

ارزیابی و بازنگری مدل MUSLE در پیش‌بینی هدر رفت خاک در کرت‌های کوچک با استفاده از باران‌های شبیه‌سازی شده

علی‌رضا واعظی* و مروارید احمدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۰۹)

چکیده

معادله جهانی فرسایش خاک تصحیح شده (MUSLE) از جمله مدل‌های برآورد هدر رفت خاک براساس خصوصیات رواناب در ابعاد رگبار می‌باشد. این مدل نیازمند ارزیابی در کرت‌های کوچک برای باران‌های نواحی نیمه‌خشک می‌باشد. جهت ارزیابی کارایی مدل MUSLE، آزمایش 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. هدر رفت خاک با استفاده از شاخص فرساینده‌ی مدل MUSLE براساس حجم رواناب (Q) و دبی اوج رواناب (q_p) به دست آمد و با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد. هدر رفت خاک برآورد شده به اندازه ۳/۸۷ برابر بیشتر از مقدار مشاهده‌ای بود. برای بهبود برآورد مدل، توان شاخص فرساینده‌ی رواناب از ۵۶٪ به ۶۲٪ اصلاح شد ($(Qq_p)^{0.62}$). اصلاح این توان موجب بهبود کارایی مدل از ۵/۵- به ۴۷٪ و کاهش ریشه میانگین مربعات خطا از ۱۳۷٪ به ۳۱٪ شد. به طور کلی این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری مدل MUSLE در کرت‌های کوچک در منطقه نیمه‌خشک منجر به بیش برآورد هدر رفت خاک می‌گردد. از اینرو ضروری است شاخص فرساینده‌ی رواناب براساس داده‌های مشاهده‌ای مورد واسنجی قرار گیرد. مدل بازنگری شده MUSLE می‌تواند برای برآورد هدر رفت خاک در کرت‌های کوچک در منطقه نیمه‌خشک مورد استفاده قرار بگیرد.

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

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

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

مقدمه

هدر رفت 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 هدر رفت خاک و بار رسوب حوضه‌ها دشوار است به این دلیل از مدل‌های مختلف جهت تخمین آنها استفاده می‌شود (۱۹ و ۴۹). تخمین هدر رفت 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 (Modified Universal Soil Loss Equation) (۵۰)، رابطه جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (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 هدر رفت خاک در ابعاد رخداده مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و غالباً هدر رفت کم خاک را بیش برآورد و هدر رفت زیاد را کم برآورد می‌کنند چرا که این مدل‌ها، رواناب را که یک عامل کلیدی در غلظت رسوب می‌باشد، به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار نمی‌دهند (۲۳). ویلیامز مدل تغییر یافته MUSLE را بر مبنای تک رخداد بارندگی و برای حوزه‌های کوچکتر از ۶۵ کیلومتر مربع ارائه کرد (۵۰) به این صورت که به‌جای عامل انرژی باران USLE، انرژی رواناب را که تابعی از حاصل ضرب حجم رواناب و دبی اوج جایگزین کرد:

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

که در آن: Y هدر رفت خاک رخداد (ton)، Q حجم رواناب (m^3)، q_p دبی اوج رواناب ($m^3 \text{ sec}^{-1}$)، K فرسایش‌پذیری 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 $Q.q_p$ به‌عنوان شاخص جریان برای برآورد هدر رفت خاک در رخداد می‌باشد. ویلیامز برتری‌های MUSLE در شبیه‌سازی هدر رفت 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 (۵۱). مزیت اصلی استفاده از شاخص‌های فرسایش‌دگی دارای عامل رواناب، کاهش خطای برآورد هدر رفت خاک می‌باشد (۱۴ و ۱۸).

مدل MUSLE برای تخمین هدر رفت خاک در مطالعات بسیاری استفاده شده است و نتایج مطلوب و گاه نامطلوبی به‌دست 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 هدر رفت خاک با استفاده از مدل MUSLE به‌دست 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 به‌دست نیاوردند. کارگر و همکاران در سمنان با به کارگیری مدل MUSLE نتایج قابل قبولی به‌دست آوردند (۵). در برخی از مطالعات به‌دلیل وجود همبستگی معنی‌دار بین نتایج برآوردی مدل و داده‌های مشاهده‌ای، اصلاح ضرایب مدل پیشنهاد شده است، رضایی فرد و همکاران (۲) در زیر حوضه اقچه لنیان، خواجه‌ای و همکاران (۱) در آذربایجان غربی و سرخوش (۳) در حوزه آبخیز درکه بیان کردند که اصلاح مدل MUSLE برآورد مناسب هدر رفت خاک را در پی خواهد داشت.

به‌طور کلی پیشنهاد استفاده از مدل‌های برآورد هدر رفت خاک در سراسر جهان مؤید این نکته است که استفاده از مدل‌های برآورد هدر رفت خاک بدون انجام کالیبراسیون منطقه‌ای، احتمال اشتباه در برآورد را بسیار افزایش می‌دهد.



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

لوم شنی واقع شده است. میانگین دمای سالانه $10/4^{\circ}\text{C}$ 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 قلتوق غرب زنجان طی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۰ بررسی شد. فراوانی باران‌هایی با شدت کم‌تر از 7 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 صفحه بارش $1/4$ متر در $1/4$ متر و ارتفاع $2/25$ 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 به‌وسیله فشارسنج نصب شده در مسیر حرکت آب تنظیم و اعمال شدند (۸).

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

اهمیت برآورد دقیق به‌خصوص در مناطقی بیشتر است که خاک‌های آسیب‌پذیر، پوشش گیاهی کم و الگوی نامنظم بارش منجر به هدر رفت خاک حاصل‌خیز سطحی و نیز آسیب به مناطق پایین‌دست می‌گردد. بسیاری از مناطق نیمه‌خشک دارای چنین شرایطی هستند و از اینرو شدت وقوع فرسایش آبی در آنها بالا است. در این راستا ارائه مدلی مناسب برای برآورد هدر رفت خاک در این مناطق ضروری است. برای جلوگیری از پیامدهای برآورد نامناسب هدر رفت خاک به‌خصوص 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 هدر رفت 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 به‌منظور بهبود پیش‌بینی هدر رفت خاک در منطقه نیمه‌خشک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

دامنه مطالعاتی

این پژوهش در دامنه‌ای با خاک دست نخورده در محدوده دانشگاه زنجان به طول ۳۰m و عرض ۳۰m و مساحت 900 m^2 در سال ۱۳۹۲ انجام شد. این دامنه در طول جغرافیایی $24^{\circ} 25'$ و 48° عرض جغرافیایی $36^{\circ} 40' 56''$ با شیب ۹ درصد و خاک

جمع‌آوری گردید. حجم مخلوط رواناب و رسوب حاصل از هر کرت با استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. نمونه‌های موجود برای تهیه نمونه همگن کاملاً مخلوط گردید و سپس از هر ظرف حاوی رواناب و رسوب، یک نمونه همگن به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر تهیه شد. به‌ازای یک لیتر رواناب، ۵۰ میلی‌لیتر نمونه همگن تهیه شد تا نماینده کل رواناب و رسوب کرت باشد (۴۴). نمونه همگن برای جدا کردن رواناب و رسوب به آزمایشگاه منتقل شد. رسوب موجود در نمونه همگن در آزمایشگاه با کاغذ صافی واتمن ۴۲ از رواناب جدا شد (۴۷) و پس از خشک شدن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت توزین شد و جرم کل رسوب نمونه تعیین و از آن مقدار کل رواناب و هدر رفت خاک کرت رخداد برای ۲۱ کرت آزمایشی به‌دست آمد.

برآورد هدر رفت خاک با مدل MUSLE و ارزیابی مدل

هدر رفت خاک با شاخص فرساینده‌گی مدل MUSLE بر مبنای دبی اوج (q_p) و حجم کل رواناب (Q) مطابق با رابطه (۱) به‌دست 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 به‌دست آمد. داده‌های حاصل از آزمایش از نظر نرمال بودن توزیع آماری با استفاده از آماره‌های چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. رابطه بین هدر رفت خاک و شاخص فرساینده‌گی مدل MUSLE با استفاده از توابع مختلف بررسی شد. برای ارزیابی مدل MUSLE در برآورد هدر رفت 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: $Z^*(x)$ هدر رفت مشاهده شده رخداد، $Z(x)$

انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شد. در نمونه‌های خاک، توزیع اندازه ذرات به‌روش هیدرومتری (۱۳)، درصد سنگریزه به‌روش 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 به‌روش اکسیداسیون تر (۴۸) و کربنات کلسیم معادل به‌روش خشتی‌سازی با اسید کلریدریک نرمال (۳۱) اندازه‌گیری شدند. جرم مخصوص ظاهری به‌روش استوانه فلزی با قطر ۴/۵ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر و نفوذپذیری خاک به‌روش استوانه مضاعف در صحرا اندازه‌گیری شدند.

پیاده‌سازی کرت‌های فرسایشی

جهت آماده‌سازی زمین و از بین بردن پوشش گیاهی پراکنده 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 به‌دست 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 لوله خروج آب و رسوب برش داده شد. در پایین دست هر کرت نیز چاله‌ای به‌منظور قرارگیری مخزن جمع‌آوری رواناب و رسوب ایجاد شد و لوله پلیکا به طول ۵۰ سانتی‌متر برای هدایت رواناب و رسوب به داخل مخزن، در مجرای انتهایی کرت قرار گرفت (۴۶).

اندازه‌گیری رواناب و هدر رفت خاک

رواناب و رسوب تولید شده در هر بارش در فواصل زمانی ۵ دقیقه از آغاز بارندگی برای تعیین دبی اوج رواناب (q_p)

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دامنه مطالعاتی

شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	سنگریزه (%)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (mm)	نفوذپذیری واکنش (cm/h)	شوری (dS/m)	ماده آلی (%)	کربنات کلسیم معادل (%)
۵۶	۲۷	۱۷	۱۹	۱/۵۲	۲/۹۳	۶/۸	۳/۱۳	۱/۱۱	۱۳/۸

مؤثر بر تولید رواناب نشان داد که همبستگی ضعیفی ($R^2 < 0/41$) بین شدت بارندگی و رواناب وجود دارد. در شدت کم (۱۰ میلی‌متر بر ساعت)، میزان رواناب صفر بود و در بیشترین شدت (۷۰ میلی‌متر بر ساعت)، 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 به‌عنوان تابعی از شدت باران افزایش یافت که مطابق با نتایج استینرگ 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 نیز با افزایش شدت باران و افزایش قدرت فرساینده‌گی، افزایش میزان رسوب تولید شده را مشاهده کردند (۵۵).

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).

از آنجا که باران با شدت ۱۰ میلی‌متر بر ساعت منجر به رواناب و هدررفت خاک در کرت‌ها نشد، داده‌های باران‌های شبیه‌سازی شده با شدت ۲۰ تا ۷۰ میلی‌متر بر ساعت که منجر به هدررفت خاک در کرت‌ها شدند (۱۸ داده) برای ارزیابی

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.

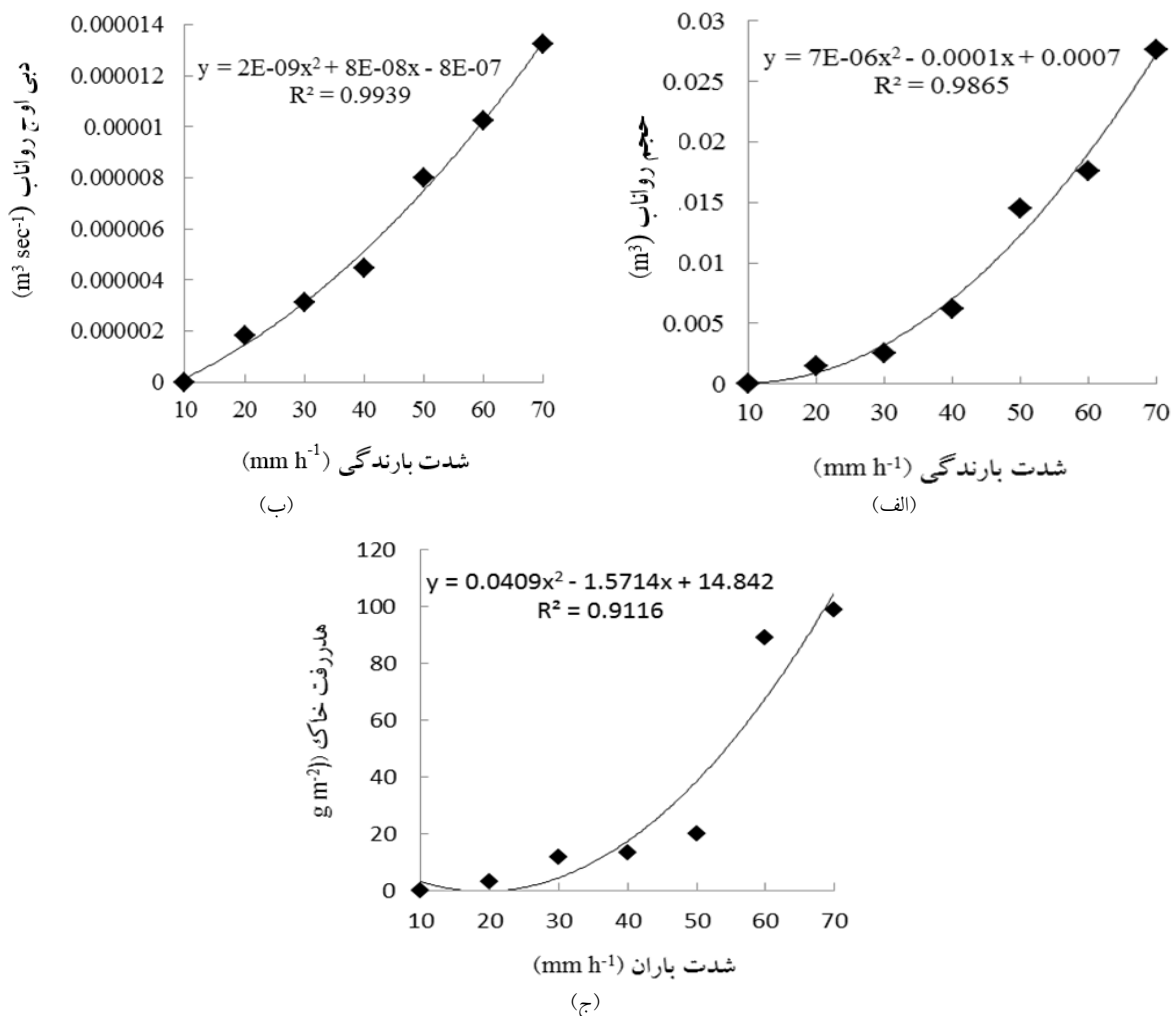
نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک دامنه

با توجه به فراوانی نسبی ذرات شن (۵۶٪)، سیلت (۲۷٪) و رس (۱۷٪)، خاک دامنه دارای بافت لوم شنی 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 سنگریزه‌ای (به‌طور 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).

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 به‌صورت 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



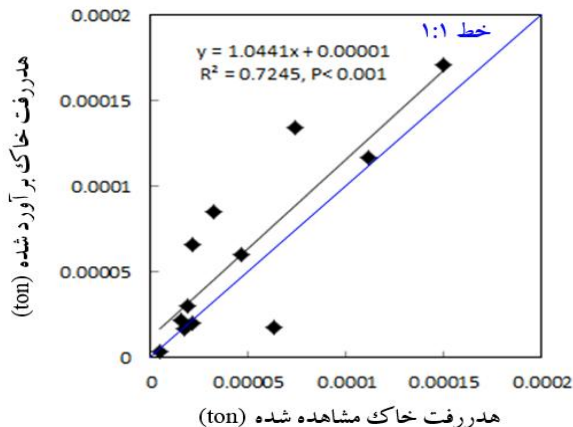
شکل ۲. الف) رابطه بین شدت بارندگی و حجم رواناب، ب) دبی اوج رواناب و ج) هدر رفت خاک

جدول ۲. مقایسه میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی هدر رفت خاک با مدل MUSLE

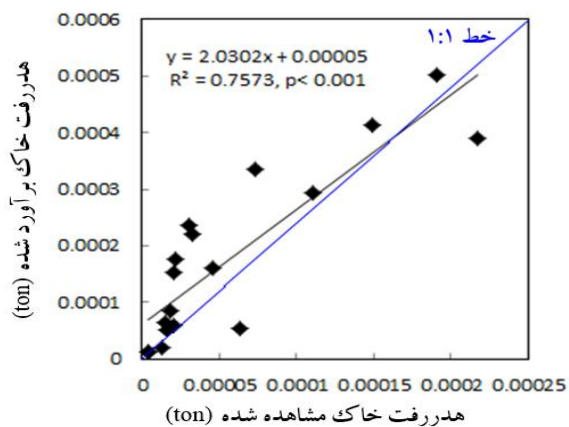
درجه آزادی	میانگین اختلاف‌ها	اختلاف انحراف استاندارد	t	معنی‌داری
۴۰	-۰/۰۰۱۴۶	۰/۰۰۰۳۲۸	-۴/۴۳	۰/۰۰۰

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 (۵۲). نتایج این پژوهش هم مؤید این نکته است که مدل MUSLE برای برآورد هدر رفت خاک در مقیاس حوضه طراحی شده است و به این دلیل در مقیاس کرت نتایج قابل

مدل MUSLE مورد توجه قرار گرفتند. شکل (۳) رابطه بین هدر رفت خاک مشاهده شده و برآورد شده با مدل MUSLE را نشان می‌دهد. با وجود همبستگی بالا بین هدر رفت خاک مشاهده شده و برآورد شده ($R^2 = 0.76, P < 0.001$)، هدر رفت خاک برآورد شده براساس مدل MUSLE به اندازه ۳/۸۷ برابر مقدار مشاهده‌ای بود. ویلیامز و برنندت چنین بیان کردند



شکل ۴. مقایسه هدر رفت خاک مشاهده شده و برآورد شده براساس مدل MUSLE با استفاده از داده‌های ۱۲ کرت



شکل ۳. مقایسه هدر رفت خاک مشاهده شده و برآورد شده براساس مدل MUSLE با استفاده از داده‌های ۱۸ کرت

برآورد می‌کرد، ابتدا تغییراتی در مقادیر ضریب a با کاهش مقدار آن به کم‌تر از $11/8$ 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 این‌رو تغییراتی در مقدار ضریب b ($0/56$) انجام گرفت. از آنجا که دامنه تغییرات شاخص جریان ($Q q_p$) در ابعاد کرت، کوچک‌تر از واحد بود، مقدار b بزرگ‌تر از $0/56$ در نظر گرفته شد. با افزایش ضریب b از $0/56$ به $0/62$ ، نسبت هدر رفت خاک برآوردی به هدر رفت خاک مشاهده‌ای از $3/87$ تن به $0/11$ تن کاهش پیدا کرد. شکل (۴) مقدار هدر رفت خاک برآوردی با مدل بازنگری شده MUSLE را در مقابل مقادیر مشاهده‌ای هدر رفت خاک در داده‌های ۱۲ کرت نشان می‌دهد. ارزیابی مدل بازنگری شده نشانگر کاهش ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به $0/000031$ و کارایی مدل (ME) به $0/47$ بود. مدل بازنگری شده MUSLE به صورت زیر ارایه گردید:

$$SY_e = 11/8 (Q q_p)^{0/62} \quad (4)$$

که در آن: SY_e هدر رفت خاک رخداد (ton)، Q حجم رواناب (m^3) و q_p دبی اوج رواناب ($m^3 \text{ sec}^{-1}$) می‌باشد. به‌طور کلی اصلاح توان شاخص جریان به $0/62$ نشان‌دهنده کاهش اثر حجم و دبی اوج رواناب در هدر رفت خاک در کرت کوچک بود.

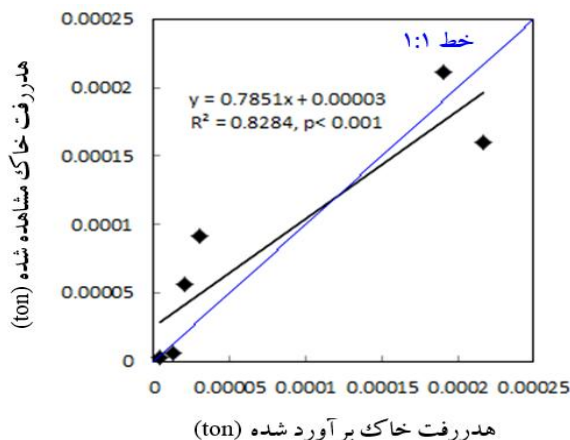
قبولی ارائه نمی‌دهد (۳۹). براساس نتایج، کارایی مدل (ME) $0/5$ - و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) $0/000137$ بود که کارایی بسیار کم مدل را در برآورد هدر رفت خاک نشان می‌دهند. صادقی و همکاران در حوزه خسیبیحان اراک نیز نشان دادند که با وجود همبستگی بالای مدل MUSLE با رسوب تولید شده، اختلافات معنی‌داری بین مقادیر برآورد شده با رسوب مشاهده شده وجود داشت (۴). این اختلافات بر لزوم انجام واسنجی‌های منطقه‌ای این مدل تأکید می‌کند. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، برای رسیدن به برآورد دقیق‌تر از هدر رفت خاک در ابعاد کرت، بازنگری مدل ضروری می‌باشد.

بازنگری مدل MUSLE

دو سوم از داده‌های اندازه‌گیری شده حجم رواناب (Q) و دبی اوج (q_p) 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 هدر رفت خاک (در ۱۲ کرت) انجام گرفت. با توجه به این که مدل MUSLE بر مبنای شاخص $(Q q_p)^{0/56}$ ، هدر رفت خاک را بیش از مقدار واقعی

نتیجه گیری

بررسی هدر رفت 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 هدر رفت 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 هدر رفت خاک ($R^2 = 0/91$) داشت. ارزیابی مدل MUSLE نشان داد اگر چه همبستگی بالایی بین داده‌های مشاهده‌ای هدر رفت خاک و برآورد مدل وجود دارد ($R^2 = 0/76$)، لیکن هدر رفت خاک برآوردی براساس مدل MUSLE به اندازه ۳/۸۷ برابر مقدار اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای) می‌باشد. علت بیش برآورد هدر رفت خاک، به‌کارگیری مدل در ابعاد کرت و در منطقه‌ای با شرایط متفاوت نسبت به منطقه ارائه مدل بود. از اینرو تلاش‌هایی برای اصلاح ضرایب براساس دو سوم از داده‌های مشاهده‌ای (۱۲ داده) انجام گرفت. اصلاح توان شاخص جریان (Q_{qp}) از ۵/۶ به ۰/۶۲ موجب گردید تا نسبت هدر رفت خاک برآوردی با مدل بازنگری شده و هدر رفت خاک مشاهده‌ای به ۱/۰۱۱ کاهش یافته و کارایی مدل از ۵/۵- به ۰/۴۶ بهبود پیدا کند. اعتبارسنجی مدل بازنگری شده با استفاده از داده‌های باقی‌مانده (۶ کرت) نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ۰/۰۰۰۳۸ و کارایی مدل میانگین مربعات خطا (ME) ۰/۸۲ می‌باشد. به‌طور کلی این پژوهش نشان داد که مدل MUSLE کارایی لازم برای برآورد هدر رفت خاک در کرت‌های کوچک در رخدادهای منفرد باران در منطقه نیمه‌خشک را ندارد و واسنجی مدل برای به‌کارگیری آن در ابعاد کرت برای باران‌های مناطق نیمه‌خشک ضروری است. از اینرو مدل بازنگری شده MUSLE براساس $(Q_{qp})^{0/62}$ می‌تواند برای برآورد قابل اطمینان هدر رفت خاک در ابعاد کرت در منطقه نیمه‌خشک مشابه با شرایط منطقه مطالعاتی سودمند واقع گردد.



شکل ۵. مقایسه هدر رفت خاک مشاهده شده و برآورد شده براساس مدل بازنگری شده MUSLE با استفاده از داده‌های ۶ کرت

اعتبارسنجی مدل MUSLE بازنگری شده

برای اعتبارسنجی مدل بازنگری شده MUSLE از داده‌های مشاهده‌ای هدر رفت خاک در ۶ کرت استفاده گردید. نتایج نشان داد که تفاوت مقادیر برآوردی با مقادیر مشاهده‌ای به‌طور میانگین ۰/۴۳ تن می‌باشد. شکل (۵) مقادیر برآوردی هدر رفت خاک براساس مدل بازنگری شده MUSLE را در مقابل مقادیر مشاهده‌ای هدر رفت خاک برای ۶ کرت نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۰۰۰۳۸ و کارایی مدل (ME) ۰/۸۲ می‌باشد. این نتایج بیانگر دقت قابل اطمینان مدل بازنگری شده MUSLE برای برآورد هدر رفت خاک در کرت‌های کوچک می‌باشد. در برخی مطالعات، مدل MUSLE برای بهبود برآورد هدر رفت 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 هدر رفت خاک، مدل MUSLE را برای برآورد بهتر هدر رفت خاک براساس 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 براساس واریانس به‌عنوان عوامل حساس مدل معرفی کردند. براساس این نتیجه واسنجی با تغییر این دو ضریب نتایج مناسبی خواهد داشت.

منابع مورد استفاده

۱. خواجehای، ا.، بروشکه، ر. سکوتی و م. عرب‌خدیری. 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 تا ۴ بهمن.
۲. رضایی فرد، م.، ع. ر. تلوری و م. عرب‌خدیری. 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 تا ۴ بهمن.
۳. سرخوش، ا.، ۱۳۸۰. بررسی کارایی مدل MUSLE در برآورد رسوب و وقوعی و سالیانه سیل در حوضه آبخیز درکه. نخستین همایش آبخیزداری و مدیریت استحصال آب در حوضه‌های آبخیز. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، بوشهر. ۱ بهمن.
۴. 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): ۷۹۴-۷۸۷.
۶. واعظی، ع. ح. بهرامی، ح. صادقی و م. مهدیان. ۱۳۸۷. ارزیابی شاخص‌های فرساینده‌ی مدل‌های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE-M در خاک‌های ناحیه‌ای نیمه‌خشک 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. *J. Hydrol.* 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). *J. Arid Environ.* 62(4): 631-647.
10. Assouline, S. 2004. Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models and solutions. *Vadose Zone J.* 3(2): 570-591.
11. Bagarello, V., C. Di Stefano, V. Ferro, G. Giordano, M. Iovino. and V. Pampalona. 2012. Estimating the USLE soil erodibility factor in Sicily, south Italy. *Appl. Eng. Agric.* 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 Environ. Sci.* 19: 351-360.
13. Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 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. *Agric. Ecosyst. Environ.* 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. Inter. 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. *Trans. 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 Degrad. Dev.* 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 Technol.* 8(1): 31-42.
21. Igwe, C. A. and O. N. Udegbunam. 2008. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria. *Inter. Agroph.* 22(4): 319-325.
22. Kemper, W. D. and R. C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. PP. 425-442. *In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods (2nd Edition). Agronomy Monograph, Kimberly, Idaho,*
23. Kinnell, P. I. A. 2005. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. *Hydrol. Proc.* 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 Sci. Soc. Am. J.* 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 Hydrol.* 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. *Austr. Forest.* 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 Degrad. Dev.* 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. *J. Hydrol.* 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. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 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. *Inter. J. Sediment Res.* 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 J. Soil Sci.* 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. *Inter. J. Sediment Res.* 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. Saeidi. 2010. Reliability of sediment rating curves for a deciduous forest watershed in Iran. *Hydrol. Sci. J.* 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. *J. Hydrol.* 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? *J. Forest Res.* 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 Sci.* 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. *J. Range Manage.* 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. *J. Hydrol.* 414: 425-434.
42. Thomann, R. V. 1982. Verification of water quality models. *J. Environ. Eng. Divi.* 108(5): 923-940.

43. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. PP. 475-490. *In*: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. SSSA/ASA. Madison, Wisconsin, USA.
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. Bahrani. 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. Bahrani. 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. *Irani. J. Watershed Manag. Sci. Enge.* 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 Sci. Soc. Am. J.* 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. *Hydrol. Proc.* 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. PP. 157-164. *In*: Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands. USDA. ARM-W-26.
52. Williams, J. R. and H. D. Berndt. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. ASAE.* 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.

Evaluation and Modification of the MUSLE in Predicting Soil Loss in Micro Plots using Simulated Rainfalls

A. R. Vaezi* and M. Ahmadi¹

(Received: Dec. 01-2015 ; Accepted: Oct. 30-2016)

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. With this aim, 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⁻¹ for 60 min. Soil loss was estimated using the MUSLE based on the runoff volume (Q) and runoff peak discharge (q_p) 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, $(Q q_p)^{0.62}$. 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 data observed in the area. The modified MUSLE can be reliably used to predict soil loss in the small plot scale in semi-arid regions.

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

¹. Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Univ. of Zanjan, Zanjan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: vaezi.alireza@gmail.com