

Spatial assessment of soil erosion using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in the Google Earth Engine platform

Omid Khorashadizadeh^{1*}, Elham Ghochanian Haghverdi²

¹South Khorasan Regional Water Company, Iran Water Resources Management Company, Birjand, Iran.

²Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran, Soil and Water Research Expert, South Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Birjand, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 13 February 2026

Revised 30 April 2026

Accepted 05 May 2026

Published online 23 September 2026

Keywords:

Soil erosion risk mapping

RUSLE model

Google Earth Engine (GEE)

Siahoo Dam Watershed

Arid Regions

ABSTRACT

Objective: Soil erosion is one of the most critical environmental challenges in arid and semi-arid regions, threatening the sustainability of water and soil resources and increasing sedimentation in reservoir systems. The aim of this study was to quantitatively estimate and spatially map soil erosion risk in the Siahoo Dam watershed, located in South Khorasan Province, eastern Iran.

Methods: In this research, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model was implemented within the Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform. The use of this platform enabled the processing of large volumes of satellite data without the need for local computational resources. Five main RUSLE factors were derived and analyzed, including rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), topographic factor (LS), land use/land cover (C), and conservation practice factor (P). The R factor was calculated using 20 years of CHIRPS precipitation data. The K factor was derived by integrating soil texture maps and geological information. The LS factor was generated using the 30-meter SRTM digital elevation model. The C factor was extracted from ESA land cover products and Sentinel imagery, while the P factor was assigned based on slope classes and land use patterns.

Results: The results showed that the soil erodibility factor (K) was 0.029 ($t \cdot ha \cdot h / ha \cdot MJ \cdot mm$), indicating a relatively high susceptibility of the regional soils to water erosion. Soil erosion was unevenly distributed across the watershed. Based on model outputs and the FRWMO classification criteria, approximately 65.8% of the watershed was classified as very low erosion ($0-10 t ha^{-1} yr^{-1}$), 20% as low to moderate erosion ($10-40 t ha^{-1} yr^{-1}$), and nearly 14% as high to very high erosion ($>40 t ha^{-1} yr^{-1}$). The mean annual soil loss was estimated at $15-20 t ha^{-1} yr^{-1}$, demonstrating the effectiveness of the proposed approach for spatial erosion assessment.

Conclusions: The findings of this study demonstrate that integrating remote sensing with hydrological modeling in the GEE environment offers a rapid, scalable, and high-precision approach for identifying erosion-prone areas.

*Corresponding author, E-mail: O.khorashadi@skhrw.ir

Cite this article: Khorashadizadeh, Omid., & Ghochanian Haghverdi, Elham. (2026). Spatial assessment of soil erosion using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in the Google Earth Engine platform. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(3), 127-144. <https://doi.org/10.22034/nawee.2026.575555.1196>.



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22034/nawee.2026.575555.1196>

Publisher: Gonbad Kavous University.

Introduction

Soil erosion induced by water is widely recognised as one of the principal drivers of land degradation, with profound environmental, economic, and social consequences. Beyond the direct loss of fertile topsoil, accelerated erosion contributes to declining agricultural productivity, deterioration of ecosystem services, and excessive sediment deposition in rivers and reservoirs. These impacts are especially pronounced in arid and semi-arid environments, where limited vegetation cover and intense rainfall events enhance soil susceptibility to detachment and transport.

Iran is among the countries facing significant challenges related to soil erosion and sediment production. Identifying critical source areas and quantifying erosion rates are therefore fundamental prerequisites for implementing targeted conservation interventions. Among the available erosion prediction models, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) has gained widespread acceptance owing to its relative simplicity, modest data requirements, and adaptability to different environmental conditions.

Recent advances in remote sensing technologies and cloud-based geospatial platforms have substantially improved the capacity to perform large-scale environmental assessments. Google Earth Engine, in particular, enables rapid processing of extensive spatial datasets without the need for high-performance local computing infrastructure. Despite the importance of the Siahoo Dam watershed as a strategic water resource in eastern Iran, comprehensive spatial assessments of erosion risk in this basin remain limited. Accordingly, this study aimed to estimate annual soil loss and identify erosion hotspots in the Siahoo Dam watershed using the RUSLE model implemented in the Google Earth Engine platform.

Methods

The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model, a globally recognized empirical framework, was implemented within the Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform to estimate annual soil loss across the watershed. The use of GEE facilitated the processing of large-scale satellite datasets without the need for high-performance local computing power. To execute the model, five key factors were integrated: Rainfall Erosivity (R), calculated using 20 years of precipitation data from the CHIRPS satellite dataset to capture long-term variability. Soil Erodibility (K), representing the inherent resistance of soil to particle detachment, derived from a combination of soil texture maps and geological data. Topographic Factor (LS), which accounts for the influence of slope length and steepness on runoff erosivity, generated from the 30-meter SRTM Digital Elevation Model (DEM). Cover-Management Factor (C), extracted from ESA and Sentinel land use/land cover products to represent vegetation density and land management conditions and Support Practice Factor (P), assigned based on slope categories and land-use patterns to reflect erosion control measures. All spatial analyses were performed in the GEE cloud environment, enabling rapid processing and high-resolution mapping

Results

The analysis revealed considerable spatial variation in the RUSLE factors throughout the watershed. Rainfall erosivity values ranged from approximately 122.8 to 144.4 (MJ mm ha⁻¹

$\text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$), with the highest values concentrated in the north-western part of the basin. The soil erodibility factor was estimated at $0.029 (\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$, reflecting a relatively high sensitivity of the regional soils to water erosion. Substantial variability was also observed in the LS factor, reflecting the influence of terrain characteristics on runoff concentration and erosive power. The C factor ranged from 0 to 1, highlighting the critical role of vegetation cover in reducing soil loss. Likewise, P values varied between 0.55 and 1, suggesting differences in the effectiveness and distribution of conservation measures across the watershed.

The resulting erosion map indicated that the majority of the watershed (65.8%) experienced very low erosion rates. Low and moderate erosion classes occupied 9.83% and 9.96% of the basin, respectively. In contrast, high and very high erosion classes encompassed 4.95% and 9.37% of the study area. Areas identified as erosion hotspots were generally associated with steep terrain, sparse vegetation, elevated LS values, and insufficient protective measures. These findings suggest that, although much of the watershed experiences relatively low erosion, a substantial proportion remains vulnerable to severe soil loss and therefore warrants immediate conservation attention. The estimated mean annual soil loss of $15\text{--}20 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ reflects a moderate level of erosion at the watershed scale, while underscoring the urgent need for targeted interventions in high-risk areas to minimise sediment delivery to the Siahoo Dam reservoir.

Conclusions

This study demonstrated the effectiveness of integrating the RUSLE model with the Google Earth Engine platform for the rapid and reliable assessment of soil erosion risk in the Siahoo Dam watershed. The resulting erosion susceptibility maps provide valuable insights for prioritising watershed management interventions and allocating conservation resources more efficiently. Implementing measures such as revegetation, controlled grazing, contour cultivation, and other soil conservation practices in identified hotspot areas could substantially reduce soil loss and sediment yield. Furthermore, the methodology presented here offers a practical and transferable framework for erosion assessment in data-limited regions.



ارزیابی مکانی فرسایش خاک با استفاده از مدل بازنگری شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) در سامانه Google Earth Engine

امید خراشادیزاده^{۱*}، الهام قوچانیان حقوردی^۲

^۱ شرکت آب منطقه ای خراسان جنوبی، شرکت مدیریت منابع آب، بیرجند، ایران.

^۲ گروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران و کارشناس بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان جنوبی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بیرجند، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: فرسایش خاک یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی در مناطق خشک و نیمه خشک است که پایداری منابع آب و خاک را تهدید کرده و موجب افزایش رسوب گذاری در مخازن سدها می شود. هدف این پژوهش، برآورد کمی و پهنه بندی مکانی خطر فرسایش خاک در حوضه آبریز سد سیاهو، واقع در استان خراسان جنوبی در شرق ایران، می باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱۱/۲۴	مواد و روش ها: در این مطالعه از مدل بازنگری شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) در بستر سامانه Google Earth Engine (GEE) استفاده شد. بهره گیری از این سامانه، امکان پردازش حجم بالای داده های ماهواره ای را بدون نیاز به توان محاسباتی محلی فراهم کرد. برای اجرای مدل، پنج عامل اصلی شامل فرسایندها (R)، فرسایش پذیری خاک (K)، عامل توپوگرافی (LS)، پوشش و کاربری اراضی (C) و عامل عملیات حفاظتی (P) تولید و تحلیل شدند. عامل R با استفاده از داده های ۲۰ ساله بارش CHIRPS محاسبه شد. عامل K از ترکیب نقشه های بافت خاک و اطلاعات زمین شناسی استخراج گردید. عامل LS با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت ۳۰ متر محاسبه شد. عامل C بر اساس محصولات پوشش زمین ESA و داده های Sentinel استخراج شد و عامل P نیز بر مبنای طبقات شیب و الگوهای کاربری اراضی تعیین گردید.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰	نتایج و بحث: نتایج نشان داد که ضریب فرسایش پذیری خاک (K) برابر با $0/029 (t \cdot ha \cdot h / ha \cdot MJ \cdot mm)$ بوده که بیانگر حساسیت نسبتاً بالای خاک های منطقه به فرسایش آبی است. فرسایش خاک در سطح حوضه به طور یکنواخت توزیع نشده بود. بر اساس خروجی های مدل و معیارهای طبقه بندی سازمان جنگل ها، مراتع و آبخیزداری کشور، حدود ۶۵/۸ درصد از مساحت حوضه در کلاس فرسایش بسیار کم (۰ تا ۱۰ تن در هکتار در سال)، ۲۰ درصد در کلاس فرسایش کم تا متوسط (۱۰ تا ۴۰ تن در هکتار در سال) و نزدیک به ۱۴ درصد در کلاس های فرسایش زیاد تا بسیار زیاد (بیش از ۴۰ تن در هکتار در سال) قرار گرفتند. میانگین فرسایش سالانه خاک بین ۱۵ تا ۲۰ تن در هکتار در سال برآورد شد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵	نتیجه گیری: نتایج نشان داد که ترکیب سنجش از دور و مدل های هیدرولوژیکی در بستر GEE، ابزاری سریع، مقیاس پذیر و با دقت بالا برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش فراهم می کند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	
کلیدواژه ها: پهنه بندی خطر فرسایش مدل RUSLE سامانه Google Earth Engine سد سیاهو مناطق خشک.	

*نویسنده مسئول، Email: o.khorashadi@skhrw.ir

استناد: خراشادیزاده، امید و قوچانیان حقوردی، الهام (۱۴۰۵). ارزیابی مکانی فرسایش خاک با استفاده از مدل بازنگری شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) در سامانه Google Earth Engine. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۵ (۳)، ۱۴۴-۱۲۷.

<https://doi.org/10.22034/nawee.2026.575555.1196>



مقدمه

خاک منبعی غیر قابل تجدید است که تامین ۹۵ درصد از تولید غذای جهان به آن وابسته است (FAO, 2015b). کشاورزی پایدار به کیفیت خاک وابسته است، اما بهره‌برداری بیش از حد از زمین موجب افزایش فرسایش خاک، از دست رفتن تنوع زیستی، کاهش بهره‌وری و در نهایت تخریب اکوسیستم می‌شود (Pimentel and Kounang, 1998; Ganasri and Ramesh, 2016). از آنجاکه تشکیل تنها یک سانتی‌متر خاک می‌تواند تا ۱۰۰۰ سال زمان ببرد (FAO, 2015a)، نرخ فعلی فرسایش که ۱۰ تا ۴۰ برابر سریع‌تر از سرعت تشکیل آن است، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و پایداری منابع طبیعی محسوب می‌شود. فرسایش خاک، عامل اصلی تخریب زمین در حوضه‌های آبخیز است، این مشکل تهدیدی جدی برای امنیت غذایی در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود، زیرا باعث تخریب زمین‌های زراعی، افزایش انتقال رسوب در رودخانه‌ها و بروز مشکلاتی مانند رسوب‌گذاری در مخازن سدها می‌گردد (Ganasri & Ramesh 2016). پیامدهای فرسایش خاک فراتر از کاهش حاصلخیزی اراضی زراعی است. این پدیده با افزایش انتقال رسوب به رودخانه‌ها، موجب کاهش کیفیت آب‌های سطحی و آلودگی منابع آبی می‌گردد (Issaka and Ashraf, 2017). علاوه بر این، انباشت رسوب در مناطق پایین‌دست، ظرفیت مفید مخازن سدها را کاهش داده و با کوتاه‌کردن عمر مفید آن‌ها، تولید انرژی برق‌آبی و مدیریت منابع آب را با چالش جدی مواجه می‌سازد (Kondolf et al., 2014). بنابراین، سنجش دقیق نرخ از دست رفتن خاک برای تدوین راهبردهای حفاظتی و کاهش خسارات اقتصادی-زیستی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است (Lal, 1998). برای مدیریت بهینه فرسایش خاک، پژوهشگران راهبردهای حفاظتی متعددی را با تکیه بر مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی توسعه داده‌اند (Pratiksha & Raaj, 2018). در این میان، از روش‌های تجربی، آماری و فیزیکی گوناگونی در مقیاس‌های منطقه‌ای استفاده شده است (Khemiri & Jebari, 2021). در حالی که مدل‌های فیزیکی نیازمند پارامترها و داده‌های ورودی بسیار زیادی هستند، مدل‌های تجربی به دلیل سادگی و نیاز اندک به داده، ابزاری کارآمد در شناسایی مناطق در معرض خطر محسوب می‌شوند (Bouguerra, 2018). شاخص‌ترین این مدل‌ها، معادله جهانی از دست رفتن خاک (USLE) است که در سال ۱۹۶۵ معرفی شد و پس از ارائه نسخه اصلاح‌شده (MUSLE) در سال ۱۹۷۵، در نهایت به شکل مدل بازنگری‌شده (RUSLE) در سال ۱۹۹۷ توسعه یافت (Renard et al., 1997). مدل RUSLE تمامی عوامل مؤثر در فرسایش آبی را در قالب پنج عامل اصلی، فرسایش‌پذیری بارش، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و اقدامات حفاظتی محاسبه می‌کند. سازگاری بالای این مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS)، امکان برآورد مکانی و زمانی نرخ فرسایش را به صورت سلول به سلول در مقیاس‌های بزرگ فراهم کرده است (Sharma and Sharma, 2022). با این حال، آماده‌سازی و پردازش کلان‌داده‌ها در محیط‌های سنتی GIS همچنان زمان‌بر و پرهزینه است. برای رفع این محدودیت، از سال ۲۰۱۰ پلتفرم پردازش ابری گوگل ارث انجین (GEE) معرفی شد که فرآیند تحلیل آنلاین تصاویر ماهواره‌ای را به سرعت تسهیل کرده است (Nghia et al., 2022; Ang et al., 2021).

Wang & Zhao (2020) با استفاده از سامانه GEE نرخ فرسایش در حوضه رودخانه تاهو چین را برآورد کردند. همچنین Elnashar et al (2021) به تخمین میانگین فرسایش در بخش‌های مختلف حوضه نیل آبی پرداختند و (Petito et al (2022) نیز تأثیر مثبت کشاورزی حفاظتی بر کاهش فرسایش در جنوب ایتالیا را با کمک سامانه GEE تایید کردند. در هر سه مطالعه یادشده، از مدل RUSLE و سامانه GEE برای برآورد فرسایش خاک استفاده شد. علاوه بر این، مطالعات دیگری تأثیر تغییرات کاربری و پوشش زمین (LULC) را بر شدت فرسایش در مناطق مختلف جهان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند (Alkharabsheh et al., 2013; Gong et al., 2022; ; El Jazouli et al., 2019; Uddin et al., 2018). در مجموع، نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مدل RUSLE به دلیل توانایی در برآورد دقیق نرخ از دست رفتن خاک در کاربری‌های مختلف زمین، از اعتبار و صحت بالایی برخوردار است. ترکیب این مدل با توان محاسباتی بالای سامانه GEE، نه تنها سرعت پردازش داده‌های بلندمدت را افزایش می‌دهد، بلکه با تولید نقشه‌های دقیق پهنه‌بندی، بستری مناسب برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در طرح‌های حفاظت خاک و آبخیزداری فراهم می‌آورد (Salazar et al., 2024; Uddin et al., 2018).

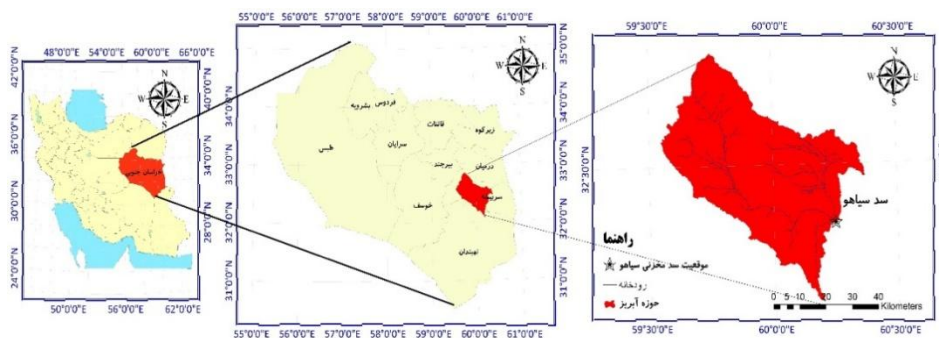
Kushwaha & Yousuf (۲۰۱۷)، در مطالعه مروری خود بر کاربرد مدل RUSLE، اذعان داشتند که ترکیب این مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و داده‌های سنجش از دور، ابزاری قدرتمند، کم‌هزینه و دقیق برای تخمین هدررفت خاک در مقیاس حوضه فراهم می‌آورد. آن‌ها تأکید کردند که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در استخراج پارامترهای پوشش گیاهی، سرعت و دقت برآورد فرسایش را در مناطق فاقد آمار کافی به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. (Salazar et al (2024) در مطالعه‌ای جامع، فرسایش خاک را در مقیاس حوضه آبخیز اکوادور طی یک بازه ۲۰ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰) مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با بهره‌گیری از مدل RUSLE در محیط GIS و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا در سامانه GEE، به تحلیل پویایی‌های زمانی و مکانی هدررفت خاک پرداختند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده همبستگی شدید میان تغییرات کاربری اراضی و نرخ فرسایش بود، به‌طوری‌که تبدیل جنگل‌ها به اراضی کشاورزی در مناطق کوهستانی، منجر به افزایش چشمگیر نرخ فرسایش در این مناطق شده است. آن‌ها تأکید کردند که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سری‌های زمانی طولانی‌مدت، دقت شناسایی پهنه‌های بحرانی را برای مدیریت پایدار خاک به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

علیرغم مطالعات گسترده جهانی، تاکنون پژوهشی جامع که از قابلیت‌های محاسبات ابری GEE برای تحلیل بلندمدت و پیوسته فرسایش خاک در حوضه‌های آبریز سدهای تازه‌احداث شرق ایران استفاده کرده باشد، گزارش نشده است. این منطقه به دلیل اقلیم خشک، فقر پوشش گیاهی و وقوع بارش‌های حدی، پتانسیل بالایی در تولید رسوب دارد. با توجه به هزینه‌های سنگین احداث سدها، عدم وجود یک سیستم پایش مکانی دقیق که بتواند تغییرات فرسایش را در بازه‌های زمانی طولانی‌مدت تحلیل کند، یک خلأ اطلاعاتی جدی در مدیریت حوضه‌های آبخیز این منطقه محسوب می‌شود. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در تلفیق مدل بازنگری شده جهانی فرسایش خاک با بستر پردازش ابری Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) جهت تحلیل مکانی فرسایش خاک بر اساس داده‌های ۲۰ ساله بارش و پوشش زمین، در یکی از مهمترین حوضه‌های آبریز استان خراسان جنوبی است. این رویکرد علاوه بر افزایش سرعت و دقت در پردازش داده‌های ماهواره‌ای، امکان پایش دقیق پهنه‌های بحرانی را فراهم می‌آورد. بر همین اساس، هدف این پژوهش برآورد فرسایش خاک در حوضه آبریز سد سیاهو واقع در استان خراسان جنوبی، با بهره‌گیری از مدل RUSLE در محیط Google Earth Engine است. بدین‌منظور، ضمن تهیه لایه‌های مکانی عوامل مؤثر که شامل بارش، فرسایش‌پذیری خاک، شیب و طول دامنه، پوشش و کاربری زمین و اقدامات حفاظتی است، میزان فرسایش سالانه خاک محاسبه خواهد شد و پهنه‌های بحرانی فرسایش مشخص می‌گردد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی علمی و عملیاتی برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و مدیریت پایدار خاک در طرح‌های آبخیزداری منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد سیاهو به‌عنوان بزرگ‌ترین سد مخزنی از نوع خاکی در خراسان جنوبی است که در طول جغرافیایی ۶۰/۱۵ و عرض جغرافیایی ۳۲/۱۷ قرار دارد و این سد در سال ۱۴۰۰ به بهره‌برداری رسید. سطح حوزه آبخیز آن ۳۰۲۸ کیلومتر مربع است که شیب متوسط حوضه آن ۰/۷ درصد و طول بلندترین آبراهه ۱۲۰ کیلومتر و متوسط بارندگی در سطح حوضه بالادست ۱۳۱ میلی‌متر می‌باشد. سد سیاهو در ۶۵ کیلومتری شهرستان سربیشه بر روی رودخانه سیاهو احداث گردیده است. ساختار زمین‌شناسی منطقه مجموعه‌ای متنوع از واحدهای رسوبی، آذرین و آتشفشانی را در بر می‌گیرد. این واحدها شامل توالی‌های آواری و کربناته (تریاس و ژوراسیک)، مجموعه رسوبی-ولکانیکی کرتاسه (رنگین کمان سنگی یا Colored Melange) و همچنین رسوبات تخریبی و آتشفشانی دوران‌های پالئوسن تا نئوژن است. علاوه بر این، رخساره‌های دگرگونی کرتاسه بالایی، زون فلیش شرق ایران و توده‌های نفوذی پالئوژن، تنوع لیتولوژیکی منطقه را تکمیل می‌کنند. در شکل (۱) موقعیت سد سیاهو و حوزه آبخیز آن نشان داده شده است.



شکل ۱- محدوده حوضه آبخیز سیاهو در شهرستان سربیشه

منابع داده و پردازش

در این پژوهش از سامانه google earth engine برای استخراج داده‌های مدل رقومی ارتفاع، کاربری و پوشش زمین، میانگین بارندگی سالانه و نقشه رقومی خاک استفاده شد. داده‌های مدل رقومی ارتفاع از ماهواره SRTM با تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه گردید. داده‌های بارش روزانه از ماهواره CHIRPS استخراج شد که ترکیبی از مشاهدات ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه زمینی بوده و به صورت روزانه در مقیاس منطقه‌ای ارائه می‌شود. همچنین داده‌های پوشش زمین از پکیج ESA WorldCover که مبتنی بر ترکیب تصاویر ماهواره‌های Sentinel 1 و Sentinel 2 با تفکیک مکانی ۱۰ متر است، تهیه شد.

روش تحقیق

در این مطالعه، از مدل بازنگری جهانی فرسایش خاک در ترکیب با تصاویر google earth engine برای برآورد فرسایش سالانه در حوضه آبریز منتهی به سد سیاهو استفاده شد. RUSLE یکی از پرکاربردترین و معتبرترین مدل‌های تجربی است که برای برآورد میانگین سالانه فرسایش به کار می‌رود. این مدل شامل عوامل فرساینده بارش-رواناب (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و شیب دامنه (LS)، مدیریت پوشش (C) و اقدامات حفاظتی (P) است. فرمول اصلی این مدل برای پیش‌بینی فرسایش سالانه خاک به صورت زیر می‌باشد:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

که در آن: A: میانگین سالانه هدر رفت خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال) که نشان‌دهنده مقدار کل خاک از دست‌رفته در واحد زمان و مساحت است.

R: عامل فرساینده باران (مگاژول میلی متر در هکتار بر ساعت در سال) که توان بارندگی در جدا کردن و جابجایی ذرات خاک را نشان می‌دهد. هرچه شدت و انرژی بارش بیشتر باشد، مقدار R نیز بالاتر خواهد بود. عامل فرساینده بارش عددی نسبی است.

K: عامل فرسایش‌پذیری خاک (تن ساعت بر مگاژول میلی متر) که حساسیت ذرات خاک نسبت به جدا شدن و حمل در اثر ضربه قطرات باران یا رواناب را بیان می‌کند. این عامل به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند بافت، ساختمان و مواد آلی بستگی دارد.

LS: عامل ترکیبی طول و شیب دامنه، که اثر طول و شیب دامنه را بر شدت فرسایش بیان می‌کند. با افزایش شیب یا طول دامنه، انرژی رواناب و در نتیجه میزان فرسایش افزایش می‌یابد.

C: عامل پوشش گیاهی و کاربری اراضی که میزان محافظت پوشش گیاهی، زراعی یا کاربری زمین در برابر فرسایش را نشان می‌دهد. مقادیر پایین C بیانگر پوشش متراکم مثلاً جنگل‌ها و مقادیر بالا نشان‌دهنده زمین‌های بایر یا کشاورزی بدون پوشش حفاظتی است.

P: عامل اقدامات حفاظتی و مدیریت زمین که اثر اقدامات ضد فرسایشی مانند تراسبندی، خطوط تراز یا شخم حفاظتی را در کاهش رواناب و فرسایش در نظر می‌گیرد. مقادیر پایین‌تر P نشان‌دهنده وجود اقدامات حفاظتی مؤثرتر است.

عامل های C، LS و P بدون واحد هستند.

۱- عامل فرساینده‌گی بارش (R)

عامل R نشان دهنده‌ی توان فرسایشی بارش‌ها است و بیان می‌کند که شدت و مدت بارندگی چه میزان در ایجاد و تشدید فرسایش خاک مؤثرند. درواقع، فرسایش آبی به‌طور مستقیم وابسته به وقوع و ویژگی‌های بارش است. هرچه باران شدیدتر و طولانی‌تر باشد، انرژی جنبشی قطرات باران بیشتر شده و درنتیجه میزان فرسایش خاک افزایش می‌یابد (Talchabhadel et al., 2020; Kamuju., 2016). عامل فرساینده‌گی بارش با استفاده از فرمولی که توسط پژوهشگرانی از جمله (Patel and Pandey., 2016; Saha and Mandal., 2022) برای محاسبه عامل فرساینده‌گی بارش به‌کاررفته است محاسبه شد.

$$R=(0/38 P) + 81/5$$

(۲)

R = میانگین سالانه فرساینده‌گی باران (مگاژول میلی متر بر هکتار ساعت) و P = میانگین سالانه بارندگی (میلی متر) عامل بارش با استفاده از میانگین بارش سالانه محاسبه شد. داده های بارش ۲۰ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۲) از ماهواره CHIRPS استخراج گردید. سپس از رابطه تجربی (۲) استفاده شد.

۲- عامل فرسایش پذیری خاک (K)

عامل فرسایش پذیری خاک (K)، یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین فرسایش در مدل RUSLE است و به‌ویژگی‌های خاک مانند نفوذپذیری، ساختمان و مقدار ماده آلی بستگی دارد. هرچه مقدار K بیشتر باشد، حساسیت خاک به فرسایش بیشتر است. عوامل مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک شامل: ساختار خاک و پایداری آن، تشکیل پوسته سطحی، حالت پراکندگی ذرات، میزان ماده آلی خاک و بافت خاک است. به‌عبارت دیگر، خاک‌های با ماسه زیاد و ماده آلی بالا، مقاومت بیشتری در برابر فرسایش دارند. درحالی‌که خاک‌های سیلتی و فاقد ماده آلی، حساس‌تر به فرسایش هستند (Yusron & Eko., 2023; Roose & Sarrailh., 1990).

$$K=3/25(S-2)+2/25(P-3)*(12-OM)*(2/1*10^{-4}))/100$$

۳

OM = درصد ماده آلی خاک، M = مجموع درصد سیلت و شن ریز ضرب در (درصد رس - ۱۰)، S = شاخص مربوط ساختمان خاک، P = شاخص مربوط به نفوذپذیری خاک است.

عامل K بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل درصد سیلت، شن و رس و سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک محاسبه شد. داده‌های خاک از نقشه رقومی خاک FAO (Digital Soil Map of the World) استخراج گردید. سپس با استفاده از معادله Wischmeier et al (1971)، مقدار K برای واحدهای خاکی منطقه محاسبه و به نقشه رقومی تبدیل شد. بر اساس ترکیب بافت خاک منطقه مورد مطالعه شامل ۴۷٪ شن، ۲۸٪ سیلت و ۲۳٪ رس است که با استناد به مثلث بافت خاک لومی است. این نوع بافت به دلیل دارا بودن نسبت‌های تقریباً برابر از ذرات شن، سیلت و رس، پتانسیل متوسطی برای نفوذپذیری دارد، اما حضور ۲۸ درصدی ذرات سیلت، حساسیت آن را در برابر جدایش ذرات توسط رواناب افزایش می‌دهد و با در نظر گرفتن سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک، مقدار عامل فرسایش پذیری خاک برابر با ۰.۲۲ (در واحد استاندارد آمریکایی) به دست آمد که جهت انطباق با سایر لایه‌ها و سیستم متریک به مقدار ۰.۰۲۹ (بر حسب تن ساعت بر مگاژول میلی متر) محاسبه شد که بیانگر فرسایش پذیری متوسط تا نسبتاً بالا برای خاک‌های منطقه است. میزان قابل توجه سیلت در کنار درصد متوسط رس می‌تواند موجب کاهش پایداری خاکدانه‌ها و افزایش حساسیت خاک نسبت به جدایش ذرات در اثر انرژی رواناب شود و خاک منطقه در برابر فرسایش مقاومت بالایی ندارد. لذا، اجرای اقدامات مدیریتی و حفاظتی خاک از جمله پوشش گیاهی مناسب، مدیریت بقایای گیاهی و کنترل رواناب سطحی، برای کاهش خطر فرسایش ضروری است.

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده برای محاسبه فرسایش پذیری خاک

مقدار هر جزء	مقداری که به هر واحد خاک در نقشه اختصاص داده می شود
47%	شن
28%	سیلت
23%	رس

۳- عامل توپوگرافی (LS)

این عامل نشان دهنده تأثیر توپوگرافی (پستی و بلندی) بر شدت فرسایش خاک است و از ترکیب دو جزء اصلی، یعنی عامل طول دامنه (L) و عامل شیب (S) تشکیل می شود. L طول مسیر جریان سطحی را از نقطه ای که رواناب آغاز می شود تا نقطه ای که یا ته نشینی رخ می دهد یا رواناب وارد یک کانال مشخص می شود، نشان می دهد. هرچه طول دامنه بیشتر باشد، حجم رواناب و در نتیجه فرسایش نیز افزایش می یابد (Ganasri and Ramesh. 2016; Lee., 2004).

S بیانگر تأثیر شیب زمین بر شدت فرسایش است. هرچه شیب بیشتر باشد، سرعت جریان رواناب افزایش یافته و توانایی آن برای جدا کردن و حمل ذرات خاک بیشتر می شود (Dutta et al., 2015).

عامل LS با استفاده از روش USPED که توسط (Wilson et al., 2000) محاسبه شد. این روش از ترکیب داده های شیب و تجمع جریان حاصل از مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) برای برآورد اثر توپوگرافی بر فرسایش استفاده می کند.

$$L=(m+1)*\left(\frac{\lambda_A}{22.1}\right)*m \quad (4)$$

A=سطح بالادست جریان، m=مقدار قابل تنظیم بسته به حساسیت خاک

$$S=\frac{\sin(0.01745*\theta)}{0.09} n \quad (5)$$

θ =زاویه شیب، n=مقدار قابل تنظیم بسته به شرایط خاک

$$LS=\text{power} \left(\text{Flow Accumulation} * \frac{\text{cell size}}{22.1}, 0.4 \right) * \text{power} \left(\frac{\sin(\text{sloperasterdeg} * 0.01745)}{0.09, 1.4} * 1.4 \right) \quad (6)$$

عامل LS با استفاده از مدل رقومی ارتفاع SRTM-DEM با تفکیک ۳۰ متر محاسبه شد. ابتدا نقشه های شیب و تجمع جریان (Flow Accumulation) استخراج گردید. سپس از روش USPED و روابط استاندارد ارائه شده توسط Wilson et al. (2000) برای ترکیب طول شیب (L) و شدت شیب (S) استفاده شد. نقشه LS در google earth engine با استفاده از توابع هیدرولوژیک (Fill, Flow Direction, Flow Accumulation) تولید شد.

۴- عامل مدیریت پوشش (C)

عامل C نشان دهنده تأثیر پوشش گیاهی و فعالیت های انسانی بر فرسایش خاک است. پوشش زمین نقش مهمی در کاهش نفوذپذیری بارش و رواناب سطحی دارد و باعث کاهش فرسایش می شود. حتی خاک های با همان نوع بافت، بسته به پوشش گیاهی می توانند رفتار متفاوتی از نظر فرسایش داشته باشند. این عامل نشان دهنده نسبت فرسایش خاک در شرایط پوشش گیاهی خاص به شرایط بدون پوشش است (Morgan., 1995). داده های پوشش زمین از پکیج ESA که ترکیبی از تصاویر ماهواره Sentinel 1 و Sentinel 2 با وضوح ۱۰ متر است تهیه شد. برای هر کلاس کاربری، مقادیر C طبق دستورالعمل (Rao., 1981) اختصاص داده شد. سپس نقشه کاربری اراضی باز طبقه بندی و به نقشه رستری تبدیل شد.

جدول ۲- مقادیر فاکتور مدیریت زراعی (C) برای کلاس‌های مختلف کاربری/پوشش اراضی

Land Use Class	C-Factor
Settlement	1
Vacant Land	1
Quarry/Brick kilns	1
Crop land	0.28
Fallow land	1
Plantations	0.28
Dense forest	0.004
Open forest	0.008
Degraded forest	0.008
Land whit scrub	0.7
Land without scrub	0.18
Marshy	0
Water bodies	0

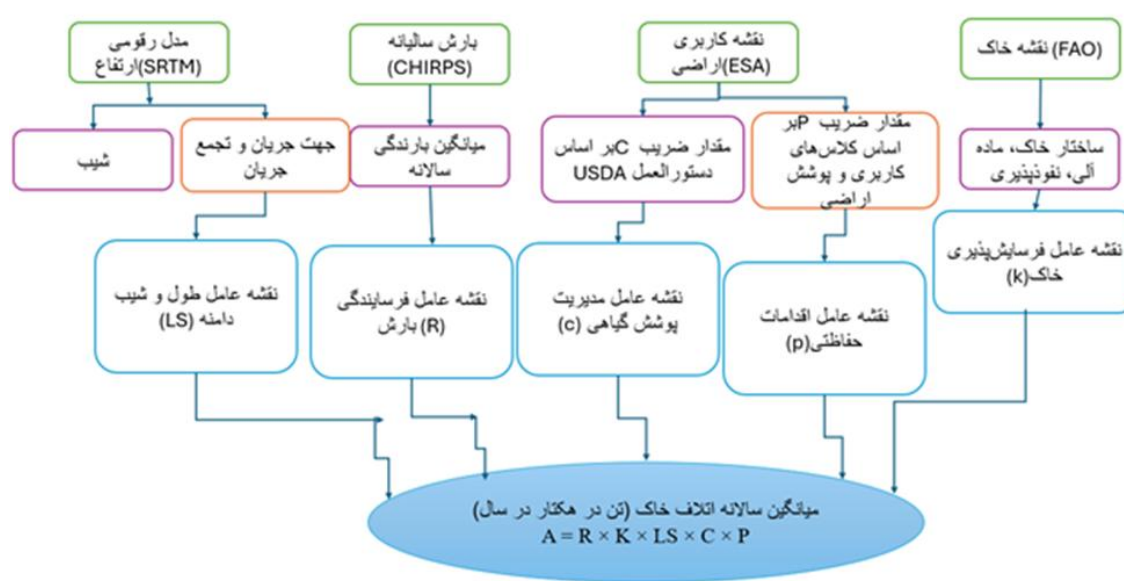
۵- عامل مدیریت زمین (P)

فاکتور مدیریت زمین را به عنوان مقدار خاک از بین رفته در واحد سطح یک زمین حفاظت شده به زمینی که لخت باشد و در جهت تندترین شیب شخم خورده باشد، تعریف نمودند. این عامل نشان دهنده تأثیر اقدامات حفاظتی خاک بر کاهش فرسایش است. این عامل بیان می کند که چه میزان از فرسایش خاک به دلیل به کارگیری یک روش حفاظتی مشخص مانند تراس بندی، کشت در خطوط تراز یا کشت نواری نسبت به حالتی که زمین بدون هیچ اقدام حفاظتی کشت می شود، کاهش یافته است (Mengie et al., 2022). در واقع عامل P نسبت فرسایش خاک در حضور اقدامات حفاظتی به حالت بدون حفاظت را نشان می دهد. مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر است. هرچه P به ۰ نزدیک تر باشد، نشان دهنده مدیریت حفاظتی بهتر و مقاومت بالاتر در برابر فرسایش است. نقشه عامل اقدامات حفاظتی در google earth engine بر اساس نقشه شیب و کاربری اراضی تولید شد. نقشه فرسایش سالانه خاک (A) با استفاده از معادله شماره (۱) در محیط Google Earth Engine به دست آمد.

جدول ۳- اقدامات کنترلی فرسایش بر اساس شیب زمین

شیب (%)	مقدار ضریب p
۰.۷	۰.۵۵
7-11.3	0.6
11.3-17.6	0.8
17.6-26.8	0.9
26.8>	1

فلوچارت زیر مراحل انجام پژوهش را از جمع آوری داده های ورودی، پیش پردازش در محیط GEE، محاسبه جداگانه عوامل معادله RUSLE شامل R، K، LS، C و P، تا تلفیق نهایی عوامل و برآورد فرسایش سالانه خاک نشان می دهد.



شکل ۲- فلوجارت روش شناسی اتخاذ شده برای برآورد فرسایش خاک

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل لایه‌های رستری با قدرت تفکیک مکانی متفاوت است. لایه بارش از پایگاه CHIRPS با قدرت تفکیک مکانی ۵ کیلومتر، لایه مدل رقومی ارتفاع از سنجنده SRTM با وضوح ۳۰ متر و لایه پوشش زمین از محصولات ESA با وضوح ۱۰ متر استخراج گردید. جهت همگام‌سازی (Resampling)، تمامی لایه‌ها در محیط Google Earth Engine به پیکسل‌های ۱۰ متری تبدیل شدند تا تحلیل‌های مکانی با بیشترین دقت انجام شود.

نتایج و بحث

نقشه‌های درون‌یابی شده برای محاسبه عامل فرسایش بارش، توزیع مکانی بارندگی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند. نتایج بیانگر وجود یک روند افزایشی بارندگی سالانه از بخش‌های جنوب شرقی به سمت شمال غربی است. از آنجاکه عامل فرسایش بارش مستقیماً به مقدار بارندگی بستگی دارد، مناطقی با بارندگی بیشتر، مقدار بالاتری از ضریب R را نیز نشان می‌دهند به‌طوری‌که بیشترین مقدار ضریب فرسایش بارش در شمال غربی منطقه به میزان ۱۴۴/۴ و کمترین مقدار آن در بخش جنوب شرقی به میزان ۱۲۲/۸ مشاهده شد. شکل (۳-۱) توزیع مکانی عامل فرسایش بارش را نشان می‌دهد.

نقشه توزیع مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهد که منطقه عمدتاً از خاک‌های لومی تشکیل شده است. مقدار K برابر با ۰/۰۲۹ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر به دست آمد. ضریب K که معیاری برای فرسایش‌پذیری خاک محسوب می‌شود، نشان‌دهنده حساسیت خاک به فرسایش است. شکل (۳-۲) نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد.

عامل توپوگرافی که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، توزیع مکانی ضریب توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب LS در بازه ۰/۰۰۱ تا ۱۸/۸۵ متغیر است، به‌طوری‌که مقادیر پایین (نزدیک به ۰/۰۰۱) بخش غالب منطقه را پوشش می‌دهند، در صورتی‌که مقادیر بالا به‌صورت پراکنده در برخی نواحی مشاهده می‌شوند. مقادیر بالاتر ضریب LS نشان‌دهنده انرژی بیشتر رواناب است که قادر به جدا کردن و حمل ذرات خاک است. درحالی‌که مقادیر پایین‌تر بیانگر انرژی کمتر و توان محدود در فرایند فرسایش می‌باشند. این یافته با نتایج محمدی و همکاران (۱۳۹۷) که فرسایش خاک در ایران را با معادله RUSLE برآورد کرده بودند هم‌خوانی دارد. بر طبق پژوهش آن‌ها، کمترین مقدار عامل توپوگرافی مربوط به مناطق مسطح و بیابانی (مناطق مرکزی ایران) و بیشترین مقدار آن مربوط به نواحی مرتفع (رشته کوه‌های البرز و زاگرس) است. به بیان دیگر تاثیر عامل توپوگرافی در مناطق مسطح کم می‌شود و در مناطق مسطح بیشتر نوع خاک و مقدار پوشش گیاهی بر

مقدار فرسایش خاک تاثیرگذار خواهد بود. کمری یکدانه‌گی و همکاران (۱۴۰۳) نیز دریافتند در مناطق کم شیب، عامل توپوگرافی نزدیک به صفر است. شکل (۳-۲) نقشه عامل طول و شیب دامنه را نشان می‌دهد.

مقادیر ضریب مدیریت پوشش، در منطقه مورد مطالعه بین ۰ تا ۱ متغیر است. بیشترین مقدار این ضریب در بخش‌های شمال غربی و به صورت پراکنده در جنوب غرب و جنوب شرق مشاهده می‌شود. از آنجاکه ضریب مدیریت پوشش، نشان‌دهنده رابطه بین پوشش گیاهی و کاهش فرسایش خاک است، نواحی با مقادیر بالاتر (نزدیک به ۱) حاکی از فقر پوشش خاک و شیوه‌های مدیریت زمین با کارایی کمتر در جلوگیری از فرسایش هستند و در نتیجه این نواحی مستعد فرسایش بیشتری می‌باشند. در مقابل، مقادیر پایین‌تر ضریب C در سایر بخش‌ها مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده مناطقی با اقدامات مؤثر حفاظت خاک است که احتمالاً ناشی از پوشش گیاهی متراکم‌تر یا مدیریت بهتر اراضی می‌باشد و مطابق با نتایج (Fathizad et al., 2014) است که هرچه پوشش گیاهی افزایش یابد ضریب C کاهش می‌یابد. این تفاوت‌ها ضرورت اجرای اقدامات حفاظتی هدفمند در مناطق با مقادیر بالاتر ضریب c را نشان می‌دهد تا پایداری خاک افزایش یافته و خطر فرسایش کاهش یابد. نقشه عامل مدیریت زمین (شکل ۳-۲) نشان می‌دهد که مقادیر این عامل بین ۰/۵۵ تا ۱ متغیر است. مقدار ۰/۵۵ عمده‌تاً در زمین‌های کشاورزی دیده می‌شود که رایج‌ترین نوع کاربری زمین در منطقه مورد مطالعه است و مقادیر بالاتر نزدیک به ۱ مربوط به مناطقی است که اقدامات حفاظتی ضعیف‌اند و بنابراین خاک بیشتر در معرض فرسایش قرار دارد. مقادیر پایین‌تر (نزدیک به ۰/۵۵) نشان‌دهنده مناطقی است که اقدامات حفاظتی مؤثر اجرا شده و ریسک فرسایش خاک در آن‌ها کاهش یافته است. این نتایج تغییرپذیری مکانی اقدامات حفاظتی و نقش آن‌ها در پایداری خاک را نشان می‌دهد. شکل (۳-۲) نقشه عامل اقدامات حفاظتی را نشان می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج سارونه و همکاران (۱۴۰۳) همسو است، پژوهشی که با استفاده از مدل RUSLE فرسایش خاک را در آبخیز معرف کسلیان بررسی کردند و نتایج نشان داد نوسانات ضریب C تابع تراکم و اندازه پوشش گیاهی است. آن‌ها دریافتند که در اراضی با مدیریت ضعیف (عامل P نزدیک به ۱)، حساسیت به فرسایش در زمین‌های بایر به شدت افزایش می‌یابد. در حوضه سیاهو نیز مقدار ۰/۵۵ برای اراضی کشاورزی نشان‌دهنده نقش مثبت مدیریت زمین در کاهش فرسایش نسبت به اراضی رها شده است. بنابراین، ترکیب مدیریت پوشش (C) و اقدامات حفاظتی (P) در مناطق با ضرایب بالا، می‌تواند به طور چشمگیری از هدررفت خاک در حوضه آبخیز در مناطق خشک جلوگیری کند و این با نتایج محسنی فر و همکاران (۱۴۰۳) در مناطق خشک مطابق می‌باشد.

برآورد میانگین سالانه فرسایش خاک (A)

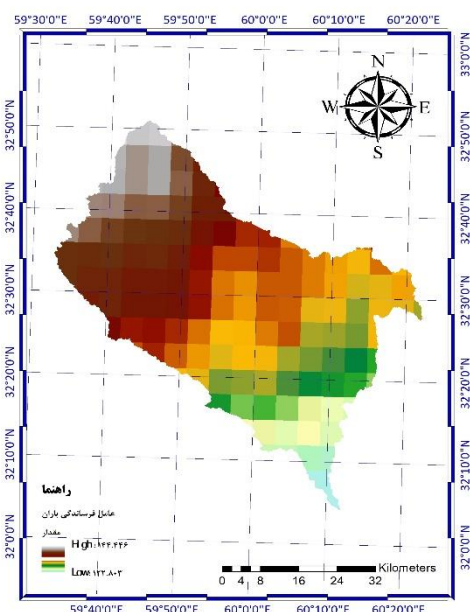
معادله بازنگری شده جهانی فرسایش خاک به طور گسترده برای برآورد میانگین سالانه فرسایش خاک کاربرد دارد. ترکیب این معادله با تصاویر سامانه Google Earth Engine (GEE) امکان ترسیم نقشه توزیع مکانی خطر فرسایش خاک را فراهم می‌کند. در این مطالعه، از معادله RUSLE برای محاسبه مقدار فرسایش سالانه خاک بر حسب تن در هکتار در سال استفاده شد. بدین منظور، با ضرب عوامل R، K، LS، C و P در محیط google earth engine مقدار فرسایش سالانه خاک محاسبه گردید (شکل ۳-۲).

در نهایت، نقشه‌های موضوعی مربوط به هر یک از این عوامل و همچنین نقشه فرسایش برآوردشده تهیه شد که این اطلاعات امکان هدفمندسازی مداخلات مدیریتی و اولویت‌بندی مناطق دارای فرسایش شدید در حوضه مورد مطالعه را فراهم می‌سازد. بر طبق نتایج جدول (۴) حدود ۶۵/۸٪ از مساحت کل منطقه در کلاس فرسایش بسیار کم (۰-۱۰ تن در هکتار در سال) قرار دارد. یعنی بیش از دوسوم منطقه پایداری نسبی خاک دارد و نرخ از دست رفتن خاک پایین است و مطابق با نتایج محمدی و همکاران (۱۳۹۷) و نیکنامی و مهدیان (۱۳۹۴) و زارع و همکاران (۱۳۹۶) است که مقدار متوسط فرسایش را در قسمت‌های شرق و جنوب شرقی کشور حداقل و در شمال، شمال غربی و غرب حداکثر یافتند. جمعاً حدود ۱۹/۸٪ از منطقه (۹/۹۶+۹/۳۸۳) در رده‌های کم تا متوسط (۱۰ تا ۴۰ تن در هکتار در سال) قرار دارد. این مناطق نیازمند مدیریت حفاظتی متوسط هستند. حدود ۴/۹۵٪ درصد منطقه با خطر زیاد فرسایش (۴۰ تا ۶۰ تن در هکتار در سال) قرار دارد و در این نواحی معمولاً شیب زیاد، خاک سست و تخریب پوشش گیاهی دیده می‌شود و حدود ۹/۳۷٪ از مساحت منطقه در رده خیلی زیاد (بیش از ۶۰ تن در هکتار در سال) قرار دارد. این مناطق که عمدتاً در بخش‌های شمال غربی منطقه بر مقادیر بالای عامل R (۱۴۴/۴) و شیب‌های

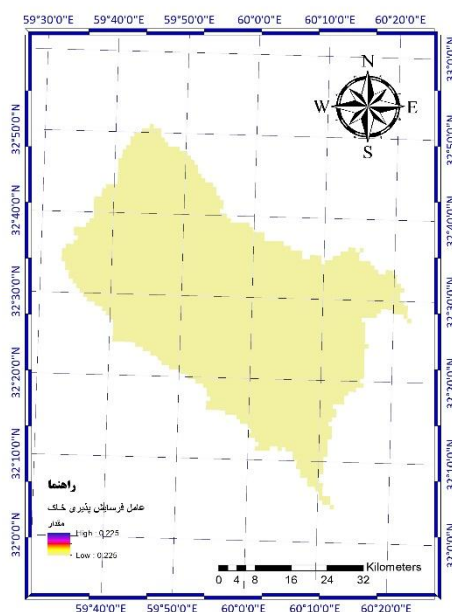
تند هستند، این محدوده بحرانی است و این مقدار نشان دهنده پتانسیل بالای تخریب خاک و از دست رفتن حاصلخیزی است و باید در اولویت اقدامات حفاظتی قرار گیرد. مناطق با فرسایش بحرانی (زیاد و خیلی زیاد)، عمدتاً بر مناطقی منطبق هستند که اولاً دارای ضریب LS بالا (شیب‌های تند و طول دامنه زیاد) هستند، دوماً پوشش گیاهی ضعیفی داشته (عامل C نزدیک به ۱) و یا در اراضی بایر واقع شده اند. مقدار عامل فرسایش پذیری خاک $k=0/029$ (تن ساعت بر مگاژول میلیمتر)، نشان دهنده حساسیت بالای اراضی به جدایی ذرات است. همچنین، تطابق الگوی عامل C و P در اراضی کشاورزی حوضه سیاهو نشان داد که مدیریت اراضی نقش کلیدی در تعدیل فرسایش دارد. تطابق نقشه نهایی فرسایش با نقشه کاربری اراضی نشان می‌دهد که اراضی کشاورزی حوضه با وجود داشتن ضریب P پایین‌تر (۰/۵۵)، به دلیل واقع شدن در دشت‌های سیلابی و دریافت رواناب از بالادست، همچنان در معرض خطر فرسایش میان‌رده قرار دارند. این موضوع ضرورت اجرای عملیات آبخیزداری در بالادست حوضه سد سیاهو را دوچندان می‌کند تا از پر شدن مخزن سد توسط رسوبات جلوگیری شود.

جدول ۴- مساحت طبقات مختلف فرسایش خاک در حوضه سد سیاهو

مساحت (برحسب درصد)	کلاس‌های فرسایش خاک (تن در هکتار در سال)	رده خطر فرسایش
65.8	۰-۱۰	خیلی کم
9.83	۱۰-۲۰	کم
9.96	۲۰-۴۰	متوسط
4.95	۴۰-۶۰	زیاد
9.37	<۶۰	خیلی زیاد

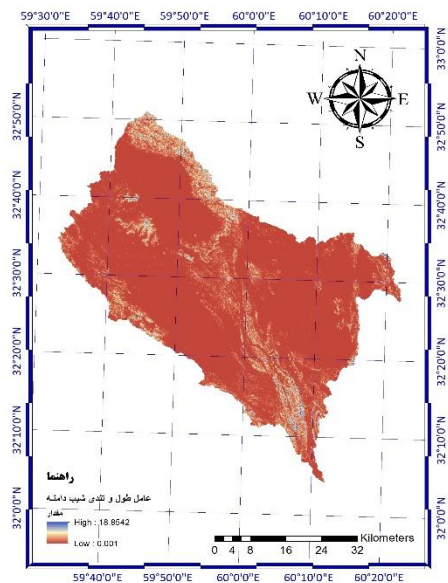


a

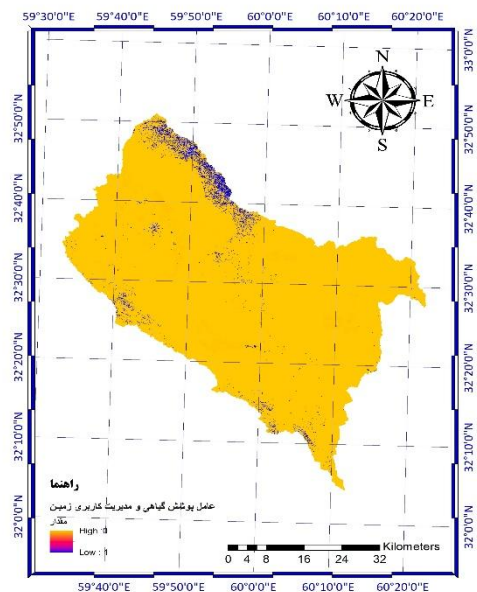


b

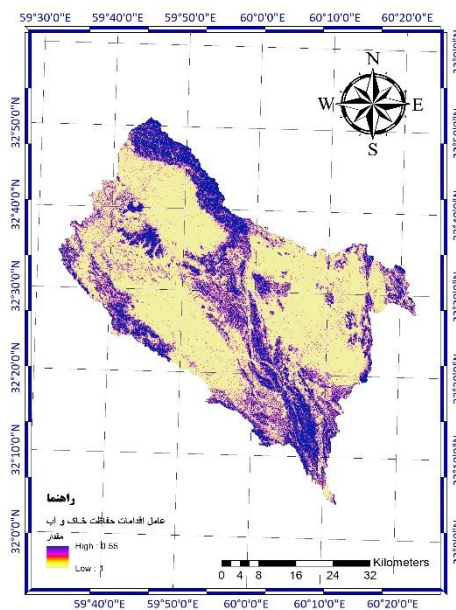
شکل ۳- a: نقشه عامل فرسایش‌دگی بارش b: نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک c: نقشه عامل طول و شیب دامنه d: نقشه عامل مدیریت پوشش e: نقشه عامل اقدامات حفاظتی f: نقشه برآورد میانگین سالانه فرسایش خاک



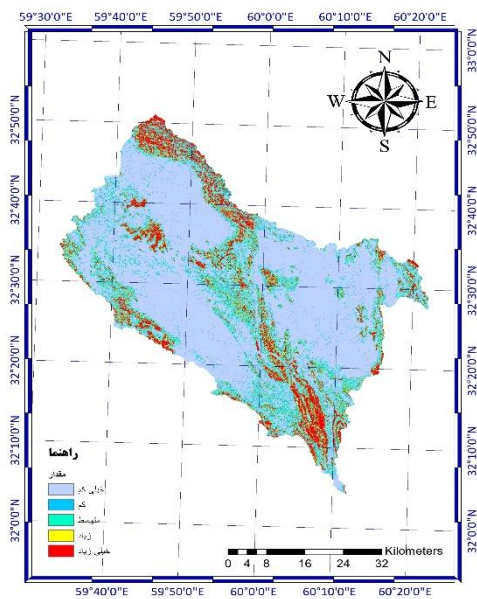
c



d



e



f

ادامه شکل ۳

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که بهره گیری از سامانه Google Earth Engine (GEE) و مدل بازنگری شده جهانی هدررفت خاک، ابزاری بسیار مؤثر و دقیق برای برآورد پتانسیل فرسایش در حوضه آبریز سد سیاهو است و با یافته‌های (salazar et al و Goshu et al (2024) بر اهمیت داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا در مدل RUSLE تأکید داشتند، همسو است. همان‌طور که محققان مذکور بر شناسایی دقیق پویایی مکانی فرسایش با استفاده از فناوری‌های نوین تأکید داشتند، در این مطالعه نیز با به کارگیری عوامل اصلی مؤثر بر فرسایش (شامل عوامل اقلیمی، خاک، توپوگرافی و مدیریت پوشش زراعی و اقدامات حفاظتی) در بستر پردازش ابری، امکان شناسایی دقیق مناطق مستعد و تعیین پهنه‌های بحرانی با اولویت حفاظتی فراهم گردید.

مطابق جدول ۴ نتایج نشان داد که حدود ۷۵٪ از مساحت منطقه (۹/۸۳+۶۵/۸) دارای فرسایش کم یا بسیار کم با نرخ فرسایش بین ۰ تا ۲۰ تن در هکتار در سال است که بیانگر پایداری نسبی خاک در بخش عمده ای از حوضه می‌باشد. با این حال حدود ۱۴٪ از منطقه (۹/۳۷+۴/۹۵) در معرض فرسایش زیاد و خیلی زیاد قرار دارد (۴۰ تا بیش از ۶۰ تن در هکتار در سال) که عمدتاً در نواحی دارای شیب زیاد، پوشش گیاهی ضعیف و اراضی بایر متمرکز شده و نیازمند توجه ویژه در برنامه های حفاظت خاک و آبخیزداری است. میانگین فرسایش سالانه منطقه در محدوده ۱۵ تا ۲۰ تن در هکتار در سال تخمین زده می‌شود که در مقیاس ملی، در سطح متوسط رو به کم ارزیابی می‌گردد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش، مناطق واقع در کلاس‌های فرسایش زیاد و خیلی زیاد می‌توانند به عنوان پهنه‌های اولویت‌دار برای اجرای عملیات آبخیزداری مانند ترانس‌بندی، مدیریت چرا و افزایش پوشش گیاهی معرفی شوند. این نقشه‌ها امکان تخصیص هدفمند منابع مالی و اجرایی را برای کاهش تولید رسوب، کنترل فرسایش و افزایش عمر مفید مخزن سد سیاهو فراهم می‌کنند. از این رو، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی‌های مدیریت حوزه آبخیز در سطح شهرستان سریشه مورد استفاده قرار گیرد. همان‌طور که آبکار و همکاران (۱۴۰۲) وجود بانک اطلاعاتی مناسب در هر زمینه‌ای را برای حوزه آبخیز ضروری دانستند.

از جمله محدودیت‌های اصلی این پژوهش می‌توان به عدم دسترسی به داده‌های مشاهده‌ای رسوب و اندازه‌گیری‌های هیدرومتری در حوضه آبریز سد سیاهو اشاره کرد به طوریکه امکان انجام صحت‌سنجی مستقیم نتایج مدل RUSLE با داده‌های واقعی میدانی فراهم نبود. همچنین به دلیل محدودیت‌های اجرایی، برداشت میدانی و نمونه‌برداری خاک جهت اعتبارسنجی پارامترهای فیزیکی خاک در این مطالعه صورت نگرفت. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، با تلفیق داده‌های رسوب اندازه‌گیری‌شده، ایستگاه‌های هیدرومتری و مدل‌های فیزیکی فرسایش، صحت و دقت نتایج حاصل از مدل RUSLE در مقیاس حوضه‌های آبریز کشور با دقت بالاتری مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع

- آبکار، ع.، سعیدیان، ح.، حاج سید علیخانی، ن. (۱۴۰۲). بررسی نقش مسائل اقتصادی-اجتماعی در توسعه حوزه های آبخیز مناطق کویری (مطالعه موردی: حوزه آبخیز یزدان آباد استان کرمان). نشریه رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست. ۳(۱)، ۳۳-۴۶.
- زارع، م.، سامانی، ا. ن.، محمدی، م.، سلمانی، ح. و بذرافشان، ج. (۱۳۹۶). بررسی اثرات سناریوهای تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از مدل‌های CLUE-S و RUSLE. مجله بین‌المللی علوم و تکنولوژی محیط زیست (IJEST)، ۱۴(۹)، ۱۹۰۵-۱۹۱۸.
- سارونه، ف.، خالدی درویشان، ع.، موسوی، و. (۱۴۰۳). بررسی تغییر پذیری ماهانه فرسایش خاک در آبخیز معرف کسلیان با استفاده از مدل RUSLE. نشریه پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۷(۳)، ۵۴-۷۵.
- کمری یکدانگی، ف.، خالدی درویشان، ع.، و آقابگی، س. (۱۴۰۲). تأثیر نکات اصلاحی نقشه عامل فرسایش‌پذیری بر برآورد فرسایش خاک در مدل G2. نشریه رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست، ۲(۲)، ۱۵۸-۱۶۹.

- محمدی، ش.، کریم زاده، ح.، عزیززاده، م (۱۳۹۷). برآورد مکانی فرسایش خاک کشور ایران با استفاده از مدل RUSLE. نشریه اکوهیدرولوژی. ۵۶۹-۵۵۱. (۲)۵.
- محسنی فر، ک.، حلفی، ع.، پناه پور، ا (۱۴۰۳). اثر فرسایش هزار دره بر هدررفت مواد آلی و تغییرات برخی خصوصیات خاک مناطق خشک استان خوزستان (حوضه درب خزینه شوشتر). نشریه رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست. ۱-۱۲. (۱)۳.
- Abkar, A., Saeedian, H., & Haj Seyed Alikhani, N., 2023. Investigating the role of socio-economic issues in the development of the desert Watersheds (Case study: Yazdanabad watershed, Kerman Province). *Jornal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(1), pp. 33–46. <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.418861.1051>
- Alkharabsheh, M. M. Alexandridis, T. K. 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, pp.912-921. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.101>
- Ang, M. L. E. Arts, D. Crawford, D. Labatos Jr, B. V. Ngo, K. D. Owen, J. R. Gibbins, C., Lechner, A. M., 2021. Socioenvironmental land cover time-series analysis of mining landscapes using Google Earth Engine and web-based mapping. *Remote Sensing Applications- Society and Environment*, 21, p.100458. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100458>
- Bouguerra, H., 2018. Quantification and modelling of solid transport, mapping of areas at risk of water erosion by using a GIS: Application to the Bouhamdane and Ressoul basins (North-East Algeria). Ph.D. Thesis, University of Tlemcen, Algeria.
- Dutta, D. Das, S. Kundu, A., Taj, A., 2015. Soil erosion risk assessment in Sanjal watershed, Jharkhand (India) using geo- informatics, RUSLE model and TRMM data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(4), pp.1–9. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0034-1>
- Elnashar, A. Zeng, H. Wu, B. Fenta, A. A. Nabil, M., Duerler, R., 2021. Soil erosion assessment in the Blue Nile Basin driven by a novel RUSLE-GEE framework. *Science of the Total Environment*, 793, p.148466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148466>
- El Jazouli, A. Barakat, A. Khellouk, R. Rais, J., Baghdadi, E. M., 2019. Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications- Society and Environment*, 13, pp.361–374. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.004>
- FAO., 2015a. Status of the world's soil resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>
- FAO., 2015b. Global soil partnership: Towards a global agenda for sustainable soil management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/ai3794e.pdf>
- Fathizad, H. Karimi, H., Alibakhshi S. M., 2014. The estimation of erosion and sediment by using the RUSLE model and RS and GIS techniques (Case study: Arid and semi-arid regions of Doviraj, Ilam province, Iran). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 7(6), pp.304-314.
- Ganasri, B. P., Ramesh, H., 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS—A case study of Nethravathi Basin. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), pp.589–602. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.994007>
- Gong, W. Liu, T. Duan, X. Sun, Y. Zhang, Y. Tong, X., Qiu, Z., 2022. Estimating the Soil Erosion Response to Land-Use Land-Cover Change Using GIS-Based RUSLE and Remote Sensing: A Case Study of Miyun, North China. *Water*, 14(5), p.742. <https://doi.org/10.3390/w14050742>
- Goshu, G. P. Koide, D., Gessesse, G. D., 2024. Soil erosion risk assessment and monitoring using the RUSLE model in a Google Earth Engine environment. *Scientific Reports*, 14(1), pp.1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50965-w>
- Gelagay, H. & Minale, A., 2016 Soil loss estimation using GIS and remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 4, pp.126–136. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.01.002>
- Gorelick, N. Hancher, M. Dixon, M. Ilyashenko, S. Thau, D. & Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, pp.18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.03>
- Issaka, S. & Ashraf, M. A., 2017. Impact of soil erosion and degradation on water quality: A review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1(1), pp.1–11. <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1301050>

- Kamuju, N., 2016. Soil erosion and sediment yield analysis using prototype & enhanced SATEEC GIS system models. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 5(1), pp.1471–1482. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.39>
- Khemiri, K., Jebari, S., 2021. Assessment of water erosion in watersheds of the Tunisian semi-arid zone with RUSLE and MUSLE models coupled to a Geographic Information System. *Cahiers Agricultures*, 30(7), pp.1–13. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020048>
- Kondolf, G. M. Gao, Y. Annandale, G. W. Morris, G. L. Jiang, E., Zhang, J., 2014. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5), pp.256–280. <https://doi.org/10.1002/2013EF000184>
- Kushwaha, N. L., Yousuf, A., 2017. Soil erosion risk mapping of watersheds using RUSLE, remote sensing, and GIS: A review. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 8(2), pp.269–277.
- Kamari-Yekdangi, F. Khalidi-Darvishan, A., Aqabigi Amin, S., 2024. Impact of corrective points in soil erodibility map on soil erosion estimation in G2 model. *Jornal of New Approaches in Water Engineering and Environment*. 3(1).pp.158-169. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.436707.1062>. (In Persian).
- Lal, R., 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 17(4), pp.319–464. <https://doi.org/10.1080/07352689891304249>
- Lee, S., 2004. Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information system: A case study at Boun, Korea. *Environmental Geology*, 45(4), pp.457–465. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0897-8>
- Mengie, M. A. Hagos, Y. G. Malede, D. A., Andualem, T. G., 2022. Assessment of soil loss rate using GIS–RUSLE interface in Tashat Watershed, Northwestern Ethiopia. *Journal of Sedimentary Environments*, 7(4), pp.617–631. <https://doi.org/10.1007/s43217-022-00112-8>
- Morgan, R. P. C., 1995. Soil erosion and conservation (Secend edition). Longman Group:Har-low.
- Mohammadi, Sh. Karimzadeh, H. R. & Alizadeh, M., 2018. Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iran Journal of Eco Hydorolgy*, 5(2), pp.551-569. (In Persian)
- Mohsenifar, K. Halafi, A., Panahpour, A., 2024. Effect of Hazar Daryeh erosion on loss of organic matter and changes in some soil properties in arid regions of Khuzestan province (Dareh Khazineh, Shushtar basin). *Jornal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 4 (1). <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.440441.1065>. (In Persian)
- Niknammi, D., Mehdiان, M., 2015 . Rainfall erosivity mapping in Iran, *Journal of Watershed Engineering and Management*, 6(4), pp.364-376. (In Persian)
- Nghia, B. P. Q. Pal, I. Chollacoop, N., Mukhopadhyay, A., 2022. Applying Google Earth Engine for flood mapping and monitoring in the downstream provinces of the Mekong River. *Progress in Disaster Science*, 15, p.100235. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100235>
- Patel, D. P. & Pandey, A., 2016. Estimating soil erosion risk in lower Himalayan watershed using USLE, remote sensing, and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 131–142. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2224-1>
- Petito, M. Cantalamessa, S. Pagnani, G. Degiorgio, F. Parisse, B. & Pisante, M., 2022. Impact of conservation agriculture on soil erosion in the annual cropland of the Apulia Region (Southern Italy) based on the RUSLE-GIS-GEE framework. *Agronomy*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy12020281>
- Pimentel, D. & Kounang, N., 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1(5), pp.416–426. <https://doi.org/10.1007/s100219900035>
- Pratiksha, J., Raaj, R., 2018. GIS-based modelling of soil erosion processes using the modified-MMF model in a large watershed having vast agro-climatological differences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), pp.2064–2076. <https://doi.org/10.1002/esp.14437>
- Rao, K. V., 1981. Evaluation of cover management factor (C) for soil erosion studies. *Journal of Soil and Water Conservation in India*, 29(2), pp.50–55.
- Renard, K. G. Foster, G. R. Weesies, G. A., Porter, J. P., 1991. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(1), pp.30–33.
- Roose, E., Sarrailh, J. M., 1990. Erodibility of some tropical soils: Twenty years of measurement in erosion plots under natural rains. ORSTOM Notebooks, *Pedological Series*, 25(12).

- Saha, S., Mandal, D., 2022. Application of RUSLE and GIS for soil erosion risk assessment in Indian agricultural landscapes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(1), pp.21–34. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09490-7>
- Salazar, J. García, M., Sánchez, P., 2024. Assessment of soil erosion by RUSLE in the Ecuadorian basins (2001–2020) based on GIS and high-resolution satellite data. *Geomorphology*, 419, p.109515. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109515>
- Sharma, R., Sharma, S., 2022. Comparative study on morphometric analysis and RUSLE-based approaches for microwatershed prioritization using remote sensing and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(4), p.111. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09837-2>
- Sarouni, F. Khalidi-Darvishan, A., Mousavi, V., 2024. Monthly variability of soil erosion in the Kasilian watershed using the RUSLE model. *Watershed Management Research*, 37 (3), pp.54-75.
- Talchabhadel, R. Prajapati, R. Aryal, A., Maharjan, M., 2020. Assessment of rainfall erosivity (R-factor) during 1986–2015 across Nepal: A step towards soil loss estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (5). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8239-9>.
- Uddin, K. Abdul Matin, M., Maharjan, S., 2018. Assessment of land cover change and its impact on changes in soil erosion risk in Nepal. *Sustainability* 10(12), p.4715. <https://doi.org/10.3390/su10124715>
- Wang, H., Zhao, H., 2020. Dynamic changes of soil erosion in the taohe river basin using the RUSLE model and google earth engine. *Water* 12(5), p.1293. <https://doi.org/10.3390/w12051293>
- Wischmeier, W. H. Johnson, C. B., Cross, B. V., 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26(5), pp.189–193. Retrieved from https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044266
- Wilson, J. P. Hession, W. C., O'Donnell, T., 2000. A new method for modeling erosion and deposition in small watersheds: The USPED model. *Geomorphology*, 34(3–4), pp.273–286. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00070-2).
- Yusron, S., Eko, P., 2023. Soil erosion prediction and risk assessment using RUSLE model and GIS techniques in the nangka watershed. *Journal of Water and Land Development* 55 (184), p. 191. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.142320>
- Zare, M. Samani, A. N. Mohammady, M. Salmani, H., Bazrafshan, J., 2017. Investigating effects of land use change scenarios on soil erosion using CLUE-s and RUSLE models. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(9), pp.1905-1918.