



Mapping of soil erosion risk and sediment yield using WaTEM/SEDEM in Hajighoshan watershed of Golestan province

Hamed Ziaiekia¹ | Hossein Asadi² | Mahmood Arabkhedri³ | Zeinab Askarian-Chaijan⁴

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail:

ziaiekia.hamed@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail:

ho.asadi@ut.ac.ir

3. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: arabkhedri@scwmri.ac.ir

4. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: zeinab.askarian@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 8, 2025

Revised: Sep. 17, 2025

Accepted: Oct. 1, 2025

Published online: Dec. 2025

Keywords:

*Annual sediment yield,
Google earth engine,
RUSLE,
Rainfall intensity,
Soil loss.*

ABSTRACT

Soil erosion (SE), as one of the most important problems in the world, threatens life and the environment by disrupting natural ecosystems. To protect and sustainably utilize soil, ensure food security, and maintain environmental health, it is essential to assess SE and the resulting sediment yield (SY). In this study, the SE risk of the Haji-Ghoshan watershed was estimated with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE) and using a spatial information system and remote sensing. Then, the SE and SY of the watershed were estimated and examined using the WaTEM/SEDEM. Various data including DEM, rainfall statistics from rain gauge stations, satellite imageries, and soil properties were used to estimate RUSLE factors and WaTEM/SEDEM input layers. The average SE risk in the watershed was estimated to be 61 ton ha⁻¹ y⁻¹. Predicted SE by WaTEM/SEDEM showed a high correlation with RUSLE at the watershed level, but had a systematic overestimation. A good agreement was not observed between the estimated SY by WaTEM/SEDEM and the annual measured SY. The annual SY was strongly affected by flood events, which led to many changes in SY over the years. The basis of the estimation with the model is the annual rainfall erosivity, which its annual changes are much less than the changes of individual flood events. The WaTEM/SEDEM model was not able to estimate the SY in years when extreme flood events occurred, and had an underestimation. On the other hand, in years when flood events do not occur much, it overestimates the SY.

Cite this article: Ziaiekia, H., Asadi, H., Arabkhedri, M., Askarian, Z., (2025). Mapping of soil erosion risk and sediment yield in Hajighoshan watershed using WaTEM/SEDEM., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (10),2691-2709. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398094.669971>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398094.669971>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil erosion, as a major type of land degradation, poses a growing threat to both the environment and human societies. Due to the various types and complex dynamics of erosion processes, the use of empirical models such as the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) has become essential. Which estimates soil erosion based on key variables: (R, K, LS, C and P). The WaTEM/SEDEM model is a spatially distributed soil erosion and sedimentation model derived from RUSLE that also incorporates a sediment transport capacity equation to predict sediment delivery within drainage networks. In this study, the risk of soil erosion was mapped and sediment yield was estimated using both the RUSLE and WaTEM/SEDEM models in Hajighoshan watershed, located in Golestan Province.

Method

This study covers a 15-year period (2002–2017) in the Hajighoshan watershed of Golestan Province. Soil loss was estimated using RUSLE. The R factor was determined using the Modified Fournier Index, while the K factor was calculated using the Romkens et al. (1987) equation. The LS factor was derived using the Moore and Wilson (1992) equation, and the C factor was calculated using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) through the Google Earth Engine platform. The P factor was set to 1 for the entire region, due to the absence of implemented soil conservation measures. To estimate the suspended sediment load at the basin outlet, hydrological and sedimentological data from the Temer station were analyzed over the study period.

The 2004 version of the WaTEM/SEDEM model was used to estimate soil erosion and sediment yield. Model inputs included a digital elevation model (DEM), a land use/land cover map, and RUSLE parameters. All input data were converted to the IDRISI software format (.rst) and standardized to a uniform pixel size of 20×20 meters to ensure cell alignment.

Results

The Modified Fournier Index ranged from 20 to 91, the K factor varied from 0.0371 to 0.0437 $\text{ton h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$, the average LS factor was 3.98, and the C factor ranged from 0.003 to 0.98. The soil erosion risk estimated by the RUSLE model ranged from 0 to 2000 tons per hectare per year across the Hajighoshan watershed, with an average of 61 tons per hectare per year. The annual sediment yields of the watershed showed significant variation (0.270 to 16 million ton per year), mainly due to changes in rainfall patterns and erosivity across different years. These variations were influenced by the intensity of rainfall events, which in turn affected the occurrence of floods in different years. The gross soil erosion estimated by WaTEM/SEDEM showed a high correlation with RUSLE at the watershed level, but it had a systematic overestimation. While the mean values were closed, there was no a good agreement between the annual specific sediment yield estimated by WaTEM/SEDEM and those calculated based on sediment rating curve and flow discharges. Comparing the gross soil erosion and sediment yield estimated by the WaTEM/SEDEM model, suggested that a large portion of the eroded soil was redeposited within the watershed and did not reach the watershed outlet.

Conclusion

The modelling of soil erosion and sediment yield using the WaTEM/SEDEM model is based on average annual rainfall erosivity, which does not fluctuate significantly between years. However, sediment yield is highly influenced by extreme rainfall events and flooding. Therefore, the sediment output estimated by the WaTEM/SEDEM model does not correspond well with the observed annual sediment yield, indicating a weak correlation between model predictions and actual sediment delivery from the watershed. Nevertheless, soil loss estimates from the WaTEM/SEDEM model showed a strong correlation with RUSLE model results across the watershed, though the WaTEM/SEDEM model tended to systematically overestimate erosion. While the spatial pattern across the watershed of soil erosion risk estimated by RUSLE is very useful in prioritization and planning of soil conservation practices, it is necessary to measure and monitor soil loss in the field/hillslope scale for calibration of the models. Soil conservation in mountainous watersheds is considered one of the key priorities in natural resource management. Thus, scientific analysis and the adoption of sustainable methods can contribute significantly to the preservation and improvement of soil conditions in these sensitive ecosystems.

Author Contributions

Conceptualization, H.A. and M.A.; methodology, H.A., H.Z. and M.A.; software, H.Z.; validation, H.A., H.Z. and M.A.; formal analysis, H.Z.; investigation, H.Z.; resources, H.A.; data curation, H.Z.; writing—original draft preparation, Z.A.C.; writing—review and editing, Z.A.C., H.A. and M.A.; visualization, H.Z. and Z.A.C.; supervision, H.A. and M.A.; project administration, H.A.; funding acquisition, H.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the University of Tehran for supporting the research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک و رسوب‌دهی در حوضه حاجی قوشان استان گلستان با مدل WaTEM/SEDEM

حامد ضیائی کیا^۱ | حسین اسدی^۲ | محمود عرب‌خدری^۳ | زینب عسکریان چایجان^۴^۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: ziaeikia.hamed@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: ho.asadi@ut.ac.ir^۳. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، تهران، ایران، رایانامه: arabkhdri@scwmri.ac.ir^۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه: zeinab.askarian@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فرسایش خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات جهانی با ایجاد اختلال در زیست‌بوم‌های طبیعی، حیات انسان و محیط زیست را تهدید می‌کند. به‌منظور حفاظت و بهره‌برداری پایدار از خاک، ایجاد امنیت غذایی و سلامت محیط زیست، ارزیابی میزان فرسایش خاک و رسوب‌دهی ناشی از آن ضروری است. در مطالعه حاضر، ابتدا خطر فرسایش خاک حوضه حاجی‌قوشان با معادله جهانی هدررفت خاک تجدیدنظر شده (RUSLE) و با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات مکانی و سنجش‌ازدور برآورد شد. سپس، میزان فرسایش و رسوب‌دهی حوضه با مدل WaTEM/SEDEM برآورد و مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مختلف شامل مدل رقومی ارتفاعی، آمار بارندگی مربوط به ایستگاه‌های باران‌نگار، تصاویر ماهواره‌ای و ویژگی‌های خاک به‌عنوان داده موردنیاز برای برآورد عامل‌های RUSLE و لایه‌های ورودی WaTEM/SEDEM استفاده شد. متوسط خطر فرسایش خاک در حوضه ۶۱ تن در هکتار در سال برآورد شد. نتایج برآورد فرسایش با WaTEM/SEDEM همبستگی بالایی با نتایج RUSLE در سطح حوضه داشت، اما دارای بیش‌برآوردی سیستماتیک بود. ارتباط مناسبی میان رسوب‌دهی برآوردی با WaTEM/SEDEM با مقادیر مشاهده‌ای رسوب‌دهی سالانه مشاهده نشد. نتایج نشان داد که رسوب‌دهی سالانه به‌شدت متأثر از رخداد‌های سیلابی است که منجر به تغییرات شدیدی در سال‌های مختلف می‌شود. مبنای برآورد با مدل، فرساینده‌گی سالانه است که تغییرات آن بسیار کمتر از تغییرات رخدادها است. مدل WaTEM/SEDEM توانایی برآورد رسوب‌دهی سال‌هایی که رخداد‌های سیلابی با شدت یا فراوانی بیش‌تر رخ می‌دهد، را نداشته و دارای کم‌برآوردی بود. از سوی دیگر، در سال‌هایی که رخداد‌های سیلابی چندانی رخ نمی‌دهد، این مدل مقدار رسوب‌دهی را بیش‌برآورد می‌کند.
واژه‌های کلیدی: تولید رسوب سالانه، فرساینده‌گی باران، هدررفت خاک، Google Earth Engine RUSLE	
استناد: ضیائی کیا، حامد؛ اسدی، حسین؛ عرب‌خدری، محمود؛ عسکریان، زینب (۱۴۰۴). پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک و رسوب‌دهی در حوضه حاجی قوشان استان گلستان با مدل WaTEM/SEDEM. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۰)، ۲۴۲۳-۷۸۳۳.	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398094.669971	https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398094.669971



مقدمه

فرسایش خاک تهدید مهمی برای خاک‌های جهان است، و وسعت و شدت آن با تبدیل جنگل‌ها و مراتع طبیعی به اراضی کشاورزی، چراگاه‌ها و مناطق مسکونی برای تامین نیازهای جمعیت رو به رشد جهان، به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است (Quinton and Fiener, 2024). فرسایش خاک و انتقال رسوب با فرایندهای هیدرولوژی و ژئومورفولوژی شامل جداسدن، انتقال و رسوب‌گذاری برهمکنش دارند. انواع/شکل‌های مختلف فرسایش خاک و پیچیدگی فرایندهای مربوطه، تغییرات زمانی و مکانی آن و همچنین عدم وجود یا نقص آمار و اطلاعات در اکثر حوزه‌های آبخیز، به‌کارگیری مدل‌های تجربی بر پایه‌ی متغیرهای قابل دسترس را برای ارزیابی آن ضروری کرده است (Irvem et al., 2007). مدل‌سازی فرسایش خاک در بسیاری از نقاط دنیا با استفاده از معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) یا نسخه تجدید نظر شده آن (مانند^۱ RUSLE) انجام شده است (Bezak et al., 2024). RUSLE نرخ هدررفت خاک را بر اساس فرسایش شیاری و بین‌شیاری برآورد می‌کند و مبتنی بر ضرب شش عامل (R: فرساینده‌ی باران، K: فرسایش‌پذیری خاک، L: طول شیب، S: درجه شیب، C: مدیریت پوشش گیاهی و P: اقدامات حفاظتی) می‌باشد (Scheper et al., 2024).

ترکیب مدل RUSLE با فناوری‌های سنجش از دور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، امکان تحلیل مکانی داده‌ها و تخمین دقیق‌تر خطر فرسایش خاک در مناطق بزرگ را با هزینه‌ی کم فراهم می‌کند (Wang et al., 2003; Lufafa et al., 2003). با این حال، هیچ یک از این رویکردها، رسوب‌گذاری در سطح حوضه یا رسوب‌دهی را مدل‌سازی نمی‌کند. در نتیجه، مقایسه مستقیم با میزان رسوب اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه امکان‌پذیر نیست. در مقابل، WaTEM/SEDEM که ترکیب دو مدل فرسایش آبی و خاک‌ورزی (WaTEM) و تحویل رسوب SEDEM است، توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب‌دهی مدل‌سازی می‌کند. این مدل براساس مدل RUSLE پایه‌گذاری شده است و برای پیش‌بینی تحویل رسوب در شبکه زهکشی، از معادله ظرفیت انتقال رسوب استفاده می‌کند (Verstraeten et al., 2002). مدل WaTEM/SEDEM ابزاری کاربردی برای شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در حوضه‌های با وسعت زیاد است (Didone et al., 2017). برخی از پژوهش‌های انجام شده با این مدل، بیانگر تخمین‌های درست از بازتوزیع خاک رسوب‌گذاری شده و نسبت تحویل رسوب در اراضی تپه‌ای بوده است (Haregeweyn et al., 2013).

با توجه به اهمیت فرسایش خاک و انجام اقدامات حفاظتی، آگاهی در مورد هدررفت خاک و رسوب‌دهی در حوزه آبخیز حاجی‌قوشان و تغییرات زمانی و مکانی آن با توجه به قرارگیری حوضه در بالادست سد بوستان، ضروری است. در این مطالعه، پهنه‌بندی خطر فرسایش و برآورد رسوب‌دهی در حوضه حاجی قوشان استان گلستان با RUSLE و WaTEM/SEDEM انجام و ارزیابی شد.

پیشینه پژوهش

Khaleghpanah و همکاران (۲۰۱۶) هدررفت خاک را در اراضی سنگ‌ریزه‌ای حوضه خامسان در مقیاس کرت با EUROSEM و RUSLE2 برآورد کردند. نتایج نشان داد که کارایی مدل EUROSEM تحت تأثیر پوشش سنگریزه، و کارایی مدل RUSLE2 تحت تأثیر مقادیر زیاد EI_{30} ، کاهش یافت. مقایسه دو مدل نشان داد که EUROSEM از کارایی بهتری برای برآورد هدررفت خاک نسبت به RUSLE2 واسنجی شده برخوردار است. اسدی و همکاران (۲۰۱۷) در ارزیابی تغییرات خطر فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوزه آبخیز ناورود نتیجه گرفتند که خطر سالانه فرسایش خاک بین ۰ تا ۱۰۵۶ تن در هکتار در سال متغیر می‌باشد. نتایج آنها نشان داد، مناطق با خطر فرسایش بسیار بالا (> 100 تن در هکتار در سال) از سال ۱۹۸۷ تا سال ۲۰۱۰ از ۱۰ درصد به ۱۲ درصد افزایش یافته است. فلاح و همکاران (۲۰۲۳) خطر فرسایش خاک و میزان رسوب‌دهی را در حوزه آبخیز ناورود با بهره‌گیری از RUSLE، ابزار ارزیابی رسوب برای کنترل موثر فرسایش^۳ (SATEEC)، RS و GIS ارزیابی نمودند. میانگین نرخ سالانه هدررفت خاک ۵/۳۹ و ۱۴/۹۵ تن در هکتار در سال بودند. همچنین کارایی مدل‌های RUSLE + SATEEC هنگامی که تنها از عامل فرساینده‌ی بارندگی استفاده شد، کمتر بود، اما استفاده از عامل فرساینده‌ی بارندگی + رواناب ناشی از ذوب برف موجب کارایی بالاتر مدل‌ها شد.

Maltsev و Ivanov (۲۰۲۲) با استفاده از مدل WATEM/SEDEM به مطالعه تطبیقی رسوب‌دهی از دو حوزه آبخیز کوچک رودخانه لنا در سیبری در دو منطقه دشتی و کوهستانی پرداختند. در این مطالعه مقادیر رسوب‌دهی از حوضه کوهستانی تطابق بسیار بهتری

1 Universal soil loss equation

2 Revised universal soil loss equation

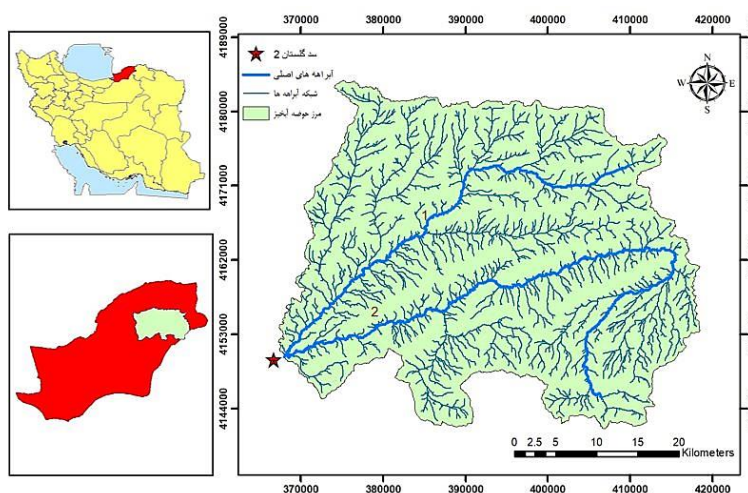
3 Sediment assessment tool for effective erosion control

با مقادیر رسوب‌دهی اندازه‌گیری شده نسبت به حوضه دشتی داشت. Scheper و همکاران (۲۰۲۳) با کاربرد WATEM/SEDEM در یک زیرحوضه از حوضه رودخانه زرد چین به این نتیجه رسیدند که فرایندهایی همچون زمین لغزش، فرسایش خندقی، فرسایش کناری و رسوب‌دهی ناشی از ساخت‌وساز، که توسط این مدل در نظر گرفته نمی‌شوند، بر رسوب‌دهی کل تاثیر زیادی دارند. در این پژوهش، با در نظر گرفتن سال‌هایی که فقط رسوب‌دهی پایه داشتند، رسوب‌دهی اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده مقایسه شد. نتایج نشان داد که فرایندهای دوم عمدتاً در طی رویدادهای شدید نقش دارند. همچنین تحقیقات دیگری (از جمله، Golosov et al., 2024, Thapa, 2020, Getu, et al., 2022)، با استفاده از این دو مدل انجام شده است. به‌طور کلی، مرور منابع نشان می‌دهد که مدل WATEM/SEDEM مقادیر هدررفت خاک را با دقت قابل قبولی برآورد می‌کند. نتایج این مدل برای میزان رسوب‌دهی نیز وابسته به نوع حوضه و داده‌های موجود است. همچنین RUSLE در برآورد هدررفت خاک موفق بوده است و در اکثر مواقع نتایج نزدیک به هم دارند.

روش‌شناسی پژوهش

معرفی حوضه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه گرگان رود در بالادست سد بوستان (گلستان ۲) بوده و به حوضه حاجی قوشان معروف است (شکل ۱). مساحت حوضه حدود ۱۵۳۰ کیلومترمربع و در محدوده عرض شمالی ۳۷ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۸ دقیقه و طول شرقی ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۵ دقیقه قرار دارد. حوضه حاجی‌قوشان از نظر آب و هوایی در حدفاصل اقلیم نیمه‌خشک و معتدل قرار دارد. شرایط آب و هوایی منطقه باعث ایجاد تنوع بسیار زیاد پوشش گیاهی طبیعی و کشت انواع گیاهان زراعی شده است. از جمله مهم‌ترین گیاهان زراعی این منطقه می‌توان به گندم، جو، ذرت (دیم و آبی)، پنبه آبی، برنج و آفتابگردان اشاره کرد. این حوضه دارای توپوگرافی پیچیده‌ای است، به گونه‌ای که مرتفع‌ترین نقطه در جنوب حوضه با ارتفاع ۲۱۸۰ متر و پست‌ترین نقطه، سد گلستان با ارتفاع ۱۰۷ متر از سطح دریا است. شیب متوسط حوضه حدود ۱۱ درصد می‌باشد. خاک‌های منطقه عمدتاً از رسوبات لسی و آبرفتی تشکیل شده‌اند که به دلیل حساسیت زیاد به فرسایش، میزان هدررفت خاک در آن‌ها زیاد است (غفاری، ۱۳۹۵). از میان ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه، یک ایستگاه سینوپتیک، هفت ایستگاه تبخیرسنجی و ۱۲ ایستگاه باران‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱).



شکل ۱. موقعیت حوضه حاجی‌قوشان در ایران و استان گلستان، و شبکه آبراهه‌های آن

تعیین عامل‌های مدل RUSLE

با بررسی داده‌های بارندگی روزانه در دوره مطالعاتی ۱۶ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶)، برای ماه‌هایی که به دلایل مختلف از قبیل خرابی باران‌سنج و یا عدم حضور متصدی، داده‌ای ثبت نگردیده است، به کمک روش نسبت نرمال داده مفقود، تخمین زده شد (رابطه ۱).

$$P_x = \frac{1}{m} \left[\frac{N_x}{N_1} P_1 + \frac{N_x}{N_2} P_2 + \dots + \frac{N_x}{N_m} P_m \right] \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، N_x برابر با بارندگی سالیانه در ایستگاه مدنظر، $N_1, N_2, \dots, N_m$ میزان بارندگی سالیانه هر یک از ایستگاه‌های شاخص و $P_1, P_2, \dots, P_m$ داده موجود در ایستگاه‌های شاخص می‌باشد (Chow et al., 1988).

عامل فرسایندهی باران با استفاده از شاخص فورنیه اصلاح‌شده با توجه به شرایط اقلیمی تقریباً مشابه حوضه مورد مطالعه با حوضه‌ای



در شمال اسپانیا (Angulo-Martínez & Beguería, 2009) تعیین گردید (رابطه ۲).

$$EI_{30} = 21.56 \cdot FI_{mod}^{0.927}$$

رابطه ۲)

در این رابطه، EI_{30} ، عامل فرساینده گی باران ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$)، و FI_{mod} ، شاخص فورنیه اصلاح شده است.

جدول ۱. نام و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در تحقیق و مقادیر شاخص فورنیه و فرساینده گی باران ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$)

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (دقیقه-درجه)	عرض جغرافیایی (دقیقه-درجه)	ارتفاع (متر)	دوره آماری بارندگی (سال آبی)	شاخص فورنیه اصلاح شده	فرساینده گی باران [#]
کلاله *	سینوپتیک	۵۵-۲۷	۳۷-۲۳	۲۰۷	۸۰-۸۱ تا ۹۵-۹۶	۵۷	۹۱۶
پیش کمر	باران سنجی	۵۵-۳۵	۳۷-۳۱	۲۵۶	۶۹-۷۰ تا ۹۵-۹۶	۵۳	۸۵۰
کریم ایشان	باران سنجی	۵۵-۴۳	۳۷-۴۰	۵۸۹	۶۹-۷۰ تا ۹۵-۹۶	۵۵	۸۸۳
آی تمر	باران سنجی	۵۵-۲۸	۳۷-۴۸	۱۸۸	۸۰-۸۱ تا ۹۵-۹۶	۲۶	۴۴۴
عزیزآباد	باران سنجی	۵۵-۴۱	۳۷-۳۲	۳۱۹	۸۰-۸۱ تا ۹۵-۹۶	۵۴	۸۷۵
سوارپایین	باران سنجی	۵۵-۴۱	۳۷-۲۷	۵۰۰	۸۰-۸۱ تا ۹۵-۹۶	۸۳	۱۳۰۰
اسلام‌آباد	باران سنجی	۵۶-۰۴	۳۷-۴۱	۹۷۴	۸۰-۸۱ تا ۹۵-۹۶	۲۳	۴۰۱
چنارلی	باران سنجی	۵۵-۵۱	۳۷-۴۲	۶۳۳	۸۰-۸۱ تا ۹۵-۹۶	۴۷	۷۶۹
ساری قمیش	باران سنجی	۵۵-۵۹	۳۷-۵۲	۱۶۴	۷۷-۷۸ تا ۹۵-۹۶	۳۰	۵۰۳
یکه چنار	باران سنجی	۵۶-۰۴	۳۷-۴۹	۵۳۸	۷۷-۷۸ تا ۹۵-۹۶	۴۹	۷۹۴
دشت شاد	باران سنجی	۵۵-۴۵	۳۷-۱۶	۱۴۵۰	۷۵-۷۶ تا ۹۵-۹۶	۳۶	۵۹۵
دشت	باران سنجی	۵۶-۰۰	۳۷-۱۸	۱۰۱۰	۸۰-۸۱ تا ۹۵-۹۶	۲۰	۳۴۴
قرناق	باران سنجی	۵۵-۴۲	۳۷-۴۳	۵۰۰	۷۵-۷۶ تا ۹۵-۹۶	۴۶	۷۵۱
تمر *	تبخیر سنجی	۵۵-۳۰	۳۷-۲۹	۱۷۳	۴۵-۴۶ تا ۹۵-۹۶	۵۷	۹۱۷
مراوه تپه *	تبخیر سنجی	۵۵-۵۷	۳۷-۵۴	۱۹۰	۴۵-۴۶ تا ۹۵-۹۶	۳۵	۵۷۷
رباط قره بیل *	تبخیر سنجی	۵۶-۱۹	۳۷-۲۱	۱۴۵۰	۵۳-۵۴ تا ۹۵-۹۶	۲۳	۳۹۱
چشمه خان *	تبخیر سنجی	۵۶-۰۷	۳۷-۱۷	۱۲۵۰	۵۳-۵۴ تا ۹۵-۹۶	۲۳	۳۹۱
گلیداغ *	تبخیر سنجی	۵۵-۵۶	۳۷-۳۸	۱۰۰۰	۷۵-۷۶ تا ۹۵-۹۶	۸۴	۱۳۱۵
پارک ملی گلستان *	تبخیر سنجی	۵۵-۴۷	۳۷-۲۳	۴۷۴	۷۶-۷۷ تا ۹۵-۹۶	۹۱	۱۴۱۰

* ایستگاه‌های حاوی باران نگار،[#] با توجه به طول دوره‌های آماری متفاوت فاکتور فرساینده گی باران برای دوره مشترک ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ برآورد شد.

به منظور محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک با رابطه رومکنس و همکاران (۱۹۸۷) (رابطه ۳)، از نتایج تعداد ۳۶۴ نمونه خاک سطحی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر اراضی کشاورزی منطقه که از سازمان جهاد کشاورزی استان تهیه گردید، به همراه نتایج ۴۵ عدد تشریح پروفیل (غفاری، ۱۳۹۵) استفاده شد.

$$K = 0.0034 + 0.0405 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log D_g + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، K عامل فرسایش‌پذیری خاک بر حسب $ha\ MJ^{-1}\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ و D_g میانگین هندسی قطر ذرات خاک بر حسب میلی‌متر می‌باشد (Romkens et al., 1987).

جهت برآورد عامل طول و درجه شیب، ابتدا نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک ۲۰ متر در محدوده حوضه تهیه گردید

و سپس با جدا کردن مرز حوضه به کمک فن‌های GIS، این عامل از رابطه ارائه‌شده توسط مور و ویلسون (Moor and Wilson, 1992) (رابطه ۴) محاسبه شد:

$$LS = \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن؛ A_s برابر با سطح مشارکت‌کننده بخش بالایی شیب در واحد عرض خط تراز یا شیار یا سطح ویژه حوضه ($m^2 m^{-1}$) و β درجه شیب است، همچنین m و n در این رابطه ضرایب ثابت تجربی هستند که اعداد آن‌ها به ترتیب از ۰/۴ تا ۰/۶ و ۱/۲ تا ۱/۳ متغیر است.

برای محاسبه عامل C ، نقشه NDVI حوضه با استفاده از بانک اطلاعاتی Google earth engine و به کمک کدنویسی در طول دوره آماری استخراج گردید. نقشه میانگین مقادیر NDVI، با استفاده از بانک اطلاعاتی GEE برای تصاویر با پوشش ابری کمتر از ۱۰ درصد ماهواره لندست ۷ از تاریخ 01-Sep-2001 تا 30-April-2013 شامل ۱۸۵ تصویر، و لندست ۸ از تاریخ 01-May-2013 تا 30-Sep-2017 شامل ۹۹ تصویر تهیه و استخراج گردید. در مرحله بعد، میانگین وزنی مقادیر NDVI با توجه به تعداد تصاویر در هر ماهواره در نرم‌افزار GIS به دست آمد. نقشه عامل C با ابزار محاسباتی نرم‌افزار GIS از رابطه ۵ تهیه شد (Van der Knijff et al., 1999):

$$C = \exp\left(-\alpha \times \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن؛ α برابر با ۲ و β برابر با ۱ می‌باشد.

با توجه به کمبود اطلاعات از عملیات حفاظتی انجام‌شده، مقدار عامل P در کل سطح حوضه برابر با یک در نظر گرفته شد. در نهایت پس از تهیه هر لایه از عامل‌های معادله جهانی هدررفت خاک، متوسط سالیانه خطر فرسایش خاک از طریق حاصل ضرب عامل‌های شش گانه و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 با ابزار Raster calculator به دست آمد (Renard et al., 1997):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن، A : میانگین سالانه هدر رفت خاک ($T ha^{-1} y^{-1}$)، R : فرساینده‌گی باران یا رواناب ($MJ mm ha^{-1} h^{-1} y^{-1}$)، K : فرسایش‌پذیری خاک ($ton h MJ^{-1} mm^{-1}$)، LS : عامل طول و تندی شیب (بدون بعد)، C : عامل پوشش گیاهی (بدون بعد) و P =عامل مدیریت زراعی (بدون بعد) است.

برآورد رسوب‌دهی حوضه

به‌منظور برآورد بار رسوب معلق خروجی حوضه، داده‌های هیدرولوژی و رسوب‌سنجی ایستگاه تمر در طول دوره آماری برای سال‌های آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا از رابطه ۷ و با استفاده از داده‌های دبی و غلظت مشاهده‌ای همزمان، مقدار رسوب‌دهی در هر دبی مشاهده‌ای محاسبه شد.

$$Q_s = 0.0864 C Q_d \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن، Q_s بار رسوب معلق بر حسب تن در روز، C غلظت متوسط رسوب معلق بر حسب میلی‌گرم در لیتر و Q_d دبی جریان مشاهده‌ای بر حسب مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

در گام بعد، برای رسم منحنی سنج از روش حد وسط دسته‌ها (Jansson, 1996) استفاده شد. دبی‌های جریان با یک نمو معین به ۳۰ دسته تقسیم‌شده و برای دبی متوسط هر دسته، رسوب‌دهی روزانه متوسط همان دسته تعیین و در آخر منحنی سنج به لگاریتم نقاط فوق برازش داده شد (رابطه ۸).

$$Q_s = 554.75 Q_w^{1.816} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

در این رابطه، Q_s بار رسوب معلق بر حسب تن در روز و Q_d دبی جریان روزانه بر حسب مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. از معادله این خط برای برآورد رسوب‌دهی روزانه (و در نتیجه ماهانه و سالانه) در طول دوره آماری استفاده شد. ملاحظه شد که برون‌یابی رابطه ۸ برای بالاترین دبی مشاهده‌ای روزانه در سیلاب رخ داده در مردادماه ۱۳۸۳ به میزان ۲۲۵ مترمکعب بر ثانیه، به غلظت بسیار بالا و غیر قابل قبول منجر می‌شود. به‌منظور منطقی‌تر شدن برون‌یابی و اصلاح مقادیر برآوردی رسوب‌دهی روزانه، منحنی سنج رسوب تعدیل گردید. از آنجایی که میزان غلظت رسوب معلق در رودخانه‌های مناطق نیمه‌خشک تا مدیترانه‌ای عملاً از حدود ۵۰۰ گرم بر لیتر تجاوز نخواهد کرد (Milliman & Syvitski, 1992)، با فرض غلظت ۵۰۰ گرم در لیتر برای دبی ۲۲۵ مترمکعب بر ثانیه، مقدار رسوب‌دهی برای این دبی



با رابطه ۷ محاسبه و نتیجه به عنوان یک دسته مجزا در دسته بندی منحنی سنجه رسوب حدوسط دسته ها وارد گردید. سپس منحنی سنجه مجدداً به داده ها برازش و منحنی سنجه تعدیل شده به شکل زیر به دست آمد.

$$Q_s = 561.37 Q_w^{1.809} \quad (\text{رابطه ۹})$$

نهایتاً از این رابطه نیز مقادیر رسوبدهی (روزانه، ماهانه و سالانه) برآورد شد. برای این اساس، برای هر سال دو مقدار رسوبدهی (با منحنی های سنجه اولیه و تعدیل شده) برآورد شد.

برآورد فرسایش و رسوبدهی با مدل WaTEM/SEDEM و ارزیابی آن

در این تحقیق از نسخه 2004 WaTEM/SEDEM استفاده شد (Van Rompaey et al., 2001). ورودی های نرم افزار شامل: مدل رقومی ارتفاع، نقشه طبقه بندی اراضی و پارامترهای مدل RUSLE شامل فرسایندهای باران، نقشه عامل پوشش گیاهی و نقشه فرسایش پذیری خاک می باشد. فرمت ورودی به نرم افزار ایدرسی (i.st) * بوده و تمامی داده های ورودی می بایست دارای پیکسل سائز یکسان ۲۰ × ۲۰ متر بوده، و تعداد ردیف و ستون های فایل های رستری با یکدیگر برابر باشند، به نحوی که تمامی سلول ها کاملاً بر هم منطبق گردند. فایل مدل رقومی ارتفاع می بایست حداقل ۱۰ تا ۲۰ پیکسل بزرگتر از مرز حوضه انتخاب شود و شامل تمام سلول های مورد محاسبه نرم افزار باشد. دو بخش از نتایج مدل، شامل رسوب کل تولید شده و رسوب خروجی از رودخانه مهم ترین مقادیر خروجی از مدل بوده که به ترتیب معادل با فرسایش ناخالص^۱ و رسوبدهی کل در خروجی حوضه^۲ می باشند و اختلاف آن ها نشان دهنده میزانی از رسوب است که در داخل حوضه باقی می ماند (Notebaert et al., 2006). نتایج رسوبدهی کل برآوردی در خروجی حوضه با نتایج رسوبدهی با روش منحنی سنجه (به عنوان اندازه گیری شده) در ایستگاه تمر در طول دوره آماری مقایسه شد.

یافته های پژوهشی

نتایج مدل RUSLE

مقدار شاخص فورنیه اصلاح شده در حوضه حاجی قوشان از ۲۰ تا ۹۱، و متوسط سالانه فرسایندهای باران نیز از ۳۴۴ تا ۱۴۱۰ (مگاژول میلی متر بر هکتار ساعت سال) به ترتیب مربوط به ایستگاه های دشت و پارک ملی گلستان متغیر است (جدول ۱). فرسایندهای باران در حوضه حاجی قوشان همچون اغلب حوضه ها، تبعیت زیادی از توپوگرافی و ارتفاع دارد. علاوه بر این، به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی این حوضه، در بخش شمال (به سمت مراوه تپه) و بخش شرق (به سمت بجنورد، به عنوان نمونه ایستگاه رباط قره بین) متاثر از اقلیم مناطق نیمه خشک است که فرسایندهای باران کمتری دارد. در مقابل در جنوب و جنوب شرق (پارک جنگلی گلستان) متاثر از اقلیم مرطوب و دارای فرسایندهای بالا است. رشته کوه ها و ارتفاعات میانی که اتفاقاً (برخلاف بسیار از حوضه ها) از مرزهای غربی، شمالی و شرقی حوضه نیز مرتفع تر می باشند، دارای بارندگی و در نتیجه فرسایندهای بالاتری هستند. به دلیل ماهیت مکانی داده ها و به منظور مشاهده تغییرات میزان فرسایندهای باران در سطح حوضه، از روش درونیابی کریجینگ عمومی با درجه یک بعد از حذف روند، استفاده شد. بر این اساس، میزان فرسایندهای باران در حوضه از ۵۲۴ تا ۱۳۷۵ مگاژول میلی متر بر هکتار ساعت سال برآورد شده است. در نواحی مرکزی حوضه و محدوده ایستگاه های گلیداغ و پارک ملی گلستان، بیشترین مقدار فرسایندهای مشاهده می شود و با دور شدن از نواحی مرکزی این مقدار کاهش می یابد (شکل ۲). این موضوع، متاثر از وضعیت توپوگرافی خاص این حوضه (دارای ارتفاعات مرکزی) و همچنین روند خاص تغییرات بارندگی با ارتفاع در ناحیه شمالی ایران است که در آن بارندگی با افزایش ارتفاع تا حد مشخصی افزایش و سپس کاهش می یابد (خلیلی، ۱۳۸۴).

فرسایش پذیری خاک (ضریب K) در سطح حوضه حاجی قوشان با متوسط مکانی ۰/۰۴۲۶، از ۰/۰۳۷۱ تا ۰/۰۴۳۷ تن ساعت بر مگاژول میلی متر متغیر بود (شکل ۳). بالاترین مقادیر فرسایش پذیری خاک مربوط به مناطق لسی حوضه است که بیشترین مساحت را نیز دارند.

در شکل ۴ نقشه عامل طول و درجه شیب (LS) آمده است. مقادیر بالای LS منطبق با ارتفاعات مرکزی و جنوب حوضه با شیب های تند است. مقادیر نزدیک به صفر ($LS < 2.5$) که سطح وسیعی از حوضه را شامل می شود، مربوط به مناطق مسطح و تپه های کم ارتفاع

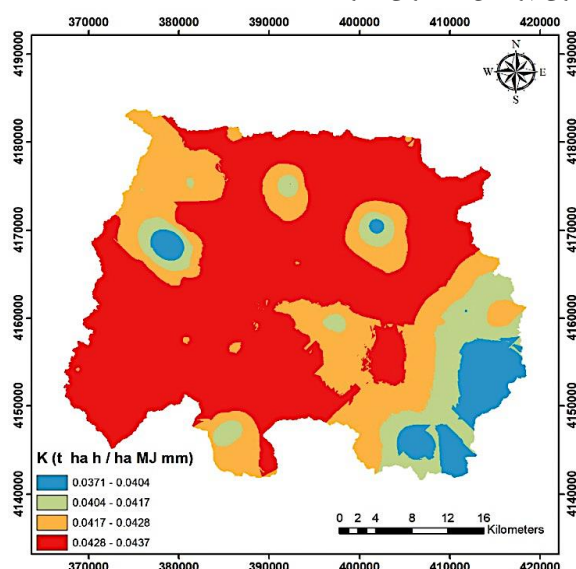
1 Total sediment production

2 Total sediment export

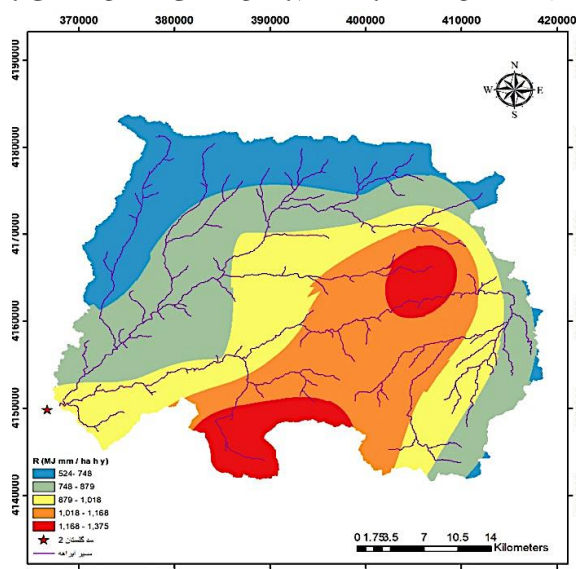
3 Gross soil erosion

4 Total sediment yield

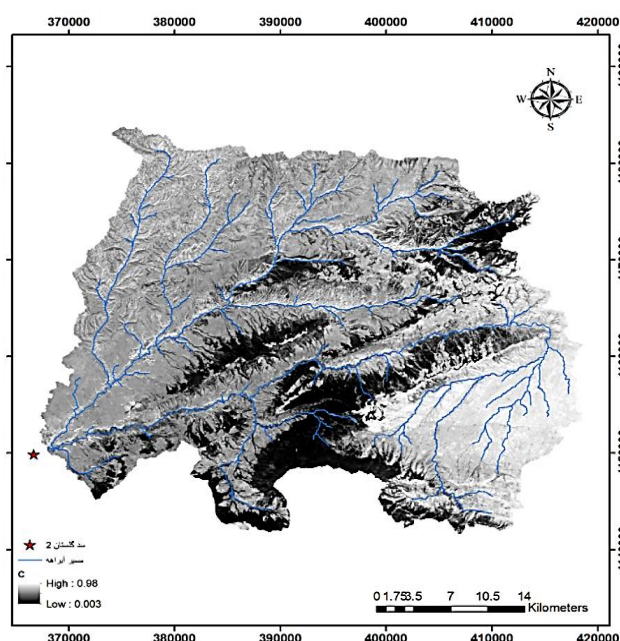
می‌باشد، که در نواحی خروجی حوضه و دشت جنوب شرق حوضه پراکنده هستند. مقدار متوسط LS در کل حوضه برابر با $3/98$ می‌باشد. برای تهیه نقشه عامل پوشش گیاهی از شاخص NDVI استفاده شد. حداکثر مقدار NDVI در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم (مناطق جنگلی با درصد پوشش ۱۰۰ درصد) با مقدار $0/74$ ، و حداقل آن در نواحی بدون پوشش گیاهی (به ویژه جنوب شرق حوضه با درصد پوشش تقریباً صفر) با مقدار $0/08$ مشاهده شد. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) در شکل ۵ آمده است. مقدار عامل C در مناطق دارای پوشش جنگلی، از $0/03$ شروع شده و در مناطق بدون پوشش گیاهی به حداکثر خود یعنی $0/98$ می‌رسد. مقدار متوسط عامل پوشش گیاهی در حوضه حاجی‌قوشان $0/48$ برآورد شد که بیان‌گر پوشش گیاهی ضعیف در اکثر مناطق حوضه می‌باشد. با توجه به شکل ۵، مناطق تیره‌تر نشان‌دهنده مناطق دارای پوشش گیاهی مناسب (مقدار عامل C کوچک) بوده که باعث کم‌تر شدن خطر فرسایش خاک در این مناطق می‌شود. در مقابل، در مناطق روشن‌تر مقدار C به یک نزدیک شده و در نتیجه کم‌ترین میزان جلوگیری از فرسایش توسط پوشش گیاهی در این مناطق مشاهده می‌شود. این مناطق که در حقیقت بخش زیادی از حوضه را دربر می‌گیرد، عموماً فاقد پوشش گیاهی است. در شکل ۶ عکس‌های از وضعیت پوشش گیاهی مناطق جنگلی و نقاط بدون پوشش به‌عنوان نمونه ارائه شده است.



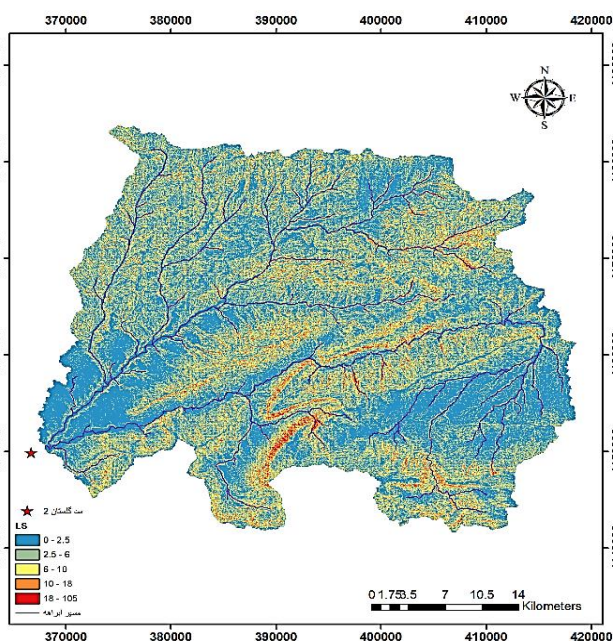
شکل ۳. نقشه نهایی عامل فرسایش‌پذیری حوضه حاجی‌قوشان



شکل ۲. نقشه عامل فرساینده‌گی باران (R) حوضه حاجی‌قوشان



شکل ۵. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) حوضه حاجی‌قوشان

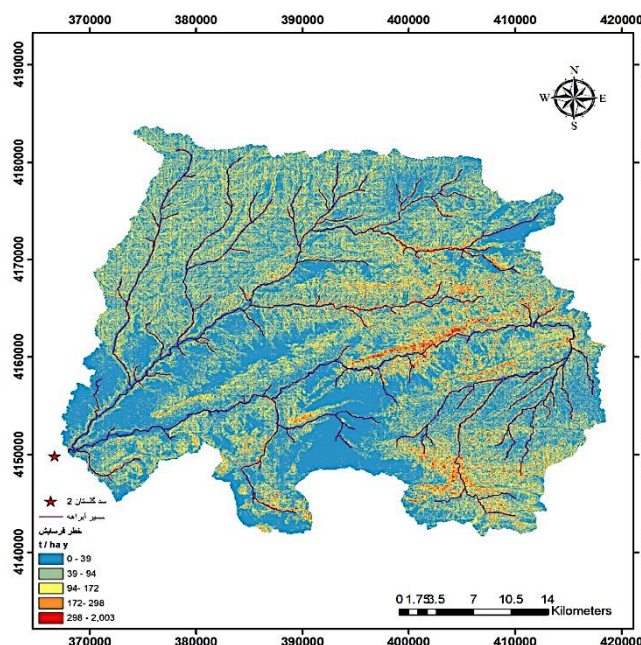


شکل ۴. نقشه عامل طول و درجه شیب حوضه حاجی‌قوشان



شکل ۶. تصاویری از وضعیت پوشش گیاهی حوضه حاجی قوشان

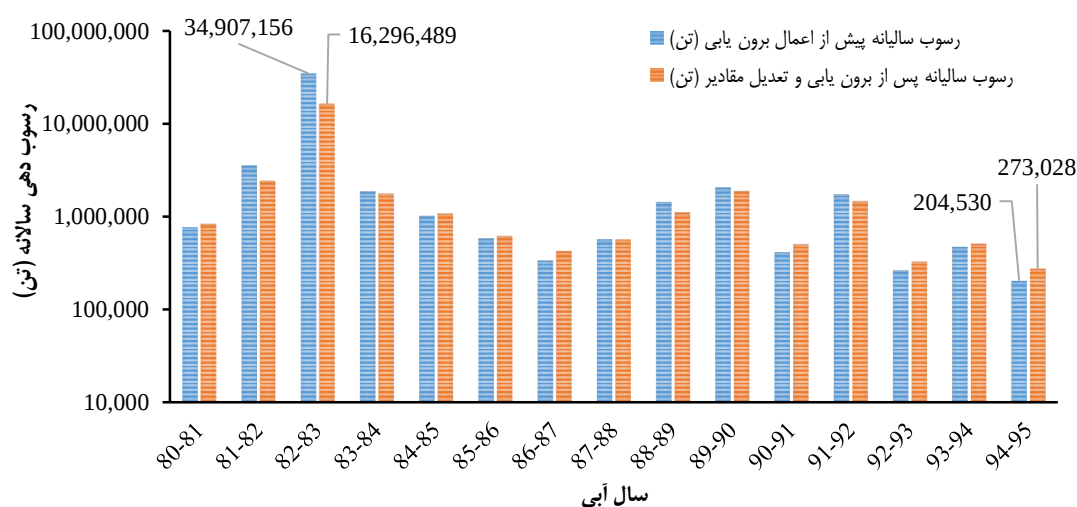
بر مبنای لایه‌های اطلاعاتی و بر اساس RUSLE، خطر فرسایش خاک در سطح حوضه با متوسط حدود ۶۱، از صفر تا ۲۰۰۳ تن بر هکتار در سال برآورد گردید (شکل ۷). در حدود ۹۴ درصد از مساحت حوضه، خطر فرسایش خاک کم‌تر از ۱۷۲ تن بر هکتار سال است و خطر فرسایش‌های خیلی بالا شامل نقاط محدودی از حوضه می‌باشد که مربوط به شیب‌های تند و ارتفاعات حوضه است. مقادیر بسیار زیادی خطر فرسایش ناشی از الگوریتم‌های محاسباتی RUSLE (حاصل ضرب فاکتورها) و فاکتور S در این معادله است که باعث می‌شود در دامنه‌های با شیب بسیار زیاد به صورت فزاینده‌ای، مقادیر بسیار زیاد برآورد شود. برای توضیح کامل به بخش بحث مراجعه شود.



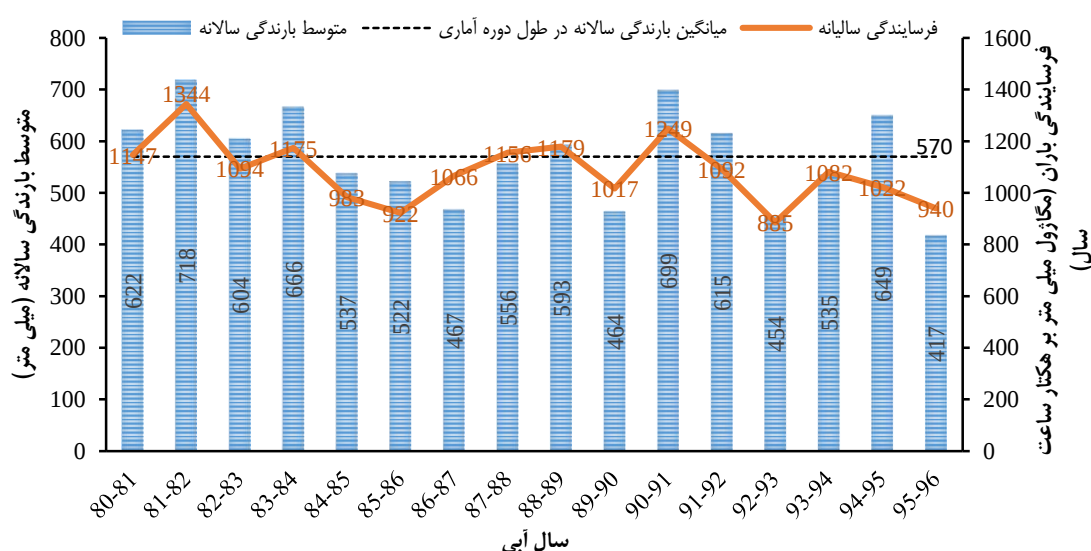
شکل ۷. نقشه خطر فرسایش خاک حوضه حاجی قوشان رسوبدهی حوضه

در شکل ۸ مقادیر رسوبدهی سالانه حوضه حاجی قوشان بر مبنای منحنی‌های سنج اولیه (رابطه ۸) و تعدیل‌شده (رابطه ۹) آمده است. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که در صورت عدم تعدیل منحنی سنج، مقدار رسوبدهی در سال‌های با رخدادهای شدید (سال ۱۳۸۳-۱۳۸۲) بسیار بالا (حدود ۳۵ میلیون تن) و در سال‌های کم باران، کمتر برآورد می‌شود. بر مبنای منحنی سنج تعدیل شده،

رسوب‌دهی سالانه حوضه از حدود ۲۷۰ هزار تن در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴، تا حدود ۱۶ میلیون تن در سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ متفاوت است. این اعداد بیانگر تغییرات بسیار زیاد رسوب‌دهی سالانه حوضه است که عمدتاً ناشی از تغییرات بارندگی و فرساینده‌گی در سال‌های مختلف، و متأثر از شدت بارندگی‌ها در هر سال و در نتیجه وقوع سیلاب در سال‌های گوناگون می‌باشد (جدول ۳). لازم به ذکر است که میزان رسوب‌دهی سالانه یک حوضه تحت تاثیر تغییر سایر عوامل انسانی (عملیات عمرانی و کشاورزی) و طبیعی (پوشش گیاهی) نیز قرار می‌گیرد. به‌طور مشخص، رسوب‌دهی بالای سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ مربوط به وقوع سیلاب‌هایی در مردادماه با دبی‌های ۱۱۶ و ۲۲۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که به‌تنهایی ۸۰ درصد از سهم رسوب معلق در این سال را تولید کرده است. مطابق شکل ۹، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار بارندگی سالیانه، به ترتیب مربوط به سال‌های آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ و ۱۳۹۴-۱۳۹۵ می‌باشد. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر متوسط سالانه فرساینده‌گی، به ترتیب مربوط به سال‌های آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ و ۱۳۹۳-۱۳۹۲ می‌باشد.



شکل ۸. مقایسه مقادیر نهایی رسوب‌دهی سالانه حوضه با دو منحنی سنجه رسوب حد وسط اولیه و تعدیل‌شده



شکل ۹. متوسط بارندگی سالانه و فرساینده‌گی باران سالانه حوضه حاجی‌قوشان

نتایج مدل WaTEM/SEDEM

متوسط ناخالص فرسایش در سطح حوضه و همچنین رسوب خروجی از حوضه با اجرای مدل WaTEM/SEDEM برای هر سال، برآورد شد (جدول ۴). به دلیل برآورد متوسط نسبت تحویل رسوب (SDR) حدود ۷ درصدی برای حوضه، مدل WaTEM/SEDEM با وجود



برآورد مقادیر زیاد فرسایش ناخالص، میزان رسوبدهی را نسبتاً پایین برآورد کرد. به بیان دیگر، مدل تخمین زده است که مقدار زیادی از خاک فرسایش یافته، مجدداً در سطح حوزه ترسیب یافته و از حوزه خارج نمی‌شود.

مقایسه مقادیر رسوبدهی سالانه برآورد شده با مدل WaTEM/SEDEM، با میزان رسوبدهی سالانه محاسبه شده با روش حدوسط دسته‌ها، در شکل ۱۰ مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در سال ۱۳۸۳ که مصادف با وقوع سیل با دبی بالا بوده است، میزان رسوبدهی برآوردی با مدل WaTEM/SEDEM با میزان رسوبدهی سالانه مشاهده‌ای اختلاف بسیار زیادی دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت، مدل WaTEM/SEDEM توانایی برآورد میزان رسوبدهی حوزه را در سال‌هایی که رخدادهای شدید سیل به وقوع پیوسته و موجب رسوبدهی بسیار زیاد در آن سال می‌شود، را ندارد.

جدول ۳. اطلاعات دریافتی از آب منطقه‌ای استان گلستان مربوط به رخداد سیل در ایستگاه تهر حوزه حاجی‌قوشان

سال آبی	تعداد رخدادهای سیل*	بیش‌ترین دبی متوسط روزانه مشاهده شده در سیلاب (m^3/s)
۱۳۸۱-۱۳۸۰	۱۷	۱۵/۷
۱۳۸۲-۱۳۸۱	۳۰	۷۴/۱
۱۳۸۳-۱۳۸۲	۴۱	۲۲۵
۱۳۸۴-۱۳۸۳	۲۱	۳۰
۱۳۸۵-۱۳۸۴	۵۴	۱۸/۲
۱۳۸۶-۱۳۸۵	۲۹	۱۴/۶
۱۳۸۷-۱۳۸۶	۱۴	۵/۹۹
۱۳۸۸-۱۳۸۷	۱۰	۲۹/۲
۱۳۸۹-۱۳۸۸	۹	۴۴/۵
۱۳۹۰-۱۳۸۹	۳۱	۲۵/۶
۱۳۹۱-۱۳۹۰	۲۹	۱۱/۴
۱۳۹۲-۱۳۹۱	۱۵	۴۲/۶
۱۳۹۳-۱۳۹۲	۱۷	۱۴/۹
۱۳۹۴-۱۳۹۳	۲۰	۲۰/۷
۱۳۹۵-۱۳۹۴	۱۹	۳/۹

* معیار ثبت رخداد سیل، هرگونه تغییر نسبتاً شدید در قرائت دبی می‌باشد. (آب منطقه‌ای استان گلستان)

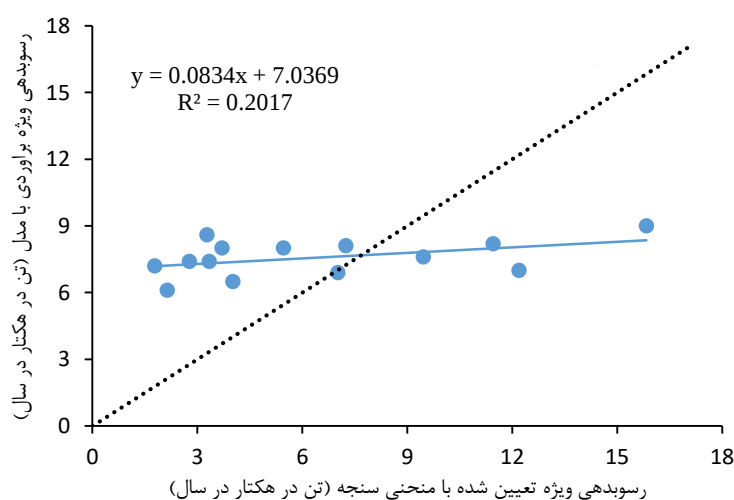


شکل ۱۰. مقایسه نتایج خروجی مدل WaTEM/SEDEM با رسوبدهی محاسباتی با روش منحنی سنج رسوب

به منظور تحلیل بیش‌تر نتایج، مقادیر رسوبدهی ویژه سالانه برآورد شده با مدل با مقادیر تعیین شده با روش منحنی سنجه مورد مقایسه قرار گرفتند (شکل ۱۱). نتایج تحلیل آماری نشان داد که، شیب خط برازش شده غیرمعنی‌دار ($p=0.107$) و عرض از مبدا آن معنی‌دار ($p<0.001$) است. ضریب کارایی نش‌شاتکلیف (ENS) و جذر میانگین مربعات خطای ($RMSE$) به دست آمده نیز ۰/۲۰۲ و ۰/۶۹۳ بودند. همان‌گونه که در شکل نیز دیده می‌شود، WaTEM/SEDEM با برآورد رسوبدهی ویژه در دامنه ۶/۱ تا ۹/۰ تن در هکتار در سال در دوره مورد مطالعه، تمایل به بیش‌برآوردی مقادیر کم و کم‌برآوردی مقادیر زیاد رسوبدهی دارد.

جدول ۴. نتایج خروجی مدل WaTEM/SEDEM برای حوضه حاجی‌قوشان

سال آبی	متوسط فرسایش ناخالص حوضه (تن بر هکتار)	رسوب خروجی از حوضه (مگا تن)	رسوبدهی معلق ویژه (تن بر هکتار)
۱۳۸۱-۱۳۸۰	۱۰۵/۳	۱/۲۱۹	۸
۱۳۸۲-۱۳۸۱	۱۱۸/۸	۱/۳۶۹	۹
۱۳۸۳-۱۳۸۲	۱۰۰	۱/۱۶۳	۷/۶
۱۳۸۴-۱۳۸۳	۱۰۷/۷	۱/۲۵۱	۸/۲
۱۳۸۵-۱۳۸۴	۹۰/۴	۱/۰۴۹	۶/۹
۱۳۸۶-۱۳۸۵	۸۵/۲	۰/۹۸۹	۶/۵
۱۳۸۷-۱۳۸۶	۹۸/۴	۱/۱۳۸	۷/۴
۱۳۸۸-۱۳۸۷	۱۰۶	۱/۲۲۷	۸
۱۳۸۹-۱۳۸۸	۱۰۸/۱	۱/۲۴۶	۸/۱
۱۳۹۰-۱۳۸۹	۹۲/۴	۱/۰۶۶	۷
۱۳۹۱-۱۳۹۰	۱۱۴/۴	۱/۳۲۳	۸/۶
۱۳۹۲-۱۳۹۱	۱۰۰/۲	۱/۱۵۷	۷/۶
۱۳۹۳-۱۳۹۲	۸۱	۰/۹۳۸	۶/۱
۱۳۹۴-۱۳۹۳	۹۸/۸	۱/۱۳۵	۷/۴
۱۳۹۵-۱۳۹۴	۹۵/۸	۱/۱۰۷	۷/۲
متوسط	۱۰۰/۲	۱/۱۵۹	۷/۶



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر رسوبدهی حاصل از مدل WaTEM/SEDEM و رسوبدهی تعیین شده با روش منحنی سنجه (داده مربوط به سال ۱۳۸۳ ارائه نشده است)

در جدول ۵ ضریب تغییرات میزان بارندگی سالانه، فرسایندهی باران سالانه، تعداد سیلاب در هر سال، حداکثر دبی سیلابی در هر سال و رسوبدهی سالانه حوضه آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، درحالی‌که ضریب تغییرات بارندگی و فرسایندهی سالانه چندان

زیاد نیست، رسوب‌دهی سالانه دارای ضریب تغییرات ۲۰۰ درصدی است و در میان متغیرهای مختلف، حداکثر دبی سیلابی از نظر ضریب تغییرات در سال‌های مختلف به آن نزدیک‌تر است.

جدول ۵. ضریب تغییرات بارندگی، فرساینده‌ی، رسوب‌دهی برآوردی و محاسبه شده حوضه، تعداد و حداکثر دبی سیلابی

مشخصه	بارندگی سالانه	فرساینده‌ی سالانه	رسوب‌دهی برآوردی	رسوب‌دهی سالانه	تعداد رخداد سیل	حداکثر دبی سیلابی
ضریب تغییرات (%)	۱۵	۳۰	۱۰	۲۰۰	۵۱	۱۴۲

بحث

برآوردهای هدررفت خاک

در پژوهش آرخی و محمدقاسمی (Arekhi and Mohammad-Ghasemi, 2022)، شاخص فورنیه اصلاح‌شده برای استان گلستان از ۴۱ تا ۴۲۹ محاسبه شد. همچنین، عابدیان و همکاران (Abedian et al., 2018)، این شاخص را در حوضه گرگان‌رود از ۴۳/۷ تا ۹۸/۶ برآورد کردند. مهری و همکاران نیز (Mehri et al., 2018) این شاخص را در حوضه قره‌سو استان گلستان از ۴۰/۶ تا ۹۱/۲ به‌دست آوردند. این مقادیر با یافته‌های تحقیق حاضر (۲۰ تا ۹۱) در حوضه حاجی‌قوشان گلستان (جدول ۱) مطابقت دارند که به دلیل شرایط اقلیمی مشابه این مناطق باشد. به همین تناسب مقادیر فرساینده‌ی باران نیز تغییرات زیادی از مقادیر متوسط تا بسیار زیاد (حدود ۳۴۰ تا ۱۴۰۰ مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال) نشان داد. مقدار فرساینده‌ی باران در حوضه ناورود استان گیلان توسط اسدی و همکاران (۲۰۱۷) بین ۱۶۴ تا ۱۰۷۱ مگاژول میلی‌متر بر هکتار سال برآورد شد. این یافته‌ها با تأکید بر بارش‌های فصلی و شدید است که می‌تواند نقش مهمی در افزایش فرسایش خاک داشته باشد، نشان‌دهنده تغییرات نسبتاً زیاد (از مقادیر کم تا بسیار زیاد) خطر فرسایش آبی از نظر بارندگی در این مناطق هستند.

مقادیر فرسایش‌پذیری برآوردی در سطح حوضه (۰/۳۷ تا ۰/۴۴ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر) نیز بیانگر تنوع خاک‌های منطقه مطالعاتی از نظر حساسیت به فرسایش است. خرمایی و همکاران (۱۳۹۵) مقادیر فرسایش‌پذیری خاک را برای اراضی حوضه کچیک استان گلستان بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۹۲ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر گزارش کردند. جوکار و دهقان (۱۴۰۱) مقادیر فرسایش‌پذیری خاک را برای اراضی حوضه بلده استان مازندران بین ۰/۰۳۲ تا ۰/۰۶۲ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر گزارش کردند. اسدی و همکاران (۲۰۱۷) برای حوضه ناورود استان گیلان مقادیری با تغییرات کم (۰/۴۳ تا ۰/۴۴ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر) به دست آوردند. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت‌های زمین‌شناسی و نوع خاک باشد. علاوه بر این، عسکریان (۱۴۰۲) میانگین فرسایش‌پذیری خاک را در حوضه خامسان استان کردستان برابر با ۰/۰۳۹ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر گزارش کرد که به‌طور کلی با مقادیر ارائه‌شده برای مناطق مشابه همچون حوضه مورد مطالعه همخوانی دارد.

در ارتباط با عامل LS، عابدیان و همکاران (۲۰۱۸)، مهری و همکاران (۲۰۱۸) و جوکار و دهقان (۱۴۰۱) مقادیر آن را به ترتیب برای حوضه‌های گرگان‌رود، قرسو و بلده به ترتیب از صفر تا ۷۱، از صفر تا ۲۷، و صفر تا ۳۶۰ محاسبه کردند. در حالی که این مقدار برای حوضه حاجی‌قوشان بین صفر تا ۱۰۵ برآورد شد که بیانگر وجود اراضی دشتی و مسطح از یک سو، و شیب‌های بسیار تند و/یا دامنه‌های بلند از سوی دیگر است. تفاوت در مقادیر LS برآوردی توسط محققین مختلف، علاوه بر تفاوت‌های توپوگرافی و شیب دامنه‌ها در حوضه‌های مختلف، می‌تواند ناشی از اندازه پیکسل DEM مورد استفاده نیز باشد. از نظر وضعیت پوشش گیاهی نیز حوضه حاجی‌قوشان از مناطق بدون پوشش (خاک لخت) تا جنگل‌های بسیار متراکم را در برمی‌گیرد که منجر به مقادیر عامل C بین ۰/۰۳ تا ۰/۹۸ شده است. در همین راستا، عابدیان و همکاران (۲۰۱۸) مقادیر عامل C را در حوضه گرگان‌رود استان گلستان از ۰/۰۴ تا ۰/۹۴ به ترتیب برای پوشش جنگلی متراکم تا مناطق عاری از پوشش گیاهی برآورد کردند که با نتایج این پژوهش تطابق بسیار زیادی دارد.

تغییرات بسیار زیاد عوامل پنج‌گانه RUSLE (R، K، LS و C) که همگی بیانگر تنوع عوامل موثر بر فرسایش خاک در حوضه حاجی‌قوشان هستند، در نهایت منجر به برآورد خطر فرسایش خاک از صفر تا بیش از ۲۰۰ تن در هکتار در سال (با میانگین ۶۱ تن در هکتار در سال) گردید (شکل ۷). بر همین اساس، متوسط ۱۵ ساله ناخالص فرسایش خاک در سطح حوضه با WaTEM/SEDEM حدود ۱۰۰ تن در هکتار در سال برآورد شد (جدول ۴). به‌طور کلی، برآورد هدررفت خاک با این مدل‌ها در حوضه‌های بزرگ و به‌ویژه در مناطق کوهستانی با بارندگی نسبتاً زیاد همچون نواحی شمال ایران یا ارتفاعات زاگرس (e.g. Asadi et al., 2017; Kalambukattu and

Gholami et al., 2024; Ebrahimzadeh et al., 2024; Ghimire et al., 2024; Li et Kumar, 2017; Fallah et al., 2023; al., 2024; Didi et al., 2025) منجر به مقادیر عددی بزرگ می‌شود. به‌عنوان نمونه Mhaske و همکاران (۲۰۲۱) برای منطقه جنگلی ساراند متوسط فرسایش سالانه خاک را ۷۶ تن در هکتار برآورد کردند. همچنین Li و همکاران (۲۰۲۴) و غلامی و همکاران (۲۰۲۴) نیز به ترتیب مقادیر هدررفت خاک را تا بیش از ۱۵۰ تا ۳۰۰۰ تن در هکتار در سال برآورد کردند. بیان چند نکته در این مورد ضروری به نظر می‌رسد. نخست، از آنجا که در همه این موارد RUSLE و WaTEM/SEDEM بدون واسنجی به کار می‌روند، محققین (e.g. Asadi et al., 2017) ترجیح داده و توصیه می‌کنند که مقادیر برآوردی را با عنوان خطر فرسایش خاک و نه مقدار واقعی هدررفت خاک توصیف نمایند، یا از این برآوردها برای کلاس‌بندی کیفی فرسایش خاک و اولویت‌بندی برای حفاظت خاک (e.g. Li et al., 2024) استفاده کنند. دوم، مقادیر برآوردی بیش از حد (به‌عنوان مثال تا چند صد یا حتی چند هزار تن در هکتار در سال)، محدود به مناطق بسیار کوچکی از حوضه‌های مورد مطالعه (حاشیه دره‌ها یا نزدیک نوک قله‌ها، شکل ۷ در مطالعه حاضر) هستند که اغلب دارای دو ویژگی، شیب‌های بسیار تند (نزدیک به قائم که منجر به عامل LS بسیار بزرگ می‌شود) و بدون پوشش (بیرون زدگی‌های سنگی و در نتیجه عامل C نزدیک یک) هستند. سوم، در بسیاری از مطالعات انجام شده در داخل کشور و برخی مطالعات بین‌المللی (به نقل از آویژگان و همکاران، ۱۴۰۴)، مقدار اندازه‌گیری شده ضریب فرسایش‌پذیری خاک (عامل K)، یک دهم و تا کوچک‌تر از یک صدم مقدار برآوردی آن با نمودگراف و معادلات موجود است، و این بدان معنی است که مقدار هدررفت برآوردی بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر مقدار واقعی است.

عرب‌خدری (۱۴۰۰) تلفات خاک اندازه‌گیری شده در کرت از سطح اراضی مرتعی، جنگلی و دیم‌زارها را اغلب بسیار کمتر از ۱ تن در هکتار در سال بیان می‌کند. اسدی (۱۴۰۱) نیز ضمن بیان اینکه در مورد میزان دقیق فرسایش آبی در کشور اتفاق نظر وجود ندارد، ارقام بیش از ۵-۶ تن در هکتار در سال را به‌عنوان متوسط بلندمدت فرسایش آبی در پهنه کشور، منطقی نمی‌داند. از آنجا که امکان واسنجی مدل به دلیل عدم وجود داده کافی و مطمئن از میزان فرسایش خاک در دامنه‌ها وجود ندارد، لذا نمی‌توان میزان واقعی هدررفت خاک را به‌طور دقیق تعیین کرد، اما با توجه به مطالعات قبلی (آویژگان و همکاران، ۱۴۰۴)، احتمالاً بیش‌برآوردی عامل فرسایش‌پذیری خاک، دلیل بیش‌برآوردی هدررفت خاک با مدل‌های خانواده RUSLE نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در کرت و دامنه‌ها (عرب‌خدری، ۱۴۰۰؛ و به نقل از آویژگان و همکاران، ۱۴۰۴) است. به‌طور بسیار تقریبی، چنانچه: (۱) متوسط فرسایش خاک برآوردی مدل WaTEM/SEDEM، ۱۰۰ تن در هکتار در سال، و متوسط خطر فرسایش خاک برآوردی مدل RUSLE، ۶۰ تن در هکتار در سال باشد، و (۲) در حوضه مورد مطالعه، براساس نتایج مطالعه‌ی Vaezi و همکاران (۲۰۰۸) در شمال غرب ایران (که بیان می‌کند ضریب فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده با نمودگراف ویشمایر بین حدود ۸/۸ تا ۱۱ برابر مقدار واسنجی شده آن است)، مقادیر برآوردی بر ۱۰ تقسیم شود، آنگاه (۳) مقدار فرسایش خاک برآوردی در حوضه حاجی‌قوشان، به ترتیب حدود ۱۰ و ۶ تن در هکتار در سال به‌دست می‌آید که منطقی‌تر هستند. ناگفته نماند که این موضوعات قطعاً به بررسی‌ها و تحقیقات بسیار بیش‌تری نیاز دارند. خرمایی و همکاران (۱۳۹۵) بیش‌برآوردی K توسط نمودگراف را در خاک‌های لسی و آهکی حوضه معرف و زوجی کچیک (شرق استان گلستان)، ۱۸۲ برابر بیان کردند. همچنین، نتایج مطالعاتی در لهستان، چین و عراق نشان می‌دهد که K برآوردی به ترتیب ۶ تا ۱۰، ۳/۳ تا ۸/۴، و ۱۰/۹ تا ۱۲/۳ برابر مقدار اندازه‌گیری شده آن است (به نقل از خرمایی و همکاران، ۱۳۹۵).

برآوردهای رسوب‌دهی

بر مبنای منحنی سنج رسوب تعدیل شده، میانگین و میانه رسوب‌دهی ویژه معلق حوضه حاجی‌قوشان به ترتیب ۱۳/۰۸ و ۵/۴۶ تن در هکتار در سال بود. دامنه تغییرات سالانه رسوب‌دهی برای دوره ۱۵ ساله مورد بررسی نیز ۱/۷۸ تا ۱۰۶/۵۱ تن در هکتار در سال تعیین شد. بررسی داده‌های رسوب‌دهی سالانه (شکل ۸) و تطبیق آن با رخدادهای سیلابی (جدول ۳)، بیانگر آن است که میزان رسوب‌دهی سالانه به شدت متأثر از رخدادهای سیلابی است. به‌عنوان مثال، تحلیل داده‌ها نشان داد که ۸۰ درصد از رسوب‌دهی سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ مربوط به دو رخداد سیلابی است. داده‌های گزارش شده از مناطق مختلف جهان نیز نشان می‌دهد که به صورت کلی، چند رخداد بیشینه، سهمی بیش از ۵۰ درصد در رسوب‌دهی دارند (به نقل از عرب‌خدری، ۱۳۹۴). مقایسه مقادیر سالانه بارندگی و فرسایش‌دهی (شکل ۹) با مقادیر رسوب‌دهی سالانه (شکل ۸) در حوضه حاجی‌قوشان نیز نشان می‌دهد که الزاماً سال آبی با حداکثر فرسایش‌دهی باران، منطبق بر سال بالاترین رسوب‌دهی نیست. این موضوع نیز نشان می‌دهد که نقش فرسایش‌های عمقی (که اغلب در رخدادهای سیلابی، شدت بالاتری دارند) در رسوب‌دهی سالانه زیاد است. این موضوع نیز با مطالعات منشاء‌یابی رسوب تأیید شده است (به نقل از عرب‌خدری، ۱۴۰۰).

مقادیر رسوب‌دهی برآوردی با WaTEM/SEDEM (جدول ۴) با میانگین ۷/۵۷ (میانه ۷/۶)، در دامنه ۶/۱ تا ۹/۰ تن در هکتار در سال

می‌باشند. ضریب تغییرات مقادیر برآوردی رسوبدهی، بسیار کوچک و حتی کمتر از ضریب تغییرات بارندگی و فرساینده‌گی سالانه است (جدول ۵)، در حالی ضریب تغییرات مقادیر محاسبه شده رسوبدهی بسیار زیاد و تطابق بیش‌تری با ضریب تغییرات حداکثر دبی سیلابی سالانه دارد. ارزیابی نتایج (شکل ۱۱)، نشان می‌دهد که کارایی مدل WaTEM/SEDEM برای برآورد رسوبدهی سالانه حوضه حاجی‌قوشان، به صورت کلی ضعیف است. بر مبنای RMSE، مقادیر برآوردی مدل به صورت میانگین، حدود ۰/۶۹ واحد از مقادیر واقعی انحراف دارند و بر مبنای E_{NS} ، اجرای مدل اندکی بهتر از استفاده از میانگین داده‌ها به عنوان تخمین‌گر است (Moriassi et al., 2007). به‌طور کلی، مدل WaTEM/SEDEM دارای بیش‌برآوردی در مقادیر کم رسوبدهی و کم‌برآوردی در مقادیر زیاد رسوبدهی است. اسدی و همکاران (۱۳۸۶) نیز این نوع خطا در مدلسازی را مشاهده کرده و آن را پدیده‌ای عام می‌دانند. نیرینگ (۱۹۹۸) نیز نتیجه گرفت که مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی کامل تغییرات طبیعی در مقدار اندازه‌گیری شده نیستند و بنابراین محدودیت مدل‌های فرسایش خاک فعلی، ماهیت قطعی^۱ آنها است. ارزیابی USLE (Risse et al., 1993)، RUSLE (Rapp, 1994) و WEPP (Zhang et al., 1996) نیز منجر به نتایج مشابهی از منظر بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی شده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، میزان فرسایش خاک و رسوبدهی در حوضه حاجی‌قوشان استان گلستان با بهره‌گیری از مدل‌های RUSLE و WaTEM/SEDEM برآورد و ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که فرساینده‌گی باران در این حوضه از ۳۴۴ تا ۱۴۱۰ مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال متغیر است و به شدت تحت تأثیر دو عامل توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی (قرارگیری حوضه در بین دو اقلیم مرطوب و نیمه‌خشک) قرار دارد. همچنین، فرسایش‌پذیری خاک بین ۰/۳۷ تا ۰/۴۴ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورد شد که نشان‌دهنده تنوع خاک‌های منطقه از نظر حساسیت به فرسایش است. عامل طول و درجه شیب (LS) در ارتفاعات مرکزی و جنوبی حوضه به دلیل شیب‌های تند، مقادیر بالایی را نشان داد، در حالی که مناطق مسطح و کم‌ارتفاع، مقادیر LS نزدیک به صفر داشتند. عامل پوشش گیاهی (C) نیز از ۰/۰۰۳ تا ۰/۹۸ متغیر بود که بیانگر وضعیت متنوع (از پوشش جنگلی متراکم تا اراضی بدون پوشش) و نامناسب پوشش گیاهی در بخش‌های وسیعی از حوضه است.

بر اساس مدل RUSLE، میانگین خطر فرسایش خاک در حوضه حدود ۶۱ تن بر هکتار در سال برآورد شد. نتایج نشان داد که مناطق با شیب‌های تند و پوشش گیاهی ضعیف، بیش‌ترین خطر فرسایش خاک را دارند. از سوی دیگر، مدل WaTEM/SEDEM میانگین فرسایش ناخالص خاک را حدود ۱۰۰ تن بر هکتار در سال، و رسوبدهی ویژه را بین ۱/۱ تا ۹/۰ تن بر هکتار در سال برآورد کرد. مقایسه نتایج این مدل با داده‌های منحنی سنج رسوب نشان داد که WaTEM/SEDEM دارای دقت نسبتاً قابل قبولی در برآورد میانگین بلندمدت رسوبدهی است، اما در برآورد رسوبدهی سالانه، به ویژه در سال‌های با رخدادهای سیلابی شدید، دقت کافی ندارد و تمایل به کم‌برآوردی دارد. مقادیر بزرگ برآوردشده خطر فرسایش و فرسایش ناخالص خاک (به ترتیب حدود ۶۰ و ۱۰۰ تن در هکتار در سال) برای حوضه حاجی‌قوشان با مدل‌های RUSLE و WaTEM/SEDEM، احتمالاً به دلیل بیش‌برآوردی عامل فرسایش‌پذیری خاک و یا فرساینده‌گی باران باشد. بیش‌برآوردی حدود ۱۰ تا بیش از ۱۰۰ برابری فرسایش‌پذیری خاک توسط محققین مختلف گزارش شده است. بهبود مدل‌سازی فرسایش خاک و رسوبدهی مستلزم انجام مطالعات میدانی برای اندازه‌گیری مستقیم و بلندمدت هدررفت خاک و رسوبدهی (داشتن برنامه پایش) به منظور واسنجی مدل‌های RUSLE و WaTEM/SEDEM است. چنین داده‌هایی امکان تحلیل حساسیت و بررسی دقیق‌تر عوامل موثر بر فرسایش خاک و رسوبدهی را نیز فراهم می‌کنند. توسعه معادلات بومی برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک (عامل K)، با توجه به ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی ایران، و استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک بالا و شاخص‌های جدید پوشش گیاهی (همچون SAVI یا EVI) نیز برای بهبود دقت تهیه نقشه عامل C پیشنهاد می‌شود.

این مطالعه نشان داد که مدل‌های فعلی فرسایش و رسوبدهی، به ویژه در مناطق با رخدادهای حدی (مانند سیلاب‌های شدید)، محدودیت‌هایی دارند. بنابراین، ترکیب روش‌های مدل‌سازی با داده‌های میدانی و فناوری‌های نوین (مانند سنجش از دور، GIS و هوش مصنوعی) شاید بتواند به درک بهتر فرایندهای فرسایش و ارائه راهکارهای مؤثرتر منجر شود. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای مطالعات آینده در حوضه‌های مشابه با شرایط توپوگرافی و اقلیمی پیچیده مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- آرخی، صالح و محمدقاسمی، مسعود (۱۴۰۱). ارزیابی شاخص‌های فرساینده‌ی باران با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (نمونه‌ی موردی: استان گلستان). *جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای*، ۱۲(۴۲): ۱۰۱-۱۲۸.
- آویژگان، ایوب؛ اسدی، حسین؛ عرب‌خدری، محمود؛ نور، حمزه و نظری سامانی، علی‌اکبر (۱۴۰۴). چالش‌های اندازه‌گیری و برآورد فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K) مدل (R)USLE در مراتع مناطق خشک. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶(۲): ۳۷۱-۳۸۱.
- ابراهیم زاده، سمیه؛ ارگانی، میثم و میردار هریجانی، فرشاد (۱۴۰۳). مدلسازی نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب با مدل RUSLE/SDR در حوضه آبریز دیزگران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۳(۳۹): ۱-۲۴.
- اسدی، حسین (۱۴۰۱). واکاوی تاریخچه فعالیت دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و سازمان‌های اجرایی مرتبط با فرسایش و حفاظت خاک در ایران. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۲): ۴۳۳-۴۱۱.
- جوکار سرهنگی، عیسی و دهقان چاچکامی، محمدرضا (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل‌های RUSLE و ICONA در پهنه‌بندی فرسایش خاک حوضه بلده، استان مازندران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۴): ۱۵۹-۱۷۸.
- خرمایی، حنیفه؛ کیانی، فرشاد و خرمالی، فرهاد (۱۳۹۵). بررسی شاخص فرسایش‌پذیری خاک در اراضی لسی حوزه آبخیز کچیک استان گلستان. *مجله آب و خاک*، ۳۰(۶): ۲۰۷۸-۲۰۸۶.
- خلیلی، علی (۱۳۸۴). آب و هوای ایران. در *خاکهای ایران: تحولات نوین در شناسایی، مدیریت و بهره‌برداری*. ویراستاران مومنی، عزیز؛ بنایی، محمد حسن؛ ملکوتی، محمد جعفر و بای‌بوردی، محمد. چاپ اول. تهران: انتشارات موسسه تحقیقات خاک.
- عرب‌خدری، محمود (۱۳۹۴). امکان برآورد فرسایش متوسط سالانه درازمدت مبتنی بر اندازه‌گیری فرسایش حاصل از چند رخداد بارندگی. *ترویج و توسعه آبخیزداری*، ۳(۱۱): ۷-۱۵.
- عرب‌خدری، محمود (۱۴۰۰). وضعیت فرسایش آبی و رسوبدهی ایران، واکاوی آماری و مقایسه‌ای. *مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۶(۲): ۱۳۹-۱۵۶.
- عسکریان چایجان، زینب (۱۴۰۲). برآورد فرساینده‌ی باران و ذوب برف و برآورد توزیع مکانی تلفات خاک در حوضه زوجی خامسان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران.
- غفاری گوشه، حیدر (۱۳۹۵). ارزیابی اثرات فرسایش بر کیفیت خاک و آب و تعیین فرسایش قابل تحمل در حوضه آبخیز سد بوستان، استان گلستان، رساله دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران.
- غلامی، لیلا؛ خالدی درویشان، عبدالواحد؛ درختی، سعید و کیانی هرچکانی، محبوبه (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوزه آبخیز چرداول ایلام. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۸(۶۵): ۱-۴.

REFERENCES

- Abedian, S., Salmanmahiny, A. (2018). Water erosion prediction using Revised Universal Soil Loss Equation and GIS: A case study of Gorganrud Basin. *Environmental Resources Research*, 6(2), 103-117.
- Angulo-Martínez, M., Beguería, S. (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1-2), 111-121.
- Arabkhedri, M. (2016). The possibility of estimation of long-term average annual erosion based on measurements of erosion from a few rainfall events. *Extension and Development of Watershed Management*, 3(11), 7-15. (In Persian)
- Arabkhedri, M. (2021). Water Erosion and Sediment Production Status in Iran: Statistical and Comparative Analyses. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 6(2), 139-156 (In Persian). doi:10.22047/srjasnr.2021.140574.
- Arekhi, S., & Mohammad-Ghasemi, M. M. (2022). Evaluating Rain Erosivity Indices Using Geostatistical Techniques in GIS Environment (Case Study: Golestan Province). *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 12(42), 101-128. (In Persian)
- Asadi, H. (2022). A Critical Report on Several Decades' Activities in the Universities, Research Institutes and Executive Organizations in the Field of Soil Erosion and Conservation in Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 411-433 (In Persian). doi:10.22059/ijswr.2022.337663.669190.
- Asadi, H., Honarmand, M., Vazifiedoust, M., Moussavi, A. (2017). Assessment of changes in soil erosion risk using RUSLE in Navrood Watershed, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 19(1), 231-244.



- Avizhgan, A., Asadi, H., Arabkhedri, M., Noor, H., Nazari Samani, A. A. (2025). The challenges of measuring and estimating the soil erodibility factor (K) of the (R)USLE model in rangelands of arid regions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(2), 351-371 (In Persian). doi: 10.22059/ijswr.2024.386195.669845.
- Bezak, N., Borrelli, P., Mikoš, M., Auflič, M. J., Panagos, P. (2024). Towards multi-model soil erosion modelling: An evaluation of the erosion potential method (EPM) for global soil erosion assessments. *Catena*, 234, 107596.
- Chow V.T., Maidment D.R., Mays, L.W. (1988). In: Applied Hydrology Chapter 7, Mc Graw Hill Book Company. ISBN 0-07-010810-2.
- Didi, S., El Boute, S., Hilali, A., Benmoussa, B., Hili, A., Ouakhir, H., Bouhachm, S., Najine, A., Wafik, A., Ennaji, W., Hajaj, S. (2025). Modeling soil degradation in a semi-arid region using GIS techniques and the RUSLE model: case study of the Hassan Addakhil Dam watershed (Ziz Basin, Morocco). *J. Sediment. Environ.* doi:10.1007/s43217-025-00241-w.
- Didoné, E. J., Minella, J. P. G., Evrard, O. (2017). Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*. 174, 24-33.
- Ebrahimzadeh, S., Argany, M. and Mirdar Harijani, F. (2024). Modeling the rate of soil erosion and sediment yield using the RUSLE / SDR model in the Dizgaran watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(39), 1-24 (In Persian). doi:10.22111/jneh.2024.39109.1823
- Fallah, M., Bahrami, H., Asadi, H. (2023). Assessment of soil erosion risk using RUSLE model, SATEEC system, remote sensing, and GIS techniques: a case study of Navroud watershed. *Environmental Earth Sciences*, 82(17), 398.
- Getu, L. A., Nagy, A., Addis, H. K. (2022). Soil loss estimation and severity mapping using the RUSLE model and GIS in Megech watershed, Ethiopia. *Environmental Challenges*. 8, 100560.
- Ghafari-Gosheh, H. (2017). Evaluation of the effects of erosion on soil and water quality, and determining soil erosion tolerance in Hajighoushan Watershed, Golestan Province. Ph.D. Thesis, Soil Science Department, University of Tehran. (In Persian)
- Ghimire, S., Singh, U., Panthi, K. K., Bhattarai, P. K. (2024). Spatial sediment erosion and yield using RUSLE coupled with distributed SDR model. *Water*, 16(24), 3549.
- Gholami, L., Khaledi Darvishan, A., Derakhti, S., Kiani Harchegani, M. (2024). Effects Evaluation of land use change on soil erosion using the RUSLE model in the Chardavol watershed, Ilam. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 18(65), 1-14 (In Persian).
- Golosov, V. N., Shamshurina, E. N., Kolos, G. I., Petel'ko, A. I., Zhidkin, A. P. (2024). Spatiotemporal Changes in the Erosion and Deposition Processes in a Small Catchment in the North of the Central Russian Upland. *Eurasian Soil Science*. 57(5), 838-852.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., de Vente, J., Nyssen, J., Moeyersons, J. (2013). Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) in Northern Ethiopia. *Land Degradation & Development*. 24 (2), 188-204.
- Irvem, A., Topaloglu, F., Uygur, V. (2007). Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan river basin in Turkey. *Journal of Hydrology*. 336, 30-37.
- Jansson, M. (1996). Estimating a sediment rating curve of the Reventazón river at Palomo using logged mean loads within discharge classes, *Journal of Hydrology*, 183(3-4), 227-241.
- Jokar Sarhangi, E., & Dehghan Chachkami, M. (2022). Efficiency Evaluation of RUSLE and ICONA models in erosion zoning of Baladeh watershed, Mazandaran province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 159-178. (In Persian)
- Kalambukattu, J and Kumar, S. (2017). Modelling soil erosion risk in a mountainous watershed of Mid-Himalaya by integrating RUSLE model with GIS. *Eurasian Journal of Soil Science*, 6(2), 92-105.
- Khaleghpanah, N., M. Shorafa, H. Asadi, M. Gorji. (2016). Modeling soil loss at plot scale with EUROSEM and RUSLE2 at stony soils of Khamesan Watershed, Iran. *Catena*, 147: 773-788.
- Khalili, A. (2005). Climate of Iran. In M. H. Banaei, M. J. Malakouti, M. B. Bourdi, & A. Momeni (Eds.), *Soils of Iran: New developments in identification, management and exploitation*. Sana Publication. (In Persian)
- Khormai, H., Kiani, F., Khormali, F. (2017). Evaluation of Soil Erodibility Factor (k) for Loess Derived Landforms of Kechik Watershed in Golestan Province. *Water and Soil*, 30(6), 2078-2086 (In Persian). doi:10.22067/jsw.v30i6.57027.
- Li, M., Liu, X., Ding, J., Zhang, W., Wang, R., Luo, X., Xing, L., Wang, C., Zhao, H. (2024) Analysis of soil erosion dynamics and its driving factors in the Qilian Mountains of Qingdong. *Soil Research* 62, SR24078. doi:10.1071/SR24078

- Lufafa, A., Tenywa, M.M., Isabirye, M., Majaliwa, M.J.G., Woome, P.L. (2003). Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GISbased universal soil loss model. *Agricultural Systems*. 76, 883-894.
- Maltsev, K., Ivanov, M. (2022). Comparative Study on Sediment Delivery from Two Small Catchments within the Lena River, Siberia. *Water*, 14(19), 3055.
- Mehri, A., Salmanmahiny, A., Mikaeili Tabrizi, A., Mirkarimi, H., Sadoddin, A. (2018). Investigation of likely effects of land use planning on reduction of soil erosion rate in river basins: Case study of the Gharesoo River Basin, *Catena*. 167, 116-129.
- Mhaske, S. N., Pathak, K., Dash, S. S., Nayak, D. B. (2021). Assessment and management of soil erosion in the hilltop mining dominated catchment using GIS integrated RUSLE model. *Journal of Environmental Management*. 294, 112987.
- Milliman, J.D., & Syvitski, J.P.M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology*, 100(5), 525-544.
- Moor, I.D., Wilson, J.P. (1992). Length-slope factors for revised universal soil loss EQ: simplified method of estimation. *Journal of Water and Soil Conservation*. 47, 423-428.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nearing, M. A. (1998). Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses. *Catena*. 32(1), 15-22.
- Notebaert, B., Vaes, B., Verstraeten, G., Govers, G. (2006). WaTEM/SEDEM version 2006 Manual. KU Leuven, Physical and Regional Geography Research Group. 29 P.
- Quinton, J. N. and Fiener, P. (2024). Soil erosion on arable land: An unresolved global environmental threat. Progress in Physical Geography. *Earth and Environment*. 48(1), 136-161.
- Rapp, J. F. (1994). Error assessment of the Revised Universal Soil Loss Equation using natural runoff plot data. Doctoral dissertation, The University of Arizona.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., Yoder, D. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: a Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Government Printing Office, Washington. DC.
- Risse, L. M., Nearing, M. A., Laflen, J. M. (1993). Assessment of error in the universal soil loss equation using natural runoff plot data. In American Society of Agricultural Engineers. Meeting (USA).
- Romkens, M., Prasad, J., Poesen, J. (1987). Soil erodibility and properties. In: *Transactions of the XIII Congress of International Society of Soil Science*. 57, 825–833.
- Scheper, S., Liu, C., Xin, Z., Ran, L., Alewell, C. (2024). Soil loss and sedimentation rates in a subcatchment of the Yellow river Basin in China. *International Soil and Water Conservation Research*. 12(3), 534-547.
- Thapa, P. (2020). Spatial estimation of soil erosion using RUSLE modeling: a case study of Dolakha district, Nepal. *Environmental Systems Research*. 9(1), 1-10.
- Vaezi, A.R., Sadeghi S.H.R., Bahrami, H.A., Mahdian M.H. (2008). Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*. 97, 414-423.
- Van der Knijff, Jm, Jones. R.J. AI and Montanarella. L. (1999). Soil erosion risk assessment in Italy. EUR19022 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 54 p.
- Van Rompaey, A.J.J, Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., Poesen, J. (2001). Modeling mean annual
- Verstraeten, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J., Govers, G. (2002). Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use Manag.* 18, 386–394.
- Wang, G., Gertner, G., Fang, S., Anderson, AB. (2003). Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 69, 889-898.
- Zhang, X. C., Nearing, M. A., Risse, L. M., McGregor, K. C. (1996). Evaluation of WEPP runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. *Transactions of the ASAE*. 39(3), 855-863.