

استفاده کرد.

واژه های کلیدی: شاخص فرساینده گی، MUSLE، USLE،
USLE_M، RUSLE و هشترود

مقدمه

مهار فرسایش خاک با توجه به اهمیت آن به ویژه از نظر کاهش تولیدات کشاورزی ضروری است. نخستین گام در این مورد، پیش بینی هدررفت خاک و ارزیابی عوامل عمده ی موثر بر آن است [۳۶]. به دلیل این که از یک سو تعیین مستقیم فرسایش هزینه بر و مستلزم وقت زیاد می باشد و نیز نتایج حاصل از آن اغلب منطقه ای و محدود می باشد، روش هایی جهت بر آورد فرسایش ارائه شده است. این روش ها شامل روابط ساده تا مدل های پیچیده ی مبتنی بر شبیه سازی فرآیند فرسایش و رسوبگذاری هستند. امروزه همه آنها را با عنوان مدل های فرسایش و رسوب می نامند [۷]. یکی از روش هایی که به گونه ی گسترده برای برآورد فرسایش آبی و بررسی عوامل موثر بر آن در زمین های کشاورزی استفاده می شود، رابطه ی جهانی فرسایش خاک^۵ یا USLE است که توسط ویشمایر و اسمیت [۴۶] به صورت رابطه تجربی زیر ارائه شد:

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

که در آن: A هدررفت خاک (تن در هکتار در سال)، R عامل فرساینده گی باران (مگاژول میلی متر در هکتار در ساعت در سال)، K عامل فرسایش پذیری (تن ساعت در مگاژول در میلی متر)، L عامل طول شیب (بدون واحد)، S عامل درجه ی شیب (بدون واحد)، C عامل پوشش گیاهی (بدون واحد) و P عامل کارهای حفاظتی (بدون واحد) است [۳۷].

بر اساس USLE، هدررفت خاک در کرت استاندارد^۶ یا واحد (زمینی با شیب ۹ درصد به عرض ۱/۸۳ و طول ۲۲/۱ متر است که در جهت شیب شخم خورده و سطح آن بدون پوشش گیاهی یا بقایایی آن می باشد) تابعی از عامل فرساینده گی باران (R) و عامل فرسایش پذیری خاک (K) است ($A=R.K$). چنانچه فرسایش در یک خاک معین در رخدادهای گوناگون باران مورد بررسی قرار گیرد هدررفت خاک تنها به عامل فرساینده گی باران بستگی خواهد داشت. این شاخص بیانگر توانایی بالقوه باران در هدررفت خاک از امتداد

ارزیابی شاخص های فرساینده گی مدل های

USLE_M و RUSLE، MUSLE، USLE

در خاک های ناحیه ای نیمه خشک در جنوب

استان آذربایجان شرقی

علیرضا واعظی^۱، حسینعلی بهرامی^۲، سیدحمیدرضا صادقی^۳ و محمدحسین مهدیان^۴

تاریخ دریافت: ۸۷/۵/۸ تاریخ پذیرش: ۸۷/۹/۳۰

چکیده

فرساینده گی، توانایی عامل فرساینده در جداسازی ذرات خاک را بیان می کند. این پژوهش به منظور تعیین شاخص فرساینده گی مناسب بر اساس مدل های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE_M انجام گرفت. آزمایش های صحرایی در دیم زارهای ناحیه نیمه خشک در منطقه ای به ابعاد ۳۰ کیلومتر در شهرستان هشترود واقع در شمال غربی ایران طی سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ انجام شد. در سطح منطقه، ۳۶ کشتزار دارای شیب ۹ درصد و تحت آیش انتخاب و در هر کشتزار، سه کرت استاندارد ایجاد شدند. مقدار رواناب و هدررفت خاک در ۴۱ رخدادهای باران منجر به رسوب طی دوره ی دو ساله اندازه گیری شدند. شاخص فرساینده گی در مدل های یاد شده بر اساس داده های باران و رواناب تعیین شد. نتایج نشان داد که رواناب بالاترین همبستگی را با شاخص فرساینده گی مدل USLE_M با ضریب تبیین ۹۰ درصد دارد. بر اساس نتایج، شاخص فرساینده گی مدل USLE، مناسب ترین شاخص ($R^2 = 0/88, p < 0/001$) برای پیش بینی هدررفت خاک در رخدادهای گوناگون باران در منطقه است. جهت پیش بینی آسان مقدار هدررفت خاک در ناحیه ی نیمه خشک مورد بررسی می توان به گونه ی مستقیم از شاخص انرژی جنبشی باران به گونه ی قابل اطمینانی ($R^2 = 0/80, p < 0/001$)

۱- نویسنده مسئول و استادیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان vaezi.alireza@gmail.com

۲- دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس

۴- استادیار پژوهش سازمان تحقیقات، ترویج و آموزش کشاورزی، وزارت کشاورزی

5- Universal Soil Loss Equation

6- Standard plot

[۴] در حوضه آبخیز رودخانه شهرچای در استان آذربایجان غربی نشان داد که به کارگیری مدل MUSLE برای برآورد رسوب رویدادهای منفرد با ضرایب اصلاحی قابل توصیه می باشد، ولی استفاده از آن برای برآورد رسوب سالیانه به علت داشتن اختلاف زیاد با مقادیر مشاهداتی قابل اعتماد نمی باشد. بررسی های سرخوش [۸] نیز در حوضه ی آبخیز درکه نشان داد که در صورت تصحیح ضرایب مدل MUSLE، بین مقادیر برآوردی و مشاهده ای رسوبدهی در رویدادهای گوناگون، همبستگی خوبی ($R^2 = 0.96$) دیده می شود.

در نسخه تصحیح شده رابطه جهانی فرسایش خاک^۴ یا RUSLE، فرسایندهی باران (R_{RUSLE}) از حاصلضرب انرژی جنبشی و بیشترین شدت ۳۰ دقیقه ای باران (EI_{30}) به دست می آید. انرژی جنبشی باران (E) نیز از رابطه ی زیر به دست می آید [۳۷]:

$$E = \sum_{i=1}^j KE.d \quad (6)$$

که در آن: KE انرژی جنبشی رگبار در واحد ارتفاع رگبار بر حسب مگاژول در هکتار در میلی متر ($MJ ha^{-1} mm^{-1}$) و d ارتفاع رگبار بر حسب (mm) در i امین زمانی است که شدت بارندگی طی مدت بارندگی یکسان می باشد. مقدار KE از رابطه زیر به دست آمد:

$$KE = e_r \Delta V_r \quad (7)$$

که در آن: e_r انرژی رگبار در واحد عمق باران بر حسب مگاژول در هکتار در ساعت ($MJ ha^{-1} mm^{-1} h^{-1}$) و ΔV_r تداوم رگبار بر حسب (h) برای r امین فاصله زمانی با شدت ثابت می باشد. مقدار e_r بر اساس شدت رگبار از رابطه زیر به دست می آید [۳۷]:

$$e_r = 0.29 [(1 - 0.72 \exp(-0.05 i_r)) \quad (8)$$

که در آن: i_r شدت رگبار) بر حسب میلی متر در ساعت (h^{-1}) (mm) برای r امین فاصله زمانی با شدت ثابت می باشد.

مدل RUSLE پایه فیزیکی محکم تری نسبت به USLE دارد و در اراضی غیر زراعی نیز استفاده می شود و در فرسایش شیبی و سطحی و سایر شکل های فرسایش به کار می رود. بررسی های پورعبدالله و تجریشی [۲] در زیر حوضه ی امامه در حوضه ی آبخیز سد لتیان نشان داد که مدل RUSLE، مقدار رسوب سالانه را بیش از ۵ برابر مقدار واقعی برآورد می کند. با این وجود بررسی های میرزایی و همکاران [۱۲] در جاجرود (شاخه اصلی سد لتیان) نشان داد که مدل RUSLE دارای دقت ۸۷ درصد در برآورد رسوب سالانه است.

در مدل USLE_M، حاصلضرب EI_{30} و ضریب رواناب (Q_R) به صورت $Q_R EI_{30}$ به عنوان شاخص فرسایندهی (R_{USLE-M}) برای بیان هدررفت خاک در اثر فرسایش آبی بیان شده است [۲۹].

پژوهش های گوناگون نشان می دهد که عامل فرسایندهی مدل های USLE [۹، ۱۹، ۴۳، ۲۷]، MUSLE [۳۹]، RUSLE،

4- Revised USLE

شیب ها است [۴۲ و ۴۷]. با تعیین این شاخص و ارائه ی نمایه ای^۱ آسان برای برآورد آن می توان نقشه ی فرسایندهی باران را تهیه کرد [۱۱]. بررسی ها نشان داد که حاصلضرب انرژی جنبشی باران (E) و بزرگترین شدت ۳۰ دقیقه ای آن (I_{30})، شاخصی مناسب برای تعیین فرسایندهی باران است. شاخص EI_{30} ، توانایی باران در جداسازی ذرات خاک را نشان می دهد. انرژی جنبشی باران در USLE از رابطه ی زیر به دست می آید [۴۶]:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n KE.d}{100} \quad (2)$$

که در آن: E انرژی جنبشی کل یک رخداد باران بر حسب مگاژول در هکتار ($MJ ha^{-1}$)، KE انرژی جنبشی باران به ازای ارتفاع باران برای بر حسب ژول بر متر مربع در سانتی متر باران ($Jm^{-2} cm^{-1}$) و d ارتفاع بارندگی در i امین زمانی که شدت بارندگی طی مدت بارندگی یکسان می باشد، بر حسب سانتی متر (cm) است. مقدار KE از رابطه زیر به دست می آید:

$$KE = 2.10 / 3 + 87 \log_{10} I \quad (3)$$

که در آن: I شدت بارندگی بر حسب سانتی متر بر ساعت (h^{-1}) (cm) است.

بررسی فرآیند فرسایش آبی نشان داد که رواناب نیز باید به عنوان عاملی اساسی در فرسایندهی و مدل سازی فرسایش آبی مورد توجه قرار گیرد [۲۲]. بررسی ها نشان داد که شاخص های فرسایندهی که شامل مقدار باران، شدت باران و مقدار رواناب باشند بهتر از شاخص EI_{30} بیانگر هدررفت خاک هستند [۲۲]. در نسخه ی تعدیل شده رابطه جهانی فرسایش خاک^۲ یا MUSLE، شاخص فرسایندهی بر اساس تولید رواناب بیان شده است. بر این اساس هدررفت خاک در اثر یک رگبار، رابطه ای مستقیم با شاخص فرسایندهی مبتنی بر حجم و حداکثر دبی رواناب دارد [۱۰ و ۴۵]:

$$R_{MUSLE} = 11.8 (Q.p_p)^{0.56} \quad (4)$$

که در آن: R_{MUSLE} شاخص فرسایندهی رگبار، Q حجم رواناب تولید شده بر حسب متر مکعب و q_p دبی اوج رواناب بر حسب متر مکعب در ثانیه است. مقدار دبی اوج رواناب را نیز مطابق با روش استدلالی^۳ از رابطه ی زیر می توان تعیین کرد:

$$q_p = \frac{CIA}{360} \quad (5)$$

که در آن q_p دبی اوج رواناب بر حسب متر مکعب در ثانیه، C ضریب رواناب، I شدت بارندگی در زمان تمرکز حوضه بر حسب میلی متر در ساعت و A مساحت بر حسب هکتار می باشد.

مدل MUSLE برای برآورد رسوبدهی معلق حوضه ها به کار می رود. مزیت این رابطه امکان برآورد رسوبدهی رودخانه ها در رویدادهای منفرد می باشد [۶]. بررسی های خواجه ای و همکاران

1- A parameter

2- Modified USLE

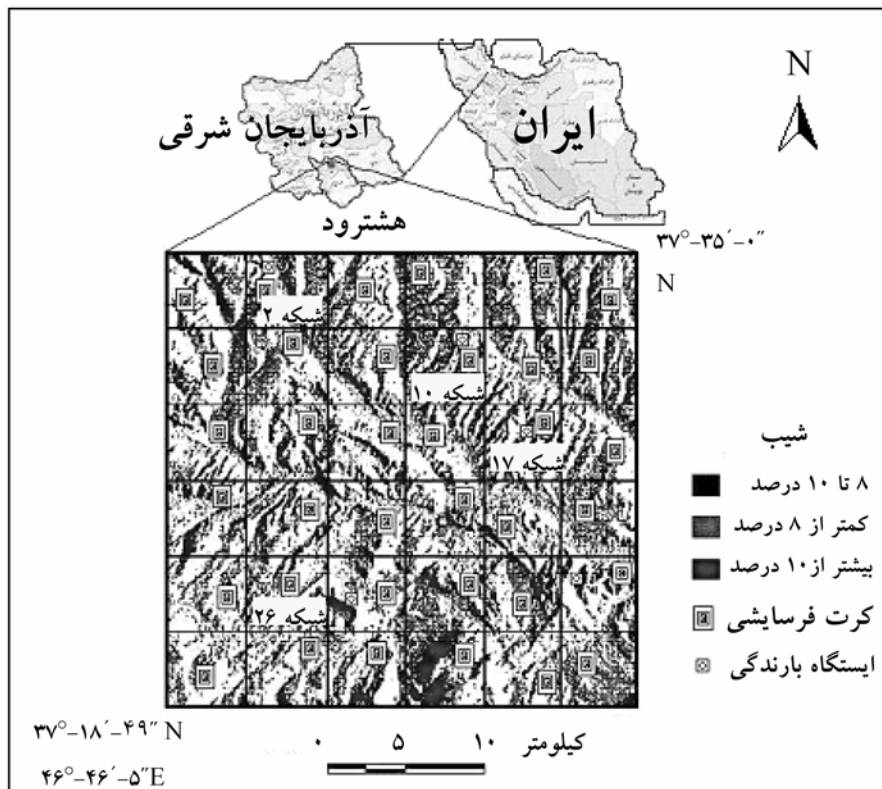
3- Rational method

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، شهرستان هشتروند واقع در جنوب استان آذربایجان شرقی انتخاب شد. این منطقه دارای آب و هوای نیمه خشک سرد با میانگین بارندگی سالانه ۳۴۰ میلی متر است [۳]. این منطقه به دلیل داشتن شرایط آب و هوایی نیمه خشک و خاک‌های تحت کشت دیم و متنوع از نظر اندازه شیب انتخاب شد. بررسی‌های اولیه نشان داد که توزیع بارندگی طی سال به گونه‌ی معمول یکنواخت نیست و بیشتر باران‌ها طی فصل بهار و تا حدی در فصل پاییز رخ می‌دهند. وجود باران‌های پاییزی به ویژه در اوایل بهار فرسایش زیادی را در دیمزارهای تحت آیش موجب می‌شود. فرسایش خاک در منطقه اغلب به شکل‌های سطحی، شیاری و آبکندی مشاهده می‌شود.

[۱۵، ۱۸، ۲۳، ۳۲، ۳۴، ۳۸، ۴۰، ۴۱] و USLE_M [۱۶] و ۳۰] به طور گسترده‌ای در برآورد فرسایش آبی به کار گرفته شده است. بررسی‌ها بیانگر این است که بیش از ۷۰ درصد تغییرات در مقدار رواناب حاصل از کرت‌های کشاورزی لخت و کوددهی شده، می‌تواند با مقدار باران و یا حاصلضرب مقدار باران و شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران بیان شود [۳۵]. بررسی‌ها در مورد عوامل موثر بر رواناب و فرسایش تحت باران شبیه سازی شده در مراتع مدیترانه‌ای اسپانیا نشان داد که با افزایش شدت باران، مقدار رواناب به طور معنی‌دار ($R^2=0/76$ ، $p<0/001$) و مقدار هدررفت خاک به گونه‌ی خطی معنی‌دار ($R^2=0/36$ ، $p<0/004$) افزایش می‌یابد [۱۶].

یافتن شاخص فرساینده‌ی مناسب، می‌تواند در پیش‌بینی مطمئن



شکل ۱- موقعیت منطقه آزمایشی، کرت‌های فرسایشی و ایستگاه‌های اندازه‌گیری باران

برای بررسی مقدار هدررفت خاک در دیمزارهای تحت آیش و انتخاب شاخص فرساینده‌ی مناسب، محدوده‌ای از زمین‌های کشاورزی به ابعاد ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر، واقع در ۳۷° ۱۸' ۴۹" تا ۳۷° ۳۵' ۰" عرض شمالی و ۴۶° ۴۶' ۵" تا ۴۶° ۶' ۵" طول شرقی در شمال شهرستان انتخاب شد. زمین‌های این منطقه بیشتر شیبدار (بین ۵ تا ۱۵ درصد) بوده و از نظر ویژگی‌های نیم‌رخ، عمیق تا بسیار عمیق با بافت لوم رسی و نفوذپذیری متوسط هستند. خاک‌ها اغلب زیر کشت دیم گندم قرار دارند. برای انجام آزمایش، ۳۶ شبکه مربعی شکل به ابعاد ۵ کیلومتر در سطح منطقه مورد بررسی در نظر گرفته شد. شکل ۱ موقعیت منطقه آزمایشی، کرت‌های فرسایشی و

مقدار فرسایش در رخدادهای باران موثر باشد. شاخص‌های فرساینده‌ی مدل‌های USLE، MUSLE، USLE_M و RUSLE به گونه‌ی گسترده‌ای برای برآورد هدررفت خاک استفاده می‌شوند. تا کنون مطالعه‌ای دقیق برای ارزیابی شاخص‌های فرساینده‌ی مدل‌های یاد شده و تعیین شاخصی مناسب برای پیش‌بینی هدررفت خاک در نواحی نیمه‌خشک انجام نشده است. بر این اساس این پژوهش بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرایی رواناب و هدررفت خاک به منظور دستیابی به شاخصی مناسب برای پیش‌بینی هدررفت خاک در ناحیه نیمه‌خشک انجام گرفت.

ایستگاه‌های اندازه‌گیری باران را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری هدررفت خاک، در هر شبکه اقدام به احداث کرت‌های استاندارد شد. برای این منظور در هر شبکه برای کاهش تاثیر جهت شیب بر رطوبت اولیه خاک و در نتیجه نفوذپذیری و فرسایش، تنها زمین‌های دارای شیب رو به جنوب مورد توجه قرار گرفتند. در این شیب‌ها برای از بین بردن اثر بقایای گیاهی بر فرسایش، زمین‌های در حال آیش انتخاب شدند. به این ترتیب در هر شبکه یک زمین برای ایجاد کرت‌های واحد در نظر گرفته شد.

برای پیاده‌سازی کرت‌ها، خاک‌ها در آغاز بهار ۱۳۸۴ در جهت شیب شخم و دیسک زده شد و بقایای گیاهی سطح آنها جمع‌آوری شد. سپس تعداد سه کرت به عرض ۱/۸۳ متر و به طول ۲۲/۱ متر با فاصله ۱/۲ متر در هر شبکه ایجاد گردید. برای جلوگیری از ورود و خروج رواناب، پیرامون کرت‌ها با پشته‌های خاکی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بسته شد. به منظور اندازه‌گیری هدررفت خاک، در انتهای هر کرت لوله‌ای ۵ اینچی از جنس پلیکا و مخزنی با حجم ۷۰ لیتر قرار داده شد [۲۷]. در کل تعداد ۱۰۸ کرت واحد (۳ تکرار \times ۳۶ زمین) در سطح منطقه مورد بررسی ایجاد شدند.

برای اندازه‌گیری مقدار رسوب، پس از پایان هر باران طبیعی منجر به رسوب، ابتدا حجم کل مخلوط رواناب و رسوب مخزن‌ها به وسیله‌ی ظرفی با حجم معین اندازه‌گیری شد. برای تعیین غلظت رسوب بر اساس روش پیشنهادی حسین و همکاران [۲۸] محتویات داخل مخزن‌ها با همزن دستی کاملاً به صورت یکنواخت درآمد. سپس نمونه‌ای با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط داخل مخزن‌ها برداشت و در آزمایشگاه پس از جداسازی رسوب با کاغذ صافی، نمونه‌های رسوب در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن آنها مشخص گردید. از نسبت مقدار رسوب بر حجم کل نمونه، غلظت رسوب به دست آمد. بر اساس تعیین غلظت رسوب هر نمونه و حجم کل مخلوط داخل مخزن‌ها، مقدار کل رسوب هر کرت در هر رگبار تعیین شد. مقدار رواناب و رسوب در رخدادهای گوناگون باران منجر به رواناب طی سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ اندازه‌گیری شدند. ضریب رواناب از نسبت مقدار رواناب بر مقدار باران در هر کرت مشخص شد. دبی اوج رواناب نیز بر اساس شدت باران، مساحت کرت و ضریب رواناب از رابطه (۴) تعیین شد.

پراکنش مکانی مقدار باران در سطح منطقه با استفاده از داده‌های باران چهار ایستگاه بارندگی موجود بررسی شد. ایستگاههای بارندگی واقع در شبکه‌های ۲، ۱۰ و ۲۶ از نوع باران‌سنجی و در شبکه‌ی ۱۷ از نوع باران‌نگاری بود (شکل ۱). برای تعیین شاخص فرساینده‌ی در مدل‌های گوناگون به داده‌های باران (شدت و مدت) و رواناب (حجم، ضریب و حداکثر دبی) نیاز بود. داده‌های ارتفاع (عمق) و مدت باران از منحنی‌های باران‌نگاری ایستگاه باران‌نگاری شبکه ۱۷ برگرفته شدند. این داده‌ها تنها شامل رخدادهای باران با مدت بیشتر از ۳۰ دقیقه بودند که منجر به تولید رواناب و در نتیجه

رسوب در کرت‌ها شدند. شاخص‌های فرساینده‌ی در مدل‌های MUSLE، USLE، RUSLE و USLE_M بر اساس آنچه در مقدمه بیان شد، تعیین گردیدند.

برای آگاهی از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک در منطقه، نمونه‌های خاک از عمق ۳۰ سانتی‌متر از سه نقطه در امتداد کرت‌ها به گونه‌ی تصادفی برداشت و پس از مخلوط کردن، نمونه‌ای مرکب فراهم و به آزمایشگاه منتقل گردید. در نمونه‌های خاک، درصد شن درشت (۰/۱ تا ۲ میلی‌متر)، شن بسیار ریز (۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر)، سیلت، رس، سنگریزه (ذرات دارای قطر ۲ تا ۸ میلی‌متر)، ماده آلی، آهک، پتاسیم، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک اندازه‌گیری شدند. درصد ذرات معدنی خاک به روش پیپت [۴۴]، سنگریزه به روش وزنی [۲۴]، ماده آلی به روش والکلی بلاک [۳۳]، مقدار مواد خنثی شونده (TNV) بر حسب کربنات کلسیم به روش خنثی‌سازی با اسید [۲۵]، پایداری خاکدانه به روش الک تر^۱ بر اساس میانگین وزنی قطر خاکدانه^۲ [۱۴] در آزمایشگاه و نفوذپذیری نیمرخ خاک نیز بر اساس سرعت نفوذ نهایی^۳ با روش استوانه‌های مضاعف در سه نقطه هر کرت در صحرا [۲۶] تعیین شد.

در تجزیه و تحلیل داده‌ها، نرمال بودن داده‌ها^۴ با آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف^۵ بررسی شد. برای آگاهی از چگونگی پراکنش مکانی باران و فرساینده‌ی آن در سطح منطقه، تفاوت بین مقدار باران در ایستگاه‌های گوناگون بارندگی با آزمون دانکن^۶ تعیین شد. همبستگی رواناب و نیز هدررفت خاک با شاخص فرساینده‌ی و ویژگی‌های باران با روش همبستگی پیرسون^۷ تعیین شد. شاخص مناسب فرساینده‌ی بر اساس ضریب تبیین^۸ (2R) و سطح معنی‌داری بالا انتخاب شد. کارهای آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۳ انجام شد.

نتایج و تحلیل نتایج

بر اساس نتایج، خاک‌ها عمدتاً با بافت لوم رسی و دارای حدود ۱/۰۹ درصد ماده آلی، ۱۲/۶۷ درصد آهک، ۹/۹۱ درصد سنگریزه هستند. پایداری خاکدانه اغلب ضعیف (با ۱/۰۶ میلی‌متر میانگین وزنی قطر خاکدانه) و نفوذپذیری خاک‌ها، متوسط (۳/۳۰ سانتی‌متر در ساعت) بود. پایین بودن مقدار ماده آلی می‌تواند دلیل اصلی ضعف پایداری خاکدانه‌ها باشد. مشاهده‌های صحرائی نشان

- 1- Wet-sieving
- 2- Mean Weight Diameter
- 3- Final infiltration rate
- 4- Data normality
- 5- Kolmogorov-Smirnov method
- 6- Duncan test
- 7- Pearson correlation method
- 8- Determination coefficient

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک ها

ویژگی	میانگین	انحراف معیار
شن	۲۶/۴۰	۶/۶۹
سیلت	۳۱/۵۰	۷/۴۸
رس	۳۱/۵۱	۵/۶۸
سنگریزه	۹/۹۱	۳/۱۰
ماده آلی	۱/۰۹	۰/۲۶
آهک	۱۲/۶۷	۴/۳۳
پایداری خاکدانه	۱/۰۶	۰/۴۴
نفوذپذیری	۳/۳۰	۱/۳۰

داد که کشت متمرکز و عدم رعایت آیش و گاهی سوزاندن بقایای گیاهی، علل اصلی پایین بودن ماده ی آلی در خاک ها هستند. جدول (۱) ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد بررسی را نشان می دهد.

طی دوره دو ساله پژوهش از ۹۶ رخداد باران با مدت بیشتر از ۳۰ دقیقه، ۴۱ رخداد باران، منجر به رواناب و در نتیجه رسوب در کرت ها شدند. شدت باران در ۴۱ رخداد باران از ۲/۱۱ تا ۱۳/۷۸ میلی متر در ساعت تغییر کرد و به طور میانگین ۴/۸۴ میلی متر در ساعت بود. جدول (۲) ویژگی های باران های منجر به رواناب در منطقه مورد بررسی در سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ را نشان می دهد. نظر به بالا بودن تعداد داده ها، توزیع آماری داده های باران نرمال بود.

جدول ۲- ویژگی های باران های منجر به رواناب در منطقه مورد بررسی در سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵

تاریخ	شدت (میلی متر در ساعت)	بیشترین شدت ۳۰ دقیقه (میلی متر در ساعت)	تاریخ	شدت (میلی متر در ساعت)	بیشترین شدت ۳۰ دقیقه (میلی متر در ساعت)
۱۳۸۴/۱/۱۳	۲/۲۱	۳/۰	۱۳۸۵/۱/۹	۶/۳۱	۸/۲
۱۳۸۴/۱/۱۴	۲/۶۸	۳/۲	۱۳۸۵/۱/۱۶	۲/۵۴	۵/۲۰
۱۳۸۴/۱/۲۵	۴/۰۳	۱۵/۲	۱۳۸۵/۱/۱۸	۲/۱۱	۴/۲
۱۳۸۴/۱/۲۶	۲/۷۰	۳/۰	۱۳۸۵/۱/۲۸	۷/۸۹	۱۴/۴۶
۱۳۸۴/۱/۲۷	۳/۷۰	۴/۸	۱۳۸۵/۲/۴	۲/۸	۵/۰
۱۳۸۴/۱/۲۸	۳/۳۶	۵/۴	۱۳۸۵/۲/۵	۲/۶۴	۴/۰
۱۳۸۴/۲/۶	۲/۵۶	۷/۶	۱۳۸۵/۲/۶	۳/۶	۶/۰
۱۳۸۴/۲/۷	۴/۰۰	۵/۴	۱۳۸۵/۲/۱۳	۳/۴	۷/۴
۱۳۸۴/۲/۱۲	۵/۵۸	۸/۴	۱۳۸۵/۲/۱۴	۲/۹۴	۴/۲
۱۳۸۴/۲/۱۳	۲/۸۲	۳/۸	۱۳۸۵/۲/۱۵	۲/۵۴	۴/۰
۱۳۸۴/۲/۱۴	۳/۴۲	۴/۸	۱۳۸۵/۲/۱۶	۲/۵۸	۷/۶
۱۳۸۴/۲/۱۵	۳/۶۵	۵/۰	۱۳۸۵/۲/۲۰	۳/۷۸	۶/۶
۱۳۸۴/۲/۲۴	۱۰/۰۸	۲۱/۸	۱۳۸۵/۴/۸	۸/۲	۸/۲
۱۳۸۴/۲/۲۵	۱۳/۷۸	۲۲/۸	۱۳۸۵/۶/۲۶	۵/۳۵	۱۳/۰
۱۳۸۴/۲/۲۶	۵/۰۶	۲۵/۰	۱۳۸۵/۷/۲۳	۹/۸	۹/۸
۱۳۸۴/۲/۲۹	۵/۹۵	۱۳/۰	۱۳۸۵/۷/۲۸	۴/۰	۴/۰
۱۳۸۴/۲/۳۰	۸/۰۰	۱۲/۲	۱۳۸۵/۸/۳	۶/۶۵	۱۲/۴
۱۳۸۴/۳/۱۰	۷/۰۰	۷/۰	۱۳۸۵/۸/۵	۴/۵۶	۹/۶
۱۳۸۴/۳/۱۲	۲/۴۷	۳/۶	-	-	-
۱۳۸۴/۷/۶	۱۱/۰۸	۲۲/۴	-	-	-
۱۳۸۴/۱۱/۱۵	۶/۱۵	۶/۸	-	-	-
۱۳۸۴/۱۱/۲۰	۴/۱۳	۴/۶	-	-	-
۱۳۸۴/۱۲/۱۸	۲/۳۲	۴/۴	-	-	-

میانگین حجم رواناب در ۳۶ زمین در هر یک از ۴۱ رخدادهای باران منجر به رواناب تعیین شد. به این ترتیب ۴۱ داده حجم رواناب برای کل منطقه مورد بررسی به دست آمد. بر این اساس، حجم رواناب در سطح منطقه در ۴۱ رخدادهای باران بین ۰/۴۰۷ متر مکعب در هکتار (رخدادهای ۳۹) و ۱۲/۲۰۹ متر مکعب در هکتار (رخدادهای ۱۴) بود. میانگین حجم رواناب در سطح منطقه در ۴۱ رخدادهای باران برابر ۳/۹۴۶ متر مکعب در هکتار بود. مقدار هدررفت خاک در سطح منطقه در ۴۱ رخدادهای باران از ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۲۹۸۸ تن در هکتار تغییر کرد و میانگین آن ۰/۰۷۳۹ تن در هکتار بود. ضریب رواناب در زمین‌های مورد بررسی در ۴۱ رخدادهای باران منجر به رواناب از ۰/۰۱۱ تا ۰/۱۴۶ تغییر یافت. دبی اوج رواناب نیز بین ۰/۰۱۲ و ۰/۳۶۳ بود. جدول (۳) حجم، ضریب و دبی اوج رواناب و

هدررفت خاک در ۴۱ رخدادهای باران در سطح منطقه مورد بررسی در سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مقدار شاخص فرسایشی در رخدادهای گوناگون باران منجر به رسوب در مدل USLE از ۱/۰۷۷ تا ۷۳/۴۰۲، در مدل MUSLE از ۰/۰۷۲ تا ۲/۶۱۳، در مدل RUSLE از ۰/۴۷۶ تا ۱۱۰/۷۸۷ و در مدل USLE_M از ۰/۰۲۸ تا ۶/۱۹۰ تغییر یافت. میانگین شاخص فرسایشی در مدل‌های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE_M نیز به ترتیب ۱۵/۴۴۴، ۰/۶۳۴، ۷۰/۳۹۶ و ۰/۹۹۲ بود. جدول (۴) مقدار شاخص فرسایشی در مدل‌های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE_M در ۴۱ رخدادهای باران منجر به رسوب در سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ را نشان می‌دهد.

جدول ۳- حجم، ضریب و دبی اوج رواناب و هدررفت خاک در ۴۱ رخدادهای باران در منطقه در سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵

هدررفت خاک	رواناب			رخدادهای	هدررفت خاک (ton/ha)	رواناب			رخدادهای
	حجم (m3/ha)	ضریب	دبی اوج (m3/sec)			حجم (m3/ha)	ضریب	دبی اوج (m3/sec)	
۰/۰۲۵۱	۰/۰۶۳	۰/۰۲۵	۱/۳۰۵	۲۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۹	۰/۰۲۱	۰/۵۳۲	۱
۰/۰۱۰۸	۰/۰۲۰	۰/۰۱۹	۰/۸۱۹	۲۵	۰/۰۰۶۷	۰/۰۳۲	۰/۰۲۹	۱/۰۶۵	۲
۰/۰۱۴۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۴	۰/۹۳۰	۲۶	۰/۲۰۰۶	۰/۰۹۶	۰/۰۵۹	۸/۰۳۳	۳
۰/۱۴۲۲	۰/۱۷۲	۰/۰۵۴	۶/۸۴۲	۲۷	۰/۰۲۵۷	۰/۰۴۲	۰/۰۳۸	۱/۰۳۴	۴
۰/۰۱۸۶	۰/۰۴۵	۰/۰۴۰	۱/۶۸۶	۲۸	۰/۰۳۶۷	۰/۰۷۲	۰/۰۴۸	۲/۳۱۴	۵
۰/۰۰۵۹	۰/۰۴۹	۰/۰۴۶	۱/۵۰۴	۲۹	۰/۰۲۸۹	۰/۰۶۷	۰/۰۴۹	۱/۸۱۲	۶
۰/۰۴۹۱	۰/۰۹۶	۰/۰۶۶	۳/۶۹۵	۳۰	۰/۱۲۴۴	۰/۰۳۶	۰/۰۳۵	۶/۲۰۱	۷
۰/۱۰۶۷	۰/۰۸۵	۰/۰۶۲	۴/۹۸۷	۳۱	۰/۰۳۵۹	۰/۱۸۱	۰/۱۱۲	۳/۱۳۷	۸
۰/۰۲۹۴	۰/۱۰۴	۰/۰۸۷	۳/۴۹۹	۳۲	۰/۰۷۳۴	۰/۱۱۱	۰/۰۴۹	۴/۱۱۹	۹
۰/۰۱۲۰	۰/۰۵۸	۰/۰۵۷	۱/۹۳۰	۳۳	۰/۰۰۳۹	۰/۰۴۸	۰/۰۴۲	۰/۸۴۹	۱۰
۰/۰۳۸۳	۰/۰۵۸	۰/۰۵۶	۲/۶۸۴	۳۴	۰/۰۴۱۴	۰/۱۲۹	۰/۰۹۳	۲/۳۳۹	۱۱
۰/۰۶۲۱	۰/۰۸۷	۰/۰۵۷	۳/۸۵۰	۳۵	۰/۰۵۴۶	۰/۱۰۶	۰/۰۷۲	۳/۰۲۴	۱۲
۰/۰۰۱۵	۰/۰۳۶	۰/۰۱۱	۰/۴۴۳	۳۶	۰/۲۲۷۶	۰/۳۳۷	۰/۰۸۳	۹/۸۲۲	۱۳
۰/۲۵۳۸	۰/۰۸۷	۰/۰۴۰	۷/۵۲۳	۳۷	۰/۲۹۸۸	۰/۵۴۹	۰/۰۹۳	۱۲/۲۰۹	۱۴
۰/۰۵۵۷	۰/۱۷۸	۰/۰۴۴	۲/۰۳۸	۳۸	۰/۱۷۱۶	۰/۱۷۶	۰/۰۸۶	۶/۹۸۲	۱۵
۰/۰۰۱۷	۰/۰۳۳	۰/۰۲۰	۰/۴۰۷	۳۹	۰/۱۰۶۴	۰/۱۰۷	۰/۰۴۵	۶/۵۷۱	۱۶
۰/۲۱۴۶	۰/۱۵۵	۰/۰۵۸	۸/۲۴۵	۴۰	۰/۱۳۸۷	۰/۲۳۳	۰/۰۶۹	۷/۱۶۷	۱۷
۰/۱۲۲۱	۰/۱۳۱	۰/۰۷۱	۵/۷۵۹	۴۱	۰/۰۵۷۷	۰/۲۹۵	۰/۱۰۴	۳/۶۵۰	۱۸
-	-	-	-	-	۰/۰۰۲۱	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	۰/۶۱۴	۱۹
-	-	-	-	-	۰/۱۵۷۹	۰/۲۶۸	۰/۰۶۰	۹/۱۴۷	۲۰
-	-	-	-	-	۰/۰۲۸۵	۰/۳۶۳	۰/۱۴۶	۵/۸۳۲	۲۱
-	-	-	-	-	۰/۰۰۶۸	۰/۱۵۳	۰/۰۹۲	۲/۲۰۴	۲۲
-	-	-	-	-	۰/۰۳۸۷	۰/۰۶۰	۰/۰۶۴	۵/۹۸۴	۲۳

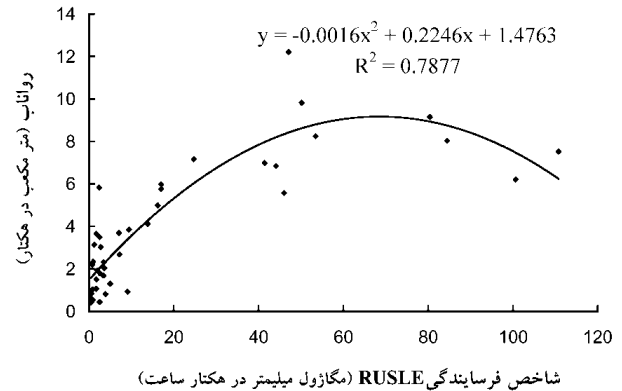
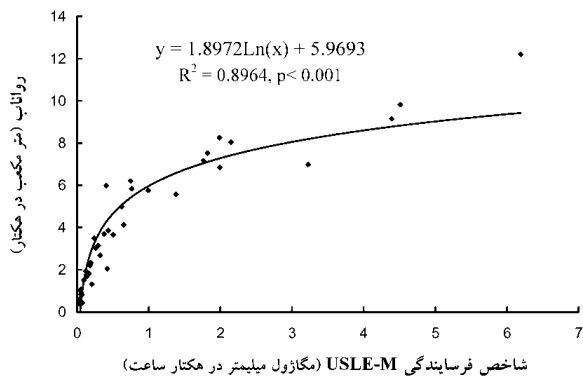
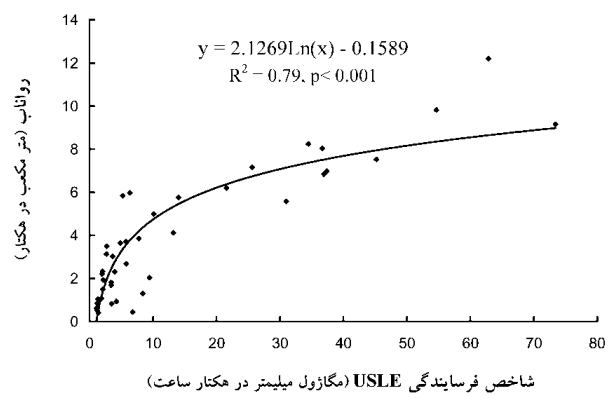
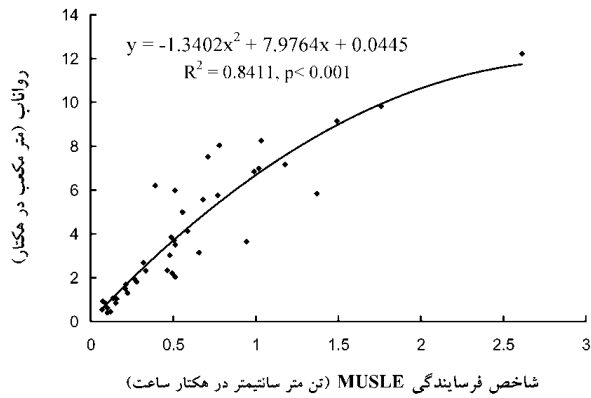
جدول ۴- شاخص فرساینده‌گی در مدل‌های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE_M در ۴۱ رخداد باران در سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵

شاخص فرساینده‌گی در سال ۱۳۸۵				رخداد	شاخص فرساینده‌گی در سال ۱۳۸۴				رخداد
RUSLE	USLE-M	MUSLE	USLE		RUSLE	USLE-M	MUSLE	USLE	
۵/۰۲۷	۰/۲۰۶	۰/۲۲۲	۸/۳۶۲	۲۴	۰/۹۰۶	۰/۰۲۴	۰/۰۶۸	۱/۱۷۲	۱
۳/۹۱۶	۰/۰۶۷	۰/۰۹۰	۳/۴۷۵	۲۵	۱/۷۰۶	۰/۰۵۵	۰/۱۳۵	۱/۸۷۵	۲
۹/۱۰۸	۰/۰۵۹	۰/۰۷۲	۴/۲۲۳	۲۶	۸۴/۴۷۰	۲/۱۵۰	۰/۷۷۹	۳۶/۶۴۲	۳
۴۴/۱۳۲	۰/۹۹۲	۰/۹۸۸	۳۶/۹۱۹	۲۷	۰/۸۷۱	۰/۰۵۰	۰/۱۵۶	۱/۳۰۳	۴
۳/۴۱۷	۰/۱۳۶	۰/۲۱۳	۳/۳۸۱	۲۸	۳/۴۸۸	۰/۱۹۲	۰/۳۳۳	۳/۹۸۰	۵
۱/۷۶۶	۰/۰۹۵	۰/۲۰۷	۲/۰۹۵	۲۹	۲/۴۹۴	۰/۱۶۶	۰/۲۷۷	۳/۳۷۸	۶
۷/۱۰۸	۰/۳۷۹	۰/۵۰۴	۵/۷۳۶	۳۰	۱۰۰/۶۴۳	۰/۷۴۷	۰/۳۴۰	۲۱/۵۴۵	۷
۱۶/۲۴۰	۰/۶۲۲	۰/۵۵۵	۱۰/۰۱۰	۳۱	۱/۲۶۰	۰/۲۹۸	۰/۶۵۶	۲/۶۵۶	۸
۲/۵۰۷	۰/۲۳۹	۰/۵۱۲	۲/۷۳۶	۳۲	۱۳/۸۹۱	۰/۶۵۱	۰/۵۸۶	۱۳/۲۰۴	۹
۱/۹۳۴	۰/۱۲۱	۰/۲۶۴	۲/۱۳۸	۳۳	۰/۵۸۶	۰/۰۵۲	۰/۱۵۱	۱/۲۳۵	۱۰
۷/۲۲۴	۰/۳۲۲	۰/۳۱۸	۵/۷۵۸	۳۴	۰/۹۹۹	۰/۱۹۰	۰/۴۶۴	۲/۰۳۷۱	۱۱
۹/۴۶۴	۰/۴۳۹	۰/۴۸۸	۷/۷۴۶	۳۵	۲/۸۰۲	۰/۲۶۰	۰/۴۷۹	۳/۶۱۷	۱۲
۲/۵۴۵	۰/۰۷۳	۰/۱۲۰	۶/۸۰۹	۳۶	۵۰/۱۶۱	۴/۵۱۰	۰/۷۶۱	۵۴/۶۳۴	۱۳
۱۱۰/۷۸۷	۱/۸۱۹	۰/۷۱۰	۴۵/۲۲۲	۳۷	۴۷/۱۱۵	۶/۱۹۰	۲/۶۱۳	۶۲/۸۸۱	۱۴
۳/۶۶۸	۰/۰۴۲	۰/۵۱۲	۹/۴۵۸	۳۸	۴۱/۴۳۱	۳/۲۲۲	۱/۰۱۸	۳۷/۳۷۴	۱۵
۰/۴۷۶	۰/۰۲۸	۰/۱۰۱	۱/۳۹۸	۳۹	۴۶/۰۴۵	۱/۳۸۱	۰/۶۷۹	۳۰/۹۸۶	۱۶
۵۳/۴۷۴	۱/۹۸۷	۱/۰۳۳	۳۴/۴۷۶	۴۰	۲۴/۷۴۸	۱/۷۶۶	۱/۱۷۶	۲۵/۶۱۶	۱۷
۱۷/۰۳۵	۰/۹۹۴	۰/۷۶۹	۱۳/۹۸۵	۴۱	۱/۷۵۰	۰/۵۰۳	۰/۹۴۴	۴/۸۲۲	۱۸
-	-	-	-	-	۰/۵۵۵	۰/۰۳۵	۰/۱۰۰	۱/۰۷۷	۱۹
-	-	-	-	-	۸۰/۴۰۹	۰/۳۹۲	۱/۴۹۳	۷۳/۴۰۲	۲۰
-	-	-	-	-	۲/۴۱۳	۰/۷۶۱	۱/۳۷۰	۵/۲۲۰	۲۱
-	-	-	-	-	۰/۷۶۹	۰/۱۷۹	۰/۴۹۵	۱/۹۵۳	۲۲
-	-	-	-	-	۱۷/۰۳۴	۰/۴۰۸	۰/۵۱۰	۶/۳۴۶۵۸۸	۲۳

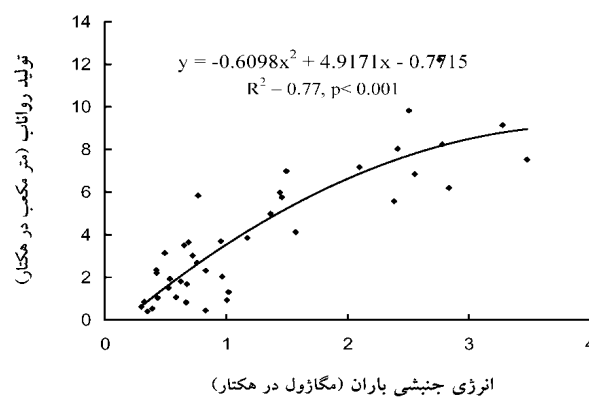
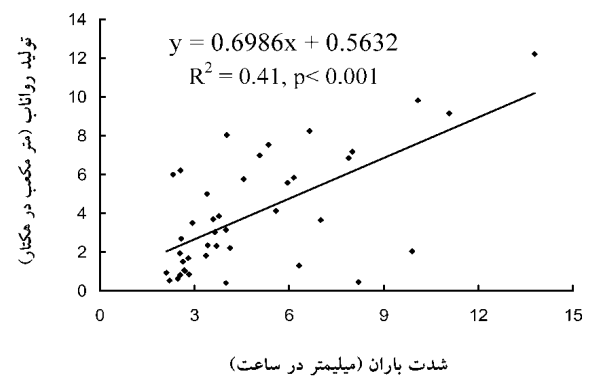
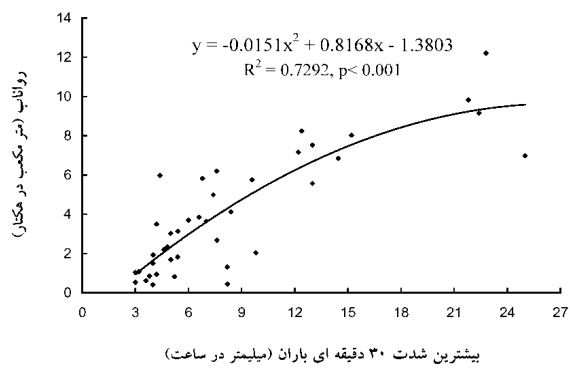
است [۱۵]. نتایج این پژوهش همچنین نظر فاستر و همکاران [۲۲] در مورد اهمیت شاخص رواناب در کنار شاخص باران در تعیین عامل فرساینده‌گی را تایید می‌کند.

از آنجا که تعیین شاخص فرساینده‌گی در برخی از مدل‌ها در کنار آگاهی از ویژگی‌های باران (شدت، بیشترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای و انرژی جنبشی باران)، نیازمند اندازه‌گیری رواناب (حجم، ضریب و دبی اوج رواناب) می‌باشد، بنابراین یافتن شاخصی ساده برای برآورد رواناب دارای اهمیت است. از این رو رابطه بین ویژگی‌های باران (شدت، بیشترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای و انرژی جنبشی) و رواناب بررسی شد. شکل (۳) رابطه بین رواناب و ویژگی‌های باران در منطقه مورد بررسی در ۴۱ رخداد باران را نشان می‌دهد.

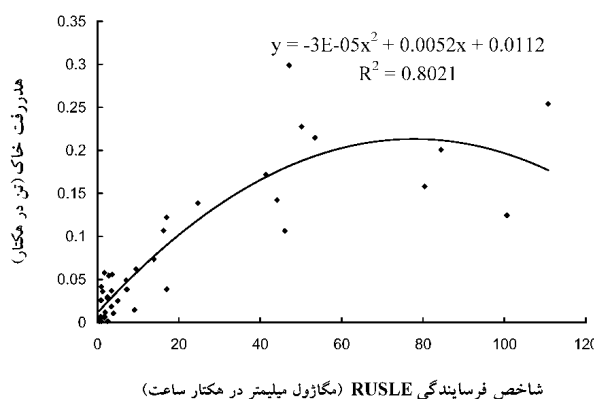
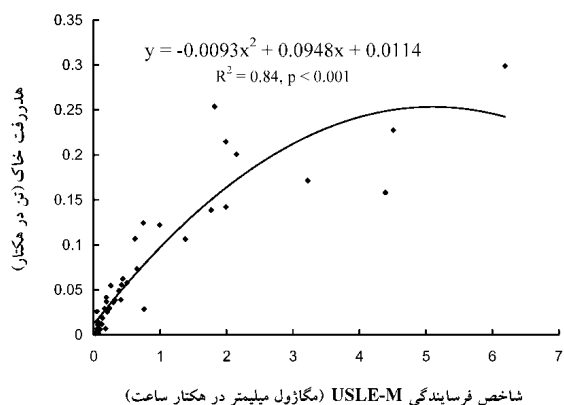
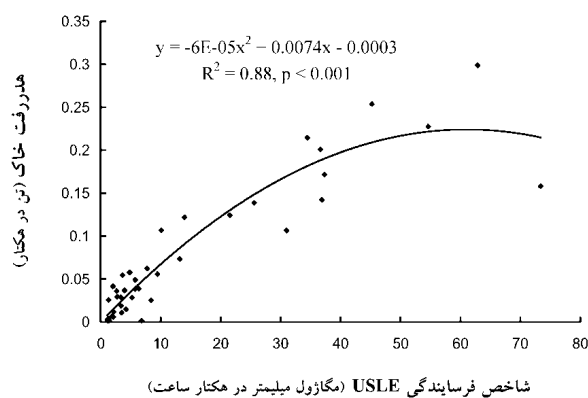
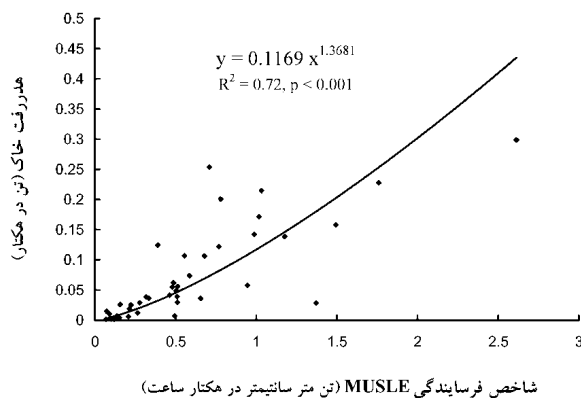
نتایج نشان داد که بین رواناب و شاخص فرساینده‌گی در مدل‌های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE_M همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۰۱ با ضریب تبیین (R^2) به ترتیب برابر ۰/۷۹، ۰/۸۴، ۰/۷۹ و ۰/۹۰ وجود دارد. رابطه‌ی بین رواناب و شاخص فرساینده‌گی در مدل‌های USLE و USLE_M از نوع تابع لگاریتمی و در مدل‌های MUSLE و RUSLE از نوع تابع درجه‌ی دوم بود. شکل (۲) رابطه بین رواناب و شاخص فرساینده‌گی در مدل‌های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE_M در ۴۱ رخداد باران را نشان می‌دهد. در پژوهش‌های حسین و همکاران [۲۷] رابطه‌ی خطی معنی‌دار ($R^2 = ۰/۵۸$) بین عمق رواناب و شاخص فرساینده‌گی (EI_{30}) به اثبات رسیده



شکل ۲- رابطه بین رواناب و شاخص فرسایشی در مدل‌های USLE، MUSLE، USLE و USLE_M در ۴۱ رخداد باران



شکل ۳- رابطه ی بین رواناب و ویژگی های باران در منطقه ی مورد بررسی در ۴۱ رخداد باران



شکل ۴- رابطه‌ی بین هدررفت خاک و شاخص فرسایندهی در مدل‌های USLE، MUSLE، USLE و USLE_M در ۴۱ رخداد باران

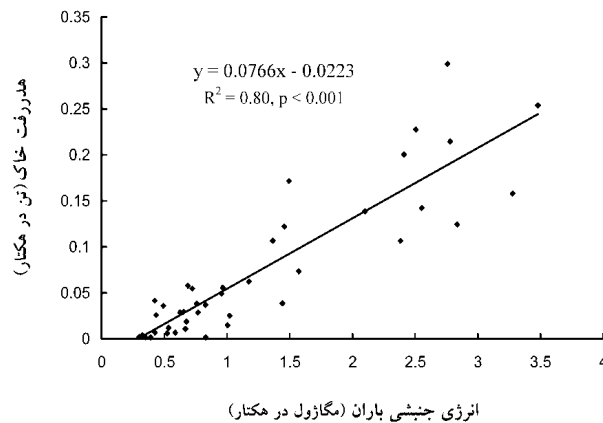
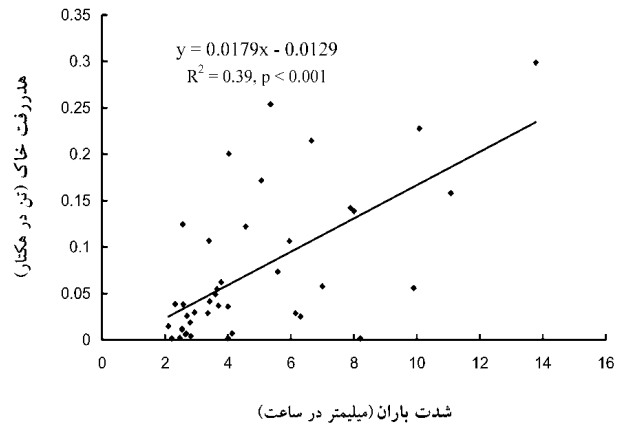
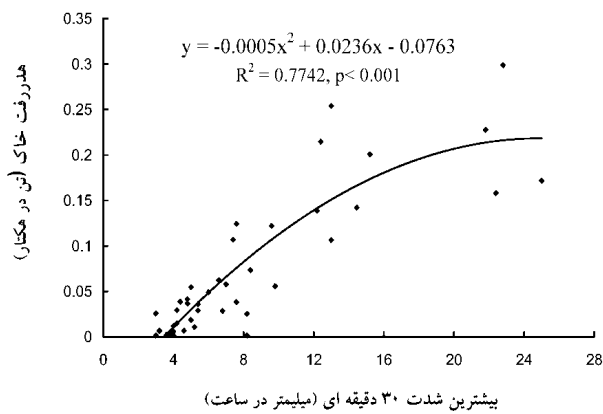
صورت تابع توانی و در سایر مدل‌ها به صورت تابع درجه دوم بود. شکل (۴) رابطه‌ی بین هدررفت خاک و شاخص فرسایندهی در مدل‌های USLE، MUSLE، USLE و USLE_M در ۴۱ رخداد باران را نشان می‌دهد.

این نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات در هدررفت خاک در منطقه مورد بررسی با شاخص فرسایندهی $USLE (88/0=2R)$ قابل تبیین است. در پژوهش کاینل و ریس [۳۰] با آن که هر دو مدل USLE و USLE_M در پیش‌بینی فرسایش خاک موثر شناخته شدند، ولی کارایی مدل USLE نسبت به USLE_M، هنگامی که میزان نفوذ آب باران به خاک افزایش می‌یابد، کمتر بود. بررسی‌های خواجه‌ای و همکاران [۴] و سرخوش [۸] نشان داد که در صورت تصحیح ضرایب مدل MUSLE، این مدل کارایی مناسبی در برآورد رسوب ناشی از رگبارها خواهد داشت. نتایج این پژوهش در مورد همبستگی بالای بین هدررفت خاک با شاخص فرسایندهی مدل RUSLE، یافته‌های میرزایی و همکاران [۱۲] در مورد دقت کافی این مدل در برآورد رسوب را تایید می‌کند.

برای پیش‌بینی آسان هدررفت خاک در رخداد‌های گوناگون باران، رابطه بین هدررفت خاک و ویژگی‌های باران نیز بررسی شد. شکل (۵) رابطه‌ی بین هدررفت خاک و ویژگی‌های باران در منطقه

نتایج نشان داد که مقدار رواناب همبستگی مثبت معنی‌دار (با شدت باران $R^2 = 0/41$)، بیشترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای ($R^2 = 0/73$) و انرژی جنبشی آن ($R^2 = 0/77$) دارد. در حقیقت تغییرات رواناب در منطقه مورد بررسی با شاخص انرژی جنبشی باران بالاترین همبستگی را دارد. در پژوهش راثو و همکاران [۳۵] در ناحیه نیمه خشک هند، رابطه‌ی بین رواناب و باران با شاخص PI_{30} بیان شد. این شاخص نشان می‌دهد که حاصلضرب بیشینه‌ی شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران (I_{30}) و مقدار باران (P) اثر مستقیمی در تولید رواناب در نقاط گوناگون (با R^2 بین ۰/۷۳ تا ۰/۸۳) دارد. یافته‌های آرنائز و همکاران [۱۶] نیز نشان می‌دهد که بین رواناب و شدت باران، رابطه‌ی خطی معنی‌دار ($R^2 = 0/77, p < 0/001$) وجود دارد.

نتایج نشان داد که همبستگی متفاوتی بین هدررفت خاک و شاخص‌های فرسایندهی در مدل‌های گوناگون وجود دارد. بین هدررفت خاک و شاخص فرسایندهی در مدل‌های USLE، MUSLE، USLE و USLE_M همبستگی مثبت معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۰۱ وجود داشت و ضریب تبیین (R^2) آن به ترتیب برابر ۰/۸۸، ۰/۷۲، ۰/۸۰ و ۰/۸۴ بود. رابطه بین هدررفت خاک و شاخص فرسایندهی در مدل MUSLE به



شکل ۵- رابطه بین هدررفت خاک و ویژگی های باران در منطقه ی مورد بررسی در ۴۱ رخداد باران

هدررفت خاک رابطه خطی مستقیم با رواناب ($p < 0.01$) داشته و رواناب نیز تحت تاثیر مستقیم شدت باران قرار دارد. در یافته های دزایر و همکاران [۲۰] در منطقه نیمه خشک اسپانیا، افزایش هدررفت خاک با افزایش میانگین شدت بارندگی، به جز در مورد باران های با شدت زیاد و مدت کوتاه، نتیجه گیری شده است. همچنین نتایج پژوهش مارتینز-زاوالا و همکاران [۳۱] نیز بیانگر وجود یک رابطه ی نمایی بین هدررفت خاک با رواناب و رواناب با شدت و انرژی جنبشی باران می باشد.

نتیجه گیری

با توجه به وسعت نواحی نیمه خشک در ایران، یافتن شاخص فرساینده گی مناسب برای پیش بینی مطمئن مقدار هدررفت خاک در این مناطق دارای اهمیت است. بر این اساس، هدررفت خاک تحت رخدادهای طبیعی باران طی دو سال در ناحیه ای نیمه خشک در شمال غرب کشور اندازه گیری شد و شاخص های فرساینده گی بر اساس مدل های USLE، MUSLE، و USLE_M در رخدادهای طبیعی باران تعیین شدند. تولید رواناب همبستگی بالاتری با شاخص فرساینده گی مدل USLE_M ($R^2 = 0.90$)

مورد بررسی در ۴۱ رخداد باران را نشان می دهد.

بر اساس این نتایج، هدررفت خاک همبستگی مثبت معنی دار ($p < 0.01$) با شدت باران ($R^2 = 0.39$)، بیشترین شدت ۳۰ دقیقه ای ($R^2 = 0.77$) و انرژی جنبشی آن ($R^2 = 0.80$) دارد. رابطه ی هدررفت خاک با شدت و نیز انرژی جنبشی باران از نوع خطی و رابطه ی آن با بیشترین شدت ۳۰ دقیقه ای باران از نوع تابع درجه دوم بود. نتایج پژوهش ها اغلب نشان می دهد که شدت باران، عاملی مهم در میزان پاشمان خاک و در نتیجه هدررفت خاک است [۱۷]. این نتیجه گزارش های خالدیان و شاهویی [۵] و بهزادفر و همکاران [۱] در مورد اهمیت شدت بارندگی در تعیین فرساینده گی باران را تایید می کند. این پژوهش نشان داد که انرژی جنبشی باران مناسبترین شاخص برای تعیین مقدار هدررفت خاک در منطقه مورد بررسی است. در پژوهش های پیشین نیز اهمیت انرژی جنبشی باران به عنوان شاخص فرساینده گی و هدررفت خاک بیان شده است [۲۳]. بررسی های همتی و همکاران [۱۳] در روستای کبوده علیا در کرمانشاه نشان داد که شاخص فرساینده گی EI_{60} به عنوان بهترین شاخص، بالاترین مقدار همبستگی و معنی داری را با مقادیر تلفات خاک دارد. نتایج پژوهش آرنائز و همکاران [۱۶] نشان می دهد که

داشت. انرژی جنبشی باران، شاخصی قابل اطمینان ($p < 0/001$)، $R^2 = 0/77$ برای پیش بینی آسان مقدار رواناب بود. شاخص فرساینده‌گی مدل USLE (EI_{30})، دقیق‌تر از شاخص فرساینده‌گی سایر مدل‌ها بیانگر تغییرات هدررفت خاک بود ($p < 0/001$)، $R^2 = 0/88$. انرژی جنبشی باران نیز شاخصی ساده برای پیش بینی آسان هدررفت خاک در رخدادهای باران بود که ۸۰ درصد تغییرات هدررفت خاک در خاک‌های منطقه را تبیین کرد. بر اساس نتایج، شاخص فرساینده‌گی مدل USLE، به عنوان شاخصی مناسب برای پیش بینی مطمئن مقدار هدررفت خاک در رخدادهای طبیعی باران در منطقه نیمه‌خشک مورد بررسی است. برای پیش بینی آسان هدررفت خاک، از شاخص انرژی جنبشی باران می‌توان بهره گرفت.

منابع

- ۱- بهزادفر، م.، مرادی، ح. و صادقی، س.ح.ر. ۱۳۸۴. مدل سازی عامل فرساینده‌گی باران برای رگبارهای منفرد: مطالعه موردی استان خوزستان. مجله علوم انسانی ۱۲(۳): ۴۱-۴۹.
- ۲- پورعبدالله، م. و تجریشی، م. ۱۳۸۵. مدل سازی فرسایش حوضه‌ای به کمک مدل‌های SWAT و RUSLE منطقه مورد مطالعه: زیر حوضه امامه. هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. تهران، دانشگاه تربیت مدرس، صفحه ۲۳-۲۵.
- ۳- حکیمی، م. ۱۳۶۵. گزارش خاکشناسی و طبقه بندی اراضی اجمالی منطقه هشترود. نشریه شماره ۷۶۷، وزارت کشاورزی، سازمان تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، موسسه تحقیقات خاک و آب، صفحه ۳-۱۲.
- ۴- خالدیان، ح. و شاهویی، س.ص. ۱۳۸۴. بررسی رابطه شدت بارندگی با انرژی جنبشی واحد بارندگی و تعیین فرساینده‌گی سالانه باران در استان کردستان. سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، کرج، صفحه ۲۳۱-۲۳۵.
- ۵- خواجه‌ای، ا.، بروشکه، ا.، سکوتی، ر. و عرب خدری، م. 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، صفحه ۴۵-۴۶.
- ۶- رضایی، م.، قرقره‌چی، ش. و قانع‌ی مطلق، غ.ر. ۱۳۸۶. برآورد فرسایش خاک در حوزه زیارت با استفاده از مدل RUSLE. دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج، صفحه ۱۱۷-۱۱۹.
- ۷- رضائی فرد، م.، تلوری، ع.ر. و عرب خدری، م. ۱۳۸۰. بررسی کارایی MUSLE در برآورد رسوب رویدادهای منفرد در زیر حوضه افجه در حوضه لتیان. همایش ملی مدیریت اراضی- فرسایش خاک و توسعه پایدار، اراک، صفحه ۷۳-۷۶.
- ۸- سرخوش، ا. ۱۳۸۰. بررسی کارایی مدل MUSLE در برآورد رسوب وقوعی و سالیانه سیل در حوضه آبخیز درکه. نخستین

همایش آبخیزداری و مدیریت استحصال آب در حوضه‌های آبخیز، بوشهر، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، صفحه ۳۴-۳۶.

۹- صادقی، س.ح.ر. و بهزادفر، م. ۱۳۸۳. بررسی ارتباط بین پارامترهای بارندگی و عامل فرساینده‌گی آن در ایستگاه‌های هواشناسی استان مازندران و گلستان. نشریه آب و آبخیز، جلد ۱، صفحه ۲-۱۰.

۱۰- صادقی، س.ح.ر.، علافی بادی، م.، دشتی مرویلی، م. و یغمایی، ه. ۱۳۸۶. کاربرد MUSLT در برآورد رسوب ناشی از رگبارهای منفرد. دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج، صفحه ۲۳۱-۲۳۳.

۱۱- صادقی فرد، د. ۱۳۸۵. پهنه بندی ضریب فرساینده‌گی باران در ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد عمران دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. صفحه ۵۶-۷۸.

۱۲- میرزایی، م.، نظرعلوی، ع. و اعلم‌الهدی، ع.ا. ۱۳۸۵. کاربرد و ارزیابی مدل فرسایش RUSLE در حوزه آبخیز جاجرود (رودک) به کمک G.I.S، اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، صفحه ۱۱۱-۱۱۲.

۱۳- همتی، م.، احمدی، ح.، نیک کامی، د. و زهتابیان، غ.ر. ۱۳۸۶. تعیین بهترین شاخص فرساینده‌گی باران در اقلیم نیمه خشک سرد ایران (مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک کبوده علیا-کرمانشاه). چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران- مدیریت حوزه‌های آبخیز. کرج، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، صفحه ۱۵۷-۱۵۸.

14- Angers, D.A. and G.R. Mehuys. 1993. Aggregate stability to water. In: Cartner, M.R. (Ed.), Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, Canada, pp. 651-657.

15- Angima, S.D. Stott, D.E. O'Neill, M.K. Ong, C.K. and Weesies, G.A. 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. Agriculture, Ecosystems and Environment, 97: 295-308.

16- Arnaez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flano, P. and Ortigosa, L. 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. Soil & Tillage Research 93: 324-334.

17- Bisal, F. 1960. The effect of raindrop size and impact velocity on sand splash. Canadian Journal of Soil Science, 40: 242-245.

18- Capolongo, D., Diodato, N., Mannaerts, C.M., Piccarreta, M. and Strobl, R.O. 2008. Analyzing

- 94: 220-228.
- 28- Hussein, M. 1998. Water erosion assessment and controle in Northern Iraq. *Soil & Tillage Research*, 45: 161-173.
- 29- Kinnell, P.I.A. 2000. AGNPS-UM: applying the USLE-M within the agricultural non point source pollution model. *Environmental Modelling & Software*, 15: 331-341.
- 30- Kinnell, P.L.A. and Risse, L.M. 1998. USLE-M: Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 1667-1672.
- 31- Martínez-Zavala, L., Jordán López, A. and Bellinfante, N. 2008. Seasonal variability of runoff and soil loss on forest road backslopes under simulated rainfall. *Catena*, 74 : 73-79.
- 32- Millward, A.A. and Mersey, J.E. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena*, 38: 109-129.
- 33- Nelson, D.W. and L.E. Sommer. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: A. L. Page (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. 2nd Ed. ASA Monogr. Amer. Soc. Agron. Madison, 9(2): 539-579.
- 34- Nyakatawa, E.Z., Reddy, K.C. and Lemunyon, J.L. 2001. Predicting soil erosion in conservation tillage cotton production systems using the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Soil & Tillage Research*, 57: 213-224.
- 35- Rao, K.P.C., Steenhuisb, T.S., Coglec, A.L. Srinivasan, S.T., Yule, D. F. Smith, G.D. 1998. Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid tropical India. II. Tilled systems *Soil & Tillage Research*, 48: 61-69
- 36- Rejman, J., Turski, R. and Paluszek, J. 1998. Spatial and temporal variability in erodibility of loess soil. *Soil & Tillage Research*, 46: 61-68.
- 37- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of
- temporal changes in climate erosivity using a simplified rainfall erosivity model in Basilicata (southern Italy). *Journal of Hydrology* 356: 119-130.
- 19- Cohen, J.M., Shepherd, K.D. and Walsh, M.G. 2005. Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed. *Geoderma*, 124: 235-252.
- 20- Desir, G. and Marin, C. 2006. Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone (Bardenas Reales, NE Spain). *Catena*, 66: 1-10.
- 21- Foster, G.R., Young, R.A.? Romkens, M.J.M. and Onstad, C.A. 1985. Processes of soil erosion by water. In: Follett, R. F. and Stewart, B. A. *Soil erosion and crop productivity*. American Society of Agronomy? Inc., Soil Science Society of America, Madison? Wisconsin, USA, pp. 137-59.
- 22- Foster, G.R., Lombardi, F. and Moldenhauer, W.C. 1982. Evaluation of rainfall-runoff erosivity factors for individual storms. *Trans. ASAE*, 25: 124-129.
- 23- Free, F. 1960. Erosion characteristics of rainfall. *Agricultural engineering*, 41: 447-449.
- 24- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1980. Particle-size analysis. In: Klutem A., *Methods of Soil analysis, Part 1, Physical And Mineralogical Methods*, Second eddition, Agronomy, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, pp. 383-385.
- 25- Goh, T.B., R.J.St. Arnaud, and Mermut. A.R. 1993. Aggregate stability to water. In: Cartner, M. R. (Ed.), *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, Canada, pp. 177-180.
- 26- Harteg, K.H. and R. Horn. 1989. *Die Physikalische Untersuchung von Böden: 2. Auflage*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. In: Scholten, T. 1997. Hydrology and erodibility of the soils and saprolite cover of the Swaziland Middleveld. *Soil Technology*, 11: 247-262.
- 27- Hussein, M.H., T.H. Kariem, and Othman, A.K. 2007. Predicting soil erodibility in northern Iraq natural runoff data. *Soil & Tillage Research*,

- 42- Silva, A.M. 2004. Rainfall erosivity map for Brazil. *Catena* 57: 251-259.
- 43- Sonneveld, B.G.J.S. and Nearing, M.A. 2003. A nonparametric/parametric analysis of the Universal Soil Loss Equation. *Catena*, 52: 9-21.
- 44- SSEW. 1982. Soil Survey Laboratory Methods. Technical Monographs No. 6. Harpenden. UK. pp. 112-113.
- 45- Williams, J.R. and Berndt, H.D. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 20: 1100-1104.
- 46- 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. pp. 13-27.
- 47- Yin, S., Xie, Y., Nearing, M.A. and Wang, C. 2007. Estimation of rainfall erosivity using 5- to 60-minute fixed-interval rainfall data from China. *Catena* 70: 306-312.
- Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, pp. 404.
- 38- Santos Loureiro, N. and Azevedo Cotinho, M. 2001. A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index, based on monthly data and applied to the Algarve region, Portugal. *Journal of Hydrology*, 250: 12-18.
- 39- Sawamura, M., Morita, M. and Hirano, H. 2003. Enlargement of bulk superconductors by the MUSLE technique. *Physica C*, 392-396: 441-445.
- 40- Shamshad, A., Azhari, M.N., Isa, M.H., Wan Hussin, W.M.A. and Parida, B.P. 2008. Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. *Catena*, 72: 423-432.
- 41- Shi, Z.H., Cai, C.F., Ding, S.W., Wang, T.W. and Chow, T.L. 2004. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China. *Catena*, 55: 33-48.