

مقدمه

از آن جا که درک و جمع آوری اطلاعات مربوط به جنبه‌های مختلف فرآیند فرسایش خاک در پهنه‌های طبیعی به واسطه محدودیت‌های مالی و زمانی، شرایط سخت فیزیکی حاکم بر سامانه‌های حوزه‌های آبخیز و نیز وجود نوسانات غیرقابل پیش بینی اقلیمی از قبیل خشکسالی‌های دراز مدت میسر نمی‌باشد، شبیه سازی و مدل سازی‌های فیزیکی در شرایط تحت کنترل، یکی از بهترین گزینه‌های جایگزین به حساب می‌آید [۲۰]. در سال‌های اخیر به منظور رفع کمبودهای مربوط به هریک از شیوه‌های جداگانه پژوهش‌های صحرایی و آزمایشگاهی فرسایش و رسوب، توجه خاصی به تلفیق این پژوهش‌ها معطوف شده است. از این رو، آزمایش‌های صحرایی با استفاده از دستگاه‌های باران ساز مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. از نظر تئوری استفاده از این وسیله نه تنها موجب صرفه جویی در وقت و هزینه می‌شود، بلکه از این طریق می‌توان میزان روان آب و فرسایش را به همراه بیشتر فرایندهای مؤثر بر آن به طور کمی و در تکرار زیاد مورد ارزیابی قرارداد [۲۵]. در پژوهش‌های فرسایش خاک بر اساس مستندات موجود استفاده از باران سازها از سال ۱۹۳۱ آغاز شده و امروزه نیز بصورت گسترده استفاده می‌شوند [۹]. در شرایط صحرایی، شبیه سازی باران برای کمی سازی فرآیندهای روان آب و فرسایش کاربرد دارد [۲۵]. معیارهای مهم برای شبیه سازی باران شامل توزیع اندازه قطرات باران مشابه باران طبیعی، برخورد قطرات باران به سطح زمین با سرعت حد، زاویه برخورد عمودی قطرات باران با سطح خاک، شدت باران یکنواخت و توزیع تصادفی اندازه قطرات، بارندگی یکنواخت بر تمام سطح مورد آزمایش، قابلیت تولید مجدد الگوهای باران و قابلیت انتقال آسان سامانه شبیه ساز به صحرا می‌باشد [۶ و ۱۶].

امروزه استفاده از باران سازها به طور گسترده‌ای افزایش یافته و حتی از باران سازهای کوچک در سطح $0/0625$ متر مربع (25×25 سانتی متر) برای انجام پژوهش‌های مقایسه‌ای در شرایط صحرایی معمول شده است [۲۲]. از نمونه‌های باران سازهای بزرگ قابل حمل می‌توان به نمونه ساخته شده توسط استیوس و همکاران [۸] اشاره کرد. باران ساز مذکور برای انجام آزمایش در کرت‌های 10 در 5 متر و با هدف شبیه سازی رگبارهای مناطق حاره‌ای در صحرا طراحی شده و با فشار آب $4/18$ کیلو پاسکال قادر است قطر متوسط قطره $2/4$ میلی متر و شدت بارندگی ثابت 65 میلی متر

طراحی، ساخت و واسنجی شبیه ساز باران قابل حمل برای مطالعات صحرایی روان آب و فرسایش خاک

عبدالواحد خالدی درویشان^۱، وفا همایون فر^۲ و سیدحمیدرضا صادقی^۳
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۲۶

چکیده

در سال‌های اخیر آزمایش‌های صحرایی فرایند روان آب و فرسایش در مقیاس کرت و با استفاده از شبیه سازهای باران به دلیل دو مزیت شرایط خاک طبیعی و تحت کنترل بودن ویژگی‌های باران، مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند. لذا در پژوهش حاضر یک شبیه ساز باران قابل حمل در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس دارای یک پمپ آب، سه عدد نازل باران BEX: $W 8/3$ و سه پایه جهت رساندن نازل‌ها به ارتفاع مناسب برای نزول باران (حداکثر $4/5$ متر) طراحی و ساخته شد. به علت تحت فشار بودن سامانه، قطرات پس از خروج از نازل‌ها به صورت مخروطی کاملی از باران، قابلیت پوشش سطح 1×2 متر مربع را دارند. توزیع قطر و سرعت قطرات باران با استفاده از روش عکس برداری سرعت بالا و پردازش تصویر و یکنواختی باران با استفاده از ضریب کریستیانسن تعیین گردید. نتایج نشان داد در شدت‌های مختلف 30 ، 60 و 90 میلی متر در ساعت میانه قطر قطرات به ترتیب $1/07$ ، $1/00$ و $0/98$ میلی متر، میانگین قطر قطرات به ترتیب $1/14$ ، $1/05$ و $1/02$ میلی متر، سرعت متوسط قطرات به ترتیب $4/53$ ، $4/08$ و $4/00$ متر در ثانیه، انرژی جنبشی باران به ترتیب $10/26$ ، $8/32$ و $8/00$ ژول بر متر مربع در هر میلی متر از باران و ضریب یکنواختی به ترتیب 90 ، 87 و 91 درصد اندازه گیری شد.

کلید واژه‌ها: انرژی جنبشی باران، سرعت حد، شبیه ساز باران، قطر قطرات باران

- ۱- نویسنده مسئول و استادیار، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس پست الکترونیک: a.khaledi@modares.ac.ir
- ۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

BEX: 3/8 S24W بر روی محور قابل نصب می‌باشد. به علت تحت فشار بودن سامانه، قطرات توسط هر نازل به صورت مخروطی از باران با توزیعی از اندازه قطرات ریز تا درشت تولید می‌شوند. لذا قطرات دارای سرعت اولیه بوده و با زاویه‌ای که بستگی به میزان فشار آب دارد، از نازل به بیرون پرتاب می‌شوند. فواصل بین نازل‌ها تعیین کننده درصد هم پوشانی مخروط‌های نازل‌ها شده و در نتیجه نحوه نصب نازل‌ها به گونه‌ای طراحی شد که این فواصل برای تنظیم شدت بارندگی و الگوهای مختلف آن، قابل تغییر باشد [۱۴]. شکل ۱ نمایشی از شبیه ساز باران را نشان می‌دهد.

توزیع اندازه قطرات

برای تعیین قطر قطرات باران شبیه سازی شده در این پژوهش از روش عکس برداری از قطرات باران و سپس پردازش تصویر استفاده شده است [۷ و ۲۷]. که در مقایسه با روش‌های دیگر دقت و کارایی بالاتری دارد [۱] استفاده گردید. برای استفاده از این یک قاب با ابعاد 40×40 سانتی متر در راستای موازی با نزول قطرات باران قرار داده شده و سپس عکس برداری از قطرات باران [۲۳] پس از طی فاصله حداقل سه متر از نقطه خروج از نازل تحت فشار مربوطه و اطمینان از نزدیک شدن سرعت قطرات به سرعت حد^۱ توسط دوربین عکاسی Canon EOS 550D با سرعت شاتر^۲ $1/2500$ ثانیه انجام گرفت. از آنجایی که استفاده از سرعت بسیار زیاد شاتر به منظور امکان ثبت تصویر قطرات باران در حال سقوط نیازمند نور بسیار زیاد بود، به همین دلیل عکس برداری همراه با تابش نور بالا با استفاده از نورافکن انجام شد. از طرف دیگر به منظور کاهش تأثیر بزرگ نمایی قطرات نزدیک و کوچک نمایی قطرات دور و محدود کردن میدان عبور قطرات باران در عکس‌های برداشت شده، از دو صفحه چوبی به عنوان مانع در مقابل بارش قطرات باران استفاده شد به گونه‌ای که قطرات باران فقط در فاصله افقی 20 سانتی متر از قاب مرکزی اجازه عبور یافته و در فضای عکس قرار گرفتند. در شکل ۲ نمایشی از امکانات مورد نیاز برای عکس برداری از قطرات باران نشان داده شده است. سپس دوربین عکاسی در فاصله افقی حدود 60 سانتی متر و کاملاً عمود بر نقطه مرکزی قاب عکس برداری قرار گرفت. پس از تهیه عکس از قطرات باران در حال سقوط و برقراری نسبت بین ابعاد واقعی و تصویردانه‌های^۳ عکس ها، قطر قطرات باران تعیین گردید. در گام اول با استفاده از پردازش چشمی تصاویر و در نظر گرفتن ارزش روشنایی هر تصویردانه در طیف خاکستری، یک ارزش آستانه برای تفکیک قطرات باران از رنگ زمینه استفاده شد. سپس به منظور اندازه‌گیری دقیق قطر قطرات بر مبنای تعداد تصویردانه‌های آن، تصاویر به محیط نرم‌افزار Digimizer منتقل گردید. در این نرم‌افزار امکان اندازه‌گیری دقیق

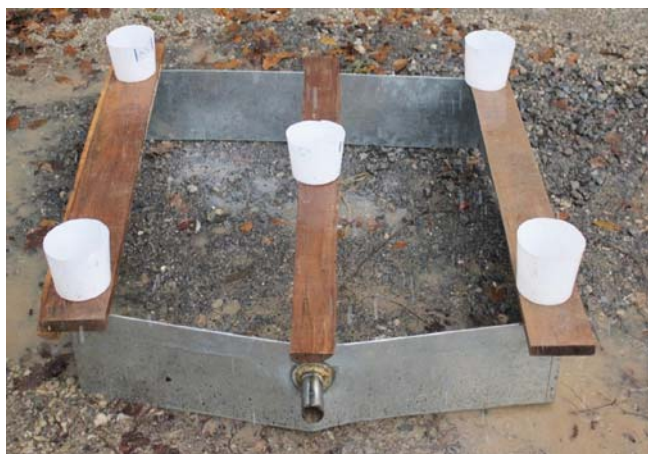
بر ساعت را با درصد توزیع یکنواخت بالاتر از 78 و انرژی جنبشی $23/5$ ژول بر متر مربع در هر میلی متر از باران شبیه سازی نماید. ابودی و همکاران (۲۰۱۲) به منظور مطالعه روان آب در شرایط صحرائی باران سازی طراحی کردند که قادر است میانه قطرات $1/5$ میلی متر و شدت‌های بارندگی کمتر از 130 میلی متر در ساعت را با توزیع یکنواخت 98 درصد و انرژی جنبشی برابر 76 درصد انرژی جنبشی باران طبیعی شبیه سازی کند [۲]. همچنین حامد و همکاران (۲۰۰۲) به ارزیابی عملکرد باران ساز کوچک طراحی شده توسط برنارد (۱۹۸۷) در شرایط طبیعی پرداخته و دقت نتایج حاصل از شبیه سازی را با رسوب اندازه گیری شده در یک مخزن واقع در انتهای حوزه آبخیزی به مساحت 158 هکتار در تونس ارزیابی نمودند [۱۰]. شبیه ساز مذکور دارای ارتفاع تقریباً 4 متر، یک نازل، دو منبع تأمین کننده آب و یک موتور می‌باشد که با فشار 55 کیلو پاسکال، توزیع مشابه با شرایط طبیعی و شدت بارندگی قابل تنظیم با سرعت چرخش نازل را شبیه سازی کرده و لذا عملکرد آن در شبیه سازی انرژی جنبشی باران طبیعی و رسوب رسیده به مخزن در زمان‌های مختلف متغیر و تا حد 96 درصد ارزیابی شد [۲۲]. سپاسخواه و بذرافشان [۲] نیز یک شبیه ساز باران کوچک مشابه طرح ارائه شده بوسیله مورین (۱۹۶۷) با ارتفاع $2/65$ متر، فشار آب 100 کیلو پاسکال، شدت بارندگی $95/6$ میلی متر بر ساعت و انرژی 697 ژول بر متر مربع در هر میلی متر را برای مطالعه اثر پلی‌آکرامید در کنترل روان آب و رسوب در کرت‌های فرسایش کوچک به ابعاد $1/4$ در $1/4$ متر استفاده کردند [۲۴]. اندازه قطرات باران ایجاد شده توسط باران ساز مایر و هامون [۱۵] و لوچ و فولی [۱۱] در دامنه یک تا حدود پنج میلی متر بوده که همانند باران طبیعی، دامنه وسیعی از قطرات با اندازه‌های متفاوتی را در بر می‌گیرد. هم چنین باران ساز پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری [۱۳] با شبیه سازی باران در شدت‌های مختلف، میانه قطراتی بین $1/64$ تا $2/15$ را دارا بوده است.

مواد و روش‌ها

بخش‌های مختلف شبیه ساز باران سامانه آبرسانی: سامانه آبرسانی شامل یک موتور پمپ بنزینی یک اینچ جهت تامین فشار برای ایجاد باران در نازل‌های تحت فشار، منبع آب برای تامین آب باران، لوله انتقال آب از منبع به موتور پمپ، لوله برگشتی از موتور پمپ به منبع برای تنظیم دقیق تر فشار و شدت بارندگی و لوله انتقال آب از موتور به نازل‌ها می‌باشد. سامانه تغییر ارتفاع: جهت رسیدن به ارتفاع مناسب نزول باران، سه پایه فلزی طراحی و ساخته شد که ارتفاع آن تا $4/5$ متر قابل تنظیم می‌باشد. تغییر ارتفاع نازل‌ها به دلیل تغییر تراکم قطرات در واحد سطح یکی از روش‌های تغییر شدت بارندگی شبیه سازی شده می‌باشد [۳].

نازل‌ها: بسته به شدت بارندگی مورد نظر، 1 تا 3 عدد نازل

1. Terminal Velocity
2. Shutter
3. Pixels



شکل ۳- چیدمان جمع‌آوری‌کننده‌ها برای تعیین شدت و ضریب یکنواختی باران

Figure 3. Arrangement of collectors to determine the rainfall intensity and uniformity coefficient



شکل ۱- نمای از شبیه ساز باران

Figure 1. View of rainfall simulator

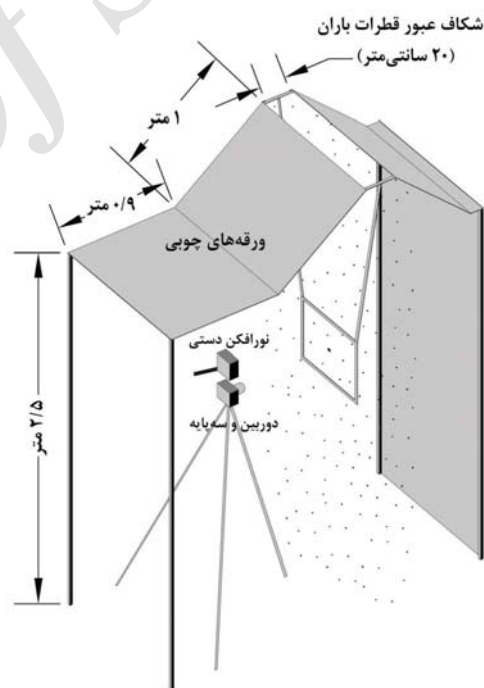
هر تعداد تصویردانه دارای دامنه‌ای از ارزش روشنایی مشخص و مجتمع در کنار یکدیگر، به صورت دستی و یا خودکار وجود دارد.

شدت و یکنواختی باران

همان طور که قبلاً گفته شد با تنظیم فشار آب، تغییر ارتفاع و یا تعداد نازل‌های فعال، شدت‌های مختلف بارندگی در دامنه ۳۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت قابل شبیه‌سازی است. در هر مورد، شدت باران با چیدن ۵ ظرف لبه تیز بر روی کرتی با ابعاد ۱×۱ متر مربع اندازه‌گیری شد. سپس برای ارزیابی یکنواختی باران از ضریب یکنواختی کریستیانسن استفاده گردید. محاسبه ضریب یکنواختی مکانی شدت باران در سطح کرت از ظروف استوانه‌ای لبه تیز با قطر دهانه ۱۰ سانتی‌متر (مساحت سطح مقطع ۱۳۳ سانتی‌متر مربع) در بازه زمانی یکسان و برای سه شدت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت استفاده شد.

بدین منظور در سطح یک متر مربعی کرت آزمایشی تعداد چهار ظرف استوانه‌ای در چهار گوشه و یک ظرف استوانه‌ای در مرکز کرت (محل تلاقی اقطار مربع) قرار داده شد. نحوه قرارگیری ظرف‌های اندازه‌گیری مقدار یا شدت بارندگی در شکل ۳ نشان داده شده است. سپس ضریب یکنواختی با استفاده از معادله ارائه شده توسط کریستیانسن (۱۹۴۲) که برای هدف فعلی مورد تایید سایر پژوهش‌گران [۴، ۱۸، ۱۹] و [۲۱] می‌باشد محاسبه گردید. ضریب یکنواختی کریستیانسن با استفاده از شدت اندازه‌گیری شده در هر ظرف (X_i)، شدت متوسط (M) و تعداد ظروف (n) به صورت رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$Cu = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |R_i - M|}{nM} \quad (1)$$



شکل ۲- نمایی از امکانات مورد نیاز برای عکس برداری از قطرات باران (اقتباس از خالدی درویشان [۱۱])

Figure 2. View of features required for imaging of raindrops (Adapted from Khaleidi Darvishan [11])

جدول ۱- میانه و متوسط اندازه قطرات باران در شدت‌های مختلف بارندگی شبیه سازی شده

Table 1. The median and mean raindrops diameter in various simulated rainfall intensities

متوسط قطر (میلی متر)	میانه قطر (میلی متر)	تعداد نازل فعال	متوسط شدت باران (میلی متر در ساعت)
Mean diameter (mm)	Median diameter (mm)	Numbers of active nozzles	Average rainfall intensity (mm h ⁻¹)
1.14	1.07	1	30
1.05	1.00	2	60
1.02	0.98	2	90

همان طور که در جدول دیده می‌شود میانه قطر قطرات باران شبیه سازی شده از ۰/۹۸ برای شدت ۹۰ میلی متر در ساعت تا ۱/۰۷ برای شدت ۳۰ میلی متر در ساعت متغیر است. از آن جای که محدوده باران طبیعی بین ۰/۱ تا ۵ میلی متر گزارش شده است [۱۵]، لذا اندازه قطرات ایجاد شده طی پژوهش فعلی با مقادیر گزارش شده در باران طبیعی تطابق قابل قبولی دارد. در شبیه سازی باران با استفاده از سامانه تحت فشار، بسته به شدت بارندگی (تابعی از فشار آب و تعداد و ارتفاع نازل)، اندازه‌های متفاوتی از قطرات قابل شبیه‌سازی است. در منابع مختلف بسته به نوع و اندازه نازل و نیز فشار آب اندازه‌های متفاوتی از قطرات شبیه سازی شده است.

شدت و یکنواختی باران

همان طور که گفته شد در باران ساز طراحی شده، با تنظیم فشار آب و هم چنین تغییر ارتفاع و تعداد نازل‌های فعال، شدت‌های مختلف بارندگی قابل شبیه سازی است. به این ترتیب باران ساز قابلیت شبیه‌سازی شدت‌های بارندگی در دامنه ۳۰ تا ۱۲۰ میلی متر در ساعت را دارد.

محاسبه ضریب یکنواختی باران با استفاده از ضریب کریستیانسن نشان داد که این ضریب به طور متوسط برای شدت‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر در ساعت به ترتیب ۹۰، ۸۷ و ۹۱ درصد است. اگرچه امروزه باران سازهایی طراحی و ساخته شده اند که ضرایب یکنواختی باران در سطح طرح در آن‌ها بسیار بالاست از جمله باران ساز ابدی و همکاران [۲] که در سطح دو متر مربع دارای ضریب یکنواختی ۹۸ درصد بوده است، اما ضریب یکنواختی بارندگی در باران ساز طراحی و ساخته شده در این پژوهش در حد باران سازهای استاندارد دیگر پژوهش گران است.

برای اندازه گیری سرعت قطرات باران نیز از روش عکس برداری با سرعت شاتر ۰/۰۲۵ ثانیه استفاده شد. از آنجایی که قطرات باران در عکس‌های برداشت شده با این دامنه از سرعت شاتر به صورت یک خط در راستای عمودی دیده می‌شدند بنابراین با کاوش تصاویر برداشت شده فاصله طی شده قطره در زمان عمل شاتر دوربین و در نتیجه سرعت قطره با دقت بالا اندازه گیری شد [۲۳]. برای افزایش دقت این روش، نمونه‌های زیادی در قطرهای مختلف قطره و هم چنین در شدت‌های مختلف باران مورد اندازه گیری قرار گرفته و در نهایت عدد متوسط سرعت قطرات باران در هر یک از شدت‌های مختلف محاسبه گردید. از طرف دیگر هر قطره با قطر بیش از دو میلی متر، با فرض کروی بودن قطرات باران، می‌بایست مسافت حداقل نه متر را با سقوط آزاد در هوای با فشار یک هکتوپاسکال و دمای ۲۰ درجه سانتی گراد طی کند تا به سرعت حد برسد [۲۸]. اما با داشتن شتاب اولیه در نازل‌های تحت فشار مسافت مورد نیاز برای رسیدن قطرات باران به سرعتی نزدیک به سرعت حد اندکی کاهش یافت. محاسبه انرژی جنبشی یک قطره باران در هر شدت بارندگی نیز با استفاده از قطر میانه و سرعت متوسط قطرات باران و از رابطه (۲) انجام گرفت.

$$e = \frac{1}{2} \times m \times V^2 \quad (2)$$

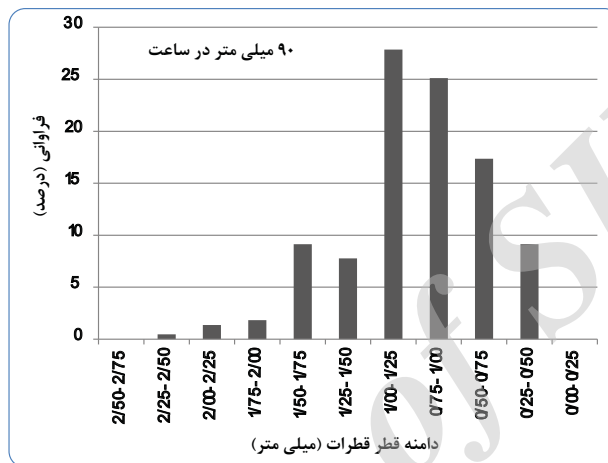
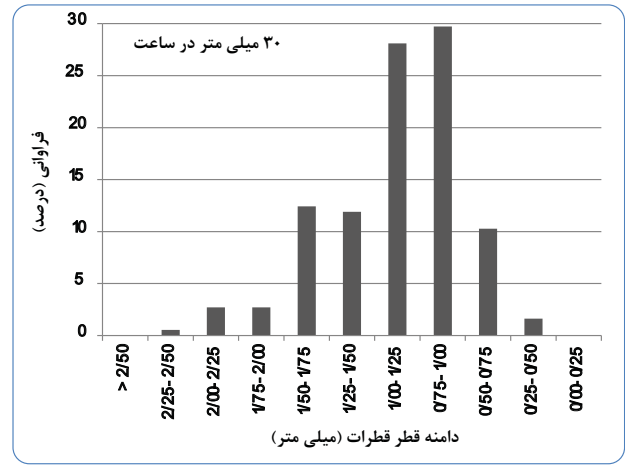
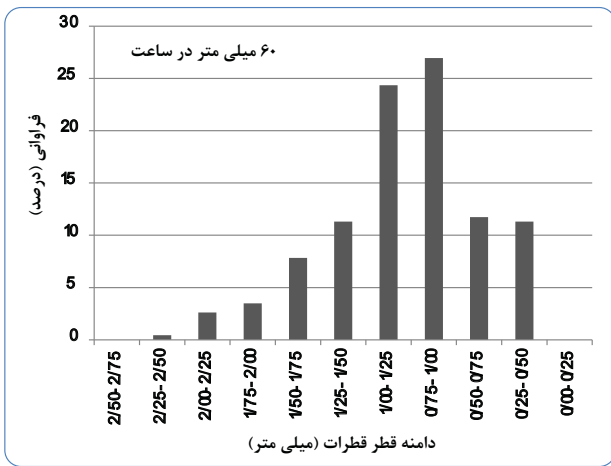
که در آن e انرژی جنبشی هر قطره از باران بر حسب ژول، m وزن قطره باران بر حسب کیلوگرم و V سرعت قطره بر حسب متر در ثانیه می‌باشد. سپس انرژی جنبشی یک میلی متر از باران شبیه سازی شده بر حسب ژول بر متر مربع با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$KE = 10 \times \frac{1}{5} \times \sum_{i=1}^n e_i \quad (3)$$

که در آن S و n به ترتیب سطح عکس برداری (۱۰۰۰ سانتی متر مربع) و تعداد قطرات دریافتی در مدت زمان طی شده برای بارش یک میلی متر (به عنوان مثال ۱۲۰ ثانیه در شدت بارندگی ۳۰ میلی متر در ساعت) می‌باشند. ضریب ۱۰، برای تبدیل انرژی جنبشی بر حسب ژول بر متر مربع اضافه شد. بازتاب نور در حاشیه عکس‌ها امکان ردیابی قطرات باران را با مشکل مواجه کرده و لذا حاشیه عکس‌ها به گونه‌ای حذف شد که دقیقاً سطح ۱۰۰۰ سانتی متر مربع برای هر عکس باقی بماند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های باران‌های قابل شبیه سازی توزیع اندازه قطرات نتایج توزیع اندازه قطرات برای شدت‌های مختلف باران در



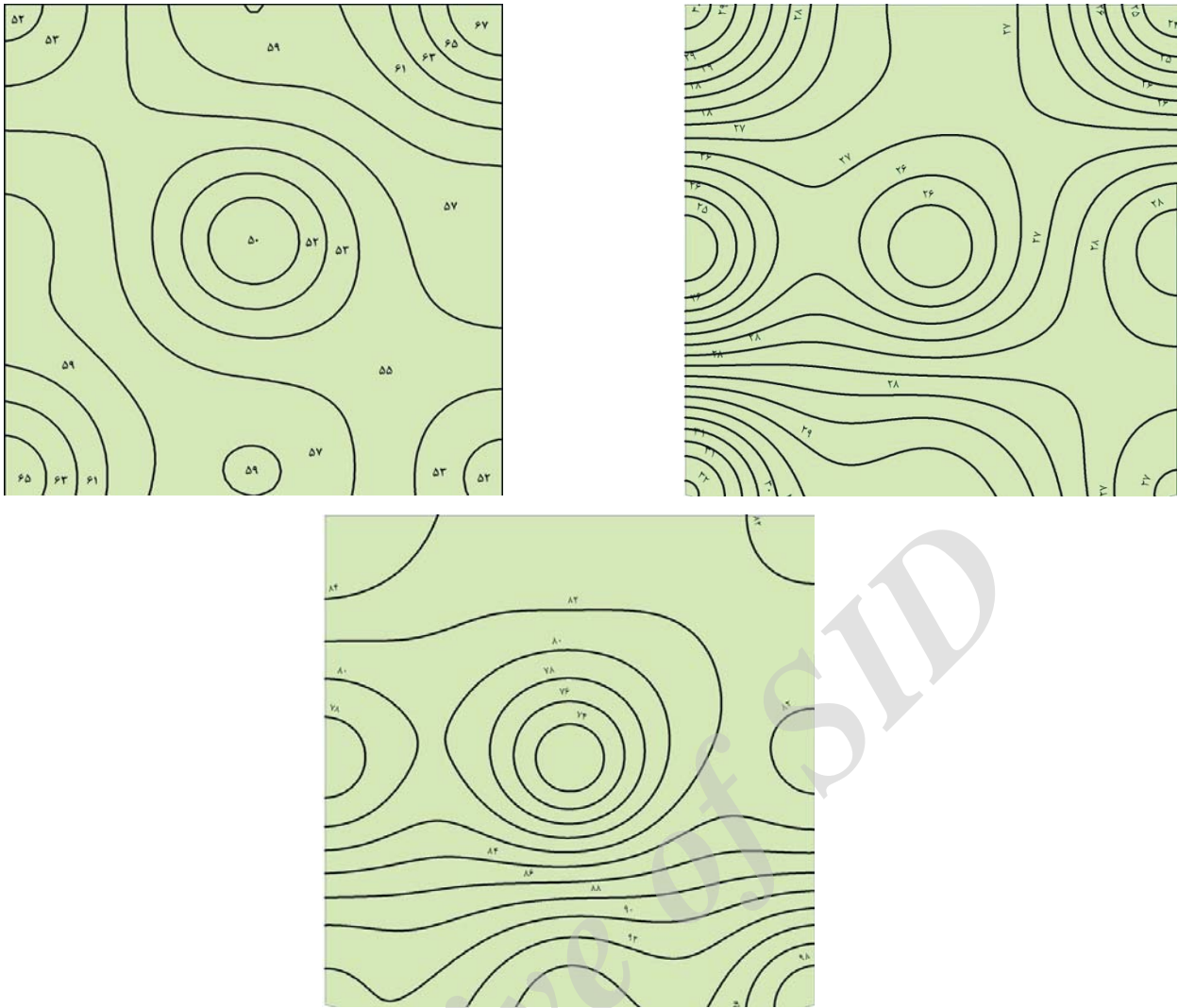
شکل ۴- توزیع اندازه قطرات باران برای شدت‌های بارندگی ۳۰ (a)، ۶۰ (b) و ۹۰ (c) میلی متر در ساعت
 Figure 4. Raindrop size distribution for the simulated rainfall intensity of 30 (a), 60 (b) and 90 (c) mm h⁻¹

شدت باران از راهکار افزایش فشار آب استفاده شده که خود موجب ریزتر شدن قطرات خروجی از نازل شده و لذا به دلیل کاهش قطر، سرعت سقوط نهایی قطرات نیز با افزایش شدت بارندگی، کمتر شده است. دلیل کاهش انرژی جنبشی در شدت‌های بارندگی بیشتر نیز کاهش قطر و کاهش سرعت سقوط قطرات بوده است. به عبارتی در یک ترکیب یکسان از چیدمان نازل‌ها با افزایش فشار آب، قطرات ریزتری تولید شده که سرعت سقوط و در نتیجه انرژی جنبشی کمتری نیز داشته اند.

سرعت و انرژی جنبشی باران ساز طراحی شده در مقایسه با دیگر باران سازهای طراحی شده قابل قبول است. باردواج و سینگ [۵] سرعت برخورد ۵/۷۱ متر بر ثانیه را برای قطره شبیه سازی شده با قطر ۵/۸۱ میلی متر گزارش کرده اند. ابودی و همکاران [۲] در شبیه‌ساز طراحی شده برای قطرات با قطر یک میلی متر سرعت ۳/۳ متر بر ثانیه گزارش کرده اند که اندکی کمتر از سرعت حد استاندارد گزارش شده توسط لاوس و پارسونس [۱۳] این قطر از قطره (حدود ۴ متر در ثانیه) می‌باشد.

در همین راستا می‌توان به باران‌ساز باتانی و گریسمر [۴] با ضریب یکنواختی ۹۱/۷ درصد و نیز باران ساز طراحی شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور [۱۴] با ضریب یکنواختی ۹۰ درصد بوده و بیشتر از ضریب یکنواختی گزارش شده توسط برخی دیگر از پژوهش گران از جمله ردی و همکاران [۲۱] با مقدار ۷۵ تا ۸۱ درصد می‌باشد. در شکل ۵ توزیع باران در سطح کرت یک متر مربعی با استفاده از درون یابی بین نقاط برای شدت‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر در ساعت ارائه شده است.

سرعت قطرات و انرژی جنبشی باران با توجه به نتایج جدول ۲، سرعت متوسط قطرات به ترتیب ۴/۵۳، ۴/۰۸ و ۴/۰۰ متر در ثانیه به ترتیب برای شدت‌های بارندگی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر در ثانیه متغیر است. میانه قطر قطرات باران نیز به ترتیب ۱/۱۴، ۱/۰۵ و ۱/۰۲ میلی متر برای شدت‌های بارندگی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر در ثانیه بوده که نشان می‌دهد قطر قطرات با افزایش شدت باران کاهش پیدا کرده است چرا که برای افزایش



شکل ۵- توزیع مکانی شدت باران در کرت یک متر مربع برای شدت‌های بارندگی ۳۰ (a)، ۶۰ (b) و ۹۰ (c) میلی متر در ساعت
 Figure 5. Spatial distribution of rainfall intensity on 1 m² plot for rainfall intensities of 30 (a), 60 (b) and 90 (c) mm h⁻¹

جدول ۲- متوسط سرعت قطره (متر بر ثانیه) و انرژی جنبشی باران شبیه‌سازی شده

Table 2. The mean raindrop velocity (m s⁻¹) and kinetic energy of simulated rainfall

متوسط شدت باران (میلی متر در ساعت)	متوسط قطر قطرات (میلی متر)	متوسط سرعت قطره (متر در ثانیه)	متوسط انرژی جنبشی باران (ژول بر متر مربع)
Mean rainfall intensity (mm h ⁻¹)	Mean raindrop diameter (mm)	Mean raindrop velocity (m s ⁻¹)	Mean kinetic energy per millimeter of rain (J m ⁻²)
30	1.14	4.53	10.26
60	1.05	4.08	8.32
90	1.02	4.00	8.00

simulator: design and field testing. *Earth Surface Processes and Landforms*. 25(7): 681-690.

9. Hadson, N. 1993. *Soil Conservation (Translating by Hossein Ghadiri)*. Shahid Chamran University Press. 470 p. (In Persian)

10. Hamed, Y. Albergal, J. Pepin, Y. Asseline, J. Nasri, S. Zante, P. Berndtsoon, R. Niazy, M. and Balah, M. 2002. Comparison between rainfall Simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion-sensitive semiarid catchment. *Catena*. 50(1): 1-16.

11. Khaledi Darvishan, A. 2013. Simulation of runoff generation and soil erosion processes in different antecedent soil moisture contents. PhD. Dissertation. Faculty Natural Resources. Tarbiat Modares University, 138 Pages. (In Persian)

12. Loch, R.J. Connolly, R.D. and Littleboy, M. 2000. Using rainfall simulation to guide planning and management of rehabilitated areas: Part II. Computer simulations using parameters from rainfall simulation. *Land Degradation and Development*. 11(3): 241-255.

13. Lows, J.O. and Parson, D.A. 1943. The relationship of raindrop size to intensity. *Transactions of the American Geophysics Union*. 24(2): 452-460.

14. Mahmoodabadi, M. and Arabkhedri, M. 2011. Rainfall and erosion simulation laboratory soil conservation and watershed management research institute: characteristics, capabilities and applications. *The Iranian Society of Irrigation and Water*. 1(3), 1-10. (In Persian)

15. Masayuki, M. Keenan, T.D. Sasaki, Y. and Nakamura, K. 2001. Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall lines observed in Drawin, Australia. *Journal of Applied Meteorology*. 40(1): 1393-1342.

16. Meyer, L.D. 1994. Rainfall simulators for soil conservation research. In: Lal, R., (ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. 83-103.

17. Meyer, L.D. and Harmon, W.C. 1979. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row side slopes. *Transactions of the ASAE*. 22(1): 100-103.

18. Munster, C.L. Taucer, P.I. Wilcox, B.P. Porter,

تقدیر و تشکر

هزینه‌های ساخت شبیه ساز باران از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس تأمین شده و لذا نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه و دانشکده منابع طبیعی اعلام می‌دارند.

منابع

1. Abdollahi, Z. Sadeghi, S.H.R. and Khaledi Darvishan, A. 2011. Estimation of rain drop size distribution using patch method. in: 1st national seminar on strategies towards sustainable agriculture, Khuzistan Province Payam-e-Noor University, Ahvaz, May 25 and 26, 2011, 5 p. (In Persian).

2. Abudi, I. Carmi, G. and Berliner. P. 2012. Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology*. 454-455: 76-81.

3. Arabkhedri, M. Mahmoodabadi, M. Rohipour, H. Heidarian, S.A. Lotfollahzadeh, D. Rahimzadeh, H. and Amiri, N. 2008. Final report of a research project to investigate the characteristics of precipitation and rainfall simulator calibration. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Ministry of Agriculture Jihad, Agricultural Research Education and Extension Organization. 73 pages. (In Persian).

4. Battany, M.C and Grismer, M.E. 2000. Development of a portable field rainfall simulator for use in hillside vineyard runoff and erosion studies. *Hydrological Processes*. 14(6): 1119-1129.

5. Bhardwaj, A. and Singh, R. 1992. Development of portable rainfall simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies. *Agricultural Water Management*. 22(3): 235-248.

6. Blanquies, J., Scharff M. and Hallock, B. 2003. The design and construction of a rainfall simulator. International Erosion Control Association (IECA), 34th annual conference and expo. Las Vegas, Nevada. February 24-28, 10 P.

7. Eigel, J.D. and Moore, I.D. 1983. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*. 26(1): 1079-1084.

8. Esteves, M. Planchon, O. Lapetite, J.M. Silvera, N. and Cadet, P. 2000. The EMIRE large rainfall

24. Sepaskhah, A.R. and Bazrafshan-Jahromi, A.R. 2006. Controlling runoff and erosion in sloping land with polyacrylamide under a rainfall simulator. *Biosystems Engineering*. 93(4): 469-474.
- Sheridan, G. Noske P. Lane P. and Sherwin C. 2008. Using rainfall simulation and site measurements to predict annual inter rill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. *Catena*. 73(1): 49-62.
25. Stroosnijder, L. 2005. Measurement of erosion: is it possible?. *Catena*. 64(2-3): 162-173.
26. Sudheer, K.P. and Panda, R.K. 2000. Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles. *Journal of Agricultural Water Management*. 45(2): 159-167.
27. Wang, P.K. and Pruppacher, H.R. 1977. Acceleration to terminal velocity of cloud and raindrops. *Journal of Applied Meteorology*. 16(3): 275-280.
- S.C. and Richards, C.E. 2006. An approach for simulating rainfall above the tree canopy at the hill slope scale. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 49(4): 915-924.
19. Navas, A. Alberto, F. Machin, J. and Galan, A. 1990. Design and operation of a rainfall simulator for field studies of rainfall and soil erosion. *Soil Technology*. 3(4): 385-397.
20. Parsons, A.J. and Lascells, B. 2000. Rainfall simulation in geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*. 25(7): 679-679.
21. Reddy, Ch. Satish Kumar, U. Mishara, P.K. and Kumathe, S.S. 2007. Hydrological response of surface configurations under simulated conditions using CRIDA rainfall simulator. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*. 20(2): 338-341.
22. Sadeghi, S.H.R. 2010. Study and measurement of water erosion. Tarbiat Modares University Press, 200 p. (In Persian)
23. Sadeghi, S.H.R. Abdollahi, Z. and Khaledi Darvishan, A.V. 2013. Experimental comparison of some techniques for estimating natural rain drop size distribution in Caspian Sea southern coast, Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 58(6): 1374-1382.

Abstract

Designing, Construction and Calibration of a Portable Rainfall Simulator for Field Runoff and soil Erosion Studies

A. Khaledi Darvishan^{1*}, V. Homayonfar² and S. H. Sadeghi³

Received: 2014/05/07 Accepted: 2016/06/15

The field experiments of runoff and erosion process at plot scale using rainfall simulators have been recently considered. The advantages of natural conditions, were soil and treatable characteristics of rainfall. A portable rainfall simulator was therefore designed and constructed in the Faculty of Natural Resources , Tarbiat Modares University, with a water pump, three nozzles of BEX: 3/8 S24W and a tripod to reach the nozzles to the suitable height of raindrop fall (max 4.5 m). As the full falling cone, the raindrops ejected from the nozzles at the height of 4.5 m could cover the whole area of 1×2 m²-plot at ground level uniformly, due to the pressure of the system. The raindrop's diameter distribution and velocity were calculated using high speed photography and image processing technique and the uniformity of rainfall on the plot area was then determined using Christiansen coefficient. The results of rainfall characteristics measurements showed that the median diameters of 1.07, 1.00 and 0.98 mm, mean diameters of 1.14, 1.05 and 1.02 mm, mean velocities of 4.53, 4.08 and 4.00 m s⁻¹, kinetic energies of 10.26, 8.32 and 8.00 J m⁻² mm⁻¹ and uniformity coefficient of 90, 87 and 91 % were calculated for rainfall intensities of 30, 60 and 90 mm h⁻¹, respectively.

Keywords: *Critical Velocity, Kinetic Energy of Rainfall, Raindrop Diameter, Rainfall Simulator.*

1. Assistant Professor, Department of Watershed Management Engineering, College of Natural Resources, Tarbiat Modares University. Noor, Iran. Corresponding Author, Email: a.khaledi@modares.ac.ir.

2. MSc Student, Department of Watershed Management Engineering, College of Natural Resources, Tarbiat Modares University. Noor, Iran..

3. Professor, Department of Watershed Management Engineering, College of Natural Resources, Tarbiat Modares University. Noor, Iran.