

Comparing the Performance of Several Erodibility Indices' Equations of USLE Model at Laboratory Condition

MAHMOOD ARABKHEDRI^{*1}, ZAHRA GERAMI^{1,2}, SAMAD SHADFAR¹, REZA BAYAT¹, YAHYA PARVIZI³, SAEED NABIPAY-LASHKARIAN¹

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

2. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Agriculture and Natural Resources Research and Education Center in Kermanshah, Education and Extension Organization (AREEO), Kermanshah, Iran.

(Received: March. 14, 2020- Revised: May. 11, 2020- Accepted: May. 22, 2020)

ABSTRACT

The performance of four erodibility indices' equations including K-USLE, K-Vaezi, K-EPIC and K-Dg were evaluated by measuring soil loss at four dryfarming soil samples in the Rainfall and Erosion Simulation Laboratory of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. For each soil sample, several experiments (33, 64 and 110 mm/h rainfall intensities, RI, at 12% slope and 64 mm/h RI at 6%, 12% and 25% slopes) were conducted for 30 min in two replicates and the soil loss were measured. In addition, the volume of rills was measured at the end of each experiment. The observed erodibility (K-Obs.) was obtained by dividing the soil loss to RLSCP factors product of USLE in each treatment which showed a high scatter. The 110 mm/h RI on 12% slope was selected as the reference treatment due to complete developed rill erosion network. Then, the estimated K value was compared to it. The results indicate an underestimation of K-Vaezi (and a negative value in one case) and an overestimation of the other three indices. The lowest difference is for K-Dg with 3-5 times overestimation. In the Next step, for each treatment, a ratio was calculated by dividing the K-Obs. of each pair soils and compared with the corresponding ratios of estimated erodibility indices using t-student statistic. The results of ratios analysis showed that the K-Dg and K-EPIC indices had better agreement with K-Obs. at 5% probability level. As a conclusion, it is recommended to use K-Dg by applying a reduction coefficient for similar soils.

Keywords: Dryfarming Land, Slope, Rainfall Intensity, and Rill Erosion.

مقایسه کارایی چند معادله برآورد شاخص فرسایش‌پذیری مدل USLE در شرایط آزمایشگاهی

محمود عرب‌خدری^{۱*}، زهرا گرامی^{۱،۲}، صمد شادفر^۱، رضا بیات^۱، یحیی پرویزی^۳، سعید نبی‌پی لشکریان^۱

۱. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۲)

چکیده

با اندازه‌گیری هدررفت خاک در چهار نمونه خاک با کاربری دیم در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، و با تکیه بر مفهوم نسبت‌ها، کارایی چهار معادله برآورد شاخص فرسایش‌پذیری K-Vaezi، K-USLE، K-Dg و K-EPIC ارزیابی شد. برای هر نمونه خاک، آزمایش‌هایی با شدت‌های ۳۳، ۶۴ و ۱۱۰ mm/h در شیب ۱۲٪ و شدت ۶۴ mm/h در شیب‌های ۶٪، ۱۲٪ و ۲۵٪ به مدت ۳۰ دقیقه در دو تکرار اجرا و میزان هدررفت خاک اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، حجم شیارهای ایجاد شده در انتهای هر آزمایش با خط‌کش اندازه‌گیری گردید. با تقسیم تلفات خاک به حاصل‌ضرب عوامل RLSCP رابطه جهانی هدررفت خاک در هر تیمار، فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای (K-Obs) به دست آمد که پراکندگی زیادی را نشان داد. با توجه به شکل‌گیری کامل فرسایش شیبی در تیمار شدت ۱۱۰ mm/h در شیب ۱۲٪، این تیمار به‌عنوان معرف انتخاب و مقادیر K برآوردی با آن مقایسه شد. نتایج، حاکی از کم‌برآوردی K-Vaezi (و در یک مورد، مقدار منفی) و بیش‌برآوردی سه شاخص دیگر است. کم‌ترین اختلاف مربوط به K-Dg با ۳-۵ برابر بیش‌برآوردی است. در مرحله بعد، برای هر تیمار، نسبت K-Obs خاک‌ها به صورت دوه‌دو محاسبه و با نسبت‌های متناظر هر یک از K‌های برآوردی با آماره t مقایسه شد. نتایج تحلیل نسبت‌ها نشان داد که دو شاخص K-Dg و K-EPIC در سطح احتمال ۵٪ هماهنگی بهتری با K-Obs دارند. در نهایت، استفاده از K-Dg با اعمال ضریب اصلاحی کاهنده برای خاک‌های مشابه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اراضی دیم، شیب، شدت باران، و فرسایش شیبی.

مقدمه

حساسیت خاک در برابر فرآیندهای فرسایشی، مانند جدا شدن توسط باران و یا برش جریان سطحی را فرسایش‌پذیری خاک گویند (Young *et al.*, 1990). ویژگی‌های ذاتی خاک از قبیل بافت، پایداری خاکدانه، مقاومت برشی، ظرفیت نفوذپذیری و مقدار مواد آلی و عناصر شیمیایی خاک، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقدار فرسایش‌پذیری خاک هستند. اگرچه عواملی از قبیل میزان بهم‌خوردگی (مانند شخم) نیز بر آن مؤثر است (Morgan, 2005; Khalilmoghadam *et al.*, 2011). به دلیل تأثیرپذیری فرسایش‌پذیری از خواص فیزیکی، مکانیکی، هیدرولوژی، شیمیایی، ژئولوژی، کانی‌شناسی، و زیست‌شناختی خاک (Veihe, 2002)، مفهوم و نحوه ارزیابی آن پیچیده است.

اغلب برای تعیین و برآورد فرسایش‌پذیری خاک، سه روش زیر استفاده می‌شود (Zhang *et al.*, 2019): الف) اندازه‌گیری

واقعی میزان هدررفت خاک در شرایط باران طبیعی در دوره طولانی، ب) استفاده از شبیه‌سازی بارندگی، و ج) استفاده از مدل‌ها و معادلات پیش‌بینی‌کننده متکی به متغیرهای مستقل و قابل اندازه‌گیری خاک که با فرسایش‌پذیری همبستگی دارند. به علت سختی و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری واقعی خاک، محققان بیش‌تر از شبیه‌ساز باران، مدل‌ها و معادلات پیش‌بینی‌کننده در برآورد فرسایش‌پذیری خاک بهره می‌گیرند (Karami *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019).

محققان زیادی برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک از روابط تجربی کمک گرفته‌اند (Zhang *et al.*, 2019; Ostovari *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016). یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین مدل‌های تجربی، رابطه جهانی هدررفت خاک (USLE) و نسخه‌های تکامل‌یافته‌ی آن از قبیل MUSLE و RUSLE است. شاخص فرسایش‌پذیری در این مدل، با شبیه‌سازی باران به مدت

مدل‌های فرآیندی، Morgan (۲۰۰۵) اعتقاد دارد که مدل‌های ساده تجربی در برآورد فرسایش موفق‌تر عمل می‌کنند و استفاده از آن‌ها نیز راحت‌تر است.

گروه دیگری از منتقدین در پژوهش‌های خود، نقاط ضعف شاخص فرسایش‌پذیری USLE را شناسایی کرده و در برخی از موارد روابط تجربی جدیدی را پیشنهاد کرده‌اند. مثلاً تعدادی بر این باورند که چون این نمودار برای خاک‌های عاری از آهک مناطق نیمه مرطوب ایالات‌متحده امریکا توسعه‌یافته است، استفاده از آن در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که غنی از آهک هستند، می‌تواند مشکل‌آفرین باشد (Refahi, 2009; Vaezi et al., 2008; Khormai et al., 2016). زیرا آهک در افزایش پایداری خاکدانه و نفوذپذیری و در نتیجه کاهش فرسایش‌پذیری تأثیر قابل‌توجهی دارد که این تأثیر در نمودار فرسایش‌پذیری USLE در نظر گرفته نشده است. هم‌چنین، مقدار سنگ‌ریزه نیز با اثر بر هدایت هیدرولیکی (یکی از عوامل نمودار فرسایش‌پذیری) ممکن است بر میزان فرسایش‌پذیری خاک تأثیر بگذارد (Morgan, 2005) که این عامل نیز مانند میزان آهک خاک، در نمودار لحاظ نشده است. (Khormai et al., 2016). دلیل نامناسب بودن شاخص فرسایش‌پذیری USLE را توسعه آن بر مبنای داده‌های جمع‌آوری‌شده در بارش‌های بسیار شدید ذکر می‌کنند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران اتفاق نمی‌افتد. دسته‌ای دیگر از محققین توانسته‌اند شاخص فرسایش‌پذیری را با عوامل محدودتری برآورد کنند (Romkens et al., 1997; Williams et al., 1984). مزیت این گروه از شاخص‌ها، کاربردی‌تر شدن استفاده از آن است. برای مثال، در غالب مطالعات خاکشناسی در ایران، اجزاء ماسه اندازه‌گیری نمی‌شود. بنابراین، روابطی که بدون نیاز به اندازه‌گیری ماسه خیلی‌ریزه، بتواند فرسایش‌پذیری را محاسبه کند اولویت دارد.

با توجه به موارد بالا، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی کارایی برخی از روابط برآورد شاخص فرسایش‌پذیری مدل USLE با استفاده از شبیه‌ساز باران اجرا شد. فرض اساسی این تحقیق، مساوی بودن نسبت فرسایش‌پذیری دو خاک مختلف با نسبت مقادیر هدررفت خاک مشاهده‌ای آن‌ها در شرایط یکسان از نظر سایر عوامل مؤثر بر فرسایش (یعنی شیب، بارش، پوشش و مدیریت) است.

مواد و روش‌ها

خاک‌های مورد مطالعه

چهار منطقه مهم دیم‌کاری در استان‌های گلستان (بیشکمر)، کرمانشاه (سرارود)، قزوین (کوهین) و کهگیلویه و بویراحمد

دو ساعت با شدت ۶۳/۵ میلی‌متر در ساعت (Khormai et al., 2016) و از تقسیم مقدار هدررفت خاک از کرت استاندارد بر شاخص فرسایش‌دگی باران توسعه‌یافته است (Zhang et al., 2004). کرت استاندارد، زمینی به عرض ۱/۸۳ متر و طول ۲۲/۱ متر با شیب ۹ درصد، شخم‌خورده در جهت شیب، و تحت آیش دائمی است که سطح آن هیچ‌گونه پوشش و بقایای گیاهی ندارد (Wischmeier and Smith, 1978). برای برآورد این شاخص، Wischmeier و Smith (1978)، رابطه رگرسیونی بر اساس پنج ویژگی خاک شامل ماسه درشت، مجموع ماسه خیلی ریز و سیلت، ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری نیمرخ خاک توسعه داده‌اند که به‌صورت نمودار ترسیمی مرکب نیز ارائه شده است.

شاخص فرسایش‌پذیری مدل USLE (Wischmeier and Smith, 1978)، توسط صاحب‌نظران و محققین ارزیابی شده و برخی از آن‌ها در شرایط کرت استاندارد، اختلاف قابل‌توجهی بین فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای و برآوردی را نشان داده‌اند. Vaezi et al. (2008)، فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای خاک‌های آهکی هشت‌رود آذربایجان شرقی را ۱۱ برابر کوچک‌تر از مقدار برآوردی از نمودار USLE و (Khormai et al., 2016) فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای خاک‌های لسی در حوضه کچیک استان گلستان را ۳۵ تا ۱۸۲ برابر کوچک‌تر از مقدار برآوردی از نمودار USLE گزارش کرده‌اند. گروهی با ایراد به مبنای تجربی رابطه USLE، بیان می‌کنند که استفاده از این مدل‌ها در مناطق متفاوت با محل توسعه مدل، خطای زیادی دارد. به‌همین دلیل، برخی محققین از مدل‌های فرآیندی مانند WEPP، EUROSEM و GUEST استفاده کرده‌اند (Vaezi et al., 2018; Reichert and Darrell, 2013; Norton, 2013; Khalilmoghdam et al., 2013; Mohammadzadeh, 2011; Rouhipour et al., 2004). در مدل WEPP، فرسایش‌پذیری خاک به‌صورت پارامترهای فرسایش-پذیری شیاری (Kr) و بین شیاری (Ki) معرفی شده است که فرسایش‌پذیری شیاری، مقدار افزایش جدا شدن خاک به ازاء افزایش تنش برشی جریان آب غیر گل‌آلود، و فرسایش‌پذیری بین شیاری (Ki)، اندازه‌ای از شدت تحویل رسوب از نواحی بین شیاری به درون شیارها است و از شدت بارندگی و شدت رواناب تبعیت می‌کند (Foster and Meyer, 1972). هم‌چنین در مدل GUEST، فرسایش‌پذیری خاک به‌صورت فاکتور β استفاده شده است که به مقاومت برشی خاک بستگی دارد (Misra and Rose, 1996). با وجود اهمیت مدل‌های فرآیندی از نظر علمی، استفاده از آن‌ها در سطوح واقعی به‌دلیل مشکلات و هزینه زیاد جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، و اعتبار ضعیف نتایج، توسعه زیادی نیافته است (Boardman, 1998). با وجود پیشرفت‌های حاصل در توسعه

ساختمان خاک سطحی در محل تعیین شد. پس از هواخشک شدن، خاک از سرنده ۱/۵۷ سانتی متری عبور داده شد و سنگریزه‌ها و قطعات ساقه و ریشه بزرگ‌تر جدا گردید. سپس، نمونه‌های دو کیلویی به آزمایشگاه آب‌و‌خاک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری منتقل و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مشتمل بر دانه‌بندی خاک به روش ترکیب سری الک‌ها و هیدرومتر، ماده آلی به روش والکی-بلاک، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و تیتراسیون با باز، گچ به روش استون، و اسیدیته در عصاره یک‌به‌یک اندازه‌گیری شد (Vice Presidency for Planning and Supervision, 2000).

(گچساران) مطابق جدول (۱) انتخاب شد. مقدار متوسط سالانه بارش این مناطق در محدوده ۲۵۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه آن‌ها بین ۱۲ تا ۲۱ درجه سلسیوس قرارداد و اقلیم‌های نیمه‌خشک گرم، معتدل، سرد و فراسرد را شامل می‌شود.

با استفاده از اطلاعات محلی، تصاویر ماهواره‌ای و پیمایش صحرایی عرصه‌های دیم‌کاری چهار منطقه مذکور، مزارعی با شیب بین ۲ تا ۱۴ درصد برای تهیه خاک سطحی مشخص شد. چند تن خاک از لایه فوقانی تا عمق ۲۵ سانتی‌متری هر یک از مزارع منتخب که محصول آن‌ها برداشت شده بود، به آزمایشگاه شبیه-ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انتقال یافت. در این مرحله، جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر و

جدول ۱- برخی از مشخصات مناطق نمونه‌برداری شده

گچساران - کهگیلویه و بویراحمد		کوهین - قزوین		سررود - کرمانشاه		پیشکمر - گلستان		منطقه
عرض	طول	عرض	طول	عرض	طول	عرض	طول	مختصات جغرافیایی
۳۰ - ۱۳	۵۰ - ۵۰	۳۶ - ۲۲	۳۵ - ۴۹	۱۹ - ۳۴	۱۹ - ۴۷	۳۲ - ۳۷	۳۶ - ۵۵	دقیقه - درجه
۳۷۸	۲۴۷	۴۴۲	۴۵۳	۱۱/۸	۱۶/۱	۴۵۳	۱۶/۱	میانگین بارش سالانه (mm)
۲۱/۵	۱۲/۶	نیمه‌خشک سرد	نیمه‌خشک معتدل	نیمه‌خشک سرد	نیمه‌خشک معتدل	نیمه‌خشک معتدل	نیمه‌خشک معتدل	دمای متوسط سالانه (°C)
نیمه‌خشک گرم	نیمه‌خشک فراسرد	نیمه‌خشک سرد	نیمه‌خشک معتدل	نیمه‌خشک سرد	نیمه‌خشک معتدل	نیمه‌خشک معتدل	نیمه‌خشک معتدل	اقلیم*
۷/۸	۲/۴	۶/۳	۱۳/۵	۶/۳	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۳/۵	متوسط شیب (درصد)

* بر اساس اقلیم‌نمای دوماترین گسترده

آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و تیمارها

عرض، قابلیت تغییر شیب تا ۶۰ درصد را دارد (Arabkhedri et al., 2008). شکل (۱)، دو نما از فلوم باران‌ساز مورد استفاده در پژوهش را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که مطابق شکل (۱) - چپ)، فلوم با یک تیغه فلزی به دو بخش نیم‌متری تقسیم شد و به عنوان دو تکرار مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش در برجی به مساحت ۱۰۴/۵ مترمربع احداث شده است. ارتفاع این برج ۱۱/۸ متر از سطح زمین و ارتفاع نازل‌ها از فلوم ۷/۷۵ متر است. نازل‌ها از نوع مخروطی پر هستند و امکان ایجاد شدت‌های مختلف بارش تا ۱۲۵ میلی‌متر در ساعت وجود دارد. فلوم آن با ابعاد ۶ متر طول و یک متر



شکل ۱- نمایی از پهلو (راست) و خروجی (چپ) فلوم آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

سانتی‌متر رسید. برای تعیین تعداد بهینه حرکت رفت و برگشت غلطک، ابتدا، در سطحی کوچک حدود ۰/۵ مترمربع غلطک‌زنی شبیه‌سازی شد و در مراحل مختلف غلطک‌زنی، نمونه برای تعیین وزن مخصوص ظاهری برداشته شد.

قبل از شبیه‌سازی بارش، خاک از طریق شیلنگ‌هایی که در زیر فلوم برای خروج زهاب تعبیه شده است، به حالت اشباع رسید. سپس شیلنگ‌ها رها و آب اضافی تخلیه شد. بعد از قطع جریان زهکش، شیب و شدت بارندگی متناسب با تیمار موردنظر (جدول ۲) تنظیم گردید.

شبیه‌سازی بارش و اندازه‌گیری ویژگی‌های موردنظر رواناب و رسوب

با شبیه‌سازی بارندگی به مدت ۳۰ دقیقه، رواناب حاوی رسوب دو تکرار به‌طور مجزا در مخازنی جمع‌آوری شد. سپس حجم رواناب اندازه‌گیری و برای ۲۴ ساعت به حال خود رها گردید. در این مرحله آب زلال رویین تخلیه و گل ته‌نشین توزین شد. به‌طور کامل مخلوط شد و نمونه‌ای از آن به آزمایشگاه ارسال گردید. میزان هدررفت خاک از طریق خشک کردن رسوب به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و تبدیل آن به وزن در حجم مشخص با لحاظ حجم آب تخلیه شده، حاصل شد. علاوه بر این، شیارها بر اساس عمق و عرض به قسمت‌های هم‌شکل تقسیم و سپس طول، عرض و عمق هر قسمت با خط‌کش با دقت ۰/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و حجم کل شیارها به دست آمد. در مرحله بعد، با اعمال جرم مخصوص ظاهری، وزن معادل حجم شیارها که وزن خاک از دست‌رفته از طریق فرسایش شیار است، محاسبه شد. همچنین، ظرفیت نفوذ شرایط آزمایشگاهی در انتهای زمان آزمایش با کسر شدت رواناب خروجی از شدت باران تعیین شد. شایان ذکر است در آزمایش اندازه‌گیری نفوذپذیری، به سرعت نهایی نفوذ آب در خاک، ظرفیت نفوذ اطلاق می‌شود (Liu et al., 2019).

تعیین شاخص فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای در قالب USLE از رابطه (۱)، شاخص فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای K-Obs محاسبه شد:

$$K-Obs = A/RLSCP \quad (1) \text{ رابطه (۱)}$$

که در آن A مقدار خاک فرسایش‌یافته خروجی از انتهای فلوم؛ R، LS، C و P به ترتیب عوامل فرسایش‌دگی، شیب، پوشش گیاهی و اقدامات حفاظتی هستند. عوامل فوق مطابق راهنمای USLE (Wischmeier and Smith, 1978) محاسبه شدند. مقدار P در کلیه خاک‌ها و مقدار C به‌غیر از کوهین، معادل یک در نظر گرفته شدند. زیرا خاک مذکور که از ایستگاه تحقیقات حفاظت

پس از آماده‌سازی فلوم (که در بند بعدی تشریح می‌شود)، یک‌بار فلوم در شیب ۱۲ درصد تنظیم و در سه مرحله در معرض شدت‌های بارندگی ۳۳، ۶۴ و ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت قرار داده شد. این شدت‌ها، به ترتیب به‌عنوان باران‌های فرساینده کم‌شدت، شدید و بسیار شدید انتخاب شدند. در آزمایشی دیگر، خاک تحت بارندگی ۶۴ میلی‌متر بر ساعت در سه شیب ۶، ۱۲ و ۲۵ درصد آزمایش شد. سه شیب مذکور نیز به ترتیب نماینده شیب‌های کمتر از حد مجاز، حد مجاز و بیش از حد مجاز دیم‌کاری انتخاب شدند.

یکی از ویژگی‌های مهم در شبیه‌سازی باران، یکنواختی بارش در سطح فلوم است که بر اساس ضریب کریستینسن (Solomon, 1979) بررسی شد. این ضریب، برای شدت‌های ۳۳، ۶۴ و ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت به ترتیب ۹۰/۳، ۹۴/۶ و ۹۵/۳ درصد به دست آمد. Arabkhedri et al. (2008) نیز بهترین ضریب یکنواختی برای باران در این شبیه‌ساز با شدت باران ۶۸/۷ میلی‌متر بر ساعت در فشار ۰/۵ اتمسفر را ۹۳/۹ درصد بیان کردند. مطابق توضیحات فوق و با توجه به وجه اشتراک دو دسته آزمایش، برای هر خاک، ۵ تیمار در دو تکرار در نظر گرفته شد (جدول ۲).

جدول ۲- تیمارهای آزمایشی

تیمار	شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	شیب دامنه (درصد)
I1-S2	۳۳	۱۲
I2-S2	۶۴	۱۲
I3-S2	۱۱۰	۱۲
I2-S1	۶۴	۶
I2-S3	۶۴	۲۵

I: شدت باران، S: درصد شیب، اندیس‌ها؛ ۱: کم، ۲: متوسط، ۳: زیاد

آماده‌سازی فلوم

آماده‌سازی بستر فلوم شامل دو مرحله زیرسازی و روسازی است. در مرحله زیرسازی، لایه‌ای به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر از مخلوط گراول با اندازه بین ۱ تا ۲ سانتی‌متر در کف فلوم ریخته شد. این لایه، مانع از اشباع خاک شده و انتقال زهاب خاک از کف فلوم را تسهیل می‌کند. سپس، گونی کفنی روی آن پهن شد که مانع از اختلاط لایه‌های زهکش زیرین و خاک رویین می‌شود. در این زمان، برای در نظر گرفتن دو تکرار در هر آزمایش، فلوم با ورقه‌های فلزی طولی به دو بخش نیم‌متری تقسیم شد. در مرحله روسازی، پس از انتقال خاک به داخل فلوم به صورت لایه‌های حدود ۷ سانتی‌متری، ابتدا خاک توسط آب‌پاش، نم‌دار و تسطیح گردید. سپس، به‌منظور رساندن جرم مخصوص ظاهری به شرایط خاک مزرعه، با حرکت رفت و برگشت غلطک فشرده شد. این کار در سه مرحله دیگر تکرار شد تا ضخامت خاک به حدود ۲۰

برآوردی متناظر (شش نسبت) با هر یک از روش‌های چهارگانه برای هر نمونه خاک محاسبه و با نسبت‌های مشاهده‌ای مقایسه گردید. معادله‌ای که مقادیر نسبت‌های آن به نسبت‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر بود به‌عنوان روش برتر معرفی شد. در این خصوص از آزمون t با داده‌های جفتی (Johnson and Bhattacharyya, 2006) استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک‌ها

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۳) آمده است. بافت خاک‌ها از نسبتاً سبک در کوهین تا نسبتاً سنگین در سرارود تفاوت دارد و ماده آلی خاک‌ها کم تا متوسط است. اصولاً ماده آلی بیشتر باعث پایداری خاکدانه‌ها و افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود. دو خاک سرارود و کوهین ساختمان دانه‌ای و خاک‌های پیشکمر و گچساران ساختمان توده‌ای دارند. فقدان ساختمان در خاک گچساران با مقدار حدود ۱/۶ درصد ماده آلی در این خاک تعجب‌برانگیز است که با تکرار آزمایش نیز تأیید شد. همچنین از دیدگاه ظرفیت نفوذ، تمامی نمونه خاک‌های مورد مطالعه در طبقه متوسط (۶/۲۵ - ۲ سانتی‌متر در ساعت) قرار دارند.

مقدار سیلت و ماسه خیلی ریز که فرسایش‌پذیرترین ذرات خاک هستند (Hazelton and Murphy, 2007)، بین ۵۰ درصد در نمونه مربوط به کوهین تا ۷۳ درصد در نمونه پیشکمر متغیر بودند که این میزان از ذرات فرسایش‌پذیر در خاک‌های دیم قابل توجه است. ماسه نمونه خاک‌های مورد مطالعه بین ۹ (سرارود) تا ۶۱ درصد (کوهین) و رس از ۱۳ تا ۳۷ درصد به ترتیب در نمونه‌های خاک کوهین و سرارود متغیر بود. سنگ‌ریزه نیز بین صفر در نمونه خاک پیشکمر تا ۱۶ درصد در گچساران تغییر می‌کند. از نظر شیمیایی، این خاک‌ها فاقد مشکل شوری و سدیمی، آهک زیاد تا خیلی زیاد (۲۳ تا ۵۲ درصد)، گچ ناچیز و همگی pH قلیایی دارند. به احتمال زیاد، بخش قابل توجهی از آهک خاک‌های مورد تحقیق به صورت ذرات سیلت و ماسه حضور دارند که طبعاً در هم‌آوری ذرات تأثیری ندارند.

نتایج شبیه‌سازی

میزان متوسط تلفات خاک و وزن معادل حجم شیارها در دو تکرار پنج تیمار آزمایشی به تفکیک خاک‌های مورد آزمایش در جدول (۴) مشاهده می‌شود. با بررسی نتایج مربوط به سهم فرسایش شیارهای خاک‌های مورد مطالعه، ملاحظه می‌شود که به استثناء دو تیمار I2-S3 و I3-S2 که فرسایش شیارهای خوبی خود را نمایان

خاک کوهین تهیه شده بود، به‌رغم سرند کردن، حدود ۷ درصد بقایای گیاهی سطحی داشت که در نتیجه مقدار C، ۰/۸۵ در نظر گرفته شد.

تعیین شاخص فرسایش‌پذیری با روابط تجربی

در این پژوهش، کارآیی چهار رابطه تجربی برآورد شاخص فرسایش‌پذیری خاک در مقایسه با فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای K-Obs ارزیابی شد. شاخص فرسایش‌پذیری رابطه جهانی هدررفت خاک (K-USLE) از نمودار مخصوص (Wischmeier and Smith, 1978) با قرار دادن مقادیر پنج متغیر مشتمل بر درصد سیلت و ماسه خیلی ریز (۰/۱ - ۰/۰۲ میلی‌متر)، درصد ماسه ریز تا درشت (۲ - ۰/۱ میلی‌متر)، درصد ماده آلی و ساختمان لایه سطحی و نفوذپذیری خاک در پروفیل خاک به دست آمد.

شاخص فرسایش‌پذیری خاک به روش Vaezi et al. (2008)، K-Vaezi، از رابطه (۲) محاسبه شد:

(رابطه ۲)

$$K-Vaezi = 0.00373 + 0.00016 \text{ Silt} - 0.00216 \text{ OM} - 0.00017 \text{ TNV}$$
 که در آن Silt، OM و TNV به ترتیب درصد سیلت، ماده آلی و درصد مواد خنثی شونده (آهک) است.

به روش Williams et al. (1984) از رابطه (۳) محاسبه شد.

(رابطه ۳)

$$K-EPIC = (0.2 + 0.3 \exp(-0.0256 \text{ Sand} (1 - \text{Silt}/100))) * (\text{Silt}/(\text{Clay} + \text{Silt}))^{0.3} * (1 - (0.25 \text{ C}/\text{C} + \exp(3.72 - 2.9\text{C}))) * (1 - (0.7 \text{ SN}/\text{SN} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN})))$$
 که در آن Sand، Silt، Clay و C به ترتیب درصد ماسه، سیلت، رس و کربن آلی است و SN نیز از رابطه (۴) محاسبه گردید.

(رابطه ۴)

$$SN = 1 - (\text{Sand}/100)$$
 در نهایت، شاخص فرسایش‌پذیری K-Dg (Romkens et al., 1997) از رابطه (۵) به دست آمد.

(رابطه ۵)

$$K-Dg = 0.0017 + 0.0494 \exp(-0.5 (\log(Dg) + 1.675/0.6986)^2)$$
 که در آن، Dg میانگین هندسی قطر ذره (Shirazi and Boersma, 1984) است.

یادآور می‌شود که شاخص فرسایش‌پذیری K-EPIC با واحد امپریال محاسبه شد و سپس برای تبدیل به متریک، در ۰/۱۳۱۷ ضرب شد (Foster et al., 1981).

مقایسه نسبت‌های برآوردی و مشاهده‌ای و انتخاب روش برتر نسبت K-Obs خاک‌ها دو به دو (جمعاً شش نسبت) محاسبه و نسبت‌های به دست آمده با توجه به مجموعه اطلاعات به روش استدلالی ارزیابی و تحلیل شد. سپس نسبت فرسایش‌پذیری

از فلوم خارج نشد. هم‌چنین، با افزایش شدت باران و شیب (به‌جز موارد استثنایی)، تلفات کل افزایش یافت و در اغلب خاک‌ها، فرسایش شیاری در تیمارهایی با شدت و شیب کم (I1-S2 و I2-S1) رخ نداد.

ساخته، در سایر تیمارها، فرسایش شیاری سهم اندکی از تلفات کل را به خود اختصاص می‌دهد.

در منطقه گچساران با بافت لوم، بیش‌ترین تلفات خاک و وزن معادل حجم شیاری در تیمار I2-S3، به‌ترتیب ۱۸/۷ و ۱۴/۵ کیلوگرم بود. در دو خاک سرارود و کوهین در تیمار I1-S2، خاکی

جدول ۳- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی	پیشکمر	سرارود	کوهین	گچساران
درصد سنگ ریزه (>2mm)	۰/۰	۱	۷	۱۶
درصد ماسه ریز تا درشت (0.1-2mm)	۲	۳	۳۷	۲۵
درصد سیلت + ماسه خیلی ریز (0.002-0.1 mm)	۷۳	۶۱	۵۰	۵۷
درصد رس (<0.002)	۲۶	۳۷	۱۳	۱۸
درصد سیلت (0.002-0.05 mm)	۶۴	۵۴	۲۶	۳۸
درصد ماسه (0.05-2mm)	۱۰	۹	۶۱	۴۴
بافت ساختمان	لوم سیلتی بدون ساختمان	لوم سیلتی رسی دانه‌ای خیلی ریز	لوم شنی دانه‌ای ریز	لوم بدون ساختمان
ظرفیت نفوذ شرایط آزمایشگاهی (cm/h)	۴/۵۶	۵/۸۲	۴/۴۸	۲/۸۶
درصد ماده آلی	۰/۶۷	۱/۸۹	۰/۸۹	۱/۵۹
درصد کربنات کلسیم معادل	۳۱/۰	۳۱/۲	۲۳/۳	۵۲/۱
درصد گچ	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴
واکنش (pH) عصاره اشباع	۷/۸۶	۷/۸۲	۷/۸۰	۷/۹۲
قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع (dS/m)	۳/۱۶	۲/۲۳	۰/۹۴	۱/۰۱
نسبت جذب سدیم (SAR)	۰/۶۷	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۳۷

جدول ۴- میانگین تلفات خاک و میانگین وزن معادل حجم شیاری در پنج تیمار آزمایشی خاک‌های مورد مطالعه*

تیمار**	تلفات خاک (تن بر هکتار)				وزن معادل حجم شیاری (تن بر هکتار)			
	پیشکمر	سرارود	کوهین	گچساران	پیشکمر	سرارود	کوهین	گچساران
I1-S2	۰/۲۳	۰	۰	۰/۷۰	۰/۰۴	۰	۰	۰
I2-S1	۰/۸۲	۰/۰۱	۱/۶۷	۴/۰۰	۰	۰	۰	۰/۱۷
I2-S2	۱/۷۷	۰/۱۰	۳/۳۳	۴/۳۳	۰/۶۷	۰	۰/۲۸	۰/۳۵
I2-S3	۵/۰۸	۳/۱۷	۱۱/۳۳	۳۱/۱۷	۰/۸۵	۳/۱۷	۵/۶۷	۲۴/۱۷
I3-S2	۱۰/۵۰	۹/۴۵	۷/۰۰	۱۷/۰۰	۱/۰۰	۴/۵۰	۲/۶۷	۹/۰۰

* در تیمارهای با مقدار هدررفت خاک صفر، رواناب و فرسایش رخ نداده است. ** تیمارها در جدول (۲) تعریف شده‌اند.

بیشترین هدررفت خاک و حجم فرسایش شیاری را در بین چهار نمونه خاک مورد بررسی نشان داد. در این خاک، فرسایش شیاری فقط در شیب ۲۵ درصد و شدت ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت، به‌میزان زیادی رخ داد و در بقیه تیمارها، سهم فرسایش شیاری نسبت به فرسایش کل ناچیز بود. این مقدار فرسایش با محتوی ماده آلی این خاک (۱/۶ درصد) هماهنگی ندارد و احتمالاً نشانه اشکال در روش اندازه‌گیری است.

در تمامی تیمارهای نمونه خاک سرارود، به‌جز شدت بالا (۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت)، تلفات خاک ناچیز بود و فرسایش-شیاری به‌جز در شیب و شدت بالای بارندگی، رخ نداد. با توجه به جدول (۳)، علت کم بودن هدررفت خاک در این نمونه، ساختمان بسیار خوب (دانه‌ای خیلی ریز)، بالاترین ظرفیت نفوذ به مقدار ۵/۸۲ سانتی‌متر بر ساعت، و بالاترین مقدار ماده آلی به‌میزان ۱/۸۹ درصد بین چهار نمونه خاک است. این عوامل، در مجموع،

مطابق جدول (۴) در نمونه‌های خاک دو منطقه پیشکمر و سرارود، بیش‌ترین هدررفت خاک مربوط به تیمار I3-S2 (به‌ترتیب ۶/۳۰ و ۵/۶ کیلوگرم یعنی معادل حدود ۱۰ تن در هکتار) و کم‌ترین هدررفت خاک مربوط به تیمار I1-S2 (به‌ترتیب ۰/۱۴ و صفر کیلوگرم، یعنی کم‌تر از حدود ۰/۲۵ تن در هکتار) است. درحالی‌که در نمونه‌های خاک کوهین و گچساران، بیش‌ترین هدررفت خاک در تیمار I2-S3 (به‌ترتیب ۶/۸ و ۱۸/۷ کیلوگرم یعنی بیشتر از ۱۰ تن در هکتار) و کم‌ترین آن در تیمار I1-S2 (به‌ترتیب صفر و ۰/۴۲ کیلوگرم یعنی کم‌تر از حدود ۰/۷ تن در هکتار) رخ داده است.

نمونه خاک گچساران با داشتن ۵۷ درصد مجموع سیلت و ماسه خیلی ریز، ساختمان توده‌ای و ظرفیت نفوذ پایین نسبت به نمونه‌های خاک دیگر (۲/۸۶ سانتی‌متر بر ساعت) و میزان آهک حدوداً ۵۲ درصد و ۱۶ درصد سنگ‌ریزه بالای ۲ میلی‌متر،

رخ داده است و در سرارود و کوهین، پدیده‌ی غالب فرسایش سطحی و نهشته‌گذاری مجدد در سطح فلوم است.

نتایج بررسی فرسایش‌پذیری

مقادیر فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای و برآوردی در جدول (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر K-Obs محاسبه شده در دو مورد صفر بوده و در سایر موارد برای هر خاک عدد ثابتی نیست. شایان ذکر است که فرسایش‌پذیری، یک ویژگی ذاتی و مستقل خاک است، و فقدان فرسایش در یک رویداد غیرفرساینده به معنی صفر بودن آن نیست. از سوی دیگر، انتظار می‌رفت که برای یک خاک مشخص در شرایط آزمایشگاهی، مقدار فرسایش‌پذیری عددی کم و بیش ثابت باشد. بنابراین، با توجه به این که بخش عمده‌ای از فرسایش هر منطقه به رویدادهای مهم مربوط می‌شود، از رویدادهای کم اهمیت صرف‌نظر شد و فرسایش‌پذیری به‌دست آمده از مهم‌ترین رویداد در این پژوهش (I3-S2) مد نظر قرار گرفت. مقدار فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای در تیمارهای با فرسایش شدید (I3-S2 و I2-S3) و K-Vaezi یک طبقه اعشار از سه K برآوردی دیگر کوچک‌تر هستند که موید نامناسب بودن روابط برآورد K توسعه‌یافته در خارج از ایران برای خاک‌های دیم مناطق نیمه‌خشک کشور است. به‌طور دقیق‌تر، اگر K-Obs محاسبه شده برای تیمار I3-S2، معرف فرسایش‌پذیری واقعی خاک‌های بررسی‌شده پذیرفته شود، K-USLE ۴ تا ۸ برابر، K-EPIC ۳ تا ۷ برابر و K-Dg ۳ تا ۵ برابر از K-Obs بزرگ‌تر هستند. برای سایر تیمارها (شدت‌ها و شیب‌های کمتر)، این نسبت بزرگ‌تر می‌شود. بنابراین به‌نظر می‌رسد که دلیل ذکر شده توسط Khormai et al. (2016) در خصوص نامناسب بودن شاخص فرسایش‌پذیری USLE، به‌علت استفاده از بارش‌های بسیار شدید منطقی نبوده و عوامل مرتبط با خصوصیات خاک باید مورد کنکاش قرار گیرند.

برآوردهای K-Vaezi که در ایران توسعه یافته است، به‌استثنای یک مورد منفی (که اصولاً قابل پذیرش نیست)، از حدود نیم تا چهار برابر مقدار مشاهده‌ای (تیمار I3-S2) است. یک دلیل برای مقدار منفی و نتایج غیرقابل قبول این شاخص در خاک‌های مورد مطالعه، زیادتر بودن آهک خاک‌ها در مقایسه با حداکثر آهک موجود در خاک‌های مورد تحقیق (Vaezi et al., 2008) است.

مقاومت خاک در مقابل پدیده‌ی فرسایش را افزایش می‌دهند. این در حالی است که مجموع سیلت و ماسه خیلی ریز در این خاک بیش از ۶۰ درصد است. نکته جالب در تیمار I2-S3 سرارود، فزونی وزن معادل حجم شیپارها از تلفات کل است. مشاهدات نشان داد که ذرات فرسایش یافته عمدتاً خاکدانه‌های درشت‌دانه‌ای هستند که مجدداً به‌صورت مخروط‌های رسوبی کمی پایین‌تر نهشته شده‌اند.

در نمونه خاک کوهین با وجود داشتن درصد ماسه زیاد و نفوذپذیری متوسط، در تیمار با شیب ۲۵ درصد، هدررفت خاک و فرسایش شیاری زیادی رخ داد، به‌طوری‌که در مقایسه با نمونه خاک سرارود، هدررفت خاک و فرسایش شیاری به‌ترتیب ۳۴۰ و ۲۰ برابر بیشتر است. شایان ذکر است که در این تیمار، مقدار فرسایش کمتر از خاک گچساران بود. جالب آن که در شدت ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت، هدررفت خاک کوهین کمترین مقدار بین چهار نمونه خاک مورد بررسی را نشان داد. نمونه خاک لسی پیشکمر در شدت بالا (۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت)، بعد از گچساران بیشترین هدررفت خاک را نشان داد که دلیل احتمالی آن وجود ۷۳ درصد ذرات حساس به فرسایش شامل سیلت و ماسه خیلی ریز و ساختمان ضعیف است (Khormai et al., 2016). در این منطقه در شدت پایین باران (۳۳ میلی‌متر بر ساعت) فرسایش شیاری نیز رخ داده است. درحالی‌که در خاک‌های دیگر فرسایش شیاری در شدت کم ایجاد نشده است.

در تمامی مناطق با افزایش شیب و شدت باران، هدررفت خاک و فرسایش شیاری افزایش یافت که با افزایش شیب از ۶ به ۲۵ درصد در مناطق گچساران، کوهین، پیشکمر و سرارود تلفات خاک به‌ترتیب ۸، ۷، ۶ و ۳ برابر افزایش یافته است. هم‌چنین، با افزایش شدت از ۶۴ میلی‌متر بر ساعت به ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت در مناطق گچساران، کوهین، پیشکمر و سرارود، فرسایش شیاری به‌ترتیب ۴، ۲، ۶ و ۸۶ برابر بیشتر شد. دلیل افزایش ۸۶ برابری ناچیز بودن فرسایش در شدت ۶۴ میلی‌متر بر ساعت است.

شکل (۲)، وضعیت سطح خاک فرسایش یافته چهار خاک در بالاترین شدت (۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت) در پایان آزمایش شیب ۱۲ درصد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه خاک‌های پیشکمر، سرارود و گچساران فرسایش شیاری رخ داده است اما در نمونه خاک کوهین شیار کمی ایجاد شده و بیشترین فرسایش شیاری در دو نمونه خاک گچساران و پیشکمر

جدول ۵- فرسایش پذیری خاک‌های مورد مطالعه (مگاگرم.ساعت بر مگاژول.میلی‌متر)*

منطقه	پیشکمر	سرارود	کوهین	گچساران
11-S2	۰/۰۰۲۱	۰	۰	۰/۰۰۶۴
مشاهده‌ای				
I2-S1	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۱۵	۰/۰۲۳۴
بر اساس				
I2-S2	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۹۴
آزمایش در				
I2-S3	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۹۸
تیمارها**				
I3-S2	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۵۹	۰/۰۱۲۱
برآوردی بر				
K-USLE	۰/۰۶۴۵	۰/۰۳۳۶	۰/۰۴۸۱	۰/۰۵۷۹
اساس				
K-Vaezi	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۲۰	-۰/۰۰۲۵
ویژگی‌های				
K-EPIC	۰/۰۵۵۹	۰/۰۴۷۶	۰/۰۳۳۶	۰/۰۳۸۳
خاک				
K-Dg	۰/۰۳۹۹	۰/۰۳۶۴	۰/۰۲۷۸	۰/۰۳۷۳

* در تیمارهای با مقدار صفر (بدون اعشار)، رواناب و فرسایش رخ نداده است. ** تیمارها در جدول (۲) تعریف شده‌اند.



شکل ۲- وضعیت سطح خاک فرسایش یافته چهار خاک، الف: پیشکمر، ب: سرارود، ج: کوهین و د: گچساران

این آزمایش‌ها ارتباط دارد. (Toy et al. (2002 اظهار داشتند که تا ۱۰۰۰ درصد خطا برای نرخ پایین تلفات خاک (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) در پلات‌های مشابه قابل انتظار است. به عبارت دیگر، دلیل مناسب‌تر بودن نسبت‌ها در دو تیمار I3-S2 و I2-S3، شکل-گیری فرسایش شیاری در خاک‌ها و بروز سیمای واقعی فرسایش خاک است. این یافته، اهمیت استفاده از رویدادهای شدید بارش و شیب‌های تند حداقل در تحقیقات آزمایشگاهی فرسایش پذیری با فلوم چند متری را نشان می‌دهد. این موضوع با توجه به نقش مهم چند رویداد شدید در میانگین فرسایش (Arabkhedri, 2015) نیز پشتیبانی می‌شود.

مقایسه نسبت‌های برآوردی و مشاهده‌ای با آزمون t
جدول (۶)، نتایج نسبت شاخص‌های فرسایش پذیری مشاهده‌ای (K-Obs.) در پنج تیمار آزمایشی و نسبت شاخص‌های برآوردی فرسایش پذیری K-USLE, K-Vaezi, K-EPIC و K-Dg را نشان می‌دهد. نسبت شاخص‌های مشاهده‌ای به استثناء دو تیمار I3-S2 و I2-S3، پراکنده یا غیرقابل محاسبه هستند. دلیل پراکندگی مورد بحث، ناچیز (و حتی صفر) بودن فرسایش در بارندگی‌های کم شدت و شیب‌های کم است. چنانچه رقم صفر در مخرج قرار گیرد، نسبت، غیرقابل محاسبه می‌شود. یک دلیل احتمالی دیگر از عدم ثبات و پراکندگی در آزمایش‌هایی با مقادیر فرسایش کم (در اینجا کمتر از ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) به خطای نسبی زیاد

جدول ۶- مقایسه نسبت شاخص فرسایش پذیری برآوردی به چهار روش مختلف با نسبت شاخص فرسایش پذیری مشاهده‌ای برای چهار خاک مورد مطالعه

	نسبت شاخص مشاهده‌ای (K-Obs.)**					نسبت شاخص برآوردی			نسبت دو خاک
	I1-S2	I2-S1	I2-S2	I2-S3	I3-S2	K-Dg	K-EPIC	K-Vaezi	
.	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۶۲	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۲۲	۰/۵۳	سرارود به پیشکمر
.	۲/۴۰	۲/۲۲	۲/۶۲	۰/۷۸	۰/۷۰	۰/۶۰	۰/۲۶	۰/۷۶	کوهین به پیشکمر
۳/۰۰	۴/۹۰	۲/۴۵	۶/۱۳	۱/۶۲	۰/۹۳	۰/۶۸	*	۰/۹۰	گچساران به پیشکمر
#	۱۶۸	۳۹/۲۲	۴/۲۱	۰/۸۷	۰/۷۶	۰/۷۱	۱/۱۸	۱/۴۲	کوهین به سرارود
#	۳۴۳	۴۳/۳۳	۹/۸۴	۱/۸۰	۱/۰۲	۰/۸۰	*	۱/۶۹	گچساران به سرارود
#	۲/۴۰	۱/۱۱	۲/۳۴	۲/۰۶	۱/۳۴	۱/۱۴	*	۱/۱۹	گچساران به کوهین

غیر قابل محاسبه؛ * مقادیر منفی؛ ** تیمارها در جدول (۲) تعریف شده‌اند.

فرسایش نشان داد که بیشترین مقدار هدررفت خاک در شدیدترین بارش (۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت) و تندترین شیب (۲۵ درصد) اتفاق افتاد که در بیشتر موارد، فرسایش شیاری سهم قابل توجهی داشت. در تمامی نمونه خاک‌ها، فرسایش شیاری در تیمارهایی با شدت بارندگی و شیب کم (I2-S1 و I1-S2) تشکیل نشد یا سهم آن ناچیز بود. علاوه بر این، در برخی از نمونه خاک‌ها با ساختمان بهتر، در تیمار با شدت حداقل (۳۳ میلی‌متر بر ساعت) رواناب و هدررفت خاک رخ نداد.

شاخص فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای تیمارها با تقسیم هدررفت خاک به حاصل ضرب عوامل RLSCP معادله USLE تعیین شد که تفاوت قابل توجهی بین تیمارهای هر نمونه خاک و بین خاک‌ها را نشان داد. از میان تیمارها، بالاترین شدت (I3S2) که فرسایش هر چهار نمونه خاک بیش از ۷ تن در هکتار و در همه آن‌ها فرسایش شیاری نیز رخ داده بود، نتایج منطقی‌تری نشان داد. در مقایسه با تیمار برتر، K-Vaezi کم‌برآورد و سایر روش‌ها بیش‌برآورد بودند. K-Dg با ۳ تا ۵ برابر بیش‌برآوردی نتایج بهتری در مقایسه با روش‌های دیگر نشان داد. مقایسه نسبت شاخص‌های فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای و برآوردی خاک‌های مورد مطالعه با آزمون t، حکایت از عدم اختلاف معنی‌دار دو شاخص K-Dg و K-EPIC در سطح ۵٪ است. بر اساس نتایج این پژوهش، توصیه می‌شود در استفاده از شاخص‌های فرسایش-پذیری توسعه یافته در خارج از کشور احتیاط شود. با این حال، برای برآورد صحیح‌تر شاخص فرسایش‌پذیری در خاک‌های مشابه، شایسته است شاخص K-Dg به عدد چهار تقسیم شود. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که برآورد و مدل‌سازی فرسایش یا فرسایش-پذیری خاک یا عوامل دیگر مؤثر بر فرسایش با تکیه بر رویدادهای مهم فرسایش که همان مقادیر بالای فرسایش است، اجرا شود. بررسی مجدد تحقیقات گذشته با استخراج داده‌های مربوط به رویدادهای شدید و استثنایی، زمانی که فرسایش شیاری رخ داده باشد و یا حداقل پس از طبقه‌بندی رویدادها بر حسب شدت فرسایش توصیه می‌شود. بدیهی است لازمه دستیابی به چنین

به این ترتیب، اختلافات تا چند ده برابر بین مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای فرسایش‌پذیری گزارش شده در تحقیقات قبلی (Vaezi et al., 2008; Khormai et al., 2016) که در شرایط طبیعی به دست آمده‌اند، نباید زیاد باعث نگرانی شود، زیرا رویدادهای اندازه‌گیری شده عمدتاً به بارش‌های کم‌شدت مربوط هستند که در میانگین طولانی‌مدت فرسایش، نقش زیادی ندارند. به بیانی دیگر، نباید انتظار داشت که فرسایش‌پذیری مشاهده‌ای خاک‌ها (محاسبه شده با رابطه ۱) در تمام رویدادهای فرسایش، مقداری ثابت بماند.

از میان دو تیمار مشاهده‌ای برتر، با توجه به وضعیت فرسایش خاک‌ها از جمله تشکیل شیاری در آزمایشگاه، نسبت‌ها در تیمار I3-S2 منطقی‌تر به نظر می‌رسد. از میان شاخص‌های برآوردی فرسایش‌پذیری، نسبت مربوط به شاخص K-Vaezi در سه حالت، به دلیل منفی بودن قابل محاسبه نبود. بنابراین، این شاخص در ادامه از تحلیل‌ها کنار گذاشته شد. شایان ذکر است که برخی مطالعات، بی‌اثر بودن ویژگی‌های آهک و سنگ‌ریزه بر کاهش فرسایش‌پذیری خاک را نشان داده‌اند (Mazloom Aliabadi, 2013; Khalilmoghadam et al., 2011; Javadi et al., 2005; Merzouk and Blake, 1991; Barahona et al., 1990). این محققان دریافته‌اند که در این خاک‌ها، آهک عمدتاً در اندازه سیلت و درشت‌تر حضور دارد.

مقایسه آماری نسبت‌های شاخص مشاهده‌ای برتر (I3-S2) و نسبت‌های متناظر سه شاخص برآوردی K-Dg، K-EPIC و K-USLE با آزمون t جفتی، حکایت از اختلاف معنی‌دار نسبت‌های K-USLE و معنی‌دار نبودن اختلاف با دو شاخص K-Dg و K-EPIC در سطح کمتر از ۵ درصد دارد. به عبارت دیگر، اگرچه این دو شاخص، فرسایش‌پذیری خاک‌ها را بیش‌برآورد می‌کنند، قادر هستند که تفاوت خاک‌ها از نظر فرسایش‌پذیری را نشان دهند.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی چهار نمونه خاک دیم استان‌های گلستان، کرمانشاه، قزوین و کهگیلویه و بویراحمد در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و

بر فرسایش دیم‌زارهای منتخب استان‌های کرمانشاه، گلستان، قزوین و کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از برج شبیه‌ساز باران" به شماره ۰۴-۲۹-۲۹-۰۲۸-۹۶۰۷۶۲ استخراج شده و اعتبار آن از معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی تأمین شده است که از هر دو دستگاه پژوهشی و اجرایی مذکور تشکر می‌شود. ویراستاری مقاله حاضر را سرکار خانم دکتر بهجت تاج‌الدین بر عهده داشتند که بدین‌وسیله از ایشان نیز قدردانی می‌شود.

REFERENCES

- Anonymous. (2000). *Guidelines for Laboratory Analysis of Soil and Water Samples*. Vice Presidency for Planning and Supervision. No. 467. (In Farsi)
- Arabkhedri, M. (2015). The possibility of estimation of long-term average annual erosion based on measurements of erosion from a few rainfall events. *Extension and Development of Watershed Management*, 3(11), 7-15. (In Farsi)
- Arabkhedri, M., Mahmoodabadi, M. Rouhipour, H. Heydariyan, A. Lotf-Allahzade, D. Rahimzade, H. and Amiri, N. (2008). Study on rain characteristics and calibration of rainfall simulator of Soil Conservation and Watershed Management Research Center. Final Report, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. (In Farsi)
- Barahona, E., Quirantes, J. Guardiola, J. L. and Iriarte, A. (1990). Factors affecting the susceptibility of soils to interrill erosion in south-eastern Spain. In Rubio, J.L and Rickson, R.J. (eds), *Strategies to combat desertification in Mediterranean Europe. Commission of the European Communities Report EUR*.
- Boardman, J. 1998. An average soil erosion rate in Europe: Myth or Reality? *Journal of Soil and Water Conservation*, 53(1), 46-50.
- Foster, G. R. and Meyer, L. D. (1972). A closed-form soil erosion equation for upland areas. In Shen, H.W. (ed.), *Sedimentation. Department of Civil Engineering*.
- Foster, G. R., McCool, D. K. Renard, K. G. and Moldenhauer, W. C. (1981). Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36 (6), 355-359.
- Hazelton, P and Murphy, B. (2007). *Interpreting soil test results: What do all the numbers mean?*. Australia: CSIRO publishing.
- Javadi, P., Rouhipour, H. and Mahjoubi, A. K. (2005). Effect of rock fragments cover on erosion and overland flow using flume and rainfall simulator. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 12(3), 287-310. (In Farsi)
- Johnson, R. A. and Bhattacharyya, G. K. (2006). *Statistics: Principles and Methods* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Karami, E., Ghorbani Dashtaki, S. and Khalilimoghadam, B. (2018). Effects of land management on soil erodibility-A case study in part of Zayandeh-Rood watershed. *Journal of Agricultural Engineering*, 40(2), 105-119. (In Farsi)
- Khalilimoghadam, B., Ghorbani, B. and Ghorbanidashtaki, S. (2013). Investigation of The Relationship between Landuse and The Sediment Load to Evaluate the Model Accuracy EUROSEM In part of the northern Karoon sub-watershed. *Electronic Journal of Soil Management and sustainable production*, 3(1): 15-38. (In Farsi)
- Khalilimoghadam, B., Afyuni, M., Jalalian, A., Abbaspour, K.C., Dehghani, A. A. (2011). Estimation surface soil shear strength by pedo-transfer functions and soil spatial prediction functions. *Iranian Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 25(1): 187-195. (In Farsi)
- Khormai, H., Kiani, F. and Khormali, F. (2016). Evaluation of soil erodibility factor (k) for loess derived landforms of Kechik watershed in Golestan province. *Journal of Water and Soil*, 30(6), 2078-2086. (In Farsi)
- Liu, Y., Cui, Z. Huang, Z. López-Vicente, M. and Wu, G-L. (2019). Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. *Catena*, 182, 1-7.
- Mazloom Aliabadi, Y. (2013). Determination rainfall erosivity and soil erodibility in universal soil loss equation (Sanganeh area, Khorasan Razavi Province). M.S.c. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. (In Farsi)
- Merzouk, A. and Blake, G. R. (1991). Indices for the estimation of interrill erodibility of Moroccan soils. *Catena*, 18, 537-550.
- Misra, R. K. and Rose, C. W. (1996). Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST. *European Journal Soil Science*, 47:593-604.
- Mohammadzadeh, Z. (2011). Cementing agents and aggregate stability indices as estimators of interrill erodibility coefficient in the semi-arid soils from East Azerbaijan province. M.S.c. Thesis, University of Tabriz, Tabriz. (In Farsi)
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation* (Third ed.). Blackwell Publishing.
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S. Bahrami, H. A and Abbasi, M. (2018). Towards prediction of soil

- erodibility, SOM and CaCO₃ using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in semi-arid region of Iran. *Geoderma*, 314: 102-112.
- Refahi, H. Gh. (2009). *Water erosion and its control* (First ed.). Tehran: University of Tehran Press. (In Farsi)
- Reichert, J. M. and Darrell Norton, L. (2013). Rill and interrill erodibility and sediment characteristics of clayey Australian Vertosols and a Ferrosol. *Soil Research*, 51:1-9.
- Romkens, M. J. M., Young, R. A. Poesen, J. W. A. McCool, D. K. El-Swaify, S. A. and Bradford, J. M. (1997). Soil erodibility factor (Chapter 3). In: Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K and Yoder, D. C. (Eds.), *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook No. 703. Washington, D. C: *US Department of Agriculture*.
- Rouhipour, H., Farzaneh, H. and Asadi, H. (2004). The effect of aggregate stability indices on soil erodibility factors using rainfall simulator. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 11(3), 235-254. (In Farsi)
- Shirazi, M. A. and Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of American Journal*, 48, 142-147.
- Solomon, K. (1979). Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1078-1086.
- Toy, T. J., Foster, G. R. and Renard, K. G. (2002). *Soil erosion: Processes, prediction, measurement, and control*. John Wiley and Sons, Inc.
- Vaezi, A. R., Bahrami, H. A. Sadeghi, S. H. R. and Mahdian, M. H. (2008). Study of factors affecting erodibility based on the universal soil loss equation in calcareous soils. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 14(5), 55-66. (In Farsi)
- Vaezi, A. R., Eslami, S. F and Keesstra, S. (2018). Interrill erodibility in relation to aggregate size class in semi-arid soil under simulated rainfalls. *Catena*, 167: 385-398.
- Veihe, A. (2002). The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. *Geoderma*, 106: 101-120.
- Wang, B., Zheng, F. and Guan, Y. (2016). Improved USLE-K facrot prediction: a case study on water erosion areas in china. *International Soil and Water Conservation Research*, 4, 3:168-176.
- Williams, J. R., Jones, C. A. and Dyke, P. T. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and productivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 27, 129-144.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Agriculture Handbook, No. 537. US Department of Agriculture, Washington DC.
- Young, R. A., Romkens, M. J. M. and McCool, D. K. (1990). Temporal variations in soil erodibility. In: Bryan, R.B, *Soil Erosion- Experiments and Models*. *Catena*, supplement 17, 41-53.
- Zhang, K., Li, S., Peng, W. and Yu, B. (2004). Erodobolity of agricultural soils and loess plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 76: 157-165.
- Zhang, K., Yue, Y. Dong, J. Yang, Q. and Xu, X. (2019). Adapting and testing use of USLE K factor for agricultural soils in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 269: 148-155.