نموگرافی جدید برای برآورد عامل فرسایش‌پذیری (K) در بخشی از خاک‌های نواحی نیمه‌خشک در شمال‌غربی ایران

علیرضا واعظی[۱*]، حسینعلی بهرامی[۱]، سیدحمیدرضا صادقی[۲] و محمدحسین مهدیان[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۹/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱/۱۸)

چکیده

ارزیابی مناسب عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) برای پیش‌بینی قابل اطمینان فرسایش آبی حائز اهمیت است. در این پژوهش، عامل فرسایش‌پذیری خاک در ۹۰۰ کیلومتر مربع از خاک‌های شهرستان هشترود واقع در ناحیه نیمه‌خشک شمال غربی ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری مقدار هدررفت خاک در ۳۶ زمین مختلف در کرت‌های استاندارد تحت باران‌های طبیعی از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ نشان داد که مقدار عامل فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده ۸/۷۷ برابر کمتر از مقدار برآوردی با نموگراف USLE است. برای دست‌یابی به نموگراف جدید، هم‌بستگی بین عامل فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های خاک‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که شن درشت، رس، ماده آلی، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک، هم‌بستگی منفی معنی‌دار و شن بسیار ریز و سیلت، هم‌بستگی مثبت معنی‌دار با عامل فرسایش‌پذیری خاک دارند. نتایج تجزیه مولفه‌های اصلی و رگرسیون چند متغیره نشان داد که نفوذپذیری خاک، پایداری خاکدانه، آهک و شن درشت رابطه‌ای معنی‌دار (R^2=۰/۹۲) با فرسایش‌پذیری دارند. برای برآورد آسان عامل فرسایش‌پذیری، نموگرافی بر اساس عوامل مذکور با ضریب تبیین ۹۲ درصد تهیه شد. از این نموگراف در مناطقی که دارای ویژگی خاک و باران مشابه با منطقه مورد بررسی باشند، برای برآورد مطمئن عامل فرسایش‌پذیری خاک می‌توان بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: عامل فرسایش‌پذیری خاک، ناحیه نیمه‌خشک، نموگراف جدید، ایران

۱. به ترتیب دانشجوی سابق دکتری و دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. دانشیار آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. استادیار پژوهشی سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vaezi.alireza@gmail.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

مقدمه

فرسایش‌پذیری خاک یکی از عوامل شش‌گانه مؤثر در فرسایش آبی در رابطه جهانی فرسایش خاک (USLE) است. این عامل نشان‌دهنده سهولت جداشدن ذرات خاک در اثر ضربه قطرات باران و نیروی رواناب است (۲۷). بر اساس مدل USLE، مقدار عامل فرسایش‌پذیری (K) از مقدار هدررفت خاک از کرت استاندارد در واحد عامل فرسایندگی باران به دست می‌آید (۳۰). کرت استاندارد یا کرت واحد عبارت از زمینی با شیب ۹ درصد، به عرض ۱/۸۳ و طول ۲۲/۱ متر است که در جهت شیب شخم خورده و سطح آن بدون پوشش گیاهی و بقایایی آن است. بررسی‌ها در خاک‌های نواحی نیمه‌مرطوب آمریکای مرکزی نشان داد که فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر پنج ویژگی خاک (درصد شن، مجموع درصد سیلت و شن بسیار ریز، درصد ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری) قرار دارد. بر این اساس، نموگراف USLE توسط ویشمایر و اسمیت (۲۸) برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک ارائه شد.

مطالعات گسترده‌ای در مورد ارزیابی نموگراف USLE و تعیین عوامل مؤثر بر فرسایش‌پذیری انجام گرفت. مطالعات رجمن و همکاران (۲۱) در لهستان، ژانگ و همکاران (۳۰) در چین و حسین و همکاران (۱۴) در عراق نشان دادند که نموگراف USLE مقدار فرسایش‌پذیری را به طور معنی‌داری بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. پژوهش‌های مختلف نشان‌دهنده تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک بر فرسایش‌پذیری (K) هستند. در بررسی‌های کیرکبای و مورگان (۱۶) و سانتوس و همکاران (۲۳) اثر ذرات معدنی خاک بر فرسایش‌پذیری به روشنی اثبات شده است. در گزارش‌های اورتس و همکاران (۲۰) و دایکر و همکاران (۸)، اهمیت آهک در ساختمان خاک و فرسایش‌پذیری بیان شده است. نتایج پژوهش‌های قادری و قدوسی (۴)، اورندلیک و همکاران (۹) و رودریگز و همکاران (۲۲) بیانگر نقش ماده آلی در افزایش مقاومت خاک و کاهش فرسایش‌پذیری است. در گزارش‌های شواب و همکاران (۲۴) و آنژیما و همکاران (۶) اهمیت پایداری ساختمان خاک در کاهش فرسایش‌پذیری خاک بیان بیان شده است. نتایج بررسی‌های سیگریست و همکاران (۲۶) و یو و همکاران (۲۹) نیز نشان‌دهنده نقش نفوذپذیری در کاهش رواناب و فرسایش‌پذیری است.

حدود ۳۹ درصد سطح کشور دارای میانگین بارندگی سالانه بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر بوده و بر اساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک هستند (۲). با توجه به تفاوت در ویژگی‌های خاک و باران در این نواحی نسبت به نواحی نیمه‌مرطوب محل ارائه نموگراف USLE، کاربرد آن ممکن است برآورد غیرمطمئنی از فرسایش‌پذیری را ارائه دهد (۳). بنابراین این پژوهش بر اساس اندازه‌گیری هدررفت خاک تحت باران طبیعی، به منظور ارزیابی نموگراف USLE در برآورد فرسایش‌پذیری خاک در ناحیه‌ای نیمه‌خشک از کشور انجام گرفت تا درصورت عدم دقت نموگراف USLE، تلاش شود نموگرافی جدید برای خاک‌های ناحیه نیمه‌خشک مورد بررسی ارائه گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش، شهرستان هشترود، در شمال‌غربی ایران واقع در جنوب استان آذربایجان شرقی انتخاب شد. این منطقه بر اساس منحنی آمبروترمیک منطقه، دارای آب و هوای نیمه خشک سرد با میانگین بارندگی سالانه ۳۴۰ میلی‌متر است. خاک‌ها بر اساس روش تاکسونومی خاک (Soil Taxonomy U.S.D.A) در سه رده انتی‌سول، اینسپتی‌سول و مالی‌سول قرار دارند. خاک‌ها اغلب با بافت لوم رسی و نفوذپذیری متوسط هستند و به طور متوسط دارای یک درصد ماده آلی و ۱۰ درصد آهک می‌باشند. خاک‌های زراعی عمدتا در شیب‌های بین ۵ تا ۱۵ درصد قرار گرفته‌اند و زیر کشت دیم گندم قرار دارند (۱). برای بررسی عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) بر اساس USLE، منطقه‌ای به مساحت ۹۰۰ کیلومتر مربع در شمال شهرستان هشترود در نظر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

گرفته شد. این منطقه از یکسو بر اساس نقشه قابلیت اراضی شهرستان برای دست‌یابی به خاک‌های با ویژگی‌های مختلف و از سوی دیگر برای امکان یافتن زمین‌های دیم تحت آیش با شیب ۹ درصد مورد توجه قرار گرفت. فرسایش‌پذیری خاک (K)، در ۳۶ شبکه مربعی شکل به ابعاد ۵ کیلومتر مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و شبکه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در هر شبکه یک قطعه زمین دیم در حال آیش که دارای شیب یک‌نواخت ۹ درصد و رو به جنوب بود، در نظر گرفته شد. شیب‌های رو به جنوب از این نظر انتخاب شدند که به دلیل تبخیر بالا، رطوبت اولیه خاک در آنها پایین است و نفوذپذیری خاک، کمتر تحت تأثیر رطوبت اولیه قرار می‌گیرد. برای دست‌یابی به شیب‌های ۹ درصد و رو به جنوب، نقشه اندازه و جهت شیب با استفاده از نرم افزار Ilwis نسخه ۳ تهیه وبا استفاده از سیستم مکان‌یاب جهانی(Global Positioning System) محل آنها در منطقه مشخص شد.

تعیین فرسایش‌پذیری خاک

فرسایش‌پذیری خاک (K) بر اساس نموگراف USLE، با تعیین پنج ویژگی خاک موجود در نموگراف برآورد شد و بر اساس هدررفت خاک از کرت استاندارد یا کرت واحد (A) در واحد عامل فرسایندگی باران (R) اندازه‌گیری شد (۲۸):

$$A = RKLSCP \Rightarrow \text{در کرت استاندارد} \Rightarrow A = RK \Rightarrow K = \frac{A}{R} \quad [۱]$$

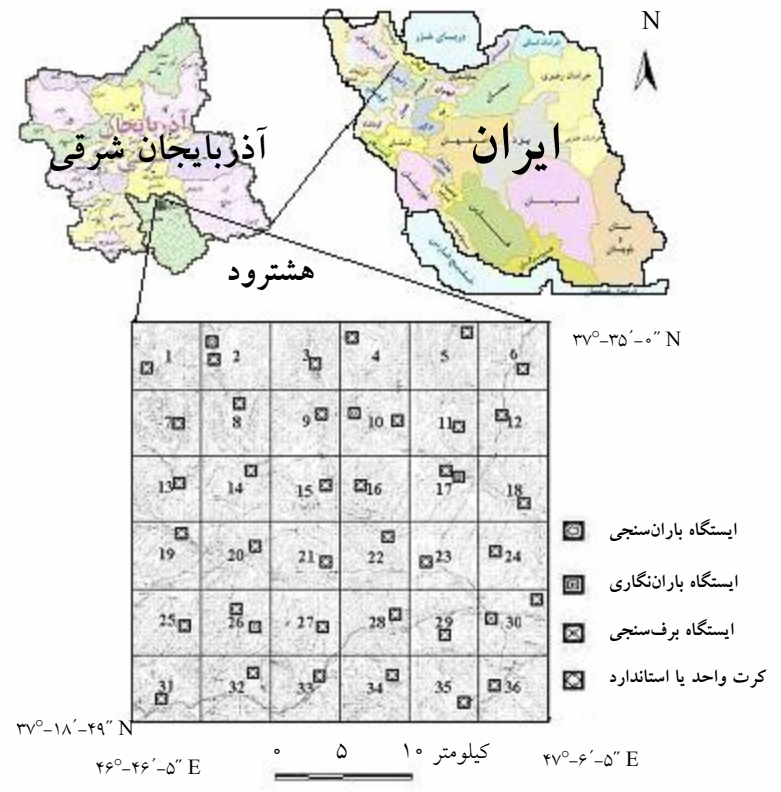
مقدار هرررفت خاک در کرت‌ها (A) بر حسب تن در هکتار در سال تعیین شد. مقدار عامل فرسایندگی باران (R) نیز بر اساس آمار ایستگاه باران‌نگاری واقع در شبکه ۱۷، از مجموع شاخص‌های فرسایندگی باران طی سال ($R=\sum EI_{۳۰}$) بر حسب $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ year^{-1}$ (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال) با روش ویشمایر و اسمیت (۲۸) به دست آمد. یک‌نواختی توزیع باران در سطح منطقه، بر اساس داده‌های باران ایستگاه باران‌نگاری شبکه ۱۷ همراه با آمار سه ایستگاه بارن‌سنجی واقع در شبکه‌های ۲، ۱۰ و ۲۶ بررسی شد (شکل ۱). برای تعیین هدررفت خاک در کرت واحد، خاک‌ها در آغاز بهار ۱۳۸۴ در جهت شیب شخم و دیسک زده شد و بقایای گیاهی سطح آنها جمع‌آوری شد. در اثر عملیات شخم و دیسک، غیریک‌نواختی جزئی سطح زمین‌ها برطرف شد. سپس تعداد سه کرت به عرض ۱/۸۳ متر و به طول ۲۲/۱ متر با فاصله ۱/۲ متر در هر زمین و مجموعا تعداد ۱۰۸ کرت واحد در سطح منطقه ایجاد گردید. در پیرامون کرت‌ها، پشته‌های خاکی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ایجاد شد. به منظور اندازه‌گیری رسوب (هدررفت خاک)، در انتهای هر کرت لوله‌ای ۵ اینچی از جنس پلیکا و مخزنی با حجم ۷۰ لیتر (۲۱) قرار داده شد. شکل۲ نمای گرافیکی از کرت‌های واحد و وسایل جمع‌آوری رواناب و رسوب را نشان می‌دهد. مقدار رواناب و رسوب در رخدادهای طبیعی باران طی سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ در کرت‌ها اندازه‌گیری شد. برای این منظور پس از پایان هر بارندگی منجر به رواناب، ابتدا حجم کل مخلوط رواناب و رسوب مخزن‌ها به وسیله ظرفی با حجم معین اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ای با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط یک‌نواخت داخل مخزن‌ها (۱۴) برداشت و در آزمایشگاه پس از جداسازی رسوب با کاغذ صافی و خشک کردن در آون، وزن رسوب آنها مشخص گردید. با تعیین غلظت رسوب هر نمونه، مقدار کل رسوب هر کرت در هر رگبار و نیز به طور سالانه تعیین شد.

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

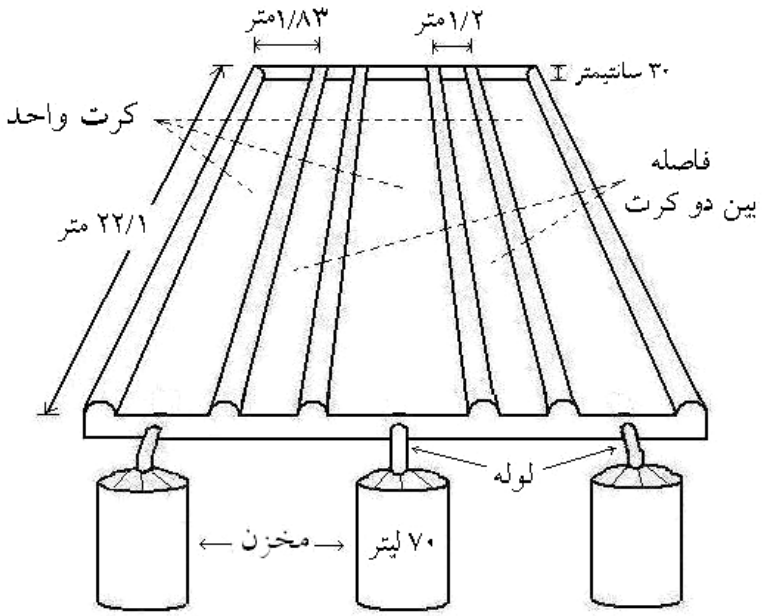
برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، سه نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر از هر کرت تهیه و نمونه‌ای مرکب از آنها فراهم شد. در نمونه‌های خاک، ویژگی‌های خاک که بر اساس بررسی منابع، احتمال تأثیر بر فرسایش‌پذیری خاک داشتند، اندازه‌گیری شدند. در این راستا درصد ذرات معدنی (بافت خاک) به روش پیپت (۱۰)، سنگریزه به روش وزنی، ماده آلی به روش والکلی بلاک (۱۹)، آهک به روش خنثی‌سازی با اسید (۱۱)، پتاسیم با روش استخراج با استات آمونیوم (۱۷) و پایداری خاکدانه بر اساس میانگین وزنی قطر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و شبکه‌های مورد بررسی



شکل ۲. نمای گرافیکی از کرت‌های واحد و وسایل جمع‌آوری رواناب و رسوب

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

خاکدانه (MWD) با روش الک تر (۵) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. نفوذپذیری نیمرخ نیز بر اساس سرعت نفوذ پایه، با روش استوانه‌های مضاعف (۷) در صحرا اندازه‌گیری شد. کد ساختمان خاک و کلاس نفوذپذیری نیمرخ از جدول پیشنهادی USLE (۲۸) تعیین شدند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف و اسمیرنوف (Kolmogorov and Smirnov test) (۲۵) استفاده شد. تفاوت بین مقدار باران‌های منجر به رسوب در ایستگاه‌های سطح منطقه از آزمون دانکن(Duncan test) بررسی شد. تفاوت بین فرسایش‌پذیری برآوردی و اندازه‌گیری شده با آزمون t نمونه‌های جفتی بررسی شد. برای بررسی چگونگی تأثیر ویژگی‌های خاک بر فرسایش‌پذیری، ابتدا ماتریس هم‌بستگی ویژگی‌های خاک و فرسایش‌پذیری تعیین شد. از بین ویژگی‌های مؤثر بر عامل فرسایش‌پذیری، ویژگی‌های اصلی با روش تجزیه مولفه‌های اصلی(Principle Components Analysis) یا PCA (۱۵) تعیین شدند. ویژگی‌های اصلی عبارت از ویژگی‌هایی از خاک منطقه هستند که تغییرات فرسایش‌پذیری در منطقه عمدتاً به آنها وابسته است. برای مدل‌سازی فرسایش‌پذیری، رابطه رگرسیونی چند متغیره بین فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های اصلی تعیین شد. با استفاده از این معادله بر اساس میزان تأثیر هر یک از عوامل رابطه بر عامل فرسایش‌پذیری خاک، نموگرافی تهیه شد. در این راستا ابتدا تأثیر مهم‌ترین عوامل بر فرسایش‌پذیری، در شکلی گرافیکی ترسیم شد و تغییرات مقدار آن عوامل در منطقه در آن شکل بیان شد. سپس بر اساس نحوه تأثیر عامل (افزایشی یا کاهشی)، منحنی‌هایی ترسیم شد و نموگراف اولیه به دست آمد. نموگراف نهایی با گنجاندن عوامل دیگر معادله، به منظور بالا بردن دقت برآورد تکمیل شد. برای انجام امور آماری از نرم افزار SPSS نسخه ۱۳ استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه ویژگی‌های خاک نشان داد که خاک‌ها عمدتا دارای بافت لوم رسی (۳۶/۷ درصد شن، ۳۱/۶ درصد سیلت و حدود ۳۲ درصد رس)، با ماده آلی کم (۱/۱ درصد)، سنگریزه متوسط (۹/۹ درصد) و آهکی (۱۲/۷ درصد) هستند. پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های منطقه پایین و بین ۰/۳ و ۱/۹ میلی‌متر بود. خاکدانه‌ها اغلب دانه‌ای با قطر بین ۲ تا ۷ میلی‌متر بودند و کد ساختمانی آنها ۳ بود. نفوذپذیری خاک‌ها، متوسط و میانگین آن در خاک‌های منطقه، ۳/۶ سانتی‌متر در ساعت بود. خاک‌ها بر اساس نفوذپذیری نیمرخ اغلب در کلاس ۳ و در مواردی (خاک‌های شبکه‌های ۲، ۱۱، ۱۳، ۱۹، ۲۵ و ۲۸) در کلاس ۴ قرار گرفتند. جدول۱ میانگین ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

میانگین سالانه مقدار بارندگی در ایستگاه‌ها برابر ۳۲۲ میلی‌متر است. طی سال ۱۳۸۴ از ۵۸ رخداد باران با مدت بیشتر از ۳۰ دقیقه، ۲۳ رخداد و طی سال ۱۳۸۵ نیز از ۳۹ رخداد باران با مدت بیشتر از ۳۰ دقیقه، ۱۸ رخداد منجر به رواناب شدند. میانگین مقدار باران در ۴۱ رخداد منجر به رواناب، در ایستگاه‌های واقع در شبکه‌های ۲، ۱۰، ۱۷ و ۲۶ به ترتیب ۷/۱۵، ۶/۷۶، ۶/۹۷ و ۷/۰۸ میلی‌متر بود. توزیع مقدار باران در ایستگاه‌های بارندگی نرمال بود. تفاوت بین مقدار باران در ایستگاه‌ها نشان داد که مقدار P-Value برابر ۰/۱۲۹ است. در حقیقت مقدار باران در ایستگاه‌های بارندگی تفاوتی معنی‌دار در سطح ۵ درصد نداشت و پراکنش باران در سطح منطقه یک‌نواخت بود. مقدار بارندگی در ۴۱ رخداد منجر به رواناب از ۱/۹ تا ۱۸/۷ میلی‌متر تغییر کرد و مدت بارندگی بین ۰/۵ و ۶/۹۸ ساعت بود. شدت باران در رخدادهای منجر به رواناب نیز بین ۲/۱۱ و ۱۳/۷۸ میلی‌متر در ساعت بود. مقدار عامل فرسایندگی باران (R) در ۵۸ رخداد سال ۱۳۸۴ و در ۳۹ رخداد سال ۱۳۸۵ به ترتیب ۴۳۸/۹۳۷۸ و ۲۲۰/۳۸۷۲ مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت و طی دوره پژوهش ۳۲۹/۶۶ مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال بود.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

جدول ۱. میانگین ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

ویژگی	میانگین	کمترین	بیشترین	انحراف معیار
شن درشت (درصد)	۱۸/۹۱	۹/۹	۲۹/۴	۴/۱۹
شن بسیار ریز (درصد)	۱۷/۸۱	۱۲/۶	۲۵/۸	۳/۲۱
سیلت (درصد)	۳۱/۵۹	۲۰/۲	۴۴/۸	۶/۱۲
رس (درصد)	۳۱/۹۷	۲۰/۸	۴۲/۲	۵/۷۵
سنگریزه (درصد)	۹/۸۹	۵/۳	۱۴/۸	۲/۳۷
ماده آلی (درصد)	۱/۰۹	۰/۷	۲/۱	۰/۲۵
آهک (درصد)	۱۲/۶۶	۴/۱	۲۳/۷	۵/۲۵
پتاسیم (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۳۱۴/۶۸	۲۳۷/۴	۳۹۰/۵	۲۵/۴۱
پایداری خاکدانه (میلی‌متر)	۱/۱۳	۰/۳	۱/۹	۰/۴۴
نفوذپذیری (سانتی‌متر در ساعت)	۳/۵۶	۱/۴	۵/۸	۱/۱۶

مقدار هدررفت خاک (رسوب تولید شده) در ۳۶ زمین مورد بررسی طی دوره پژوهش از ۰/۶۷۳۷ تا ۲/۴۳۱۳ تن در هکتار در سال تغییر کرد و به طور میانگین برابر ۱/۵۱۶۷ تن در هکتار در سال بود. با توجه به این‌که توزیع مکانی بارندگی در سطح منطقه یک‌نواخت بود، تغییرات رسوب در شبکه‌ها به دلیل تغییر در فرسایش‌پذیری خاک آنها بود. مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بر اساس نسبت هدررفت خاک سالانه به میانگین عامل فرسایندگی باران، در ۳۶ شبکه از ۰/۰۰۲۰ تا ۰/۰۰۷۲ تن ساعت در مگاژول میلی‌متر تغییر کرد. مقدار فرسایش‌پذیری برآوردی از نموگراف USLE نیز از ۰/۰۲۵۴ تا ۰/۰۴۹۲ تن ساعت در مگاژول میلی‌متر تغییر کرد. جدول۲ مقدار هدررفت خاک و فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی در منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. توزیع آماری داده‌های فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی نرمال بود.

نتایج نشان داد که مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ در تمام شبکه‌ها کمتر از مقدار برآوردی است. مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در ۳۶ شبکه به طور میانگین ۸/۷۷ برابر کمتر از مقدار برآوردی بود. هم‌بستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی پایین (R^2=۰/۲۱) بود. شکل ۳ هم‌بستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی در ۳۶ شبکه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

بر اساس آزمون t نمونه‌های جفتی، تفاوت بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی در سطح ۰/۰۰۱ معنی‌دار بود. مقدار فرسایش‌پذیری برآوردی نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده، در تحقیقات رجمن و همکاران (۲۱) در لهستان، ژانگ و همکاران (۳۰) در چین و حسین و همکاران (۱۴) در عراق به ترتیب ۶ تا ۱۰، ۳/۳ تا ۸/۴ و ۱۰/۹ تا ۱۲/۷ برابر به دست آمده بود. نتایج این پژوهش، عدم کارآیی نموگراف USLE در برآورد فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه را تأیید می‌کند. دلیل این مسأله را باید تفاوت در نوع عوامل و یا چگونگی تأثیر عوامل بر فرسایش‌پذیری در منطقه نسبت به محل ارائه نموگراف USLE در خاک‌های نواحی نیمه‌مرطوب جستجو کرد.

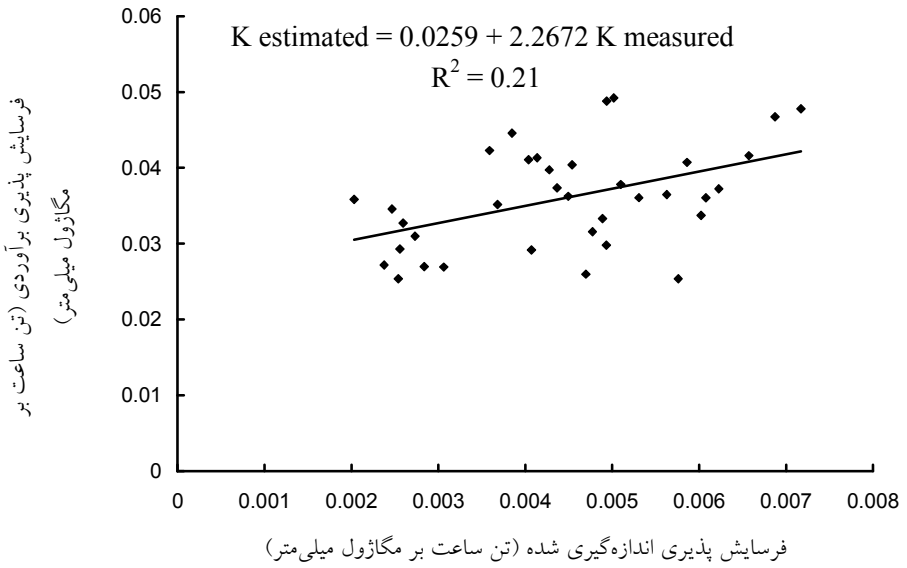
برای دست‌یابی به نوع عوامل مؤثر بر فرسایش‌پذیری و نیز نموگراف جدید فرسایش‌پذیری، ماتریس هم‌بستگی فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که به جز سنگریزه و پتاسیم، سایر ویژگی‌ها، هم‌بستگی معنی‌دار با فرسایش‌پذیری دارند. جدول ۳ ماتریس هم‌بستگی فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک در منطقه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

جدول ۲. مقدار هدررفت خاک و فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی در منطقه مورد بررسی

شاخص آماری	هدررفت خاک (تن در هکتار در سال)		فرسایش‌پذیری (تن ساعت در مگاژول میلی‌متر)	
	۱۳۸۴	۱۳۸۵	اندازه‌گیری شده	برآوردی
کمترین	۰/۳۶۴۴	۰/۵۷۹۴	۰/۰۰۲۰	۰/۰۲۵۴
بیشترین	۳/۲۸۹۴	۱/۸۹۴۸	۰/۰۰۷۲	۰/۰۴۹۲
میانگین	۱/۸۶۹۰	۱/۱۶۴۵	۰/۰۰۴۴	۰/۰۳۶۰
انحراف معیار	۰/۹۹۲۰	۰/۹۹۱۰	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۶۸



شکل ۳. هم‌بستگی بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی در ۳۶ شبکه مورد بررسی

مورد بررسی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، بین فرسایش‌پذیری خاک با شن درشت، رس، ماده آلی، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک، هم‌بستگی منفی و با شن بسیار ریز و سیلت، هم‌بستگی مثبت وجود داشت. در این پژوهش، اثر کاهشی شن درشت بر فرسایش‌پذیری با یافته‌های سانتوس و همکاران (۲۳) مطابقت دارد. هم‌بستگی مثبت بین فرسایش‌پذیری و شن بسیار ریز و سیلت، یافته‌های میلر و گاردنر (۱۸) را تأیید می‌کند. هم‌بستگی معنی‌دار منفی موجود بین فرسایش‌پذیری و رس در این پژوهش مطابق با یافته‌های ژانگ و همکاران (۳۰) در چین است. تأثیر رس بر کاهش فرسایش‌پذیری خاک به دلیل افزایش پایداری خاکدانه‌ها بود که بدین وسیله مقاومت خاکدانه‌ها در برابر عوامل فرساینده افزایش می‌یابد. تأثیر ماده آلی در کاهش فرسایش‌پذیری خاک با نتایج تحقیقات قادری و قدوسی (۴) و رودریگز و همکاران (۲۲) همخوانی دارد. نقش ماده آلی در فرسایش‌پذیری به دلیل بهبود چشمگیر پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری خاک بود. آهک نیز مانند ماده آلی موجب شد پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری خاک افزایش یافته و فرسایش‌پذیری کاهش یابد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

جدول ۳. ماتریس هم‌بستگی فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک در ۳۶ شبکه مختلف در منطقه مورد بررسی

	شن درشت	شن بسیار ریز	سیلت	رس	ماده آلی	آهک	پایداری خاکدانه	نفوذپذیری	فرسایش‌پذیری
شن درشت	۱								
شن بسیار ریز	۰/۲۲	۱							
سیلت	-۰/۷۴***	-۰/۲۰	۱						
رس	-۰/۱۸	-۰/۵۰**	-۰/۴۰**	۱					
ماده آلی	۰/۲۷	-۰/۳۱*	-۰/۲۳	۰/۲۱	۱				
آهک	-۰/۰۰	-۰/۵۶**	-۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۰۵	۱			
پایداری خاکدانه	-۰/۱۷	-۰/۶۷***	-۰/۱۲	۰/۷۰***	۰/۲۹*	۰/۴۸**	۱		
نفوذپذیری	۰/۷۶***	-۰/۰۵	-۰/۵۵**	-۰/۰۷	۰/۵۴**	۰/۲۹*	۰/۱۳	۱	
فرسایش‌پذیری	-۰/۵۰**	۰/۴۳**	۰/۴۶**	-۰/۳۱*	-۰/۵۴**	-۰/۵۵**	-۰/۶۴***	-۰/۷۸***	۱

*: معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱

***: معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۰۱

این نتیجه، نتایج تحقیقات اورتس و همکاران (۲۰) و دایکر و همکاران (۸) را تأیید می‌کند. در این پژوهش، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک دو ویژگی مهم خاک بودند که اثری چشمگیر (در سطح احتمال ۰/۰۰۱) بر فرسایش‌پذیری خاک داشتند. این نتایج، نظر گوپتا (۱۲) و هویوس (۱۳) در مورد نقش اساسی دو شاخص نفوذپذیری و پایداری ساختمان خاک در فرسایش‌پذیری را تأیید می‌کند.

نتایج جدول ۳ هم‌چنین نشان داد که بین ویژگی‌های مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک (مثل پایداری خاکدانه با ماده آلی و نفوذپذیری با سیلت) نیز هم‌بستگی معنی‌دار وجود دارد. بنابراین لازم بود از بین ویژگی‌های مؤثر بر فرسایش‌پذیری (شن درشت، شن بسیار ریز، سیلت، رس، ماده آلی، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک) تعداد محدودی ویژگی که بتواند بیانگر تغییرات کل ویژگی‌های خاک در منطقه باشند، انتخاب شوند. برای این منظور بررسی این ویژگی‌ها با روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که کلیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی در سه مؤلفه (PC_1، PC_2 و PC_3) قابل بیان هستند. این اجزا ۸۲/۵ درصد تغییرات واریانس ویژگی‌های خاک منطقه را تبیین کردند. جدول ۴ تجزیه مولفه‌های اصلی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک را نشان می‌دهد. در هر مولفه ویژگی‌های دارای ضریب بالا (بزرگ‌تر از ۰/۷)، به عنوان عوامل اصلی بیان کننده آن مؤلفه انتخاب شدند. بر این اساس، شن درشت، سیلت و نفوذپذیری از مولفه اول (PC_1)، رس و پایداری خاکدانه از مولفه دوم (PC_2) و شن بسیار ریز و آهک از مولفه سوم (PC_3) انتخاب و به عنوان ویژگی‌های اصلی بیان کننده تغییرات خاک منطقه بیان شدند.

بررسی رابطه رگرسیونی چند متغیره خطی بین عامل فرسایش‌پذیری خاک اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های اصلی (شن درشت، شن بسیار ریز، سیلت، رس، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری) با روش گام به گام(Stepwise method) نشان داد که از بین ویژگی‌های اصلی، تنها شن درشت، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری اثری معنی‌دار ($P<0/001$، $R^2=0/923$) بر فرسایش‌پذیری خاک دارند. جدول ۵ تحلیل رگرسیونی رابطه بین عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) و ویژگی‌های اصلی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

جدول ۴. تجزیه مولفه‌های اصلی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک

ویژگی	مولفه		
	PC۱	PC۲	PC۳
شن درشت	۰/۹۱۲	-۰/۲۱۱	-۰/۱۳۸
شن بسیار ریز	۰/۰۸۰	-۰/۵۵۷	-۰/۷۱۰
سیلت	-۰/۷۸۱	-۰/۳۴۰	۰/۴۲۸
رس	۰/۰۱۸	۰/۹۷۸	-۰/۰۶۱
ماده آلی	۰/۵۴۶	۰/۲۸۱	۰/۲۵۱
آهک	۰/۰۹۸	۰/۰۲۹	۰/۸۹۱
پایداری خاکدانه	۰/۰۵۹	۰/۷۸۹	۰/۴۷۷
نفوذپذیری	۰/۹۱۹	-۰/۰۷۸	۰/۲۶۶
درصد تبیین واریانس	۳۴/۷	۳۱/۵	۱۶/۳

جدول ۵. تحلیل رگرسیونی رابطه بین عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) و ویژگی‌های اصلی مؤثر بر آن

مدل	ضرایب غیر استاندارد		ضرایب استاندارد	t	سطح معنی‌داری
	B	انحراف معیار	Beta		
مقدار ثابت	۰/۰۰۹۹۹	۰/۰۰۰۳۷		۲۷/۳۵۳	۰/۰۰۰
شن درشت	$-۴/۹\times۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۰۰۲	-۰/۱۸۷	-۲/۰۹۱	۰/۰۴۵
آهک	$-۳/۶\times۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۰۰۲	-۰/۱۳۷	-۲/۲۶۳	۰/۰۳۱
پایداری خاکدانه	-۰/۰۰۱۶۷۴	۰/۰۰۰۱۹	-۰/۵۳۱	-۸/۸۵۴	۰/۰۰۰
نفوذپذیری نیمرخ	-۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۱۱	-۰/۵۳۴	-۵/۹۷۰	۰/۰۰۰

مؤثر بر آن را نشان می‌دهد. شن درشت، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری، اثر کاهشی معنی‌دار به ترتیب در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱ بر فرسایش‌پذیری خاک داشتند.

بر اساس نتایج جدول ۵، رابطه عامل فرسایش‌پذیری خاک و ویژگی‌های اصلی مؤثر بر آن به صورت زیر بود:

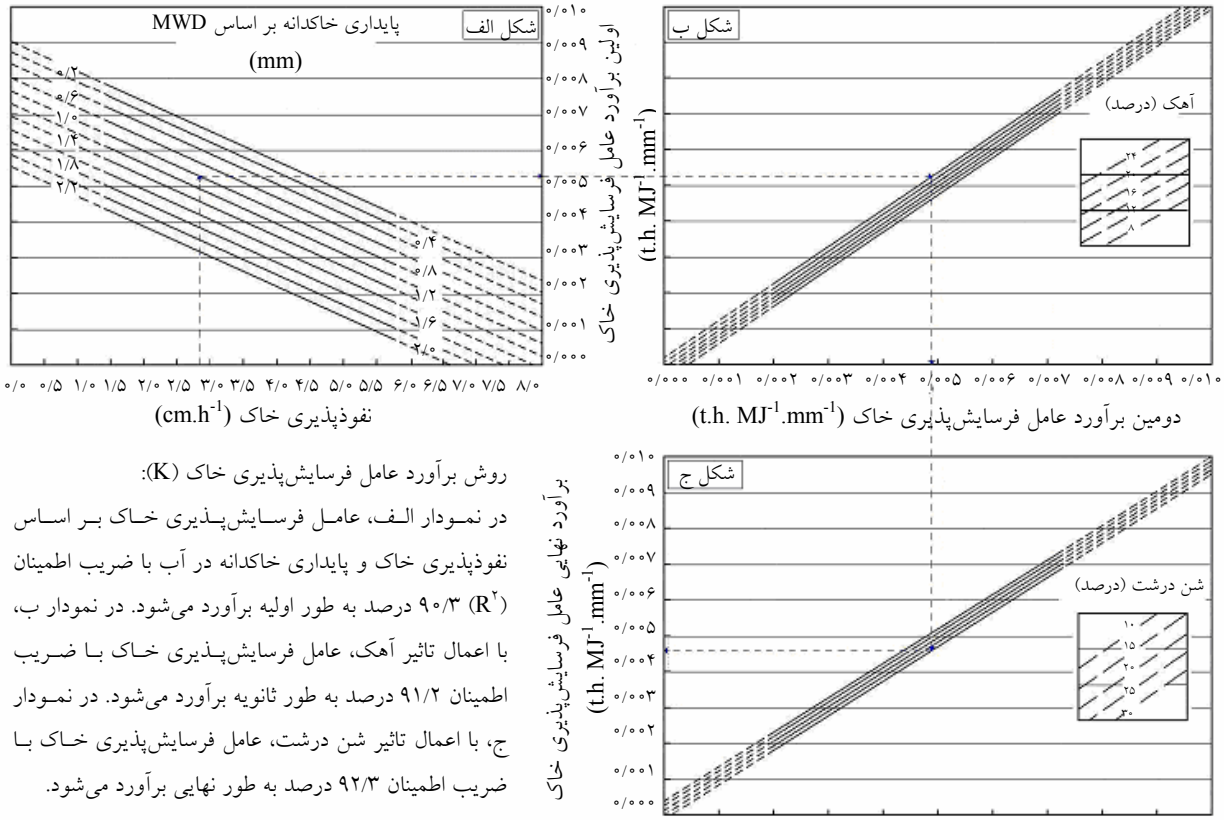
$$K = ۰/۰۰۹۹۹ - ۴/۹\times۱۰^{-۵}\ CS - ۳/۶\times۱۰^{-۵}\ Lime - ۰/۰۰۱۶۷۴\ MWD - ۰/۰۰۰۶۴\ Ks, \quad R^۲ = ٪۹۲/۳ \quad [۲]$$

که در آن: K عامل فرسایش‌پذیری خاک در USLE بر حسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر، CS شن درشت (Coarse sand) بر حسب درصد، Lime آهک (TNV یا مواد خنثی شونده) بر حسب درصد، MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه در روش الک تر برحسب میلی‌متر، Ks نفوذپذیری نیمرخ خاک بر حسب سانتی‌متر در ساعت است.

برای برآورد آسان عامل فرسایش‌پذیری (K) در خاک‌های مورد بررسی، لازم بود معادله رگرسیونی بالا به شکل نموداری ارائه شود. بر این اساس نموگرافی بر اساس شن درشت، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری، با ضریب تبیین ($R^۲$) ۹۲/۳ درصد ارائه شد. شکل ۴ نموگراف فرسایش‌پذیری (K) خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. نموگراف فرسایش‌پذیری از سه نمودار (A، B و C) تشکیل شده است. نمودار A، از رابطه رگرسیونی عامل فرسایش‌پذیری خاک با نفوذپذیری و پایداری خاکدانه ($R^۲$= ٪۹۰/۳) به دست آمده است. در این نمودار، عامل فرسایش‌پذیری بر اساس نفوذپذیری نیمرخ خاک و پایداری خاکدانه در آب (MWD)، با ضریب

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]



روش برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک (K):
در نمودار الف، عامل فرسایش‌پذیری خاک بر اساس نفوذپذیری خاک و پایداری خاکدانه در آب با ضریب اطمینان (R^2) ۹۰/۳ درصد به طور اولیه برآورد می‌شود. در نمودار ب، با اعمال تاثیر آهک، عامل فرسایش‌پذیری خاک با ضریب اطمینان ۹۱/۲ درصد به طور ثانویه برآورد می‌شود. در نمودار ج، با اعمال تاثیر شن درشت، عامل فرسایش‌پذیری خاک با ضریب اطمینان ۹۲/۳ درصد به طور نهایی برآورد می‌شود.

شکل ۴. نموگراف فرسایش‌پذیری (K) خاک‌های مورد بررسی

تبیین (R^2) ۹۰/۳ درصد به طور اولیه برآورد می‌شود. در نمودار B، با اعمال تأثیر آهک، ضریب تبیین برآورد فرسایش‌پذیری به ۹۱/۲ درصد افزایش می‌یابد. در نمودار C، نقش شن درشت در عامل فرسایش‌پذیری خاک مورد توجه قرار گرفته و به این ترتیب، ضریب تبیین برآورد نهایی عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) را به ۹۲/۳ درصد افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری

بررسی عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرایی هدررفت خاک تحت رخدادهای طبیعی باران در ناحیه‌ای نیمه‌خشک در شمال غربی ایران طی دو سال نشان داد که مقدار اندازه‌گیری شده K، به طور میانگین ۸/۷۷ برابر کمتر از مقدار برآوردی آن با نموگراف USLE است. این نتیجه عدم کارآیی نموگراف USLE، در برآورد فرسایش‌پذیری خاک‌های این منطقه را نشان داد. برای دست‌یابی به نموگراف جدید فرسایش‌پذیری، هم‌بستگی بین K اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های خاک‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که شن درشت، رس، ماده آلی، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک، هم‌بستگی منفی معنی‌دار و شن بسیار ریز و سیلت، هم‌بستگی مثبت معنی‌دار با فرسایش‌پذیری خاک دارند. نتایج تجزیه مولفه‌های اصلی و رگرسیون چند متغیره نشان داد که شن درشت، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک ۹۲/۳ درصد تغییرات واریانس فرسایش‌پذیری خاک‌ها را نشان می‌دهند. برای برآورد آسان فرسایش‌پذیری، نموگرافی بر اساس ویژگی‌های مذکور با استفاده از معادله رگرسیونی چند متغیره، با ضریب اطمینان ۹۲/۳ درصد تهیه شد. از آنجا که تاکنون مطالعه‌ای گسترده و دقیق در مورد برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) در نواحی نیمه‌خشک به ویژه در ایران انجام نشده است، مطالعه حاضر نخستین گام برای دست‌یابی به این هدف است. بدیهی است در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

این راستا انجام مطالعات صحرایی گسترده‌تر و درازمدت در سایر نواحی نیمه‌خشک کشور ضروری خواهد بود. با این وجود، از نموگراف در مناطقی که دامنه تغییرات ویژگی‌های خاک و باران مشابه با محدوده تغییرات ویژگی‌های خاک و باران در منطقه مطالعاتی می‌باشند، برای برآورد مطمئن عامل فرسایش‌پذیری خاک می‌توان بهره گرفت. برای استفاده از نموگراف در خارج از محدوده تغییرات ویژگی‌ها، لازم است قبلا کارآیی نموگراف ارزیابی گردد.

سپاسگزاری

از مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری تهران به خاطر ارائه نقشه جغرافیایی منطقه و از اداره آبیاری شهرستان هشترود به خاطر ارائه آمار بارندگی سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. حکیمی، ا. ۱۳۶۵. مطالعات خاک‌شناسی اجمالی منطقه هشترود. نشریه شماره ۷۶۷، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت کشاورزی، تهران.

۲. خاکسارفرد، م. ۱۳۷۳. تلفات آب و کاهش آن. نشریه علمی، اجتماعی و فرهنگی آب و فاضلاب کشور ۹: ۲۵-۲۹.

۳. رفاهی، ح. ق. ۱۳۷۵. *فرسایش آبی و کنترل آن*. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.

۴. قادری، ن. و ج. قدوسی. ۱۳۸۴. بررسی فرسایش پذیری خاک در واحدهای اراضی حوزه تلوار چای. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، صفحه ۳۶۷ تا ۳۷۲، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران.

5. Angers, D. A. and G. R. Mehuys. 1993. Aggregate stability to water. PP. 651-657. *In*: Cartner, M.R. (Ed.), Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Pub., Boca Raton, Canada,
6. Angima, S. D., D. E. Scott, M. K. O' Neill, C. K. Ong and G. A. Weesies. 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. Agric. Ecosys. and Environ. 97: 295-308.
7. Bouwer, H. 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. PP. 341-345. *In*: Klutem A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed., Agronomy, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
8. Duiker, S. W., D. C. Flanagan and R. Lal. 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. Catena 45: 103-121.
9. Evrendliek, F., I. Celik and S. Kilic 2004. Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forests, grassland and cropland ecosystems. J. Arid Environ. 59: 743-752.
10. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1980. Particle-size analysis. *In*: Klutem A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods, Second eddition, Agronomy, Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, USA.
11. Goh, T. B., R. J. St. Arnaud and A. R. Mermut. 1993. Carbonates. PP. 177-185. *In*: Cartner, M.R. (Ed.), Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Pub., Boca Raton, Canada.
12. Gupta, O. P. 2002. Water in relation to soils and plants. Agrobios, India.
13. Hoyos, N. 2005. Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. Catena, 63: 85-108.
14. Hussein, M. H., T. H. Kariem and A. K. Othman. 2007. Predicting soil erodibility in northern Iraq natural runoff data. Soil & Tillage Res. 94: 220-228.
15. Jollife, I. 1986. Principal Component Analysis. Springer-Verlag, New York.
16. Kirkby, M. J. and R P. Morgan. 1980. Soil erosion. John Wiley & Sons. New York.
17. Knudsen, D., G.A. Peterson and P.F. Pratt. 1982. Lithium, sodium and potassium. PP. 225-246. *In*: A. L. Page et al. (Ed.), Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties. ASA Monograph Number 9.
18. Miller, R. W. and D. T. Gardiner. 1998. Soils in Our Environment. 8th ed., Prentice-Hall Inc., United State of America.
19. Nelson, D. W. and L. E. Sommer. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In*: A.L. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis. 2nd ed., ASA Monogr. Am. Soc. Agron. Madison. 9(2) 539-579.
20. Orts, J. W., R. E. Sojka and G. M. Glenn. 2000. Biopolymer additives to reduce erosion- induced soil losses during irrigation. Indust. Crops and Prod. 11: 19-26.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]

21. Rejman, J., R. Turski and J. Paluszek. 1998. Spatial and temporal variability in erodibility of loess soil. Soil & Tillage Res. 46: 61-68.
22. Rodríguez, R. R., C. D. Arbelo, J. A. Guerra, M. J. S. Natario and C. M. Armas. 2006. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andosols. Catena 66: 228-235.
23. Santos, F. L., J. L. Reis, O. C. Martins, N. L. Castanheria and R. P. Serralherio. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigation soils. Biosys. Eng. 86(3): 355-364.
24. Schwab, G. O., D. D. Fanmeier, W. J. Elliot and R. K. Frevert. 1993. Soil and Water Conservation Engineering. 4th ed., John Wiley & Sons Inc., New York.
25. Sheskin, D. 2007. Handbook of Parametric Statistical Procedures. 4th ed., Boca Raton, Chapman & Hall., USA.
26. Siegrist, S., D. Schaub, L. Pfiffner and P. Mader. 1998. Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. Agriculture. Ecosys. and Environ. 69: 253-264.
27. Veihe, A. 2002. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. Geoderma 106: 101-120.
28. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. US Department of Agriculture. Washington DC.
29. YU, D. S., S. Xue-Zheng and D. C. Weindorf. 2006. Relationships between permeability and erodibility of cultivated acrisols and cambisols in subtropical China. Pedosphere 16(3): 304-311.
30. Zhang, K., S. Li, W. Peng and B. Yu. 2004. Erodibility of agricultural soils and loess plateau of China. Soil & illage Res. 76: 157-165.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.5.7]