

# ارزیابی و بازنگری مدل MUSLE در پیش‌بینی هدررفت خاک در کرت‌های کوچک با استفاده از باران‌های

## شبیه‌سازی شده

علی‌رضا واعظی<sup>۱\*</sup>، مروارید احمدی<sup>۲</sup>

### چکیده

معادله جهانی فرسایش خاک تصحیح شده (MUSLE) از جمله مدل‌های برآورد هدررفت خاک بر اساس خصوصیات رواناب در ابعاد رگبار می‌باشد. این مدل نیازمند ارزیابی در کرت‌های کوچک برای باران‌های نواحی نیمه‌خشک می‌باشد. جهت ارزیابی کارایی مدل MUSLE، آزمایش‌های صحرایی با استفاده از ۲۱ کرت فرسایشی طراحی شد. کرت‌ها تحت هفت شدت بارندگی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفتند و رواناب و رسوب در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شدند. هدررفت خاک با استفاده از شاخص فرسایشی مدل MUSLE بر اساس حجم رواناب (Q) و دبی اوج رواناب ( $q_p$ ) به دست آمد و با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد. هدررفت خاک برآورد شده به اندازه ۳/۸۷ برابر بیش‌تر از مقدار مشاهده‌ای بود. برای بهبود برآورد مدل، توان شاخص فرسایشی رواناب از ۰/۵۶ به ۰/۶۲ اصلاح شد ( $(Qq_p)^{0.62}$ ). اصلاح این توان موجب بهبود کارایی مدل از ۵/۵- به ۰/۴۷ و کاهش ریشه میانگین مربعات خطا از ۰/۰۰۰۱۳۷ به ۰/۰۰۰۰۳۱ شد. به طور کلی این پژوهش نشان داد که بکارگیری مدل MUSLE در کرت‌های کوچک در منطقه نیمه‌خشک منجر به بیش‌برآورد هدررفت خاک می‌گردد. از این رو ضروری است شاخص فرسایشی رواناب بر اساس داده‌های مشاهده‌ای مورد واسنجی قرار گیرد. مدل بازنگری شده MUSLE می‌تواند برای برآورد هدررفت خاک در کرت‌های کوچک در منطقه نیمه‌خشک مورد استفاده قرار بگیرد.

**کلمات کلیدی:** حجم رواناب، دبی اوج رواناب، شدت باران، کارایی مدل، منطقه نیمه‌خشک

### مقدمه

هدررفت خاک و بار رسوب شاخص مهم اندازه‌گیری روند و شدت تخریب زمین یک منطقه می‌باشد (۲۷ و ۳۶). اطلاعات کافی در مورد فرسایش خاک و بار رسوب برای دستیابی به کاربری پایدار زمین و حفظ کیفیت آب‌ها مهم می‌باشد (۲۵ و ۳۷). اندازه‌گیری هدررفت خاک و بار رسوب حوضه‌ها دشوار است به این دلیل از مدل‌های مختلف جهت تخمین آن‌ها استفاده می‌شود (۱۹)

<sup>۱</sup>. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: [@gmail.com](mailto:vaezi.alireza@gmail.com)

<sup>۲</sup>. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

و (۴۹). تخمین هدررفت خاک با استفاده از مدل‌های تجربی مانند رابطه جهانی فرسایش خاک (USLE Universal Soil Loss Equation) (۵۳ و ۵۴)، رابطه جهانی فرسایش خاک تصحیح شده (MUSLE Modified Universal Soil Loss Equation) (۵۰)، رابطه جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE Revised Universal Soil Loss Equation) (۳۴) و نسخه تصحیح شده رابطه جهانی فرسایش خاک (USLE-M Universal Soil Loss Equation-Modified) (۲۴) صورت می‌گیرد. هر یک از مدل‌ها با توجه به داده‌های موجود می‌تواند در مناطقی نتایج منطقی و قابل قبولی ارائه دهد (۱۱).

مدل‌های USLE و RUSLE اغلب برای برآورد هدررفت خاک در ابعاد رخدادهای مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و غالباً هدررفت کم خاک را بیش برآورد و هدررفت زیاد را کم برآورد می‌کنند چرا که این مدل‌ها، رواناب را که یک عامل کلیدی در غلظت رسوب می‌باشد، به طور مستقیم مورد استفاده قرار نمی‌دهند (۲۳). ویلیامز (۵۰) مدل تغییر یافته MUSLE را بر مبنای تک رخداد بارندگی و برای حوزه‌های کوچکتر از ۶۵ کیلومتر مربع ارائه کرد به این صورت که به جای عامل انرژی باران USLE، انرژی رواناب را جایگزین کرد که تابعی از حاصل ضرب حجم رواناب و دبی اوج رواناب است:

$$SY_e = a(Q.q_p)^b.K.L.S.C.P \quad (1)$$

که در آن: Y هدررفت خاک رخداد (ton)، Q حجم رواناب ( $m^3$ )،  $q_p$  دبی اوج رواناب ( $m^3 \text{ sec}^{-1}$ )، K فرسایش پذیری خاک (بدون واحد)، LS عامل شیب (بدون واحد)، C عامل پوشش گیاهی (بدون واحد) و P عامل عملیات حفاظت خاک (بدون واحد) و a و b ضرایبی به ترتیب برابر با ۱۱/۸ و ۰/۵۶ می‌باشد. عبارت  $Q.q_p$  به عنوان شاخص جریان برای برآورد هدررفت خاک در رخداد می‌باشد. ویلیامز (۵۱) برتری‌های MUSLE در شبیه‌سازی هدررفت خاک را به این صورت توصیف کرد: ۱- کاربرد در تک رخدادها ۲- حذف نیاز به نسبت تحویل رسوب زیرا رواناب انرژی لازم برای حمل رسوب را به خوبی منعکس می‌کند ۳- دقت بیش‌تر زیرا رواناب تغییرات بار رسوب را نسبت به باران بهتر نشان می‌دهد. مزیت اصلی استفاده از شاخص‌های فرسایشی دارای عامل رواناب، کاهش خطای برآورد هدررفت خاک می‌باشد (۱۴ و ۱۸).

مدل MUSLE برای تخمین هدررفت خاک در مطالعات بسیاری استفاده شده است و نتایج مطلوب و گاه نامطلوبی به دست آمده است. ویلیامز (۵۱)، کولی و ویلیامز (۱۶) در هاوایی، اسمیت و همکاران (۴۰) در تگزاس و ارسکین و همکاران (۱۷) در استرالیا نتایج مناسبی در برآورد هدررفت خاک با استفاده از مدل MUSLE به دست آوردند. مطالعاتی مانند واعظی و همکاران (۶) در آذربایجان شرقی، محمودزاده و همکاران (۲۶) در باتورست استرالیا و صادقی و همکاران (۳۸) و نور و همکاران (۲۹) در شمال ایران برآورد مناسبی با استفاده از این مدل به دست نیاوردند. کارگر و همکاران (۵) در سمنان با به کارگیری مدل MUSLE نتایج

قابل قبولی به دست آوردند. در برخی از مطالعات به دلیل وجود همبستگی معنی‌دار بین نتایج برآوردی مدل و داده‌های مشاهده-ای، اصلاح ضرایب مدل پیشنهاد شده است، رضایی‌فرد و همکاران (۲) در زیر حوضه اقیچه لتیان، خواجه‌ای و همکاران (۱) در آذربایجان غربی و سرخوش (۳) در حوزه آبخیز در که بیان کردند که اصلاح مدل MUSLE برآورد مناسب هدررفت خاک را در پی خواهد داشت.

به طور کلی پیشینه استفاده از مدل‌های برآورد هدررفت خاک در سراسر جهان مؤید این نکته است که استفاده از مدل‌های برآورد هدررفت خاک بدون انجام کالیبراسیون منطقه‌ای، احتمال اشتباه در برآورد را بسیار افزایش می‌دهد. اهمیت برآورد دقیق به خصوص در مناطقی بیش‌تر است که خاک‌های آسیب‌پذیر، پوشش گیاهی کم و الگوی نامنظم بارش منجر به هدررفت خاک حاصلخیز سطحی و نیز آسیب به مناطق پایین‌دست می‌گردد. بسیاری از مناطق نیمه‌خشک دارای چنین شرایطی هستند و از این رو شدت وقوع فرسایش آبی در آنها بالا است. در این راستا ارائه مدلی مناسب برای برآورد هدررفت خاک در این مناطق ضروری است. برای جلوگیری از پیامدهای برآورد نامناسب هدررفت خاک به خصوص زمانی که مکان استفاده از مدل شرایطی بسیار متفاوت از مکان ارائه مدل داشته باشد، ارزیابی دقت مدل برای منطقه مورد استفاده ضروری می‌باشد (۳۳). با توجه به اهمیت برآورد هدررفت خاک در هر یک از رخدادهای باران در منطقه نیمه‌خشک، هدف این مطالعه نیز ارزیابی کارایی مدل MUSLE در ابعاد کرت و در صورت نیاز انجام اصلاحاتی در مدل به منظور بهبود بیش‌بینی هدررفت خاک در منطقه نیمه‌خشک می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### دامنه مطالعاتی

این پژوهش در دامنه‌ای با خاک دست نخورده در محدوده‌ی دانشگاه زنجان به طول ۳۰ m و عرض ۳۰ m و مساحت ۹۰۰ m<sup>2</sup> در سال ۱۳۹۲ انجام شد. این دامنه در طول جغرافیایی ۲۵° ۲۴' ۴۸" و عرض جغرافیایی ۵۶° ۴۰' ۳۶" یا شیب ۹ درصد و خاک لوم شنی واقع شده است. میانگین دمای سالانه ۱۰/۴ °C و متوسط بارندگی سالانه در دوره آماری ۳۳ ساله (۱۳۸۵-۱۳۵۲) حدود ۳۰۹ میلی‌متر است. این پژوهش در کرت‌های فرسایشی و تحت باران شبیه‌سازی شده انجام گرفت. آزمایش در هفت شدت بارندگی (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر بر ساعت) با مدت ثابت ۶۰ دقیقه در سه تکرار با مجموع ۲۱ واحد آزمایشی انجام گرفت. برای انتخاب شدت و مدت مناسب، داده‌های ۱۹۶۱ رخداد باران ثبت شده در ایستگاه قتلوق غرب زنجان طی سال-های ۱۳۸۰-۱۳۹۰ بررسی شد. فراوانی باران‌هایی با شدت کم‌تر از ۷۰ mm/h و مدت کم‌تر از ۶۰ دقیقه بالا بود به این دلیل این دامنه شدت و مدت مورد استفاده قرار گرفتند. برای ایجاد باران، یک دستگاه شبیه‌ساز باران قابل حمل به ابعاد صفحه‌ی بارش ۱/۴

متر در ۱/۴ متر و ارتفاع ۲/۲۵ متر طراحی و استفاده شد (شکل ۱). ارتفاع دستگاه برای رساندن سرعت سقوط قطرات باران به بیش از ۷۰٪ سرعت حد تعیین شد (۷). شدت‌های بارندگی مورد استفاده در آزمایش به وسیله فشارسنج نصب شده در مسیر حرکت آب تنظیم و اعمال شدند (۸).



شکل ۱- نمایی از کرت فرسایشی و شبیه‌ساز باران مستقر بر روی آن

### تعیین ویژگی‌های خاک دامنه

برای آگاهی از ویژگی‌های خاک، تعداد سه نمونه از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک از سطح دامنه جمع‌آوری گردید و جهت انجام آزمایشات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شد. در نمونه‌های خاک، توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (۱۳)، درصد سنگریزه به روش وزنی (۲۱)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب در ۱۰۰ گرم خاکدانه با قطر ۴ تا ۶ میلی‌متر (۲۲) طی مدت یک دقیقه با استفاده از الک تر (۴۶)، pH با استفاده از pH سنج (۴۳)، EC در عصاره اشباع با استفاده از EC سنج (۳۵)، ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (۴۸) و کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک نرمال (۳۱) اندازه‌گیری شدند. جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه فلزی با قطر ۴/۵ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر و نفوذپذیری خاک به روش استوانه مضاعف در صحرا اندازه‌گیری شدند.

### پیاده‌سازی کرت‌های فرسایشی

جهت آماده‌سازی زمین و از بین بردن پوشش گیاهی پراکنده‌ی سطحی، دامنه مورد آزمایش تحت شخم و سپس تسطیح قرار گرفت. جهت مسدود کردن پیرامون کرت‌ها از ورق گالوانیزه به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و طول ۵ متر استفاده شد که به عمق ۱۰ سانتی‌متر در خاک فرو برده شد. ابعاد کرت‌ها ۱ متر در ۱/۴ متر در نظر گرفته شد. انتخاب این ابعاد برای آزمایش‌های شبیه‌سازی

باران از آنجا بود که سطح کرت بزرگتر از ۱ در ۱ متر نتایج دقیق‌تری به دست می‌دهد (۲۰). برای تسهیل جمع‌آوری رواناب و رسوب، ضلع پایینی کرت‌ها با استفاده از ورق گالوانیزه به شکل مثلثی ساخته شد و مرکز آن نیز به شکل نیم دایره، جهت قرارگیری لوله‌ی خروج آب و رسوب برش داده شد. در پایین دست هر کرت نیز چاله‌ای به منظور قرارگیری مخزن جمع‌آوری رواناب و رسوب ایجاد شد و لوله‌ی پلیکا به طول ۵۰ سانتی‌متر برای هدایت رواناب و رسوب به داخل مخزن، در مجرای انتهایی کرت قرار گرفت (۴۶).

### اندازه‌گیری رواناب و هدررفت خاک

رواناب و رسوب تولید شده در هر بارش در فواصل زمانی ۵ دقیقه از آغاز بارندگی برای تعیین دبی اوج رواناب ( $q_p$ ) جمع‌آوری گردید. حجم مخلوط رواناب و رسوب حاصل از هر کرت با استوانه‌ی مدرج اندازه‌گیری شد. نمونه‌های موجود برای تهیه نمونه‌ی همگن کاملاً مخلوط گردید و سپس از هر ظرف حاوی رواناب و رسوب، یک نمونه‌ی همگن به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر تهیه شد. به ازای یک لیتر رواناب، ۵۰ میلی‌لیتر نمونه همگن تهیه شد تا نماینده کل رواناب و رسوب کرت باشد (۴۴). نمونه‌ی همگن برای جدا کردن رواناب و رسوب به آزمایشگاه منتقل شد. رسوب موجود در نمونه‌ی همگن در آزمایشگاه با کاغذ صافی واتمن ۴۲ از رواناب جدا شد (۴۷) و پس از خشک شدن در آون در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت توزین شد و جرم کل رسوب نمونه تعیین و از آن مقدار کل رواناب و هدررفت خاک کرت رخداد برای ۲۱ کرت آزمایشی به دست آمد.

### برآورد هدررفت خاک با مدل MUSLE و ارزیابی مدل

هدررفت خاک با شاخص فرساینده‌ی مدل MUSLE بر مبنای دبی اوج ( $q_p$ ) و حجم کل رواناب ( $Q$ ) مطابق با رابطه (۱) به دست آمد. دبی اوج رواناب، حداکثر حجم رواناب خروجی از کرت‌ها در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای می‌باشد و حجم کل رواناب نیز از مجموع حجم رواناب‌های جمع‌آوری شده در بازه‌های ۵ دقیقه‌ای به دست آمد. داده‌های حاصل از آزمایش از نظر نرمال بودن توزیع آماری با استفاده از آماره‌های چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. رابطه بین هدررفت خاک و شاخص فرساینده‌ی مدل MUSLE با استفاده از توابع مختلف بررسی شد. برای ارزیابی مدل MUSLE در برآورد هدررفت خاک در کرت‌های کوچک، مقایسه بین نتایج مشاهده‌ای و برآوردی با استفاده از رسم خط یک به یک، شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (۴۲) و کارایی مدل (۲۸) انجام گرفت:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Z^*(x) - Z(x))^2}{n}} \quad (2)$$

$$ME = 1 - \frac{\sum (X_p - X_o)^2}{\sum (X_o - \bar{X}_o)^2} \quad (3)$$

که در آن‌ها:  $Z^*(x)$  هدررفت مشاهده شده رخداد،  $Z(x)$  هدررفت برآورد شده رخداد،  $n$  تعداد رخدادها،  $X_p$  هدررفت برآورد شده یک رخداد،  $X_0$  هدررفت مشاهده شده یک رخداد و  $\bar{X}_0$  میانگین هدررفت خاک مشاهده شده تمام رخدادها می‌باشد.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های خاک دامنه

با توجه به فراوانی نسبی ذرات شن (۵۶٪)، سیلت (۲۷٪) و رس (۱۷٪)، خاک دامنه دارای بافت لوم‌شنی بود و با توجه به میزان کربنات کلسیم معادل (حدود ۱۴ درصد) خاک دامنه در گروه خاک‌های آهکی قرار داشت. خاک مورد بررسی از نوع سنگریزه-ای (به طور میانگین ۱۹ درصد) بود. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت تر (۲/۹۳ mm) نشان داد که خاکدانه‌ها پایداری نسبتاً پایینی در برابر آب داشتند که این موضوع به دلیل پایین بودن میزان ماده آلی خاک (۱/۱۱) بود (۹). واکنش (pH) خاک حدود ۷/۴۵ و شوری آن ۳/۱۳ دسی‌زیمنس بر متر است (جدول ۱).

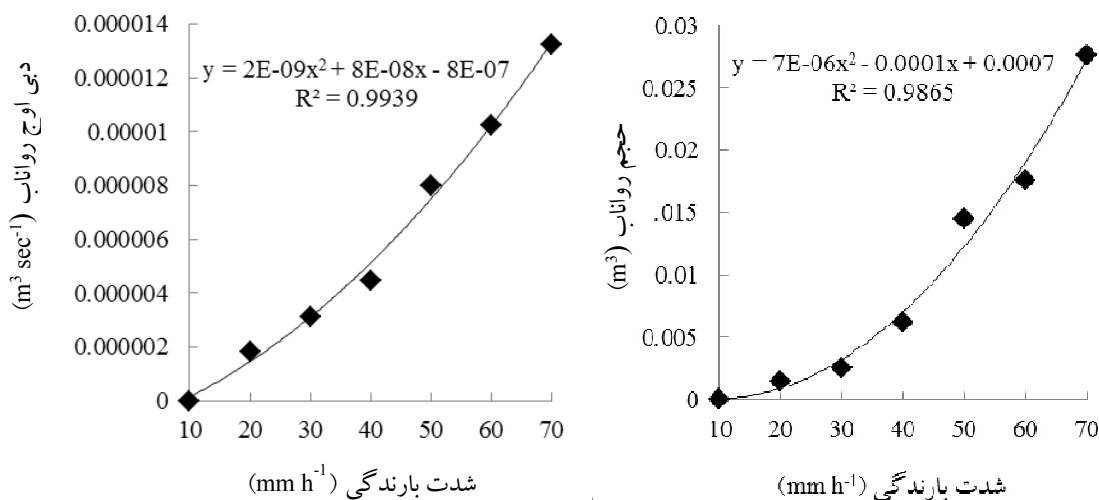
جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه مطالعاتی

شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	سنگریزه (%)	جرم مخصوص	میانگین وزنی قطر خاکدانه-های پایدار (mm)	نفوذپذیری خاک (cm/h)	واکنش خاک	شوری (dS/m)	ماده آلی (%)	کربنات کلسیم معادل (%)
۵۶	۲۷	۱۷	۱۹	۱/۵۲	۲/۹۳	۶/۸	۷/۴۵	۳/۱۳	۱/۱۱	۱۳/۸

### تأثیر شدت باران بر رواناب و هدررفت خاک

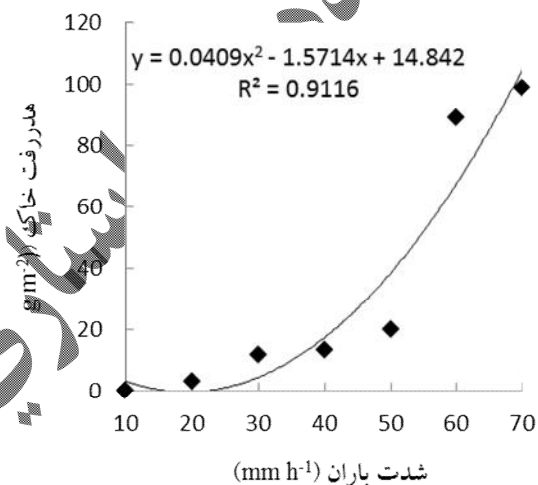
نتایج بررسی متغیرهای رواناب و هدررفت خاک در شدت‌های مختلف باران نشان داد که شدت بارندگی اثر معنی‌داری بر میزان رواناب ( $R^2=0.98, p<0.01$ )، دبی اوج ( $R^2=0.99, p<0.001$ ) و هدررفت خاک ( $R^2=0.91, p<0.01$ ) داشت (شکل ۲). با افزایش شدت باران، حجم رواناب به صورت توانی افزایش یافت ( $R^2=0.98, p<0.01$ ) و رابطه قوی بین شدت باران و رواناب برقرار بود. در پژوهشی واعظی (۴۵) با بررسی عوامل مؤثر بر تولید رواناب نشان داد که هم‌بستگی ضعیفی ( $R^2<0.41$ ) بین شدت بارندگی و رواناب وجود دارد. در شدت کم ( $10 \text{ mm h}^{-1}$ )، میزان رواناب صفر بود و در بیش‌ترین شدت ( $70 \text{ mm h}^{-1}$ )، ۲۸ درصد از کل بارش‌ها تبدیل به رواناب شدند. شدت ۲۰ میلی‌متر بر ساعت آستانه وقوع رواناب و هدررفت خاک در کرت‌ها بود. در اثر افزایش شدت بارندگی با تخریب بیش‌تر ساختمان خاک و افزایش ذخیره آب خاک، نفوذپذیری خاک به شدت کاهش یافت و رواناب بیش‌تری جاری شد (۱۲). به این ترتیب دبی اوج رواناب به عنوان تابعی از شدت باران افزایش یافت که مطابق با

نتایج استیمرگ و ویلمز (۴۱) می‌باشد. رابطه افزایشی بین شدت بارندگی و هدررفت خاک نیز مشاهده می‌شود. انرژی قطرات باران باعث تشکیل سله، کاهش نفوذ و افزایش رواناب و در نتیجه افزایش ظرفیت حمل شد (۱۰). ژانگ و همکاران (۵۵) نیز با افزایش شدت باران و افزایش قدرت فرساینده‌گی، افزایش میزان رسوب تولید شده را مشاهده کردند.



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۲- رابطه بین شدت بارندگی و حجم رواناب (الف)، دبی اوج رواناب (ب) و هدررفت خاک (ج)

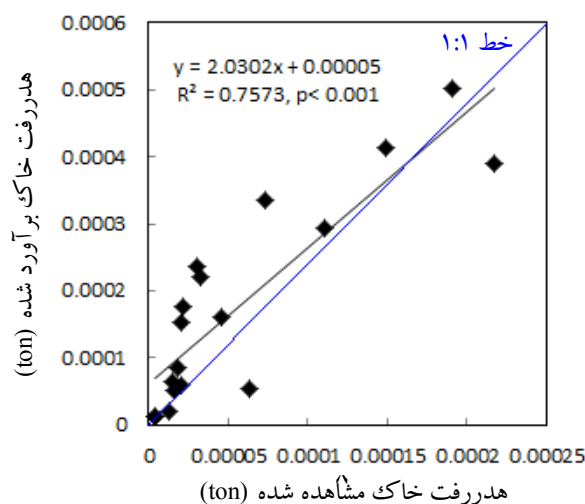
### ارزیابی مدل MUSLE

مقایسه میانگین بین مقادیر مشاهده‌ای هدررفت خاک و مقادیر برآوردی با مدل MUSLE با استفاده از آزمون T-test نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین دو مقدار وجود دارد (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی هدررفت خاک با مدل MUSLE

معنی داری	t	اختلاف انحراف استاندارد	میانگین اختلاف‌ها	درجه آزادی
۰/۰۰۰	-۴/۴۳	۰/۰۰۰۳۲۸	-۰/۰۰۱۴۶	۴۰

از آنجا که باران با شدت ۱۰ میلی متر بر ساعت منجر به رواناب و هدررفت خاک در کرت‌ها نشد، داده‌های باران‌های شبیه‌سازی شده با شدت ۲۰ تا ۴۰ میلی متر بر ساعت که منجر به هدررفت خاک در کرت‌ها شدند (۱۸ داده) برای ارزیابی مدل MUSLE مورد توجه قرار گرفتند. شکل ۳ رابطه بین هدررفت خاک مشاهده شده و برآورد شده با مدل MUSLE را نشان می‌دهد. با وجود همبستگی بالا بین هدررفت خاک مشاهده شده و برآورد شده ( $R^2=0.76, P<0.001$ )، هدررفت خاک برآورد شده بر اساس مدل MUSLE به اندازه ۳/۸۷ برابر مقدار مشاهده‌ای بود. ویلیامز و برنندت (۵۲) چنین بیان کردند که دلیل تفاوت در داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی در مناطق مختلف می‌تواند به دلیل تفاوت در اندازه کرت و حوضه مورد استفاده و یا تفاوت در اقلیم منطقه مورد مطالعه با منطقه ارائه مدل باشد. نتایج این پژوهش هم مؤید این نکته است که مدل MUSLE برای برآورد هدررفت خاک در مقیاس حوضه طراحی شده است و به این دلیل در مقیاس کرت نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد (۳۹). بر اساس نتایج، کارایی مدل (ME) ۵/۵- و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۰۰۱۳۷ بود که کارایی بسیار کم مدل را در برآورد هدررفت خاک نشان می‌دهند. صادقی و همکاران (۴) در حوزه خسیحان اراک نیز نشان دادند که با وجود همبستگی بالای مدل MUSLE با رسوب تولید شده، اختلافات معنی‌داری بین مقادیر برآورد شده با رسوب مشاهده شده وجود داشت. این اختلافات بر لزوم انجام واسنجی‌های منطقه‌ای این مدل تأکید می‌کند. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، برای رسیدن به برآورد دقیق‌تر از هدررفت خاک در ابعاد کرت، بازنگری مدل ضروری می‌باشد.





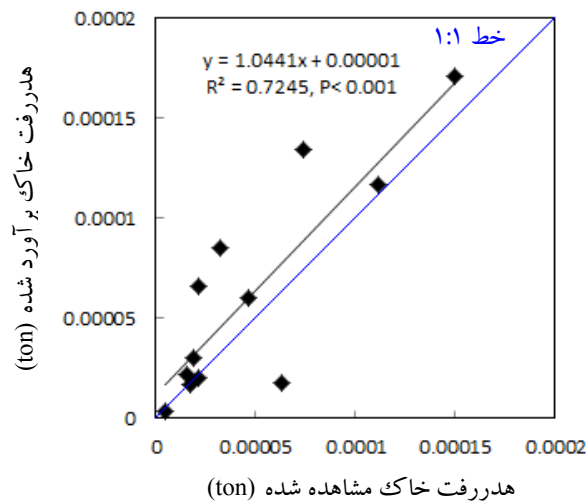
شکل ۳- مقایسه هدررفت خاک مشاهده شده و برآورد شده بر اساس مدل MUSLE با استفاده از داده‌های ۱۸ کرت

### بازنگری مدل MUSLE

دو سوم از داده‌های اندازه‌گیری شده حجم رواناب (Q) و دبی اوج (q<sub>p</sub>) در ۱۲ کرت از ۱۸ کرت برای دستیابی به مدل دقیق‌تر (مدل بازنگری شده MUSLE) مورد استفاده قرار گرفت. برای ارائه مدل بازنگری شده MUSLE، تلاش زیادی برای اصلاح ضرایب a و b و مقایسه نتایج حاصل از آن با داده‌های مشاهده‌ای هدررفت خاک (در ۱۲ کرت) انجام گرفت. با توجه به این که مدل MUSLE بر مبنای شاخص  $11.8(Qq_p)^{0.56}$ ، هدررفت خاک را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کرد، ابتدا تغییراتی در مقادیر ضریب a با کاهش مقدار آن به کم‌تر از ۱۱/۸ انجام گرفت. در هر مرحله از تصحیح ضریب a، خطای برآورد مدل برای ۱۲ داده تعیین شد. با این وجود، کاهش مقدار ضریب a، موجب بهبود برآوردهای مدل نشد. از این رو تغییراتی در مقدار ضریب b (۰/۵۶) انجام گرفت. از آنجا که دامنه تغییرات شاخص جریان (Q q<sub>p</sub>) در ابعاد کرت، کوچک‌تر از واحد بود، مقدار b بزرگ‌تر از ۰/۵۶ در نظر گرفته شد. با افزایش ضریب b از ۰/۵۶ به ۰/۶۲، نسبت هدررفت خاک برآوردی به هدررفت خاک مشاهده‌ای از ۳/۸۷ تن به ۰/۱۱ تن کاهش پیدا کرد. شکل ۴ مقدار هدررفت خاک برآوردی با مدل بازنگری شده MUSLE را در مقابل مقادیر مشاهده‌ای هدررفت خاک در داده‌های ۱۲ کرت نشان می‌دهد. ارزیابی مدل بازنگری شده نشانگر کاهش ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ۰/۰۰۰۰۳۱ و کارایی مدل (ME) به ۰/۴۷ بود. مدل بازنگری شده MUSLE به صورت زیر ارائه گردید:

$$SY_e = 11.8 (Q q_p)^{0.62} \quad (۴)$$

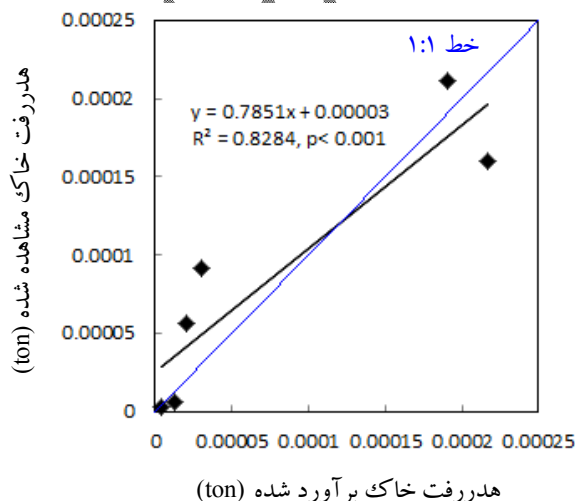
که در آن: SY<sub>e</sub> هدررفت خاک رخداد (ton)، Q حجم رواناب (m<sup>3</sup>) و q<sub>p</sub> دبی اوج رواناب (m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>) می‌باشد. به طور کلی اصلاح توان شاخص جریان به ۰/۶۲ نشان‌دهنده کاهش اثر حجم و دبی اوج رواناب در هدررفت خاک در کرت کوچک بود.



شکل ۴- مقایسه هدررفت خاک مشاهده شده و برآورد شده بر اساس مدل MUSLE با استفاده از داده‌های ۱۲ کرت

### اعتبارسنجی مدل MUSLE بازنگری شده

برای اعتبارسنجی مدل بازنگری شده MUSLE از داده‌های مشاهده‌ای هدررفت خاک در ۶ کرت استفاده گردید. نتایج نشان داد که تفاوت مقادیری برآوردی با مقادیر مشاهده‌ای به طور میانگین ۰/۰۴۳ تن می‌باشد. شکل ۵ مقادیر برآوردی هدررفت خاک بر اساس مدل بازنگری شده MUSLE را در مقابل مقادیر مشاهده‌ای هدررفت خاک برای ۶ کرت نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۰۰۰۰۳۸ و کارایی مدل (ME) ۰/۸۲ می‌باشد. این نتایج بیانگر دقت قابل اطمینان مدل بازنگری شده MUSLE برای برآورد هدررفت خاک در کرت‌های کوچک می‌باشد. در برخی مطالعات، مدل MUSLE برای بهبود برآورد هدررفت خاک با توجه به شرایط منطقه مورد واسنجی قرار گرفته است (۱۵ و ۳۲). صادقی و همکاران (۳۸) در ژاپن، پونگسای و همکاران (۳۲) در تایلند برای بهبود پیش‌بینی هدررفت خاک، مدل MUSLE را برای برآورد بهتر هدررفت خاک بر اساس منطقه مورد مطالعه اصلاح کردند. ادونگو و همکاران (۳۰) دو ضریب a و b در مدل MUSLE  $(a(Q_{qp})^b)$  را با آنالیز حساسیت بر اساس واریانس به عنوان عوامل حساس مدل معرفی کردند. بر اساس این نتیجه واسنجی با تغییر این دو ضریب نتایج مناسبی خواهد داشت.



شکل ۵- مقایسه هدررفت خاک مشاهده شده و برآورد شده بر اساس مدل بازنگری شده MUSLE با استفاده از داده‌های ۶ کرت

### نتیجه‌گیری

بررسی هدررفت خاک در یک خاک آهکی در کرت‌هایی به ابعاد ۱ متر در ۱/۴ متر تحت شیب ۹ درصد با استفاده از باران‌های شبیه‌سازی شده با شدت‌های ۱۰ تا ۷۰ میلی‌متر بر ساعت نشان داد که باران با شدت ۲۰ میلی‌متر بر ساعت به عنوان آستانه شدت

باران برای وقوع هدررفت خاک در کرت‌ها می‌باشد. شدت باران همبستگی بالا و معنی‌داری با حجم رواناب ( $R^2=0.98$ )، دبی اوج رواناب ( $R^2=0.99$ ) و هدررفت خاک ( $R^2=0.91$ ) داشت. ارزیابی مدل MUSLE نشان داد اگرچه همبستگی بالایی بین داده‌های مشاهده‌ای هدررفت خاک و برآورد مدل وجود دارد ( $R^2=0.76$ )، لیکن هدررفت خاک برآوردی بر اساس مدل MUSLE به اندازه  $3/87$  برابر مقدار اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای) می‌باشد. علت بیش برآورد هدررفت خاک، بکارگیری مدل در ابعاد کرت و در منطقه‌ای با شرایط متفاوت نسبت به منطقه ارائه مدل بود. از این رو تلاش‌هایی برای اصلاح ضرایب بر اساس دو سوم از داده‌های مشاهده‌ای (۱۲ داده) انجام گرفت. اصلاح توان شاخص جریان ( $Q_{p1}$ ) از  $0/56$  به  $0/62$  موجب گردید تا نسبت هدررفت خاک برآوردی با مدل بازنگری شده و هدررفت خاک مشاهده‌ای به  $1/011$  کاهش یافته و کارایی مدل از  $5/5$  به  $0/46$  بهبود پیدا کند. اعتبارسنجی مدل بازنگری شده با استفاده از داده‌های باقیمانده (۶ کرت) نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)،  $0/00038$  و کارایی مدل (ME)  $0/82$  می‌باشد. به طور کلی این پژوهش نشان داد که مدل MUSLE کارایی لازم برای برآورد هدررفت خاک در کرت‌های کوچک در رخدادهای منفرد باران در منطقه نیمه‌خشک را ندارد و واسنجی مدل برای بکارگیری آن در ابعاد کرت برای باران‌های مناطق نیمه‌خشک ضروری است. از این رو مدل بازنگری شده MUSLE بر اساس  $(Q_{p1})^{0/62}$  می‌تواند برای برآورد قابل اطمینان هدررفت خاک در ابعاد کرت در منطقه نیمه‌خشک مشابه با شرایط منطقه مطالعاتی سودمند واقع گردد.

## منابع

1. خواجه‌ای، الف.، الف. بروشکه، ر. سکوتی و م. عرب‌خداری. ۱۳۸۰. بررسی قابلیت کاربرد مدل تجربی MUSLE برای برآورد رسوب حاصل از رگبارهای منفرد و رسوب سالانه در حوضه آبخیز رودخانه شهرچای. همایش ملی مدیریت اراضی- فرسایش خاک و توسعه پایدار. اراک. ۲-۴ بهمن.
2. رضایی فرد، م.، ع. ر. تلوری و م. عرب‌خداری. ۱۳۸۰. بررسی کارایی MUSLE در برآورد رسوب رویدادهای منفرد در زیر حوضچه افچه در حوزه لتیان. همایش ملی مدیریت اراضی فرسایش خاک و توسعه پایدار. اراک. ۲-۴ بهمن.
3. سرخوش، ا. ۱۳۸۰. بررسی کارایی مدل MUSLE در برآورد رسوب وقوعی و سالیانه سیل در حوضه آبخیز در که. نخستین همایش آبخیزداری و مدیریت استحصال آب در حوضه‌های آبخیز. بوشهر. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
4. صادقی، س. ح. ر. م. پورقاسمی، ح. محمدپور و ح. آقاراضی. ۱۳۸۷. ارزیابی دقت و کارایی رابطه جهانی فرسایش و برخی از نسخ آن در برآورد رسوب رگبارهای منفرد (مطالعه موردی: ایستگاه تحقیقات منابع طبیعی خسیجان، اراک). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۴۶): ۳۲۳-۳۳۴.

۵. کارگر، م.، م. ر. جوادی و س. ع. ا. هاشمی. ۱۳۹۳. کارایی مدل های MUSLE-S، MUSLT، USLE-M و AOF در برآورد رسوب رگبارهای منفرد در پلاتهای استاندارد (مطالعه موردی: سایت تحقیقاتی سفید دشت سمنان). نشریه آب و خاک. ۲۸(۴): ۷۸۷-۷۹۴.

۶. واعظی، ع.، ح. بهرامی، ح. صادقی و م. مهدیان. ۱۳۸۷. ارزیابی شاخص های فرساینده گی مدل های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE-M در خاک های ناحیه ای نیمه خشک در جنوب استان آذربایجان شرقی. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۲(۴): ۲۵-۳۷.

7. Abudi, I., G. Carmi. and P. Berliner. 2012. Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology*. 454: 76-81.
8. Aksoy, H., N. E. Unal, S. Cokgor, A. Gedikli, J. Yoon, K. Koca, B. S. Inci. and E. Eris. 2012. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume. *Catena*. 98: 63-72.
9. Aranda, V. and C. Oyonarte. 2005. Effect of vegetation with different evolution degree on soil organic matter in a semi-arid environment (Cabo de Gata-Níjar Natural Park, SE Spain). *Journal of Arid Environments*. 62(4): 631-647.
10. Assouline, S. 2004. Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models and solutions. *Vadose Zone Journal*. 3(2): 570-591.
11. Bagarello, V., C. Di Stefano, V. Ferro, G. Giordano, M. Iovino. and V. Pampalone. 2012. Estimating the USLE soil erodibility factor in Sicily, south Italy. *Applied Engineering in Agriculture*. 28 (2): 199-206.
12. Biddoccu, M., S. Ferraris, E. Cavallo, F. Opsi, M. Previati. and D. Canone. 2013. Hillslope vineyard rainfall-runoff measurements in relation to soil infiltration and water content. *Procedia Environmental Sciences*. 19: 351-360.
13. Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*. 54(5): 464-465.
14. Cammeraat, E. L. H. 2004. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 104: 317-332.
15. Casagrande, L. and J. B. D. De Paiva. 2005. *Determination of sediment yields in the Vacacaí-Mirim River basin using MUSLE*. IHAS press, Brazil, pp: 94-100.
16. Cooley, K. R. and J. R. Williams. 1983. Applicability of the USLE and MUSLE to Hawaiian Agricultural Lands. In: *Proc. Internat. Conf. on Soil Erosion and Conservation*. Honolulu, Hawaii.
17. Erskine, W. D., A. H. M. A. D. Mahmoudzadeh. and C. Myers. 2002. Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of Triassic sandstone near Sydney, NSW, Australia. *Catena*. 49(4): 271-287.
18. Foster, G. R., F. Lombardi. and W. C. Moldenhauer. 1982. Evaluation of rainfall-runoff erosivity factors for individual storms. *Transactions of ASAE*. 25: 124-129.
19. Haregeweyn, N., J. Poesen, G. Verstraeten, G. Govers, J. de Vente, J. Nyssen, J. Deckers. and J. Moeyersons. 2012. Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) in Northern Ethiopia. *Land Degradation and Development*. 24(2): 188-204.
20. Hignett, C. T., S. Gusli, A. Cass. and W. Besz. 1995. An automated laboratory rainfall simulation system with controlled rainfall intensity, raindrop energy and soil drainage. *Soil Technology*. 8(1): 31-42.
21. Igwe, C. A. and O. N. Udegbumam. 2008. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria. *International Agrophysics*. 22(4): 319-325.
22. Kemper, W. D. and R. C. Rosenau. 1986. *Aggregate stability and size distribution*. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (2nd Edition). Agronomy Monograph, Kimberly, Idaho, pp: 425-442.

23. Kinnell, P. I. A. 2005. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. *Hydrological Processes*. 19(3): 851–854.
24. Kinnell, P. I. A. and L. M. Risse. 1998. USLE-M: empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal*. 62(6): 1667–1672.
25. Lana-Renault, N., D. Regues, C. Marti-Bono, S. Begueria, J. Latron, E. Nadal, P. Serrano. and J. M. Garcia-Ruiz. 2007. Temporal variability in the relationships between precipitation, discharge and suspended sediment concentration in a small Mediterranean mountain catchment. *Nordic Hydrology*. 38(2): 139–150.
26. Mahmoudzadeh, A., W. D. Erskine. and C. Myers. 2002. Sediment yields and soil loss rates from native forest, pasture and cultivated land in the Bathurst area, New South Wales. *Australian Forestry*. 65(2): 73-80.
27. Mutua, B. M., A. Klik. and W. Loiskandl. 2006, Modelling soil erosion and sediment yield at a catchment scale: the case of Masinga catchment, Kenya. *Land Degradation and Development*. 17(5): 557–570.
28. Nash, J. E. and J. E. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1– a discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282–290.
29. Noor, H., S. Fazli. and S. M. Alibakhshi. 2012. Prediction of storm-related sediment-associated contaminant loads in a watershed scale. *Ecohydrology and Hydrobiology*. 12(3): 183-189.
30. Odongo, V. O., J. O. Onyando, B. M. Mutua, P. R. Van Oel. and R. Becht. 2013. Sensitivity analysis and calibration of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) for the upper Malewa Catchment, Kenya. *International Journal of Sediment Research*. 28(3): 368-383.
31. Pansu, M. and J. Gautheyrou. 2006. *Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Springer, pp: 1-993.
32. Pongsai, S., D. Schmidt Vogt, R. P. Shrestha, R. S. Clemente, and A. Eiumnoh. 2010. Calibration and validation of the Modified Universal Soil Loss Equation for estimating sediment yield on sloping plots: A case study in Khun Satan catchment of northern Thailand. *Canadian Journal of Soil Science*. 90(4): 585–596.
33. Qiu, L. J., F. L. Zheng. and R. S. Yin. 2012. SWAT-based runoff and sediment simulation in a small watershed, the loessial hilly-gullied region of China: capabilities and challenges. *International Journal of Sediment Research*. 27(2): 226–234.
34. Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool. and D. C. Yoder. 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA, Washington, DC, pp: 1-404.
35. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: *Methods of Soil Analysis, Chemical Methods, Electrical conductivity and total dissolved solids ASA/SSSA*. Madison, Wisconsin, USA. pp: 417-436.
36. Sadeghi, S. H. R. and P. Saedi. 2010. Reliability of sediment rating curves for a deciduous forest watershed in Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 55(5): 821–831.
37. Sadeghi, S. H. R., T. Mizuyama, S. Miyata, T. Gomi, K. Kosugi, T. Fukushima, S. Mizugaki. and Y. Onda. 2008. Determinant factors of sediment graphs and rating loops in a reforested watershed. *Journal of Hydrology*. 356(3-4): 271–282.
38. Sadeghi, S. H. R., T. Mizuyama, S. Miyata, T. Gomi, K. Kosugi, T. Fukushima, S. Mizugaki. and Y. Onda. 2007a. Is MUSLE apt to small steeply reforested watershed? *Journal of Forest Research*. 12(4): 270–277.
39. Sadeghi, S. H., T. Mizuyama. and B. Ghaderi Vangah. 2007b. Conformity of MUSLE estimates and erosion plot data for storm-wise sediment yield estimation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 18(1): 117-128.
40. Smith, S. J., R. G. Menzel, E. D. Rhoades, J. R. Williams. and H. V. Eck. 1983. Nutrient and sediment discharge from Southern Plains grasslands. *Journal of Range Management*. 36(4): 435-439.
41. Steenbergen, N. V. and P. Willems. 2012. Method for testing the accuracy of rainfall–runoff models in predicting peak flow changes due to rainfall changes, in a climate changing context. *Journal of Hydrology*. 414: 425-434.
42. Thomann, R.V. 1982. Verification of water quality models. *Journal of Environmental Engineering Division*. 108(5): 923–940.
43. Thomas, G. W. 1996. *Soil pH and soil acidity*, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. SSSA/ASA*. Madison, Wisconsin, USA. pp: 475-490

44. Ulrich, U., A. Dietrich. and N. Fohre. 2013. Herbicide transport via surface runoff during intermittent artificial rainfall: a laboratory plot scale study. *Catena*. 101: 38-49.
45. Vaezi, A. R. 2014. Modeling runoff from semi-arid agricultural lands in Northwest Iran. *Pedosphere*. 24(5): 595-604.
46. Vaezi, A. R., S. H. R Sadeghi, H. A. Bahrami. and M. H. Mahdian. 2008a. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*. 97(3): 414-423.
47. Vaezi, A. R., S. H. R Sadeghi, H. A. Bahrami. and M. H. Mahdian. 2008b. Evaluating erosivity indices of the USLE, MUSLE, RUSLE and USLE-M models in soils of a semi-arid region in northwest of Iran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*. 2(4): 25-37.
48. Walkly, A. and I. A. Black. 1934. An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Science Society of America Journal*. 37: 29-38.
49. Wang, G., H. Jiang, Z. Xu, L. Wang. and W. Yue. 2012. Evaluating the effect of land use changes on soil erosion and sediment yield using a grid-based distributed modelling approach. *Hydrological Processes*. 26(3): 3579–3592.
50. Williams, J. R. 1975. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS-S-40, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, pp: 244-252.
51. Williams, J. R. 1981. Testing the modified Universal Soil Loss Equation. in: Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands. USDA. ARM-W-26. pp: 157-164.
52. Williams, J. R., and Berndt, H. D. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*. 20: 1100-1104.
53. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1960. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. 7th Int. Cong. Soil Sci. Trans. 1: 418-425.
54. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses*. U.S. Dep. Agr., Sci. Ed. Admin., Agr. Handbook 537. Washington, D.C. pp: 1-62.
55. Zhang, G. H., G. B. Liu, G. L. Wang. and Y. X. Wang. 2011. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-bound nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particles. *Pedosphere*. 21(5): 676-684.

انجمن استادی نشریه

## Evaluation and modification of the MUSLE in predicting soil loss in micro plots using simulated rainfalls

Ali Reza Vaezi<sup>1\*</sup>, Morvarid Ahmadi<sup>2</sup>,

### Abstract

Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) is one of soil loss estimation models which has been developed based on the runoff characteristics in the event scale. However, it needs to be evaluated in the plot scale for the semi-arid rainfall events. Toward this, a field study was designed using twenty one plots. Runoff and soil loss were measured using 5-min samples under seven rainfall intensities consisted of 10, 20, 30, 40, 50, 60, and 70 mm h<sup>-1</sup> for 60 min. Soil loss was estimated using the MUSLE based on the runoff volume (Q) and runoff peak discharge (q<sub>p</sub>) and the values were compared with the observed values. The estimated soil loss was about 3.89 times bigger than the observed value on average. In order to improve model estimations, the power of rainfall erosivity index was modified from 0.56 to 0.62, (Q q<sub>p</sub>)<sup>0.62</sup>. The modification of the MUSLE model improved model efficiency (ME) from -5.5 to 0.47 and decreased the root mean square error from 0.000137 to 0.000031. This study revealed that the MUSLE overestimates soil loss from the small plots in the semi-arid regions. Therefore it is essential to calibrate runoff erosivity index using the observed data in the area. The modified MUSLE can be reliably used to predict soil loss in small plot scale in semi-arid regions.

**Keywords:** Runoff volume, Runoff peak discharge, Rainfall intensity, Model efficiency, Semi-arid region

---

<sup>1</sup>. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

\*. Corresponding author: vaezi.alireza@gmail.com

<sup>2</sup>. M.Sc. student of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

مقاله پذیرفته شده، ویراستاری نشده