

طراحی و ساخت شبیه‌ساز باران قابل حمل

سهیلا آفایگی امین^{۱*}، محمود عرب‌خداری^۲

۱. استادیار، گروه منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲. دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۵/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۰/۱۴)

چکیده

شبیه‌سازی باران یکی از روش‌های مهم برای اندازه‌گیری فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایش خاک است. ارزیابی سریع و قابلیت تکرار زیاد از مزایای استفاده از شبیه‌ساز باران است. شبیه‌ساز ساخته‌شده به وزن تقریبی ۲۰ کیلوگرم قابلیت شبیه‌سازی باران با شدت‌های ۲/۸ تا ۹/۵ سانتی‌متر بر ساعت در سطح کرت آزمایشی با مساحت یک تا سه مترمربع را دارد. اندازه‌گیری قطر قطرات از روش‌های گلوله‌آردی و لکه‌رنگی به‌دست آمد. روش گلوله‌آردی به‌دلیل بیشتربودن ضریب تبیین انتخاب و نتایج آن بررسی شد. بیشترین ضریب یکنواختی (۹۶/۶ درصد) مربوط به شدت ۸/۳ سانتی‌متر بر ساعت و کمترین ضریب (۹۰/۶ درصد) مربوط به شدت ۹/۵ سانتی‌متر بر ساعت به‌دست آمد که بیشتر از حد قابل قبول است. دامنه قطر متوسط قطرات از ۰/۹۷ میلی‌متر در شدت ۲/۸ سانتی‌متر بر ساعت تا ۱/۲۲ میلی‌متر در ۷/۱ سانتی‌متر بر ساعت تغییر می‌کند که در محدوده باران‌های طبیعی قرار دارد. همچنین، دامنه تغییرات سرعت از ۳/۵۸ تا ۴/۲۱ متر بر ثانیه است. با توجه به مجموعه ویژگی‌های یادشده یک شبیه‌ساز باران قابل حمل بسیار مناسب با دقت قابل قبول برای مطالعات رواناب، نفوذپذیری، فرسایش و رسوب در صحرا ساخته شد.

کلیدواژه‌گان: روش گلوله‌آردی، سرعت و انرژی جنبشی باران، ضریب یکنواختی کریستیان‌سن، نازل.

مقدمه

اهمیت اندازه‌گیری فرسایش خاک به دلیل پیامدهای نامطلوب محیط زیستی و اقتصادی فراوانی که به‌همراه دارد روزبه‌روز بیشتر می‌شود. روش‌های تجربی زیادی برای تخمین فرسایش خاک وجود دارد، اما به‌دلیل عدم قطعیت پارامترهای ورودی آنها، برآورد فرسایش بر اساس این روش‌ها با خطاهای زیادی روبه‌روست [۱]. بنابراین، دقیق‌ترین روش، اندازه‌گیری مستقیم فرسایش خاک تحت شرایط بارندگی طبیعی است، اما جمع‌آوری داده در شرایط طبیعی به‌دلیل تغییرپذیری باران‌های طبیعی از نظر شدت و توزیع، زمان‌بر و پرهزینه است [۲]. بنابراین، بدون ساده‌سازی شرایط طبیعی، مطالعه رفتار خاک با پارامترهای متعدد و بی‌شمار آن مشکل و در بسیاری مواقع غیرممکن است. استفاده از شبیه‌ساز باران بسیاری از این محدودیت‌ها را رفع کرده [۳] و امکان مطالعه تحت شرایط کنترل‌شده در دوره زمانی کوتاه‌مدت را برای محققان فراهم آورده است [۴]. همگام با توسعه مدل‌سازی هیدرولوژیکی، از ۱۹۳۰ بسیاری از محققان انواع مختلفی از شبیه‌سازها را با هدف جمع‌آوری داده‌های فرسایش، رسوب، نفوذپذیری و رواناب سطحی طراحی کرده‌اند [۴ و ۵]. از آنجا که دو باران طبیعی کاملاً یکسان وجود ندارد، هیچ باران‌سازی نیز قادر نیست که همه ویژگی‌های باران‌های طبیعی را شبیه‌سازی کند. بر این اساس، همیشه هدف در ساخت باران‌سازها، بیشترین شباهت است. سرعت، کارایی و امکان تکرارپذیری در شدت‌ها، تداوم‌ها و مقادیر متفاوت باران از مزایای استفاده از شبیه‌ساز باران در مطالعات رواناب سطحی، فرسایش و رسوب است [۶]. شبیه‌سازهای باران از نظر امکان جابه‌جایی و محل استفاده به دو دسته شبیه‌سازهایی که در آزمایشگاه استفاده می‌شوند و شبیه‌سازهای قابل حمل که قابلیت جابه‌جایی و استفاده در عرصه را دارند، تقسیم می‌شوند. دو نمونه آزمایشگاه شبیه‌ساز باران در داخل کشور توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری [۳] و همچنین دانشگاه تربیت مدرس [۷] ساخته شده است. اهمیت تمایز و تفکیک فرایند تولید رواناب و رسوب به توسعه شبیه‌سازی باران در کرت‌های آزمایشی کوچک منجر شده است [۸]. به دلیل مزایای زیادی که شبیه‌سازهای کوچک دارند مانند هزینه کم، حمل‌ونقل راحت و مصرف کم آب، در بسیاری از مطالعات در سرتاسر جهان توسط محققان مختلف به کار گرفته شده‌اند. Floyd [۹] با ساخت یک شبیه‌ساز باران با

نازل v-jet، بارانی با شدت ۲/۷ سانتی‌متر بر ساعت در سطح کرت آزمایشی هفت متر در چهار متر را تولید کردند. باران شبیه‌سازی‌شده قطراتی با اندازه ۳/۵ میلی‌متر و سرعت ۵/۳۲ متر بر ثانیه داشت. برای تعیین قطر قطرات از روش گلوله آردی استفاده کردند. Poesen و همکارانش [۱۰] با ساخت یک نوع شبیه‌ساز باران و اعمال فشار ۶/۲ کیلو پاسکال قادر به تولید بارانی با شدت ۳/۶۴ سانتی‌متر بر ساعت شدند. ارتفاع صفحه بارش این دستگاه ۳/۲۵ متر بود. Navas و همکارانش [۴] باران‌هایی با شدت‌های ۴/۸ تا ۵/۸ سانتی‌متر بر ساعت و مدت ۱۵ دقیقه را با استفاده از یک شبیه‌ساز باران در سطح کرت آزمایشی ۱/۵۶ مترمربع شبیه‌سازی کردند. قطر قطرات از ۰/۲۵ تا ۵ میلی‌متر با استفاده از روش گلوله آردی به دست آمد. Singh و Bhardwaj [۱۱] باران‌هایی با شدت‌های ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر بر ساعت با قطر قطرات ۵/۸ تا ۵/۷ میلی‌متر و سرعت پنج متر بر ثانیه از ارتفاع ۱/۴ متر از سطح زمین شبیه‌سازی کرده و برای تعیین قطر قطرات نیز از روش گلوله آردی استفاده کردند. Creda و همکارانش [۱۲] بارانی با شدت ۵/۷۱ سانتی‌متر بر ساعت و قطر میانه قطرات ۲/۵۳ میلی‌متر، میانگین سرعت ۳/۴ متر بر ثانیه در سطح کرت آزمایشی ۰/۲۴ مترمربع را با استفاده از پمپ دستی یا مکانیکی شبیه‌سازی کردند. Victora و همکارانش [۱۳] با استفاده از شبیه‌ساز باران، شدت بارشی برابر با هفت سانتی‌متر بر ساعت از ارتفاع ۲/۴ متری تولید کردند. Veihe و همکارانش [۱۴] با ساخت یک دستگاه شبیه‌ساز باران در ارتفاع سه‌متری شدت بارانی برابر با ۱۳/۲ سانتی‌متر بر ساعت تولید کردند. Francisco و همکارانش [۵] دو دستگاه شبیه‌ساز با دو نوع نازل مخروطی و مسطح ساختند که هر دو نوع شبیه‌ساز قادر به ایجاد باران‌هایی با شدت‌های بین دو تا هشت سانتی‌متر بر ساعت با ضریب یکنواختی ۸۰ تا ۹۲ درصد در ارتفاع دومتری از سطح زمین بودند و قطر قطرات به‌دست‌آمده از روش گلوله آردی بین ۰/۵ تا ۲/۸ میلی‌متر بود. Iserloh و همکارانش [۸] با ساخت یک شبیه‌ساز باران، بارانی با سرعت بین ۳/۴ تا ۵ متر بر ثانیه و ضریب یکنواختی ۹۱ درصد شبیه‌سازی کردند. همچنین، Abudi و همکارانش [۱۵] با طراحی و ساخت یک شبیه‌ساز باران قابل حمل، باران‌هایی با شدت‌های چهار تا بیشتر از ۵ متر بر ثانیه از ارتفاع دو متر از سطح زمین ایجاد کردند که به‌ترتیب دارای قطر یک تا بیشتر از ۳/۵ میلی‌متر و سرعت ۳/۳ تا بیش از

موارد مشابه است که قابل حمل و ارزان بوده و توانایی اعمال بارندگی با مدت و شدت‌های متغیر از کم تا زیاد را داشته باشد.

مواد و روش‌ها

ساختار دستگاه شبیه‌ساز باران

شبیه‌ساز طراحی شده برای استفاده در عرصه و در مقیاس کرب آزمایشی است که از قسمت‌های مختلف تشکیل شده است:

نازل: از آنجا که از اصلی‌ترین قسمت‌های شبیه‌ساز باران، مولد قطره یا نازل است، نازل باید قادر به خیس کردن یکنواخت سطح مد نظر باشد و قطراتی با اندازه شبیه به قطرات باران طبیعی را تولید کند [۱۵]. در شبیه‌ساز ساخته شده بر اساس شدت بارندگی و سطح کرب آزمایشی، تعداد یک تا سه نازل، قابل نصب و استفاده‌اند. نازل‌ها از نوع BEX-3/8S24W هستند که روی یک میله با قابلیت تغییر بین فاصله‌ها نصب شده‌اند. میله حامل نازل‌ها روی یک چارچوب فلزی که تا ارتفاع سه‌متری قابل تنظیم است قرار گرفته است (شکل ۱). با استفاده از چارچوب موجود می‌توان در مواقع ضروری از پرده محافظ برای جلوگیری از تأثیر باد در شبیه‌سازی کمک گرفت.

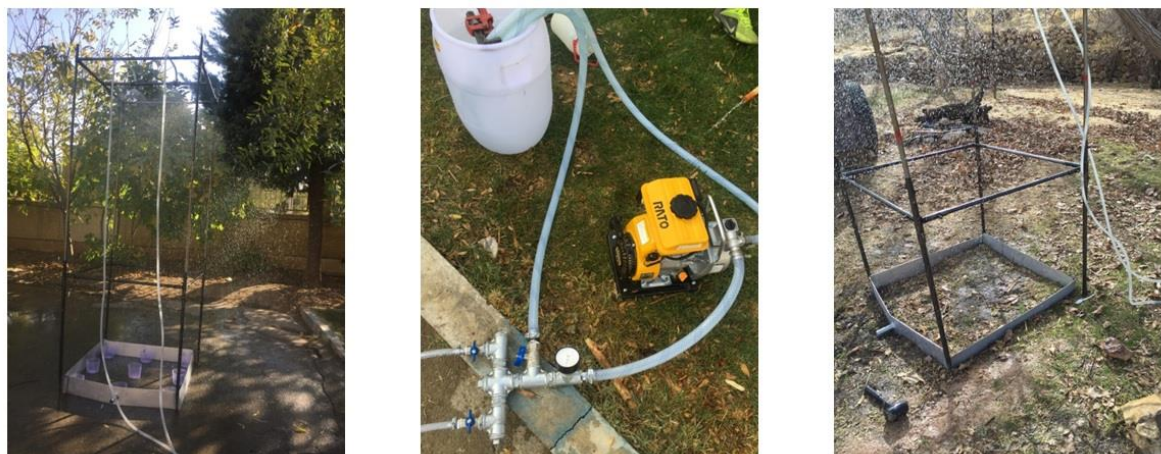
سیستم آب‌رسان: مجموعه‌ای از وسایل مختلف شامل منبع آب، موتور پمپ، شیرآلات، مقسم، سیستم برگشت آب و فشارسنج در آب‌رسانی به نازل‌ها و تولید و تنظیم باران شرکت دارند. برای راحتی در حمل، همه این اجزاء قابلیت جداسازی دارند (شکل ۱).

برای پمپاژ کردن و رساندن آب از منبع تا نازل، از موتور پمپ یک اینچی استفاده شد. نوع سوخت این موتور پمپ با توجه به محدودیت‌ها و عدم امکان تأمین برق در صحرا از نوع بنزینی انتخاب شد که مقدار مصرف بسیار کمی دارد. با توجه به اینکه مقدار آب پمپ‌شده توسط موتور بسیار بیشتر از دبی خروجی از نازل‌هاست، سامانه برگشت آب برای برگرداندن آب مازاد به داخل منبع طراحی شده است.

به‌منظور تقسیم و کنترل آب در هر نازل از مقسمی با یک ورودی و سه خروجی قابل کنترل استفاده شد. همچنین، برای اندازه‌گیری و کنترل فشار آب ورودی به نازل‌ها یک فشارسنج نصب شد. با استفاده از مقسم و فشارسنج می‌توان دبی ورودی به نازل‌ها را تنظیم کرد.

شش متر بر ثانیه بوده و میزان یکنواختی آنها در سطح کرب آزمایشی، ۹۲ تا ۹۸ درصد بود. Iserloh و همکارانش [۱۶] با مطالعه تعدادی از شبیه‌سازهای باران ساخته شده طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۳ در اروپا به مقایسه آنها پرداختند. مقیاس وسیعی از شدت باران (۳/۷ تا ۳۶ سانتی‌متر بر ساعت) توسط این شبیه‌سازها اندازه‌گیری و ویژگی‌های آنها به‌دست آمد. ضریب یکنواختی برای توزیع مکانی باران در سطح پلات از ۶۱ تا ۹۸ درصد، قطر قطره از ۰/۳۷۵ تا ۶/۵ میلی‌متر و انرژی جنبشی باران از ۲۵ تا ۱۳۲۲ ژول بر مترمربع بر ساعت در این شبیه‌سازها متغیر بود. Corona و همکارانش [۱۷] قادر به شبیه‌سازی باران‌هایی با شدت ۳/۱ تا ۶/۲ سانتی‌متر بر ساعت با قطر قطرات ۰/۲۵ تا ۳/۳ میلی‌متر و ضریب یکنواختی ۶۲ تا ۷۵ درصد شدند. Lora و همکارانش [۱۸] طراحی و ساخت یک شبیه‌ساز باران با هدف تولید بارندگی‌های شدید (۵ تا ۱۵ سانتی‌متر بر ساعت) با یکنواختی مکانی بیش از ۸۰ درصد را به‌طور موفقیت‌آمیزی انجام دادند. Al Ali و همکارانش [۱۹] یک شبیه‌ساز باران قابل حمل با توانایی ایجاد بارانی با شدت ۱۲ سانتی‌متر بر ساعت ساختند. این شبیه‌ساز قادر به تولید بارانی با ضریب یکنواختی ۷۳ درصد در سطح پلات یک مترمربع است. بیشترین تعداد قطرات در دامنه قطری ۰/۵ تا ۰/۷۵ میلی‌متر است که سرعتی کمتر از ۵ متر بر ثانیه دارند. خالدی درویشان و همکارانش [۲۰] یک شبیه‌ساز قابل حمل با کرب آزمایشی یک مترمربع با قابلیت شبیه‌سازی باران در شدت‌های سه، شش، نه سانتی‌متر بر ساعت با میانگین قطر قطرات ۱/۱۴، ۱/۰۵ و ۱/۰۲ میلی‌متر و ضریب یکنواختی به‌ترتیب ۸۷، ۹۰ و ۹۱ درصد طراحی کردند و ساختند.

با اینکه ساخت شبیه‌سازهای باران قابل حمل در دنیا قدمت زیادی دارد و موارد متعدد زیادی ساخته شده است، این امر در ایران جدید بوده و از نظر تنوع و تعداد نیز محدود است. علاوه بر این، بیشتر مطالعات فرسایش و رواناب با استفاده از شبیه‌سازها در آزمایشگاه و روی خاک‌های دست‌خورده در کرب آزمایشی انجام شده است. این در حالی است که در خاک‌های دست‌خورده، ساختمان، آرایش سله و روابط بارش رواناب به‌هم ریخته و شرایط آنها با صحرا کاملاً متفاوت است [۲۱، ۲۲ و ۱۵]. بنابراین، هدف از این مطالعه طراحی، ساخت و واسنجی شبیه‌ساز باران قابل حمل مناسب استفاده در صحرا و در جهت تکمیل و رفع مشکلات سایر



شکل ۱. شبیه‌ساز باران طراحی شده و آزمایش در عرصه (سمت راست)، اجزای سیستم آبرسان (وسط) و اندازه‌گیری یکنواختی توزیع مکانی باران در سطح پلات یک مترمربعی (سمت چپ)

شبیه‌سازی باران با شدت‌های مد نظر، مقدار باران جمع شده در ظروف با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. برای بررسی توزیع مکانی باران از ضریب یکنواختی کریستیان سن^۱ استفاده شد. این ضریب با استفاده از شدت اندازه‌گیری شده در هر ظرف و از رابطه^۱ [۱۷ و ۲۳] محاسبه شد.

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

که در آن R_i باران اندازه‌گیری شده در هر ظرف، n تعداد ظرف‌ها و M متوسط باران اندازه‌گیری شده در همه ظرف‌هاست.

توزیع اندازه قطر باران

روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری قطر قطرات باران وجود دارد، از جمله روش لکه رنگی^۲ [۲۴ و ۲۵]، گلوله آردی^۳ [۲۶، ۵، ۲۷ و ۳] استغراقی^۴، گشتاوری^۵، استفاده از رادار^۶ و فتوگرافیک^۷ [۲۸، ۲۹ و ۲۰]؛ که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارند. روش گلوله آردی روشی آسان و کم‌هزینه است که با وجود ابداع روش‌های جدید هنوز استفاده می‌شود. سایر روش‌ها مانند روش عکس‌برداری با اینکه برای اندازه‌گیری مستقیم اندازه و سرعت قطرات

چارچوب و کرت آزمایشی: یک چارچوب فلزی برای نگه‌داشتن میله حامل نازل‌ها و تنظیم آنها در فاصله‌ها و ارتفاع مختلف طراحی شده است که از میله‌های فلزی یک و دو متری تشکیل شده که قابلیت جداسازی دارند و تا ارتفاع سه‌متری قابل تنظیم هستند (شکل ۱). کرت آزمایشی استفاده شده یک مترمربعی است و عمق ۱۵ سانتی‌متری دارد که تا عمق ۱۰ سانتی‌متری قابلیت مستقر شدن در زمین را دارد. یک لوله خروجی در فاصله هفت سانتی‌متری برای جمع‌آوری رواناب و رسوب در سطح کرت آزمایشی در نظر گرفته شده است. با توجه به محدوده خیس شده توسط هر نازل سطح کرت آزمایشی قابلیت افزایش تا سه مترمربع را دارد، اما در این مرحله واسنجی فقط برای کرت آزمایشی یک مترمربعی صورت گرفت. شبیه‌ساز ساخته شده برای همه شیب‌ها (در صورت وجود چند سانتی‌متر خاک) قابل استفاده است. با توجه به چگونگی طراحی و وجود چارچوب، امکان تنظیم نازل‌ها و ایجاد بارش به صورت عمود بر هر شیبی وجود دارد.

واسنجی شبیه‌ساز باران

شدت و توزیع مکانی باران در سطح کرت آزمایشی

شدت‌های مختلف بارندگی با تغییر در فشار آب ورودی به نازل‌ها، تعداد نازل‌های فعال و تنظیم فاصله‌های بین آنها و نیز تغییر ارتفاع نازل‌ها از سطح زمین ایجاد شدند. برای بررسی یکنواختی شدت باران در سطح کرت آزمایشی از نه ظرف استوانه‌ای با قطر دهانه ۱۳ سانتی‌متر با آرایش سه در سه استفاده شد. به این‌منظور در هر بار اجرای

1. Christiansen Coefficient
2. Stain method
3. Flour pellet
4. Immersion method
5. Momentum method
6. Radar reflectivity
7. Photographic method

مختلف دامنه‌ای از قطرات با اندازه‌های مختلف تولید شد (شکل ۲). با استفاده از هر وسیله حدود ۵۰ قطره آب مقطر تولید و وزن شده و با استفاده از روابط حجم-جرم، حجم قطره و در نهایت قطر معادل کروی (با فرض کروی بودن) آنها محاسبه شد [۳۱]. سپس، با استفاده از روش لکه رنگی و گلوله آردی با داشتن قطر لکه‌های ایجادشده و وزن گلوله‌های آردی و قطرات متناظر آنها منحنی واسنجی قطر قطره برای هر دو روش به‌دست آمد. در نهایت، ظرف آرد و کاغذهای منتخب در روش لکه، برای مدت یک تا چهار ثانیه در معرض باران شبیه‌سازی قرار گرفت و اندازه قطرات از طریق منحنی واسنجی تعیین شد. برای همه شدت‌های منتخب، آزمایش اندازه‌گیری قطر قطره انجام شد.

سرعت و انرژی جنبشی باران

برای اندازه‌گیری سرعت نهایی قطرات از جدول Gunn و Kinzer [۳۲] استفاده شد. با توجه به این جدول و داشتن قطر میانگین قطرات در هر شدت سرعت قطرات اندازه‌گیری شد. با داشتن سرعت متوسط قطرات باران و قطر میانه قطرات و با استفاده از رابطه ۲ انرژی جنبشی قطرات و باران شبیه‌سازی شده در هر شدت مشخص، محاسبه شد.

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

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 بر ثانیه است.

استفاده می‌شود، اما پرهزینه است و علاوه بر آن بر اساس نتایج Sadeghi و همکارانش [۳۰] این روش نتایج تقریباً یکسانی با روش گلوله آردی ارائه می‌دهد، در عین حال که روشی ساده، کم‌هزینه و با دقت لازم است. در این مطالعه برای تعیین اندازه و توزیع قطرات با توجه به امکانات موجود و دقت مد نظر، از دو روش اندازه‌گیری قطر قطره شامل لکه رنگی و گلوله آردی استفاده شد.

در روش لکه رنگی از انواع مختلف کاغذ از جمله کاغذ صافی، کاغذ فابریانو، مقوای رنگی (نیم‌رو شطرنجی)، کاغذ A4، کاغذ پرینت Coated HP [۳] استفاده شود.

در روش گلوله آردی با چکاندن قطرات آب با جرم و اندازه مشخص با استفاده از قطره‌سازهای مختلف (شکل ۲ الف) به داخل سینی‌های حاوی لایه‌ای از آرد به ضخامت ۲۵ میلی‌متر واسنجی صورت گرفت. گلوله‌های آرد ابتدا در هوا خشک شده و سپس در آون در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. پس از خشک کردن نمونه‌ها، از سری الک‌های خاک‌شناسی برای تفکیک گلوله‌ها از نظر اندازه استفاده شد. سپس، با شمارش و توزین تعداد گلوله‌ها در هر طبقه قطری، وزن متوسط یک گلوله به‌دست آمد. این فرایند برای قطرات با اندازه‌های مختلف ولی معین تکرار و با انتقال به محور مختصات ابر نقاط^۱ آن تهیه می‌شود. سپس، معادلات مختلف بر آن برازش شده و از بین آنها بهترین رابطه بر اساس ضریب تبیین انتخاب می‌شود. برای این کار ابتدا با استفاده از وسایل مختلف مانند سرنگ، پیپت، پیست و بورت در اندازه‌های



شکل ۲. اندازه‌گیری قطر قطرات باران به ترتیب مراحل الف) قطره‌سازها؛ ب) گلوله آردی ایجادشده با قطره‌سازها؛ ج) ظروف آرد استفاده‌شده در باران شبیه‌سازی شده و د) تفکیک گلوله‌های آردی با استفاده از سری الک‌های خاک‌شناسی

نتایج و بحث

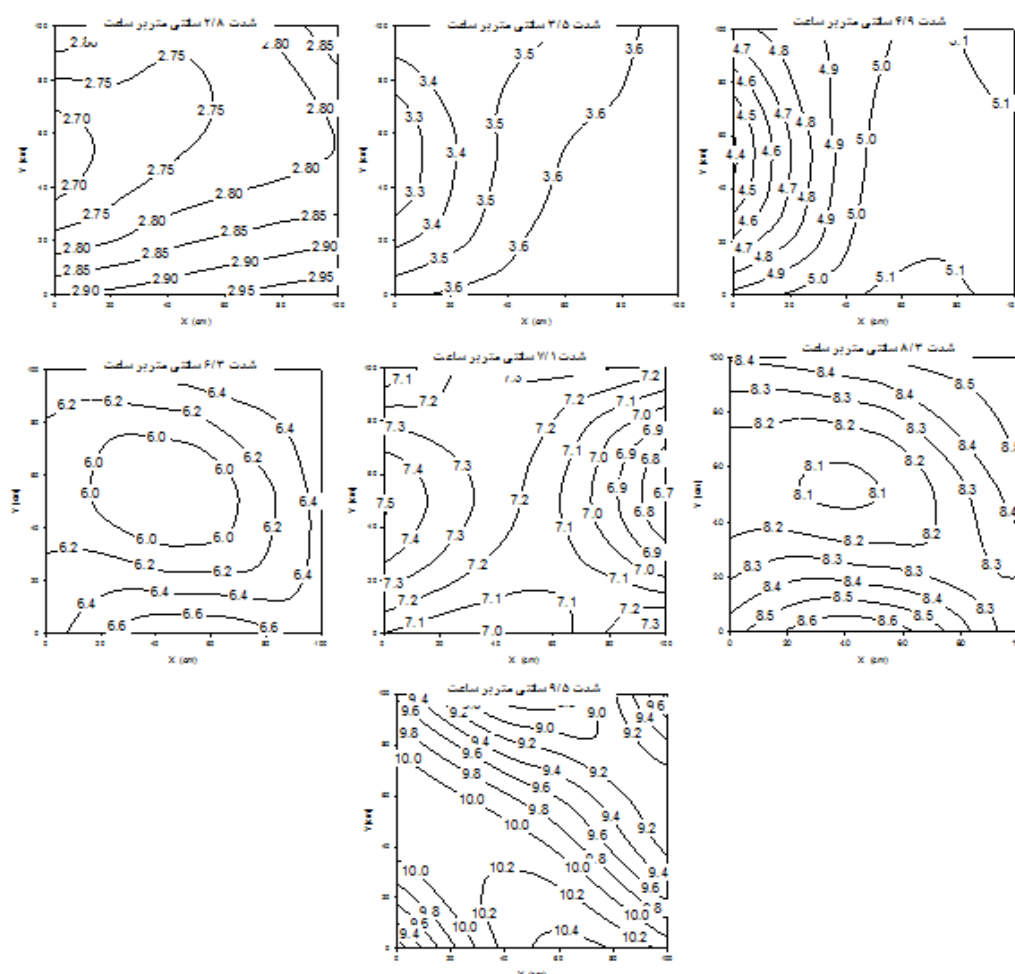
شدت و توزیع مکانی باران در سطح کرت آزمایشی

بر اساس معیارهای یکنواختی شدت، اندازه و سرعت قطرات و نیز با توجه به شدت‌های معمول در طبیعت که بین یک تا ۱۲ سانتی‌متر بر ساعت است [۳۱] و همچنین محدودیت‌های دستگاه، باران‌های از بین باران‌های مختلف شبیه‌سازی شده هفت باران با شدت‌های ۲/۸، ۳/۵، ۴/۹، ۶/۳، ۷/۱، ۸/۳ و ۹/۵ سانتی‌متر بر ساعت انتخاب شد.

یکنواختی شدت‌های به‌دست‌آمده با تغییر فشار آب، تعداد نازل‌های فعال و تغییر فاصله بین آنها و نیز تغییر ارتفاع نازل‌ها از سطح زمین قابل دستیابی‌اند. شدت‌های منتخب ضریب تغییرات کمتر (جدول ۱) و توزیع مکانی یکنواخت‌تر (شکل ۳) در سطح کرت آزمایشی داشته‌اند. شدت‌های بیشتر و کمتر از دامنه یادشده با استفاده از این نوع موتور و نازل قابل تولید نبوده و یا یکنواختی مکانی بسیار کم داشته‌اند.

جدول ۱. ویژگی‌های آماری شدت‌های باران شبیه‌سازی شده

۹/۵	۸/۳	۷/۱	۶/۳	۴/۹	۳/۵	۲/۸	شدت بارندگی (سانتی‌متر بر ساعت)
۲	۲	۲			۱		تعداد نازل‌های فعال
۹۰/۶۴	۹۶/۶۲	۹۵/۳۷	۹۴/۵۷	۹۳/۷۸	۹۴/۷۳	۹۴/۸۳	ضریب یکنواختی (درصد)
۱۰/۴۰	۸/۶۸	۷/۵۰	۶/۷۸	۵/۲۰	۳/۶۶	۲/۹۹	بیشتر شدت (سانتی‌متر بر ساعت)
۸/۶۳	۷/۰۹	۶/۶۹	۵/۸۳	۴/۳۸	۳/۲۱	۲/۶۷	کمترین شدت (سانتی‌متر بر ساعت)
۶/۲۴	۲/۳۴	۳/۳۷	۴/۱۸	۴/۹۵	۴/۰۱	۳/۵۴	ضریب تغییرات (درصد)



شکل ۳. توزیع شدت‌های باران شبیه‌سازی شده در سطح کرت آزمایشی یک مترمربع

۶/۵ درصد است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج پژوهش Isroel و همکارانش [۸] و خالدی‌درویش‌ان و همکارانش [۲۰] مشابه است.

توزیع اندازه قطرات باران

از بین روش‌های به‌کار گرفته‌شده در این مطالعه برای تعیین قطر قطرات باران، روش گلوله آردی و دو نوع کاغذ پرینت Coated HP و فابریانو بر اساس ضریب تبیین انتخاب شدند (جدول ۲). سایر کاغذهای استفاده شده دارای ضریب تبیین کمتر از ۰/۵ بوده و به همین دلیل حذف شدند.

روابط به‌دست‌آمده از بین انواع معادلات (خطی، لگاریتمی، سهمی و توانی) برآزش شده بر ابرنقاط بیشترین ضریب تبیین را داشته‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شکل معادلات به‌دست‌آمده برای هر سه روش معادله توانی است که با شکل غالب روابط ارائه‌شده در سایر مطالعات مطابقت دارد. سپس، با توجه به روش یادشده در بخش روش کار و رابطه ارائه‌شده در جدول ۲ اندازه قطرات به‌دست آمدند. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳ برای روش‌های منتخب آمده است.

اعداد کمترین و بیشترین جدول بیان‌کننده یکنواختی زیاد بارندگی در سطح پلات است، به‌گونه‌ای که در شدت‌های کم (۴/۹ سانتی‌متر بر ساعت) اختلاف کمترین و بیشترین از حدود پنج میلی‌متر تجاوز نکرده و در شدت‌های زیاد نیز به یک سانتی‌متر نرسیده است. علاوه بر این، ضریب تغییرات در همه شدت‌ها از حدود هفت درصد بیشتر نشده است که این امر نشان از یکنواختی زیاد بارندگی دارد. بیشترین ضریب یکنواختی مربوط به شدت ۸/۳ سانتی‌متر بر ساعت با بیش از ۹۶/۶ درصد و کمترین مربوط به شدت ۹/۵ سانتی‌متر بر ساعت با ۹۰/۶ درصد است. دامنه تغییرات شدت نیز در شدت ۲/۸ سانتی‌متر بر ساعت کمترین (۰/۳) و در شدت ۶/۳ میلی‌متر بر ساعت بیشترین (۰/۹) مقدار است. ضریب یکنواختی به‌دست‌آمده نسبت به یافته‌های Francisco و همکارانش [۵] و Crona و همکارانش [۱۷] بیشتر است.

نمودار توزیع شدت در سطح کرت آزمایشی نشان می‌دهد باران‌های ایجادشده در کناره‌های کرت آزمایشی شدت بیشتری نسبت به مرکز کرت آزمایشی دارند. با وجود تغییرات شدت در سطح کرت آزمایشی، هیچ‌یک از شدت‌های مد نظر ضریب یکنواختی کریستیان سن کمتر از ۹۰ درصد نداشته و واریانس آنها نیز بسیار پایین و کمتر از

جدول ۲. روابط به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف استفاده‌شده برای تعیین قطر قطرات باران

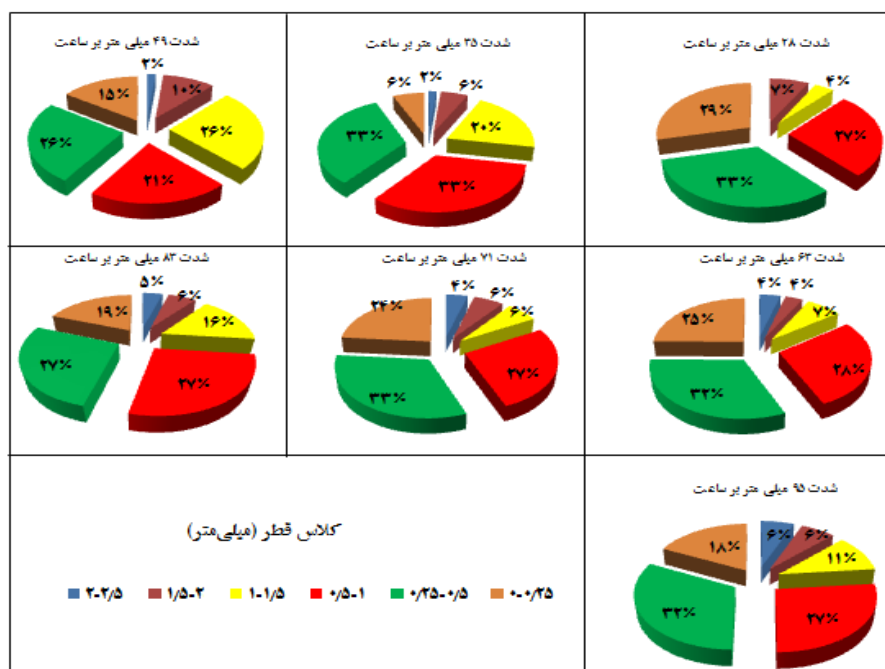
ضریب تبیین	رابطه	روش
۰/۹۷	$D = ۱۸ / ۱۱۷^{۰/۵۴۵}$	گلوله آردی
۰/۶۹	$D = ۰ / ۸۶۵d^{۰/۶۷۱}$	کاغذ پرینت Coated HP
۰/۷۱	$D = ۱ / ۱۲d^{۰/۵۵۴}$	کاغذ فابریانو

جدول ۳. قطر قطرات باران (میلی‌متر) در شدت‌های شبیه‌سازی شده به روش‌های مختلف

کاغذ پرینت		کاغذ فابریانو		گلوله آردی		شدت (سانتی‌متر بر ساعت)
میانگین	میانگین	میانگین	میانگین	میانگین	میانگین	
۰/۷۸	۰/۸۶	۱/۰۸	۱/۰۹	۰/۹۵	۰/۹۷	۲/۸
۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۲۲	۱/۲۲	۱/۱۰	۱/۱۱	۳/۵
۱/۱۱	۱/۱۳	۱/۳۹	۱/۳۲	۱/۰۸	۱/۱۴	۴/۹
۰/۹۸	۰/۹۸	۱/۲۷	۱/۲۱	۱/۰۷	۱/۱۳	۶/۳
۰/۹۳	۱/۰۰	۱/۲۴	۱/۱۸	۱/۱۴	۱/۲۲	۷/۱
۱/۱۷	۱/۰۷	۱/۰۵	۱/۱۶	۱/۱۳	۱/۲۱	۸/۳
۰/۹۲	۱/۰۲	۱/۲۱	۱/۲۳	۱/۱۰	۱/۱۹	۹/۵

است. تغییرات قطر در دو روش اخیر، الگوی خاصی را نشان نمی‌دهند. با توجه به اینکه رابطه به‌دست‌آمده از روش گلوله آردی ضریب تبیین بیشتری دارد نتایج آن مد نظر قرار گرفت. مطالعه Sadeghi و همکارانش [۳۰] در مازندران اندازه قطرات باران طبیعی را از ۰/۳ تا ۵/۱۶ میلی‌متر عنوان کردند، که بر اساس آن، نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر در این دامنه قرار گرفته و تأیید شده است. Creda [۱۲] در منطقه‌ای با آب و هوای مدیترانه‌ای در اسپانیا با مطالعه باران طبیعی دامنه قطر میانه قطرات از ۰/۲۵ میلی‌متر تا ۲/۶۹ میلی‌متر به‌ترتیب برای شدت ۰/۱ تا ۱۲ سانتی‌متر بر ساعت به دست آورد. همچنین، Abudi و همکارانش [۱۵] نیز میانگین قطر ۱/۵۰ میلی‌متر برای شدت ۱۲/۶ سانتی‌متر بر ساعت با استفاده از شبیه‌ساز باران را به‌دست آوردند که به نتایج مطالعه حاضر بسیار نزدیک است. علاوه بر این، نتایج به‌دست‌آمده توسط خالدی‌درویشان و همکارانش [۲۰] نیز مطابقت زیادی با نتایج تحقیق حاضر دارد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌ساز آزمایشگاهی ساخته‌شده توسط عرب‌خدری که برای شدت‌های ۳/۵ تا ۱۲/۵ سانتی‌متر بر ساعت قطراتی با قطر میانه ۱/۶۴ تا ۲/۱۵ میلی‌متر شبیه‌سازی شد با یافته‌های این تحقیق مطابقت ندارد. شکل ۴ درصد فراوانی وزنی باران شبیه‌سازی‌شده در شدت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

قطر اندازه‌گیری‌شده در روش‌های مختلف تفاوت زیادی را نشان نمی‌دهند اگرچه کاغذ فابریانو و گلوله آردی برآورد نزدیک‌تری داشته‌اند. دامنه میانگین قطرهای به‌دست‌آمده از ۰/۹۷ میلی‌متر در شدت ۲/۸ سانتی‌متر بر ساعت تا ۱/۲۲ میلی‌متر در ۷/۱ سانتی‌متر بر ساعت در روش گلوله آردی است. همان‌طور که در بخش روش کار گفته شد، برای ایجاد شدت‌های مختلف از راه‌های متفاوتی مانند تغییر فشار آب ورودی، تغییر ارتفاع نازل‌ها از سطح کرت آزمایشی، تعداد نازل‌های استفاده‌شده و تنظیم فاصله نازل‌ها استفاده شد که هر یک از این عوامل به‌گونه‌ای متفاوت روی اندازه قطرات تأثیر می‌گذارند. بسته به استفاده از یک یا چند روش به‌طور هم‌زمان برای تغییر شدت باران اندازه قطرات درشت‌تر و یا ریزتر شده‌اند. کاهش فشار آب، شدت باران بیشتری را موجب می‌شود، بنابراین بر اثر سرعت پاشش کمتر اندازه قطرات بزرگ‌تر خواهد بود. از طرف دیگر، استفاده از دو نازل به‌طور هم‌زمان به‌دلیل ترکیب قطرات با هم نیز قطرات درشت‌تری تولید می‌کند. کاغذ فابریانو قطر را بیشتر از گلوله آردی برآورد کرده و تغییرات آن از ۱/۰۹ تا ۱/۳۲ میلی‌متر است، اما کاغذ پرینت برآورد کمتری نسبت به دو روش دیگر داشته و دامنه تغییرات آن کمتر بوده است. کمترین قطر به‌دست‌آمده با استفاده از کاغذ پرینت ۰/۷۸ و بیشترین آن ۱/۱۷ میلی‌متر



شکل ۴. درصد فراوانی وزنی باران در طبقه‌های مختلف قطر قطره در شدت‌های شبیه‌سازی‌شده

شدت با توجه به توزیع قطرات باران ابتدا سرعت برای هر دسته از قطرات با استفاده از جدول Gunn و Kinzer [۳۲] به دست آمد. سپس، انرژی جنبشی معادل هر سرعت نیز به همین ترتیب برای هر طبقه از قطرات جداگانه محاسبه و میانگین آنها به عنوان سرعت و انرژی جنبشی هر شدت مد نظر قرار گرفت (جدول ۴). در شدت ۷/۱ سانتی‌متر بر ساعت، که قطر میانگین قطرات بیشترین است، بیشترین سرعت و در شدت ۲/۸ سانتی‌متر بر ساعت کمترین مقدار است. بر همین اساس، دامنه تغییرات سرعت از ۳/۵۸ تا ۴/۲۱ متر بر ثانیه در شدت‌های شبیه‌سازی شده است. انرژی جنبشی بارندگی‌های ایجاد شده نیز از ۸/۳۴ تا ۱۱/۷۷ ژول بر مترمربع متغیر است.

با توجه به شکل ۴، بیشترین دامنه قطری در همه شدت‌ها، طبقه ۰/۲۵ تا ۰/۵ میلی‌متر از ۲۷ تا ۳۳ درصد بوده و کمترین درصد برای طبقه قطری دو تا ۲/۵ میلی‌متر است. شدت ۲/۸ سانتی‌متر بر ثانیه قطرات حداکثر تا دو میلی‌متر را ایجاد کرده و شدت ۹/۵ سانتی‌متر بر ثانیه بیشترین درصد (شش درصد) در طبقه قطری بیشتر از دو میلی‌متر دارد. باران طبیعی در دامنه قطری نزدیک صفر تا هفت میلی‌متر تغییر می‌کند، اما قطر میانه بین یک تا سه میلی‌متر برای باران‌های فرساینده اعلام شده است [۳۱] که قطر قطرات تولید شده در باران‌های شبیه‌سازی شده در این محدوده قرار می‌گیرند.

سرعت و انرژی جنبشی باران

برای به دست آوردن سرعت و انرژی جنبشی مربوط به هر

جدول ۴. مقادیر شدت و انرژی جنبشی باران‌های شبیه‌سازی شده

سرعت (متر بر ثانیه)	میانگین قطر قطرات (میلی‌متر)	شدت (سانتی‌متر بر ساعت)	انرژی جنبشی (ژول بر مترمربع بر میلی‌متر)
۳/۵۸	۰/۹۷	۲/۸	۸/۳۴
۴/۰۱	۱/۱۱	۳/۵	۱۰/۱۲
۴/۰۷	۱/۱۴	۴/۹	۱۰/۷۱
۳/۹۵	۱/۱۳	۶/۳	۱۰/۶۶
۴/۲۱	۱/۲۲	۷/۱	۱۱/۷۷
۴/۱۹	۱/۲۱	۸/۳	۱۱/۴۹
۴/۱۵	۱/۱۹	۹/۵	۱۱/۳۳

ساخت یک شبیه‌ساز باران قابل حمل و کم‌هزینه با امکان استفاده آسان در صحرا و تولید باران با نزدیک‌ترین شباهت به خصوصیات باران طبیعی در سطح پلات آزمایشی یک تا سه مترمربعی بوده است که سطح مناسبی برای این‌گونه مطالعات است. بر پایه نتایج به دست آمده ویژگی‌های مختلف باران‌های شبیه‌سازی شده در این پژوهش شباهت و قرابت زیادی با باران‌های طبیعی داشته و نتایج کاملاً قابل قبولی را به همراه داشته است. قابلیت تولید دامنه وسیعی از شدت‌های بارندگی و چگونگی طراحی برای استفاده آسان در طبیعت مانند قابلیت جداسازی همه قطعات و وزن کم آنها و نیاز بسیار کم موتور به سوخت از مزایای این شبیه‌ساز است. استفاده از نازل‌های وارداتی به دلیل نبود نازل ساخت داخل با کیفیت و دقت لازم و همچنین مصرف آب نسبتاً زیاد در صورت فعال بودن دو نازل از عیب‌های آن محسوب می‌شود. با

بر اساس نتایج به دست آمده توسط Assouline و همکارانش [۳۳] در بلژیک، که انرژی جنبشی باران طبیعی با قطر ۱/۵ میلی‌متر را برابر ۱۳ ژول در مترمربع یاد کردند و همچنین Abudi و همکارانش [۱۵] که برای بارندگی شبیه‌سازی شده با شدت ۱۲/۶ سانتی‌متر بر ساعت، انرژی جنبشی ۹/۷۵ ژول بر میلی‌متر در مترمربع به دست آوردند، یافته‌های مطالعه حاضر قابل قبول است.

نتیجه‌گیری

اگرچه شبیه‌سازهای باران مزایای زیادی در مطالعات فرسایش و رسوب دارند، دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. شباهت نداشتن کامل خصوصیات باران تولید شده با باران طبیعی، کوچک بودن سطح کرت آزمایش شده، تعمیم‌دادن نتایج به شرایط واقعی عرصه، هزینه و زمان مورد نیاز برای طراحی و ساخت شبیه‌ساز از محدودیت‌های آنهاست. در این تحقیق سعی بر رفع هر چه بیشتر این محدودیت‌ها و

- [9]. Floyd CN. A mobile rainfalls for small plot field experiments. *Journal agriculture engineering research*. 1981; 26:307-314.
- [10]. Poesen J, Ingelmo S. F and Mucher H.. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surf. Process Landforms*. 1990; 15: 653-671.
- [11]. Bhardwaj A and Singh R. Development of a portable rainfall simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies, *Agricultural Water Management*. 1992; 22: 235-248.
- [12]. Cerda A, Ibanez S, Cavlo A. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technol*. 1997; 11: 163-170.
- [13]. Victora K C A and Fiori H. Soil erodibility assessments with simulated rainfall and with the USLE nomograph in soil from Uruguay. *Proceeding of 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France*. 1998.
- [14]. Veihe A, Rey J, Quinton J N, Strauss P, Sancho F M and Somarriba M. Modeling of event- based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: evaluation of the EUROSEM model. *Catena*. 2001; 44: 187-203.
- [15]. Abudi I, Carmi G and Berliner P. Rainfall simulator for field runoff studies, *Journal of Hydrology*. 2012; 454: 76-81.
- [16]. Iserloh T, Ries JB, Arnáez J, Boix-Fayos C, Butzen V and et al. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena*. 2013; 110 : 100-112.
- [17]. Corona R, Wilson T, Addrio L, Porco F, Montadolo N and Albertson J. On the estimation of surface runoff through a new plot scale rainfall simulator in Sardinia, Italy. *Procedia Environmental Sciences* 2013; 19: 875 – 884.
- [18]. Lora M, Camporese M and Salandin P. Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments. *Catena*. 2016; 140: 77-89.
- [19]. Al Ali S, Bonhomme C, Dubois P and Chebbo G. Investigation of the wash-off process using an innovative portable rainfall simulator allowing continuous monitoring of flow and turbidity at the urban surface outlet. *Science of the Total Environment*. 2017; 609: 17-26.
- [20]. Khaledi Darvishan A, Homayonfar V and Sadeghi SHR. Designing, construction and calibration of a portable rainfall simulator for field runoff and soil erosion studies. *Watershed Sciences and Engineering of Iran*. 2016; 10(34): 105-112. (In Persian)

وجود اینکه عمر ساخت شبیه‌سازهای باران در دنیا به بیش از ۸۰ سال می‌رسد، در داخل کشور تعداد معدودی ساخته شده است و همچنان نیاز به تلاش بیشتر برای ارتقا و رفع محدودیت‌های موارد موجود و نیز رفع نیاز داخلی به این وسیله بسیار مناسب برای مطالعات فرسایش خاک و رواناب ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

- [1]. Sawatsky I, Dick W, Cooper D, Keys M. Design of a rainfall simulator to measure erosion of reclaimed surface, earth and environmental. *AGRA Earth and Environmental Limited, The 20th annual mine reclamation symposium*. 1996.
- [2]. Sheridan GJ, Noske PJ, Lane P NJ, Christopher S B. Using rainfall simulation and site measurements to predict annual interrill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. *Catena*. 2008; 73: 49-62.
- [3]. Mahmoodabadi M and Arabkhedri M. Rainfall and Erosion Simulation Laboratory Soil Conservation and Watershed Management Research Institute: Characteristics, Capabilities and Applications. 2011; 1(3): 1-11. (In Persian)
- [4]. Navas EL, Alberto E, Maehin J and Galhn Z A. Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion, *Soil technology*. 1990; 3: 385-397.
- [5]. Francisco J P, Latorre R, Castro L and Delgado A. A comparison of two variable intensity rainfall simulators for runoff studies. *Soil and Tillage Research*. 2010; 107: 11-16.
- [6]. Jahanbakhshi F, Ekhtesasi MR, Talebi A and Piri M. Investigation of permeability of three geological formations in different precipitation intensities using rainfall simulator (Case study: Shirkooh Yazd). 11th national conference on watershed management sciences and engineering of Iran. 2016; April 19-21. Yasooj. Iran. (In Persian)
- [7]. Abdollahi Z, Sadeghi SHR and Khaledi Darvishan AV. Designing, manufacturing and testing rainfall simulator nozzles, *Journal of Water and Soil Conservation*. 2013; 20(6): 67-86. (In Persian)
- [8]. Iserloh T, Fister W, Seeger M, Willger H and Ries JB. A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion, *Soil & Tillage Research*. 2012; 124: 131-137.

- [21]. Hignett CT, Gusli S, Cass A, Besz W. An automated laboratory rainfall simulation system with controlled rainfall intensity, raindrop energy and soil drainage. *Soil Technol.* 1995; 8: 31-42.
- [22]. Ahuja LR, Swartzendruber D. *Flow through Crusted Soils: Analytical and Numerical Approaches* Lewis. 2000; p. 93.
- [23]. Solomon K. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. *Trans. ASAE.* 1979; 22: 1078-1080.
- [24]. Shangzhi S, Hegao G, Wenmao G, Chenghuan N and Jingquan S. Large- scale movable field rainfall simulator. Forth international symposium on river sedimentation. Beijing, China. 1989; 184-91.
- [25]. Panneton B, Roy P M and Thereiault R. A droplet generator producing narrow drop size spectra. *Trans. ASAE.* 1991; 34(6): 2355-2362.
- [26]. Carter Cade E, Greer J D, Braud H J and Floy J M. Raindrop characteristics in south central United States. *Trans. ASAE.* 1974; 1033-1037.
- [27]. Khaledian H. Investigating the rainfall characteristics in relation to erosion in the west of Iran. The final report of the research project. Soil conservation and watershed research institute. 2003. (In Persian)
- [28]. Eigel JD and Moore ID. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. *Transactions of the ASAE* (American Society of Agricultural Engineers), 1983; 3: 1079-1084.
- [29]. Ghadiri H and Payne D. Raindrop impact stress and the breakdown of soil crumbs. *Soil Science*, 1997; 28: 247-258.
- [30]. Sadeghi S H R, Abdollahi Z and Khaledi Darvishan A. Experimental comparison of some techniques for estimating natural raindrop size distribution on the south coast of the Caspian Sea, Iran. *Hydrological Sciences Journal.* 2013; 58(6): 1374-1382.
- [31]. Arabkhedri M, Mahmoodabadi M, Rouhipour H, Heidarian SA, Lotfollahzade D and et al. Study on Rain Characteristics and Calibration of Rainfall Simulator of Soil Conservation and Watershed Management Research Center. Final report of research plan. Ministry of Jihad-e-Agriculture Research and Education Organization Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. 2008. 73p. (in Persian)
- [32]. Gunn R and Kinzer G D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *Journal of meteorology.* 1949; 6: 243-248
- [33]. Assouline S, El Idrissi A, Persoons E. Modeling the physical characteristics of simulated rainfall: a comparison with natural rainfall. *Journal of Hydrology.* 1997; 196: 336-347.