

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

WaTEM/SEDEM

چکیده

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 مشاهداتی 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، فرساینده‌ی سالانه است که تغییرات آن بسیار کمتر از تغییرات رخدادهای رسوب‌دهی 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، مقدار رسوب‌دهی را بیش‌برآورد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: تولید رسوب سالانه، فرساینده‌ی باران، هدررفت خاک، RUSLE, Google Earth Engine

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

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 $61 \text{ ton ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$. 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.

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

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 Fienner, 2024). فرسایش خاک و انتقال رسوب با فرایندهای هیدرولوژی و ژئومورفولوژی شامل جداشتن، 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، به کارگیری 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 نظرشده آن (مانند^۲ RUSLE) انجام شده است (Bezak et al., 2024). RUSLE نرخ هدررفت خاک را بر اساس فرسایش شیار 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، هیچ‌یک 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 حاجی‌قوشان 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 EI₃₀ 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 RUSLE2 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 (< ۱۰۰ 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 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 تأثیر زیادی دارند. در این پژوهش، با

^۱ Universal soil loss equation

^۲ Revised universal soil loss equation

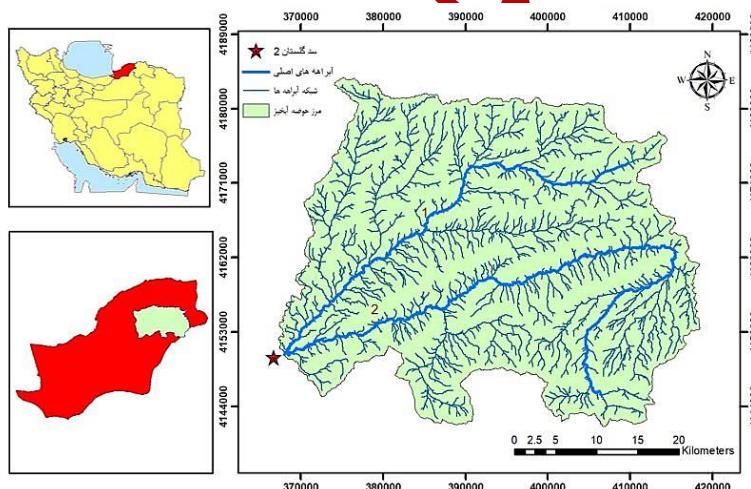
^۳ Sediment assessment tool for effective erosion control

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 کیلومتر مربع و در محدوده عرض شمالی ۳۷ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۸ دقیقه و طول شرقی ۵۵ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۵ دقیقه قرار دارد. حوضه حاجی قوشان 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 پستی‌بالایی 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 حاجی قوشان 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).

$$EI_{30} = 21.56 \cdot FI_{mod}^{0.927} \quad (\text{رابطه ۲})$$

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

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

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (دقیقه-درجه)	عرض جغرافیایی (دقیقه-درجه)	ارتفاع (متر)	دوره آماری بارندگی (سال آبی)	شاخص فورنیه اصلاح‌شده	فرساینده‌ی باران [#]
کلارد*	سی‌وپیک	۵۵-۲۷	۳۷-۲۳	۲۰۷	۸۱-۸۰ تا ۹۵-۹۶	۵۷	۹۱۶
پیس کمر	باران‌سنجی	۵۵-۳۵	۳۷-۳۱	۲۵۶	۷۰-۶۹ تا ۹۵-۹۶	۵۳	۸۵۰
کریم ایشان	باران‌سنجی	۵۵-۴۲	۳۷-۴۰	۵۸۹	۷۰-۶۹ تا ۹۵-۹۶	۵۵	۸۸۳
آی تمر*	باران‌سنجی	۵۵-۲۸	۳۷-۴۸	۱۸۸	۸۱-۸۰ تا ۹۵-۹۶	۲۶	۴۴۴
عزیز آباد	باران‌سنجی	۵۵-۴۱	۳۷-۳۲	۳۱۹	۸۱-۸۰ تا ۹۵-۹۶	۵۴	۸۷۵
سوارپاین	باران‌سنجی	۵۵-۴۱	۳۷-۲۷	۵۰۰	۸۱-۸۰ تا ۹۵-۹۶	۸۳	۱۳۰۰
اسلام‌آباد	باران‌سنجی	۵۶-۰۴	۳۷-۴۱	۹۷۴	۸۱-۸۰ تا ۹۵-۹۶	۲۳	۴۰۱
چنارلی	باران‌سنجی	۵۵-۵۱	۳۷-۴۲	۶۳۳	۸۱-۸۰ تا ۹۵-۹۶	۴۷	۷۶۹
ساری‌قمیش	باران‌سنجی	۵۵-۵۹	۳۷-۵۲	۱۶۴	۷۸-۷۷ تا ۹۵-۹۶	۳۰	۵۰۳
یکه چنار	باران‌سنجی	۵۶-۰۴	۳۷-۴۹	۵۳۸	۷۸-۷۷ تا ۹۵-۹۶	۴۹	۷۹۴
دشت شاد	باران‌سنجی	۵۵-۴۵	۳۷-۱۶	۱۴۵	۷۶-۷۵ تا ۹۵-۹۶	۳۶	۵۹۵
دشت	باران‌سنجی	۵۶-۰۰	۳۷-۱۸	۱۰۱۰	۸۱-۸۰ تا ۹۵-۹۶	۲۰	۳۴۴
قرناق	باران‌سنجی	۵۵-۴۲	۳۷-۴۳	۵۰۰	۷۶-۷۵ تا ۹۵-۹۶	۴۶	۷۵۱
تمر*	تبخیرسنجی	۵۵-۳۰	۳۷-۲۹	۱۷۳	۴۶-۴۵ تا ۹۵-۹۶	۵۷	۹۱۷
مراوه‌تپه*	تبخیرسنجی	۵۵-۵۷	۳۷-۵۴	۱۹۰	۴۶-۴۵ تا ۹۵-۹۶	۳۵	۵۷۷
رابط قره بیل*	تبخیرسنجی	۵۶-۱۹	۳۷-۲۱	۱۴۵۰	۵۴-۵۳ تا ۹۵-۹۶	۲۳	۳۹۱
چشمه خان*	تبخیرسنجی	۵۶-۰۷	۳۷-۱۷	۱۲۵۰	۵۴-۵۳ تا ۹۵-۹۶	۲۳	۳۹۱
گلیداغ*	تبخیرسنجی	۵۵-۵۶	۳۷-۳۸	۱۰۰۰	۷۶-۷۵ تا ۹۵-۹۶	۸۴	۱۳۱۵
پارک ملی گلستان*	تبخیرسنجی	۵۵-۴۷	۳۷-۲۳	۴۷۴	۷۷-۷۶ تا ۹۵-۹۶	۹۱	۱۴۱۰

* ایستگاه‌های حاوی باران نگار،[#] با توجه به طول دوره‌های آماری متفاوت فاکتور فرساینده‌ی 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 فرسایش پذیری خاک بر حسب $t \text{ ha } MJ^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ و D_g میانگین هندسی قطر ذرات خاک بر حسب میلی متر می باشد (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 فن های GIS، این عامل از رابطه ارائه شده 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 مشارکت کننده 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 نرم افزار GIS به دست آمد. نقشه عامل C با ابزار محاسباتی نرم افزار GIS از رابطه ۵ تهیه شد (Van der Knijff et al., 1999):

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

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

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

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

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

برآورد رسوبدهی حوضه

به منظور **برآورد** بار رسوب معلق خروجی حوضه، داده های هیدرولوژی و رسوب سنجی ایستگاه تهر در طول دوره آماری برای سال های آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا از رابطه ۷ و با استفاده از داده های دبی و غلظت مشاهده ای همزمان، مقدار رسوبدهی در هر دبی مشاهده ای 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 میلی گرم در لیتر و Q_d دبی جریان مشاهده ای بر حسب مترمکعب بر ثانیه می باشد.

در گام بعد، برای رسم منحنی سنجه 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 سنجه 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. به منظور منطقی‌تر شدن برون‌یابی و اصلاح مقادیر **برآوردی** رسوب‌دهی روزانه، **منحنی سنجه 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 دسته‌بندی منحنی سنجه رسوب حدوسط دسته‌ها وارد گردید. سپس **منحنی سنجه مجدداً به داده‌ها برازش و منحنی سنجه تعدیل‌شده** 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 **منحنی‌های 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). ورودی‌های نرم‌افزار شامل: مدل رقومی ارتفاع، نقشه طبقه‌بندی اراضی و پارامترهای مدل RUSLE شامل فرساینده‌گی باران، نقشه عامل پوشش گیاهی و نقشه فرسایش‌پذیری خاک می‌باشد. فرمت ورودی به نرم‌افزار ایدریسی (*.rst) بوده و تمامی داده‌های ورودی می‌بایست دارای پیکسل سایز یکسان 20×20 متر بوده، و تعداد ردیف و ستون‌های فایل‌های رستری با یکدیگر برابر باشند، به نحوی که تمامی سلول‌ها کاملاً بر هم منطبق گردند. فایل مدل رقومی ارتفاع می‌بایست حداقل ۱۰ تا ۲۰ پیکسل بزرگ‌تر از مرز حوضه انتخاب شود و شامل تمام سلول‌های مورد محاسبه نرم‌افزار باشد. دو بخش از نتایج مدل، شامل رسوب کل تولیدشده^۱ و رسوب خروجی از رودخانه^۲ مهم‌ترین مقادیر خروجی از مدل بوده که به ترتیب معادل با فرسایش ناخالص^۳ و رسوب‌دهی کل در خروجی حوضه^۴ می‌باشند و اختلاف آن‌ها نشان‌دهنده میزانی از رسوب است که در داخل حوضه باقی می‌ماند (Notebaert et al., 2006). نتایج رسوب‌دهی کل برآوردی در خروجی حوضه با نتایج رسوب‌دهی با روش منحنی سنجه (**به عنوان** اندازه‌گیری شده) در ایستگاه تهر در طول دوره آماری مقایسه شد.

یافته‌های پژوهش

نتایج مدل RUSLE

مقدار شاخص فورنیه اصلاح‌شده در حوضه حاجی قوشان از ۲۰ تا ۹۱، و متوسط سالانه فرساینده‌گی باران نیز از ۳۴۴ تا ۱۴۱۰ (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال) به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های دشت و پارک ملی گلستان متغیر است (جدول ۱). فرساینده‌گی باران در حوضه حاجی‌قوشان همچون اغلب حوضه‌ها، تبعیت زیادی از توپوگرافی و ارتفاع دارد. علاوه بر این، به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی این حوضه، در بخش شمال (به سمت مراوه‌تپه) و بخش شرق (به سمت بجنورد، **به عنوان** نمونه ایستگاه رباط قره‌بین) متاثر از اقلیم

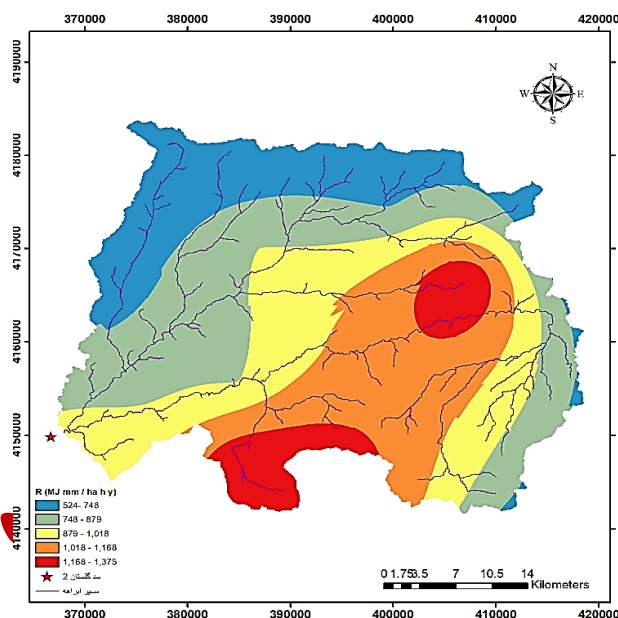
¹ Total sediment production

² Total sediment export

³ Gross soil erosion

⁴ Total sediment yield

مناطق نیمه‌خشک است که فرساینده‌ی باران کم‌تری دارد. در مقابل در جنوب و جنوب شرق (پارک جنگلی گلستان) متاثر از اقلیم مرطوب و دارای فرساینده‌ی بالا است. رشته کوه‌ها و ارتفاعات میانی که اتفاقاً (برخلاف بسیار از حوضه‌ها) از مرزهای غربی، شمالی و شرقی حوضه نیز مرتفع‌تر می‌باشند، دارای بارندگی و در نتیجه فرساینده‌ی بالاتری هستند. به دلیل ماهیت مکانی داده‌ها و به‌منظور مشاهده تغییرات میزان فرساینده‌ی باران در سطح حوضه، از روش درون‌یابی کریجینگ عمومی با درجه یک بعد از حذف روند، استفاده شد. بر این اساس، میزان فرساینده‌ی باران در حوضه از ۵۲۴ تا ۱۳۷۵ مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال برآورد شده است. در نواحی مرکزی حوضه و محدوده ایستگاه‌های گلیداغ و پارک ملی گلستان، بیش‌ترین مقدار فرساینده‌ی مشاهده می‌شود و با دور شدن از نواحی مرکزی این مقدار کاهش می‌یابد (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 است (خلیلی، ۱۳۸۴).



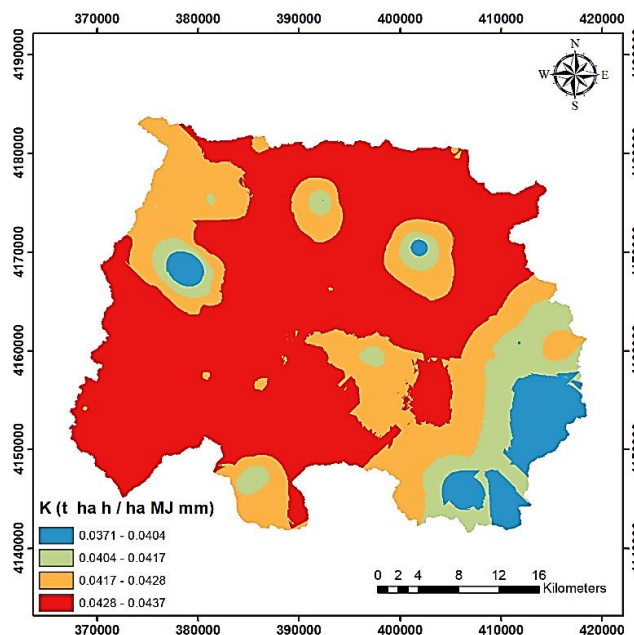
شکل ۲. نقشه عامل فرساینده‌ی باران (R) حوضه حاجی‌قوشان

فرسایش‌پذیری خاک (ضریب K) در سطح حوضه حاجی‌قوشان با متوسط مکانی ۰/۰۳۷۶، از ۰/۰۳۷۱ تا ۰/۰۳۷۷ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر متغیر بود (شکل ۳). بالاترین مقادیر فرسایش‌پذیری خاک مربوط به مناطق لسی حوضه است که بیش‌ترین مساحت را نیز دارند.

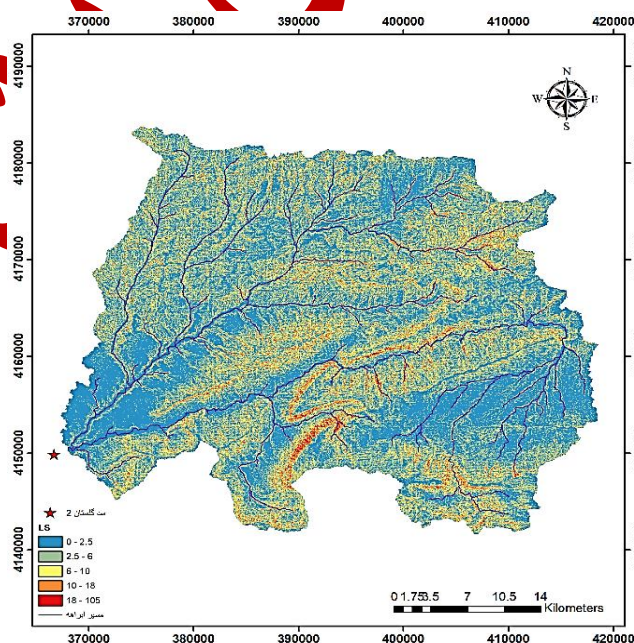
در شکل ۴ نقشه عامل طول و درجه شیب (LS) آمده است. مقادیر بالای LS منطبق با ارتفاعات مرکزی و جنوب حوضه با شیب‌های تند است. مقادیر نزدیک به صفر ($LS < 2.5$) که سطح وسیعی از حوضه را شامل می‌شود، مربوط به مناطق مسطح و تپه‌های کم ارتفاع می‌باشد، که در نواحی خروجی حوضه و دشت جنوب شرق حوضه پراکنده هستند. مقدار متوسط LS در کل حوضه برابر با ۳/۹۸ 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 ۰/۷۴، و حداقل آن در نواحی بدون پوشش گیاهی (به ویژه جنوب شرق حوضه با درصد پوشش تقریباً صفر) با مقدار ۰/۰۰۸ مشاهده شد. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) در شکل ۵ آمده است. مقدار عامل C در مناطق دارای پوشش جنگلی، از ۰/۰۰۳ شروع شده و در مناطق بدون پوشش گیاهی به حداکثر خود یعنی ۰/۹۸ می‌رسد. مقدار متوسط عامل پوشش گیاهی در حوضه حاجی‌قوشان ۰/۴۸ برآورد شد که بیان‌گر پوشش گیاهی ضعیف در اکثر مناطق حوضه می‌باشد. با توجه به

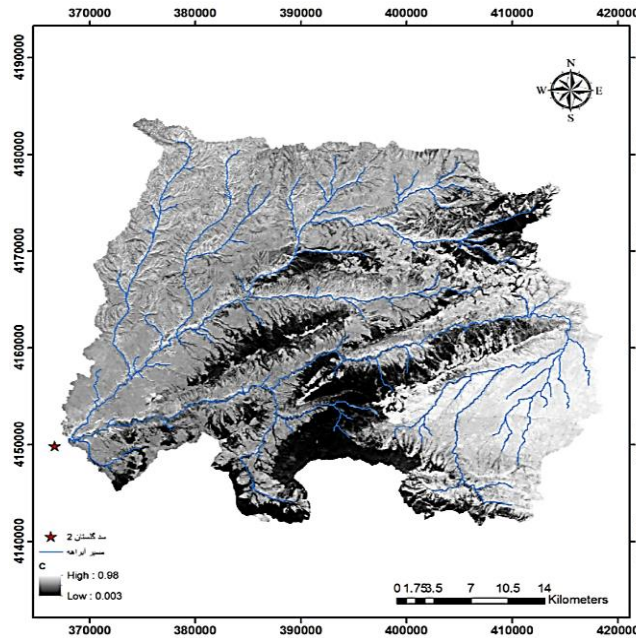
شکل ۵، مناطق تیره‌تر نشان‌دهنده مناطق دارای پوشش گیاهی مناسب (مقدار عامل C کوچک) بوده که باعث کم‌تر شدن خطر فرسایش خاک در این مناطق می‌شود. در مقابل، در مناطق روشن‌تر مقدار C به یک نزدیک شده و در نتیجه کم‌ترین میزان جلوگیری از فرسایش توسط پوشش گیاهی در این مناطق مشاهده می‌شود. این مناطق که در حقیقت بخش 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 ۴. نقشه عامل طول و درجه شیب حوضه حاجی‌قوشان

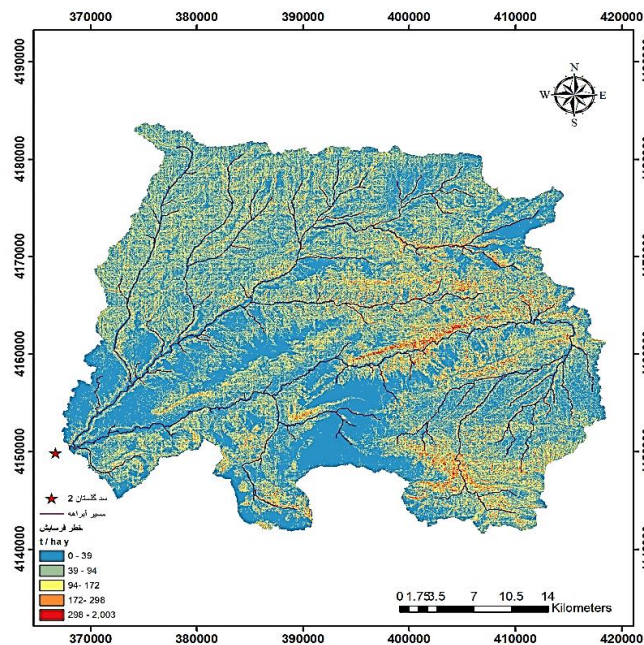


شکل ۵. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) حوضه حاجی قوشان



شکل ۶. تصاویری از وضعیت پوشش گیاهی حوضه حاجی قوشان

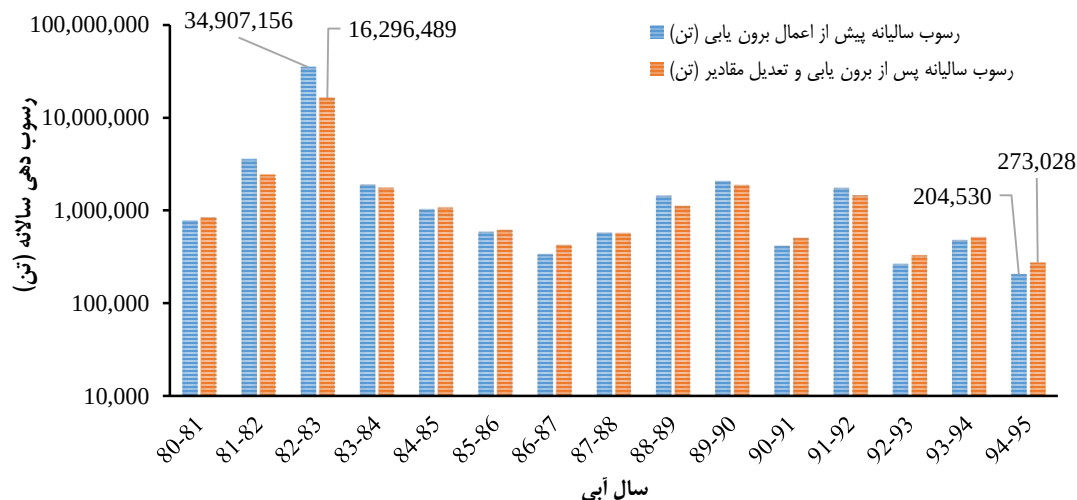
بر مبنای لایه‌های اطلاعاتی و بر اساس *RUSLE*، خطر فرسایش خاک در سطح حوضه با متوسط حدود ۶۱ از صفر تا ۲۰۳ تن بر هکتار در سال **برآورد** گردید (شکل ۷). در حدود ۹۴ درصد از مساحت حوضه، خطر فرسایش خاک کم‌تر از ۱۷۲ تن بر هکتار سال است و خطر فرسایش‌های خیلی بالا شامل نقاط محدودی از حوضه می‌باشد که مربوط به شیب‌های 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.**



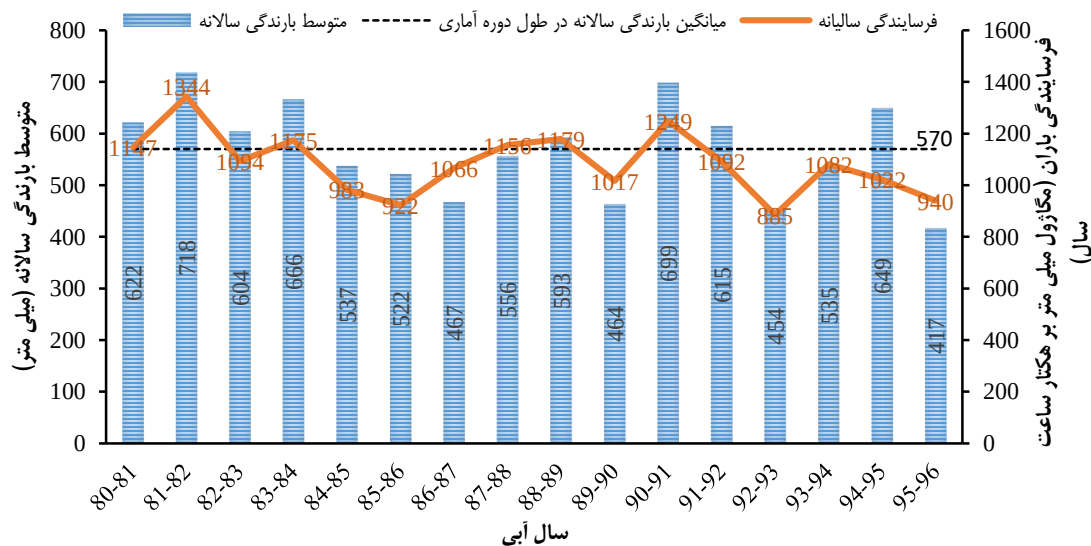
شکل ۷. نقشه خطر فرسایش خاک حوضه حاجی قوشان

رسوبدهی حوضه

در شکل ۸ مقادیر رسوبدهی سالانه حوضه حاجی قوشان بر مبنای منحنی‌های سنجه اولیه (رابطه ۸) و تعدیل شده (رابطه ۹) آمده است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که در صورت عدم تعدیل منحنی سنجه مقدار رسوبدهی در سال‌های با رخداد‌های شدید (سال ۱۳۸۲-۱۳۸۳) بسیار بالا (حدود ۳۵ میلیون تن) و در سال‌های کم باران، کمتر برآورد می‌شود. بر مبنای منحنی سنجه تعدیل شده، رسوبدهی سالانه حوضه از حدود ۲۷۰ هزار تن در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴، تا حدود ۱۶ میلیون تن در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ 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. به طور مشخص، رسوبدهی بالای سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ مربوط به وقوع سیلاب‌هایی در مردادماه با دبی‌های ۱۱۶ و ۲۲۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که به تنهایی 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 ۱۳۸۲-۱۳۸۳ و ۱۳۹۴-۱۳۹۵ می‌باشد. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر متوسط سالانه فرساینده‌گی، به ترتیب مربوط به سال‌های آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ و ۱۳۹۳-۱۳۹۴ می‌باشد.



شکل ۸. مقایسه مقادیر نهایی رسوبدهی سالانه حوضه با دو منحنی سنج رسوب حد وسط اولیه و تعدیل شده



شکل ۹. متوسط بارندگی سالانه و فرسایش باران سالانه حوضه حاجی فرشان

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 حوضه ترسیب یافته و از حوضه 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 حوضه 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 تمر حوضه حاجی‌قوشان

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

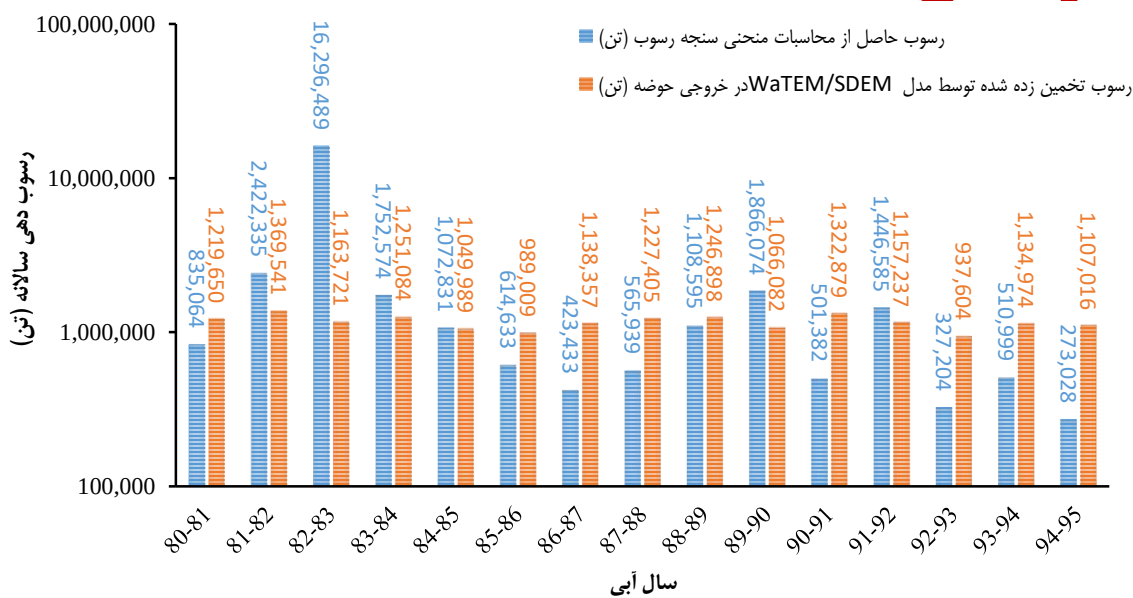
* معیار ثبت رخداد سیل، هرگونه تغییر نسبتاً شدید در فرائد دبی می‌باشد. (آب منطقه‌ای استان گلستان)

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 (E_{NS}) و جذر میانگین مربعات خطایی (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.

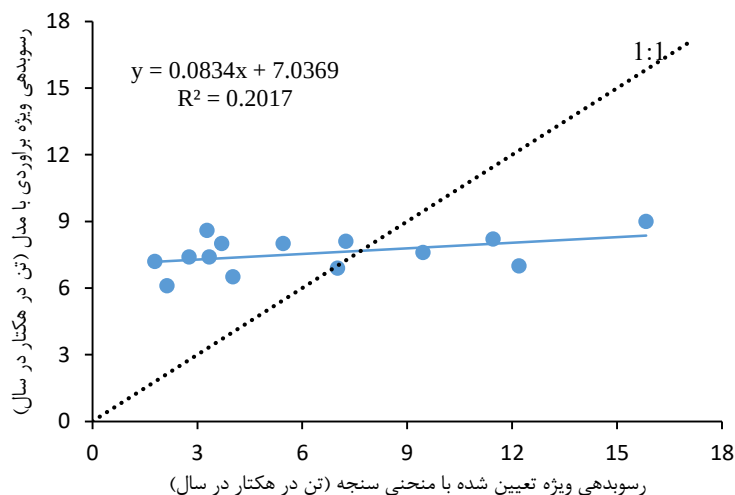
جدول ۴. نتایج خروجی مدل WaTEM/SEDEM برای حوضه حاجی‌قوشان

سال آبی	متوسط فرسایش ناخالص حوضه (تن بر هکتار)	رسوب خروجی از حوضه (مگا تن)	رسوب‌دهی معلق ویژه (تن بر هکتار)
۱۳۸۰-۱۳۸۱	۱۰۵/۳	۱/۲۱۹	۸
۱۳۸۱-۱۳۸۲	۱۱۸/۸	۱/۳۶۹	۹
۱۳۸۲-۱۳۸۳	۱۰۰	۱/۱۶۳	۷/۶
۱۳۸۴-۱۳۸۵	۱۰۷/۷	۱/۲۵۱	۸/۲
۱۳۸۴-۱۳۸۵	۹۰/۴	۱/۰۴۹	۶/۹
۱۳۸۵-۱۳۸۶	۸۵/۲	۰/۹۸۹	۶/۵
۱۳۸۶-۱۳۸۷	۹۸/۴	۱/۱۳۸	۷/۴
۱۳۸۷-۱۳۸۸	۱۰۶	۱/۲۲۷	۸

۸/۱	۱/۲۴۶	۱۰۸/۱	۱۳۸۸-۱۳۸۹
۷	۱/۰۶۶	۹۲/۴	۱۳۸۹-۱۳۹۰
۸/۶	۱/۳۲۳	۱۱۴/۴	۱۳۹۰-۱۳۹۱
۷/۶	۱/۱۵۷	۱۰۰/۲	۱۳۹۱-۱۳۹۲
۶/۱	۰/۹۳۸	۸۱	۱۳۹۲-۱۳۹۳
۷/۴	۱/۱۳۵	۹۸/۸	۱۳۹۳-۱۳۹۴
۷/۲	۱/۱۰۷	۹۵/۸	۱۳۹۴-۱۳۹۵
۷/۶	۱/۱۵۹	۱۰۰/۲	متوسط



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



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر رسوبدهی حاصل از مدل WaTEM/SEDEM و رسوبدهی تعیین شده با روش منحنی سنج رسوب (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 پژوهش‌های 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 حدود 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 کوچک 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 (۰/۰۴۳ تا ۰/۰۴۴ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر) به‌دست 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، قره‌سو 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 ۰/۰۰۳ تا

۰/۹۸ شده است. در همین راستا، عابدیان و همکاران (۲۰۱۸) مقادیر عامل C را در حوضه گرگان رود استان گلستان از ۰/۰۰۴ 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 پنج گانه **RUSLE** (R، K، LS و C) که همگی بیانگر تنوع عوامل موثر بر فرسایش خاک در حوضه حاجی قوشان 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). به طور 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, 2024; Didi et al., 2025) منجر به مقادیر عددی بزرگ می‌شود. به عنوان 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 و 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 کالاس‌بندی کیفی فرسایش خاک و اولویت‌بندی برای حفاظت خاک (e.g. Li et al., 2024) استفاده کنند. دوم، مقادیر برآوردی بیش از حد (به عنوان 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 نمودراف 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 به عنوان متوسط بلندمدت فرسایش آبی در بهمن 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 بیش برآوردی 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 نمودراف 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 حاجی قوشان، 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 نمودراف 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. به عنوان مثال، تحلیل داده‌ها نشان داد که ۸۰ درصد از رسوبدهی سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ 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 فرساینده‌گی (شکل ۹) با مقادیر رسوبدهی سالانه (شکل ۸) در حوضه حاجی‌قوشان نیز نشان می‌دهد که الزاماً سال آبی با حداکثر فرساینده‌گی باران، منطبق بر سال با 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 منشأیابی 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 می‌باشد. 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). به‌طورکلی، 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 آنها است. ارزیابی USLE (Risse et al., 1993) و 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 $۰/۰۳$ 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 ۶/۱ 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 برآورد شده 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 فرسایش‌دگی 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 مؤثر 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 فرسایش‌دگی باران با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (نمونه موردی: استان گلستان). *جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای*، ۱۲(۴۲): ۱۰۱-۱۲۸.
- آویژگان، ایوب؛ اسدی، حسین؛ عرب‌خدیری، 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، فرهاد (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): ۴۱۱-۴۳۳.
- 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 شنا سایی، مدیریت و بهره‌برداری*. ویراستاران مومنی، عزیز؛ بنایی، محمد حسن؛ ملکوتی، محمد جعفر و بای‌بوردی، محمد. چاپ اول. تهران: انتشارات موسسه تحقیقات خاک.
- عرب‌خدیری، 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.
- عرب‌خدیری، 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.

ع سکریان 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 گو شه، 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., Vazifedoust, 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.
- Bezák, N., Borrelli, P., Mikoš, M., Auflí, 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. R. 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., Woomer, P.L. (2003). Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS based 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 soil erosion. *Soil Use Manag.* 17, 385–394.
- 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.

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

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 ton h MJ⁻¹ 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.

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