

The Role of Environmental Factors in the Susceptibility of Rangeland Soils of West Azerbaijan Province to Water Erosion

Siavash Babaei¹, Habib Nazarnejad^{2*}, Farrokh Asadzadeh³, Esmail Sheidai Karkaj⁴

(Received: December, 2024

Accepted: June, 2025)

Abstract

Soil erodibility is influenced by environmental and management factors and serves as a critical quantitative and qualitative indicator for estimating soil loss potential. This parameter is essential for planning soil conservation strategies and prioritizing protective measures. This study aimed to identify the direct and indirect environmental variables affecting the soil erodibility index (K) in sub-watersheds of West Azerbaijan Province. A total of 131 soil samples were collected from representative rangeland sites across the province, with adequate spatial distribution, from the surface layer (0–20 cm). Soil properties, including sand, silt, clay, organic carbon, lime content, saturated moisture, pH, and electrical conductivity, were measured in the laboratory. Additionally, soil permeability class and structure were determined. Topographic characteristics, such as slope gradient, slope aspect, and elevation of sampling points, were recorded using a clinometer, azimuth meter, and Global Positioning System (GPS). Maps of temperature and precipitation distribution were generated using the Inverse Distance Weighting (IDW) method in ArcGIS 10.3.1, and corresponding values for sampling points were extracted. The soil erodibility factor (K) was calculated using the equation proposed by Wischmeier and Smith. Stepwise regression analysis was used to examine the relationship between the soil erodibility factor (K) and environmental variables. Regression coefficients and steps were determined for environmental parameters, and the statistical significance of the regression model was assessed through analysis of variance (ANOVA) across four steps. Correlation coefficients for vegetation cover, precipitation, slope, and elevation with the soil erodibility factor (K) were calculated at each step. ANOVA results indicated that the model was significant at the 1% level, confirming its reliability. The student's t-test was used to determine the constant and variable coefficients of the models. Standardized coefficients for vegetation cover, precipitation, slope, and elevation were -0.231, -0.203, 0.194, and -0.187, respectively. Vegetation cover showed the highest correlation ($R = 0.320$), while elevation showed the lowest correlation ($R = 0.469$) with the soil erodibility factor (K). The spatial distribution of the K factor was mapped using geostatistical techniques, with the IDW method selected due to its lowest Root Mean Square Error (RMSE). The K factor map indicated the highest erodibility in the northern regions of the province, corresponding to areas with excessive livestock grazing and reduced vegetation cover due to overgrazing.

Key words: Soil erosion, erodibility index, Soil conservation, Stepwise regression, geostatistics

Babaei S., Nazarnejad H., Asadzadeh F., Sheidai Karkaj E. 2026. The role of environmental factors in the susceptibility of rangeland soils in West Azerbaijan Province to water erosion. *Applied Soil Research*. 12(3): 36-48.

1. Ph.D. Candidate of Watershed Management, Range & Watershed Management Department, Urmia University, Urmia, Iran

2. Associate professor, Watershed Management Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3. professor, Soil department, Urmia University, Urmia, Iran

4. Associate professor, Range & Watershed Management Department, Urmia University, Urmia, Iran

* Corresponding Author Email: h.nazarnejad@gau.ac.ir

نقش عوامل محیطی در حساسیت خاک های مرتعی استان آذربایجان غربی به فرسایش آبی

سیاوش بابایی^۱، حبیب نظرنژاد^{۲*}، فرخ اسدزاده^۳، اسماعیل شیدای کرکج^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

چکیده

فرسایش پذیری خاک تحت تأثیر عوامل محیطی و مدیریتی قرار داشته و از نظر کمی و کیفی به عنوان یک شاخص کلیدی برای تخمین پتانسیل تلفات خاک مطرح است. این پارامتر برای برنامه ریزی در جهت اجرای حفاظت خاک و نیز اولویت بندی اقدامات حفاظتی خاک ضروری است. این مطالعه به منظور تعیین متغیرهای تأثیرگذار مستقیم و غیرمستقیم محیطی بر شاخص فرسایش پذیری (K) در زیرحوضه های استان آذربایجان غربی انجام گرفت. برای این منظور ۱۳۱ نمونه خاک از سایت های معرف مرتعی در استان آذربایجان غربی با پراکنش مناسب از لایه سطحی (صفر تا ۲۰ سانتی متر) برداشت شد. مقادیر شن، سیلت، رس، کربن آلی، آهک، رطوبت اشباع، اسیدیته و هدایت الکتریکی در آزمایشگاه اندازه گیری و طبقه نمود پذیرش و ساختمان نمونه ها مشخص شد. خصوصیات توپوگرافیکی دامنه شامل شیب، جهت شیب دامنه و ارتفاع نقاط نمونه برداری با استفاده از ابزارهای شیب سنج، آزیموت سنج و سامانه موقعیت یاب جغرافیایی (GPS) ثبت شد. نقشه پهنه بندی دما و بارش استان با روش IDW در نرم افزار ArcGIS 10.3.1 تهیه و مقادیر دما و بارش مربوط به نقاط نمونه برداری از این نقشه ها به دست آمد. برای برآورد عامل فرسایش پذیری خاک از رابطه ارائه شده توسط ویشمایر و اسمیت استفاده شد. در مرحله بعد، برای بررسی رابطه ضریب فرسایش پذیری خاک (K) با عوامل محیطی از روش رگرسیون گام به گام استفاده شد. پس از تعیین ضرایب و گام های رگرسیونی (مراحل مختلف رگرسیون) برای پارامترهای محیطی، مقادیر معنی داری رگرسیون توسط آزمون آماری تجزیه واریانس در چهار گام بررسی شد و مقادیر همبستگی هر یک از پارامترهای پوشش گیاهی، بارندگی، شیب و ارتفاع با عامل فرسایش پذیری خاک (K) در هر مرحله مشخص شد. نتایج آزمون تجزیه واریانس نشان داد مدل دارای معنی داری در سطح یک درصد بوده و به عبارتی مدلی قابل اطمینان می باشد. پس از تعیین وضعیت همبستگی هر یک از پارامترها برای تعیین ضرایب ثابت و متغیر مدل ها از آزمون تی استیودنت استفاده شد. با توجه به مقادیر ضرایب استاندارد متغیرهای پوشش گیاهی، بارندگی، شیب و ارتفاع در مدل به ترتیب برابر با ۰/۲۳۱، ۰/۲۰۳، ۰/۱۹۴ و ۰/۱۸۷- بودند. مشخص شد متغیر پوشش گیاهی با ضریب همبستگی (R=0.320) و متغیر ارتفاع با ضریب همبستگی (R=0.469) به ترتیب بیشترین و کمترین اثرگذاری را بر روی شاخص فرسایش پذیری خاک (K) دارند. به منظور نشان دادن پراکنش مکانی فاکتور K از تکنیک زمین آمار و از روش IDW به دلیل داشتن کمترین RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) استفاده شد. بیشترین مقدار ضریب فرسایش خاک در شمال استان است که با تعداد دام بیش از حد مجاز در این مناطق و کاهش پوشش گیاهی در اثر چرای بی رویه منطبق می باشد.

واژه های کلیدی: فرسایش خاک، شاخص فرسایش پذیری، حفاظت خاک، رگرسیون گام به گام، زمین آمار

بابایی س.، نظرنژاد ح.، اسدزاده ف.، شیدای کرکج ا. ۱۴۰۴. نقش عوامل محیطی در حساسیت خاک های مرتعی استان آذربایجان غربی به فرسایش آبی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۳. صفحه: ۴۸-۳۶.

- ۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 - ۲- دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
 - ۳- استاد، گروه خاک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 - ۴- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- * پست الکترونیک: h.nazamejad@gau.ac.ir

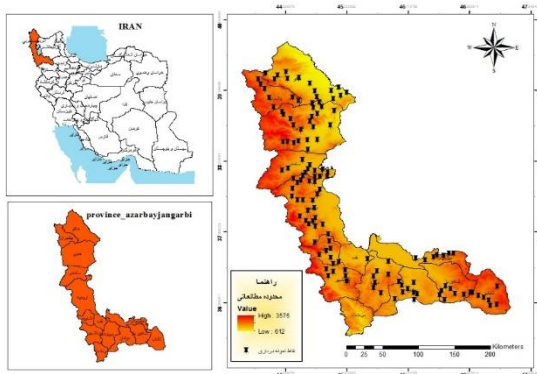
مقدمه

بنابراین باید شرایط مکانی و نیروهای فزاینده برای بررسی شاخص فرسایش پذیری خاک مورد توجه قرار گیرد (Liu *et al.*, 2011). ارزیابی توزیع مکانی عامل فرسایش پذیری خاک به سبب تعامل زیاد با متغیرهای آب و هوا، پوشش گیاهی و توپوگرافی و به دلیل تأثیرپذیری از ویژگی‌های ذاتی خاک اهمیت زیادی دارد. از میان عوامل اقلیمی می‌توان به بارش اشاره داشت که در حال حاضر وقوع خشکسالی در کشور و کاهش بارندگی، باعث کاهش پوشش گیاهی و بعضاً از بین رفتن پوشش گیاهی شده است. روند رو به رشد شخم اراضی در حوضه‌هایی که بیشترین کاربری کشاورزی را دارند باعث از بین رفتن خاک در اثر برخورد قطرات باران در مرحله اول و در مراحل بعدی در اثر ایجاد رواناب در منطقه باعث تشدید فرسایش می‌شود. توپوگرافی نیز به عنوان یکی از عوامل خاک‌سازی، در قالب جهت و موقعیت شیب بر ویژگی‌های فیزیکی خاک مؤثر است. تفاوت در فاکتورهای مؤثر بر تشکیل و تکامل خاک در طول یک شیب، رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Wang *et al.*, 2001). جهت شیب از طریق تأثیر بر رطوبت و دما و فعالیت ریزجانداران خاک، به افزایش یا کاهش ماده آلی خاک در جهت‌های مختلف شیب و ایجاد تفاوت در کیفیت خاک منجر می‌شود. درجات مختلف شیب نیز از طریق انتقال رس‌ها و ماده آلی به قسمت‌های پائین شیب و تغییر در جرم مخصوص ظاهری، کیفیت خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Yuan Jun & Mingan, 2008). همچنین بسیاری از خصوصیات خاک مانند درصد سنگریزه، ضخامت مؤثر خاکرخ و ظرفیت نگهداری آب به طور معنی‌داری وابسته به شیب هستند (Rengasamy *et al.*, 1984). یکی از مشکلات اصلی در اندازه‌گیری فرسایش پذیری خاک این است که این شاخص توسط تعدادی از عوامل خاک کنترل می‌شود که ممکن است در مکان و زمان بسیار متفاوت باشد (Chappell *et al.*, 2006). بنابراین، یک روش متداول برای بررسی فرسایش پذیری خاک، تهیه نقشه ویژگی‌های خاک بر اساس تعداد زیادی نمونه برداری سنتی از خاک و تجزیه و تحلیل خصوصیات شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی آن است، اما چنین تجزیه و تحلیل‌هایی نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی می‌باشند. در این میان استفاده از مدل‌های ریاضی برای تخمین فرسایش پذیری خاک گزینه‌های مناسبی هستند

خاک یکی از مهم‌ترین اجزای منابع طبیعی و فرسایش آن یکی از دلایل اصلی کاهش پتانسیل تولیدی اکوسیستم محسوب می‌شود (Amundson *et al.*, 2015). فرسایش ناشی از کنده شدن و جابجائی تدریجی خاکدانه‌ها و مواد موجود در سطح زمین در اثر عوامل مختلف چون آب، باد، یخچال، نیروی ثقل است. فرسایش خاک یک مشکل جدی محیطی، اجتماعی و اقتصادی است که نه تنها سبب تخریب شدید زمین و هدررفت خاک می‌شود، بلکه تهدید ثبات و سلامت جامعه و به‌طور کلی توسعه پایدار آن را در پی دارد (Kiani Harchegani *et al.*, 2019). فرسایش خاک به دلیل تخریب منابع زیست‌محیطی یکی از مسائل مهم و اصلی بازدارنده برای تحقق توسعه اقتصادی و اجتماعی است. همچنین عامل بازدارنده در دستیابی به امنیت غذایی در جهان می‌باشد. در بررسی عوامل فرسایش خاک، اساساً نمی‌توان عامل مشخص و معینی را به‌عنوان عامل اصلی فرسایش در یک منطقه معرفی کرد. فرسایش را باید معلول تأثیرات متقابل مجموعه عوامل و عناصر مؤثر در ایجاد آن دانست. عامل فرسایش پذیری خاک به عنوان یکی از پارامترهای اصلی و تأثیرگذار بر فرسایش، به پایداری و ایستادگی خاک در مقابل گسیختگی و انتقال ذرات گفته می‌شود (Bryan, 2000). فرسایش‌پذیری خاک یک نیاز ضروری برای تخمین مقدار فرسایش خاک و شاخصی بسیار مهم و ضروری در رابطه با اجرای عملیات اصلاحی می‌باشد (Ghosal & Das Bhattacharya, 2020). فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر متغیرهای محیطی و مدیریتی قرار داشته و از نظر کمی و کیفی به‌عنوان یک شاخص کلیدی برای تخمین پتانسیل تلفات خاک و در نتیجه برنامه‌ریزی برای اجرای حفاظت خاک و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی در مناطق مختلف است (Wang *et al.*, 2013). به‌طور کلی فرسایش‌پذیری خاک یک ویژگی اصلی از خصوصیات خاک است که حساسیت خاک نسبت به فرسایش را نشان می‌دهد و به عوامل مختلفی بستگی دارد. از طرفی فرسایش‌پذیری خاک یک مفهوم نسبی بوده که به شدت به تغییرات مکانی، خواص پویای خاک از نظر زمانی و فعالیت‌های انسان وابسته است، به‌طوری که خاک تحت تأثیر اشکال مختلف و شدت فرسایش، فرسایش‌پذیری مختلفی از خود نشان می‌دهد.

ماده آلی خاک در مقیاس های کوچک، با ترکیب ذرات خاک و pH در مقیاس های متوسط و با ارتفاع، هدایت هیدرولیکی اشباع و محتوای رس در در مقیاس های بزرگ در ارتباط می باشد. تیان و همکاران (Tian *et al.*, 2022)، با بررسی مهم ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر شاخص فرسایش پذیری خاک در چین اقدام به جمع آوری ۱۰۱ نمونه خاک و اندازه گیری برخی مشخصات فیزیکی و ذره-ای خاک کردند. این محققان مقدار فرسایش پذیری خاک (K) را محاسبه کرده و مشاهده کردند که مهم ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر این شاخص آب و هوا و تراکم پوشش گیاهی هستند. یو و همکاران (Yu *et al.*, 2023)، به منظور ایجاد نقشه شاخص فرسایش پذیری خاک در جنوب شرق تبت، از عوامل محیطی اثرگذار بر شاخص فرسایش پذیری خاک مانند خاک، توپوگرافی، آب و هوا و پوشش گیاهی و خصوصیات خاک برای ایجاد نقشه استفاده کردند. این پژوهشگران بیان کردند خصوصیات فیزیکی خاک مانند میانگین قطر خاکدانه ها تأثیر معنی داری بر شاخص فرسایش پذیری خاک دارند. از بین عوامل محیطی، اقلیم و توپوگرافی تأثیر معنی داری بر این شاخص داشته اند. به طور کلی جمع بندی مرور منابع نشان می دهد مقدار شاخص های فرسایش پذیری خاک، در ارتباط با متغیرهای محیطی هستند و متغیرهای مختلف روی شاخص های مختلف فرسایش پذیری خاک اثر یکسانی ندارند. در میان این متغیرها پوشش گیاهی به عنوان مهم ترین عامل تأثیرگذار، خیلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو ضرورت دارد تا بر میزان سهم اثرگذاری این پارامتر بر شاخص فرسایش پذیری خاک پرداخته شود. هم چنین به دلیل امکان مدیریت نسبی آسان این شاخص نسبت به سایر پارامترها اقدام به ارائه پیشنهادات اجرایی در خصوص کاهش فرسایش خاک منجر شود. استان آذربایجان غربی از نظر توپوگرافی و فیزیوگرافی بسیار متنوع و متغیر می باشد، لذا برای نیل به اهداف مدیریت جامع حوضه های آبخیز و برنامه ریزی های منطقه ای لازم است که ارتباط عوامل تأثیرگذار توپوگرافیک و مرتبط با پستی و بلندی زمین با فرآیند فرسایش خاک و شاخص فرسایش پذیری بررسی و مشخص شود. بر اساس مرور منابع مشخص می شود که ارتباطات بین عوامل بسیار پیچیده است و براساس مناطق مختلف اقلیمی و خاکی روابط مختلفی و نتایج متفاوتی حاصل می شود. در نتیجه

که با هزینه و زمان کمتر، اطلاعات دقیق و مناسبی از منطقه مورد مطالعه در اختیار کاربران قرار می دهد. همچنین تکنیک های رگرسیون به خوبی می توانند برای توسعه و ایجاد روابط پیش بینی کننده شاخص فرسایش پذیری خاک، مورد استفاده قرار گیرند (Ostovari *et al.*, 2019). در زمینه فرسایش پذیری خاک پژوهش های متعددی انجام شده است. زنگی آبادی و همکاران (Zangiabadi *et al.*, 2010)، در بررسی عوامل تأثیرگذار بر فرآیند فرسایش خاک در مراتع نیمه خشک کلات با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره نشان دادند درصد تراکم پوشش گیاهی و درصد شیب زمین به ترتیب مهم ترین عوامل تعیین کننده میزان فرسایش خاک هستند. سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2012)، رابطه بین خصوصیات شیمیایی خاک و شاخص فرسایش پذیری را بررسی کردند. نتایج نشان داد فرسایش پذیری خاک (K) با زمین، آب و هوا، پوشش گیاهی و نوع استفاده از زمین ارتباط دارد و این عوامل محیطی به طور غیرمستقیم بر ویژگی های خاک تأثیر می گذارند. آنها محتوای کل مواد آلی خاک را به عنوان متمایزترین شاخص کیفیت خاک تشخیص داده و بیان کردند می توان از آن برای نظارت بر تغییرات کیفیت فیزیکی خاک در طول زمان استفاده کرد. مالیک و همکاران (Mallick *et al.*, 2016)، براساس تحقیقی در عربستان سعودی گزارش دادند که فرسایش-پذیری خاک (K) با ماده آلی و محتوای شن همبستگی منفی و با سیلت و رس همبستگی مثبت دارد. ان واگو و همکاران (Nwaogu *et al.*, 2017)، در بررسی تأثیر پوشش زمین بر مقدار فرسایش خاک در نیجریه به این نتیجه رسیدند که در دامنه های شیبدار فرسایش خاک شدید و در مناطقی که پوشش گیاهی متراکم دارند، فرسایش ناچیزی رخ می دهد. ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2019)، به منظور بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات مکانی و زمانی در فرسایش پذیری خاک (K) و توزیع فرسایش خاک به این نتیجه رسیدند، مهم ترین عوامل مؤثر بر فرسایش پذیری خاک (K) ویژگی های خاک و سپس توپوگرافی و آب و هوا می باشد. ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2021)، به منظور شناسایی روابط وابسته به مقیاس بین فرسایش پذیری خاک (K) و عوامل مختلف محیطی در جنوب شرقی چین به این نتیجه رسیدند فرسایش پذیری خاک (K) به طور عمده با ترکیب ذرات خاک و محتوای



شکل ۱- موقعیت سایت‌های نمونه‌برداری و منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Location of sampling sites and study area

انتخاب سایت‌های مطالعاتی و نمونه‌برداری خاک

در این پژوهش با مشخص نمودن زیرحوضه‌های مطالعاتی در کل استان آذربایجان غربی با پراکنش مناسب، ۱۳۱ سایت معرف در سطح مراتع و کاملاً تصادفی انتخاب شدند. مورفولوژی سطح استان شامل کوهستان، جنگل، دشت و اراضی کشاورزی می‌باشد و قسمت زیادی از محدوده کوهستان‌ها و دشت‌های استان در نوار مرزی واقع شده‌اند. با توجه به این شرای، به‌منظور سهولت و دسترسی در نمونه‌برداری و یکسان بودن شرایط متغیرهای محیطی، واحد دامنه مرتع به عنوان سایت نمونه‌برداری انتخاب شد (شکل ۱). نمونه‌برداری در سایت‌های معرف مرتعی (واحد دامنه) که به لحاظ نظر کارشناسی و عوامل محیطی نماینده سطح وسیعی از مراتع باشد، انجام گرفت. نمونه‌های خاک از عمق سطحی ۰-۲۰ سانتی‌متر در دامنه‌های با کاربری مرتعی و به‌صورت مرکب (مخلوط سه نمونه برداشتی از هر سایت) برداشت شدند. نمونه‌ها بعد از جمع‌آوری برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شد.

اندازه‌گیری خصوصیات خاک

خصوصیات اندازه‌گیری شده در این مطالعه شامل درصد ماده آلی، سیلت، رس، شن، pH، تخلخل، آهک، درصد رطوبت اشباع طبق روش‌های ذیل انجام گرفت: نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و متغیرهایی مانند کربن آلی خاک با روش اکسیداسیون مرطوب (Nelson & Somers, 1996)، pH با استفاده از نسبت یک به پنج خاک به آب (Rhoades,

بررسی ارتباط بین متغیرهای محیطی (اقلیم، توپوگرافی، پوشش گیاهی، خاک) با شاخص فرسایش‌پذیری خاک در مناطق مختلف به منظور نیل به مدل‌های مختلف که تحلیل‌های پیچیده موجود در طبیعت را ساده‌تر می‌کنند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر تأکید بیشتر بر تعیین متغیرهای تأثیرگذار مستقیم و غیرمستقیم محیطی بر شاخص فرسایش‌پذیری به‌منظور ارائه روشی اصولی برای کنترل فرسایش می‌باشد تا اقدامات و عوامل محیطی مؤثر بر فرسایش مورد توجه مدیران و برنامه‌ریزان قرار گیرد. از این‌رو آگاهی در خصوص اثر عوامل مؤثر بر شاخص فرسایش‌پذیری خاک می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص اتخاذ اقدامات مدیریتی ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

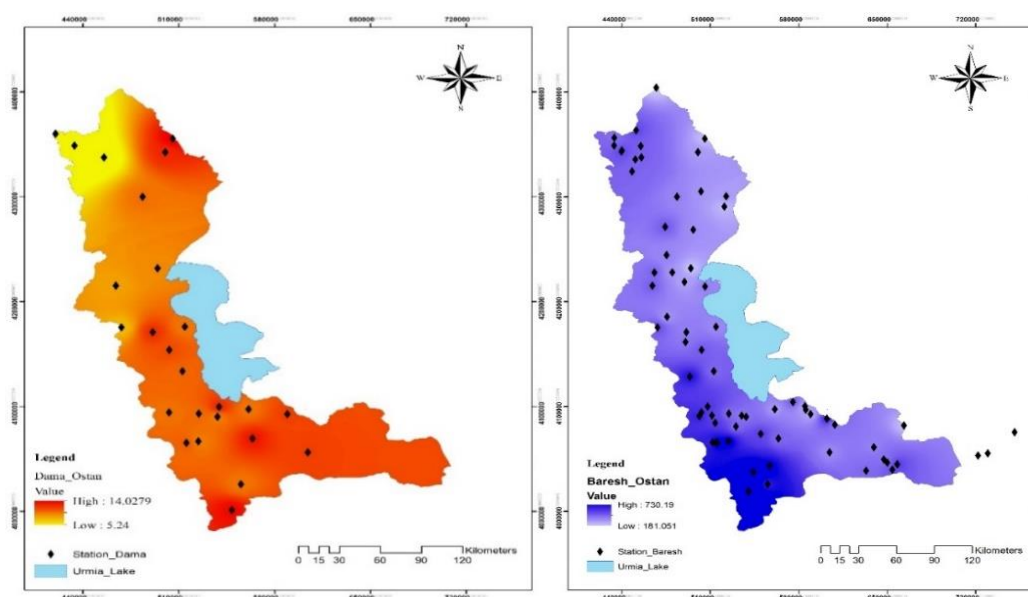
منطقه مورد مطالعه استان آذربایجان غربی می‌باشد که در شمال غرب کشور قرار گرفته است. مساحت استان با احتساب سطح دریاچه ارومیه ۴۲۲۵۲۰۱ هکتار و بدون احتساب دریاچه ارومیه ۳۷۶۱۴۳۶ هکتار می‌باشد. آذربایجان غربی بین ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد و دارای آب و هوای معتدل، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب کوهستانی تحت تأثیر جریان‌های مرطوب اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه می‌باشد. متوسط دمای استان ۱۲ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی ۳۵۶ میلی‌متر در سال است. آذربایجان غربی به واسطه ویژگی‌های اقلیمی و محیطی دارای مراتع خوب است. در حال حاضر مجموع کل مراتع استان ۲۵۱۶۵۸۴ هکتار می‌باشد. بر اساس تقسیم‌بندی انجام شده برای واحدهای زمین‌شناختی و ساختمانی ایران، استان آذربایجان غربی در بخشی از زون البرز غربی و آذربایجان قرار گرفته و از نظر ناهمواری‌ها، چهره‌ای متنوع دارد؛ به‌طوری که از کل وسعت استان ۲۱ درصد را سرزمین‌های پست و جلگه‌ها، ۶۳ درصد را ارتفاعات و ۱۶ درصد را دریاچه ارومیه به خود اختصاص داده است. شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه و موقعیت سایت‌های نمونه‌برداری را در استان آذربایجان غربی نمایش می‌دهد.

داده‌های دما و بارش، نقشه پهنه‌بندی این دو متغیر برای استان با استفاده از روش IDW در نرم‌افزار Arc GIS 10.3.1 تهیه و مقادیر دما و بارش مربوط به نقاط نمونه‌برداری از این نقشه‌ها به‌دست آمد (شکل شماره ۲). به منظور تهیه نقشه متغیرهای بارش و دما، به ترتیب از آمار ۷۰ و ۲۵ ایستگاه با دوره آماری مشترک ۳۰ ساله (از سال آبی ۷۲-۷۳ تا سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱) پس از بررسی همگنی و نرمال بودن داده‌ها استفاده شد. شایان ذکر است که انتخاب روش IDW¹ بر مبنای شاخص کارایی خطای جذر میانگین مربعات (RMSE²) بوده است.

(Ryan, 1996)، توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Ryan et al., 2001) و همچنین امتیاز طبقات نفوذپذیری خاک با توجه به بافت خاک در ۱۳۱ نقطه تعیین و کدهای نفوذپذیری و ساختمان خاک نمونه‌های برداشت شده به کمک پروتکل‌های استاندارد خاک مشخص شد.

استخراج متغیرهای محیطی

خصوصیات توپوگرافیکی دامنه شامل شیب، جهت شیب دامنه‌ها و ارتفاع نقاط نمونه‌برداری با استفاده از ابزارهای شیب‌سنج، آزیموت‌سنج و سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت شد (جدول شماره ۱). به‌منظور استخراج



شکل ۲- نقشه پهنه بندی بارش (سمت راست) و نقشه پهنه بندی دما (سمت چپ) منطقه مورد مطالعه
Figure 2. Precipitation zoning map (right) and temperature zoning (left) of the study area



شکل ۳- پلات یک متر مربعی جهت محاسبه درصد پوشش گیاهی

اندازه‌گیری درصد پوشش گیاهی

برای به‌دست آوردن و استخراج تراکم پوشش گیاهی بر حسب درصد در نقاط نمونه‌برداری خاک، از پلات یک مترمربعی استفاده شد. بدین صورت که در هر سایت معرف، ۱۰ پلات یک متر مربعی بصورت تصادفی-سیستماتیک مستقر و میانگین پلات‌های ۱۰ گانه برای هر نقطه به‌عنوان نماینده‌ای از وضعیت درصد پوشش گیاهی تخمین و محاسبه شد (شکل ۳).

2 Root Mean Square Error

1. Inverse Distance Weighting

رگرسیون چندمتغیره خطی یکی از تکنیک‌های پیچیده آماری برای داده‌هایی است که معمولاً در سطح سنجش فاصله‌ای می‌باشند و روشی برای تحلیل مشارکت جمعی و فردی دو یا چند متغیر مستقل (X_i) در تغییرات یک متغیر وابسته (Y_i) است (Habibpour & Safari, 2024). برای ورود متغیرهای رگرسیونی به مدل روش‌های مختلفی وجود دارد که محقق با توجه به هدف تحلیل می‌تواند یکی از روش‌ها را انتخاب نماید. در این پژوهش به منظور تعیین مهم‌ترین متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر شاخص فرسایش‌پذیری از روش رگرسیون گام‌به‌گام در محیط نرم‌افزار Minitab 17 استفاده شد. در این روش متغیرها یک به یک وارد مدل می‌شوند، یعنی ابتدا متغیری که بیشترین همبستگی را با متغیر وابسته دارد، انتخاب می‌شود. دومین متغیری که وارد تحلیل می‌شود، متغیری است که پس از تفکیک متغیر مقدم بر آن، موجب بیشترین افزایش در ضریب تعیین می‌شود. در این روش، ورود متغیرها به مدل یک‌به‌یک و تا زمانی انجام می‌شود که معنی‌داری متغیر به ۹۵ درصد برسد، یعنی سطح خطا ۵ درصد شود سپس عملیات متوقف می‌شود.

نتایج و بحث

خلاصه آماری داده‌های خاک و متغیرهای محیطی

برای تخمین فاکتور فرسایش‌پذیری با استفاده از معادله ویشمایر و اسمیت (Wischmeier & Smith, 1978) به پارامترهایی از قبیل درصد شن، سیلت، رس، کربن آلی، آهک و قابلیت نفوذپذیری خاک نیاز هست. خلاصه آماری این ویژگی‌ها و عامل فرسایش‌پذیری خاک در جدول (۱) آورده شده است. پارامترهایی از قبیل درصد شن، سیلت و آهک دارای بیشترین و کربن آلی، رس دارای کمترین ضریب تغییرات هستند. در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک آهک نقش اساسی در پایداری خاکدانه‌ها دارد و ممکن است بر فرسایش‌پذیری (K) اثر بگذارد (Refahi, 1996). رس به دلیل خاصیت چسبندگی، مانع از جدا شدن ذرات خاک و فرسایش می‌شود (Charman & Murphy 2000). از بین متغیرهای محیطی چهار متغیر پوشش گیاهی، درجه شیب، بارش و ارتفاع بیشترین عوامل تأثیرگذار در بین پارامترهای محیطی بر شاخص فرسایش‌پذیری (K) هستند (جدول ۲).

محاسبه شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K)

فرسایش‌پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی آن به فرسایش است. از آنجا که اندازه‌گیری عامل فرسایش‌پذیری به‌طور مستقیم زمان‌بر و پرهزینه است، از معادلات و مدل‌های برآوردی برای تخمین آن استفاده می‌شود. در این پژوهش برای تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک از معادله ارائه شده توسط ویشمایر و اسمیت استفاده شد (Wischmeier & Smith, 1978).

رابطه (۱):

$$K = 2.73 \times 10^{(-6)} \times M^{1.14} \times (12 - OM) + 3.25 \times 10^{(-2)} (S - 2) + 2.5 \times 10^{(-2)} (P - 3)$$

K عامل فرسایش‌پذیری خاک (t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹) در سیستم متریک، M حاصل ضرب مجموع درصد سیلت و شن خیلی ریز در ۱۰۰ منهای درصد رس؛ OM ضریب درصد ماده آلی، S کد مربوط به ساختمان خاک و P طبقه‌بندی نفوذپذیری خاک است.

تهیه نقشه فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از زمین‌آمار از روش‌های معمول برای تهیه نقشه فرسایش‌پذیری خاک، تعمیم اطلاعات عامل فرسایش‌پذیری در نقاط مختلف به سطح یک منطقه با استفاده از زمین‌آمار است. استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار برای بررسی تغییرات مکانی اجازه بررسی پیشرفته تغییرات خصوصیات خاک را می‌دهد. برای تهیه نقشه پراکنش مکانی عامل فرسایش‌پذیری (K)، بعد از اینکه مشخص شد پوشش گیاهی به‌عنوان مؤثرترین متغیر تأثیرگذار در شاخص فرسایش‌پذیری، دارای بیشترین همبستگی با آن در بین متغیرهای محیطی می‌باشد، روش‌های متعدد میان‌یابی نقاط با استفاده از زمین‌آمار ارزیابی شده و در نهایت روش IDW بر مبنای شاخص کارایی خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، به‌عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد (شکل ۴).

آنالیز آماری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

تعیین متغیرهای محیطی مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک (K) با استفاده از روش رگرسیون گام‌به‌گام انجام گرفت که یکی از انواع رگرسیون خطی چندمتغیره است.

جدول ۱. برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و آمار متغیرهای محیطی اندازه گیری شده در سایت های نمونه برداری
Table 1. Some physical and chemical properties of soil and statistics of measured environmental variables in sampling sites

Physical and chemical parameters of soil	Min	Max	Mean	Std. Dev
Sand (%)	3	84	38.12	16.8
Silt (%)	4	69	37.73	11.91
Caly (%)	9	50	24.14	9.38
(Organic Carbon (%))	0.36	3.2	1.41	0.70
Lime (%)	3.26	60.91	24.12	15.65
Saturation Humidity (%)	16	66	36.65	10.07
Slope (%)	8	65	32.43	10.73
Azimuth	0.069	3.11	1.60	0.85 ^h
Elevation (m)	806	2274	1564	298
Vegetation (%)	20	70	43.5	12.04
Rain (mm)	242.3	515.3	337.9	61.5
Temperature (°C)	6.56	13.47	11.66	1.24

در گام دوم (مدل دوم) پوشش گیاهی (Cover) و بارندگی وارد مدل شده و میزان ضریب همبستگی (R) با افزایش اندک به ۰/۳۹۴ رسیده است. گام سوم نیز با وارد کردن پوشش گیاهی، بارندگی و شیب مقدار ضریب همبستگی (R) نیز به ۰/۴۳۷ رسیده است. در نهایت و در آخرین گام رگرسیونی یعنی گام چهارم پارامترهای پوشش گیاهی، بارندگی، شیب و ارتفاع وارد مدل شده و بیشترین ضریب همبستگی (R) با میزان ۰/۴۶۹ به دست آمده است.

نتایج رگرسیون گام به گام در بررسی ضریب فرسایش پذیری (K) با عوامل محیطی

رگرسیون گام به گام برای داده های جمع آوری شده در چهار گام تهیه شد و مقدار هر یک از گام ها در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول فوق مشاهده می شود: در طی رگرسیون گام به گام در گام اول (مدل اول) فقط پوشش گیاهی وارد مدل شده و میزان ضریب همبستگی (R) برابر با ۰/۳۲۰ شده است.

جدول ۲- مشخصات آماری رگرسیون حاصله در گام های مختلف چهار گانه

Table 2. Statistical characteristics of the resulting regression in different four steps

Std. Error	Sum of squares	R ²	R	Model
0.09909	0.095	0.102	0.320 ^a	1
0.09650	0.142	0.155	0.394 ^b	2
0.09480	0.172	0.191	0.437 ^c	3
0.09344	0.195	0.220	0.469 ^d	4

A: مدل اول شامل پارامتر درصد تاج پوشش گیاهی (cover)

B: مدل دوم شامل پارامتر درصد تاج پوشش گیاهی (cover) و بارش (precipitation)

C: مدل سوم شامل پارامتر درصد تاج پوشش گیاهی (cover)، بارش (precipitation) و شیب (Slop)

D: مدل چهارم شامل پارامتر درصد تاج پوشش گیاهی (cover)، بارش (precipitation)، شیب (Slop) و ارتفاع (elevation)

هستند. به طور کلی هر ۴ مدل حاصل توسط آزمون ANOVA دارای معنی داری در سطح یک درصد هستند و به عبارتی مدل حاصله قابل اطمینان است. پس از تعیین وضعیت همبستگی هر یک از پارامترها برای تعیین ضرایب ثابت و متغیر مدل ها از آزمون تی استیودنت استفاده شد که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

پس از تعیین ضریب و گام های رگرسیونی برای پارامترهای محیطی مقادیر معنی داری رگرسیون توسط آزمون آماری ANOVA بررسی شد و نتایج در جدول ۳ نشان ارائه شده است. این آزمون در چهار گام بررسی شد و مقادیر همبستگی هر یک از پارامترهای پوشش گیاهی، بارندگی، شیب و ارتفاع در هر مرحله مشخص شد. با توجه به نتایج جدول فوق همه موارد دارای ارتباط معنی داری

جدول ۳- نتایج آزمون ANOVA برای رگرسیون بین K و عوامل محیطی در گام‌های مختلف

Table 3. Results of ANOVA test for regression between K and environmental factors at different steps

Model	Sources of changes	Sum of squares	d.f.	Mean of squares	F	Sig.
1	Regression	0.144	1	0.144	14.673**	0.000 ^b
	Remainder	1.267	129	0.10		
	Total	1.411	130			
2	Regression	0.219	2	0.109	11758**	0.000 ^c
	Remainder	1.192	128	0.009		
	Total	1.411	130			
3	Regression	0.269	3	0.090	9.994**	0.000 ^d
	Remainder	1.141	127	0.009		
	Total	1.411	130			
4	Regression	0.311	4	0.78	8.898**	0.000 ^e
	Remainder	1.100	126	0.009		
	Total	1.411	130			

a. Dependent Variable: K

b. Predictors: (Constant), cover

c. Predictors: (Constant), cover, precip

d. Predictors: (Constant), cover, precip, slope

e. Predictors: (Constant), cover, precip, slope, elev

** معنی دار در سطح یک درصد

نتایج مربوط به آزمون معنی‌داری ضرایب ثابت و متغیر رگرسیون‌های گام‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- آزمون آماری ضرایب ثابت و متغیر رگرسیون‌های گام‌های مختلف

Table 4. Statistical test of fixed and variable coefficients of regressions of different steps

Model	Coefficients	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	Fixed coefficient	0.460	0.032	-	14.175**	0.000
	Vegetation	-0.003	0.001	-0.320	-3.831**	0.000
2	Fixed coefficient	0.578	0.052	-	11.056**	0.000
	Vegetation	-0.002	0.001	-0.279	-3.375**	0.001
	Rain	0.000	0.000	-0.234	-2.836**	0.005
3	Fixed coefficient	0.529	0.55	-	9.543**	0.000
	Vegetation	-0.002	0.001	-0.285	-3.509**	0.001
	Rain	-0.0002	0.00001	-0.248	-3.052**	0.003
	Slope	0.002	0.001	0.190	2.370**	0.019
4	Fixed coefficient	0.584	0.6	-	9.700**	0.000
	Vegetation	-0.002	0.001	-0.231	-2.765**	0.007
	Rain	-0.000343	0.00004	-0.203	-2.454**	0.015
	Slope	0.002	0.001	0.194	2.462**	0.015
	Elevation	-0.00006521	0.000	-0.187	-2.174**	0.032

a. Dependent Variable: K

** معنی دار در سطح یک درصد * معنی‌دار در سطح پنج درصد

رابطه (۲):

$$K (\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}) = 0.460 - 0.003 \text{ Cover}$$

$$(F=14.673^{**}, SE= 0.9909, P<0.01, R^2= 0.102)$$

بر اساس جدول ۴ در اولین مدل ایجاد شده، پارامتر پوشش گیاهی وارد مدل شده است و ضریب متغیر مربوط با میزان ۰/۰۳- در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است و مدل نهایی به صورت ذیل است.

(F=8/898××, SE= 0.9344, P<0.01, R²= 0.22)

نتایج نشان داد پوشش گیاهی و شیب در بین متغیرهای محیطی بیشترین تأثیر را بر روی فرسایش پذیری خاک (K) داشتند و این با نتایج حاصل از پژوهش زنگی آبادی و همکاران (Zangiabadi *et al.*, 2010) که درصد تراکم پوشش گیاهی و درصد شیب زمین را به عنوان مهم ترین عامل تأثیرگذار در فرسایش پذیری معرفی کرده بودند کاملاً منطبق می باشد. در خاک های مناطق خشک و نیمه خشک کمبود مواد آلی باعث حساسیت خاک های این مناطق به فرسایش شده لذا با افزایش پوشش گیاهی ماده آلی در خاک زیاد شده و به تبع آن ساختمان خاک اصلاح می شود و همچنین کربن آلی خاک نیز افزایش می یابد. براساس ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نمونه های خاک (جدول ۱) درصد شن، دارای بیشترین و رس دارای کمترین ضریب تغییرات می باشند که با نتایج برخی پژوهشگران همخوانی دارد. مالیک و همکاران (Mallick *et al.*, 2016) بیان کردند فرسایش پذیری خاک (K) با ماده آلی و محتوای شن همبستگی منفی و با سیلت و رس همبستگی مثبت دارد. ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2021) نیز محتوای ماده آلی را به عنوان عامل تأثیرگذار در فرسایش پذیری معرفی کرده بودند. در بین عوامل توپوگرافی، تأثیر درجه شیب بر شاخص فرسایش پذیری خاک بیشتر می باشد به طوری که با افزایش درجه شیب شاخص K نیز افزایش می یابد که این امر در نتیجه عدم پایداری خاک در شیب های تند، کاهش ماده آلی، تخریب ساختمان خاک، آب شویی، خارج شدن مواد مغذی از دسترس گیاه و در نهایت کاهش پوشش گیاهی می باشد. این مورد با یافته های ان واگو و همکاران (Nwaogu *et al.*, 2017)، که نتیجه گیری کرده بودند در دامنه های شیب دار فرسایش خاک شدید و در مناطقی که پوشش گیاهی متراکم دارند فرسایش ناچیزی رخ می دهد، سازگاری دارد.

توزیع مکانی فرسایش پذیری خاک

نقشه توزیع مکانی فرسایش پذیری (K) به دست آمده از روش ویشمایر و اسمیت (Wischmeier & Smith, 1978) که با استفاده از روش میان یابی IDW تهیه شده در شکل ۴ ارائه شده است. این نقشه نشان می دهد بیشترین

در دومین مدل تولید شده، پارامتر پوشش گیاهی و بارندگی وارد مدل شده است و ضرایب متغیرها به ترتیب ۰/۰۰۲- و ۰/۰۳۴۳- بدست آمده و در سطح یک درصد معنی دار است و مدل نهایی به صورت ذیل است.
رابطه (۳):

$$K (t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}) = 0.578 - 0.002 Cover - 0.000343 Precipitation$$

(F=11.758××, SE= 0.9650, P<0.01, R²= 0.155)

با توجه به مقادر ضرایب استاندارد (Beta) متغیرهای پوشش گیاهی و بارندگی در مدل حاصله که به ترتیب برابر با ۰/۲۷۹- و ۰/۲۳۴- است، مشخص می شود اثر پوشش گیاهی بر ضریب فرسایش پذیری خاک بیشتر می باشد. در مدل سوم پارامترهای پوشش گیاهی، بارندگی و شیب وارد مدل شده است. ضرایب متغیرها به ترتیب ۰/۰۰۲-، ۰/۰۰۰۲- و ۰/۰۰۲- به دست آمده و در سطح یک درصد معنی دار هستند. با توجه به مقادیر ارائه شده مدل نهایی به صورت ذیل بدست می آید:

رابطه (۴):

$$K (t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}) = 0.529 - 0.002 Cover + 0.000343 Precipitation + 0.002 Slope$$

(F=9/994××, SE= 0.9480, P<0.01, R²= 0.191)

با توجه به مقادر ضرایب استاندارد متغیرهای پوشش گیاهی، بارندگی و شیب در مدل حاصله که به ترتیب برابر با ۰/۲۸۵-، ۰/۲۴۸- و ۰/۱۹۰- است مشخص می شود اثر پوشش گیاهی بر میزان فرسایش پذیری خاک بیشتر می باشد. در چهارمین و مدل نهایی که به عنوان مدل مورد قبول و مورد بحث در این پژوهش است، ضرایب متغیرهای پوشش گیاهی، بارندگی، شیب و ارتفاع به ترتیب برابر یا ۰/۰۰۲-، ۰/۰۰۰۳۴۳-، ۰/۰۰۲- و ۰/۰۰۰۶۵۲۱- به دست آمده است. ضرایب متغیرهای ثابت استاندارد به ترتیب ۰/۲۳۱-، ۰/۲۰۳-، ۰/۱۹۴- و ۰/۱۸۷- می باشد.

رابطه (۵):

$$K (t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}) = 0.584 - 0.002 Cover - 0.000343 Precipitation + 0.002 Slope - 0.00006521 Elevation$$

و در نهایت باعث حمل ذرات خاک به طرف پائین شود. در نتیجه تغییرات کاربری نادرست و چرای بی‌رویه در این مناطق، عامل فرسایش‌پذیری خاک نیز افزایش یابد. افزایش شاخص فرسایش‌پذیری موجب افزایش حساسیت خاک شده و شدت فرسایش تشدید شود. اندازه‌گیری میزان دقت روش‌های مورد استفاده میان‌یابی جهت تهیه نقشه پراکنش مکانی فرسایش‌پذیری در جدول ۵ گزارش شده است. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد در بین روش‌های میان‌یابی روش IDW با $RMSE=0/0959371$ کمترین خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، را در بین روش‌های مورد استفاده داشته و در نتیجه به‌عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد.

مقادیر فرسایش‌پذیری در مناطق شمال منطقه و کم‌ترین مقادیر در بخش‌های مرکزی و جنوب وجود دارد. که با توجه به بررسی‌های به عمل آمده علت افزایش فرسایش‌پذیری در قسمت‌های شمالی محدوده علیرغم بارندگی مناسب، تعداد دام مازاد چند برابر بیش از حد مجاز می‌باشد. مراتع شهرستان‌های شمال استان مانند چالدران و ماکو بیلاقات چندین شهرستان بوده و در فصل چرا، دام شهرستان‌های اطراف نیز به آن مناطق کوچ می‌کنند. همچنین با توجه به مورفولوژی و خصوصیات توپوگرافیکی، بیشترین کشت در این مناطق کشت به‌صورت دیم است. احتمال می‌رود که در این اراضی عملیات کشت و کار باعث سست شدن خاک و در نتیجه به دلیل شیب زیاد در این نواحی، افزایش سرعت رواناب

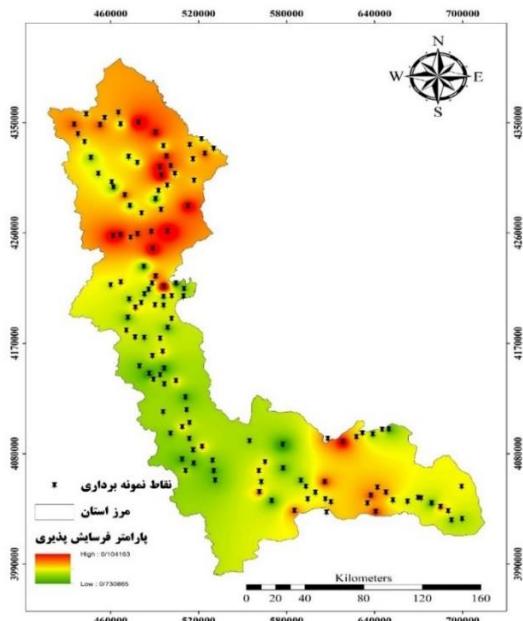
جدول ۵- ارزیابی روش‌های مورد استفاده در میان‌یابی

Table 5. Evaluation of the types of methods used in interpolation

Method	Error	
	RMSE	Mean
IDW	0.0959371	0.0001083
GPI	0.0982268	0.0000763
LPI	0.0982839	-0.0025839
RBF	0.0972613	-0.0005932
Kernel Smoothing	0.0988944	-0.35759
Kriging Ordinary	0.0977144	0.108991
Kriging Simple	0.0974639	0.00080125
Kriging Universal	0.097714	0.00108991
Cokriging	0.0962188	0.00020381

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش به بررسی متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر عامل فرسایش‌پذیری پرداخته شد. علاوه بر در نظر گرفتن متغیرهای پایه‌ای خاک مانند بافت خاک، ماده آلی، نفوذپذیری و ساختمان خاک، عوامل محیطی تأثیرگذار بر عامل فرسایش‌پذیری خاک مانند پوشش گیاهی، شیب و ارتفاع نیز لحاظ شد. برای بررسی ارتباط متغیرها از رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شد و مقادیر همبستگی هر یک از پارامترهای محیطی در هر مرحله مشخص شد. به دلیل پیچیدگی روابط و متعدد بودن متغیرها امکان اندازه‌گیری و دخالت همه متغیرها مشکل و شاید غیرممکن می‌باشد. تعدادی از متغیرها هم وارد مدل شده ولی رابطه معنی‌داری نداشتند. در بین متغیرهای محیطی پارامترهای پوشش گیاهی، بارندگی، شیب و ارتفاع با



شکل ۴- نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

Figure 4. Map of soil erodibility factor (K)

انسان بر این ویژگی‌ها از طریق تغییر در سایر مشخصه‌های قابل کنترل محیطی و همچنین جلوگیری از برخی پیامدهای سوء مدیریتی معطوف خواهد بود. به همین دلیل با توجه به نقش مهم گیاه به عنوان عامل اصلی تأثیرگذار بر شاخص فرسایش پذیری و قابل مدیریت بودن آن می‌توان با مدیریت اصولی، حساسیت خاک‌ها به فرسایش را کاهش داد. همچنین کارشناسان با توصیه کردن روش‌های مناسب حفاظت خاک و افزایش پوشش گیاهی در مراتع می‌توانند زمینه را برای جلوگیری از فرسایش خاک، شستشو و انتقال ذرات ریز نظیر رس و سیلت و دستیابی به توسعه پایدار زیست محیطی مهیا سازند.

توجه به نتایج، دارای ارتباط معنی‌داری بودند. همچنین نتایج نشان داد اثرگذاری متغیرها بر روی ضریب فرسایش پذیری به ترتیب شامل پوشش گیاهی، شیب، بارش و ارتفاع می‌باشد. بعد از مشخص شدن سهم هر یک از عوامل تأثیرگذار (عوامل اقلیمی، توپوگرافی و پوشش) نقشه الگوی مکانی عامل فرسایش پذیری خاک نیز به منظور اجرای روش‌های مدیریتی مؤثر در نقاط مختلف حوضه تهیه شد. طبق نتایج دو پارامتر پوشش گیاهی و درصد شیب از پارامترهای مؤثر در فرسایش پذیری خاک منطقه محسوب می‌شوند که در صورت عدم مدیریت صحیح منجر به فرسایش آبی و هدررفت بیشتر خاک می‌شوند. اگر چه انسان بطور طبیعی و مستقیم قادر به تغییر برخی ویژگی‌های خاک نیست اما نقش غیرمستقیم

Reference

- Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W., Olson C., Sztein A.E., Sparks D.L. 2015. Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235), 1261071.
- Bryan, R.B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32(3-4): 385-415.
- Charman P.E.V., Murphy B.W. 2000. Soils (their properties and management). Second edition, *Land and Water Conservation*, Oxford University Press, 461p.
- Chappell A., Zobeck T.M., Brunner G. 2006. Using bi-directional soil spectral reflectance to model soil surface changes induced by rainfall and wind-tunnel abrasion. *Remote Sensing of Environment*, 102 (3-4): 328-343.
- Ghosal K., Das Bhattacharya S. 2020. A review of RUSLE model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(4): 689-707.
- Habibpour K., Safari R. 2024. A comprehensive Guide to using SPSS in survey research (quantitative data analysis). *Mobtakeran Publications*, 866 p. (In Persian).
- Kiani Harchegani M., Sadeghi S.H., Falahatkar S. 2019. Comparative analysis of soil erodibility factor in Shazand watershed. *Eco-Hydro Journal*, 6 (1): 153-163 (In Persian).
- Liu H.L.T.W., Lei T.W., Zhao J., Yuan C.P., Fan Y.T., Qu L.Q. 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the runoff on out method. *Journal of Hydrology*, 396(1-2): 24-32.
- Mallick J., Al-Wadi H., Rahman A., Ahmed M., Abad Khan R. 2016. Spatial variability of soil erodibility and its correlation with soil properties in semi-arid mountainous watershed, Saudi Arabia. *Geocarto International*, 31(6): 661-681.
- Nelson D.W., Somers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*, SSSA Book Ser. 5.3., Madison, USA, *Soil Sci. Soc. Am.*, pp.961-1010.
- Nwaogu C., Okeke O.J., Adu S.A., Babine E., Pechanec V., 2017. Land use land cover change and soil-gully erosion relationships: A study of Nanka, South-Eastern Nigeria using geoinformatics. *Proceedings of GIS Ostrava: Dynamics in GIScience*, 305-319p. Springer International Publishing.
- Ostovari Y., Ghorbani-Dashtaki S., Kumar L., Shabani F. 2019. Soil erodibility and its prediction in semi-arid regions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65: 1688-1703.
- Refahi H. Gh. 1996. *Water Erosion and Control*, No.1. Tehran University Press, 674 p (In Persian).
- Rengasamy P., Greene R.S.B., Ford G.W., Mehanni A.H. 1984. Identification of dispersive behavior and the management of red-brown earths, *Australian Journal of Soil Research*, 22(4): 413-431.

- Rhoades J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*, SSSA Book Ser. 5.3., *Soil Sci. Soc. Am.* Madison, USA. pp. 417-436.
- Ryan J., Estefan G., Rashid A. 2001. Soil and plant analysis laboratory manual. 2nd ed., *International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA)*, Aleppo, 254p.
- Singh M.J., Khera K.L., Santra, P. 2012. Selection of soil physical quality indicators in relation to soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(6): 657-672.
- Tian Z., Liu, F., Liang, Y., Zhu, X. 2022. Mapping soil erodibility in southeast China at 250 m resolution: Using environmental variables and random forest regression with limited samples. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(1), 62-74.
- Wang B., Zheng F., Römken M.J.M., Darboux F. 2013. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*, 187: 1-10.
- Wang G., Gertner G., Liu X., Anderson A. 2001. Uncertainty assessment of soil erodibility factor for revised universal soil loss equation. *Catena*, 46(1): 1-14.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Prediction Rainfall Erosion Losses. A Guide for Conservation Planning Agriculture. *USDA, Agriculture Handbook*, No. 537.
- Yuan Jun Z., Mingan S. 2008. Spatial distribution of surface rock fragment on hill slopes in a small catchment in wind-water erosion crisscross region of the loess Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(6); 862-870.
- Yu W., Jiang Y., Liang W., Wan D., Liang B., Shi Z. 2023. High-resolution mapping and driving factors of soil erodibility in southeastern Tibet. *Catena*, 220, 106725.
- Zangiabadi M., Rangavar A., Refahi H.Gh., Shorafa M., Bihamta M.R. 2010. Investigation of the most Important Factors Affecting on Soil Erosion in Kalat Semi-Arid Rangelands. *Journal of Water and Soil*, 24(4): 737-744. (In Persian)
- Zhu G., Tang Z., Shanguan Z., Peng CH., Lei Deng L. 2019. Factors affecting the spatial and temporal variations in soil erodibility of China. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(3): 737-749.
- Zhu X., Liang Y., Tian Z., Wang X. 2021. Analysis of scale-specific factors controlling soil erodibility in southeastern China using multivariate empirical mode decomposition. *Catena*, 199: 105131.