

گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که توزیع بارش تمام شش نازل تقریباً مشابه است. با ایجاد ترکیب‌های مختلفی از نازل‌های فعال و با تغییر فشار آب، فاصله بین نازل‌ها و نحوه چیدمان آنها، شدت‌های متفاوتی از ۳۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر در ساعت شبیه‌سازی گردید. برای بارش‌های منتخب، ضریب یکنواختی بیش از ۹۰٪ بدست آمد. الگوی بارش در گام مشاهده‌ای نسبت به گام محاسبه‌ای دارای شدت و ضریب تغییرات بیشتری بود. میان‌هجمی قطر قطرات باران شبیه‌سازی شده بین ۱/۶۴ تا ۲/۱۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. افزایش تعداد نازل‌های فعال در یک فشار ثابت، افزایش میان‌هجمی قطر قطرات را به دنبال داشت. با افزایش فشار آب در یک ترکیب مشخص از چیدمان نازل‌ها، شدت بارش افزایش یافت در حالیکه میان‌هجمی قطر قطرات و همچنین سرعت و انرژی جنبشی برآوردی کاهش نشان داد. با فرض رسیدن قطرات به سرعت حد، سرعت نهایی و انرژی جنبشی باران شبیه‌سازی برای شدت‌های مختلف، به ترتیب بین ۵/۷۰ تا ۶/۷۸ متر بر ثانیه و ۱۶/۲۴ تا ۲۲/۹۷ ژول بر متر مربع در میلی‌متر باران برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی باران، واسنجی، یکنواختی بارش، توزیع اندازه قطرات.

## مقدمه

با توجه به وضعیت حاد و بحرانی فرسایش خاک در ایران، انجام فعالیت‌های گسترده از دیدگاه‌های تحقیقات و اجرا ضروری است. در این راستا، در سال‌های اخیر شبیه‌سازی باران به‌طور وسیعی در شناخت فرسایش فرآیندهای مربوط به آن مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹، ۲۲، ۲۶، ۲ و ۱]. مهمترین مزایای استفاده از شبیه‌سازهای باران سرعت در عمل، کارایی، قابلیت کنترل و انعطاف‌پذیری بیشتر آن نسبت به باران‌های طبیعی است [۱۴].

واسنجی، توزیع مکانی و خصوصیات بارش‌های شبیه‌سازی شده (مطالعه موردی: شبیه‌ساز باران مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری)

مجید محمودآبادی<sup>۱</sup>، حسن روحی‌پور<sup>۲</sup>، محمود عرب‌خدری<sup>۳</sup> و حسینقلی رفاهی<sup>۴</sup>

## چکیده

در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی باران به‌طور وسیعی در شناخت فرسایش خاک و فرآیندهای مربوط به آن مورد استفاده قرار گرفته است. اخیراً مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، یک واحد آزمایشگاه شبیه‌سازی باران و فرسایش تاسیس نموده که از بسیاری لحاظ از سایر شبیه‌سازهای موجود در کشور متفاوت می‌باشد. در تحقیق حاضر با معرفی سامانه مذکور، روشی برای واسنجی، یکنواختی بارش و توزیع اندازه قطرات باران شبیه‌سازی شده در سه فشار ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱۵ مگاپاسکال، مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه‌گیری توزیع مکانی شدت بارش برای تک‌تک نازل‌ها به‌طور جداگانه روی قاعده مخروط بارش و نیز برای ترکیب‌های مختلف آنها در سطح فلوم در دو گام محاسبه‌ای و مشاهده‌ای انجام شد. به منظور تعیین توزیع اندازه قطرات از روش گلوله آردی استفاده

۱- مدرس دانشگاه شهید باهنر کرمان و دانشجوی دکتری

گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران

mmahmoodabadi@yahoo.com

۲- استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور

hassanrouhipour@yahoo.com.au

۳- مربی پژوهشی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

arabkhedri@scwmri.ac.ir

۴- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران

rafahi@ut.ac.ir

۵/۵۱ میلی‌متر استفاده شده بود و در فشار ۴۷/۶ کیلوپاسکال، قطراتی با قطر میانه ۱/۷۱ میلی‌متر تولید می‌نمود. شبیه‌سازهای باران شامل دو نوع مولد قطره<sup>۵</sup> و تحت فشار<sup>۶</sup> می‌باشند (Meyer (1994) و Morgan (1995). در نوع اول، قطرات بدون سرعت اولیه و تنها در اثر نیروی ثقل سقوط می‌کنند لذا، نیاز به ارتفاع زیادی برای رسیدن قطرات به سرعت حد دارند. همچنین قادر به شبیه‌سازهای توزیع مناسبی از اندازه قطرات نیستند. از این شبیه‌سازها می‌توان به نمونه مورد استفاده توسط Munn و Huntington [۱۹] اشاره نمود. در شبیه‌سازهای تحت فشار، قطرات دارای سرعت اولیه بوده لذا، در مقایسه با شبیه‌سازهای نوع اول برای رسیدن به سرعت حد، نیاز به ارتفاع کمتری دارند. همچنین قابلیت تغییر شدت باران را در دامنه نسبتاً بیشتری دارند. باران‌ساز ساخت Meyer [۱۴] از جمله این باران‌سازهاست که توانایی تولید بارانی با انرژی جنبشی معین را داشته است. با وجود اینکه هیچ دو باران طبیعی نیز کاملاً مشابه نیستند، برخی معیارهای مهم برای شبیه‌سازی مناسب باران عبارتند از:

۱. توزیع اندازه قطرات مشابه باران طبیعی [۴ و ۳]
  ۲. برخورد قطرات به سطح زمین با سرعت حد [۱۴]
  ۳. شدت بارش یکنواخت و توزیع اندازه قطرات تصادفی [۱۴]
  ۴. بارش یکنواخت در تمام سطح کرت مورد آزمایش [۳]
  ۵. زاویه برخورد عمودی قطرات با سطح کرت [۳]
  ۶. قابلیت تولید مجدد الگوهای باران [۱۷ و ۱۵]
- در شبیه‌سازهای باران، سرعت برخورد قطره با سطح خاک تابعی از اندازه قطره، ارتفاع صفحه بارش و سرعت اولیه است. سرعت حد قطرات در باران‌های طبیعی با افزایش قطر قطره افزایش یافته و به حدود ۹ متر بر ثانیه می‌رسد [۴ و ۱۷]. نتایج اندازه‌گیری قطراتی که به سرعت حد رسیده باشند، نشان از همبستگی بالای انرژی باران با شدت آن دارد [۱۱]. لذا، دستیابی به شدت‌های نزدیک به باران طبیعی در صورتیکه قطرات به سرعت حد رسیده باشند، قابلیت شبیه‌سازی انرژی جنبشی باران را نیز میسر می‌سازد. انرژی

کرت‌های استاندارد رواناب (SRP)<sup>۱</sup> و شبیه‌سازهای باران (RFS)<sup>۲</sup> دو روش رایج در تحقیقات فرسایش به حساب می‌آیند. در روش اول، فرسایش تحت شرایط طبیعی اندازه‌گیری می‌شود، اما این روش زمان‌بر بوده و نصب و عملیات پرهزینه‌ای نیز می‌طلبد. روش RFS هر چند به اندازه روش SRP دقیق نیست، اما هزینه کمتری لازم داشته و امکان انجام آزمایش را با چندین تکرار در مدت زمان کوتاه‌تری میسر می‌سازد. Duley و Hays [۷] از جمله اولین محققانی بودند که شبیه‌سازی باران را برای اندازه‌گیری هدررفت خاک بکار بردند. از آن زمان به بعد، استفاده‌های مکرری از RFS به عنوان ابزاری در تحقیقات فرسایش خاک صورت گرفته است [۶، ۲۶، ۳ و ۱۳].

Poesen و همکاران [۲۱] از سیستم LECHLER 460.788 استفاده نمودند که در آن فشار آب به وسیله یک تنظیم‌کننده<sup>۳</sup> کنترل می‌شد. با اعمال فشار ۶/۲۰ کیلو پاسکال، بارشی با شدت ۳۶/۴ میلی‌متر در ساعت از ارتفاع ۳/۲۵ متر شبیه‌سازی گردید. Victora و همکاران [۲۶] در باران‌ساز Puentes با استفاده از نازل Veejet H1/2 U80-100 در فشار ۰/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع از ارتفاع ۲/۴ متری، بارانی با شدت ۷۰ میلی‌متر در ساعت شبیه‌سازی نمودند. Veihe و همکاران (۲۰۰۱) در کاستاریکا برای بررسی مدل فرسایش EUROSEM، با استفاده از نازل‌های نوع LECHLER 460.848 5ECE که در ارتفاع ۳ متری نصب شده بود، تحت فشار ۱۳۰ کیلوپاسکال، شدت ۱۳۲ میلی‌متر در ساعت را با میانه قطر قطرات ۱/۰۶ میلی‌متر ایجاد کردند. آنها همچنین در مکزیک در باران‌ساز ORSTOM از نازل‌های جارویی<sup>۴</sup> استفاده نمودند که از ارتفاع ۳ متری تحت فشار ۵۰ کیلو پاسکال، بارشی با شدت ۳۱ میلی‌متر در ساعت را بر روی کرت یک متر در یک متر شبیه‌سازی می‌نمود. Blanquies و همکاران [۳] باران‌سازی طراحی نمودند که در آن از نازل نوع SS3/8K- 45 Floodjet با قطر دهانه

- 1-Standard runoff plots (SRP)
- 2-Rainfall simulators (RFS)
- 3-Regulator
- 4-Oscillating nozzle

- 5-Dropforming simulators
- 6-Pressurized nozzle simulators

روش‌های آسان و کاربردی است که به رغم ابداع روش‌های جدید، هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. Carter و همکاران [۵] معتقدند روش گلوله آردی نسبت به روش لکه رنگی ارجحیت دارد.

اخیراً در مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری باران‌سازی ساخته شده است که از بسیاری جنبه‌ها متفاوت از سایر باران‌سازهای موجود در کشور می‌باشد. تحت فشار بودن سیستم، ابعاد آن هم از لحاظ ارتفاع صفحه بارش (۷/۷۵ متر از تراز فلوم) و هم از نظر ابعاد فلوم (شش متر طول در یک متر پهنا)، قابلیت تغییر شیب فلوم (صفر تا ۶۰ درصد)، تغییرپذیری شدت بارش (بین ۳۵ تا ۱۲۵ میلی متر در ساعت) و قابلیت شبیه‌سازی باران و رواناب بطور مجزا یا همزمان، از جمله محاسن این دستگاه است. لازم به ذکر است این باران‌ساز بر اساس شبیه‌ساز باران دانشگاه گریفیث استرالیا (GUTSR)<sup>۱۲</sup> الگوبرداری و ساخته شده است. دستگاه مزبور شهرت جهانی داشته و در بسیاری از تحقیقات از آن استفاده شده است. GUTSR از یک فلوم شیب‌پذیر به طول ۵/۸ متر و پهنای یک متر تشکیل شده است. در سیستم مذکور شبیه‌سازی با استفاده از شش نازل افشانه‌ای<sup>۱۳</sup> دهانه‌گشاد انجام می‌شود که قادر به شبیه‌سازی شدت‌های مختلفی از باران است [۱۶].

قسمت‌های شبیه‌ساز مورد بررسی در این تحقیق، شامل سیستم آبرسانی، صفحه بارش، فلوم شیب‌پذیر، اتاق کنترل و آزمایشگاه، چارچوب اصلی و پوشش اطراف آن می‌باشد. آب مورد نیاز بارش با استفاده از پمپ و الکتروموتور و از طریق سیستم آبرسانی، از مخزن تا نازل‌ها هدایت می‌شود. به کمک یک فشارسنج، فشار و دبی آب قابل کنترل است. صفحه بارش از شش عدد نازل تشکیل شده که روی ریل متحرکی به طول شش متر و ارتفاع ۷/۷۵ متر از سطح فلوم (۹ متر از کف سالن) نصب شده‌اند. نازل‌های مورد استفاده در این شبیه‌ساز از نوع BEX-S30W با قطر دهانه ۴/۵ میلی‌متر است. تعداد نازل‌های فعال و فواصل بین آنها برای تنظیم شدت و

جنبشی باران با استفاده از توزیع اندازه قطرات برای یک شدت مشخص قابل برآورد است [۳].

یکی از معیارهای شبیه‌سازی مطلوب باران، توزیع مناسب اندازه قطرات است. دامنه اندازه قطرات باران‌های طبیعی در محدوده نزدیک به صفر تا ۶ میلی‌متر متغیر است [۱۸] و [۱۴] و با افزایش شدت باران، میانه قطر قطرات به سمت قطرات درشت‌تر میل می‌کند [۱۸]. در شبیه‌سازی باران برای تولید قطره، روش‌های متفاوتی وجود دارد [۲۰]. سه نوع مولد قطره شامل استفاده از قطعات نخ آویزان<sup>۱</sup>، لوله‌های سوزنی نوک‌تیز<sup>۲</sup> و نازل<sup>۳</sup> را معرفی نمودند. دو نوع اول عموماً در شبیه‌سازهای مولد قطره و نازل در شبیه‌سازهای نوع تحت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیستم‌هایی که از چند نازل برای تولید باران استفاده می‌شود، نحوه آرایش و چیدمان نازل‌ها، در شدت و یکنواختی بارش اهمیت دارد. در شبیه‌سازهای تحت فشار، شدت بارش با اندازه نازل، فشار هیدرولیکی وارد بر نازل، فاصله بین نازل‌ها و حرکت آنها تغییر می‌کند [۳].

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری قطر قطرات و توزیع اندازه آنها وجود دارد که مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از: ۱) روش گلوله آردی<sup>۴</sup> [۵] ۲) روش لکه رنگی<sup>۵</sup> [۹] و [۵] و [۲۲] ۳) روش فتوگرافیک<sup>۶</sup> [۵] و [۸] ۴) روش استغرافی<sup>۷</sup> [۸] ۵) روش گشتاوری<sup>۸</sup> [۸] ۶) استفاده از رادار<sup>۹</sup> [۳] ۷) استفاده از ادوات الکترونیکی<sup>۱۰</sup> [۳] ۸) اندازه‌گیری اثر برخورد<sup>۱۱</sup> [۳]. هر یک از این روش‌ها کاربردها، مزایا و معایبی دارد. با توجه به هزینه اندازه‌گیری، دقت و توزیع اندازه قطرات، روش‌های گلوله آردی و استغرافی از بهترین روش‌های تعیین اندازه قطرات باران طبیعی و مصنوعی محسوب می‌شوند [۵] و [۸]. روش گلوله آردی از جمله

- 1-Hanging yarn
- 2-Tubing tip
- 3-Nozzle
- 4-Flour pellet method
- 5-Stain method
- 6-Photographic method
- 7-Immersion method
- 8-Momentum method
- 9-Radar
- 10-Electronic devices
- 11-Measurement of impact effect

12-Griffith University tilting- flume and simulated rainfall

13- Spray nozzle

## مواد و روش‌ها

## ۱- اندازه‌گیری شدت و یکنواختی بارش

به منظور مشخص نمودن دامنه شدت‌هایی که به وسیله دستگاه قابل شبیه‌سازی است و همچنین اندازه‌گیری شدت و یکنواختی بارش در سطح فلوم آزمایش‌هایی در دو مرحله انجام شد:

## ۱-۱- تعیین شدت و توزیع مکانی بارش برای تک‌نازل

در مرحله اول برای تعیین شدت و توزیع مکانی آن در قاعده مخروط بارش برای هر نازل منفرد، از ظروف استوانه‌ای لبه‌تیز با سطح مقطع ۱۰۰ سانتیمتر مربع با فواصل ۳۰ سانتی‌متر بین مراکز آنها، در تراز ارتفاعی فلوم استفاده گردید. با اعمال بارش در سه فشار ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱۵ مگاپاسکال و اندازه‌گیری آب جمع‌شده در ظروف در مدت ۱۰ دقیقه، توزیع شدت در راستای طول فلوم تعیین شد. این آزمایش‌ها در مورد هر شش نازل به‌طور جداگانه تکرار گردید.

## ۱-۲- تعیین توزیع بارش در سطح فلوم برای ترکیب نازل‌ها

در این مرحله، بررسی شدت و یکنواختی بارش در سطح فلوم برای ترکیب نازل‌ها در دو گام محاسبه‌ای و مشاهده‌ای صورت گرفت. گام اول با استفاده از نتایج حاصل از مرحله قبل و ترکیب نمودن آنها در محیط Excel انجام پذیرفت. بدین صورت که در هر فشار، توزیع شدت روی قطر قاعده مخروط بارش هر تک‌نازل، به صورت ستونی از داده‌ها با ستون مربوط به توزیع شدت سایر نازل‌ها در همان فشار، ترکیب و فاصله نازل‌ها طوری تنظیم شد که با تداخل مخروط‌های بارش، بیشترین یکنواختی نسبی در طول شش متر فلوم حاصل گردد. در این مرحله، از سه آرایش شامل فاصله مساوی بین نازل‌ها، تغییر فاصله نازل‌ها تا رسیدن به ضریب یکنواختی حداکثر و چیدن نازل‌ها به صورت جفتی استفاده گردید. در کل، برای ۳۷ ترکیب از نازل‌ها برحسب فشار آب، تعداد نازل‌های فعال و فاصله و آرایش آنها، شدت باران محاسبه شد. لازم به ذکر است که در ترکیب مخروط‌های بارش، به دلیل فعالیت همزمان چند نازل و تقسیم فشار آب بین آنها، فشار ۰/۱۵ مگاپاسکال برای شدت‌های حاصل از ترکیب نازل‌ها عملاً کارایی ندارد. لذا در این مرحله، برای ترکیب مخروط‌های بارش، تنها فشارهای

الگوهای مختلف بارش قابل تنظیم است. از شیلنگ‌هایی با قطر و طول یکسان برای آبرسانی از مقسم تا نازل‌ها استفاده می‌شود. فلوم شبیه‌ساز با طول و پهنای شش متر در یک متر و ارتفاع دیواره‌ها ۶۰ سانتی‌متر از مواد پلکسی‌گلاس ساخته شده که روی یک شاسی فلزی نصب شده است. شیب طولی فلوم بوسیله یک دستگاه بالابر (جک) هیدرولیکی تا ۶۰ درصد قابل تنظیم است. به منظور شبیه‌سازی رواناب، بخش تولید رواناب مشتمل بر مخزن با ارتفاع ثابت آب، حوضچه آرامش، شیرهای تنظیم دبی ورودی، آرام‌کننده جریان و سرریز، در بالادست فلوم بر روی شاسی فلزی نصب شده است. در انتهای فلوم نیز قیف جمع‌آوری نمونه‌های رواناب و رسوب قرار دارد (شکل ۱). چارچوب اصلی شبیه‌ساز از نوع قاب صلب است که تعدادی از اجزای سیستم روی آن قرار گرفته‌اند. برای جلوگیری از تاثیر باد، پوشش دوجداره فلزی روی این چارچوب نصب شده است. پوشش باران‌ساز مجموعه‌ای مکعب مستطیل با سقف شیروانی به طول ۱۰، عرض ۵ و ارتفاع ۱۱/۲۵ متر است.



شکل (۱) نمایی از فلوم شیب‌پذیر شبیه‌ساز باران مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

تحقیق حاضر با معرفی آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش این مرکز به بررسی واسنجی شدت و توزیع مکانی بارش در جهت دستیابی به شدت‌های مطلوب با یکنواختی مناسب می‌پردازد. همچنین، تعیین توزیع اندازه قطرات و برآورد سرعت و انرژی جنبشی باران شبیه‌سازی شده از اهداف این پژوهش است.

و سرنگ نوک‌تیز، تعداد ۵۰ عدد از هر اندازه قطره مصنوعی با قطر مشخص تولید گردید. با استفاده از روابط جرم-حجم، قطر معادل شکل کرووی قطرات محاسبه شد. برای هر وسیله، این کار در دو یا سه تکرار انجام شد و میانگین تکرارها به عنوان قطر معادل قطره لحاظ گردید. سپس قطرات مصنوعی با اندازه مشخص، از ارتفاع صفحه بارش بر روی سطح آرد چکانده شد. حین سقوط قطرات با تکان دادن ظرف، لایه‌ای از آرد روی گلوله‌های آرد پاشیده می‌شد تا از تبخیر آب و همچنین به هم چسبیدن آنها جلوگیری گردد. نمونه‌ها پس از هوا خشک کردن، در آون با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد. پس از جداسازی و توزین گلوله‌ها، جرم متوسط گلوله حاصل از هر اندازه قطره مصنوعی محاسبه گردید. سپس منحنی واسنجی با استفاده از رابطه بین جرم گلوله آردی و قطر قطره ترسیم و معادله خط برازش یافته تعیین شد.

در مرحله بعد، توزیع اندازه قطرات باران شبیه‌سازی شده توسط باران‌ساز، با استفاده از منحنی واسنجی اندازه‌گیری شد. بسته به شدت بارش، ظرف حاوی آرد حدود پنج ثانیه زیر باران قرار گرفت. در این مدت، مشابه مرحله قبل ظرف آرد با حرکت دست تکان داده می‌شد تا گلوله‌ها به یکدیگر نچسبند. پس از خشک کردن نمونه‌ها، با استفاده از سری الک‌های ۴، ۵، ۱۰، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۳۵، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ مش، گلوله‌ها از آرد جدا گردید. از توزین تعداد مشخصی گلوله روی هر الک، میانگین جرم گلوله روی هر الک تعیین شد. با استفاده از منحنی واسنجی، درصد حجمی هر یک از قطرات به صورت تجمعی محاسبه گردید. این نمونه‌گیری در شش نقطه از طول فلوم به فواصل یک متر و در سه تکرار (۱۸ نمونه‌گیری برای هر شدت، جمعاً ۹۰ نمونه) اندازه‌گیری قطر قطره صورت گرفت.

۳- برآورد سرعت و انرژی باران شبیه‌سازی شده  
با توجه به اینکه قطرات باران شبیه‌سازی شده دارای سرعت اولیه بوده و همچنین اندازه‌های متفاوتی نیز دارند، امکان اندازه‌گیری سرعت سقوط نهایی فراهم نبود. Laws در سال ۱۹۴۱ [۴] برای قطرات با اندازه‌های ۱/۵ تا ۶/۰ میلی‌متر،

۰/۰۱ و ۰/۰۵ مگاپاسکال مورد استفاده قرار گرفت. از بین این ترکیب‌ها با توجه به شدت‌های مطلوب شبیه‌سازی، مقادیر ضریب یکنواختی بهینه و همچنین پارامترهای آماری، پنج شدت مناسب انتخاب گردید. برای هر شدت بارش، پارامترهای آماری شامل حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات محاسبه شد. برای ارزیابی یکنواختی بارش از ضریب یکنواختی کریستینسن<sup>۱</sup> استفاده گردید. این ضریب (C.C) با استفاده از شدت اندازه‌گیری شده در هر ظرف (xi)، شدت متوسط (m) و تعداد ظروف (n) از فرمول زیر برآورد شد [۲۴]:

$$C.C = \left[ 1 - \frac{\sum |xi - m|}{m.n} \right] \times 100 \quad (1)$$

در گام بعد با توجه به نتایج مرحله محاسبه‌ای، پنج ترکیب منتخب بارش به صورت مشاهده‌ای (عملی) نیز ایجاد گردید. بدین منظور، مشابه مرحله اول، ظروف استوانه‌ای در داخل فلوم چیده شد. حجم آب جمع‌آوری شده در مدت ۱۰ دقیقه برای پنج شدت منتخب اندازه‌گیری شد. همچنین کل آب جمع شده در فلوم که مجموع آب داخل ظروف اندازه‌گیری و بقیه آب جمع شده در کف فلوم بود، نیز از انتهای فلوم جمع‌آوری گردید. این قسمت برای تعیین صحت شدت اندازه‌گیری شده از طریق ظروف انجام گرفت. نظیر گام محاسبه‌ای، برای هر شدت، پارامترهای آماری بارش محاسبه شد. به‌علاوه نتایج گام مشاهده‌ای بر اساس پارامترهای آماری شامل ضریب یکنواختی، حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات و الگوی توزیع مکانی بارش با گام محاسبه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت.

۲- اندازه‌گیری قطر قطرات بارش و توزیع اندازه  
در این تحقیق برای اندازه‌گیری قطر قطرات باران شبیه‌سازی شده، روش گلوله آردی مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور از ظروف پلاستیکی با سطح مقطع مستطیلی به ابعاد ۱۵ در ۲۰ سانتی‌متر حاوی لایه‌ای صاف از آرد (سه صفر سفید گندم) به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر استفاده شد. در ابتدا برای تهیه منحنی واسنجی به کمک وسایلی نظیر بورت، پیپت

1-Christiansen coefficient uniformity

مخروط بارش در راستای طول فلوم نشان می‌دهد. این الگو برای سایر نازل‌ها نیز تقریباً مشابه بود. با افزایش فشار آب از ۰/۰۱ به ۰/۰۵ و ۰/۱۵ مگاپاسکال، حداکثر شدت‌ها به ترتیب تا حدود ۲۵، ۳۵ و ۷۰ میلی متر در ساعت افزایش یافت. از طرفی با افزایش فشار، قطر مخروط بارش در تراز ارتفاعی فلوم از پنج به ۷/۵ متر افزایش نشان داد. مطابق شکل (۲)، مخروط‌های بارش دو اوج دارند و شدت در مرکز قاعده کمی افت نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند ناشی از گرایش قطرات ریز به سمت مرکز سطح بارش باشد. Kohl و DeBoer [۱۰] عنوان داشتند که قطرات ریز، ضریب کششی<sup>۱</sup> بزرگتری دارند و لذا به سمت مرکز سطح تحت بارش سقوط می‌نمایند.

از بین سه فشار آزمایشی، فشار متوسط (۰/۰۵ مگاپاسکال) برای توزیع مکانی بارش تک‌نازل بالاترین مقادیر ضریب یکنواختی را بدست داد. متوسط این ضریب برای تک‌نازل‌ها در فشارهای ۰/۰۱ به ۰/۰۵ و ۰/۱۵ مگاپاسکال، به ترتیب ۵۴/۹۵، ۵۵/۷۵ و ۳۳/۳۳ و انحراف استاندارد مربوط به ضریب یکنواختی بین نازل‌ها، به ترتیب ۷/۰۱، ۵/۷۸ و ۷/۸۲ محاسبه گردید. با توجه به این مقادیر، فشار ۰/۰۵ مگاپاسکال شرایط مطلوبتری از نظر توزیع بارش نسبت به دو فشار دیگر دارد.

سرعت‌های سقوط از ارتفاع‌های بین یک تا ۲۰ متر را در هوای آرام اندازه‌گیری نمود و سرعت سقوط قطرات از ارتفاع ۲۰ متر را به عنوان سرعت حد در نظر گرفت. در اینجا دو سناریو مد نظر قرار گرفت؛ در سناریوی اول با توجه به ارتفاع صفحه بارش از سطح فلوم و تحت فشار بودن آب سیستم، می‌توان فرض کرد که قطرات به سرعت حد می‌رسند. با استفاده از جداول Laws و همچنین میانه قطر قطرات در هر شدت، سرعت نهایی قطرات برآورد گردید. در سناریوی دوم با فرض اینکه قطرات فاقد سرعت اولیه باشند، با استفاده از قطر میانه قطرات (جرم قطره) در هر شدت باران شبیه‌سازی شده و ارتفاع صفحه ریزش (۷/۷۵ متر از سطح فلوم) محاسبه گردید که قطرات به چند درصد از سرعت نهایی خود (حاصل از سناریوی اول) می‌رسند. همچنین با داشتن سرعت، میانه قطر قطره (جرم قطره) و تعداد قطرات، انرژی باران در هر شدت برآورد گردید.

## نتایج و بحث

### ۱- آبدهی نازل‌ها

اندازه‌گیری آبدهی نازل‌ها نشان داد که رفتار نازل‌ها از نظر دبی خروجی مشابه بوده که بین تعداد نازل‌های فعال و فشار آب سیستم یک رابطه خطی معکوس وجود داشت. با افزایش فشار آب (P)، دبی خروجی (Q) نازل‌ها به صورت نمایی افزایش یافت. معادله (۲) میزان همبستگی بین دبی متوسط نازل (Q) (برحسب لیتر در ثانیه) و فشار آب سیستم (P) (بر حسب مگاپاسکال) را که برای هر شش نازل و در سه فشار مختلف مورد آزمون قرار گرفت با ضریب تعیین مربوطه نشان می‌دهد:

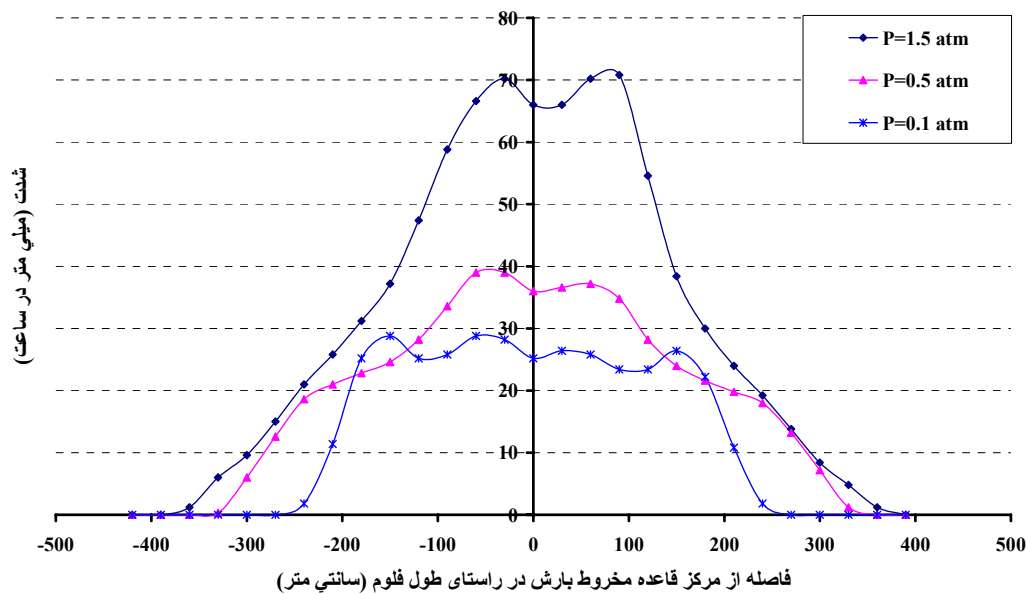
$$Q = 0.6106(P)^{0.4619} \quad (۲)$$

$$R^2 = 0.9999$$

### ۲- شدت و توزیع مکانی بارش

نتایج مرحله تعیین شدت و توزیع مکانی بارش برای تک‌نازل نشان داد که توزیع شدت بارش هر شش نازل تقریباً با یکدیگر یکسان است. شکل (۲) توزیع شدت بارش را برای یکی از نازل‌ها در سه فشار آزمایشی، با فاصله از مرکز قاعده

1-Drag coefficient



شکل (۲) توزیع مکانی شدت در سه فشار آزمایشی، با فاصله از مرکز قاعده مخروط بارش در راستای طول فلوم

فاصله مساوی آنها جواب می‌دهد (جدول ۱ در بارش‌های ۴ و ۵).

Shelton و همکاران (۱۹۸۵) با استفاده از نازل‌های نوع Fulljet 50WSQ شدت‌هایی از باران بین ۷۶ تا ۱۶۸ میلی‌متر در ساعت با حداکثر یکنواختی ۸۴٪ را شبیه‌سازی نمودند. همچنین مطابق جدول (۱) در یک ترکیب ثابت از چیدمان نازل‌ها، با افزایش فشار از ۰/۰۱ به ۰/۰۵ مگاپاسکال (بارش‌های ۱ و ۲)، متوسط شدت بارش افزایش می‌یابد. نتایج Cerda و همکاران [۶] نشان از کاهش شدت باران بصورت خطی، با افزایش فشار آب داشت. حداکثر یکنواختی (۹۳/۲۴٪) در فشار ۱/۵۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و شدت ۵۵ میلی‌متر در ساعت حاصل شد. آنها علت کاهش ضریب یکنواختی در فشارهای کمتر و بیشتر از فشار مذکور را به توزیع قطرات باران به ترتیب در مرکز و حاشیه سطح تحت بارش مربوط دانستند. با توجه به جدول (۱) در یک ترکیب ثابت از چیدمان نازل‌ها، با افزایش فشار از ۰/۰۱ به ۰/۰۵ مگاپاسکال (بارش‌های ۱ و ۲)، ضریب یکنواختی تغییر چندانی نشان نمی‌دهد.

جدول (۱) خصوصیات آماری بارش حاصل از ترکیب نازل‌ها را در دو گام محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای پنج شدت منتخب بارش نشان می‌دهد. این شدت‌ها محدوده شدت‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی از کم تا زیاد را پوشش می‌دهد. Meyer و Harmon [۱۵] عنوان می‌دارند که شدت‌های بین ۱۲ تا ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت به‌طور معمول در طبیعت اتفاق افتاده و بیشترین اهمیت را در مطالعات فرسایش خاک دارند. برای ترکیب‌های مختلف نازل‌ها، مقادیر شدت محاسبه‌ای از ۲۵ تا ۱۱۰ و مقادیر مشاهده‌ای بین ۳۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر در ساعت متغیر و مقادیر ضریب یکنواختی در هر دو حالت، بیشتر از ۹۰٪ بود.

مطابق جدول (۱) با افزایش تعداد نازل‌های فعال (تعداد نازل در حال بارش به طور همزمان) در یک فشار مشخص، شدت بارش افزایش نشان می‌دهد. همچنین در ترکیب نازل‌ها، بهترین مقادیر ضریب یکنواختی در فشار ۰/۰۵ مگاپاسکال حاصل می‌شود، هرچند رسیدن به ضریب یکنواختی ۱۰۰٪ میسر نیست. از طرفی، برای نیل به شدت‌های بالاتر، چیدمان نازل‌ها به صورت جفتی بهتر از

جدول (۱) خصوصیات آماری بارش در دو حالت محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برای بارش‌های منتخب

| شماره بارش منتخب | (۱) نازل‌های فعال        | فاصله نازل‌ها (cm) | (۲) فشار (MPa)   | ضریب یکنواختی (%) | حداکثر         |               |                  | ضریب تغییرات (%) | (۳) شدت در فلوم (mm h <sup>-1</sup> ) |
|------------------|--------------------------|--------------------|------------------|-------------------|----------------|---------------|------------------|------------------|---------------------------------------|
|                  |                          |                    |                  |                   | میانگین        | حداقل         | انحراف استاندارد |                  |                                       |
| (۱)              | ۱ و ۴                    | ۴۲۰                | ۰/۰۱ O<br>۰/۰۱ C | ۹۲/۶<br>۹۵/۶      | ۴۲/۰<br>۳۰/۶   | ۲۸/۸<br>۲۳/۴  | ۳۵/۰<br>۲۶/۴     | ۳/۳<br>۱/۷       | ۳۳/۵                                  |
|                  |                          |                    |                  |                   |                |               |                  |                  |                                       |
| (۲)              | ۱ و ۴                    | ۴۲۰                | ۰/۰۵ O<br>۰/۰۵ C | ۹۲/۱<br>۹۴/۴      | ۴۹/۲<br>۳۹/۰   | ۳۴/۸<br>۳۱/۲  | ۴۱/۳<br>۳۵/۱     | ۴/۰<br>۲/۳       | ۴۲/۱                                  |
|                  |                          |                    |                  |                   |                |               |                  |                  |                                       |
| (۳)              | ۱، ۳ و ۵                 | ۲۷۰                | ۰/۰۵ O<br>۰/۰۵ C | ۹۳/۹<br>۹۳/۷      | ۷۵/۶<br>۶۷/۸   | ۵۲/۲<br>۴۴/۴  | ۶۷/۳<br>۵۹/۸     | ۵/۷<br>۵/۲       | ۶۸/۷                                  |
|                  |                          |                    |                  |                   |                |               |                  |                  |                                       |
| (۴)              | (۲ و ۱)<br>(۴ و ۵)       | ۴۲۰                | ۰/۰۵ O<br>۰/۰۵ C | ۹۳/۵<br>۹۴/۹      | ۱۰۲/۰<br>۸۰/۴  | ۷۷/۴<br>۶۳/۶  | ۸۶/۳<br>۷۱/۱     | ۷/۳<br>۴/۷       | ۸۸/۷                                  |
|                  |                          |                    |                  |                   |                |               |                  |                  |                                       |
| (۵)              | (۲، ۱ و ۳)<br>(۵، ۴ و ۶) | ۴۵۰                | ۰/۰۴ O<br>۰/۰۵ C | ۹۰/۰<br>۹۴/۵      | ۱۷۱/۰<br>۱۲۱/۲ | ۱۰۱/۰<br>۹۶/۰ | ۱۲۵/۹<br>۱۰۷/۲   | ۱۷/۷<br>۷/۳      | ۱۲۵/۳                                 |
|                  |                          |                    |                  |                   |                |               |                  |                  |                                       |

(۱) نازل‌های داخل پراتنز حداقل فاصله (۱۵ سانتی متر) را با یکدیگر دارند.

(۲) علامت O مبین شدت مشاهده‌ای و C مبین شدت محاسبه‌ای است.

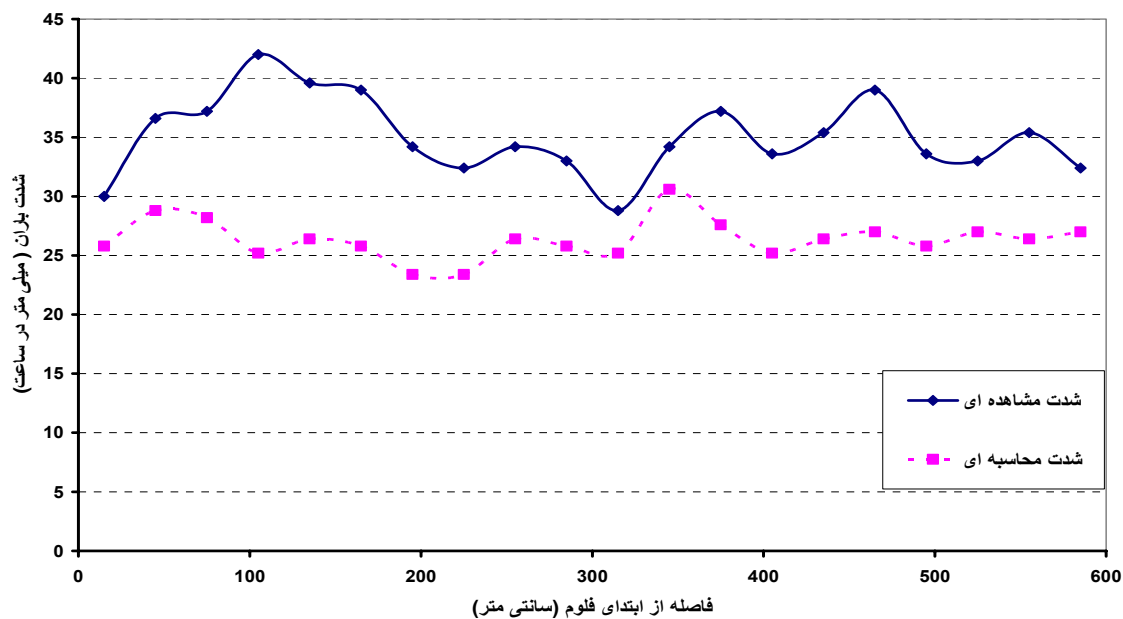
(۳) شدت فلوم فقط برای حالت مشاهده‌ای است.

شده در کف فلوم و نیز ظروف اندازه‌گیری در مدت بارش در واحد سطح فلوم محاسبه گردیده در حالی که شدت مشاهده‌ای تنها از مقادیر شدت اندازه‌گیری شده در داخل ظروف بدست آمده است. به عبارتی هر دوی این شدت‌ها واقعی و نه برآوردی هستند.

شکل (۳) نمونه‌ای از توزیع مکانی مربوط به بارش منتخب شماره یک را در دو حالت محاسبه‌ای و مشاهده‌ای نشان می‌دهد. این الگوی بارش در گام مشاهده‌ای تقریباً مشابه گام محاسبه‌ای است ولی نسبت به آن شدت و ضریب تغییرات بیشتری دارد.

جدول (۱) همچنین نشان می‌دهد که مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات گام مشاهده‌ای نسبت به محاسبه‌ای بیشتر است. به عبارتی در شرایط واقعی شدت‌های بیشتری از باران شبیه‌سازی می‌گردد که البته با ضریب تغییرات بیشتری نیز توأم است. به‌علاوه مقایسه ضرایب یکنواختی بارش در این دو گام نشان می‌دهد که بارش مربوط به گام مشاهده‌ای یکنواختی کمتری دارد. Solomon (1979) [۲۴] معتقد است که تغییر در مقدار ضریب یکنواختی بستگی به نوع و اندازه نازل، فشار آب، فاصله نازل‌ها و اثر باد دارد. در این جدول ستون آخر به شدت در فلوم اختصاص دارد که از مجموع حجم آب جمع





شکل (۳) توزیع مکانی بارش منتخب شماره یک در دو حالت محاسبه‌ای و مشاهده‌ای

ترکیب مخروط‌های بارش از طریق محاسبه (گام محاسبه‌ای)، اثرات متقابل و احتمال برخورد قطرات به یکدیگر لحاظ نمی‌شود حال آنکه، در واقع (گام مشاهده‌ای)، برخورد تصادفی قطرات به یکدیگر باعث ایجاد قطرات درشت‌تر و افزایش شدت باران می‌گردد.

۳- واسنجی قطر قطرات بارش

تهیه منحنی واسنجی برای اندازه‌گیری قطر قطرات به روش گلوله آردی، معادله رگرسیونی زیر را بدست داد:

$$D = 12.715(X)^{0.3307} \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9988$$

که در آن: X جرم گلوله آردی به گرم و D قطر قطره به میلی‌متر است. جدول (۲) مقادیر متوسط چارک‌های اندازه قطره را برای پنج شدت منتخب بارش نشان می‌دهد. با مقایسه بارش‌های منتخب (۱) و (۲) چنین بر می‌آید که با افزایش فشار آب برای یک آرایش مشخص از نازل‌ها، میانه قطر قطرات کاهش می‌یابد. نتایج Cerda و همکاران [۶] نشان داد که به علت سرعت پاشش<sup>۱</sup> بیشتر قطرات ریز نسبت به قطرات درشت، با افزایش فشار آب، اندازه قطرات کاهش می‌یابد.

همچنین در یک فشار ثابت با افزایش تعداد نازل‌های فعال، علاوه بر افزایش شدت بارش، میانه قطر قطرات نیز افزایش نشان داد. این موضوع مؤید این مطلب است که در اثر برخورد قطرات به یکدیگر قطرات درشت‌تری حاصل می‌شود. با توجه به این قضیه و مراجعه به شکل (۳) در

جدول (۲) مقادیر متوسط چارک‌های قطر قطرات برای پنج شدت منتخب

| D <sub>75</sub> | D <sub>50</sub> | D <sub>25</sub> | تعداد<br>نازل فعال | فشار<br>(MPa) | متوسط شدت<br>بارش<br>(mm h <sup>-1</sup> ) | شماره<br>بارش منتخب |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------|--|---------------------|
| ۲/۶۶            | ۱/۹۵            | ۱/۱۰            | ۲                  | ۰/۰۱          | ۳۳/۵                                       | (۱)                 |
| ۲/۳۴            | ۱/۶۴            | ۱/۱۰            | ۲                  | ۰/۰۵          | ۴۲/۱                                       | (۲)                 |
| ۲/۶۰            | ۱/۸۳            | ۱/۱۴            | ۳                  | ۰/۰۵          | ۶۸/۷                                       | (۳)                 |
| ۲/۶۶            | ۲/۰۳            | ۱/۳۸            | ۴                  | ۰/۰۵          | ۸۸/۷                                       | (۴)                 |
| ۲/۷۳            | ۲/۱۵            | ۱/۴۴            | ۶                  | ۰/۰۴          | ۱۲۵/۳                                      | (۵)                 |

سرعت نهایی را نشان می‌دهد که از ۵/۷۰ تا ۶/۷۸ متر بر ثانیه متغیر است.

نتایج سناریوی دوم با فرض سقوط قطرات شبیه‌سازی شده بدون سرعت اولیه (حذف عامل فشار آب)، نشان داد که در این حالت سرعت سقوط قطرات در شدت‌های مختلف به ۹۶ تا ۹۹ درصد سرعت حد آنها (حاصل از سناریوی اول) می‌رسد. به عبارتی حتی اگر قطرات فاقد سرعت اولیه باشند، حین برخورد با سطح فلوم، سرعتی بسیار نزدیک به سرعت حد خود پیدا می‌کنند. با در نظر گرفتن فشار آب وارد بر قطرات و پاشش آنها با سرعت اولیه، فرض مربوط به سناریوی اول (رسیدن قطرات به سرعت حد) قابل قبول می‌گردد.

با توجه به نتایج بدست آمده، میانه قطر قطرات شبیه‌سازی شده بین ۱/۶۴ تا ۲/۱۵ میلی‌متر بر حسب فشار و آرایش نازل‌ها متغیر بود. حداکثر قطر قطرات باران مشاهده شده در طبیعت ۶ تا ۶/۲ میلی‌متر است [۱۸] و [۸]. در سیستم GUTSR شبیه‌سازی با استفاده از شش نازل افشانه‌ای<sup>۱</sup> دهانه‌گشاد انجام می‌شود که در شدت ثابت ۱۰۰ میلی‌متر در ساعت از ارتفاع نه متر، قطراتی با قطر میانه ۲/۲۴ میلی‌متر تولید می‌گردد [۱۶]. توزیع قطر قطرات باران‌سازهای استفاده شده توسط Meyer و Harmon [۱۵] و Loch و Foley [۶] از یک تا حدود ۵ میلی‌متر با حداکثر فراوانی در قطر ۲ تا ۳ میلی‌متر بوده و همانند باران، دامنه وسیعی از قطرات با قطرهای متفاوت را تولید می‌کردند. Cerda و همکاران (۱۹۹۷) با شبیه‌سازی باران با شدت ۵۷/۱ میلی‌متر در ساعت تحت فشار ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، میانه اندازه قطرات ۲/۴۹ میلی‌متر را گزارش نمودند.

#### ۴- سرعت و انرژی جنبشی بارش

جدول (۳) سرعت و انرژی جنبشی برآورد شده را برای پنج بارش منتخب نشان می‌دهد. بر اساس سناریوی اول، با توجه به تحت فشار بودن آب سیستم و ارتفاع قابل توجه صفحه بارش، می‌توان فرض کرد که قطرات به سرعت حد می‌رسند. با این فرض و با استفاده از جدول Laws به نقل از Bubenzer [۴] و همچنین میانه قطر قطرات، سرعت حد در شدت‌های منتخب برآورد گردید. جدول (۳) این مقادیر

1-Spray nozzle

جدول (۳) سرعت و انرژی جنبشی باران در پنج بارش منتخب

| شماره بارش منتخب | متوسط شدت بارش<br>(mm h <sup>-1</sup> ) | میانۀ قطر قطرات<br>(mm) | سرعت برخورد با سطح فلوم<br>(۱)<br>(m sec <sup>-1</sup> ) | انرژی جنبشی باران (۲)<br>(J m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---|-------------------------|--|--|
| (۱)              | ۳۳/۵                                    | ۱/۹۵                    | ۶/۳۹   | ۲۰/۴۳  |
| (۲)              | ۴۲/۱                                    | ۱/۶۴                    | ۵/۷۰   | ۱۶/۲۴  |
| (۳)              | ۶۸/۷                                    | ۱/۸۳                    | ۶/۱۴   | ۱۸/۸۴  |
| (۴)              | ۸۸/۷                                    | ۲/۰۳                    | ۶/۵۵   | ۲۱/۴۷  |
| (۵)              | ۱۲۵/۳                                   | ۲/۱۵                    | ۶/۷۸   | ۲۲/۹۷  |

(۱) با فرض رسیدن قطرات به سرعت حد

(۲) با استفاده از معادله  $E = \frac{1}{2} MV^2$  محاسبه شده است.

فشار آب در یک ترکیب مشخص از چیدمان نازلها، شدت بارش افزایش می‌یابد در حالیکه، میانۀ قطر قطرات و همچنین سرعت و انرژی جنبشی برآوردی کاهش نشان می‌دهد. سرعت برآوردی سقوط نهایی و همچنین انرژی جنبشی باران شبیه‌سازی شده برای شدت‌های مختلف، به ترتیب بین ۵/۷۰ تا ۶/۷۸ متر بر ثانیه و ۱۶/۲۴ تا ۲۲/۹۷ ژول بر متر مربع در میلی‌متر باران است.

#### مراجع

- ۱- روحی‌پور، ح.، جوادی پ. و محبوبی، ع. ا. ۱۳۸۴. تأثیر سنگریزه بر روی فرسایش و رسوب دو نوع خاک با استفاده از فلوم و شبیه‌سازی باران. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۶-۹ شهریور. تهران. ۷۱۶-۷۲۱.
- ۲- محمودآبادی، م. ۱۳۸۲. پهنه‌بندی خطر فرسایش در حوزه آبخیز گل‌آباد اردستان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک سنجش از دور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران. ۱۴۳ صفحه.

3- Blanquies, J., M. Scharff, and B. Hallock. 2003. The design and construction of a rainfall simulator. International Erosion Control Association (IECA), 34th Annual Conference and Expo. Las Vegas, Nevada.

مطابق جدول (۳) انرژی جنبشی باران در بارش‌های منتخب بین ۱۶/۲۴ تا ۲۲/۹۷ ژول بر متر مربع در میلی‌متر باران محاسبه گردید. میانۀ قطر قطرات بارش (۲) نسبت به بارش (۱) کوچکتر است لذا، سرعت سقوط نهایی کمتری دارند. به همین خاطر به رغم شدت بیشتر آن، انرژی جنبشی کمتری را نشان می‌دهد. 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 دارند. با افزایش تعداد نازل‌های فعال در یک فشار ثابت، به علت تولید قطرات درشت‌تر که سرعت سقوط بیشتری نیز دارند، انرژی جنبشی باران افزایش می‌یابد.

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق واسنجی شدت و توزیع مکانی بارش در جهت دستیابی به شدت‌های مطلوب و نیز محاسبه توزیع اندازه قطرات در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مورد بررسی قرار گرفت. این سیستم قادر به شبیه‌سازی باران در شدت‌های مختلف بین ۳۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر در ساعت با ضریب یکنواختی بیش از ۹۰٪ می‌باشد. میانۀ حجمی قطر قطرات باران شبیه‌سازی شده به روش گلوله آردی بین ۱/۶۴ تا ۲/۱۵ میلی‌متر تعیین شد. افزایش تعداد نازل‌های فعال در یک فشار ثابت، افزایش میانۀ قطر قطرات را به دنبال دارد. با افزایش

- 4- Bubenzer, G. D. 1979. Rainfall characteristics important for simulation. Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop, Tucson, Arizona, US, 22-34.
- 5- Carter Cade, E., J. D. Greer, H. J. Braud, and J. M. Floy. 1974. Raindrop characteristics in south central United States. Trans. ASAE. 17: 1033-1037.
- 6- Cerda, A., S. Ibanez, and A. Calvo. 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. Soil Tech. 11: 163-170.
- 7- Duley, F. L. and O. E. Hays. 1932. The effect of the degree of slope on runoff and soil erosion. J. Agr. Res. 45: 349-360.
- 8- Eigel, J. D. and I. D., Moore, 1983. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. Trans. ASAE. 26: 1079-1084.
- 9- Hall, M. J. 1970. Use of the stain method in determining the drop- size distribution of coarse liquid sprays. Trans. ASAE. 13: 33-37, 41.
- 10- Kohl, R. A. and D. W. DeBoer. 1984. Drop size distribution for a low pressure spray type agricultural sprinkler. Trans. ASAE. 27: 1836-1840.
- 11- Kinnell, P. I. A. 1981. Rainfall intensity-kinetic energy relationships for soil loss prediction. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 153-155.
- 12- Loch, R. J. and J. L. Foley. 1994. Measurement of aggregate breakdown under rain: Comparison with tests of water stability and relationship with field measurements of infiltration. Aust. J. Soil Res. 32: 701-702.
- 13- Mahmoodabadi, M. and H. G. Rafahi. 2006. Evaluation of interrill erosion rate using rainfall simulation in comparison to the WEPP. The 2nd International Symposium on Soil Erosion and Dry-land Farming. Yangling, Shaanxi, China. Session 7-1, 97.
- 14- Meyer, L. D. 1994. Rainfall simulators for soil conservation research. In Lal, R. Soil Erosion Research Methods (ed.), Soil and Water Conserv. Soc. Ankeny, Iowa. 83-103
- 15- Meyer, L. D. and W. C. Harmon. 1979. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row side slopes. Trans. ASAE. 22: 100-103.
- 16- Misra, R. K. and C. W. Rose. 1995. An examination of the relationship between erodibility parameters and soil strength. Aust. J. Soil Res. 33: 715-732.
- 17- Moore, I. D., M. C. Hirschi, and B. J. Barfield. 1983. Kentucky rainfall simulator. Trans. ASAE. 23: 1085-1089.
- 18- Morgan, R. P. C., 1995. Soil Erosion and Conservation. Second Ed., Silsoe College Canfield, Longman. 198.
- 19- Munn, J. J. R. and G. L. Huntington. 1976. A portable rainfall simulator for erodibility and infiltration measurements on rugged terrain. Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 622-624.
- 20- Mutchler, C. K. and L. F. Hermsmeier. 1965. A review of rainfall simulators. Trans. ASAE. 8: 67-68.
- 21- Poesen, J., F. Ingelmo-Sanchez, and H. Mucher. 1990. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragment in the top layer. Earth Surf. Processes Landforms, 15: 653-671.
- 22- Shangzhi, S., G., Hegao, G., Wenmao, N. Chenghuan, and S. Jingquan. 1989. Large- scale movable field rainfall simulator. Forth International Symposium on River Sedimentation. Beijing, China. 184-91.
- 23- Shelton, C. H., R. D. Von Bernuth, and S. P. Rajbhandari. 1985. A continuous- application rainfall simulator. Trans. ASAE. 28: 1115-1119.
- 24- Solomon, K. 1979. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. Trans. ASAE. 22: 1078-1080, 1086.
- 25- Veihe, A., J. Rey, J. N. Quinton, P. Strauss, F. M. Sancho, and M. Somarriba. 2001. Modelling of event based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: Evaluation of the EUROSEM model. Catena, 44: 187-203.
- 26- Victora, C., A. Kacevas, and H. Fiori, 1998. 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. Paper No. 1041.