

تأثیر عامل تندى شیب در دقت بر آورد هدررفت خاک با نسخه‌های مدل USLE در کشتزارهای دیم منطقه نیمه‌خشک زنجان

علی‌رضا واعظی*^۱، فریباالسادات حسینی^۲

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۲۵

۱-استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲-دانشجوی دکارتاسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

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

چکیده

تندى شیب یکی از مهم‌ترین عوامل در فرسایش خاک است که در مدل‌های فرسایش خاک مانند معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) و نسخه‌های آن، به‌عنوان عامل تندى شیب (S) بیان شده است. اطلاعات کافی در مورد دقت مدل‌های فرسایش خاک در برآورد عامل تندى شیب در کشتزارهای دیم منطقه نیمه‌خشک وجود ندارد. بنابراین در این پژوهش، شش کشتزار دیم با شیب متفاوت (۸، ۱۱، ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۲۴ درصد) در منطقه نیمه‌خشک زنجان انتخاب و هدررفت خاک در کرت‌هایی به ابعاد ۱/۵ متر × ۲/۵ متر تحت باران‌های طبیعی طی دوره یک سال آبی از مهر ۱۳۹۴ تا پایان شهریور ۱۳۹۵ اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج حاصله، از ۸۲ رخدادهای بارندگی طی دوره پژوهش فقط ۸ رخداد منجر به هدررفت خاک در کرت‌ها شدند. عامل تندى شیب بر مبنای نسبت هدررفت خاک از زمین مورد نظر به هدررفت خاک از زمینی با شیب ۹ درصد اندازه‌گیری شد و با استفاده از مدل‌های USLE، RUSLE، USLE-MM و AUSLE برآورد شد. رابطه‌ای قوی بین هدررفت خاک و درصد شیب کشتزار مشخص شد ($R^2=0/92$). با افزایش درصد شیب، هدررفت خاک به‌شدت افزایش یافت و مقدار عامل تندى شیب (S) برآورد شده با استفاده از مدل‌های USLE و USLE-MM به‌ترتیب ۴ و ۱۵ درصد بیشتر بود در حالی که مدل‌های AUSLE و RUSLE به‌ترتیب ۱۳ و ۱۰ درصد کمتر از مقدار مشاهده‌ای نشان دادند. این مطالعه بیانگر این است که USLE در مقایسه با نسخه‌های اصلاحی آن مدلی مناسب‌تر برای برآورد عامل تندى شیب در کشتزارهای دیم منطقه نیمه‌خشک است.

واژه‌های کلیدی: باران طبیعی، تندى شیب، کرت استاندارد، کرت فرسایشی، هدررفت خاک

Effect of Slope Steepness Factor on Soil Loss Estimation Accuracy of the USLE Model Versions in Semi-arid Rainfed Lands, Zanjan Province

AR Vaezi^{1*}, F Hoseini²

Received: 23 April 2016 Accepted: 13 February 2017

¹ Full Prof., Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., University of Zanjan, Iran

² M.Sc. Student, Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., University of Zanjan, Iran

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

Abstract

Slope steepness is one of the very important factors in soil erosion which has been defined as slope steepness factor (S) in soil erosion models such as the Universal Soil Loss Equation (USLE) and its versions. Sufficient information is not available on the accuracy of the erosion models in estimating the S-factor in semi-arid rainfed lands. Therefore, in this study, six rainfed lands with 8, 11, 15, 18, 20 and 24% slopes were selected in a semi-arid region of Zanjan and soil loss was measured at 1.5 m × 2.5 m plots under natural rainfalls during a year period from early October 2015 to end of September 2016. Based on the obtained results, eight rainfalls among 82 rainfall events caused soil loss at the plots during the study period. The S-factor was measured using the ratio of soil loss from the plots to the soil loss from a land with 9% slope and estimated using the USLE, RUSLE, USLE-MM and AUSLE models. A strong relationship was found between soil loss and slope steepness of rainfed land ($R^2 = 0.92$). Soil loss increased strongly with increasing the slope steepness and the S-factor values estimated using the USLE and USLE-MM were about 4% and 15% higher than the measured value, respectively. The AUSLE and RUSLE showed about 13% and 10% lower estimations than the measured ones, respectively. This study revealed that the USLE is more suitable model than the other models to estimate the S-factor in the semi-arid rainfed lands.

Keywords: Natural rainfall, Slope gradient, Standard plot, Erosion plot, Soil loss

مقدمه

افزایش فرسایش خاک با افزایش تندی شیب زمین به اثبات رسیده است (لو و همکاران ۲۰۱۶). با این وجود در برخی مطالعات ارتباطی بین میزان هدررفت خاک با تندی شیب یافت نشد (چاپلوت و بیزونایس ۲۰۰۳). معادلات تجربی به ویژه معادله جهانی فرسایش خاک^۱ (USLE) و نسخه‌های برگرفته از آن به طور گسترده در سراسر جهان برای برآورد هدررفت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. برآورد هدررفت خاک در این مدل بر اساس عوامل معینی با استفاده از معادله زیر انجام می‌شود (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸):

$$A = RKLSCP \quad [1]$$

شیب زمین یکی از عوامل مهم در ارزیابی میزان فرسایش خاک است به طوری که رابطه مستقیم شیب با فرسایش خاک به وسیله آب به اثبات رسیده است (کویان و همکاران ۲۰۱۶). طول و تندی شیب جزء ویژگی‌های مهم شیب هستند که تعیین‌کننده نوع و شدت فرآیندهای فرسایش خاک می‌باشند. طول و تندی شیب زیاد معمولاً منجر به ایجاد رواناب با انرژی بالاتر و ظرفیت حمل ذرات بیشتر می‌شود (اسمتز و همکاران ۲۰۰۷). دلیل این موضوع در ابتدا افزایش سرعت آبدوی و سپس زیاد شدن مقدار رواناب سطحی است. در پژوهش‌های پیشین،

¹ Universal Soil Loss Equation

بزرگ‌تر از ۵ درصد ۰/۵، شیب ۳/۵ تا ۴/۵ درصد ۰/۴، شیب ۱ تا ۳ درصد ۰/۳ و برای شیب کم‌تر از ۱ درصد ۰/۲ است (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸).

عامل تندی شیب (S) یکی از شش عامل معادله جهانی فرسایش خاک است که نسبت فرسایش از زمینی با شیب دلخواه به فرسایش از زمینی با شیب ۹ درصد را نشان می‌دهد. اثر درجه شیب بیش‌تر از اثر طول شیب است (اوموتو ۲۰۰۸). تندی شیب باعث افزایش سرعت و نیروی برشی جریان شده و مطابق با آن فرسایش خاک نیز بیش‌تر می‌شود. زینگ (۱۹۴۰) به این نتیجه رسید که هدررفت خاک با توان ۱/۳۹ درصد شیب تغییر می‌کند و در ادامه ماسگریو (۱۹۴۷) توان ۱/۳۵ را مورد استفاده قرار داد. ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) با تحلیل داده‌های هدررفت خاک دریافتند که عامل S تابع درجه دوم درصد شیب است:

$$S = 0.065 + 0.045\theta + 0.0065\theta^2 \quad [۳]$$

که در آن: S عامل تندی شیب و θ درصد شیب است.

مدل USLE در سال‌های ۱۹۶۵ و ۱۹۷۸ مورد تجدید نظر قرار گرفته و نسخه تجدید نظر شده معادله جهانی فرسایش خاک^۲ (RUSLE) معرفی شده توسط رنارد و همکاران (۱۹۹۱) برآوردهای دقیق‌تری از عامل-های R، C، K، P و فرسایش خاک انجام می‌دهد. در مدل RUSLE عامل S تابع مثلثاتی از تندی شیب است. عامل S در شیب‌های کم‌تر و بیش‌تر از ۹ درصد دارای ضرایب متفاوت است (مککول و همکاران ۱۹۸۷):

$$S = 10.8\sin\theta + 0.03 \quad S < 9\% \quad [۴]$$

$$S = 16.8\sin\theta - 0.50 \quad S \geq 9\% \quad [۵]$$

لیو و همکاران (۱۹۹۴) عامل S را برای شیب‌های بیش از ۳۰ درصد اصلاح کردند که این معادله نیز تابعی مثلثاتی از تندی شیب بود که توسط مککول و همکاران (۱۹۸۷) به آن اشاره شده بود:

$$S = 3\sin(\sin\theta)^{0.8} + 0.56 \quad 9\% \leq S < 50\% \quad [۶]$$

که در آن: A میانگین فرسایش سالانه خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال)، R شاخص عامل فرسایش باران و رواناب (مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال)، K عامل فرسایش‌پذیری خاک (تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر)، LS عامل طول و تندی شیب، C عامل پوشش گیاهی و P عامل عملیات حفاظتی خاک است (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸).

عوامل طول شیب (L) و تندی شیب (S) اغلب به-صورت عامل شیب (LS) بیان می‌شود (تروئه و همکاران ۱۹۹۱) که بیانگر تأثیر توپوگرافی بر فرسایش خاک است. LS نسبت مقدار هدررفت خاک از کرت شیب‌دار به کرت استاندارد است (ژانگ و همکاران ۲۰۰۹). افزایش در طول و تندی شیب می‌تواند سرعت جریان آب را افزایش دهد و باعث تشدید فرسایش خاک شود. طبق نظر بلانکو و ناداوکا (۲۰۰۶) عامل LS از نظر محاسبه مهم‌ترین و مشکل‌ترین عامل رابطه جهانی فرسایش خاک است، به-خصوص اگر در مقیاس آبخیز کوچک به‌کار رود. طول شیب عبارت است از فاصله افقی از مبدأ جریان بالا دست دامنه تا جایی که تندی شیب به مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر یافته، به‌طوری که عمل رسوب‌گذاری آغاز یا جریان‌های روی یک دامنه در یک کانال معین (کانال تراس، سطوح تمرکز جریان، خندق، چاله، آبراهه و غیره) متمرکز گردند (وزارت کشاورزی ایالات متحده ۱۹۷۲). مطالعات زیادی نشان دادند که هدررفت خاک از واحد سطح متناسب با توانی از طول شیب است، با این تفاوت که مقادیر توان متفاوت است. برای مثال زینگ (۱۹۴۰) به مقدار ۰/۶ برای توان طول شیب رسید در حالی که ماسگریو (۱۹۴۷) مقدار ۰/۳۵ را پیشنهاد کرد. در مدل USLE، عامل طول شیب با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m \quad [۲]$$

که در آن: λ طول کرت و m توان وابسته به شیب است. در مدل USLE مقدار m برای شیب‌های مساوی یا

پژوهشی دیگر ژو و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که ضریب رواناب با درجه شیب رابطه توانی مثبت داشت. نقش عامل شیب در کارایی مدل USLE و نسخه-های آن در برآورد هدررفت خاک در برخی پژوهش‌های پیشین مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعه‌ای، لیو و همکاران (۱۹۹۴) با بررسی هدررفت خاک در کرت‌های صحرائی نشان دادند که رابطه‌ای خطی بین هدررفت خاک و تندى شیب وجود دارد. مقدار هدررفت خاک اندازه‌گیری شده از رابطه مذکور کمتر از مقدار برآورد شده با مدل USLE و بیشتر از مقدار برآورد شده با مدل RUSLE بود. بررسی‌های محمدی و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد که مقدار هدررفت خاک برآورد شده با مدل RUSLE بیش‌ترین همبستگی را با عوامل طول و تندى شیب ($R^2=0.93$) دارد. خالقی‌پناه و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که کارایی مدل RUSLE و به‌ویژه مدل RUSLE2 در دامنه‌های مرتعی با واسنجی عامل طول شیب و پوشش گیاهی بهبود می‌یابد. بررسی‌های باگارلو و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که مدل USLE-M و USLE-MM برآورد بهتری از هدررفت خاک نسبت به مدل USLE در اختیار می‌گذارند که دلیل آن وابستگی بیشتر فرسایش به فرآیند انتقال با رواناب است. یافته‌های کینل (۲۰۱۷) نشان داد که مدل USLE-M نسبت به مدل پروژه پیش-بینی فرسایش آبی (WEPP) برآورد بهتری از هدررفت خاک در کرت‌های بدون پوشش ارائه می‌دهد.

در بیش‌تر روش‌های محاسبه عامل توپوگرافی، به عامل طول شیب اهمیت زیادی داده شده است. هدف بیش‌تر محققان نیز ارائه روش‌های جدید و یا توسعه روش‌های قبلی برای برآورد عامل توپوگرافی بوده است. با این حال در پژوهش‌های داخلی کمتر به این موضوع پرداخته شده است. این مدل‌ها عمدتاً از لحاظ روش و نحوه برآورد عوامل توپوگرافی متفاوت هستند و طبقاً مقایسه توانمندی آن‌ها در ارزیابی عامل تندى شیب،

مدل USLE-MM^۳ (باگارلو و فرو ۲۰۱۰) نسخه اصلاح شده مدل USLE-M (کینل و ریس ۱۹۹۷) است که در آن عامل تندى شیب از رابطه زیر محاسبه می‌شود (نیرینگ ۱۹۹۷):

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + \exp(2.3 - 1.6 \sin\theta)} \quad [V]$$

مدل AUSLE^۴ از نسخه‌های دیگر مدل USLE است که در آن عامل توپوگرافی وابسته به تندى شیب زمین است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (مور و ویلسون ۱۹۹۲):

$$S = \left[\frac{\sin\theta}{0.0896} \right]^{1.3} \quad [A]$$

که در آن‌ها: S عامل تندى شیب و θ تندى شیب است.

در پژوهش‌های زیادی به موضوع تأثیر شیب زمین بر هدررفت خاک پرداخته شده است. رئیس‌یان و چرخابی (۲۰۰۴) به این نتیجه رسیدند که در زراعت دیم افزایش شیب موجب افزایش رسوب‌زایی شده درحالی‌که در مرتع افزایش شیب موجب کاهش رسوب‌زایی شد. زارع‌خورمیزی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که اگرچه بین حجم رواناب و درصد شیب، همبستگی معنی‌دار وجود ندارد اما همبستگی آن با هدررفت خاک معنی‌دار است. مککول و همکاران (۱۹۹۳) به این نتیجه رسیدند که مقدار مناسب برای ضریب طول شیب در شمال غربی ایالات متحده ۰/۵ است. ریک‌زاپ و نیرینگ (۲۰۰۵) نشان دادند که شکل شیب و توپوگرافی عاملی مهم در همگرایی یا واگرایی جریان‌ها روی خاک است. ال‌کاتب و همکاران (۲۰۱۳) درجات مختلفی از رواناب سطحی و هدررفت خاک را تحت تأثیر سه سطح شیب (۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و بیش‌تر از ۳۰ درصد) تعیین کردند و نتیجه گرفتند که بین هدررفت خاک و تندى شیب زمین روابط معنی‌داری وجود داشت. در پژوهشی اکبری‌مهر و جلیوند (۲۰۱۳) نشان دادند که همبستگی معنی‌دار و مثبت بین مقدار هدررفت خاک و طول و تندى شیب وجود دارد. در

⁵ Water Erosion Prediction Project

³ Modification of the USLE-M

⁴ Adopted USLE

شیب‌ها به رابطه بین فرسایش و شیب پی برد و با بهره‌مندی از رابطه شیب در مدل USLE، مقدار فرسایش در شیب ۹ درصد را به دست آورد.

اندازه‌گیری هدررفت خاک در کشتزارها

در مدل USLE، فرسایش خاک در کرت‌هایی با طول متفاوت تعیین شده و نهایتاً با کرت دارای طول ۲۲/۱ متر مقایسه شده و رابطه‌ای برای تعیین عامل طول شیب ارائه شده است (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸). به هر حال در شیب‌های کوتاه (کمتر از ۲۲/۱ متر) و یا طولانی با شکل غیریکنواخت، امکان احداث کرتی با طول مذکور وجود ندارد. لذا می‌توان از کرتی با طول کوچکتر که در دامنه قابل احداث است، برای مطالعه فرسایش خاک استفاده کرد و بر اساس مدل USLE مقدار فرسایش را به طول کرت استاندارد (۲۲/۱ متر) گسترش داد. در این راستا، در هر دامنه تعداد سه کرت آزمایشی با ابعاد ۱/۵ متر × ۲/۵ متر با مجموع ۱۸ کرت آزمایشی احداث شد. دیواره‌های طولی کرت‌های احداث شده با پشته خاکی و دیواره‌های بالایی و پایینی با ورق گالوانیزه محدود شد. در انتهای هر کرت مخزنی با حجم ۷۰ لیتر قرار داده و مقدار رواناب حاصل از باران‌های طبیعی طی سال آبی ۱۳۹۴-۹۵ اندازه‌گیری گردید. پس از پایان هر رخداد منجر به رواناب، ابتدا وزن و حجم رواناب جمع شده در داخل مخزن‌ها اندازه‌گیری شد و نمونه ۵۰۰ میلی‌لیتری از آن برداشته، در آزمایشگاه ابتدا توزین و پس از جداسازی رسوب با کاغذ صافی، مقدار رواناب و خاک هدررفته تعیین گردید (واعظی و همکاران ۲۰۰۸).

تعیین عامل تندی شیب در مدل‌های فرسایش خاک

ابتدا هدررفت خاک در کرت‌های مورد مطالعه از میانگین سه کرت موجود در هر دامنه محاسبه و سپس جهت تعیین عامل S ابعاد کرت‌ها به کرت استاندارد تعمیم داده شد و هدررفت خاک برای کرتی با شیب ۹ درصد میان‌یابی شد. در نهایت با توجه به رابطه زیر مقدار عامل تندی شیب مشاهده‌ای محاسبه گردید:

$$S = \frac{\text{هدررفت خاک شیب معین}}{\text{هدررفت خاک در شیب 9 درصد}} \quad [9]$$

زمینه‌ساز استفاده از مدل‌های صحیح و کارآمد و همچنین تهیه و توسعه مدل‌های جدید خواهد بود.

مواد و روش‌ها

انتخاب کشتزارهای مطالعاتی

برای انجام این پژوهش شش دامنه با شیب‌های متفاوت شامل ۸، ۱۱، ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۲۴ درصد در محدوده دانشگاه زنجان واقع بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه ۴۱/۰۱۸ دقیقه تا ۳۶ درجه ۴۱/۰۳ دقیقه شمالی و بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ درجه ۲۴/۴۹ دقیقه تا ۴۸ درجه ۲۴/۵۲ دقیقه شرقی، انتخاب شدند. بر اساس داده‌های بلندمدت ایستگاه سینوپتیک زنجان، میانگین دمای سالانه منطقه ۱۱ درجه سلسیوس و متوسط بارندگی سالانه آن ۲۷۰/۴ میلی‌متر است. منطقه مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب زیرک و مزیک است. خاک‌های موجود در منطقه دارای افق‌های سطحی اکریک و افق‌های زیر سطحی جیپسیک، کلسیک و کمبیک هستند. گونه‌های گیاهی اغلب از نوع بوته‌های رز ایرانی یا ورک (*Rosa persica*) از خانواده *Rosaceae* می‌باشند (زرین آبادی و واعظی ۲۰۱۷).

در منطقه مورد مطالعه بیش‌ترین فراوانی درصد شیب مربوط به شیب‌های بین صفر تا ۵ درصد است و شیب‌های بین ۵ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ درصد به ترتیب در رتبه بعدی فراوانی قرار دارند (زرین آبادی و واعظی ۱۳۹۵). در شیب‌های ملایم (کمتر از ۵ درصد)، نشانه‌های وقوع فرسایش آبی در کشتزارها ضعیف است. از این رو شیب‌های بالا برای این پژوهش انتخاب شدند. در مدل USLE نقش شیب در فرسایش خاک با مقایسه مقدار فرسایش در شیب‌های مختلف با شیب مرجع (۹ درصد) بررسی شده است (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸). گاهی ممکن است پیدا کردن شیب ۹ درصد که شرایط مناسب برای بررسی فرسایش خاک داشته باشد، آسان نباشد. از این رو می‌توان با مطالعه فرسایش خاک در سایر

خاک (واعظی و همکاران ۲۰۱۰) است و عامل M از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M = (100 - \text{درصد رس}) \times (\text{درصد شن خیلی ریز}) \quad [11]$$

تجزیه و تحلیل آماری

تفاوت بین دامنه‌ها از نظر هدررفت خاک به روش تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مورد ارزیابی قرار گرفتند. از توابع ریاضی برای دستیابی به رابطه‌ای برای پیش‌بینی هدررفت خاک بر مبنای شیب زمین استفاده و در انتها، دقت برآورد مدل‌های فرسایش خاک در تعیین عامل تندی شیب، مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک کشت‌زارهای دیم

نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف خاک در Error! Reference source not found. ارائه شده است. دامنه‌ها از لحاظ بسیاری از ویژگی‌ها تفاوت معنی‌دار دارند اما از نظر نفوذپذیری خاک‌رخ و فرسایش‌پذیری خاک شرایطی مشابه دارند. با توجه به میانگین درصد نسبی ذرات شن (۴۴/۶۴)، سیلت (۲۰/۵۴) و رس (۳۱/۸۹)، به‌طور کلی بافت خاک دامنه‌ها در کلاس لوم رسی شنی قرار دارند. میانگین چگالی ظاهری به‌دلیل حضور ذرات درشت زیاد (شن و سنگریزه)، ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. خاک‌ها از نظر ماده آلی فقیر و دارای متوسط قطر خاکدانه پایین هستند. وجود بافت درشت‌دانه و سنگریزه‌ای، عامل اصلی نفوذپذیری زیاد خاک دامنه‌ها است.

برای برآورد مقدار عامل S بر اساس مدل‌های USLE، USLE-MM، RUSLE و AUSLE از روابط ۳ تا ۸ استفاده شد.

تعیین ویژگی‌های خاک کشت‌زارها

نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری در هر دامنه برداشت شد. توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (گی و بودر ۱۹۸۶)، چگالی ظاهری به روش سیلندر فلزی به قطر ۴/۸ و ارتفاع ۵/۸ سانتی‌متر (اودام و همکاران ۲۰۰۹)، سنگریزه به روش توزین جرم و متوسط قطر خاکدانه‌ها با سری الک‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر با دستگاه شیکر مکانیکی تعیین شدند. برای جداسازی ذرات شن و ذرات کوچکتر از آن‌ها، خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک از الک ۰/۰۵ میلی‌متر عبور داده شدند و در نهایت میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها محاسبه شد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک، آزمایش نفوذ با استفاده از استوانه مضاعف انجام گرفت. کربن آلی به روش والکی-بلک اصلاح شده (نلسون و سامرز ۱۹۸۲) و کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید (سیمس ۱۹۹۶) اندازه‌گیری شد. برای تعیین پایداری خاکدانه‌ها از شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب پس از غربال کردن در آب استفاده شد (کمپر و روزنا ۱۹۸۶). عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) از رابطه زیر محاسبه گردید (ویشمایر و اسمیت ۱۹۷۸):

$$K = 2.8 \times 10^{-7} \times M^{1.14} \times (12 - OM) + 4.3 \times 10^{-3} \times (S - 2) + 3.3 \times 10^{-3} \times (P - 3) \quad [10]$$

که در آن: K عامل فرسایش‌پذیری خاک برحسب تن در هکتار در سال در واحد عامل فرسایش‌پذیری باران، OM ماده آلی بر حسب درصد، S کد ساختمان خاک مورد استفاده در طبقه‌بندی خاک و P کلاس نفوذپذیری پروفیل

جدول ۱- ویژگی‌های خاک کشتزارهای دیم مورد بررسی و نتایج تجزیه واریانس بین آن‌ها.

خصوصیات خاک	میانگین	بیشترین	کمترین	میانگین مربعات
شن (%)	۴۴/۶۴	۵۱/۵۰	۳۶/۰۰	۹۷/۴۴**
سیلت (%)	۲۰/۵۴	۲۵/۰۰	۱۵/۹۰	۴۲/۰۳**
رس (%)	۳۱/۸۹	۳۷/۱۰	۲۲/۴۴	۷۱/۶۲**
چگالی ظاهری (g cm ⁻³)	۱/۵۸	۱/۷۰	۱/۳۳	۰/۰۱*
سنگریزه (%)	۲۹/۱۵	۴۴/۰۰	۲۰/۰۰	۶۵/۵۴**
متوسط اندازه خاکدانه (mm)	۱/۸۹	۲/۰۴	۱/۶۰	۰/۰۵**
نفوذپذیری (cm h ⁻¹)	۱۳/۵۰	۱۶/۰۳	۱۱/۸۳	۱۶۰/۶۰ ^{ns}
ماده آلی (%)	۱/۰۰	۱/۲۰	۰/۸۰	۰/۰۷**
کربنات کلسیم معادل	۲۳/۷۷	۳۷/۰۰	۹/۰۰	۴۱۵/۳۷**
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (mm)	۰/۳۲	۰/۶۷	۰/۱۴	۰/۱۴**
عامل فرسایش‌پذیری، K	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰ ^{ns}

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

هدررفت خاک در کشتزارهای دیم

طی دوره یک ساله پژوهش، ۲۸۶ میلی‌متر بارندگی رخ داد که شامل ۸۸ درصد باران بود. از ۸۲ رخداد بارندگی طی دوره پژوهش فقط ۸ رخداد منجر به رواناب و هدررفت خاک در کرت‌ها شدند. بیشترین مقدار

بارندگی منجر به رواناب ۵/۵۲ میلی‌متر و کمترین آن یک میلی‌متر بود و شدت بارندگی از ۰/۱۱ میلی‌متر بر ساعت تا ۱/۸۴ میلی‌متر بر ساعت تغییر کرد. برای بررسی عوامل مؤثر بر هدررفت خاک ابتدا همبستگی بین هدررفت خاک با شیب زمین و ویژگی‌های فیزیکی خاک تعیین شد (جدول ۲).

جدول ۲- ماتریس همبستگی بین هدررفت خاک و درصد شیب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در کشتزارهای دیم.

هدررفت خاک	عامل فرسایش‌پذیری	نفوذپذیری	پایداری خاکدانه	اندازه خاکدانه	کربنات کلسیم	ماده آلی	سنگریزه	چگالی ظاهری	رس	سیلت	شن	شیب
												۱
												۰/۸۲**
											۰/۸۷**	۱
											۰/۲۲	۰/۴۹**
											۰/۴۵	۰/۴۲
											۰/۴۲	۰/۵۵*
											۰/۲۸	۰/۲۰
											۰/۵۵*	۰/۷۷**
											۰/۲۸	۰/۳۹
											۰/۱۱	۰/۲۴
											۰/۳۵	۰/۰۴
											۰/۱۸	۰/۱۷
											۰/۶۲**	۰/۶۲**

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

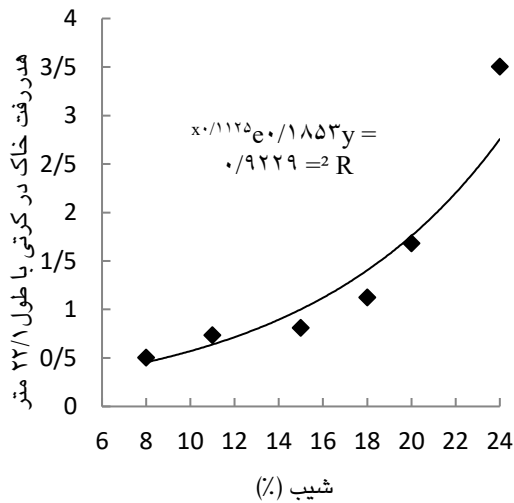
همبستگی معنی‌دار بین هدررفت خاک با شیب دامنه (P < ۰/۰۱ و r = ۰/۶۲)، درصد شن (P < ۰/۰۱ و r = ۰/۵۹) و سنگریزه (P < ۰/۰۵ و r = -۰/۵۳) وجود

همبستگی معنی‌دار بین هدررفت خاک با شیب دامنه (P < ۰/۰۱ و r = ۰/۶۲)، درصد شن (P < ۰/۰۱ و r = ۰/۵۹) و سنگریزه (P < ۰/۰۵ و r = -۰/۵۳) وجود

هدررفت خاک دامنه‌ها نبود. این نتیجه عدم کارایی این مدل در ارزیابی وضعیت فرسایش‌پذیری خاک در کشت‌زارهای دیم منطقه است. اهمیت اصلاح عامل فرسایش‌پذیری خاک در کشت‌زارهای منطقه نیمه‌خشک در شمال غرب ایران در پژوهش‌های واعظی و همکاران (۲۰۰۸) قبلاً به اثبات رسیده است. دانه‌بندی ذرات خاک مهمترین ویژگی خاک از نظر تأثیر بر هدررفت خاک بود و خاک‌های دارای درصد بالایی از ذرات سیلت بر خلاف خاک‌های حاوی سنگریزه، شن و رس، بسیار حساس به فرسایش هستند. این نتایج مؤید نقش مهم بافت خاک در هدررفت خاک است. وهابی و نیک‌کامی (۲۰۰۸) نشان دادند که درصد سیلت دارای همبستگی مثبت اما درصد ذرات شن همبستگی منفی با میزان رسوب تولیدی داشتند. طبق نظر ونگ و همکاران (۲۰۱۲) با افزایش مقدار شن، فرسایش‌پذیری خاک کاهش می‌یابد؛ زیرا شدت نفوذ آب به خاک را افزایش می‌دهد و لذا از ایجاد رواناب سطحی و هدررفت خاک جلوگیری می‌کند که بستگی به مقدار و اندازه شن دارد. هدررفت خاک با درصد سیلت خاک همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد که با نتایج دوکر و همکاران (۲۰۰۱) مطابقت داشت. همین‌طور مطالعات مکوآیر و همکاران (۲۰۰۳) نشان داده است که با افزایش درصد سیلت، میزان فرسایش‌پذیری خاک به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. خاک‌های سیلتی معمولاً خوب دانه‌بندی می‌شوند، ولی در اثر مرطوب شدن، خاک‌دانه‌ها به‌سهولت شکسته و ذرات سیلت جدا و منتقل می‌شوند. وجود همبستگی منفی بین هدررفت خاک و محتوای رس خاک از آنجا است که رس توسط تشکیل خاکدانه و چسبندگی ذرات خاک به هم موجب افزایش ثبات خاکدانه‌ها و در نتیجه کاهش هدررفت خاک می‌شود (دوکر و همکاران ۲۰۰۱). این ذره خاک برخلاف ذرات شن، سیلت و سنگریزه تحت تأثیر شیب دامنه نبود و به عنوان عامل مستقل از شیب در هدررفت خاک مؤثر است. سنگریزه نیز از عواملی است که در هدررفت خاک مؤثر است به‌طوری که نتایج مطالعات لی (۲۰۰۳) نشان می‌دهد

داشت. این نتایج مؤید آن است که شیب زمین یکی از عوامل مهم تعیین‌کننده فرسایش خاک در کشت‌زارهای دیم منطقه نیمه‌خشک زنجان است. تغییر در شیب دامنه‌ها، با تغییر ویژگی‌های خاک از نظر فراوانی ذرات معدنی خاک (شن، سیلت، رس و سنگریزه) همراه بود. خاک دامنه‌های با شیب بالا، از مقدار شن و سنگریزه کمتر، اما از مقدار سیلت بیشتری برخوردار هستند. رس برخلاف ذرات شن، سیلت و سنگریزه تحت تأثیر شیب دامنه نبود و به‌عنوان عامل مستقل از شیب ($r = -0.22$)، در هدررفت خاک مؤثر است. با افزایش شیب زمین، سرعت جریان افزایش می‌یابد و قدرت جریان برای جدا کردن ذرات خاک نیز بیشتر خواهد شد. این موضوع به‌دلیل پایین بودن نفوذپذیری خاک و افزایش حجم رواناب در این شیب‌ها است (اکویو و هاریلال ۲۰۱۰). نتایج مطالعات باتنی و گریزمر (۲۰۰۰) در کالیفرنیا نشان می‌دهد که افزایش درصد شیب زمین در محدوده بین ۴ تا ۱۶ درصد، تأثیر مثبت و معنی‌دار بر هدررفت خاک دارد که این نتایج با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. چنگ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از شبیه‌ساز باران، رابطه زاویه شیب بر رواناب و هدررفت خاک در مناطق تپه-ماهوری فلات لسی چین بررسی کردند. نتایج بیانگر آن بود که با افزایش شیب، تولید رواناب و هدررفت خاک افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که ظرفیت حمل رسوب رابطه توانی با درصد شیب داشت. در پژوهشی دیگر، سوهوآ و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی تأثیر درصد شیب بر فرسایش خاک در دامنه‌های کوتاه در شیب‌های ۹، ۱۸، ۲۷، ۳۶، ۴۷، ۵۸، ۷۰، ۸۴ و ۱۰۰ درصد بیان کردند که هدررفت خاک در اثر ضربه قطرات باران و هدررفت در اثر شستشو با بالا رفتن درصد شیب، افزایش می‌یابد.

هدررفت خاک در کنار تندی شیب کشت‌زار به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های خاک نیز قرار می‌گیرد. عامل فرسایش-پذیری خاک (K) برآورد شده با مدل USLE تغییرات زیادی بین دامنه‌ها نداشت و به عنوان عامل مؤثر در



(۱۳۸۴) نشان داد که در شیب‌های بالاتر از ۹ درصد بین مقدار هدررفت خاک برآورد شده با مدل USLE با مقدار اندازه‌گیری شده آن تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. از این رو واسنجی عوامل مندرج در مدل از جمله عامل تندی شیب در کشت‌زارهای دیم ضروری است. لیو و همکاران (۱۹۹۴) گزارش کردند که مقدار رسوب منتقل شده با افزایش تندی شیب به صورت خطی افزایش می‌یابد. نیسن و ورمیرش (۲۰۱۰) نیز نشان دادند که بین درجه و جهت شیب با فرسایش خاک در اکثر موارد همبستگی مثبت وجود داشته است. در پژوهش حاضر با استفاده از رابطه به دست آمده، هدررفت خاک در شیب ۹ درصد میان‌یابی شد. با تعیین نسبت هدررفت خاک در هر کرت به هدررفت خاک در کرت با شیب ۹ درصد، مقدار عامل تندی شیب برای کشت‌زارهای دیم منطقه به دست آمد و همچنین عامل تندی شیب برای مدل‌های مورد نظر نیز برآورد شد.

عامل تندی شیب در مدل‌های فرسایشی

برای ارزیابی مدل‌های فرسایشی از داده‌های هدررفت خاک در ۸ رگبار مورد بررسی طی سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ استفاده شد. چنین تحلیلی در پژوهش‌های صادقی و همکاران (۲۰۰۹) نیز در مورد کارایی مدل USLE در برآورد رسوب در ابعاد رگبار استفاده شده است. مقادیر نسبت عامل تندی شیب برآوردی بر اساس مدل‌های

که وجود سنگریزه و قطعات سنگی در سطح و داخل خاک از طرق مختلف می‌تواند باعث کاهش میزان هدررفت خاک گردد. وجود سنگ و سنگریزه در سطح خاک می‌تواند از برخورد مستقیم قطرات باران بر روی خاک جلوگیری کرده، موجب کاهش فرسایش شود. عوامل مؤثر بر هدررفت خاک در این کشت‌زارهای دیم عبارت از شیب دامنه، درصد ذرات خاک و محتوای سنگریزه است و از آنجا که نتایج تجزیه واریانس شیب دامنه در سطح یک درصد معنی‌دار شد می‌توان گفت که این عامل در هدررفت خاک کشت‌زارهای دیم از عوامل دیگر مهم‌تر است که این نتایج با پژوهشی که توسط کومینو و همکاران (۲۰۱۶) انجام گرفته، مطابقت دارد.

برای تعیین عامل تندی شیب ابتدا هدررفت خاک در شیب‌ها در کرت‌هایی به ابعاد ۱/۵ متر در ۲/۵ متر اندازه‌گیری شده بود، بر اساس عامل طول شیب (L) به شیب‌هایی با طول کرت استاندارد (۲۲/۱ متر) تعمیم داده شد (رابطه ۲). سپس رابطه هدررفت خاک تعمیم یافته به کرت استاندارد با شیب زمین مورد بررسی قرار گرفت. رابطه ای مثبت و قوی ($R^2 = 0.92$) بین هدررفت در دامنه‌ای با طول استاندارد (۲۲/۱ متر) و تندی شیب زمین وجود دارد (شکل ۱). وجود رابطه‌نمایی بین هدررفت خاک و تندی شیب، نشانگر نقش فزاینده تندی شیب در هدررفت خاک در کشت‌زارهای دیم منطقه است. در شیب‌های تندتر، هم‌زمان با تولید رواناب، تنش برشی جریان به واسطه افزایش سرعت جریان بیشتر می‌شود و در نتیجه بخش زیادی از ذرات حساس به آسانی از سطح جدا شده، انتقال می‌یابند.

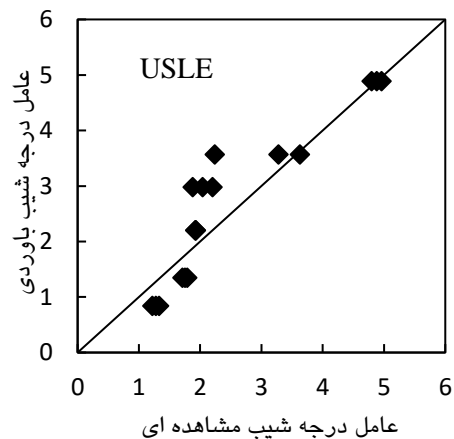
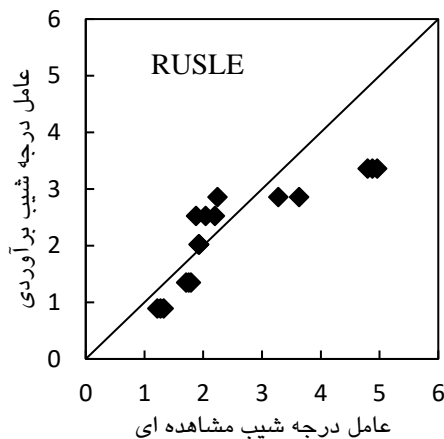
شکل ۱- هدررفت خاک در کشت‌زارهای دیم با شیب‌های

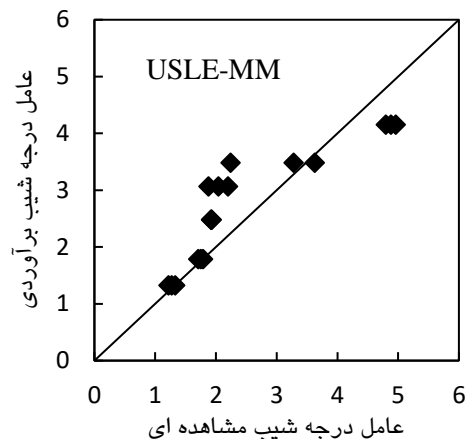
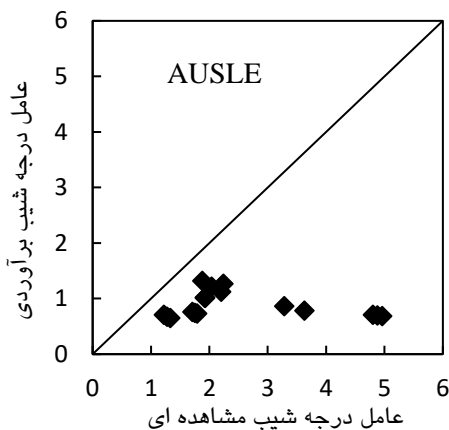
متفاوت.

همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد در دامنه‌های با شیب بیش‌تر از ۲۰ درصد، مقدار هدررفت خاک افزایش زیادی یافت. محدوده شیب بحرانی که از آن پس فرسایش خاک افزایش شدیدتری پیدا می‌کند به عوامل مختلف از جمله فرسایش‌پذیری خاک و طول دامنه بستگی دارد. آقارضا

USLE، مقدار عامل تندى شیب بر اساس توابع سینوسی به دست می آید، در حالی که در مدل USLE عامل تندى شیب بر اساس تانژانت زاویه محاسبه می شود. همان طور که در شکل ۲ دیده می شود، مدل USLE در شیب های بینابینی (از ۱۵ تا ۱۸ درصد) دارای بیش برآورد، ولی در شیب های پایین و به ویژه بالا دارای برآورد مناسب است. مدل AUSLE در تمام شیب های مورد مطالعه دارای برآورد کمتر عامل تندى شیب بود.

USLE و نسخه های اصلاح شده آن بر عامل تندى شیب مشاهده ای نشان داد که این نسبت برای مدل های USLE و USLE-MM بیش از یک بود، در حالی که نسبت مذکور برای مدل های AUSLE، RUSLE، کمتر از یک است. این موضوع نشان دهنده این است که مدل های USLE و USLE-MM دارای بیش برآورد، اما مدل های RUSLE و AUSLE دارای کم برآورد در برآورد عامل تندى شیب می باشند. در این پژوهش مقدار عامل تندى شیب برآوردی در مدل های USLE و USLE-MM، به ترتیب ۴ و ۱۵ درصد بیش تر از عامل تندى شیب مشاهده ای بود، در حالی که در مدل های RUSLE و AUSLE مقدار عامل تندى شیب برآوردی به ترتیب ۱۰ و ۱۳ درصد کمتر از عامل تندى شیب مشاهده ای بود. ارزیابی مدل ها با استفاده از روش متقابل نشان داد که مدل USLE بهترین برآورد و مدل USLE-MM نامناسب ترین برآورد را برای عامل تندى شیب داشتند (شکل ۲). در مدل های اصلاح شده



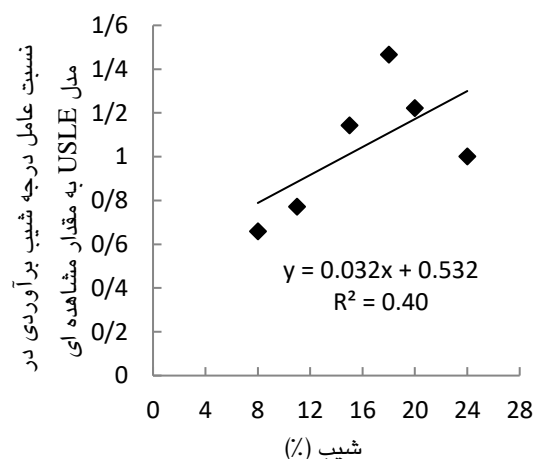


شکل ۲- عامل تندى شیب برآوردی در مقابل مقدار مشاهده‌ای در کشت‌زارهای دیم منطقه نیمه‌خشک.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که درصد شیب دامنه، عامل مهم تغییرات هدررفت خاک در کشت‌زارهای دیم منطقه بود و تغییر در شیب دامنه‌ها، با تغییر ویژگی‌های خاک از نظر فراوانی ذرات معدنی خاک (شن، سیلت، رس و سنگریزه) همراه می‌باشد. خاک دامنه‌های با شیب بالا، از مقدار شن و سنگریزه کمتر اما از مقدار سیلت زیاد برخوردار هستند. رس برخلاف ذرات شن، سیلت و سنگریزه تحت تأثیر شیب دامنه نبوده، به‌عنوان عامل مستقل از شیب در هدررفت خاک مؤثر است. عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) برآورد شده با مدل USLE تغییرات زیادی بین دامنه‌ها نداشت، به‌عنوان عامل مؤثر در هدررفت خاک دامنه‌ها نبود. این موضوع ناکارآمدی این مدل در ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک در کشت‌زارهای دیم منطقه است. ارزیابی مدل USLE و نسخه‌های اصلاحی آن (RUSLE، USLE-MM و AUSLE) از نظر برآورد عامل تندى شیب (S) نشان داد که میزان خطا در مدل‌ها از ۴ درصد در مدل USLE تا ۱۵ درصد در مدل RUSLE تغییر می‌کند. مدل USLE مناسب‌ترین مدل بین مدل‌های از نظر برآورد عامل تندى شیب بود. با این وجود، این مدل در شیب‌های پایین (کمتر از ۱۱ درصد) کم برآورد و در شیب‌های بینابین (۱۵ تا ۱۸ درصد) دارای بیش‌برآورد دارد. به‌طور کلی این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌های RUSLE،

با توجه به شکل ۳ از شیب ۴ تا ۱۸ درصد نسبت عامل تندى شیب برآوردی به مشاهده‌ای در مدل USLE افزایش یافت. در واقع با افزایش شیب تفاوت بین مقادیر برآوردی عامل تندى شیب و مقادیر مشاهده‌ای آن بیش‌تر می‌شود. هر چه شیب تندتر باشد برآورد عامل تندى شیب در مدل USLE بیش‌تر می‌گردد؛ به‌طوری که در شیب ۱۸ درصد مقدار عامل شیب برآوردی ۱/۵ برابر مقدار مشاهده‌ای است ولی در شیب ۲۴ درصد که نسبت عامل تندى شیب برآوردی به مشاهده‌ای یک است، این مدل برآورد مناسبی دارد.



شکل ۳- رابطه بین نسبت عامل تندى شیب برآوردی به مشاهده‌ای در کشت‌زارهای دیم منطقه.

برآورد نقش تندی شیب در کشتزارهای دیم مشابه با منطقه مطالعاتی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

USLE-MM و AUSLE دچار خطای زیادی در برآورد عامل تندی شیب (S) در کشتزارهای دیم منطقه نیمه-خشک مورد بررسی هستند. مدل USLE، به‌خوبی برای

منابع مورد استفاده

- Akbarimehr M, Jalilvand H, 2013. Considering the relationship of slope and soil loss on skid trails in the north of Iran (a case study). *Journal of Forest Science* 59: 339-344.
- Agharazi H, 2005. Measurement and estimation of soil loss using the Universal Soil Loss Equation in rainfed lands. Pp. 473-475. Third National Conference on Erosion and Sedimentation, Tehran. (In Persian)
- Anonymous, 1972. Sediment Sources, Yields and Delivery Ratios, National Engineering Handbook, USDA, Section 3 Sedimentation.
- Bagarello V, Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V. 2017. Predicting maximum annual values of event soil loss by USLE-type models. *Catena* 155: 10-19.
- Bagarello V, Ferro V, 2010. Analysis of soil loss data from plots of different length for the Sparacia experimental area, Sicily, Italy. *Biosystems Engineering* 105: 411-422.
- Battany MC, Grismer ME, 2000. Rainfall Runoff and Erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological Processes* 14: 1289-1304.
- Blanco AC, Nadaoka K, 2006. A comparative assessment and estimation of potential soil erosion rates and patterns in Laguna lake watershed using three models: Towards development of an erosion index system for integrated watershed-lake management. Philippines, Symposium on Infrastructure.
- Chaplot VAM, Le Bissonnais Y, 2003. Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope. *Soil Science Society of America Journal* 67: 844-851.
- Cheng Q, Ma W, Cai Q. 2008. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: a case study in the hilly areas of the Loess Plateau, north China. *Geo Journal* 71(2-3): 117-125.
- Comino JR, Iserloh T, Lassu T, Cerdà A, Keestra SD, Prosdocimi M, Brings C, Marzen M, Ramos MC, Senciales JM, Sinoga JR, 2016. Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in Spanish and German vineyards. *Science of The Total Environment* 565: 1165-1174.
- Duiker S W, Flanagan DC, Lal R, 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. *Catena* 45: 103-121.
- Ekwu E I, Harrilal A, 2010. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils. *Biosystems Engineering* 105(1): 112-118.
- El Kateb H, Zhang H, Zhang P, Mosandl R, 2013. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China. *Catena* 105: 1-10.
- Gee GW, and Bauder JW. 1986. Particle-size analysis. Pp. 383-411. In: Klute A (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* (Ed. A. Klute). American Society for Agronomy/Soil Science Society of America: Madison, WI, Wisconsin.
- Kemper WD, Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution. Pp. 425-442. In: Klute A (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* 2nd ed., Agron. Monog. 9. ASA and SSSA, Madison, WI .
- Khalegh Panah N, Shorafa M, Asadi, H, Gorji M, Davari M, 2019. Comparison and evaluation of RUSLE and RUSLE2 models in soil loss estimation at rangeland hillslopes of Khamesan watershed, Kurdistan. *Water and Soil Science- University of Tabriz* 32 (2): 203-219. (In Persian)
- Kinnell PIA, 2017. A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas. *Science of the Total Environment* 596: 32-42.
- Kinnell PIA, Risse LM, 1998. USLE-M: empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal* 62: 1667-1672.

- Li XY, 2003. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China. *Catena* 52: 105-127.
- Liu BY, Nearing MA, Risse LM, 1994. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Transaction of American Society of Agriculture Engineers* 37 (6): 1835-1840.
- Lu J, Zheng F, Li G, Bian F and An J, 2016. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research* 161: 79-85.
- Maquaire O, Malet JP, Remaitre A, Locat J, Klotz S, Guillon J, 2003. Instability conditions of Marly hillslopes: towards landsliding or gullyng? The case of the Barcelonnette Basin, South East France. *Engineering Geology* 70: 109-130.
- McCool DK, Brown LC, Foster GR, Mutchler CK and Meyer LD, 1987. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Association Executives* 30(5): 1387-1396.
- McCool DK, George GO, Freckleton M, Douglas CL, Papendick RI, 1993. Topographic effect on erosion from cropland in the northwestern wheat region. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 36:1067-1071.
- Mohammadi M, Fallah M, Kaviani A, Gholami L, Omidvar E, 2017. The application of RUSLE model in spatial distribution determination of soil loss hazard. *Iranian Journal of Ecohydrology* 3(4): 645-658. (In Persian)
- Moore ID and Wilson JP, 1992. Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47(5): 423-428
- Musgrave GW, 1947. The quantitative evaluation of factors in water erosion, A first approximation. *Journal of Soil and Water Conservation* 2:133-138.
- Nearing MA, 1997. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. *Soil Science Society of America Journal* 61(3): 917-919.
- Nelson DW, Sommers L, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 539-579. In: Page AL, (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*,
- Nyssen J, Vermeersch D, 2010. Slope aspect affects geomorphic dynamics of coal mining spoil heaps in Belgium. *Geomorphology* 123(1-2): 109-121.
- Omuto CT, 2008. Assessment of soil physical degradation in Eastern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128: 199-211.
- Qian F, Cheng D, Ding W, Huang J and Liu J, 2016. Hydraulic characteristics and sediment generation on slope erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 64(3): 237-245.
- Raissan R and Charkhabi Ah, 2004. Investigating the effect of slope and land use on erosion and sediment in the Gregak basin. Pp. 114.. *Proceedings of the Conference on Watershed Management and Water and Soil Management*, May 8-9, Kerman.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA and Porter JP, 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46: 30-33.
- Rieke-Zapp DH, Nearing MA, 2005. Slope shape effects on erosion. *Soil Science Society of America Journal* 69:1463-1471.
- Sadeghi SHR, Pourghasemi HR, Mohamadi M, Agharazi H, 2009. Evaluation of accuracy and efficiency of USLE and some of its versions in estimation of storm-wise soil erosion and sediment yield. *Journal of Water and Soil Science* 12: 323-334. (In Persian)
- Sims JT, 1996. Lime Requirement Methods of Soil Analysis. Pp. 491-515. In: Sparks RL (ed.), *Chemical Methods*, Soil Science Society of America Book Series, Madison, Wisconsin, USA.
- Smets T, Poesen J, Fullen MA, Booth CA, 2007. Effectiveness of palm and simulated geotextiles in reducing run-off and inter-rill erosion on medium and steep slopes. *Soil Use and Management* 23: 306-316.
- Suhua F, Baoyuan L, Heping L, Li X, 2011. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena* 84: 29-34.
- Troeh FR, Hobbs JA, Donahue RL, 1991. Chapter Six: Predicting Soil Loss. *Soil and Water Conservation*, 2nd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

- Udom BE, Ano AO, Chukwu GO, 2009. Bulk density and water permeability of vertic epiaquults under intensive cattle grazing. Pp. 856-859. In: Proc. 43rd Annual Conference of Agricultural Society of Nigeria. Abuja.
- Vaezi AR, Sadeghi SHR., Bahrami HA, Mahdian MH, 2008. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology* 97(3): 414-423.
- Vaezi AR, Sadeghi SH, Bahrami HA, Mahdian M, 2010. Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology* 12: 241-252.
- Vahabi J, Nikkami D, 2008. Assessing dominant factors affecting soil erosion using a portable rainfall simulator. *International Journal of Sediment Research* 23: 375-385.
- Wang L, Yan M, Zhang Q, Zhikaun J, 2012. Effects of vegetation restoration on soil physical properties in the wind-water erosion region of the northern loess Plateau of China. *Soil, Air and Water* 40(1): 7-15.
- Wischmeier WH, Smith DD, 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*, US Department of Agriculture, Washington, DC.
- Zarea Khormizi M, Najafi Nejad A, Nora N, Kavian A, 2013. Effect of slope and soil characteristics on runoff and soil losses using rain simulator of Chehelchay watershed in Golestan province. *Journal of Soil and Water Protection Research* 9(2): 111 - 131.
- Zarrinabadi E, Vaezi AR, 2017. Runoff production and soil loss in poorly covered rangelands under the influence of land use change and plowing direction. *Iran Water and Soil Research* 74(1): 87 - 98.
- Zhang WH, Zhang XN, Gao ZD, 2009. Factor value determination and applicability evaluation of universal soil loss equation in granite gneiss region. *Water Science and Engineering* 2(2): 87-97.
- Zhang G H, Wang LL, Tang KM, Luo RT, Zhang XC, 2011. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes. *Journal of Hydrological Science* 56(7): 1289-1299.
- Zhao X, Huang J, Gao X, Wu P, Wang J, 2014. Runoff features of pasture and crop slopes at different rainfall intensities, antecedent moisture contents and gradients on the Chinese Loess Plateau: A solution of rainfall simulation experiments. *Catena* 119: 90-96.
- Zingg AW, 1940. Degree and length of land surface as it affects soil loss in runoff. *Agricultural Engineer* 21: 59-64.