نیز تأکید دارند که تغییرات توپوگرافی و شیب تأثیر زیادی بر میزان فرسایش دارند و با افزایش شیب، احتمال و شدت فرسایش نیز افزایش می‌یابد.

عامل پوشش گیاهی نیز تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش فرسایش داشته است. در مناطقی با پوشش گیاهی مناسب و درصد سنگ‌ریزه بالا، مقدار شاخص C کاهش یافته است. استفاده از نقشه‌های دقیق‌تر نظیر درصد پوشش گیاهی و سنگ‌ریزه به جای NDVI، نتایج مدل RUSLE را به واقعیت نزدیک‌تر کرده است. این دستاورد با نتایج BaiYu و همکاران (۲۰۲۱) و Ebrahimzadeh و همکاران (۲۰۱۸) و Mondal و همکاران (۲۰۲۴)، تطابق دارد که تأکید داشته‌اند ترکیب داده‌های میدانی (درصد پوشش و سنگ‌وسنگ‌ریزه) در مدل RUSLE امکان درک دقیق‌تری از وضعیت پوشش منطقه را فراهم می‌کند و نمای جامع‌تری از چشم‌انداز منطقه ارائه می‌دهد که قابلیت اطمینان مدل را در شرایط مختلف محیطی افزایش می‌دهد.

علاوه بر این، عملیات حفاظتی نیز تأثیر بسزایی در کنترل فرسایش داشته است. در مناطقی که اقدامات حفاظتی مانند ترانس‌بندی و کشت در راستای خطوط هم‌ارتفاع انجام شده است، شاخص P کاهش یافته و بین ۰/۵ تا ۰/۸ قرار

گرفته است، در حالی که در مناطق بدون این اقدامات، مقدار آن به ۰/۹۸ افزایش یافته است. این یافته‌ها با مطالعات Ciu و همکاران (۲۰۲۴) و Zhou و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد که نشان می‌دهند مدیریت مناسب زمین و کاهش شیب پروفیل طولی می‌تواند اثرات فرسایش را کاهش دهد. مطالعات دیگر نظیر (Wilson et al, 2021 & Roberts et al, 2022 & Harris et al, 2024) نشان می‌دهند که در مناطقی که عملیات حفاظتی به درستی انجام می‌شود، میزان حفاظت به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی و شیب منطقه قرار می‌گیرد و این باعث کاهش چشمگیر فرسایش خاک می‌شود. همچنین، کاهش شیب پروفیل طولی و استفاده از پوشش گیاهی مناسب می‌تواند تأثیر زیادی در کنترل فرسایش خاک داشته باشد.

میزان فرسایش بر حسب تن در هکتار در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که اکثر مناطق واقع در شمال و شمال‌شرقی منطقه دارای فرسایش بیش از ۳۰ تن در هکتار بوده و مناطق با فرسایش کمتر از ۱۰ تن در هکتار در اراضی پایین‌دست حوضه و با ارتفاع کمتر قرار دارند. در این بین برخی مناطق فرسایش حد واسطه ۱۰ تا ۲۰ تن و ۲۰ تا ۳۰ تن در هکتار را داشتند که وسعت آن‌ها نسبت به سایر مناطق بسیار اندک است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده ثابت شد که مدل RUSLE توانمندی بالایی در برآورد فرسایش در منطقه مورد مطالعه داشته و برای سایر مناطق با ویژگی‌های مشابه این منطقه، قابل استفاده می‌باشد. همچنین، ترکیب داده‌های میدانی با روش‌های نوین نقشه‌برداری نظیر DSM توانسته است دقت مدل‌سازی را افزایش دهد و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی نیز از این رویکرد بهره گرفته شود.

منابع

1. Abedini, M., Fathi Jokandan, R., & Pasban, A. (2024). Estimating erosion and sediment through evaluation of affecting variables in the catchment basin of Karganroud using EPM model. *Geography and Human Relationships*, 7(1), 658-672.
2. Al-Khreisat, K., El-Korchi, M. M., & McKenna, S. J. (2022). Spatial variability of rainfall erosivity and its impact on soil erosion: A study from the Eastern Mediterranean. *Journal of Hydrology*.
3. Alvarez, C. G., Martinez, J. R., & Gómez, S. L. (2024). Effects of topography and slope gradient on soil erosion: A study in the Mediterranean region. **Earth Surface Processes and Landforms**.
4. Amini, E., Zolfaghari, A., Kaboli, H., & Rahimi, M. (2022). Estimation of Rainfall Erosivity Map in Areas with Limited Number of Rainfall Station (Case study: Semnan Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2027-2044.
5. Amira, F., Ghernaout, R., Saad, D., & Boualem, R. (2024). Assessing soil erosion through the implementation of the RUSLE model and geospatial technology in the Isser watershed, northern Algeria. **Water Science & Technology: Water Supply**, 24(1), 154-164. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.154>
6. Anthony, K. (2022). Assessing the accuracy of interpolation methods to map soil properties at a regional scale in Extremadura (SW Spain). **EGU General Assembly Conference Abstracts*, 24*, EGU22-11074. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11074>
7. Aouichaty, N., Bouslhim, Y., Hilali, S., Zouhri, A., & Koulali, Y. (2024). Assessing the influence of multiresolution DEMs on soil loss prediction using the RUSLE model in central Morocco. **Journal of Geological Society of India**. <https://doi.org/10.17491/jgsi/2024/173849>

8. Bai, Y., & Cui, H. (2021). An improved vegetation cover and management factor for RUSLE model in prediction of soil erosion. **Environmental Science and Pollution Research**, 28(5), 5671-5683. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-11820-X>.
9. Bai, Y., & Cui, H. (2021). An improved vegetation cover and management factor for the RUSLE model in prediction of soil erosion. **Environmental Science and Pollution Research*, 28*(15), 18901-18912. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-11820-X>
10. Bezak, N., Borrelli, P., Mikoš, M., Auflīč, M. J., & Panagos, P. (2024). Towards multi-model soil erosion modelling: An evaluation of the erosion potential method (EPM) for global soil erosion assessments. *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107596>.
11. Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2022). Water erosion. In **Soil erosion and carbon dynamics** (pp. 27-45). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30341-8_2
12. Cao, L., Zhang, T., & Wang, Y. (2021). Adapting the WEPP hillslope model to predict unpaved road soil erosion in southern China. *Authorea Preprints*.
13. Casabella-González, M. J., Borselli, L., & García-Meza, J. V. (2023). Improved MPSIAC model for soil erosion rate assessment in semiarid zones. *Journal of Arid Environments*, 212, 104946.
14. Chen, L., Yang, J., & Li, W. (2022). Kriging-based estimation of soil organic carbon in semi-arid regions using remote sensing data. **Catena**, 210, 105731. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.105731>.
15. Chen, L., Yang, J., & Li, W. (2022). Kriging-based estimation of soil organic carbon in semi-arid regions using remote sensing data. *Catena*, 105731. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.105731>.
16. Chen, N., Gao, Y., Gao, Y., Yang, C., & Hu, G. (2018). Effect of clay content on the strength of gravel soil in the source region of debris flow. *Journal of Mountain Science*, 15(5), 915-924. <https://doi.org/10.1007/S11629-018-4911-8>
17. Chen, N., Gao, Y., Yang, C., & Hu, G. (2018). Effect of clay content to the strength of gravel soil in the source region of debris flow. **Journal of Mountain Science**, 15(5), 963-971. <https://doi.org/10.1007/S11629-018-4911-8>.
18. Davis, K. L., Robinson, M. J., & Green, T. W. (2022). Correlation between vegetation coverage and erosion factors: A case study in agricultural areas of Central Europe. *Agricultural Water Management*.
19. Ding, H., Liu, L., Wu, J., & Zhang, Y. (2023). "Assessing the effectiveness of soil conservation practices in semi-arid regions using the WEPP model." *Catena*, 223, 106517.
20. Ebrahimzadeh, S., Motagh, M., Mahboub, V., & Mirdar Harijani, F. (2018). An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion. **Environmental Earth Sciences*, 77*(4), 131. <https://doi.org/10.1007/S12665-018-7635-8>
21. Ekundayo, A., Adesina, O., Ajayi, G., Odumosu, J. O., & Kolade, T. S. (2024). Assessment of soil erosion susceptibility using multi-criteria analysis. **Environmental Technology and Science Journal*, 15*(1), 50-64. <https://doi.org/10.4314/etsj.v15i1.4>
22. Elhaddad, A., Abou Najm, M., & Berriane, A. (2022). Application of RUSLE model for soil erosion assessment in a semi-arid region of Morocco. *Journal of Environmental Management*, 113582. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.113582>.
23. Feng, R. (2022). Impact of climate and land use land cover changes on soil erosion. In **Water science and technology library**. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8665-9_14
24. Fernández, C., García, A., & Martín, J. (2022). Digital soil mapping for erosion risk assessment using RUSLE in Mediterranean environments. **Catena**. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106029>
25. Fisher, K. L., White, J. M., & Lee, T. S. (2024). Variation in soil erodibility and its implications for erosion control in agricultural landscapes. **Agricultural Systems**.
26. Haddadchi, A., Phillips, C., & Vale, S. (2023). The influence of erosion sources on sediment-related water quality attributes. **EGU General Assembly Conference Abstracts**, 25, 10405. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10405>.

27. Haddadchi, A., Phillips, C., & Vale, S. S. (2023). The influence of erosion sources on sediment-related water quality attributes. *EGU General Assembly Conference Abstracts, 25*, EGU23-10405. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10405>
28. Harris, L. T., Clark, M. B., & Miller, S. J. (2024). Evaluating the impact of slope and vegetation on soil erosion control: A case study in sloping terrain. *Land Degradation & Development*.
29. Hossain, M. K., Miah, M. S., & Rahman, M. M. (2021). Soil erosion assessment using the RUSLE model, remote sensing, and GIS in the Shatt Al-Arab basin. *Water*, 13(24), 3511. <https://doi.org/10.3390/w13243511>
30. Ip, S. C. Y., Satyanaga, A., & Rahardjo, H. (2021). Spatial variation of shear strength properties incorporating auxiliary variables. *Catena*, *203*, 105196. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105196>
31. Ivanov, N. M., Davies, R. A., & Petrova, L. T. (2023). Assessment of rainfall erosivity and its variability across different agro-ecological zones in Central Asia. *Soil and Tillage Research*.
32. Jemai, S., Kallel, A., Agoubi, B., & Abida, H. (2021). Soil erosion estimation in arid area by USLE model applying GIS and RS: Case of Oued El Hamma catchment, south-eastern Tunisia. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(6), 1293-1305.
33. Jiang, Z., He, Y., Zhao, G., Li, Z., Yuan, Q., & Liu, L. (2020). Quantitative evaluation of the spatial variation of surface soil properties in a typical alluvial plain of the lower Yellow River using classical statistics, geostatistics, and single fractal and multifractal methods. *Applied Sciences, 10*(17), 5796. <https://doi.org/10.3390/APP10175796>
34. Karakoyun, E., & Kaya, N. (2022). Hydrological simulation and prediction of soil erosion using the SWAT model in a mountainous watershed: a case study of Murat River Basin, Turkey. *Journal of Hydro informatics*, 24(6), 1175-1193.
35. Karami, M., Keshavarzi, A., & Abbasi, M. (2022). Soil erosion estimation using RUSLE model under different land use scenarios in Iran. *Environmental Earth Sciences*, 10532. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10532-3>
36. Kenny, A. (2022). Assessing the accuracy of interpolation methods to map soil properties at regional scale in Extremadura (SW Spain). *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 24, 11074. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11074>.
37. Khalili Vavdareh, S., Shahnazari, A., & Sarraf, A. (2022). Investigating Anzali Wetland Sediment Estimation Using the MPSIAC Model. *Frontiers in Earth Science*, 10, 736125.
38. Kumar, R., Sharma, P., & Gupta, V. (2022). Application of IDW interpolation method for soil moisture estimation in arid regions of India. *Geoderma*, 115340. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115340>.
39. Liu, Y. R., Yan, X., Xie, Y., & Wang, W. (2019). Effects of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion from furrow diking under simulated rainfall. *Catena*, 175*, 224-231. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.02.004>
40. Lopez, J. H., Sanchez, A. M., & Fernandez, R. V. (2021). Assessment of vegetation cover and its impact on soil erosion using NDVI and C factor in the Mediterranean region. *Journal of Environmental Management*.
41. López, J., Serrano, J., & Vargas, P. (2023). Evaluating soil erosion and sediment yield using RUSLE model in semi-arid regions of Spain. *Catena*, 106537. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106537>
42. Madhukar, A., Hari, N., Srivalli, R., & Neelima, T. L. (2023). Spatial Estimation of Soil Erosion Using RUSLE Model: A Case Study of Sangareddy Telangna State, India. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(18), 490-498.
43. Mahdavi, M., Hosseini, S., & Dehghani, S. (2023). Cokriging for improving soil salinity mapping in irrigated areas using auxiliary data. *Journal of Arid Environments*, 104957. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104957>.

44. Martínez, J., Fernández, M., & García, L. (2024). Impact of land use changes on soil erosion in a semi-arid watershed using RUSLE. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28, 345-355. <https://doi.org/10.5194/hess-28-345-2024>
45. Mazigh, N., Taleb, A., El Bilali, A., & Ballah, A. (2022). The effect of erosion control practices on the vulnerability of soil degradation in Oued EL Malleh catchment using the USLE model integrated into GIS, Morocco. *Trends in Sciences*, 19(2), 2059-2059.
46. Meyer, L. B., Fischer, T. J., & Schmidt, H. M. (2022). Influence of slope and elevation on soil erosion in agricultural watersheds: Insights from a Central European study. **Journal of Soil and Water Conservation**.
47. Mikołaj, M., Czuchaj, A., & Marciniak, M. (2023). Impact of rainfall intensity on soil erosion based on experimental research. **Landform Analysis**. <https://doi.org/10.12657/landfana-042-002>
48. Mondal, C., Karim, M., & Ghosh, S. (2024). Utilizing GIS and remote sensing for soil loss estimation in Kopai River basin: An application of the RUSLE model. **Proceedings of the Indian National Science Academy**. <https://doi.org/10.1007/s43538-024-00283-0>
49. Motamedirad, M., Zangane Asadi, M. A., & Ajam, H. (2023). Investigating the rate of soil erosion and sediment production using the RUSLE model and the modified method PSIAC (case study: kal basin of Ismail, Shahrood city, Semnan province). *Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 147-165.
50. Moutaoikil, N., Benzougagh, B., Mastere, M., El Fellah, B., & Lamrani, H. (2023). The impact of soil erosion on environments: A case study of the Oued Beht Watershed (Morocco). **BIO Web of Conferences**. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411501006>
51. Musa, O. I., Samuel, J., Adams, M. V., Abdulsalam, M., Nathaniel, V., Mohammed, A., Maude, O., Adedayo, J., & Tihamiyu, A. T. (2023). Soil erosion, mineral depletion and regeneration. **Earth and Environmental Sciences Library**. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53270-2_7
52. Ndlovu, V., Moyo, P., & Dube, S. (2024). Using DSM to improve soil erodibility factor estimations for RUSLE in Sub-Saharan Africa. **Environmental Research**. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.115936>.
53. Nozari, S., Pahlavan-Rad, M. R., Brungard, C. W., Heung, B., & Borůvka, L. (2024). Digital soil mapping using machine learning-based methods to predict soil organic carbon in two different districts in the Czech Republic. **Soil and Water Research**. <https://doi.org/10.17221/119/2023-SWR>
54. Odoh, B.I., C., P., Arukwe-Moses., C., V., Ahaneku., Glory, E., Nwafor., T., E., Onyebum., Ogonna, T., Emenaha., Chijioke, V., Orabueze., Irene, C., Meniru., E., J., Amasiani., O., G., Ozoemena. (2024). 4. The Implications of Geotechnical Properties of Soil in the Development of Gully Erosion in Ukpör, Southeastern Nigeria. *International journal of research and innovation in applied science*, doi: 10.51584/ijrias.2024.907064.
55. Peters, A. C., Morgan, D. W., & Harrison, E. F. (2022). Assessment of soil erodibility in relation to soil texture and organic matter content: A case study in Northern Europe. **Catena**.
56. Peterson, R. A., Martin, L. T., & Wright, H. S. (2024). Vegetation index and erosion control: Analyzing NDVI and C factor in high-gradient mountainous areas. *Earth Surface Processes and Landforms*.
57. Qianqian, C., Richer-de-Forges, A. C., Chen, S., Vaudour, E., Bispo, A., & Arrouays, D. (2024). Uncertainty in digital soil mapping at broad scale: A review. **EGU General Assembly 2024**, 6005. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-6005>
58. Qin, R., Xiao, L., Farella, E. M., & Remondino, F. (2022). Uncertainty-guided depth fusion from multi-view satellite images to improve the accuracy in large-scale DSM generation. **Remote Sensing**, 14(6), 1309. <https://doi.org/10.3390/rs14061309>
59. Roberts, C. D., Green, A. L., & Taylor, R. P. (2022). Soil erosion control practices in agricultural and forested areas: Impacts and effectiveness. *Soil Science Society of America Journal*.

60. Sartori, M., Ferrari, E., M'barek, R., Philippidis, G., Boysen-Urban, K., Borrelli, P., Montanarella, L., & Panagos, P. (2023). Remaining loyal to our soil: A prospective integrated assessment of soil erosion on global food security. **Ecological Economics**. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108103>
61. Sharma, R. K., Gupta, M. S., & Joshi, P. N. (2021). Topographic factors and their impact on soil erosion: A case study in the Himalayan region. **Geomorphology**.
62. Sidi Almouctar, M. A., Wu, Y., Zhao, F., & Dossou, J. F. (2021). Soil erosion assessment using the RUSLE model and geospatial techniques in South-Central Niger (Maradi Region). *Water*, 13(24), 3511. <https://doi.org/10.3390/w13243511>.
63. Singh, S., & Sarma, K. (2023). Exploring soil spatial variability with GIS, remote sensing, and geostatistical approach. **Journal of Spatial Analysis and Environmental Studies**, 2*(1), 186. <https://doi.org/10.56946/jspae.v2i1.186>
64. Smith, J. R., Johnson, L. T., & Brown, M. P. (2021). Soil erosion and its relationship with soil properties: A regional study in the Mediterranean Basin. **Soil Science Society of America Journal**.
65. Smith, P., Johnson, J. W., & Green, A. M. (2024). Impact of topographic and climatic factors on rainfall erosivity: A case study from the Southern Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*.
66. Stumpf, F., Behrens, T., Schmidt, K., & Keller, A. (2024). Exploiting soil and remote sensing data archives for 3D mapping of multiple soil properties at the Swiss national scale. **Remote Sensing*, 16*(15), 2712. <https://doi.org/10.3390/rs16152712>
67. Vale, S. S., Smith, H., Davies-Colley, R. J., Dymond, J. R., Hughes, A. O., Haddadchi, A., & Phillips, C. (2022). The influence of erosion sources on sediment-related water quality attributes. **Science of The Total Environment**, 803*, 149989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160452>
68. Wang, L., Zhou, J., & Li, Q. (2023). Application of digital soil mapping techniques for RUSLE input parameter estimation in a semi-arid region. **Geoderma**. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.115402>
69. Wang, W., Chen, X., Chen, Y., & Li, Z. (2022). "Simulation of soil erosion and sediment yield using the WEPP model in a semi-arid watershed." *Journal of Arid Environments*, 195, 104616.
70. Wilson, M. R., Edwards, H. K., & Brown, J. T. (2021). Effectiveness of erosion control measures in steep mountainous regions: A comparative study. *Journal of Soil and Water Conservation*.
71. Xiong, M., Leng, G., & Tang, Q. (2023). Global analysis of the cover-management factor for soil erosion modeling. *Remote Sensing*, 15(11), 2868. <https://doi.org/10.3390/rs15112868>.
72. Yang, Q., Ni, S., Zhang, C., & Wang, J. (2024). Soil erosion-induced decline in aggregate stability and soil organic carbon reduces aggregate-associated microbial diversity and multifunctionality of agricultural slope in the Mollisol region. **Land Degradation & Development**. <https://doi.org/10.1002/ldr.5163>
73. Yuda, R., & Ahmad, H. (2023). Prediction of erosion in hilly areas of Khilau sub-sub watershed using the RUSLE method. **ASEAN Engineering Journal**, 13*, 19238. <https://doi.org/10.11113/aej.v13.19238>
74. Zeynali, H., & Hajigholizadeh, M. (2023). "Soil erosion and sediment yield estimation in a semi-arid basin using PSIAC model." *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 54.
75. Zhang, Y., Liu, H., & Wang, X. (2023). Polynomial interpolation for spatial variability analysis of soil nutrients in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 12345. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12345-9>.
76. Zhenzhi, Z., Fangshi, J., Peisong, C., Pengyu, G., Jinshi, L., Hongli, G., Ming, K. W., & Yanhe, H. (2020). Effect of gravel content on the sediment transport capacity of overland flow. **Catena**. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104447>