



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در مقیاس حوزه آبخیز (به وسعت ۱/۴۶ میلیون

هکتار) با استفاده از مدل RUSLE

میثم صمدی^{۱*}، زینب عسکریان چایجان^۲، امیر پیام مسلم^۳، علیرضا سروری نژاد^۴

۱- دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه منابع طبیعی و آبخیزداری شرکت مهندسی مشاور ایده پردازان توسعه، تهران؛

* (Meisamadi68@gmail.com)

۲- دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۳- کارشناسی مرتع و آبخیزداری، مدیر گروه منابع طبیعی و آبخیزداری شرکت مهندسی مشاور ایده پردازان توسعه، تهران

۴- دکتری فیزیک و حفاظت خاک، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان سیستان و بلوچستان، زاهدان

چکیده

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تخریب منابع طبیعی در مناطق خشک ایران به‌شمار می‌رود. این پژوهش با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز جالق و تهاباب به وسعت ۱'۴۶۰'۰۰۰ هکتار در استان سیستان و بلوچستان انجام شد. به‌منظور برآورد میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش سطحی، از مدل RUSLE در محیط GIS استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که نرخ هدررفت سالیانه خاک در سطح منطقه از کمتر از ۱ تا بیش از ۵۷ تن در هکتار در سال متغیر بوده و میانگین آن ۶/۸۳ تن در هکتار در سال برآورد شد. همچنین تحلیل مکانی فرسایش نشان داد حدود ۳۱ درصد از سطح حوضه در کلاس‌های فرسایش شدید تا بسیار شدید قرار دارد. این نواحی عمدتاً با شیب زیاد، پوشش گیاهی ضعیف و بهره‌برداری ناپایدار از اراضی همراه هستند. نبود اقدامات حفاظتی نیز در تشدید فرسایش نقش مؤثری داشته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استفاده از مدل RUSLE در حوزه‌های آبخیز بزرگ به‌عنوان مدلی در مقیاس دامنه می‌تواند ابزاری مؤثر در شناسایی مناطق بحرانی و تصمیم‌سازی مدیریتی برای حفاظت خاک در حوزه‌های آبخیز خشک و نیمه‌خشک باشد.

واژگان کلیدی: آبخیزداری، تحلیل مکانی GIS، فرسایش خاک، مدل RUSLE

مقدمه

فرسایش خاک یکی از چالش‌های محیط‌زیستی جهانی است که به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل پراکندگی بارش، پوشش گیاهی ضعیف، شیب‌های تند و خاک‌های کم‌عمق، منجر به کاهش حاصلخیزی، رسوب‌گذاری در منابع آبی و تهدید امنیت غذایی می‌شود (Attoubounou et al., 2025). به‌منظور پاسخ به این چالش، مدل‌های تجربی مانند RUSLE با تلفیق داده‌های بارندگی (R)، ویژگی‌های خاک (K)، شیب و طول دامنه (LS)، پوشش و مدیریت اراضی (C)، و اقدامات حفاظتی (P)، همراه با فناوری تحلیل مکانی GIS، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی کمی فرسایش و پهنه‌بندی خطر آن مطرح شده است (Ganasri and Ramesh, 2016; Alemu et al., 2025). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از RUSLE در حوضه‌هایی با وسعت بیش از یک میلیون هکتار قابل اعتماد و موثر است، به‌عنوان مثال، Alemu و همکاران (2025) میانگین ۴۳ تن در هکتار در سال در حوضه Abaya-Chamo اتیوپی ثبت کرده‌اند؛ و Attoubounou و همکاران (2025) در حوضه Mekrou در آفریقا متوسط ۶/۴۹ تن در هکتار در سال را نشان دادند. در داخل کشور نیز مطالعات جامع در برآورد هدررفت خاک ناشی از فرسایش سطحی با این دقت مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، اما Mohammadi و همکاران، (2021)،

متوسط فرسایش سالانه خاک در ایران را ۱۶/۵ تن بر هکتار در سال برآورد کردند. پژوهش حاضر، با تمرکز بر ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در یک حوزه آبخیز وسیع به وسعت ۱/۴۶ میلیون هکتار در سیستان و بلوچستان، سعی در پر کردن این خلأ دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز جالق و تهلاب با مساحتی بالغ بر ۱'۴۰۰'۰۰۰ هکتار، در استان سیستان و بلوچستان و در محدوده شهرستان‌های خاش، گلشن، سراوان، میرجاوه، تفتان و سیب و سوران و از نظر موقعیت جغرافیایی بین " ۴۹'۱۳" ۶۲° تا " ۱۲' ۵۸" ۶۰° طول شرقی و " ۲۲' ۴۸" ۲۷° تا " ۴۵' ۱۰" ۲۸° عرض شمالی واقع شده است. این حوضه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک، بارندگی سالیانه کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر است.

روش مدل‌سازی فرسایش

به منظور مدل‌سازی فرسایش و برآورد نرخ هدررفت از مدل RUSLE استفاده شد. این مدل توسعه‌ای از مدل USLE است که نخستین بار در دهه ۱۹۶۰ توسط وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) برای برآورد نرخ سالانه هدررفت خاک معرفی شد. مدل RUSLE در دهه ۹۰ توسط رنارد و همکاران بازنگری و توسعه یافت. معادله اصلی این مدل به صورت زیر است:

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

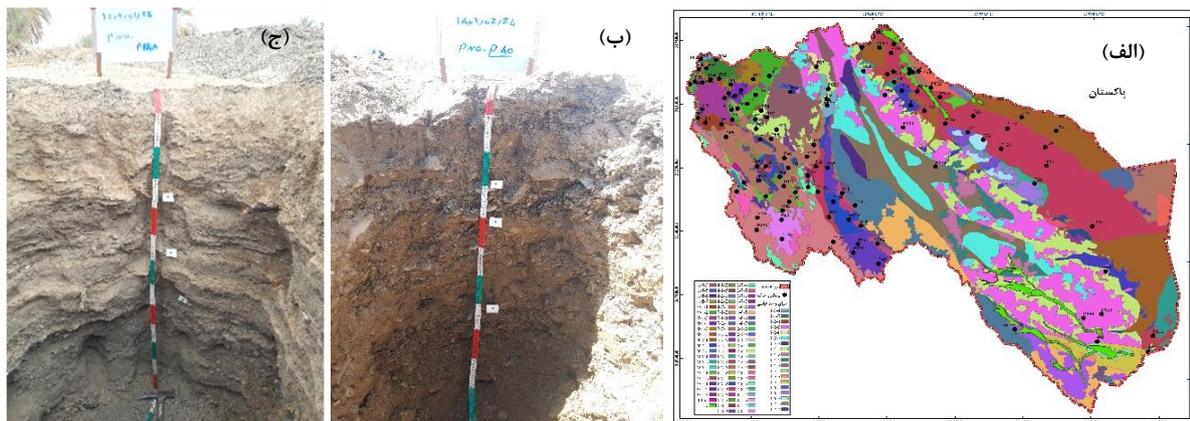
در این معادله A: میزان هدررفت خاک سالانه به تن در هکتار در سال (Renard, 1997)، R: عامل فرسایش باران که نمایانگر شدت و میزان بارندگی است که به طور مستقیم بر میزان فرسایش تأثیر می‌گذارد (Renard and Freimund, 1994). برای برآورد فرسایش باران از آمار بارندگی ایستگاه‌های جالق، تهلاب، ناهوک و کوشه-خاش استفاده شد. عامل فرسایش بر حسب مگژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$) از رابطه رینارد و فریموند (Renard and Freimund, 1994) برآورد شد:

$$R - \text{Factor} = 0.07397MF^{1.847} \quad (2)$$

که در آن، MF شاخص فورنیه اصلاح شده است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$MF = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \quad (3)$$

که در آن، P_i بارش ماهانه و P متوسط بارندگی در دوره‌ی آماری می‌باشد. (K): عامل فرسایش‌پذیری خاک است. به منظور تهیه نقشه K از نقشه اجزاء واحد اراضی و پروفیل‌های خاک شناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. براساس مشخصات خاک منطقه و وسعت آن، تعداد ۸۹ اجزاء واحد اراضی اصلی خاک و اجزاء واحد اراضی فرعی برای کل منطقه، شناسایی شد (شکل ۱-الف). در نهایت با استفاده از روش ویشمایر اسمیت، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک برآورد و نقشه آن تهیه شد.



شکل ۱- الف: نقشه اجزای واحد اراضی و محل حفر پروفیل‌های خاکشناسی، ب و ج: تصاویری از پروفیل‌های حفر شده

(LS): عامل توپوگرافی که ترکیبی از طول و درجه شیب زمین است که هر دو به افزایش سرعت جریان رواناب و در نتیجه فرسایش بیش‌تر منجر می‌شوند. مدل RUSLE روش‌های پیشرفته‌ای برای محاسبه این عوامل ارائه کرده است که شرایط

مختلف توپوگرافی را پوشش می‌دهد (Wischmeier and Smith, 1978). در تحقیق حاضر به منظور تهیه نقشه LS، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) از سایت ALOSPALSAR و تبدیل به دقت ۲۰ متر استفاده شده و نقشه LS در محیط نرم افزار SAGA GIS تهیه شد. (C): عامل پوشش و مدیریت زمین که تأثیر نوع پوشش گیاهی و شیوه‌های مدیریتی زمین بر فرسایش را توصیف می‌کند. پوشش گیاهی متراکم می‌تواند با کاهش سرعت رواناب، فرسایش را به شدت کاهش دهد (USDA, 2020). این فاکتور مقادیری بین ۰ (حداکثر حفاظت) تا ۱ (حداقل حفاظت یا سطح بدون پوشش) دارد و به‌طور گسترده در مطالعات ارزیابی فرسایش خاک استفاده می‌شود (Renard et al., 1997). به منظور برآورد فاکتور C، از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) استفاده شد. شاخص NDVI یک ابزار سنجش از دور است که رابطه مستقیمی با تراکم پوشش گیاهی دارد و از بازتاب طیفی در طول موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک با استفاده از تصاویر Landsat7-8 و دقت ۳۰ متر به دست می‌آید (Rouse et al., 1974). فرمول NDVI به صورت زیر است:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (4)$$

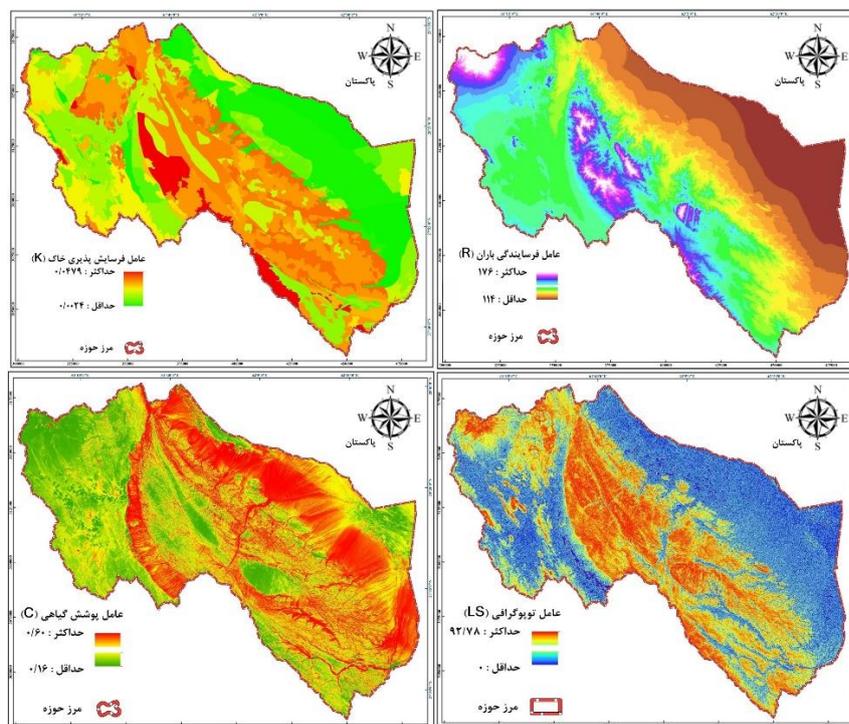
در این معادله، NIR بازتاب در طول موج مادون قرمز نزدیک و RED بازتاب در طول موج قرمز است. با استفاده از NDVI، فاکتور C معمولاً از طریق روابط تجربی استخراج می‌شود. یکی از معادلات رایج برای این کار به صورت زیر است:

$$C = ((1 - NDVI) / 2) \quad (5)$$

(P): عامل اقدامات حفاظتی که این عامل به تأثیر اقداماتی نظیر کشت در خطوط تراز، احداث تراس‌ها و استفاده از پوشش‌های گیاهی به عنوان مانعی در برابر رواناب اشاره دارد. این اقدامات می‌توانند به طور قابل توجهی از میزان فرسایش جلوگیری کنند (Benavidez et al., 2018). با توجه به اینکه اقدامات حفاظتی در حوضه مورد مطالعه صورت نپذیرفته است مقدار P برابر با یک در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل RUSLE نشان داد که نرخ هدررفت خاک در سطح حوزه آبخیز مورد مطالعه دارای تنوع قابل توجهی است و تحت تأثیر ترکیب عوامل مختلف از جمله بارندگی، فرسایش پذیری خاک، شیب و طول دامنه، پوشش گیاهی و نبود اقدامات حفاظتی قرار دارد. نقشه‌های مکانی هر یک از عوامل مدل (شکل ۲) به روشنی توزیع فضایی مقادیر مختلف را در سطح حوضه نشان می‌دهند.



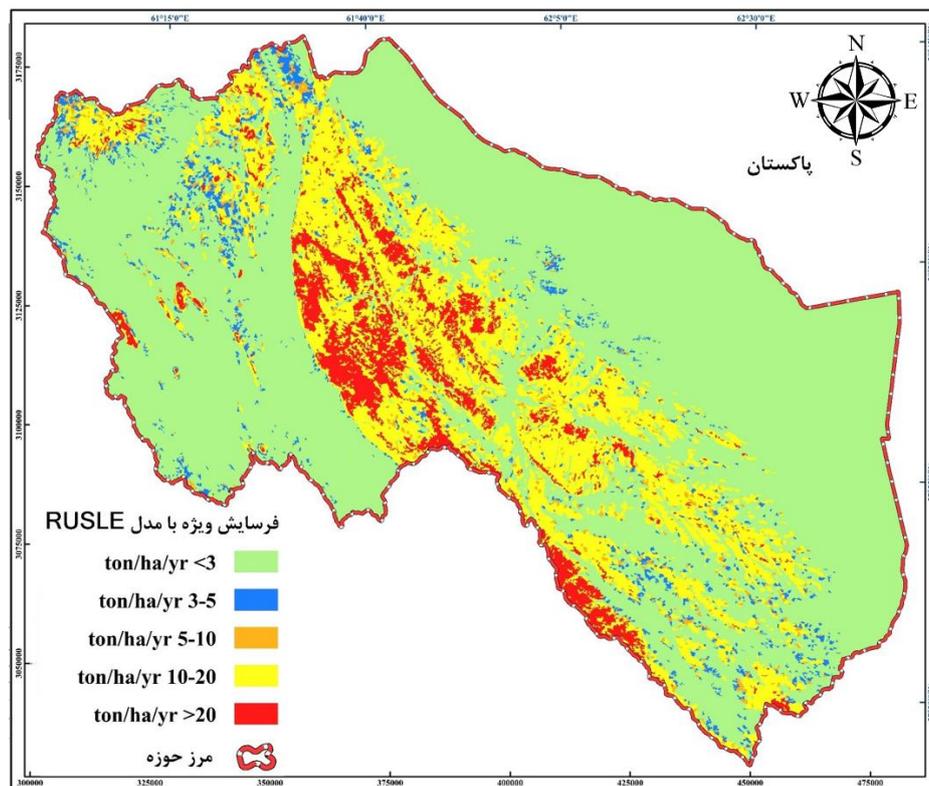
شکل ۲- نقشه‌های مکانی عوامل ورودی مدل RUSLE

بر اساس جدول (۱)، عامل توپوگرافی (LS) با دامنه تغییرات ۹۲/۷۸ نقش مهمی در تشدید فرسایش در مناطق مرتفع و شیب‌دار ایفا کرده است. عامل بارندگی (R) نیز در محدوده‌ای قابل توجه از حوضه متغیر بوده و به‌ویژه در شرق حوضه تأثیرگذار بوده است. عامل پوشش گیاهی (C) نیز بیانگر تراکم پایین پوشش گیاهی و کمبود حفاظت طبیعی در سطح حوضه است. از آنجا که هیچ‌گونه اقدام حفاظتی مؤثری در منطقه گزارش نشده، عامل مدیریتی P در کل سطح حوضه برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مقادیر آماری امتیازات عوامل مدل RUSLE و فرسایش ویژه

RKLSCP		عامل	حداقل	حداکثر	دامنه تغییرات	انحراف معیار	میانگین عوامل پارامترهای مدل RUSLE	هدررفت خاک (تن در هکتار در سال)
۶/۸۳	R	۱۱۴/۰۰	۱۷۶/۰۰	۶۲/۰۰	۹/۳۷	۱۲۷/۲۱		
	K	۰/۰۰۲	۰/۰۴۸	۰/۰۴۶	۰/۰۱۱	۰/۰۲۴		
	LS	۰/۰۰	۹۲/۷۸	۹۲/۷۸	۳/۵۶	۲/۵۶		
	C	۰/۱۶	۰/۶۰	۰/۴۴	۰/۰۱	۰/۴۷		
	P	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰		

نتایج حاصل از مدل RUSLE و تحلیل‌های مکانی GIS در سطح حوزه آبخیز مورد مطالعه نشان داد که نرخ برآوردی هدررفت سالیانه خاک در این منطقه بین کمتر از ۱ تا بیش از ۵۷ تن در هکتار در سال متغیر است و میانگین آن برابر با ۶/۸۳ تن در هکتار در سال برآورد شد. این تنوع گسترده در نرخ هدررفت خاک، بازتابی از اثر ترکیبی عوامل مختلف مدل است؛ به‌ویژه عامل توپوگرافی بوده که نقش برجسته‌ای در تشدید فرسایش در نواحی کوهستانی و پرشیب داشته است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش، بیش از ۳۱ درصد از سطح حوضه در کلاس‌های خطر فرسایش بیش از ۱۰ تن در هکتار در سال و حدود ۹ درصد در کلاس بسیار شدید (بیش از ۲۰ تن در هکتار در سال) قرار دارند. این وضعیت به‌ویژه در نواحی مرکزی، جنوب‌شرقی و غرب حوضه مشهود است؛ مناطقی که شیب تند، پوشش ضعیف و بهره‌برداری ناپایدار در آن‌ها غالب است. این یافته‌ها با توزیع مکانی متغیرهای مدل نیز هم‌راستا هستند.



شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی فرسایش آبی با مدل RUSLE

جدول ۲- توزیع مساحت (هکتار) و درصد کلاس‌های فرسایش حوضه

جمع	کلاس های فرسایش					مساحت
	۲۰ < ton/ha/yr.	۱۰-۲۰ ton/ha/yr.	۵-۱۰ ton/ha/yr.	۳-۵ ton/ha/yr.	۳ > ton/ha/yr.	
۱۴۶۱۷۱۹/۴۸	۹۰۵۸۸/۹۷	۳۰۶۱۳۲/۶۹	۲۳۴۵۵/۵۸	۴۷۰۱۰/۵۹	۹۹۴۵۳۱/۶۵	
۱۰۰	۶/۲	۲۱	۱/۶	۳/۲	۶۸	درصد

در مقایسه با مطالعات مشابه انجام شده در حوزه‌های با وسعت بیش از یک میلیون هکتار، یافته‌های این پژوهش از دقت و واقع‌بینی برخوردار است. برای نمونه Alemu و همکاران (2025) در مطالعه‌ای در حوضه Abaya-Chamo در اتیوپی، با وسعتی در همین حدود، میانگین نرخ فرسایش را حدود ۴۳ تن در هکتار در سال گزارش کردند و عوامل اصلی مؤثر در آن را شیب بالا، خاک‌های سبک و پوشش گیاهی ضعیف برشمردند. در پژوهش دیگری در حوضه Ziway در اتیوپی، میانگین نرخ فرسایش ۴۳ تن در هکتار در سال به دست آمد که آن نیز به‌ویژه در اراضی زراعی بدون پوشش و حاشیه دریاچه‌ها بیشتر بود (Moges and Bhat, 2018). اگرچه میانگین فرسایش سالیانه در حوضه مورد مطالعه نسبت به برخی از حوضه‌های بزرگ‌مقیاس در آسیا و آفریقا پایین‌تر است، اما وجود واحدهایی با نرخ فرسایش بسیار بالا، در کنار وسعت زیاد منطقه و ناهمگونی شدید محیطی، این حوضه را در زمره مناطق مستعد خطر فرسایش قرار داده است. همچنین با توجه به اینکه میانگین کشوری فرسایش در ایران حدود ۱۶/۵ تن در هکتار در سال گزارش شده است (Mohammadi و همکاران، 2021)، مقدار ۶/۸۳ تن در هکتار در سال در این تحقیق اگرچه پایین‌تر است، اما با در نظر گرفتن پراکندگی زیاد، مساحت تحت فرسایش شدید و نبود اقدامات مدیریتی، همچنان تهدیدی جدی برای منابع خاک محسوب می‌شود. در مجموع، این مطالعه نشان داد که مدل RUSLE در ترکیب با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، ابزاری مناسب برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در مقیاس‌های بزرگ‌مقیاس است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد اگرچه میانگین فرسایش سالیانه در مقیاسه با برخی مطالعات انجام شده در حوضه‌های هم‌وسعت در سایر کشورها پایین‌تر است، اما وجود نواحی قابل‌توجهی با نرخ‌های بسیار بالا، این حوضه را در زمره مناطق نیازمند مداخله فوری قرار می‌دهد. مدل RUSLE در این مقیاس عملکرد قابل قبولی در شناسایی نواحی پرخطر از خود نشان داد و امکان اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها برای اقدامات مدیریتی را فراهم ساخت. بر اساس این ارزیابی، لازم است برنامه‌های حفاظتی در این منطقه به‌گونه‌ای طراحی شود که هم از گسترش نواحی بحرانی جلوگیری کرده و هم ظرفیت‌های حفاظتی طبیعی آن تقویت شود. بدین منظور، پیشنهاد می‌شود:

- مناطق دارای فرسایش شدید و بسیار شدید در اولویت اجرای اقدامات آبخیزداری مکانیکی و بیولوژیکی قرار گیرند؛
 - پوشش گیاهی طبیعی در مناطق مرتعی تقویت شود و برای اراضی زراعی شیب‌دار، کشت حفاظتی جایگزین روش‌های رایج شود؛
 - از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش به‌عنوان ابزار تصمیم‌سازی در سطح منطقه‌ای بهره گرفته شود و در تدوین طرح‌های مدیریت منابع طبیعی و کشاورزی لحاظ شود؛
- در مجموع، نتایج این تحقیق نشان داد که تحلیل مکانی فرسایش با بهره‌گیری از مدل RUSLE در مقیاس بزرگ، رویکردی مؤثر و کاربردی برای مدیریت پایدار منابع خاک و آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود.

فهرست منابع

Alemu, M. D., Laekemariam, F., Belay, S., Van Tol, J., & Mengistu, A. G. (2025). Modeling soil erosion for sustainable landscape management using RUSLE in the landscapes of Abaya-Chamo Sub-Basin, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(3), 171.

- Attoubounou, R. A., Diawara, H., Ludwig, R., & Adoukpe, J. (2025). Quantification of Soil–Water Erosion Using the RUSLE Method in the Mékrou Watershed (Middle Niger River). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(1), 28.
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., and Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 6059–6086.
- Moges, D. M., Bhat, H. G. (2018). An insight into land use and land cover changes and their impacts in Rib watershed, north-western highland Ethiopia. *Land degradation & development*, 29(10), 3317-3330.
- Mohammadi, S., Balouei, F., Haji, K., Khaledi Darvishan, A., & Karydas, C. G. (2021). Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran using the G2 model. *International Journal of Digital Earth*, 14(8), 1019–1039. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1919230>
- Renard, K. G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 287-306.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. The Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. 309-317.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2020). Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Handbook. Natural Resources Conservation Service (NRCS).
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Assessment and Zoning of Soil erosion risk in the watershed scale (1.46 Million Hectares) Using the RUSLE Model

Meisam Samadi^{1*}, Zeinab Askarian-chaijan², AmirPayam Moslem³, Alireza Sarvarenezhad⁴

1-Ph.D. in Watershed Management Science and Engineering, Department of Natural Resources and Watershed Management, Ideh Pardazan Tosseah Consulting Engineering Company, Tehran, Iran

(Meisamadi68@gmail.com)

2- Ph.D. Candidate in Soil Physics and Conservation, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

3- B.Sc. in Rangeland and Watershed Management, Head of the Department of Natural Resources and Watershed Management, Ideh Pardazan Tosseah Consulting Engineering Company, Tehran, Iran

4- Ph.D. in Soil Physics and Conservation, General Office of Natural Resources and Watershed Management, Sistan and Baluchestan Province, Zahedan, Iran

Abstract

Soil erosion is one of the most critical processes contributing to the degradation of natural resources in arid regions of Iran. This study aimed to assess and map soil erosion risk in the Jaalq and Tahlab watershed, covering an area of 1,460,000 hectares in Sistan and Baluchestan Province. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model was applied within a GIS environment to estimate the annual soil loss rate due to surface erosion. The results indicated that the annual soil erosion in the study area ranged from less than 1 to more than 57 tons per hectare, with an average of 6.83 tons per hectare per year. Also, spatial analysis revealed that approximately 31% of the watershed area falls into severe to very severe erosion classes. These areas are mainly characterized by steep slopes, poor vegetation cover, and unsustainable land use practices. The absence of conservation measures has also played a significant role in exacerbating soil erosion. The findings suggest that applying the RUSLE model at large watersheds as a domain-scale model can be an effective tool for identifying critical zones and supporting management decisions aimed at soil conservation in arid and semi-arid regions.

Keywords: Watershed Management, GIS, Soil erosion, RUSLE model.