



## بررسی عوامل مؤثر بر توسعه فرسایش خندقی در مناطق نیمه‌خشک شمال غرب ایران

فرشته حق‌شناس<sup>۱\*</sup>، مسعود داوری<sup>۲</sup>

۱- نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.

پست الکترونیک: Fereshtheh74@gmail.com

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان.

### چکیده:

فرسایش خندقی به عنوان یک تهدید جدی برای محیط‌زیست و منابع طبیعی، از جمله خاک، آب و پوشش گیاهی در حوزه‌های آبخیز شناخته می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی توسعه یک مدل پیش‌بینی کننده مبتنی بر داده است که قادر به پیش‌بینی روند زمانی و مکانی توسعه فرسایش خندقی در مناطق نیمه‌خشک در حوضه آبخیز کلوچه است. در این تحقیق، ۶۲ نقطه در منطقه مورد مطالعه به صورت تصادفی جمع‌آوری و سپس در آزمایشگاه آماده‌سازی شدند. سپس، ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک مانند بافت، چگالی ظاهری، ماده آلی، کربنات کلسیم، تخلخل، فرسایش‌پذیری، کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم اندازه‌گیری شدند. برای انجام این اندازه‌گیری‌ها از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی استفاده شده است. نتایج همبستگی نشان داد که شن، ماده آلی، کربن آلی، پایداری خاکدانه و هدایت هیدرولیکی اشباع همبستگی منفی معنی‌داری با فرسایش‌پذیری دارند، به این معنی که افزایش این عوامل باعث کاهش فرسایش‌پذیری می‌شود. در مقابل، سیلت با فرسایش‌پذیری همبستگی مثبت معنی‌داری دارد. تحلیل رگرسیون چندگانه نیز تأیید کرد که پایداری خاکدانه، مواد آلی، میزان سیلت و شن و همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، همگی با هم تأثیر معناداری بر فرسایش‌پذیری خاک دارند و حدود ۹۴ درصد از تغییرات آن را توجیه می‌کنند ( $R^2 = 0.94$ ). به‌ویژه، خاک‌هایی که از پایداری خاکدانه پایین، مقدار کم مواد آلی، میزان بالای سیلت و شن و هدایت هیدرولیکی اشباع پایین برخوردارند، بیشتر در معرض فرسایش قرار دارند.

**واژگان کلیدی:** پایداری خاکدانه، مواد آلی، سیلت، هدایت هیدرولیکی اشباع، مناطق نیمه‌خشک.

### مقدمه:

فرسایش خاک، به‌ویژه فرسایش خندقی، یک تهدید جدی برای خاک و زیست‌بوم است. فرسایش خندقی به عنوان شدیدترین شکل تخریب خاک، نه تنها باعث از بین رفتن خاک سطحی حاصلخیز می‌شود، بلکه منجر به تخریب و تکه‌تکه شدن اراضی، افزایش جریان‌های سیلابی و کاهش کیفیت آب سطحی می‌گردد (Zhang et al., 2024). فرسایش خندقی با از دست دادن ظرفیت تولید، تهدیدی جدی برای پایداری کشاورزی در مقیاس جهانی است. با توجه به اینکه خندق‌ها می‌توانند منبع بزرگی برای تولید و انتقال رسوبات در حوضه‌های آبخیز باشند، بر کیفیت آب تأثیر منفی می‌گذارند (Wang et al., 2020). رسوب‌گذاری در شبکه‌های زهکشی و مخازن آب و همچنین آسیب به شبکه‌های حمل‌ونقل و زیرساخت‌های مخازن، می‌تواند عواقب اقتصادی - اجتماعی منفی داشته باشد. معادل ۴۱ درصد از اراضی سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده است، که می‌تواند به شدت مستعد فرسایش خندقی باشد (Rahmati et al., 2022).

فرسایش خندقی، به عنوان یک فرآیند پیچیده ژئومورفولوژیک، تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله رویدادهای آب و هوایی، کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. در حالی که رویدادهای طبیعی همچون بارندگی‌های شدید و خشک‌سالی‌های طولانی مدت می‌توانند شروع یا تشدید فرسایش خندقی را تسریع کنند، نقش عوامل انسانی در این فرآیند نیز بسیار حائز اهمیت است. تغییرات



کاربری اراضی و فعالیت‌های غیراصولی انسانی، با تأثیر بر شرایط زهکشی و نفوذ آب، به‌طور قابل توجهی در توسعه و گسترش خندق‌ها نقش دارند. با این حال، پیامدهای دقیق این تأثیرات در زمینه فرسایش خندقی هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. فرسایش خندقی در اراضی کشاورزی، مراتع و مناطق جنگلی به دلیل فعالیت‌های انسانی تشدید می‌شود. در اراضی کشاورزی، شیوه‌های کشاورزی فشرده، چرای بیش از حد و سیستم‌های زهکشی نامناسب می‌توانند منجر به کاهش مواد آلی و به تبع آن کاهش پایداری ساختمان خاک و در نتیجه افزایش فرسایش خندقی شوند. در مراتع، چرای بیش از حد دام‌ها و تخریب پوشش گیاهی، خاک را در برابر رخداد فرسایش خندقی آسیب‌پذیرتر می‌کند. در مناطق جنگلی نیز، آتش‌سوزی، جنگل‌زدایی و ساخت زیرساخت‌های دسترسی، با آسیب رساندن به پوشش گیاهی، فرسایش خندقی را تشدید می‌کند (Valentin et al., 2005); (Garosi and Gomez., 2018). شروع و توسعه خندق‌ها اغلب با ساخت جاده‌ها و همچنین مسیرهای عبور رواناب مرتبط است. این سازه‌ها با جمع‌آوری و تمرکز رواناب از سطوح وسیع‌تر، بر توسعه و گسترش خندق‌ها تأثیر می‌گذارند (Imwangana et al., 2014).

پژوهش‌های متعددی به بررسی نقش عوامل طبیعی و انسانی در وقوع فرسایش خندقی پرداخته‌اند و بر اهمیت شناخت این عوامل در مدیریت و پیشگیری از فرسایش خندقی تأکید کرده‌اند. در این زمینه Liu و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش در منطقه خاک سیاه شمال شرقی چین پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که مناطق با شیب زیاد بیشتر در معرض خطر فرسایش خندقی هستند و بیش از ۷۵ درصد از مناطق با حساسیت بسیار بالا به فرسایش در زمین‌های شیب‌دار واقع شدند. در پژوهشی Wei و همکاران (۲۰۲۲) میزان تأثیرگذاری ۱۸ عامل محیطی مختلف بر فرسایش خندقی را با استفاده از مدل نسبت فرکانس ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که عواملی همچون بارندگی سالانه، فرساینده‌گی بارندگی و فاصله از رودخانه‌های اصلی نقشی مهم در ایجاد فرسایش خندقی دارند. در پژوهشی دیگر Arabameri و Pourghasemi (۲۰۱۹) به بررسی و شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوضه آبخیز شاهرود واقع در استان سمنان پرداختند. در این پژوهش، با در نظر گرفتن عوامل محیطی شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه و نوع پوشش گیاهی و بهره‌گیری از دو مدل آماری تحلیل تشخیص خطی (LDA) و تحلیل تشخیص درجه دوم (QDA)، نقشه‌های حساسیت به فرسایش خندقی تهیه شدند. نتایج نشان داد عواملی همچون شیب زمین، فاصله از رودخانه و نوع کاربری زمین تأثیر قابل توجهی بر وقوع فرسایش خندقی دارند. با توجه به این پژوهش مناطق با شیب تندتر، فاصله کمتر از رودخانه و پوشش گیاهی کمتر، بیشتر در معرض خطر فرسایش خندقی قرار دارند. نتایج نشان داد که مدل LDA در مقایسه با مدل QDA، عملکرد بهتری از خود نشان داد و توانست مناطق مستعد فرسایش خندقی را با دقت بیشتری شناسایی کند. همان‌گونه که در قبل بیان شد فرسایش خندقی یکی از چالش‌های جدی در حفاظت از منابع آب و خاک است. حوضه آبخیز کلوچه در شهرستان بیجار به دلیل گستردگی و شدت فرسایش خندقی، به‌عنوان یک منطقه مطالعاتی مناسب انتخاب شده است. باوجود اهمیت این موضوع، تاکنون مطالعات کمی در خصوص مدل‌سازی فرسایش خندقی در این حوضه انجام شده است. هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل پیش‌بینی کننده مبتنی بر داده است که بتواند روند زمانی و مکانی توسعه فرسایش خندقی در مناطق نیمه‌خشک شمال غرب ایران را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

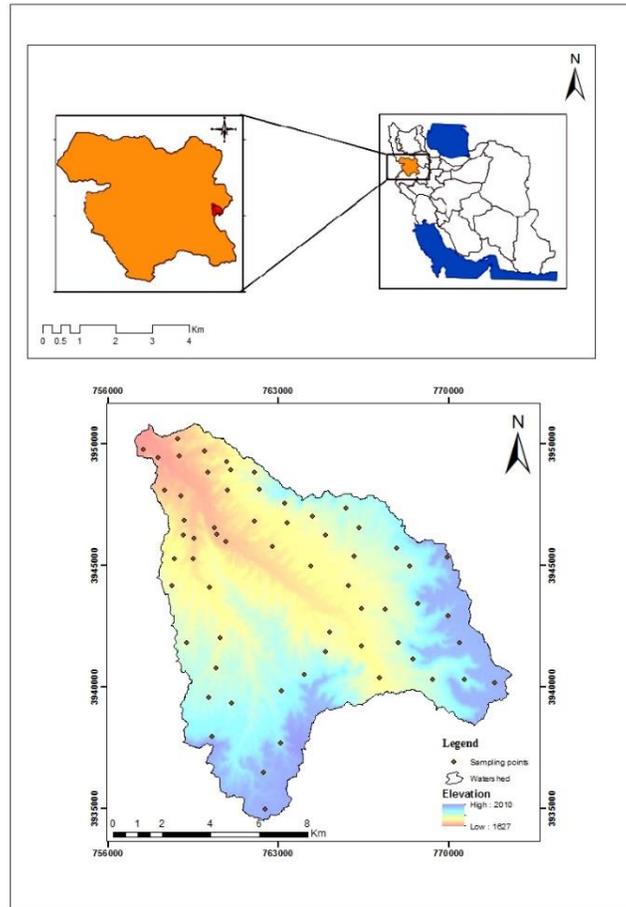
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش بخشی از حوضه آبخیز کلوچه در فاصله حدود ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بیجار در استان کردستان است. این منطقه با مساحت ۱۳۱۲۶/۹۲ هکتار در محدوده مرزی استان‌های کردستان و همدان واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه به ترتیب ۱۶۳۰ و ۲۰۰۵/۳ متر از سطح دریا و ارتفاع متوسط آن نیز ۱۸۲۱/۱ متر از سطح دریا می‌باشد. شیب حداقل، حداکثر و متوسط این منطقه به ترتیب صفر، ۵۸/۶۰ و ۸/۰۵ درجه محاسبه شده است. از نظر هیدرولوژیکی حوضه آبخیز کلوچه یکی از سرشاخه‌های رودخانه سفیدرود از زیر حوضه‌های حوضه دریای خزر می‌باشد. اقلیم منطقه بر اساس روش



طبقه‌بندی آمبرژه، جزو اقلیم مرطوب معتدل محسوب می‌گردد. میزان بارش حوضه ۳۱۴ میلی‌متر است. میانگین درجه حرارت سالانه حوضه نیز  $8/3^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی منطقه به ترتیب زیریک و مزیک بوده و خاک‌های غالب منطقه به‌طور عمده در زیرگروه Lithic Xerorthents، Typic Xerorthents، Typic Calcixerepts و Typic Haploxerepts طبقه‌بندی شده است. کاربری‌های غالب منطقه نیز شامل اراضی دیم، باغ و مراتع می‌باشد (سازمان محیط‌زیست، ۱۳۸۷). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه و مکان خندق‌های مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه.

### نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش با استفاده از منابع، اطلاعات و نقشه‌های موجود ۶۲ نقطه با توزیع مکانی تصادفی در منطقه مورد مطالعه شناسایی گردید. سپس، با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، موقعیت دقیق این نقاط در عرصه تعیین شد و از هر نقطه، نمونه‌ای



تا عمق ۳۰ سانتی‌متر از سطح خاک برداشت شد. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه و پس از طی مراحل هوا خشک کردن، کوبیدن و حذف کردن بقایای گیاهی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و جهت انجام تجزیه‌های آزمایشگاهی آماده گردید.

### اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های خاکی

در این پژوهش برای تعیین توزیع اندازه ذرات و بافت خاک از روش هیدرومتری و الک استفاده گردید (Gee and Or, 2002). چگالی ظاهری و حقیقی خاک به ترتیب با استفاده از روش‌های استوانه و پیکنومتر تعیین شد (Flint and Flint, 2002). کربن آلی خاک (SOC) به روش و الکلی بلک و مقدار کربنات کلسیم معادل خاک نیز از روی واکنش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک و سپس تیتراسیون با سود اندازه‌گیری شد (Sparks et al., 1996). تخلخل کل خاک (f) با بهره‌گیری از چگالی ظاهری ( $\rho_b$ ) و حقیقی خاک ( $\rho_s$ ) و با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (Flint and Flint, 2002).

$$f = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (1)$$

برای کلسیم و منیزیم محلول خاک از روش کمپلکسومتری و سدیم و پتاسیم محلول از دستگاه فلیم‌فتومتر استفاده شد (Sparks et al., 1996). با اندازه‌گیری غلظت‌های سدیم و کلسیم و منیزیم محلول در خاک و بهره‌گیری از رابطه زیر نسبت جذبی سدیم (SAR) محاسبه شد:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}} \quad (2)$$

در این رابطه غلظت‌ها برحسب میلی‌اکی والان بر لیتر می‌باشد. پایداری خاکدانه در خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر بر اساس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب به روش الک تر (Angers and Mehuys, 1993)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها به روش بار ثابت (McKenzie et al., 2002) تعیین شدند.

### نتایج و بحث:

#### ویژگی‌های خاک‌ها

برخی خصوصیات آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های گرفته شده از خاک سطحی در جدول (۱) نشان داده شده است. درصد رس در این نمونه‌ها بین ۷/۶۰ تا ۳۹/۴۰ درصد متغیر است. میانگین آن ۲۴/۳۹ درصد و انحراف معیار ۷/۴۵ درصد می‌باشد. میزان سیلت نیز بین ۳/۰۹ تا ۵۸/۳۱ درصد با میانگین ۳۹/۹۱ درصد و انحراف معیار ۱۱/۰۶ درصد متغیر است. این درحالی است که میانگین درصد شن در نمونه‌ها ۳۵/۶۹ درصد بوده و دامنه تغییرات آن بین ۷/۹۷ تا ۸۹/۳۰ درصد می‌باشد. با توجه به مقادیر بالای سیلت در اغلب نمونه‌ها و فرسایش‌پذیری بالای ذرات سیلت، می‌توان انتظار داشت که خاک‌های مورد مطالعه به‌طور کلی فرسایش‌پذیری بالایی داشته باشند. میانگین جرم ویژه ظاهری و حقیقی خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب در ۱/۳۱ و ۲/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. میانگین میزان ماده آلی در نمونه‌ها ۱/۴۳ درصد با انحراف معیار ۰/۹۲ درصد می‌باشد. نسبت جذبی سدیم (SAR) که نشان‌دهنده خطر سدیمی بودن خاک است، در نمونه‌ها بین ۰/۱۵ تا ۱۲/۵ متغیر بوده است. مقدار کربنات کلسیم معادل در خاک‌ها نیز بین ۹/۹۷ تا ۳۳/۹۷ درصد متغیر است.

<sup>1</sup> Sodium adsorption ratio



جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌ها	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار
رس (%)	۲۴/۳۹	۷/۶۰	۳۹/۴۰	۷/۴۵
سیلت (%)	۳۹/۹۱	۳/۰۹	۵۸/۳۱	۱۱/۰۶
شن (%)	۳۵/۶۹	۷/۹۷	۸۹/۳۰	۱۷/۲۸
شن خیلی ریز (%)	۹/۸۵	۳/۴۳	۱۹/۷۸	۳/۴۴
جرم ویژه حقیقی (gr/cm <sup>۳</sup> )	۲/۵۵	۲/۱۰	۲/۹۹	۰/۲۶
جرم ویژه ظاهری (gr/cm <sup>۳</sup> )	۱/۳۱	۱/۰۴	۱/۸۹	۰/۱۷
مواد آلی (%)	۱/۴۳	۰/۲۰	۵/۵۳	۰/۹۲
نسبت جذبی سدیم (mmole/L)	۰/۷۵	۰/۱۵	۱۲/۵	۱/۹۷
کربن آلی (%)	۰/۸۳	۰/۱۱	۳/۲۰	۰/۵۳
کربنات کلسیم معادل (%)	۲۵/۸۵	۹/۹۷	۳۳/۹۷	۴/۳۳
پتانسیم (mg/L)	۲۹/۴۷	۹/۴۰	۳۹/۳۹	۶/۶۴
سدیم (mg/L)	۳/۴۷	۰/۳۰	۷۷/۷	۱۳/۰۰
پایداری خاکدانه (mm)	۰/۹۸	۳/۳۷	۰/۳۹	۰/۴۷
هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/h)	۱/۲۵	۴/۵۴	۰/۱۸	۰/۹۲

### همبستگی بین خصوصیات خاک

بررسی‌های همبستگی بین ویژگی‌های خاک و فرسایش خندقی نشانگر روابط آماری معنی‌داری است. یافته‌ها حاکی از آن است که شن ( $r=-0.429, p<0.01$ )، ماده آلی ( $r=-0.264, p<0.05$ )، کربن آلی ( $r=-0.264, p<0.05$ )، پایداری خاکدانه ( $r=-0.270, p<0.05$ ) و هدایت هیدرولیکی اشباع ( $r=-0.635, p<0.01$ )، همبستگی منفی و معنی‌داری با فرسایش خندقی دارند. این بدان معناست که با افزایش این پارامترها، پتانسیل فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، شن با بهبود تخلخل و نفوذپذیری و ماده آلی با افزایش پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک، مقاومت خاک را در برابر نیروهای برشی آب افزایش می‌دهند. هدایت هیدرولیکی اشباع بالا نیز با تسهیل نفوذ آب، از تمرکز رواناب سطحی و توسعه خندق‌ها جلوگیری می‌کند. در مقابل، سیلت ( $r=0.611, p<0.01$ ) همبستگی مثبت و معنی‌داری با فرسایش خندقی نشان می‌دهد. خاک‌های با درصد سیلت بالاتر، مستعدترین حالت برای فرسایش خندقی هستند؛ زیرا ذرات سیلت به راحتی توسط جریان آب حمل شده و تمایل به تشکیل لایه‌های سطحی با نفوذپذیری پایین دارند که این امر رواناب سطحی و شدت فرسایش را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، خاک‌های با سیلت بالا، ماده آلی کم و پایداری خاکدانه ضعیف، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر فرسایش خندقی نشان می‌دهند. در نتیجه، افزایش محتوای ماده آلی و بهبود ساختمان خاک از طریق ارتقاء پایداری خاکدانه و افزایش نفوذپذیری، راهکارهای مؤثری برای کاهش فرسایش پذیری خاک در برابر فرسایش خندقی خواهند بود. در بسیاری از مطالعات، بیشترین فرسایش‌پذیری خاک در خاک‌هایی مشاهده شده است که عمدتاً حاوی سیلت هستند (Bonilla and Johnson, 2012). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که عوامل متعددی بر فرسایش خاک تأثیرگذارند و Poesen و همکاران (۱۹۹۴) بیان کردند که پوشش‌های متشکل از شن و سیلت می‌توانند در جریان رواناب اختلال ایجاد کنند. همچنین، اندازه خاکدانه‌ها نیز در میزان نفوذ آب به خاک مؤثر است؛ هرچه اندازه خاکدانه کوچک‌تر باشد، سرعت نفوذ آب به داخل خاک کاهش می‌یابد (Wei et al., 2020; Yu et al., 2017). در بسیاری از پژوهش‌ها، به دلیل نقش ماده آلی در حفاظت فیزیکی و شیمیایی خاک، همبستگی مثبتی بین ماده آلی و پایداری خاکدانه مشاهده شده است. برای مثال، Evrendilek و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند که ماده آلی نقش مهمی در افزایش اندازه و پایداری خاکدانه‌ها ایفا می‌کند.



جدول ۲. همبستگی (r) بین ویژگی‌های خاک

	Cl	Si	Sa	BD	OM	SAR	OC	SP	MWD <sub>wet</sub>	Ks	K
Cl	1										
Si	0.731**	1									
Sa	-0.900**	-0.956**	1								
BD	-0.520**	-0.504**	0.547**	1							
OM	0.409**	0.325*	-0.384**	-0.301*	1						
SAR	0.061	0.133	-0.111	0.085	-0.087	1					
OC	0.409**	0.325*	-0.384**	-0.301*	1.000**	-0.087	1				
SP	0.478**	0.308*	-0.403**	-0.173	0.237	0.202	0.237	1			
MWD <sub>wet</sub>	-0.143	-0.217	0.201	-0.035	-0.021	0.220	-0.021	-0.230	1		
Ks	-0.316*	-0.474**	0.439**	-0.192	-0.131	0.029	-0.131	-0.099	0.577**	1	
K	0.087	0.611**	-0.429**	0.006	-0.264*	0.170	-0.264*	-0.032	-0.270*	-0.635**	1

\*: معنی‌داری در سطح ۵ درصد، \*\*: معنی‌داری در سطح ۱ درصد

Cl: رس، Si: سیلت، Sa: شن، BD: چگالی ظاهری، OM: ماده آلی، OC: کربن آلی، SP: درصد اشباع خاک، MWD<sub>wet</sub>: تغییرات پایداری خاکدانه، Ks: تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع و K: عامل فرسایش خاک).

### رابطه بین فرسایش‌پذیری و خواص خاک

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است رگرسیون‌های چندگانه گام‌به‌گام به‌طور قابل‌توجهی باعث کاهش متغیرهای خاک شد و در نهایت فرسایش‌پذیری خاک به پایداری خاکدانه‌ها، مقدار ماده آلی، درصد سیلت و شن و همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با ضریب تبیین معادل  $R^2=94\%$  مرتبط بود که در رابطه زیر نشان داده شده است: (۱).

$$K = -0.048 + 0.001MWD_{wet} - 0.004OC + 0.002Silt + 0.001Sand - 0.002Ks \quad R^2 = 0.94, P < 0.001 \quad (۱)$$

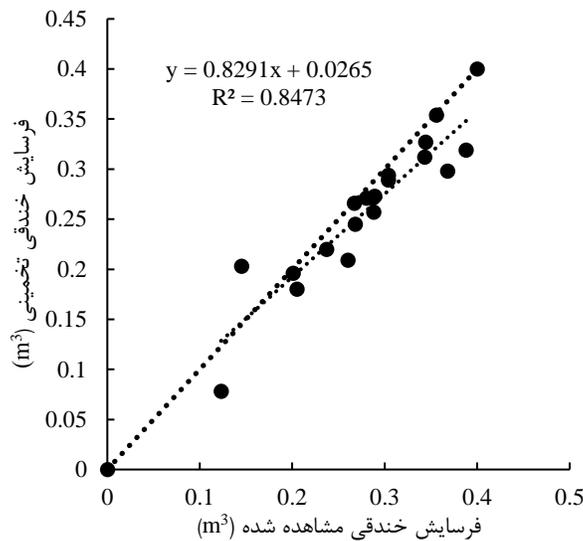
که در آن K فرسایش‌پذیری خاک ( $t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$ )، MWD<sub>wet</sub> پایداری خاکدانه‌ها (mm)، OC مقدار ماده آلی (/)، Silt درصد سیلت، Sand درصد شن و Ks هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $cm.h^{-1}$ ) است. این مدل پیشنهادی توانست حدود ۹۴ درصد از واریانس فرسایش‌پذیری را در خاک‌های مورد مطالعه تبیین کند. به‌طور کلی، خاک‌هایی که حاوی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایین و درصد سیلت و شن بالایی هستند، حتی از طریق جریان‌های سطحی کم‌عمق و ضعیف به‌راحتی قابل شستشو هستند. چنین خاک‌هایی حساسیت بیشتری نسبت به تولید رواناب و فرسایش نشان دادند.

جدول ۴ - تحلیل رگرسیون چندگانه رابطه بین فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها.

	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients		
	B	Std. Error	Beta	t	Sig
Constant	-0.363	0.057		-6.341	0.000
Silt	0.012	0.001	2.011	13.898	0.000
Sand	0.006	0.001	1.522	10.547	0.000
OM	-0.031	0.003	-0.380	-8.943	0.000
MWD <sub>wet</sub>	-0.009	0.007	-0.062	-1.168	0.250
Ks	-0.016	0.002	-0.507	-8.932	0.000



پایداری کم خاکدانه‌ها، بافت سبک خاک و کمبود مواد آلی این عوامل باعث کاهش مقاومت خاک در برابر نیروهای فرسایشی شده و منجر به تخریب سریع‌تر خاک می‌شوند. در این شرایط جریان‌های سطحی کم‌عمق و ضعیف نیز می‌توانند باعث فرسایش چنین خاک‌های حساسی شوند. از دست رفتن بیش‌ازحد خاک منجر به کاهش محتوای کربن آلی خاک (SOC) و تخریب کیفیت خاک شده و در نتیجه پایداری خاکدانه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Yan et al., 2018). Luo و همکاران (۲۰۱۶) و Zhang و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که فعالیت‌های کشاورزی فشرده و غیراصولی، گسترش مناطق بیابانی سنگی، کاهش پوشش گیاهی و تخریب جدی خاک را به دنبال دارد. همچنین، استفاده نادرست از زمین در گذشته، منجر به فرسایش شدید خاک و در نتیجه از بین رفتن پایداری خاکدانه‌ها شده است.



شکل ۲- ارزیابی عملکرد مدل در پیش‌بینی قابلیت فرسایش‌پذیری خاک

به منظور ارزیابی عملکرد مدل در پیش‌بینی فرسایش خندقی، از ۳۰ درصد از مکان‌های فرسایش خندقی باقی‌مانده استفاده گردید که به طور تصادفی انتخاب شده و قبلاً در فرایند مدل‌سازی لحاظ نشده بودند. نمودار شکل ۲، نتایج این ارزیابی را به تصویر می‌کشد و نشان می‌دهد که مدل از عملکرد بسیار خوبی برخوردار است. ضریب تعیین ( $R^2$ ) حدود ۰/۸۴۷۳، بیانگر قدرت بالای مدل در توضیح تغییرات فرسایش خندقی تخمینی بر اساس فرسایش خندقی مشاهده شده است. این مقدار بالا حاکی از توانایی چشمگیر مدل در پیش‌بینی دقیق فرسایش خندقی است.

### نتیجه‌گیری:

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌طور مستقیم بر میزان فرسایش‌پذیری خاک تأثیرگذار هستند. وجود همبستگی منفی بین فرسایش‌پذیری و ویژگی‌هایی مانند ماده آلی، پایداری خاکدانه و هدایت هیدرولیکی اشباع، حاکی از آن است که افزایش مقدار ماده آلی خاک به بهبود خاکدانه‌سازی و افزایش پایداری خاکدانه‌ها و افزایش نفوذپذیری و هدایت آب در خاک می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی از وقوع فرسایش جلوگیری کند. از سوی دیگر، نتایج همبستگی مثبت و معنی‌دار بین سیلت و فرسایش‌پذیری، بر نقش حیاتی این جزء خاک در افزایش آسیب‌پذیری اراضی تأکید می‌کند. خاک‌های سیلty، به دلیل اندازه ذرات ریز و فضای خالی کمتر بین آن‌ها، نفوذپذیری پایینی دارند. در نتیجه، آب باران به‌جای نفوذ در خاک، به‌صورت رواناب سطحی جاری می‌شود. این رواناب، با حمل ذرات



خاک، منجر به تشدید فرسایش می‌گردد. در مقابل، خاک‌های شنی به دلیل اندازه ذرات درشت‌تر، دارای تخلخل بیشتری بوده و آب به راحتی در آن‌ها نفوذ می‌کند که این امر، پتانسیل فرسایش را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، وجود ماده آلی در خاک باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها، به بهبود ساختمان خاک می‌شود. این یافته‌ها به وضوح بر اهمیت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مقاومت آن در برابر فرسایش تأکید داشته و می‌توانند در راهبردهای مدیریت خاک و پیشگیری از فرسایش مورد استفاده قرار گیرند.

## فهرست منابع

1. Arabameri, A., Pourghasemi, H. R. (2019). 13 - Spatial Modeling of Gully Erosion Using Linear and Quadratic Discriminant Analyses in GIS and R (H. R. Pourghasemi & C. B. T.-S. M. in G. I. S. and R. for E. and E. S. Gokceoglu (eds.); pp. 299–321). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00013-2>
2. Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei-Sardooi, E., Sankey, J. B., Lee, S., Shahabi, H., Ahmad, B. Bin. (2019). Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Science of The Total Environment*, 655, 684–696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.235>
3. Angers, D.A., Mehuys, G.R. (1993). Aggregate stability to water. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, pp: 651–657.
4. Bonilla, C. A., Johnson, O. I. (2012). Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, 189, 116–123.
5. Garosi, Y., Sheklabadi, M., Pourghasemi, H. R., Besalatpour, A. A., Conoscenti, C., Van Oost, K. (2018). Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*, 330, 65–78.
6. Gholami, H., Mohammadifar, A., Golzari, S., Song, Y., Pradhan, B. (2023). Interpretability of simple RNN and GRU deep learning models used to map land susceptibility to gully erosion. *Science of the Total Environment*, 904, 166960.
7. Gee, G.W., D. Or. (2002). Particle-size analysis. p. 255-293. In J.H. Dane and G.C. Topp (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Sci. Am. Book Series No. 5. ASA and SSSA, Madison, WI
8. Flint, A.L., L.E. Flint. (2002). Particle density. p. 229-240. In- J.H. Dane and G.C. Topp (eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods*. Soil Sci. Am. Book Series No. 5. ASA and SSSA, Madison, WI.
9. Hitouri, S., Meriame, M., Sk Ajim, A., Renata Pacheco, Q., Nguyen-Huy, T., Quoc Bao, P., ElKhrachy, I., Varasano, A. (2024). Gully erosion mapping susceptibility in a Mediterranean environment: A hybrid decision-making model. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 279–297. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.09.008>
10. Imwangana, F. M., Dewitte, O., Ntombi, M., Moeyersons, J. (2014). Topographic and road control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). *Geomorphology*, 217, 131–139.
11. McKenzie, N., Coughlan, K., Cresswell, H. (2002). *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation (Vol. 5)*. CSIRO publishing.
12. Liu, C., Fan, H., Wang, Y. (2024). Gully erosion susceptibility assessment using three machine learning models in the black soil region of Northeast China. *CATENA*, 245, 108275.
13. Luo, M., Chen, Z., Zhou, H., Jakada, H., Zhang, L., Han, Z., Shi, T. (2016). Identifying structure and function of karst aquifer system using multiple field methods in karst trough valley area, South China. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-13.
14. Page, A.L., Miller, R.H. Keeney, D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Inc, Soil Science, America. Madison, Wisconsin. United States of America.
15. Poesen, J. W., Torri, D., Bunte, K. (1994). Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *Catena*, 23(1–2), 141–166.
16. Rahmati, O., Kalantari, Z., Ferreira, C. S., Chen, W., Soleimanpour, S. M., Kapović-Solomun, M., Seifollahi-Aghmiuni, S., Ghajarnia, N., Kazemi Kazemabady, N. (2022). Contribution of physical and anthropogenic factors to gully erosion initiation. *CATENA*, 210, 105925.



17. Valentin, C., Poesen, J., Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2–3), 132–153.
18. Wang, J., Wei, H., Cheng, K., Ochir, A., Davaasuren, D., Li, P., Shun Chan, F. K., Nasanbat, E. (2020). Spatio-Temporal Pattern of Land Degradation from 1990 to 2015 in Mongolia. *Environ Dev* 34: 100497.
19. Wei, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Cui, T., Guo, Z., Cai, C., Li, Z. (2022). Analysis of gully erosion susceptibility and spatial modelling using a GIS-based approach. *Geoderma*, 420, 115869.
20. Wei, Y., Wu, X., Zeng, R., Cai, C., Guo, Z. (2020). Spatial variations of aggregate-associated humic substance in heavy-textured soils along a climatic gradient. *Soil and Tillage Research*, 197, 104497.
21. Walkley, A., I. A. Black. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1), 29-38.
22. Yu, Z., Zhang, J., Zhang, C., Xin, X., Li, H. (2017). The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability. *Soil and Tillage Research*, 174, 251–260.
23. Yan, Y., Dai, Q., Yuan, Y., Peng, X., Zhao, L., Yang, J. (2018). Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China. *Geoderma*, 330, 30-40.
24. Zhang, S., Guo, M., Liu, X., Chen, Z., Zhang, X., Xu, J., Han, X. (2024). Historical evolution of gully erosion and its response to land use change during 1968–2018 in the Mollisol region of Northeast China. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 388–402.
25. Zhang, Y., Li, Y., Luo, G., Bai, X., Huang, J., Tang, F., Yu, M. (2022). Analysis of the land use dynamics of different rural settlement types in the Karst Trough Valleys of Southwest China. *Land*, 11(9), 1572.

### Investigation of factors affecting the development of gully erosion in semi-arid regions of northwestern Iran

Fereshteh Haghshenas<sup>1\*</sup>, Masoud Davari<sup>2</sup>

- 1- Corresponding author and PhD student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan. \* Corresponding author: fereshtehh74@gmail.com
- 2- Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan.

#### Abstract

Gully erosion is recognized as a serious threat to the environment and natural resources, including soil, water, and vegetation in watersheds. This phenomenon, by creating deep and extensive furrows on the ground, leads to the loss of fertile soil, pollution of water resources, and destruction of vegetation. The present research aims to develop a data-driven predictive model capable of forecasting the temporal and spatial development of gully erosion in semi-arid regions within the Koloocheh watershed. In this study, soil samples were initially collected randomly from 62 points in the study area using existing maps and information, and then prepared in the laboratory. Subsequently, various physical and chemical soil properties such as texture, bulk density, organic matter, calcium carbonate, porosity, erodibility, calcium, magnesium, sodium, and potassium were measured. Standard laboratory methods were used for these measurements. Correlation results showed that sand, organic matter, organic carbon, aggregate stability, and saturated hydraulic conductivity have a significant negative correlation with erodibility, meaning that an increase in these factors leads to a decrease in erodibility. In contrast, silt has a significant positive correlation with erodibility. Multiple regression analysis also confirmed that aggregate stability, organic matter content, silt and sand content, and saturated hydraulic conductivity of the soil all together have a significant effect on soil erodibility, explaining approximately 94% of its variations ( $R^2=0.94$ ). Specifically, soils with low aggregate stability, low organic matter content, high silt and sand content, and low saturated hydraulic conductivity are more susceptible to erosion.

**Keywords:** Aggregate stability, organic matter, silt, saturated hydraulic conductivity, semi-arid regions.