

مقدمه

در بین عوامل اقلیمی، باران به عنوان مهم‌ترین عامل فرساینده خاک است [۱]. برآورد فرسایش ناشی از باران به منظور پیش‌بینی دقیق فرسایش خاک و بهبود عملیات حفاظت خاک و آب سودمند است [۱۸]. فرساینده‌های باران به عنوان نیروی محرک بسیاری از فرآیندهای فرسایش آبی، عامل مهم جداسازی ذرات خاک و تولید رواناب سطحی است [۱۲]. فرساینده‌های باران عبارت از توانایی قطرات باران در جدا کردن ذرات خاک و انتقال آن‌ها می‌باشد [۱۰] که به عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده فرآیندهای فرسایش خاک شناخته شده است [۱۱]. توانایی قطرات باران در تخریب خاک تابعی از انرژی جنبشی قطرات باران است [۱۰]. با افزایش شدت بارندگی از یک سو قطر قطرات باران بیشتر شده و از سوی دیگر تعداد قطرات برخورد یافته به سطح خاک افزایش می‌یابد. از این رو باران‌های با شدت بالا دارای انرژی جنبشی و فرساینده‌های بالایی می‌باشند. تاکنون شاخص‌های متعددی برای بیان فرساینده‌های باران ارائه شده است که در این میان شاخص‌های مبتنی بر انرژی جنبشی باران به دلیل انطباق با مفهوم فیزیکی باران اهمیتی بیش‌تر دارند. ویشمایر و اسمیت [۲۴] گزارش کردند که تلفات خاک در انواع مختلف فرسایش یعنی در اثر برخورد قطرات باران با زمین، فرسایش در اثر جریان آب روی زمین و فرسایش شیاری بستگی به شاخصی دارد که در آن انرژی جنبشی باران (E) و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران (I_{30}) در نظر گرفته شده باشد. در این مفهوم، انرژی جنبشی باران بر اساس رابطه‌ای لگاریتمی از شدت باران به دست آمده بود. هادسون (۱۹۷۱) شاخص $KE \geq 25$ برای آفریقای جنوبی [۶] و لال (۱۹۷۶) شاخص AI_m برای نیجریه [۹] را ارائه کردند.

در مطالعات بسیاری هم‌بستگی بالای بین شاخص‌های فرساینده‌های باران و رسوب تولیدی نشان داده شده است. نیکولو [۱۴] شاخص‌هایی همچون I_{30} و I_{60} که هم‌بستگی بالایی با مقادیر رواناب و رسوب داشتند، را برای اسپانیا معرفی کرد. شریفه مستوره و همکاران [۲۰] در مالزی نشان دادند که بعضی از شاخص‌های باران از قبیل EI_{30} و I_{60} رابطه خطی بسیار بالایی با فرسایش خاک نشان دادند. یانگ و همکاران [۲۶] در یونان بیان کردند که I_{60} بیش‌ترین هم‌بستگی را با هدررفت خاک داشت. اوسون و راموس [۲۳] نتیجه گرفتند که ترکیب انرژی جنبشی و حداکثر شدت ۵ دقیقه‌ای باران (KEI_5) مناسب‌ترین شاخص برای منطقه مدیترانه است. تحقیقات همتی و همکاران [۵] در اقلیم نیمه‌خشک در کرمانشاه نشان داد که شاخص

ارائه شاخص فرساینده‌های باران بر اساس
اندازه‌گیری‌های صحرایی هدررفت خاک
در کرت‌های کوچک در منطقه‌ی نیمه‌خشکعلی‌رضا واعظی^۱ و یونس رستمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۰۸

چکیده

فرساینده‌های باران بیانگر توان قطرات باران در فرسایش خاک است که انتظار می‌رود تغییرات آن مطابق با تغییرات ویژگی‌های باران به ویژه شدت و مدت بارندگی تغییر کند. این پژوهش به منظور بررسی اثرات شدت و مدت بارندگی در فرساینده‌های باران در منطقه‌ای نیمه‌خشک در شمال غرب زنجان، ایران انجام شد. هدررفت خاک در ۴۸ کرت به اندازه ۶۰ سانتی‌متر \times ۸۰ سانتی‌متر تحت باران‌های شبیه‌سازی شده با هشت شدت و شش تداوم بارندگی در پنج تکرار در دامنه‌ای شیب‌دار (۸ درصد) اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج از ۲۴۰ رخدادهای بارندگی، ۱۸۰ رخداد منجر به هدررفت خاک در کرت‌ها شدند. شدت ۱۵ میلی‌متر بر ساعت به عنوان آستانه وقوع فرسایش خاک در کرت‌ها بود. انرژی کل باران (E) به دست آمده بر اساس مجموع انرژی تمام قطرات باران هم‌بستگی بهتری با میزان هدررفت خاک در کرت‌ها داشت ($r=0.92$). هدررفت خاک هم‌بستگی بالایی با شاخص به دست آمده از حاصل‌ضرب حداکثر شدت ۷/۵ دقیقه‌ای باران ($EI_{7.5}$) و انرژی باران (E)، $EI_{7.5}$ داشت. حدود ۹۶ درصد هدررفت خاک در کرت‌ها با شاخص $EI_{7.5}$ تبیین شد. نتایج نشان داد که شاخص $EI_{7.5}$ در مقایسه با EI_{30} هدررفت خاک را در کرت‌های کوچک شبیه آنچه که معمولاً در فرسایش سطحی رخ می‌دهد، بهتر پیش‌بینی می‌نماید.

کلید واژه‌ها: $EI_{7.5}$ ، شدت بارندگی، فرساینده‌های باران، مدت بارندگی

۱- نویسنده مسئول و دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان، پست الکترونیکی: vaezi.alireza@gmail.com
۲- کارشناس ارشد گروه خاکشناسی دانشگاه زنجان

EI₆₀ بیشترین همبستگی را با مقادیر رسوب دارد. نیک‌کامی و همکاران [۱۵] در زنجان نشان دادند که شاخص مبتنی بر حداکثر شدت در پایه‌های زمانی ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه، بیشترین همبستگی را با رسوب در کرت‌ها دارد.

تعیین شاخص مناسب فرساینده‌گی باران در هر منطقه اقلیمی، قبل از اجرای طرح‌های حفاظت و کنترل فرسایش خاک امری ضروری است. استفاده از یک شاخص ویژه در همه جا از اعتبار کافی برخوردار نبوده و ضروری است تا با توجه به شرایط مختلف اقلیمی هر منطقه، بهترین شاخص فرساینده‌گی تعیین و به کار برده شود. در اغلب شاخص‌های فرساینده‌گی باران، انرژی جنبشی باران بر اساس رابطه تجربی ویشمایر و اسمیت به دست آمده است. از سوی دیگر در غالب شاخص‌ها، هدررفت خاک تابعی از حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران می‌باشد. به هر حال در مناطق نیمه‌خشک باران‌هایی قابل مشاهده می‌باشند که در ابعاد کرت‌ها فرسایش‌زا می‌باشند با این حال تداوم آن‌ها کم‌تر از ۳۰ دقیقه می‌باشد. از این رو ضروری است تا فرسایش‌زایی باران‌ها بر اساس شبیه‌سازی با باران‌های مناطق نیمه‌خشک مورد بررسی قرار گیرد. این مطالعه تلاشی برای دستیابی به شاخص فرساینده‌گی باران در شرایط باران‌های منطقه نیمه‌خشک است. در این راستا، این مطالعه بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرائی هدررفت خاک تحت کرت‌های فرسایش با استفاده از باران‌های شبیه‌سازی شده به منظور ارائه شاخص فرساینده‌گی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در دامنه‌ای در غرب زنجان واقع در "۵۲° ۰۱' ۳۶" عرض شمالی و "۴۴° ۲۵' ۴۸" طول شرقی در سال ۱۳۹۱ انجام گرفت. ابتدا ناهمواری‌های زمین به وسیله دستگاه پنجه‌غازی حذف و شیب آن یکنواخت شد. شیب دامنه ۸ درصد و جهت آن رو به شمال بود.

تعیین ویژگی‌های خاک

برای تعیین ویژگی‌های خاک از سه نقطه در قطر زمین مورد آزمایش، نمونه خاک برداشت شد. نمونه خاک پس از هواخشک شدن از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. فراوانی ذرات خاک به روش هیدرومتری [۳]، ماده آلی به روش سوزاندن تر [۱۳]، واکنش خاک در گل اشباع با استفاده از pH متر [۲]، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با استفاده از EC متر [۱۷]، درصد سدیم تبادل‌ی خاک به روش استات آمونیوم [۸]، کربنات کلسیم خاک به روش تیتراسیون با NaOH ۰/۵ نرمال [۴] و مقدار گچ به روش استون [۱۷] اندازه‌گیری شد. همچنین جرم مخصوص ظاهری خاک در نمونه‌های برداشت شده با استفاده از سیلندر فلزی (قطر ۴/۸۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) تعیین شد، پایداری خاکدانه‌ها به روش الک تر [۲۲] در خاکدانه‌های با قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر در ۱۰۰ گرم و به مدت ۲ دقیقه اندازه‌گیری شد و بر مبنای میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های

پایدار (میلی‌متر) محاسبه شد.

اعمال باران‌های شبیه‌سازی شده

برای انجام این پژوهش ۴۸ کرت فرسایشی با ابعاد ۶۰ سانتی‌متر × ۸۰ سانتی‌متر در امتداد زمین برای اعمال ۸ نوع شدت بارندگی و ۶ دوره‌ی تداوم بارندگی ایجاد شدند. برای مسدود کردن پیرامون کرت‌ها از ورق گالوانیزه به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. در انتهای هر کرت ظرف ۱۰ لیتری برای جمع‌آوری رواناب و رسوب قرار داده شد. کرت‌های فرسایشی تحت رخدادهای باران شبیه‌سازی شده با شدت‌های ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ میلی‌متر در ساعت و تداوم‌های ۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰، ۳۷/۵ و ۴۵ دقیقه قرار گرفتند. برای ایجاد شدت و تداوم‌های مختلف باران از دستگاه شبیه‌ساز باران استفاده شد. دستگاه شبیه‌ساز باران دارای صفحه بارش به ابعاد ۶۰ سانتی‌متر × ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۱۵ سانتی‌متر بود (شکل ۱). شدت بارندگی بر مبنای ارتفاع آب در بالای صفحه بارش قابل تنظیم بود. قطرات باران از طریق ۳۰۰ نازل به صورت آزاد بر سطح سقوط کرده و قطر قطره تولید شده به وسیله دستگاه ۲/۸ میلی‌متر بود. تعداد ۵ رخدادهای باران به فاصله ۷ روز از همدیگر بر روی کرت‌های فرسایشی اعمال گردید. مجموعاً ۲۴۰ رخدادهای باران بر کرت‌ها اعمال شد. شدت و تداوم‌های بارندگی بر اساس مشخصات باران‌های منطقه طراحی شدند. برای این منظور اطلاعات بارندگی از گراف‌های باران‌نگاری ثبت شده در ایستگاه قتلوق وابسته به سازمان آب منطقه‌ای استان زنجان برای دوره آماری ۱۰ سال (۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹) استخراج شد. بر این اساس شدت‌های منطقه در دامنه ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر در ساعت با فراوانی ۹۳ درصد (شکل ۲-الف) و تداوم‌های بارندگی در محدوده ۳ تا ۶۰ دقیقه با فراوانی ۷۵ درصد بودند (شکل ۲-ب).

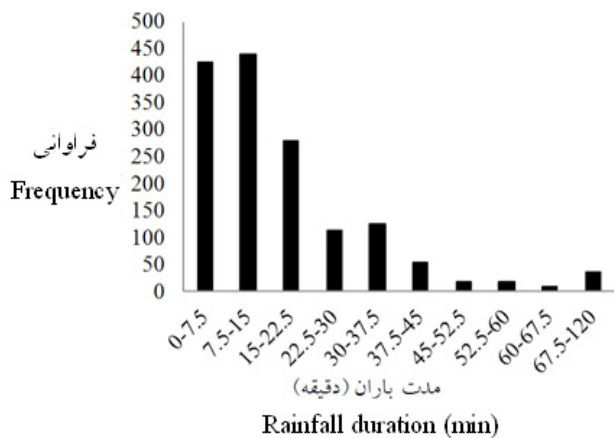
اندازه‌گیری هدررفت خاک در کرت‌ها

پس از هر رخدادهای بارش با استفاده از ظرف ۱۰ لیتری، مخلوط رواناب و رسوب خروجی از هر کرت جمع‌آوری و حجم کل آن اندازه‌گیری شد. سپس همزمان با هم‌زدن کامل مخلوط، نمونه کوچک یک لیتری از آن برداشت و برای تعیین میزان هدررفت خاک به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه مخلوط پس از عبور دادن از کاغذ صافی واتمن ۴۲، در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و توزین شد. بر مبنای غلظت رسوب در نمونه و حجم کل مخلوط، جرم خاک هدررفته در هر رخدادهای تعیین شد.

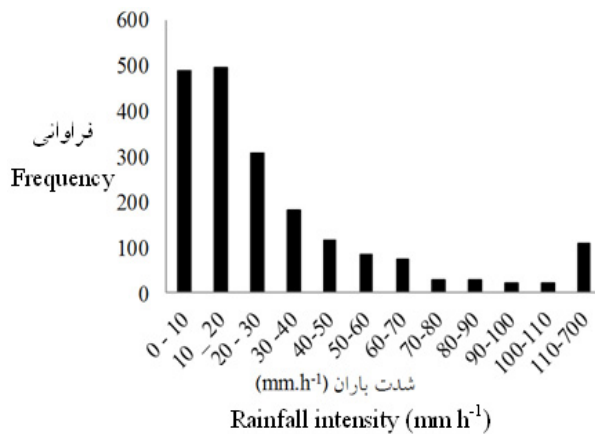
تعیین انرژی جنبشی باران‌های شبیه‌سازی شده

انرژی جنبشی کل باران حاصل مجموع انرژی جنبشی حاصل از برخورد مجموع قطرات باران به خاک است. با در دست داشتن توزیع اندازه قطرات باران (قطر قطره) و سرعت نهایی آن‌ها انرژی جنبشی هر یک از قطرات با استفاده از رابطه فیزیکی محاسبه [۱۹] گردید و با جمع کردن آن‌ها انرژی جنبشی باران تعیین شد:

$$E_p = \sum \frac{1}{2} M \cdot V^2 = \sum \frac{1}{12} \pi \rho D^3 V^2 \quad (1)$$



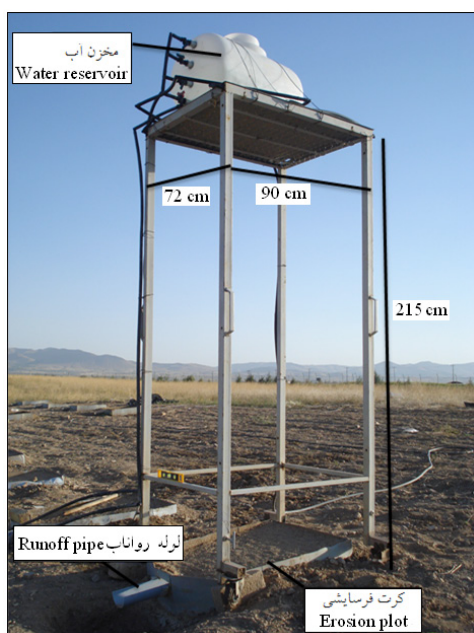
(ب)



(الف)

شکل ۲- هیستوگرام توزیع فراوانی شدت باران منطقه (الف) و تداوم بارندگی منطقه (ب)

Fig 2. Histogram of frequency distribution of rainfall intensity (a) and rainfall duration (b)



شکل ۱- نمایی از شبیه‌ساز باران و کرت فرسایشی

Fig 1. Rainfall simulator and erosion plot

- شاخص‌های مبتنی بر مقدار بارندگی (h)
 - شاخص‌های مبتنی بر مدت بارندگی (T)
 - شاخص‌های مبتنی بر شدت بارندگی (I)
 - شاخص‌های مبتنی بر انرژی جنبشی باران (E)
 - شاخص‌های مبتنی بر رشدت بارندگی و انرژی جنبشی باران
 - شاخص‌های مبتنی بر شدت و مدت بارندگی
- در شاخص‌های گروه اول و دوم، ارتفاع و مدت باران و حاصل‌ضرب آن‌ها محاسبه شد.
- در شاخص‌های گروه دوم، حداکثر شدت باران در پایه‌های زمانی مختلف (۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰، ۳۷/۵) و یا شدت متوسط باران ($I^{1.5}$) محاسبه شد.
- در شاخص‌های گروه سوم، مقدار انرژی جنبشی بر اساس روابط

که در آن: E_p انرژی جنبشی قطرات باران (J)، M جرم قطره باران (kg)، V سرعت نهایی قطره باران ($m s^{-1}$)، ρ چگالی آب (kg m^{-3}) و D قطر قطره باران (m) است [۲۱]. بر مبنای سطح کرت‌ها (60×80 cm)، انرژی جنبشی باران اعمال شده در واحد سطح ($J.m^{-2}$) تعیین شد.

انرژی جنبشی باران در سایر شاخص‌ها از روابط تجربی زیر محاسبه شد [۱۹]:

(۲) ویشمایر و اسمیت (۱۹۵۸)

$$KE = 210 + 89 \log I$$

(۳) هادسون (۱۹۶۵)

$$KE = 29.86(1 - 4.21 I^{-1})$$

(۴) زانچی و توری (۱۹۸۰)

$$KE = 9.81 + 11.25 \log I$$

(۵) کینل (۱۹۸۱)

$$KE = 29.31 I [1 - 0.281 \exp(-0.018 I)]$$

(۶) روزویل (۱۹۸۶)

$$KE = 29 [1 - 0.6 \exp(-0.04 I)]$$

(۷) براون و فوستر (۱۹۸۷)

$$KE = 29 I [1 - 0.72 \exp(-0.05 I)]$$

(۸) برنندت (۱۹۹۰)

$$KE = 8.95 (8.73 \log I)$$

(۹) وان‌دایک (۲۰۰۲)

$$KE = 28.3 [1 - 0.52 \exp(-0.42 I)]$$

که در آن‌ها: KE انرژی جنبشی باران در واحد عمق بارندگی (J $m^{-2} cm^{-1}$) و I شدت بارندگی ($mm h^{-1}$) است.

شاخص‌های فرسایشی باران

شاخص‌های فرسایشی باران در قالب چند گروه تفکیک و محاسبه شدند:

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1. Physicochemical soil properties

میانگین Mean	ویژگی خاک Soil property
60.81	شن (درصد) (%) Sand
8.19	شن بسیار ریز (درصد) (%) Very coarse sand
10.48	شن درشت (درصد) (%) Coarse sand
12.34	شن متوسط (درصد) (%) Medium sand
13.78	شن ریز (درصد) (%) Fine sand
15.92	شن بسیار ریز (درصد) (%) Very fine sand
23.14	سیلت (درصد) (%) Silt
16.05	رس (درصد) (%) Clay
14.20	رطوبت جرمی (درصد) (%) Mass moisture
1.27	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب) (g.cm ⁻³) Bulk density
1.42	پایداری خاکدانه (میلیمتر) Mean weight diameter of water-stable (mm) aggregates
0.84	ماده آلی (درصد) (%) Organic matter
12.63	کربنات کلسیم معادل (درصد) (%) Calcium carbonate equivalent
13.32	گچ (درصد) (%) Gypsum
8.20	واکنش pH
2.80	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمن بر متر) (dS.m ⁻¹) Electrical conductivity
6.17	درصد سدیم تبادلی Exchangeable sodium percentage

فرسایش خاک می‌باشد [۲۳]. با افزایش پایه‌ی زمانی حداکثر شدت بارندگی، ضریب هم‌بستگی روند کاهش نشان داد به طوری که در پایه زمانی ۳۷/۵ دقیقه ضریب هم‌بستگی تا ۰/۴۰ کاهش یافت. به کارگیری شاخص انرژی جنبشی باران (E_p) در کنار شاخص‌های حداکثر شدت بارندگی در پایه‌های زمانی مختلف (۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰ و ۳۷/۵ دقیقه) موجب شد هم‌بستگی شاخص‌ها با هدررفت خاک تقویت شود. بسیاری از تحقیقات پیشین [۱۴، ۲۵ و ۲۶] نیز موید آن است که انرژی جنبشی باران در کنار شدت بارندگی در پایه زمانی، مفهومی بهتر از فرسایش‌دگی باران را ارائه می‌دهد. در این میان شاخص $EI_{7.5}$ بالاترین هم‌بستگی را با هدررفت خاک داشت ($r=0/96$). بر خلاف نتایج تحقیق حاضر، در بسیاری از تحقیقات

تجربی ارائه شده (ویشمایر و اسمیت، هادسون، کینل، براون و فوستر، روزویل، زانچی و توری، وان دایک و برنلت) تعیین شدند. در شاخص‌های فرسایش‌دگی گروه چهارم، ترکیبی از انرژی جنبشی و حداکثر شدت باران در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه شد ($EI_{7.5}$ ، EI_{15} ، $EI_{22.5}$ ، EI_{30} ، $EI_{37.5}$). برای این منظور انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارندگی در بازه‌های زمانی ۷/۵ دقیقه ($I_{7.5}$)، ۱۵ دقیقه (I_{15})، ۲۲/۵ دقیقه ($I_{22.5}$) و ۳۰ دقیقه (I_{30}) ضرب شد. سپس هم‌بستگی شاخص‌های فرسایش‌دگی با رسوب خروجی کرت‌ها به دست آمد.

در شاخص‌های گروه پنجم که شامل شاخص اونچو (۱۹۸۵) (P/\sqrt{t})، شدت و مدت بارندگی محاسبه شد به طوری که در آن P به عنوان مقدار بارش بیش‌تر از ۹/۵ میلی‌متر و با شدت بیش‌تر از ۰/۱۸ میلی‌متر در دقیقه و t مدت زمان بارش [۱۶] تعیین گردید.

به منظور ارائه شاخص فرسایش‌دگی باران، هم‌بستگی بین شاخص‌های مختلف فرسایش‌دگی و هدررفت خاک در کرت‌ها به روش Pearson تعیین شد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک مورد بررسی

بر اساس نتایج تجزیه خاک (جدول ۱)، خاک مورد آزمایش دارای بافت لوم شنی بود. حدود ۳۹ درصد ذرات خاک، شامل ذرات فرسایش‌پذیر شن بسیار ریز و سیلت [۲۴] بود. مقدار ماده آلی خاک پایین بود (۰/۸۴ درصد) و خاکدانه‌ها پایداری اندکی در آب ($MVD=1.42mm$) داشتند. با توجه به مقدار گچ (۱۳/۳۲ درصد) و آهک (۱۲/۶۳ درصد)، خاک مورد آزمایش در گروه خاک‌های گچی- آهکی قرار داشت. با توجه به درجه شوری ($EC=2.8 dS/m$) و سدیمی ($ESP=17/6$)، خاک مورد بررسی در گروه خاک‌های غیر شور و غیر سدیمی قرار داشت.

بر اساس نتایج از ۲۴۰ رخدادهای باران اعمال شده بر روی کرت‌ها، ۱۸۴ رخداد منجر به تولید رواناب و هدررفت خاک شدند. بررسی هدررفت خاک در کرت‌ها نشان داد که باران‌های با شدت کم‌تر از ۱۵ میلی‌متر بر ساعت منجر به تولید رواناب و هدررفت خاک در کرت‌ها نشدند، لیکن با افزایش شدت بارندگی (بیش‌تر از ۱۵ میلی‌متر بر ساعت) در تداوم‌های پایین بارندگی نیز رواناب و هدررفت خاک مشاهده شد.

بررسی هم‌بستگی بین هدررفت خاک و شاخص‌های فیزیکی و تجربی مختلف (جدول ۲) نشان داد که شاخص‌های مبتنی بر مقدار حداکثر شدت باران در پایه‌های زمانی مختلف ($I_{7.5}$ ، I_{15} ، $I_{22.5}$ ، I_{30} و $I_{37.5}$) هم‌بستگی‌های نسبتاً بالایی با میزان هدررفت خاک داشتند. شاخص $I_{7.5}$ نسبت به سایر شاخص‌های مبتنی بر شدت بارندگی از هم‌بستگی بالاتری ($r=0/81$) برخوردار بود. این موضوع بیانگر اهمیت شدت‌های بارندگی در دوره‌های زمانی کوتاه مدت در

جدول ۲- همبستگی شاخص‌های فرساینده‌گی و هدررفت خاک در کرت‌ها
Table 2. Correlation between erosivity indices and soil loss in the plots

همبستگی (r) Correlation (r)	شاخص‌های تجربی فرساینده‌گی Empirical erosivity indices	ردیف No.	همبستگی (r) Correlation (r)	شاخص‌های فیزیکی فرساینده‌گی Physical erosivity indices	ردیف No.
0.29*	EI ₃₀ (Wischmeier and Smith)	17	0.81**	I	1
0.81**	KE _{Wischmeier and Smith}	18	0.48**	h	2
0.76**	KE _{Hudson}	19	0.51**	T	3
0.81**	KE _{Zanchi and Torri}	20	0.53**	h.T	4
0.80**	KE _{Kinnell}	21	0.78**	I ^{1.5}	5
0.79**	KE _{Rosewell}	22	0.81**	I _{7.5}	6
0.80**	KE _{Brown and Foster}	23	0.66**	I ₁₅	7
0.81**	KE _{Brandt}	24	0.78**	I _{22.5}	8
0.80**	KE _{Van Dijk}	25	0.69**	I ₃₀	9
0.91**	AI _{m Lal}	26	0.40**	I _{37.5}	10
0.88**	Onchev	27	0.92**	E _p	11
			0.96**	E _p I _{7.5}	12
			0.89**	E _p I ₁₅	13
			0.80**	E _p I _{22.5}	14
			0.69**	E _p I ₃₀	15
			0.38**	E _p I _{37.5}	16

Significant at 95% level *

Significant at 99% level **

منابع

- Bonilla, C.A. and Vidal, K.L. 2011. Rainfall erosivity in Central Chile. *Journal of Hydrology*. 410: 126–133.
- Carter, M.R. and Gregorich, E.G. 2008. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition. Canadian Society of Soil Science Publisher. ISBN, 10: 0-8493-3586-8.
- Gee, G.W. and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. In: *Methods of soil analysis*. Part1. 2nd ed. Klute, A. (Ed). Agron. Monoger. 9. AsA. Madison, WI., pp. 383-411.
- Goh, T.B., Arnaud, R.J.St. and Mermut, A.R. 1993. Aggregate stability to water. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 177–180.
- Hemmati, M., Ahmadi, H., Nikkami, D., Zehtabayan, Gh.R. and Jafari, M. 2008. The best indicator of cold rain erosion in semi-arid climates of Iran. *Engineering Sciences and Watershed Management Conference factual areas of watershed management*, March, Department of Natural Resources, Tehran University. 4: 277-290. (In Persion)

پیشین که در مناطق نیمه‌خشک انجام گرفته است، شدت بارندگی در پایه‌های زمانی ۳۰ دقیقه [۰، ۲۰ و ۲۵] و ۶۰ دقیقه [۵، ۱۵ و ۲۶] اساس ارائه شاخص فرساینده‌گی بودند، با این حال یافته‌های اوسن و راموس [۲۳] در اسپانیا نشان داد که هدررفت خاک وابسته به انرژی جنبشی و شدت باران در پایه زمانی ۵ دقیقه است (EI₅).

نتیجه‌گیری

بررسی هدررفت خاک تحت باران شبیه‌سازی شده در منطقه نیمه‌خشک نشان داد که شدت و مدت بارندگی مشخصه‌های مهمی از باران در هدررفت خاک بودند. در میان شاخص‌های مبتنی بر حداکثر شدت بارندگی در پایه‌های زمانی مختلف، شاخص I_{7.5} از همبستگی بالاتری با هدررفت خاک (r=۰/۸۱) برخوردار بود. این موضوع بیانگر اهمیت شدت‌های پایین بارندگی در هدررفت خاک در منطقه نیمه‌خشک می‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که رابطه‌ای معنی‌دار بین هدررفت خاک و انرژی جنبشی (E) با حداکثر شدت بارش در پایه‌های زمانی مختلف (۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۳۰، ۳۷/۵ و ۴۵) وجود داشت. شاخص EI_{7.5} بالاترین همبستگی را با هدررفت خاک داشت (r=۰/۹۶) و آن را می‌توان به عنوان شاخص فرساینده‌گی باران برای پیش‌بینی فرسایش خاک، شبیه آنچه که معمولاً در فرسایش سطحی (ورقه‌ای و بین شیبی) در مناطق نیمه‌خشک رخ می‌دهد، استفاده کرد.

19. Salles, C., Poesen, J. and Sempere-Torres, D. 2002. Kinetic energy of rain and its functional relation with intensity. *Journal of Hydrology*. 257: 256-270.
20. Sharifah Mastura, S.A, Al-Thom, S. and Jaafar, O. 2003. Rain splash erosion: a case study in Tekala River catchment, East Selangor. *Malaysian Journal of Society and Space*. 4: 44-59.
21. Torres, D.S., Salles, C., Creutin, J.D. and Delrieu, G. 1992. Quantification of soil detachment by raindrop impact: performance of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms. *International Association of Hydrological Sciences Publication*. 210: 115-124.
22. Udom, B.E., Ano, A.O. and Chukwu, G.O. 2009. Bulk density and water permeability of vertic epiaquils under intensive cattle grazing. In: *Proc. 43rd Annual Conference of Agricultural Society of Nigeria*. Abuja: 856-859.
23. Uson, A. and Ramos, M.C. 2001. An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate. *Catena*. 43: 293-305.
24. Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1958. Predicting rainfall erosion Losses from cropland East of the RockyMountains. *Agricultural Handbook 537*, Washington DC, 201p.
25. Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *USDA Handbook*. 537.
26. Yang, Z., Yang, L. and Zhang, B. 2010. Soil erosion and its basic characteristics at karst rocky-desertified land consolidation area: a case study at Muzhe Village of Xichou County in south east Yunnan. *Journal of Mountain Science*. 7: 55-72.
6. Hudson, N., 1971. *Soil Conservation*. Cornell University Press, Ithaca, 392p.
7. Khorsandi, N., Mahdian, M.H., Pazira, E., Nikkami, D. 2010. Comparison of rainfall erosivity indices in runoff –sediment plots in northern Iran. *World Applied Sciences Journal*. 10: 975-979.
8. Klute, A. 1986. *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods (2nd Eds.)*. Madison, Wisconsin, 87p.
9. Lal, R. 1976. Soil erosion on alfisols in Western Nigeria III–Effects of rainfall characteristics. *Geoderma*. 16: 389– 401.
10. Loureiro, N.S. and Couthino, M.A. 2001. A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal. *Journal of Hydrology*. 250: 12–18.
11. Mannarts, C.M. and Gabriels, D. 2000. Rainfall erosivity in Cape Verde. *Soil & Tillage Research*. 55: 207-212.
12. Moore, T.R. 1979. Rainfall erosivity in East Africa. *Geografiska Annaler*. 61: 147–156.
13. Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd ed.*, A.L. Page et al., Ed. Agronomy. Am. Soc. of Agron., Inc. Madison, WI., pp 961-1010.
14. Nicolau, J.M. 2002. Runoff generation and routing on artificial slopes in a Mediterranean continental environment: the Teruel Coal field, Spain. *Hydrological Processes*. 16: 631-647.
15. Nikkami, D., Razmjo, P. and Bayat Moahed, F. 2006. Introduction of a new index and rain erosion. *Water and Watershed Publishing*. 2: 52-62. (In Persian)
16. Onchev, N.G. 1985. Universal index for calculating rainfall erosivity. In: El-Swaify, S.A., Moldenhauer, W. C. and Lo, A. (eds), *Soil erosion and conservation*, Soil Conservation Society of America, Ankeny, IO., pp. 424–431.
17. Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. 1986. *Methods of soil analysis. Part 2. 2nded.* Agron. Monogr. 9. AsA and SSSA, Madison, WI., 1184p.
18. Renschler, C.S., Mannaerts, C. and Dieckkruger, B. 1999. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain. *Catena*. 34: 209-225.

*Abstract***Developing Rainfall Erosivity Index Based on Field Soil Loss Measurements at the Small Plots in a Semi-Arid Region**A.R. Vaezi¹ and Y. Rostami²

Received: 2013/06/30 Accepted: 2014/10/26

Rainfall erosivity is defined as the power of raindrops to erosion, which can be expected to change in correspondence to changes in rain characteristics, particularly intensity and duration. This study was conducted to assess the effects of intensity and duration on rainfall erosivity in a semi-arid region in North West of Zanjan, Iran. Soil loss was measured at forty eight plots (60 cm × 80 cm) under the simulated rainfalls with eight rainfall intensities and six durations at five replications in a sloped land (8%). Based on the results, out of 240 rainfall events, only 180 events caused soil loss at the plots. Rainfall intensity of 15 mm h⁻¹ was threshold intensity of the rainfalls from view point of soil erosion at the plots. Total rainfall energy of rainfall (E) obtained based on the sum of energies of all raindrops had a better correlation with the amount of soil loss at the plots ($r= 0.92$). Soil loss strongly correlated with an index obtained from the multiplication of maximum 7.5 minute intensity (I7.5) and rainfall energy (E), EI7.5. About 96 percentage of soil loss at the plots could be explained by EI7.5. The results indicated that, EI7.5 as compared to the EI30 can properly predict soil loss at the small plots similar to what usually happens in the surface erosion.

Keywords: *EI7.5, Rainfall erosivity, Rainfall intensity, Rainfall duration*

1. Associate Professor, Soil Science Department, Agriculture Faculty, University of Zanjan, Iran, Corresponding Author E-mail: vaezi.alireza@gmail.com.

2. M.Sc., Soil Science Department, Agriculture Faculty, University of Zanjan, Iran