

Spatial estimation of soil erosion and sediment yield using the RUSLE and SEDD models in Chehelchay watershed, Golestan Province

Habib Nazarnejad^{1*}, Farkhondeh Aghajan Liafu²

¹ Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

² Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Extended Abstract

Introduction

Soil erosion is one of the most serious and pervasive environmental challenges worldwide, directly and significantly threatening the stability of natural ecosystems, the quality of drinking water and agricultural resources, and long-term food security. In many mountainous regions of Iran, the combination of climatic conditions, steep slopes, geological instability, and increasing anthropogenic pressures has exacerbated this process. The Chehelchay watershed, located in Golestan Province, is a prime example of a watershed susceptible to erosion. This basin, covering an area of 25683 hectares and receiving an average annual rainfall of 766 mm, has witnessed extensive land-use changes, with a significant portion of its natural forest cover being converted into agricultural lands. Despite numerous studies conducted in this region and similar areas in the past, limited efforts have been made to integrate empirical models (such as RUSLE) with process-based or distributed models (such as SEDD) for the simultaneous estimation of the spatial pattern of soil erosion and sediment transfer, using reliable spatial data. Therefore, this study aims (i) to accurately quantify the spatial distribution of soil erosion and (ii) to estimate sediment transfer rates, and to identify priority and critical erosion areas within the Chehelchay watershed, by integrating the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model and the Sediment Delivery Distributed (SEDD) model. Few studies have simultaneously mapped soil erosion and sediment delivery using integrated empirical and distributed models in data-limited mountainous watersheds. This integrated approach, which simultaneously accounts for processes of surface sediment generation and its transfer along the river network, provides a robust and comprehensive framework for supporting conservation and management planning in data-limited watersheds.

Materials and Methods

To estimate surface erosion and sediment yield in the Chehelchay watershed, the RUSLE and the SEDD model were employed. For estimating surface erosion, the RUSLE model was utilized, incorporating five factors: Rainfall erosivity (R), Soil erodibility (K), Slope-Length (LS), Land cover and management (C), and Support practices (P). Spatial input maps were generated for each RUSLE factor in ArcGIS. The R-factor map was extracted using long-term daily precipitation data and the modified Fournier index. Physicochemical properties of the soil formed the basis for preparing the K-factor map. The LS factor map was calculated by processing the Digital Elevation Model (DEM) in a GIS environment. The interpretation of Landsat 8 satellite imagery and vegetation cover maps enabled the preparation of the C-factor map. The P-factor was determined based on land use type and farming practices. After preparing the RUSLE parameter layers, the annual water erosion map was generated by multiplying these layers in ArcGIS software. Subsequently, the SEDD model was used to quantitatively estimate sediment yield and its transfer ratio to the watershed outlet. This model, by spatially calculating the Sediment Delivery Ratio (SDR), establishes a link between the erosion calculated by RUSLE and the sediment data measured at the Lezoreh hydrometric station. Suspended sediment data from the Lezoreh station were analyzed using the sediment rating curve method and an intermediate data approach. The accuracy of the curve calibration was confirmed with a coefficient of determination $R^2 = 0.79$. Finally, the sediment yield, SDR, and erosion maps derived from the models were integrated and spatially analyzed to identify priority areas with severe erosion and high sediment yield potential.

Results and Discussion

The RUSLE-based assessment indicated that the average annual soil erosion rate in the Chehelchay watershed is approximately $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. However, its spatial distribution exhibited considerable heterogeneity and was found to be significantly controlled by topographic factors, particularly the LS factor (slope and slope length), and land use type. The highest erosion rates were observed in agricultural fields situated on steep slopes; this pattern is

primarily attributed to minimal soil conservation measures and the direct exposure of soil to intense rainfall events. In contrast, forested areas displayed strong protective effects, substantially reducing surface erosion due to dense vegetation cover and soil structural stability. These findings underscore the critical importance of preserving and expanding forest cover in mountainous regions. Based on data collected from the Lezoreh sediment monitoring station, the average annual sediment yield was estimated at $1.78 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. The overall watershed SDR was calculated to be approximately 44%. This relatively high SDR indicates the presence of efficient sediment transfer pathways, largely facilitated by steep slopes and discontinuous vegetative cover across the watershed. Integrated mapping of erosion potential and sediment delivery ratios revealed that areas with the highest erosion potential and sediment generation are primarily concentrated in the middle and upper sections of the watershed, where slope gradients exceed 30% and agricultural expansion has replaced natural forest cover. The spatial correspondence between high erosion potential and elevated SDR highlights the crucial importance of simultaneously considering both sediment generation (erosion) and sediment transport (SDR) processes when designing management interventions.

Conclusion

Ultimately, the outcomes of this research can serve as a practical guide for developing and implementing sustainable water and soil resource management plans in the Chehelchay watershed and in other regions with comparable ecological and data conditions. The overall study results emphasize the pivotal role of topographic factors and land use; specifically, terrain slope, land use type, and vegetation condition were identified as the most determinant factors of erosion intensity. Notably, the negative consequences of land use changes, particularly the degradation of forest cover and its conversion to agricultural or other uses on steep slopes, lead to a significant increase in soil erosion and, consequently, a higher volume of sediment transported downstream. This study affirms the critical importance of principled land use planning, taking into full account the inherent topographical constraints of mountainous regions. The effective implementation of conservation measures, including the preservation and restoration of natural vegetation and the application of sustainable management practices in agricultural lands, is deemed essential for controlling and reducing sediment transport in priority areas. Despite the satisfactory accuracy of the employed models, limitations such as sensitivity to the quality and precision of input data and the lack of comprehensive field data for complete validation persist. These limitations create valuable opportunities for future research to significantly improve prediction accuracy by integrating extensive field sampling, high-resolution soil data, and the application of more advanced process-based modeling approaches.

Keywords: Modeling, Soil loss, Universal Soil Loss Equation, Sediment rating curve, Sediment delivery ratio

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The article is derived from an internal research project of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. The university's Vice Presidency of Research is gratefully acknowledged for their cooperation, assistance, and financial support in conducting the research.

Conflicts of interest

The authors of this article declare no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

All data generated during the manuscript analysis are included in the article.

Authors' contribution

Habib Nazarnejad :Conceptualization, manuscript editing, supervision, formal analysis and investigation; **Farkhondeh Aghajan Liafu**: writing original draft preparation, formal analysis and investigation, visualization

*Corresponding Author, E-mail :h.nazarnejad@gau.ac.ir

Citation: Nazarnejad, H., & Aghajan Liafu, F. (2026). Spatial estimation of soil erosion and sediment yield Using the RUSLE and SEDD models in Chehelchay watershed, Golestan Province. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 217-234
doi: 10.22098/mmws.2026.19535.1794

Received: 30 March 2026, Received in revised form: 04 May 2026, Accepted: 18 May 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 217-234.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





برآورد مکانی فرسایش و رسوب با مدل های SEDD و RUSLE در آبخیز چهل چای استان گلستان

حبیب نظرنژاد^{۱*}، فرخنده آقاجان لیافو^۲

^۱ دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران
^۲ دانشجوی دکتری، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران

چکیده

فرسایش خاک به عنوان یکی از چالش های چندبعدی زیست محیطی، امنیت اکولوژیک و غذایی را در سطح جهانی تهدید می کند. این پژوهش با هدف برآورد مکانی فرسایش خاک و تولید رسوب و اولویت بندی مناطق بحرانی آبخیز چهل چای استان گلستان، با تلفیق مدل اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و مدل توزیعی نرخ تحویل رسوب (SEDD) انجام شد. داده های مورد نیاز شامل نقشه فرسایندگی باران، فرسایش پذیری خاک، توپوگرافی (طول و درجه شیب)، کاربری اراضی و پوشش گیاهی و اقدامات حفاظتی بود. نتایج مدل RUSLE نشان داد میانگین فرسایش سالانه آبخیز ۴ تن در هکتار است که توزیع مکانی آن تحت تأثیر شدید عامل توپوگرافی (LS) با دامنه تغییرات صفر تا ۱۹۷/۱۵۸ و کاربری اراضی قرار دارد. بیشترین میزان فرسایش (بیش از ۴۰ تن در هکتار در سال) در اراضی زراعی واقع در شیب های تند مشاهده شد، در حالی که پوشش جنگلی تأثیر محافظتی قابل توجهی در کاهش فرسایش (کمتر از ۱ تن در هکتار در سال) داشت. میانگین تولید رسوب سالانه در ایستگاه لزوره در خروجی آبخیز با استفاده از منحنی سنج رسوب (روش حدوسط داده ها با ضریب تبیین ۰/۷۹) برابر با ۱/۷۸ تن در هکتار در سال و نسبت تحویل رسوب کل آبخیز ۴۴ درصد برآورد شد. نقشه توزیعی نسبت تحویل رسوب حاصل از مدل SEDD نشان داد که این نسبت بین صفر تا ۰/۹۱ متغیر است و بیشترین مقادیر آن در مجاورت آبراهه ها و اراضی کشاورزی واقع در شیب های تند متمرکز است. همچنین، مناطق بحرانی آبخیز از نظر تولید رسوب عمدتاً در بخش های میانی و بالادست آبخیز (با شیب بیش از ۳۰ درصد) قرار دارند که با تبدیل پوشش جنگلی به اراضی کشاورزی همراه بوده است. این مطالعه بر ضرورت حفظ و توسعه پوشش گیاهی طبیعی، به ویژه در مناطق شیب دار، و اعمال ملاحظات توپوگرافی در برنامه ریزی کاربری اراضی کشاورزی برای کاهش فرسایش تأکید می کند. مدل های مورد استفاده با وجود ساده سازی های ذاتی، ابزار کارآمدی برای شناسایی مناطق بحرانی و اولویت بندی اقدامات حفاظتی در شرایط کمبود داده های میدانی ارائه می دهند.

واژه های کلیدی: مدل سازی، معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک، منحنی سنج رسوب، نسبت تحویل رسوب، هدررفت خاک

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.nazarnejad@gau.ac.ir

استناد: نظرنژاد، حبیب، آقاجان لیافو، فرخنده (۱۴۰۵). برآورد مکانی فرسایش و رسوب با مدل های SEDD و RUSLE در آبخیز چهل چای استان گلستان. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶ (۳)، ۲۱۷-۲۳۴.

doi: 10.22098/mmws.2026.19535.1794

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۲۱۷ تا ۲۳۴.

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان



۱- مقدمه

خاک به عنوان پوشش حیاتی زمین، نه تنها بستری ضروری برای تولید غذا، آب پاک و هوای سالم است (Amundson et al., 2015)، بلکه یکی از اصلی ترین سرمایه های طبیعی و محور خدمات اکوسیستمی پایه برای بقای انسان در قرن بیست و یکم به شمار می رود (Keesstra et al., 2016; Robinson et al., 2017). با این حال، این سرمایه حیاتی در مقیاس جهانی و به ویژه در ایران، تحت تأثیر فرآیندهای مخرب فرسایش خاک (به ویژه فرسایش آبی) و همچنین عواملی نظیر تغییرات نامناسب کاربری اراضی، چرای بی رویه دام، و عملیات نادرست کشاورزی قرار دارد که آن را به یکی از پیچیده ترین و جدی ترین چالش های محیط زیستی، امنیت غذایی و توسعه پایدار تبدیل کرده است (Khezri et al., 2022; Ahmad et al., 2025; Haile et al., 2025). فرسایش، فرآیندی است که طی آن نیروهای هیدرولوژیکی، ذرات خاک را جدا کرده و جابه جا می کنند و پیامدهای آن فراتر از از دست دادن لایه حاصلخیز سطحی است. کاهش شدید حاصلخیزی خاک و بهره وری محصولات کشاورزی (Gayen et al., 2020)، کاهش کیفیت آب های پایین دست، افزایش رسوب گذاری در مخازن سدها و کاهش ظرفیت ذخیره سازی آن ها، تشدید خطر سیلاب و کاهش تنوع زیستی، از جمله عوارض گسترده این پدیده هستند (Pasban et al., 2022; Huang et al., 2019). فرسایش خاک یک مانع زیست محیطی و کشاورزی قابل توجه است که امنیت غذایی را در سراسر جهان به خطر می اندازد (Haile et al., 2025). سالانه حدود ۱۰ میلیون هکتار از زمین های کشاورزی جهان در اثر فرسایش تخریب می شود (Gayen et al., 2020). در ایران، متوسط هدررفت خاک در اراضی کشاورزی به ۳۳ تن در هکتار می رسد (Baibordi, 2014). این رقم به معنای از بین رفتن حدود ۹۰۰ کیلوگرم مواد مغذی در هر هکتار و خسارتی معادل ۲/۷ میلیارد دلار تنها به دلیل اتلاف عناصر غذایی است (Emadodin et al., 2012). در مقیاسی کلان، هزینه اقتصادی مقابله با فرسایش خاک در ایران بین ۵۶ تا ۱۱۲ میلیارد دلار برآورد شده است که از درآمد سالانه نفتی کشور نیز فراتر می رود (Financial Tribune, 2022). این ارقام به وضوح نشان می دهد که فرسایش خاک تنها یک معضل زیست محیطی نیست، بلکه بحرانی اقتصادی و امنیتی است که پایداری نظام های کشاورزی، مدیریت منابع آب و ثبات جوامع انسانی را تهدید می کند (Maqsoom et al., 2020). در مواجهه با این چالش، ارزیابی دقیق و کمی نرخ فرسایش، گام نخست و اساسی

برای طراحی راهبردهای مؤثر حفاظتی و مدیریتی است (Dutta et al., 2015). روش های مختلفی برای تخمین هدررفت خاک توسط آب در سطوح مختلف از جمله جهانی، منطقه ای و محلی استفاده شده است. چندین مدل برای ارزیابی نرخ هدررفت خاک ایجاد شده است (Jarašiūnas et al., 2020). از مهم ترین مدل هایی که در برآورد فرسایش خاک و توسعه طرح های مدیریتی فرسایش خاک مورد استفاده قرار می گیرند می توان به معادله جهانی فرسایش خاک (USLE^۱)، مدل اروپایی فرسایش خاک (EUROSEM^۲)، پروژه پیش بینی فرسایش آبی (WEPP^۳) و ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT^۴) اشاره کرد (Morgan et al., 1998; Yu and Rosewell, 2018; Nezhadafzali et al., 2018). از این بین مدل های تجربی به ویژه معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) و نسخه اصلاح شده آن (RUSLE) به دلیل سادگی ساختار، نیاز به داده های کمتر و قابلیت اجرا در مقیاس های مختلف، به عنوان پرکاربردترین ابزارهای برآورد فرسایش در سراسر جهان پذیرفته شده اند (Nezhadafzali et al., 2018). تاکنون مطالعاتی در این خصوص در خارج و داخل ایران انجام شده به طور مثال، Allafza and Opp (2022) در آبخیز شط العرب با استفاده از مدل RUSLE میزان فرسایش سالانه را در ۵ گروه خیلی کم (۰ تا ۱ تن در هکتار در سال) تا خیلی زیاد (بیش از ۵۰ تن در هکتار در سال) تعیین کردند. نرخ بالای هدررفت خاک با بارندگی شدید، غالب بودن خاک لومی، زمین های مرتفع، مناطق با شیب تند جانبی و کشاورزی مرتبط است. در پژوهش دیگر De Crop et al. (2023) به ارزیابی خطر نسبی فرسایش و رسوب با استفاده از مدل های RUSLE و SEDD در اوگاندا پرداختند. نتایج نشان داد شیب به عنوان مهم ترین عامل برای از دست دادن خاک در آبخیز مورد مطالعه است و مقدار زیادی از خاک فرسایش یافته وارد بخش های پایین تر آبخیز شده و در آن جا رسوب می کند. Ibragimov et al. (2024) فرسایش خاک در منطقه بک آباد ازبکستان را با مدل RUSLE بررسی کردند. آن ها افزایش کلاس های فرسایش متوسط را گزارش داده و بر لزوم پایش مستمر و اقدامات حفاظتی تأکید کردند. Noor and Arabkhedri (2023) در برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه به این نتیجه دست یافتند که مدل RUSLE پس از اعمال ضریب اصلاحی رگرسیونی، قادر به برآورد متوسط فرسایش خاک با خطای ۲ تا ۱۷ درصد و نسبت تحویل رسوب (SDR) بین ۳۹/۷ تا ۴۲/۲ درصد در حوضه های

³ Water Erosion Prediction Project (WEPP)

⁴ Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

¹ Universal Soil Loss Equation (USLE)

² European soil Erosion Model (EUROSEM)

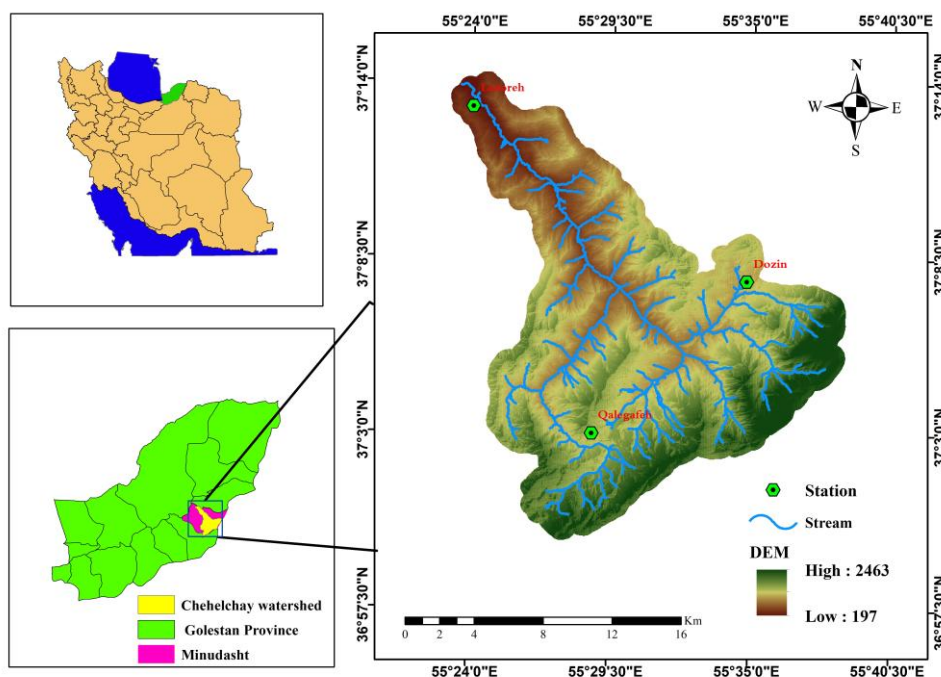
پایگاه سنگانه است. (Davoudi et al. (2024) به برآورد مکانی فرسایش و رسوب در محیط GIS با استفاده از مدل SEDD و RUSLE در آبخیز رودزرد استان خوزستان پرداختند. نتایج مدل SEDD نشان داد نسبت تحویل رسوب در کل آبخیز بین صفر و ۰/۹۹ متغیر و بیشترین مقدار آن در ارتباط با نواحی مجاور آبراهه‌ها است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز با ورودی‌های اندک و سهل‌الوصول مانند مدل RUSLE و SEDD کارایی قابل قبولی در برآورد مقدار فرسایش و رسوب به‌ویژه در آبخیزهای بزرگ که با محدودیت و کمبود داده مواجه هستند، دارد. (Arekhi and Barani (2024) در برآورد فرسایش و رسوب آبخیز چم‌گردلان ایلام با دو مدل RUSLE و EPM نتیجه گرفتند که میزان رسوب برآوردی مدل RUSLE، ۱۶/۳۷، و در روش EPM، برابر ۲۱/۴۹ و مقدار رسوب مشاهده‌ای ۱۶/۵۸ تن در هکتار در سال بود. با توجه به نزدیک‌تر بودن مقدار برآوردی RUSLE به مقدار رسوب مشاهده‌ای کارایی مدل RUSLE در برآورد رسوب منطقه مورد مطالعه بیشتر است. (Ebrahimzadeh et al. (2024) با به‌کارگیری مدل RUSLE/SDR در آبخیز دیزگران، نرخ متوسط فرسایش را ۴۵ تن در هکتار در سال محاسبه و نشان دادند که بیش از ۷۰ درصد مساحت آبخیز در کلاس‌های فرسایش شدید و بسیار شدید قرار دارد.

آبخیز چهل‌چای که بخشی از آبخیز گرگانرود در استان گلستان است به‌عنوان یک مرکز کشاورزی و جمعیتی قابل توجه و تغییرات زیادی در جنگل‌زدایی و تبدیل جنگل به اراضی زراعی داشته است (Taghinejad, 2021). در سال‌های اخیر سطح جنگل در آبخیز چهل‌چای با کاهش چشمگیری همراه بوده و سطح وسیعی از جنگل به اراضی زراعی تبدیل شده است. این تغییر کاربری عموماً بدون توجه به قابلیت‌های آن‌ها است که ایجاد خسارت‌های جدی مانند فرسایش، سیل، از دست رفتن خاک حاصلخیز و مانند آن‌ها را به دنبال دارد (Chamani and Azari., 2021). آبخیز چهل‌چای تحت تأثیر فرسایش شدید قرار دارد. از عوامل مهم فرسایش در این آبخیز می‌توان به قطع بی‌رویه درختان، توسعه بی‌رویه اراضی دیم، شخم در جهت شیب و تبدیل جنگل به اراضی کشاورزی اشاره کرد. همچنین این آبخیز به دلیل بالا بودن مقدار و شدت بارندگی، وجود سازندهای حساس به فرسایش، و داشتن شیب متوسط بیش از ۳۰ درصد یکی از آبخیزهای مستعد فرسایش و سیل است؛ به‌طوری‌که در مناطق پرشیب آبخیز، به دلیل عوامل انسانی از قبیل جاده‌سازی‌های غیر اصولی و تغییر کاربری، میزان فرسایش بیشتر از نقاط دیگر آبخیز است (Kornejady and

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

آبخیز چهل‌چای در محدوده شهرستان مینودشت استان گلستان با مختصات "۵۵°۳۰'۳۰" الی "۵۵°۳۷'۳۰" طول شرقی و "۳۶°۵۷'۱۵" الی "۳۷°۱۵'۳۰" عرض شمالی و مساحت ۲۵۶۸۳ هکتار واقع شده است. قسمت عمده این آبخیز کوهستانی پوشیده از جنگل و بقیه را اراضی زراعی در برمی‌گیرد (Aghajan Liafu et al., 2026). ارتفاع آبخیز چهل‌چای بین ۱۳۵ متر (حدقل) تا ۲۵۵۰ متر (حداکثر) از سطح دریا متغیر است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۷۶۶ میلی‌متر گزارش شده است که بیشترین میزان آن در ماه‌های اسفند و فروردین و به‌طور کلی در فصل زمستان رخ می‌دهد. میانگین دمای سالانه آبخیز نیز ۱۵/۴ درجه سانتی‌گراد است (Karimi et al., 2022). وجود ۲۶ روستا در این آبخیز، چالش‌های اقتصادی-اجتماعی را به همراه داشته است. یکی از این مسائل، چرای بی‌رویه دام است که میزان آن از سایر آبخیزهای جنگلی استان فراتر رفته و منجر به تشدید فرسایش در این منطقه شده است. به همین دلیل، بررسی فرسایش در آبخیز چهل‌چای از اهمیت بالایی برخوردار است (Agharajabi, 2018).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز چهل چای

Figure 1: Geographic Location of the Chehelchay watershed

(Amellah and el Morabiti, 2021). با این حال، تعیین ضریب R در اکثر نقاط جهان به دلیل کمبود داده‌های بارندگی با دقت بالا یک کار چالش برانگیز است. ضریب فرسایشی باران (R) بیانگر فرسایشی باران یا معیار فرسایش برای مدت بارندگی موردنظر است و قدرت فرسایش یک باران مشخص را تعیین می‌کند. این عامل میزان تأثیر قطرات باران بر خاک لخت و همچنین اثر رولناب ایجاد شده را کمی می‌کند. برای هر دوره معین، این ضریب با جمع کردن حاصل ضرب انرژی جنبشی کل بارش در واحد سطح (E)، ژول بر متر مربع) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I_{30})، میلی‌متر بر ساعت)، با در نظر گرفتن هر رویداد رگبار رابطه ۲، به صورت تحلیلی تخمین زده می‌شود (Arnoldus, 1977).

$$R = \frac{E \cdot I_{30}}{1700} \quad (2)$$

کمبود داده‌های دقیق بارش، محاسبه تحلیلی R را در برخی مناطق غیرممکن می‌کند. بنابراین، روش‌های تجربی ساده‌شده‌ای توسعه داده شدند (Schwertmann et al., 1990; Yu and Rosewell, 1996; Arnoldus, 1977; Van der Knijff et al., 2000; Ferrari et al., 2005) که عامل R را با پارامترهای آسان‌تر به‌دست آمده، مانند میانگین بارش سالانه (P) یا شاخص Fournier (F) مرتبط می‌کنند (Arnoldus et al., 2017). همچنین Arnoldus, (1997) شکل اصلاح‌شده شاخص فورنیه (رابطه ۳) را پیشنهاد داد تا از اشکالات مربوط به توزیع ماهانه بارندگی در طول سال جلوگیری شود.

۲-۲- معادله جهانی اصلاح‌شده فرسایش خاک (RUSLE)

معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) که مبتنی بر چارچوب معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) است، به‌عنوان یکی از متداول‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های کمی‌سازی نرخ فرسایش خاک شناخته می‌شود. (Wischmeier and Smith, 1978). این مدل بر پایه شش عامل کلیدی تعیین‌کننده شدت فرسایش استوار است. توسعه مدل RUSLE با اصلاح و بهبود این عوامل، قابلیت تطبیق و دقت آن را در محیط‌های مختلف افزایش داده است (رابطه ۱) (Renard et al., 1997).

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

که در آن A میانگین تلفات خاک در واحد سطح ($t \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$)، R ضریب فرسایشی باران ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot y^{-1}$)، K ضریب فرسایش‌پذیری خاک ($tonha \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)، LS توپوگرافی (بدون بعد) شامل عامل طول شیب (L) و اندازه شیب (S)، C ضریب مدیریت پوشش (بدون بعد) و P ضریب عملیات حفاظتی (بدون بعد) است.

فرسایشی باران (R) تابعی از توانایی بارندگی در ایجاد فرسایش خاک با جداسازی و حرکت ذرات خاک است. محاسبه R مستلزم داده‌های بلند مدت و کامل بارندگی است (Farhan and Nawaiseh, 2015; Ganasri and Ramesh, 2016). شدت بارندگی می‌تواند برای محاسبه فرسایشی باران استفاده شود

حساسیت زیادی به تغییرات طول شیب نشان نمی‌دهد (تغییرات $\pm 10\%$ ، به خصوص در مناطق مسطح، مهم تلقی نمی‌شوند)، درحالی‌که شدت و سرعت آن بیشتر تحت تأثیر اندازه شیب قرار می‌گیرد. نقشه عامل LS با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در قسمت Spatial Analyst، طول و درجه شیب مطابق رابطه ۷ محاسبه شد (McCool et al., 1989).

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \times \left(\frac{S}{9}\right)^n \quad (7)$$

که در آن λ طول شیب (بر حسب متر)، S درصد یا شدت شیب (بر حسب درصد)، m نمای طول شیب متغیر (بی‌بعد)، n نمای شدت شیب متغیر (بی‌بعد) است. عامل پوشش و کاربری سرزمین (C) بیانگر اثر فعالیت‌های مخرب خاک، کاربری سرزمین، سطح تولید محصولات و پوشش خاک بر فرسایش خاک است (Alexakis et al., 2013). یکی از روش‌های تعیین عامل C استفاده از نقشه طبقات کاربری و پوشش زمین است. مقادیر C برای هر نوع کاربری و پوشش زمین به صورت تجربی تعیین می‌شود (Karimi, 2011). کاربری اراضی با استفاده از تصویر ماهواره لندست ۸ ژوئن سال ۲۰۲۴ تعیین شد. مقادیر عامل C برای نقشه کاربری مطابق (جدول ۱) تعیین شد.

جدول ۱- عامل C برای طبقات کاربری سرزمین (Karimi, 2011)

Table 1: C-factor for landuse/landcover classes	
نوع کاربری و پوشش زمین	عامل C
جنگل	0.003
بدون پوشش	0.36
کشاورزی	0.26
مراکز	0.013
مراکز توسعه یافته	0.003
آب	0

عامل عملیات حفاظتی (P) به عنوان کسری از میزان فرسایش هنگام استفاده از روش‌های کشت مانند کشت در خطوط تراز، کشت نواری و تراس‌بندی، در مقایسه با فرسایش بدون آنها، تعریف می‌شود. روش‌های بهبود یافته خاک‌ورزی (مانند تناوب زراعی، کود آلی) نیز به کنترل فرسایش کمک می‌کنند. چنانچه در آبخیز مورد نظر هیچ کار حفاظتی صورت نگرفته باشد، مقدار آن یک در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳- تخمین میانگین سالانه تولید رسوب

با توجه به اینکه داده‌های رسوب معمولاً به صورت ناپیوسته و ناقص وجود دارند، لازم است مقدار رسوب برای روزهای فاقد داده به طریقی برآورد شوند. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای این

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

$$R\text{-Factor} = (0.07397 \times F^{1.847}) / 17.2 \quad F < 55 \text{ mm} \quad (4)$$

$$R\text{-Factor} = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times F^2) / 17.2 \quad F \geq 55 \text{ mm} \quad (5)$$

که در آن $\bar{p}_i$ میانگین بارندگی ماه i (میلی‌متر) و $\bar{P}$ میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر) است.

با جایگذاری شاخص فورنیه در روابط (۴ و ۵) برای مناطق فاقد داده‌های شدت بارندگی پیشنهاد شده است، مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌ها برآورد می‌شود (Renard and Freimund, 1994). فرسایش‌پذیری خاک نشان‌دهنده مقاومت ذاتی خاک در برابر فرسایش ناشی از باران و رواناب است و بازتابی از برهمکنش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است که بر جداسازی، انتقال و ظرفیت نفوذ تأثیر می‌گذارند. بافت، ساختار، محتوای ماده آلی، نفوذپذیری از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده فرسایش‌پذیری هستند. طبق نظر (Wischmeier et al., 1978)، ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K) معیاری از رفتار خاک با ویژگی‌های خاص (دانه‌بندی، محتوای ماده آلی، بافت، ساختار و نفوذپذیری) است. عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) با در نظر گرفتن اهمیت آن در ارزیابی سطوح فرسایش و رسوب (dos Santos et al., 2023) و با استفاده از بافت خاک، ماده آلی و رابطه ۶ محاسبه شد:

$$E_s = 0.2 + 0.3 \times e^{-0.0256 \times \text{sand} \times (1 - \frac{\text{silt}}{100})} \quad (6)$$

$$E_{C-T} = \left(\frac{\text{silt}}{\text{clay} + \text{silt}}\right)^{0.3}$$

$$E_{OC} = 1 - \left(\frac{0.25 \times OC}{OC + e^{3.72 - 2.95 \times OC}}\right)$$

$$E_{HS} = 1 - \frac{0.7 \times (1 - \frac{\text{sand}}{100})}{(1 - \frac{\text{sand}}{100}) + e^{-5.51 + 22.9 \times (1 - \frac{\text{sand}}{100})}}$$

$$USLE_K = E_s \times E_{C-T} \times E_{OC} \times E_{HS}$$

در این روابط، E_s زیرعامل مربوط به بافت خاک بر اساس محتوای شن، E_{C-T} زیرعامل بافت خاک برای برهمکنش رس و سیلت، E_{OC} زیرعامل کربن آلی و E_{HS} زیرعامل هیدرولیکی/ساختمانی است.

عامل توپوگرافی (LS) از دو مؤلفه طول شیب (L) و اندازه شیب (S) تشکیل شده که در یک شاخص واحد ترکیب می‌شوند. عامل L، که بیانگر تأثیر طول شیب بر فرسایش است، به عنوان فاصله از نقطه شروع رواناب تا منطقه رسوب‌گذاری تعریف می‌شود. عامل S نیز تأثیر شیب بر فرسایش را نشان می‌دهد و به صورت نسبت تغییرات عمودی به افقی بین هر دو نقطه مجزا تعریف می‌شود. افزایش مقادیر عامل LS، نشان‌دهنده حجم و سرعت بالای رواناب بوده و منجر به نرخ بالای هدررفت خاک می‌شود. با این حال، ذکر شده است هدررفت خاک

منظور استفاده از منحنی سنجه رسوب است. منحنی سنجه رسوب یک رابطه رگرسیونی نمایی بین مقدار رولناب (Q_w) و غلظت رسوب (Q_s) است (Zakwan et al., 2021).

$$Q_s = aQ_w^b \quad (۸)$$

که a و b ضرایب معادله هستند.

روش های گوناگونی برای تدوین منحنی سنجه وجود دارد. روش حد وسط دسته ها، به دلیل وزن دهی بیشتر به مقادیر حداکثر، از کارایی بالاتری برخوردار است (Arabkhedri et al., 2003). در این روش، داده های رواناب به ترتیب صعودی مرتب و به چندین دسته تقسیم می شوند. سپس، میانگین رواناب و رسوب متناظر با هر دسته محاسبه می شود. برای تخمین رسوب در روزهایی که داده ای در دسترس نیست، از رابطه رگرسیونی بین میانگین رواناب و رسوب دسته ها استفاده می شود. با بهره گیری از میانگین تولید سالانه رسوب برآورد می شود.

۲-۴- تخمین نسبت تحویل رسوب برای کل آبخیز

نسبت تحویل رسوب کل آبخیز با توجه به میانگین فرسایش به دست آمده از مدل RUSLE و میانگین رسوب محاسبه شده از منحنی سنجه رسوب مطابق رابطه ۹ به دست می آید (Kamuju, 2016).

$$SDR_w = \frac{\text{میانگین سالانه رسوب}}{\text{میانگین سالانه فرسایش}} \quad (۹)$$

۲-۵- تهیه نقشه توزیعی نسبت تحویل رسوب

با استفاده از مدل SEDD، نقشه توزیع نسبت تحویل رسوب تهیه می شود. مدل SEDD که یک مدل تجربی-توزیعی است، میزان رسوب را از طریق ضرب فرسایش خاک در نسبت تحویل رسوب محاسبه می کند. این مدل توانایی شبیه سازی فرایندهای فرسایش، انتقال و ته نشینی در آبراهه ها را ندارد و فرض بر این است که کلیه مواد رسیده به شبکه های آبراهه به خروجی آبخیز منتقل می شوند (Ferro and Porto, 2000; Davoudi et al., 2024). به عبارت دیگر، نسبت تحویل رسوب از دامنه ها به آبراهه محاسبه می شود. برای این منظور، در محیط ArcGIS و با بهره گیری از DEM، پارامترهایی چون زمان پیمایش، شیب و طول سلول در امتداد مسیر جریان محاسبه شد. طول هر سلول در مسیر جریان، بر اساس جهت جریان (که می تواند یکی از هشت جهت ممکن باشد) تعیین شد. در نهایت، با در دست داشتن نسبت تحویل رسوب کل آبخیز، ضریب ویژه حوضه (β) با استفاده از رابطه ۱۰ از طریق روش سعی و خطا مشخص شد (Ferro and Porto, 2000).

(۱۰)

$$SDR_i = \exp(-\beta \cdot t_{pi})$$

که t_{pi} زمان پیمایش از واحد λm تا نزدیک ترین آبراهه در امتداد مسیر هیدرولیکی p ، β ضریب ویژه آبخیز است. زمان پیمایش تحت تأثیر شیب مسیر و فاصله تا آبراهه بوده و از معادله ۱۰ قابل محاسبه است.

برای تعیین نسبت تحویل رسوب کل آبخیز، به اطلاعات فرسایش و رسوب آبخیز نیاز است. اطلاعات فرسایش خاک با مدل RUSLE و اطلاعات رسوب با داده های واقعی رسوب و منحنی سنجه رسوب استخراج شدند.

۲-۶- اولویت بندی مناطق بر اساس تولید رسوب

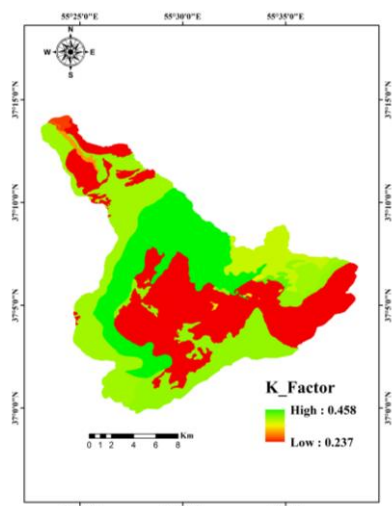
برای اولویت بندی مناطق بر اساس تولید رسوب، برآورد مقدار رسوب در هر پیکسل زیر آبخیز ضروری است. تولید رسوب از حاصل ضرب مقدار فرسایش تخمین زده شده توسط مدل RUSLE در نسبت تحویل رسوب تخمین زده شده توسط مدل SEDD به دست آمد. پس از محاسبه تولید رسوب برای هر پیکسل، میانگین تولید رسوب در زیر آبخیزها به عنوان معیار اولویت بندی مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

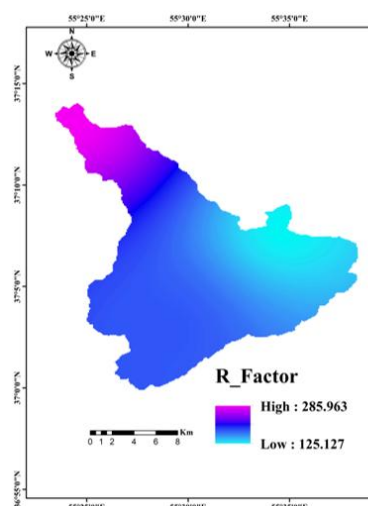
۳-۱- تحلیل عوامل مدل RUSLE

برای محاسبه عامل فرسایش باران (R) از ایستگاه های لزوره، قله قافه و دوزین موجود در آبخیز استفاده شد. پس از تعیین ایستگاه های باران سنجی، بارندگی ماهانه و سالیانه در دوره آماری مشترک (۱۳۸۰-۱۴۰۰) محاسبه شد. با استفاده از رابطه (۲)، شاخص فورنیه برای ایستگاه ها تخمین زده شد. با جای گذاری شاخص فورنیه در رابطه ۴، مقدار عامل R برای ایستگاه ها برآورد شد. نقشه عامل R با روش زمین آمار IDW تهیه شد (شکل ۲). مقدار این عامل از ۱۲۵/۱۲۷ تا ۲۸۵/۹۶ ($MJ \ mm \ ha^{-1} \ h^{-1}y^{-1}$) متغیر است. برای محاسبه عامل فرسایش پذیری خاک (K) از نمونه های خاک پس از انجام آزمایشات خاک شناسی، داده های لازم برای محاسبه عامل فرسایش پذیری خاک از رابطه (۶)، استخراج و نقشه عامل K در نرم افزار ArcGIS 10.8 تهیه شد. مقدار K ، بین ۰/۲۳۷ تا ۰/۴۵۸ متغیر است (شکل ۳).

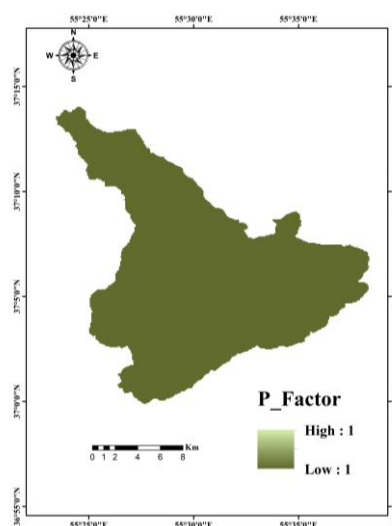
مقدار عامل LS که با استفاده از رابطه (۷) به دست آمد، بین صفر تا ۱۹۷/۱۵۸ متغیر است (شکل ۴). مقدار این عامل در مناطق با شیب تند و ناهموار، بیشتر است.



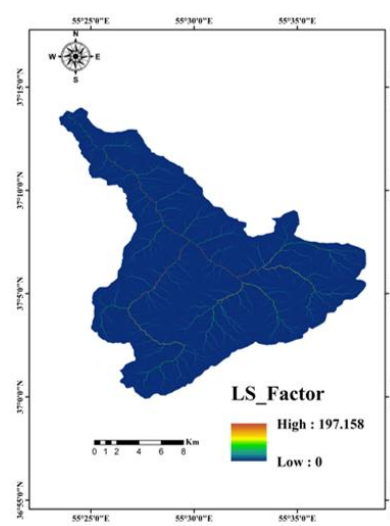
شکل ۳- عامل فرسایش‌پذیری خاک آبخیز چهل‌چای
Figure 3: Soil erodibility factor of Chehelchay watershed



شکل ۲- عامل فرسایش‌گذاری باران آبخیز چهل‌چای
Figure 2: Rain erosivity factor of Chehelchay watershed



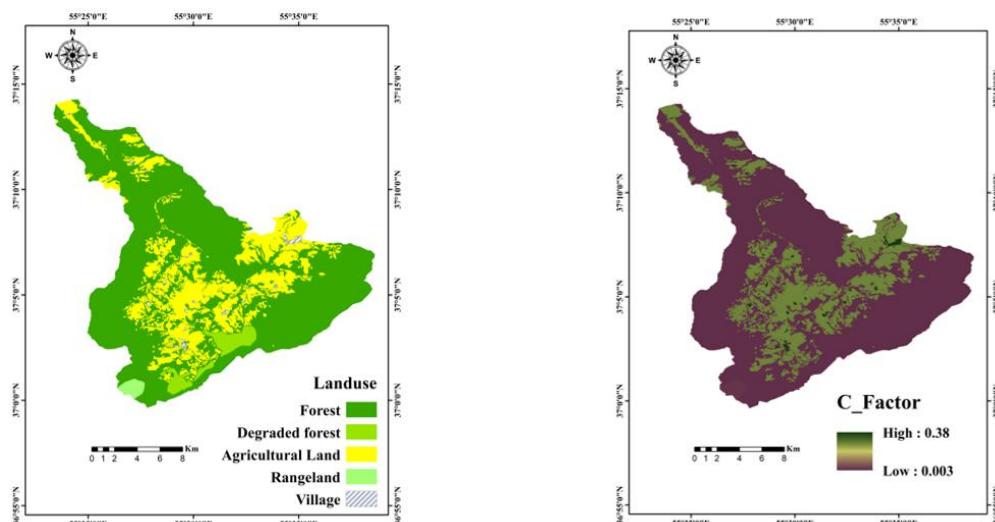
شکل ۵- عامل اقدامات حفاظتی آبخیز چهل‌چای
Figure 5: Land management factor of Chehelchay watershed



شکل ۴- عامل طول و جهت شیب آبخیز چهل‌چای
Figure 4: slope and length factor of Chehelchay watershed

Haji et al. (2024) در مطالعه ای نشان دادند شیب یک عامل مهم فرسایش بوده که اجرای شیوه‌های حفاظتی در زمین‌های شیب‌دار به طور قابل توجهی فرسایش را کاهش می‌دهد Mersha et al. (2025) . در اتیوپی نشان دادند که مناطق با شیب تند (بیش از ۲۶ درجه) بیش‌ترین نرخ فرسایش (تا ۱۴۴ تن در هکتار در سال) را تجربه می‌کنند. همچنین Abebe et al. (2023) در اسپانیا تأکید کردند که مقادیر بالای LS در مناطق پرشیب و مجاور آبراهه‌ها، همبستگی مستقیمی با نرخ بالای فرسایش دارد. که این یافته‌ها همسو با پژوهش‌حاضر است. برای تهیه نقشه عامل پوشش گیاهی (C)، از نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه استفاده شد. مقدار آن بین ۰/۰۳ تا ۰/۳۸ متغیر است (شکل ۶).

با توجه به عدم انجام اقدامات حفاظتی مشخص در آبخیز، مقدار اقدامات حفاظتی (P) یک در نظر گرفته شد (شکل ۵). یافته‌های این مطالعه نشان داد که عامل توپوگرافی (LS) با دامنه تغییرات صفر تا ۱۹۷/۱۵۸، نقش مهمی را در توزیع مکانی فرسایش آبخیز چهل‌چای ایفا می‌کند شیب به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل کنترل‌کننده فرسایش خاک در مطالعات متعدد مورد تأکید قرار گرفته است. در این راستا، Abedini and Pasban (2023) در آبخیز خیابوچای مشکین‌شهر گزارش کردند که عامل توپوگرافی (شیب و طول دامنه) با ضریب همبستگی ۰/۹۲ بیش‌ترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک دارد. Kaliyeva et al. (2024) در قزاقستان نشان دادند که اراضی کشاورزی واقع در شیب‌های تند و فاقد اقدامات حفاظتی، بالاترین نرخ فرسایش را به خود اختصاص می‌دهن همچنین



شکل ۶- عامل پوشش گیاهی و کاربری اراضی آبخیز چهل چای

Figure 6: vegetation cover factor and landuse map of Chehelchay watershed

۴۲/۳ تن در هکتار در سال افزایش یافته است. این مطالعات تأکید می کنند که حفاظت از پوشش جنگلی و مدیریت پایدار اراضی کشاورزی، یکی از کلیدی ترین راهکارهای کنترل فرسایش در آبخیزها هستند.

۳-۲- برآورد فرسایش خاک با روش RUSLE

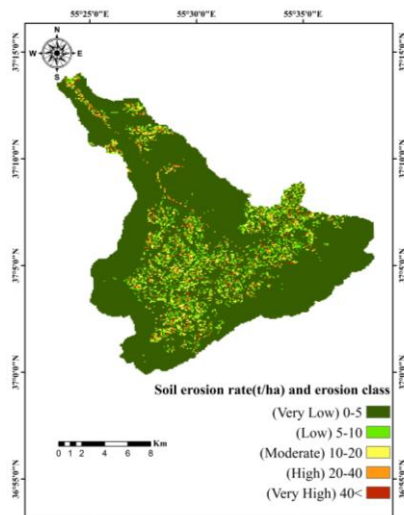
متوسط فرسایش سالانه خاک با حاصل ضرب عامل فرسایشی باران (R)، عامل فرسایش پذیری خاک (K)، عامل طول و درجه شیب (LS)، عامل پوشش گیاهی (C) و عامل حفاظت خاک (P) در محیط نرم افزار ArcGIS10.8 محاسبه شد (شکل ۷). شدت فرسایش به ۵ کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم بندی شد. با توجه به شیب زیاد در این مناطق، تقویت پوشش گیاهی مرتعی، جلوگیری از چرای بیش از حد دام و جنگل کاری گزینه های مناسبی برای کنترل فرسایش و حفاظت خاک به شمار می روند. جدول ۲ مقدار فرسایش و درصد مساحت هر طبقه را نشان می دهد.

در تحقیق حاضر، اراضی کشاورزی واقع در شیب های تند بیش ترین نرخ فرسایش را نشان دادند، درحالی که پوشش جنگلی تأثیر محافظتی قابل توجهی داشت. این یافته با نتایج مطالعات دیگر تأیید می شود. به عنوان مثال، Abiyat et al. (2021) نشان دادند افزایش اراضی زراعی دیم و مناطق مسکونی منجر به افزایش سطوح فرسایشی بالای ۲۰ تن در هکتار در سال شده است. در آبخیز چهل چای، کاهش چشمگیر سطح جنگل و تبدیل آن به اراضی زراعی (Chamani and Azari., 2021) یکی از عوامل اصلی افزایش فرسایش شناسایی شده است. Abiyat et al. (2021) نشان دادند تبدیل اراضی مرتعی به کشاورزی و افزایش مناطق مسکونی، باعث افزایش سطوح فرسایشی از ۱۹/۶۹ درصد در سال ۲۰۰۲ به ۴۵/۳۶ درصد در سال ۲۰۱۹ شده است. در مطالعه Mersha et al. (2025)، به این نتیجه دست یافتند که کاهش پوشش جنگلی از ۱۳/۳ درصد به ۳/۸ درصد و افزایش اراضی کشاورزی از ۶۲/۳ درصد به ۷۷ درصد، منجر به افزایش حداکثر فرسایش از ۷۲۶ به ۹۳۷ تن در هکتار در سال شده است. Mersha et al. (2025) نشان دادند که با افزایش مساحت اراضی کشاورزی، میانگین فرسایش سالانه از ۲۵/۵ به

جدول ۲- درصد مساحت و مقدار فرسایش آبخیز چهل چای

Table 2. Area percentage and erosion rate of the Chehelchay watershed

فرسایش (تن)	مساحت (درصد)
0-5	83.23
5-10	7.27
10-20	4.12
20-40	2.02
>40	1.35



شکل ۷- میزان فرسایش آبخیز چهل‌چای با روش RUSLE

Figure 7: Erosion rate in the Chehelchay watershed using the RUSLE Model

مدل رگرسیونی مورد استفاده برای توصیف رابطه دبی-رسوب ارائه شده است. روش حدوسط داده‌ها، نسبت به دو روش دیگر بیشترین ضریب تبیین (۰/۷۹) را دارد (شکل ۸). ضریب تبیین رگرسیون یک خطی برابر با ۰/۷۰ و برای رگرسیون دو خطی ۰/۵۵ برای دبی‌های کمتر از ۳ مترمکعب بر ثانیه و ۰/۷۷ برای دبی‌های بزرگتر از ۳ متر مکعب بر ثانیه به دست آمد. روش حد وسط داده‌ها توسط پژوهشگران مختلف از جمله Arabkhedri et al., (2003) به عنوان روش مناسب مورد تأیید قرار گرفته است. مزیت روش حدوسط داده‌ها نسبت به سایر روش‌های رگرسیونی در این است که ارزش بیشتری به دبی‌های بالا می‌دهد. با توجه به اینکه دبی‌های بالا نقش و سهم زیادی در انتقال رسوبات دارند، نتایج این روش به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. بر اساس روش حد وسط داده‌ها، میانگین سالانه تولید رسوب کل آبخیز برابر ۴۵۷۹۴ تن در سال به دست آمد که با در نظر گرفتن مساحت آبخیز، معادل ۱/۷۸ تن در هکتار در سال است.

۳-۴- نسبت تحویل رسوب

با توجه به میانگین سالانه تولید رسوب و فرسایش میانگین نسبت تحویل رسوب آبخیز برابر با ۴۴ درصد محاسبه شد. به عبارتی دیگر، از کل خاک فرسایش یافته کمتر از نیمی از آن به شبکه آبراهه راه پیدا می‌کند و کمی بیشتر از نیم دیگر در سطح آبخیز توزیع مجدد می‌شود. از میانگین نسبت تحویل رسوب آبخیز برای محاسبه ضریب ویژه حوضه (β) مدل SEDD استفاده شد. مقدار پارامتر β بین 10^{-1} تا 10^{-6} (m-1) متغیر است (Burguet et al., 2017). هرچه ظرفیت و سهولت انتقال

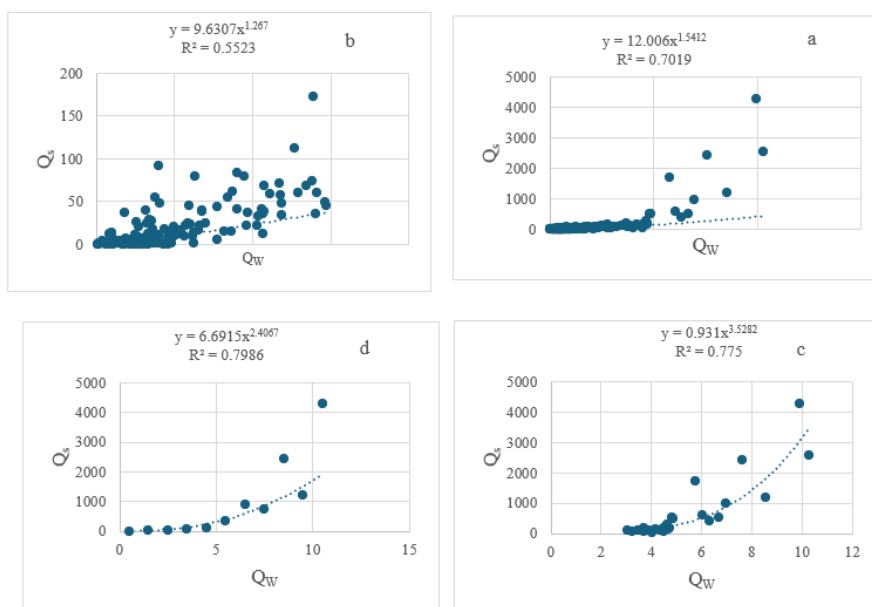
مقادیر فرسایش خاک بین صفر تا بیش از ۴۰ تن و متوسط ۴ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر است. بیشترین مقدار فرسایش در مناطق با شیب زیاد و کاربری کشاورزی بوده است. میانگین فرسایش سالانه خاک در آبخیز چهل‌چای حدود ۴ تن در هکتار در سال است که در مقایسه با میانگین ملی ایران (۳۳ تن در هکتار در سال؛ Baibordi, 2014) و مطالعات مشابه در آبخیزهای ایران مانند آبخیز دیزگران با ۴۵ تن در هکتار، (Ebrahimzadeh et al., 2024) و آبخیز سراب سیکان با ۲۲/۳ تن در هکتار، (Rezaei Moghaddam et al., 2022) پایین‌تر است. این اختلاف قابل توجه عمدتاً به دلیل پوشش جنگلی نسبتاً خوب در بخش‌هایی از آبخیز چهل‌چای است که نقش محافظتی مؤثری در کاهش فرسایش ایفا می‌کند با این حال، با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه (شیب متوسط بالای ۳۰ درصد) و فشارهای انسانی (چرای بی‌رویه دام، تبدیل جنگل به اراضی زراعی)، این میزان فرسایش همچنان نیازمند توجه مدیریتی جدی است. همچنین یافته‌ها با نتایج مطالعات دیگر در مناطق جنگلی ایران (Sohrabi et al., 2023) که نشان دادند پوشش جنگلی می‌تواند فرسایش را تا بیش از ۹۰ درصد کاهش دهد، همخوانی دارد. نتایج این پژوهش با مطالعات انجام‌شده در مناطق دیگر که کارایی مدل RUSLE را در شناسایی مناطق مستعد فرسایش تأیید کردند همخوانی دارد (Efthimiou et al., 2014; Arekhi et al., 2022; Saeedi Nazarlu et al., 2026).

۳-۳- وضعیت تولید رسوب آبخیز

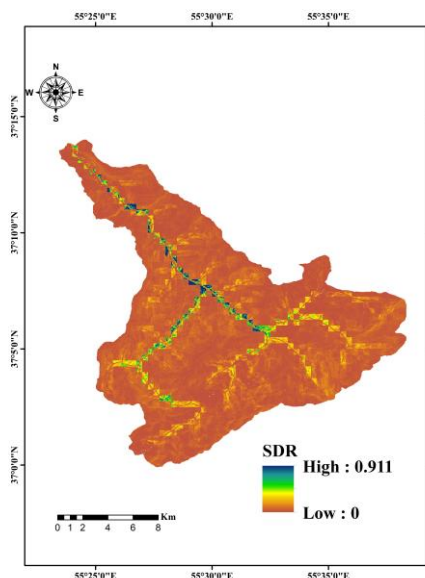
برای بررسی تولید رسوب آبخیز از داده‌های ایستگاه رسوب‌سنجی لزره واقع در خروجی آبخیز در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۰ و روش منحنی‌سنج رسوب استفاده شد. نتایج نکویی برازش سه

بررسی تفکیکی نسبت تحویل رسوب بر اساس شیب نشان می‌دهد که بیشترین نسبت تحویل رسوب در شیب‌های بالا است. بر اساس نوع کاربری، بیشترین نسبت تحویل رسوب در اراضی کشاورزی و کم‌ترین آن در اراضی جنگلی است.

رسوب در آبخیز بیشتر باشد، مقدار پارامتر β کوچک‌تر خواهد بود. نسبت تحویل رسوب توزیعی به‌دست آمده از مدل SEDD در شکل ۹ ارائه شده است. مقدار آن بین صفر و ۰/۹۱ متغیر است. بیشترین مقدار نسبت تحویل رسوب به نقاط مجاور آبراهه‌ها مربوط است و با افزایش فاصله و کاهش شیب، توان انتقال رسوب کاهش می‌یابد.



شکل ۸- منحنی‌های سنجه رسوب یک خطی (a)، دبی پایین (b)، دبی بالا (c) و حد وسط داده‌ها (d) در ایستگاه رسوب‌سنجی لزوره
Figure 8. Sediment rating curves single line (a), low discharge (b), high discharge (C), and mean data approach (d) of Lezoreh Hydrometry Station



شکل ۹- نسبت تحویل رسوب آبخیز چهل چای با مدل SEDD
Figure 9: Sediment delivery ratio in the Chehelchay watershed using the SEDD Model

داد که حدود نیمی از خاک فرسایش یافته به خروجی آبخیز می‌رسد. از منظر مدیریتی، اولویت اقدامات حفاظتی باید بر حفظ پوشش جنگلی موجود، جلوگیری از تبدیل جنگل به اراضی کشاورزی در شیب‌های تند، و اجرای تراس‌بندی در اراضی زراعی شیب‌دار متمرکز شود. این پژوهش با وجود نتایج ارزشمند، دارای محدودیت‌هایی است؛ به‌طوری‌که مدل RUSLE تنها فرسایش سطحی را برآورد می‌کند و فرسایش خندقی و کنار رودخانه‌ای را در نظر نمی‌گیرد، کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی و رسوب‌سنجی در داخل آبخیز، منبع عدم قطعیت در نتایج محسوب می‌شود. این محدودیت‌ها فرصت مناسبی برای پژوهش‌های آتی با استفاده از مدل‌های فرآیندی پیشرفته‌تر و داده‌های میدانی گسترده‌تر فراهم می‌آورد.

سپاسگزاری

مقاله مستخرج از طرح پژوهشی داخلی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان است. از معاونت پژوهشی دانشگاه برای همکاری و مساعدت حمایت مالی انجام پژوهش قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

تمام داده‌های تولید شده در متن مقاله حاضر ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

حبیب نظر نژاد: مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، راهنمایی، تجزیه و تحلیل و بررسی؛ **فرخنده آقاجان لیافو:** نگارش پیش نویس اصلی، تجزیه و تحلیل و بررسی، تهیه نقشه‌ها.

منابع

- ابراهیم‌زاده، سمیه، ارگانی، میثم، و میردار هریجانی، فرشاد (۱۴۰۳). مدل‌سازی نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب با مدل RUSLE/SDR در حوضه آبخیز دیزگران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۳(۳۹)، ۱-۲۴. doi:10.22111/jneh.2024.39109.1823
- آرخی، صالح، بارانی، شهرام، و سمیه، عمادالدین (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر فرسایش و برآورد رسوب در حوضه چم گردلان (استان ایلام) با استفاده از مدل تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۴)، ۵۶-۳۵. doi: 10.22111/jneh.2022.39063.1822
- آرخی، صالح، و بارانی، شهرام (۱۴۰۳). مقایسه مدل‌های RUSLE و EPM در برآورد فرسایش و تولید رسوب با استفاده از GIS (مطالعه)

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات مشابه همخوانی دارند به عنوان مثال، Fernandez et al. (2003) در آمریکا با تلفیق مدل‌های RUSLE و SEDD برای برآورد دقیق‌تر رسوب، رویکردی مشابه با مطالعه حاضر ارائه دادند. این الگو با مطالعه Rashki et al. (2006) در آبخیز کهنوک خاش که با تلفیق مدل‌های SEDD و RUSLE توانستند توزیع مکانی نسبت تحویل رسوب را با دقت قابل قبولی برآورد کنند نیز هم‌راستا است. Noor and Arabkhedri. (2023) نیز در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه نشان دادند که مدل RUSLE پس از اعمال ضریب اصلاحی، قادر به برآورد متوسط فرسایش با خطای ۲ تا ۱۷ درصد و نسبت تحویل رسوب بین ۳۹/۷ تا ۴۲/۲ درصد است که نسبتی بسیار نزدیک با یافته‌های حاضر (۴۴ درصد) دارد. همچنین Davoudi et al. (2024) در آبخیز رودزرد استان خوزستان نشان دادند که نسبت تحویل رسوب بین صفر تا ۰/۹۹ متغیر است و بیش‌ترین مقادیر آن در مجاورت آبراهه‌ها مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، تلفیق مدل‌های RUSLE و SEDD عملکرد بهتری نسبت به استفاده از هر یک از این مدل‌ها به تنهایی داشته و قادر است درک جامع‌تری از فرآیند فرسایش و رسوب ارائه دهد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق RUSLE و SEDD با کالیبراسیون با داده‌های واقعی ایستگاه لزوره از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

شناخت دقیق وضعیت فرسایش و تولید رسوب در آبخیزهای کشور، نقشی اساسی در بهینه‌سازی مدیریت ایفا می‌کند. با این وجود، تعیین کمی نرخ فرسایش و رسوب، به‌ویژه در برخی از آبخیزها به دلیل کمبود داده‌های میدانی مناسب و کافی، همواره با چالش‌ها و محدودیت‌هایی همراه بوده است. نتایج این پژوهش نشان داد که تلفیق مدل‌های تجربی RUSLE و SEDD، رویکردی کارآمد برای برآورد مکانی فرسایش و تولید رسوب در شرایط کمبود داده است. این مدل‌ها، علیرغم ساده‌سازی‌های ذاتی، قادر به شناسایی الگوهای فضایی بحرانی فرسایش بوده و امکان اولویت‌بندی مناطق آسیب‌پذیر را فراهم می‌آورند. یافته‌ها تأیید کردند که عامل توپوگرافی (LS) با بیش‌ترین تأثیر، و کاربری کشاورزی در شیب‌های تند با بیش‌ترین نرخ فرسایش، به ترتیب اصلی‌ترین عوامل طبیعی و انسانی کنترل‌کننده فرسایش در آبخیز چهل‌چای هستند. در مقابل، پوشش جنگلی نقش محافظتی چشمگیری در کاهش فرسایش ایفا کرد. نسبت تحویل رسوب ۴۴ درصد نشان

سهرابی، احسان، طهماسبی پور، ناصر، حق زاده، علی، و زینی وند، حسین (۱۴۰۱). بررسی اثر پوشش گیاهی بر فرسایش آبی با استفاده از مدل اصلاح شده جهانی هدررفت خاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز مادیان رود لرستان). ترویج و توسعه آبخیزداری، ۱۰(۳۹)، ۲۲-۲۱. doi: 20.1001.1.26454777.1401.10.39.2.211-22

عابدینی، موسی، و پاسبان، امیرحسام (۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل و پهنه بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی، مطالعه موردی: حوزه آبریز خیاوچای، مشکین شهر. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۳۸)، ۴۰-۵۹. doi:10.22034/HYD.2023.58528.1708

عبیات، محمد، عبیات، مصطفی، و عبیات، مرتضی (۱۴۰۰). بررسی تغییرات کاربری اراضی و اثر آن بر روند فرسایش خاک در حوزه باغملک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل RUSLE. محیط شناسی، ۴۷(۱)، ۸۹-۱۱۱. doi: 10.22059/JES.2021.324250.1008180

عرب خدری، محمود، حکیم خانی، شاهرخ، و نیک کامی، داود (۱۳۸۲). مقایسه چند روش آماری در برآورد بار معلق در یک حوزه با رژیم برفی و بارانی. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، شماره ثبت ۹۶۶/۸۳، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.

کرندادی، آیدینگ، و پورقاسمی، حمیدرضا (۱۳۹۸). ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل های داده کاوی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز چهل چای. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۱)، ۴۲-۲۸. doi: 10.22092/ijwmse.2019.118436.

کریمی، صاحب (۱۳۹۰). تهیه نقشه کالاها و خدمات اکوسیستمی اکوسیستم های جنگلی و مرتعی استان گلستان (مطالعه موردی: حوزه آبخیز گرگان و علی آباد کنول). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

کریمی، زینب، سعدالدین، امیر، و شیخ، واحدبدی (۱۴۰۱). اثرات اقدامات آبخیزداری بر خدمات چهارگانه آبخیز چهل چای استان گلستان. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۴)، ۳۶-۱۸. doi: 10.22098/MMWS.2022.10523.1087

نژادافضلی، کرامت، شاهرخی، محمدرضا، و بیاتانی، فاطمه (۱۳۹۸). برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوزه آبخیز دهکهان (جنوب کرمان). مخاطرات طبیعی، ۸(۲۰)، ۳۸-۲۱. <https://sid.ir/paper/373685/fa>

نور، حمزه، و عرب خدری، محمود (۱۴۰۲). برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۱)، ۵۳-۴۲. doi: 10.22098/mmws.2022.11085.1098

موردی: حوضه چمگردلان استان ایلام). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۳(۲)، ۳۷۱-۳۳۹. doi:10.22067/geoch.2022.75260.1176

آقارجی، ساسان (۱۳۹۷). بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش اقدامات حفاظت خاک در بین کشاورزان حوضه آبخیز چهل چای، استان گلستان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

بای بوردی، محمد (۱۳۹۳). فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۴ صفحه.

پاسبان، امیرحسام، عابدینی، موسی، و فروتن، مهدی (۱۴۰۱). ارزیابی و تحلیل میزان تاثیر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از مدل تجربی RUSLE (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بالیخوچای، استان اردبیل). جغرافیا و روابط انسانی، ۵(۳)، ۲۵۸-۲۳۸. doi: 10.22034/GAHR.2023.382150.1796

تقی نژاد، حدیثه (۱۴۰۰). ارزیابی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر پتانسیل فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چهل چای). پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی لامعی گرگان.

چمنی، رضا، و آذری، محمود (۱۴۰۰). اثرات اصلاح کاربری اراضی بر رفتار هیدرولوژیکی حوزه آبخیز چهل چای استان گلستان. آب و خاک، ۳۵(۲)، ۱۸۸-۱۵۲. doi:10.22067/jsw.2021.15022.0.۱۷۹-۱۸۸

خضری، میلاد، نصرتی، کاظم، محمدی رایگانی، زینب، خالقی، سمیه و جلالی، سعیده (۱۴۰۲). تاثیر کاربری اراضی بر فرسایش پذیری و کیفیت خاک (مطالعه موردی: حوزه آبریز هشتیان، دریاچه ارومیه). جغرافیا و پایداری محیط، ۱۳(۲)، ۱۷-۱. doi:10.22126/GES.2022.8143.2564

داودی، شکوفه، غفاری، حیدر، و فرخیان فیروزی، احمد (۱۴۰۳). برآورد مکانی فرسایش و رسوب در محیط GIS با استفاده از مدل SEDD و RUSLE در حوزه آبخیز رودزرد استان خوزستان. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۸(۶۶)، ۱۳-۱. doi: 10.22034/18.66.1

راشکی، علیرضا، تلوری، عبدالرسول، و نورا، ناصر (۱۳۸۵). برآورد فرسایش و رسوب سالانه با استفاده از مدل های RUSLE و SEDD و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS در حوزه آبخیز کهنوک خاش. دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج. <https://civilica.com/doc/24503>

رضایی مقدم، محمدحسین، حجازی، اسداله، و مزبانی، مهدی (۱۴۰۱). برآورد فرسایش-رسوب آبریز سراب سیکان با استفاده از RUSLE. هیدروژئومورفولوژی، ۹(۳۲)، ۲۳-۱. doi: 10.22034/hyd.2021.40330.1555

challenges of the 'RUSLE-IC-SDR' approach to identify sediment dynamics in a Mediterranean catchment. *Catena*, 233, 107480. doi:10.1016/j.catena.2023.107480

References

Abebe, N., Eekhout, J., Vermeulen, B., Boix-Fayos, C., de Vente, J., Grum, B., Hoitink, T., & Baartman, J. (2023). The potential and

- Abedini, M., & Pasban, A.H. (2023). Analysis and zoning of soil erosion rate and its relationship with hydrogeomorphic indicators and vegetation, case study: Khiavchai watershed, MeshkinShahr. *Hydrogeomorphology*, 11(38), 40-59. doi:10.22034/HYD.2023.58528.1708 [In Persian]
- Abiyat, M., Abiyat, M., & Abiyat, M. (2021). Investigation of land-use changes and their impacts on soil erosion in Baghdad basin using artificial neural network and RUSLE model. *Journal of Environmental Studies*, 47(1), 89-111. doi: 10.22059/JES.2021.324250.1008180 [In Persian]
- Aghajan Liafu, F., Nazarnejad, H., Zare Garizi, A., & Daghubati, P. (2026). Sediment estimation using SWAT+ model and assessing the effectiveness of conservation measures. *Journal of Mountain Science*, 23(1), 156-170. doi:10.1007/s11629-025-9812-z
- Agharajabi, S. (2018). Investigation of factors affecting the adoption of soil conservation measures among farmers in the Chehelchay watershed, Golestan province. *M.Sc. Thesis*, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. [In Persian]
- Ahmad, J., Mahmood, S.A., and Haseeb, M. (2025). Comprehensive assessment of soil erosion using cloud-based geospatial analysis: Insights from the RUSLE model. *Soil & Environment*, 44(2), 14-30. doi:10.25252/SE/2025/253773
- Alexakis, D.D., Hadjimitsis, D.G., and Agapiou, A., (2013). Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of Yialias in Cyprus. *Atmospheric Research*, 131, 108-124. doi: 10.1016/j.atmosres.2013.02.013
- Allafta, H., and Opp, CH. (2022). Soil erosion assessment using the RUSLE model, remote sensing and GIS in the Shatt Al- Arab basin (Iraq-Iran). *Applied Sciences*, 12(15):7776. doi: 10.3390/app12157776
- Amellah, O., and el Morabiti, K. (2021). Assessment of soil erosion risk severity using GIS, remote sensing and RUSLE model in Oued Laou Basin (north Morocco). *Soil Science Annual*, 72(3), 142530. doi: 10.37501/soilsa/142530
- Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., Olson, C., Sztein, A.E., and Sparks, D.L. (2015). Soil and human security in the 21 century. *Science*, 348, 6235. doi: 10.1126/science.1261071.
- Arabkhedri, M., Hakim Khani, Sh., & Nik Kami, D. (2003). Comparison of several statistical methods for estimating suspended sediment load in a basin with snow and rain regime. *Research Report*, Registration No. 83/966, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. [In Persian]
- Arekhi, S., & Barani, S. (2024). Comparison of EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment production using GIS (Case study: Chamgardalan watershed of Ilam province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 339-371. doi:10.22067/geoh.2022.75260.1176 [In Persian]
- Arekhi, S., Barani, S., & Emadodin, S. (2022). Zoning Erosion Hazard and Sediment Estimation in Cham Gardalan basin (Ilam province) using the Revised Universal Soil Erosion Equation (RUSLE). *Natural Environmental Hazards*, 11(34), 35-56. doi: 10.22111/jneh.2022.39063.1822 [In Persian]
- Arnoldus, J.M.J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Food. Agric. Org., Soils Bull.* 34, 39-51.
- Arnoldus, M., Taguas, E.V., and Gómez, J.A. (2017). Exploring calibration strategies of the SEDD model in two olive orchard catchments. *Geomorphology*, 290, 17-28. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.03.034
- Baibordi, M. (2014). Soil physics. *Tehran University Press*, 674 p. [In Persian]
- Burguet, M., Taguas, E.V., and Gómez, J.A. (2017). Exploring calibration strategies of the SEDD model in two olive orchard catchments. *Geomorphology*, 290, 17-28. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.03.034
- Chamani, R., & Azari, M. (2021). Land Use Restoration Impacts on Hydrological Behavior of Chehel Chay Watershed of Golestan Province. *Water and Soil*, 35(2), 179-188. doi:10.22067/jsw.2021.15022.0 [In Persian]
- Davoudi, S., Ghaffari, H., & Farrokhan Firouzi, A. (2024). Spatial Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield in GIS Environment Using SEDD and RUSLE Models: A Case Study Roudzard Watershed in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 18(66), 1-13. doi:10.22034/18.66.1 [In Persian]
- De Crop, W., Verschuren, D., Ryken, N., Basooma, R., Okuonzia, J.T. and Verdoodt, A. (2023). Accelerated soil erosion and sedimentation associated with agricultural activity in Crater-Lake Catchments of Western Uganda. *Land*, 12(5), 976. <http://hdl.handle.net/1854/LU-01H8NXFJCP1MNN23EE7JGV62S3>

- dos Santos, F.M., de Souza Pelinson, N., de Oliveira, R.P. and Di Lollo, J.A. (2023). Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. *Catena*, 222: 106872. doi:10.1016/j.catena.2022.106872
- Dutta, D., Das, S., Kundu, A., and 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, 37. doi:10.1007/s40808-015-0034-1
- Ebrahimzadeh, S., Argany, M., & Mirdar Harijani, F. (2024). Modeling the rate of soil erosion and sediment yield using the RUSLE / SDR model in the Dizgaran watershed. *Natural Environmental Hazards*, 13(39), 1-24. doi:10.22111/jneh.2024.39109.1823 [In Persian]
- Efthimiou, N., Lykoudi, E., and Karavitis, C. (2014). Soil erosion assessment using the RUSLE model and GIS. *European Water*, (47), 15-30. doi:10.1007/s40003-024-00769-9
- Emadodin, I., Narita, D., and Bork, H.R. (2012). Soil degradation and agricultural sustainability: an overview from Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 14, 611-625. doi:10.1007/s10668-012-9351-y
- Farhan, Y., and Nawaiseh, S. (2015). Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 74, 4649-4669. doi:10.1007/s12665-015-4430-7
- Fernandez, C., Wu, J.Q., McCool, D.K., and Sto'ckle, C.O. (2003). Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(3), 128-136. doi:10.1080/00224561.2003.12457515
- Ferrari, R., Pasqui, M., Bottai, L., Esposito, S., and Di Giuseppe, E. (2005). Assessment of soil erosion estimate based on a high temporal resolution rainfall dataset. In: *Proc. 7th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM)*, Utrecht, Netherlands, 12-16 September 2005.
- Ferro, V. and Porto P. (2000). Sediment delivery distributed (SEDD) model. *Journal of Hydrologic Engineering*. 5(4): 411-422. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699
- Financial Tribune. (2022): <https://financialtribune.com/articles/environment/33787/soil-erosion-in-iran-costs-more-than-oil-revenue>.
- Ganasri, B.P., and Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS- A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontier*, 7(6), 953-961. doi:10.1016/j.gsf.2015.10.007
- Gayen, A., Saha, S., and Pourghasemi, H.R. (2020). Soil erosion Assessment using RUSLE model and its Validation by FR probability model. *Geocarto International*, 35 (15), 1750-1768. doi:10.1080/10106049.2019.1581272
- Haile, D. C., Bedhane, M. D, Shiferaw, W., Chalite, G. C., Birra, D. A., Morgamo, Z. D., Gebre, Z.A.&Solomon, T. (2025). Estimating soil loss rates and landcapability classification based on erosion severity in the Womba Watershed, Southern Ethiopia. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(4), 41-64. doi: 10.22098/mmws.2025.18258.1667
- Haji, K., Esmali-Ouri, A., Mostafazadeh, R., & Nazarnejad, H. (2024). Scenario-based land use management to restore natural areas and reducing soil erosion rate in a competing land uses condition. *Anthropogenic Pollution*, 8(2). doi:10.57647/j.jap.2024.0802.15
- Huang, X., Liu, J., Zhang, Z., Fang, G., and Chen, Y. (2019). Assess river embankment impact on hydrologic alterations and floodplain vegetation. *Ecological Indicators*, 97, 372-379. doi:10.1016/j.ecolind.2018.10.039
- Ibragimov, O., Inamov, B., and Alimakhamatova, S. (2024). Assessing Soil Erosion Dynamics in the Bekabad district, Uzbekistan: A Remote Sensing Approach Integrating the RUSLE Model and Google Earth Engine. In *E3S Web of Conferences* (590: 01005). EDP Sciences. doi:10.1051/e3sconf/202459001005
- Jarašiūnas, G., Šwitoniak, M., and Kinderienė, I. (2020). Dynamics of slope processes under changing land use conditions in young morainic landscapes, Western Lithuania. *International Agrophysics*, 34(1), 43-55. doi:10.31545/intagr/116404
- Kaliyeva, D., Tokbergenova, A., Mirzabaev, A., Zulpykharov, K., Bissenbayeva, S., Taukebayev, O., & Qadir, M. (2024). Assessing soil erosion risk in Kazakhstan: A RUSLE-based approach for land rehabilitation. Preprint, 1-13. doi: 10.15244/pjoes/187595
- Kamuju, N. (2016). Soil erosion and sediment yield analysis using prototype and enhanced SATEEC GIS system models. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 5(1), 1471-1482.
- Karimi, S. (2011). Mapping of goods and services of forest and rangeland ecosystems in Golestan province (Case study: Gorgan and Aliabad Katoul watershed). *M.Sc. Thesis*, University of Tehran, Iran. [In Persian]

- Karimi, Z., Sadoddin, A., & Sheikh, V. (2022). Effects of watershed management practices on the quadric services of Chehel-Chai Watershed, Golestan Province. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 18-36. doi:10.22098/MMWS.2022.10523.1087 [In Persian]
- Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tiftonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J.N., Pachepsky, Y., van der Putten, W.H., Bardgett, R. D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., and Fresco, L.O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals (SDGS). *Soil Discussion*, 2, 111–128. doi:10.5194/soil-2-111-2016
- Khezri, M., Nosrati, K., Mohammadi Rigani, Z., Khaleghi, S., & Jalali, S. (2022). The Impact of Land Use on Erodibility and Soil Quality (Case Study: Hashtian Catchment, Urmia Lake). *Geography and Environmental Sustainability*, 13(2), 1-17. doi: 10.22126/GES.2022.8143.2564 [In Persian]
- Kornejady, A., & Pourghasemi, H.R. (2019). Landslide Susceptibility Assessment Using Data Mining Models, A case study: Chehel-Chai Basin. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 28-42. doi:10.1001.1.22519300.1398.11.1.3.3 [In Persian]
- Maqsoom, A., Aslam, B., Hassan, U., Kazmi, Z. A., Sodangi, M., Tufail, R. F., and Farooq, D. (2020). Geospatial assessment of soil erosion intensity and sediment yield using the revised universal soil loss equation (RUSLE) model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 356. doi: 10.3390/ijgi9060356
- McCool, D. K., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1989). Revised Slope Length and Steepness Factors for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1571–1576
- Mersha, E., Degefa, S., Argaw, M., & Mengist, W. (2025). Spatiotemporal modeling of soil loss and sediment yield due to land use and land cover changes: implications for watershed management. *Journal of Water and Climate Change*, 16(3), 1-26. doi: 10.2166/wcc.2025.467
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. and Styczen, M.E. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(6): 527-544. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527:AID-ESP868>3.0.CO;2-5
- Nezhadafzali, K., Shahrokhi, M.R., & Bayatani, F. (2018). Assessment soil erosion using RUSLE model and identification the most effective factor in Dekhan watershed basin of southern Kerman. *Journal of Natural Environment Hazards*, 8(20), 21-38. <https://sid.ir/paper/373685/fa> [In Persian]
- Noor, H., & Arabkhedri, M. (2023). Prediction of soil erosion and sediment delivery ratio using RUSLE at Sanganeh soil conservation research station. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 42-53. doi: 10.22098/mmws.2022.11085.1098 [In Persian]
- Pasban, A.H., Abedini, M., & Frotan, M. (2022). Evaluation and analysis of the impact of land use on soil erosion using the RUSLE experimental model (case study: Balikhlochai watershed, Ardabil province). *Geography and Human Relationships*, 5(3), 238-258. doi: 10.22034/gahr.2023.382150.1796 [In Persian]
- Rashki, A., Teluri, A., & Noura, N. (2006). Estimation of annual erosion and sediment using RUSLE and SEDD models and GIS in Kahnouk Khash watershed. *Proceedings of the 10th Iranian Congress of Soil Science*, Karaj, Iran. <https://civilica.com/doc/24503> [In Persian]
- Renard, K. G., Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157: 287-306. doi:10.1016/0022-1694(94)90110-4
- Renard, K.G. Foster, G.R. Weesies, G.A. McCool, D.K. and Yoder, D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Handbook* 703. US Department of Agriculture, Washington
- Rezaei Moghaddam, M.H., Hejazi, A., & Mozbani, M. (2022). Estimation of Erosion-Sediment in Sarab Sikan Watershed Using RUSLE Model. *Hydrogeomorphology*, 9(32), 1-23. doi:10.1001.1.23833254.1401.9.32.1.9 [In Persian]
- Robinson, D.A., Panagos, P., Borrelli, P., Jones, A., Montanarella, L., Tye, A., and Obst, C.G. (2017). Soil natural capital in Europe; a framework for state and change assessment. *Sci. Rep.* 7(1):6706. doi:10.1038/s41598-017-06819-3.
- Saeedi Nazarlu, F., Khavarian Nehzak, H., Mostafazadeh, R., & Alaei, N. (2026). Spatial hotspot analysis of soil erosion rate and classification of homogeneous zones using GIS in a mountainous contrasting land-use

- watershed. *Scientific Reports*. 16, 10456. doi:10.1038/s41598-026-41668-z
- Schwertmann, U., Vogl, W., and Kainz, M. (1990). Soil erosion by water. *Verlag Eugen Ulmer*, Stuttgart
- Sohrabi, E., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., & Zeinivand, H. (2023). Effect of vegetation on water erosion using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Case study: Madyanwood River watershed, Lorestan, Iran). *Extension and Development of Watershed Management*, 10(39), 11-22. doi:20.1001.1.26454777.1401.10.39.2.2 [In Persian]
- Taghinejad, H. (2021). Evaluation of the effects of land use changes on soil erosion potential using the RUSLE model (Case study: Chehelchay watershed). *M.Sc. Thesis*, Lamei Gorgan Institute of Higher Education. [In Persian]
- Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A. and Montanarella L. (2000). Soil erosion risk assessment in Italy, EUR 19044 EN, 44pp. *Office for Official Publications of the European Communities*, Luxembourg.
- Wischmeier W.H., and Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* No. 537. US Department of Agriculture, Washington DC.
- Yu, B. and Rosewell C.J. (1996). A robust estimator of the R-Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE*, 2, 559-561. doi:10.13031/2013.27535
- Zakwan, M. Pham, Q.B. and Zhu, S. (2021). Effective discharge computation in the lower Drava River. *Hydrological Sciences Journal*. 66(5): 826-837. doi:10.1080/02626667.2021.1900853