

فعال و غیر فعال و هم‌چنین تغییر دامنه‌ی فشار بهینه بوده است.

کلید واژه‌ها: اقلیم مازندران، توزیع قطری قطرات، روش عکس‌برداری سرعت بالا، شبیه‌سازی باران، فشار بهینه.

مقدمه

شبیه‌سازی باران^۱ یک ابزار مفید در تحقق اهداف پژوهشی می‌باشد و معمولاً برآورد فرسایش با استفاده از این روش در مقایسه با سایر روش‌های مطالعه فرسایش خاک به واقعیت نزدیک تر می‌باشد [۴۰]. دستگاه باران‌ساز به‌عنوان مهم‌ترین وسیله شبیه‌سازی اجزای مختلف چرخه هیدرولوژی، به خصوص باران و روان‌آب ناشی از آن در اولین مراحل شکل‌گیری فرآیند فرسایش خاک شناخته شده است. علاوه بر آن برای تحقیقات دقیق آزمایشگاهی در فرآیندهای نفوذ، روان‌آب و فرسایش به آسانی قابل تطبیق می‌باشد [۳۲]. افزایش سرعت اجرای طرح‌های تحقیقاتی و کنترل پذیری متغیرهای بارندگی دو مزیت عمده و مهم شبیه‌سازی باران به‌شمار می‌روند. به دلیل قابلیت کنترل، تکرار و انعطاف پذیری بیش‌تر شرایط حاکم بر آزمایش‌ها نسبت به باران‌های طبیعی [۲۳ و ۲۴]، محققان قادرند رگبارهای نادر را شبیه‌سازی نموده و اندازه‌گیری‌های غیرممکن و یا سخت مربوط به یک رگبار طبیعی را با دقت قابل قبول انجام دهند [۲۹ و ۳۴]. ولی توجه به این نکته ضروری است که هرگز نمی‌توان تمام خصوصیات باران طبیعی را به‌طور دقیق شبیه‌سازی نمود [۳۲]. علی‌رغم کمبودهای وارد بر شبیه‌سازهای باران، استفاده از این ابزار، جزء کاربردی‌ترین روش‌های در دسترس برای مطالعات صحرایی بارش، روان‌آب و فرآیندهای فرسایش در بسیاری از موقعیت‌ها می‌باشد [۶]. در طراحی باران‌ساز بایستی تمام خصوصیات فیزیکی باران طبیعی با حداکثر دقت ممکن شبیه‌سازی شود. از جمله معیارهای اصلی مورد توجه در شبیه‌سازی می‌توان به توزیع اندازه قطرات [۸، ۹ و ۱۷، ۴۴]، سرعت برخورد قطرات [۸، ۱۸، ۱۹ و ۲۹]، شدت بارش یک نواخت و توزیع تصادفی اندازه قطرات [۸، ۱۸ و ۲۲، ۴۲]، یکنواختی بارش در کل پلات آزمایشی [۸، ۴۳]، زاویه عمودی برخورد قطره به سطح پلات [۸، ۳۲ و ۳۷]، بازسازی الگوی رگبار در شدت و تداوم معنی‌دار [۸، ۲۷ و ۳۲] اشاره کرد.

4. Rainfall simulator

تغییرپذیری خصوصیات باران شبیه‌سازی شده از تغییر دبی و فشار پمپ

زهرا عبداللهی^۱، سید حمیدرضا صادقی^۲ و عبدالواحد خالدی‌درویشیان^۳
تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

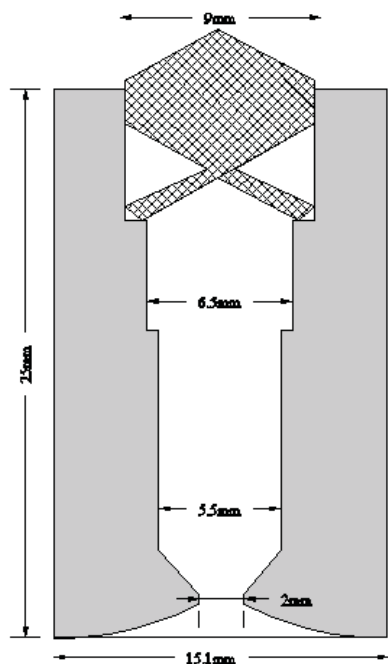
چکیده

سرشت غیرقابل پیش‌بینی و تصادفی باران، شرایط مطالعه آن را دشوار می‌سازد. لذا ساخت و طراحی شبیه‌سازی باران مناسب برای شرایط حاکم بر هر منطقه از کشور با قابلیت کاربرد زیاد ضروری است. با این وجود واسنجی شرایط مناسب انجام شبیه‌سازی‌های باران و تعیین شرایط بهینه حاکم بر آن‌ها کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، گروه مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس اقدام به طراحی و ساخت سامانه بزرگ شبیه‌سازی باران به همراه نازل‌های مناسب و قابل نصب برای شبیه‌سازی باران متناسب با شرایط اقلیمی استان مازندران نمود. در تحقیق حاضر، امکان‌سنجی تولید بارش شبیه‌سازی شده با شدت‌های دلخواه از طریق تغییر دبی، فشار پمپ و چپش نازل‌های مورد استفاده در سامانه مذکور و هم‌چنین اثر تغییر فشار و دبی ورودی به سامانه بر تغییر شدت بارش، اندازه قطرات و یکنواختی بارش در سطح پلات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات نشان داد که تغییر فشار پمپ اثر معنی‌داری بر خصوصیات باران شبیه‌سازی شده دارد. علاوه بر آن، نتایج حاصل از عکس‌برداری سرعت بالا نشان داد که توزیع قطری و سرعت قطرات شبیه‌سازی شده در دامنه فشار ۱۰ تا ۵۰ کیلوپاسکال، توسط نازل ساخته شده، به ترتیب بین ۰/۵ تا ۴/۷ میلی‌متر و ۴/۸ تا ۹ متر بر ثانیه ثبت شد. هم‌چنین نتایج حاصل از طراحی و چپش شبکه نازل‌ها حاکی از قابلیت شبیه‌سازی دامنه شدت‌های ۳۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت با ضریب یکنواختی ۸۰ تا ۹۵ درصد در کل سطح ۴۲ متر مربعی از طریق ترکیب ۲۷ نازل

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس

۲- نویسنده مسئول و استاد گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس. sadeghi@modares.ac.ir

۳- استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۲- شمایی از نازل طراحی شده Apd4

Fig 2. A schematic view of designed nozzle, Apd4

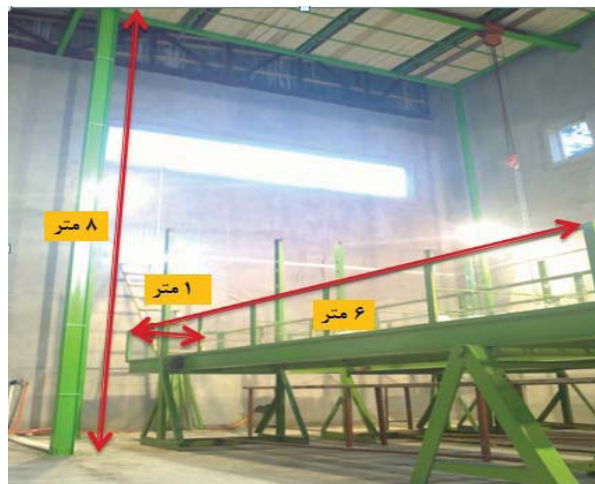
ضمن تعیین فشار بهینه عملکرد برای سامانه شبیه ساز، قابلیت تغییرپذیری خصوصیات سامانه از قبیل تغییر فشار پشت نازل، دبی ورودی به سامانه، تعداد نازل‌های فعال و نحوه چینش آن‌ها و همچنین چگونگی تأثیرگذاری هر یک بر خصوصیات باران شبیه سازی شده را مورد آزمون قرار دهد. طبیعی است نتایج حاصل به واسطه ی تعیین وضعیت بهینه ی حاکم بر تنظیم اجزای مختلف سامانه ی باران ساز، زمینه ساز دست یابی به شبیه سازی‌های قابل اعتماد در شرایط آزمایشگاهی خواهد بود.

مواد و روش ها

شبیه ساز بزرگ باران دانشگاه تربیت مدرس شبیه ساز بزرگ باران با سه پلات به ابعاد ۶ در ۱ متر، عمق نیم متر، ارتفاع بارش بالغ بر ۶ متر، فلوم با قابلیت تغییر شیب از صفر تا ۳۰ درصد، امکان مطالعات نشت و نفوذ در خاک‌های مختلف مستقر بر لایه‌های زهکشی ایجاد شده، ورود روان آب از بالادست کرت‌ها در سه تکرار و حریم نیم متر با استفاده از صفحات فلزی، گالوانیزه و با قاب فلزی در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس ساخته شده است. شکل ۱ آزمایشگاه شبیه ساز باران دانشگاه تربیت مدرس و ابعاد پلات‌های مذکور را نشان می‌دهد.

نازل‌های ساخته شده

علاوه بر آزمون نازل‌های موجود در کشور و همچنین ضرورت دستیابی به نازل‌های مناسب و طبعاً امکان شبیه سازی باران‌های طبیعی، مبادرت به طراحی و ساخت نازل با استفاده از استوانه‌های آکرولیک فشرده با قطرهای ۱ و ۱/۵ سانتی متر و موجود در بازار شد [۳]. در شکل ۲ شمایی از نازل طراحی و بهینه شده با علامت



شکل ۱- آزمایشگاه شبیه ساز باران دانشگاه تربیت مدرس

Fig 1. Rainfall simulator laboratory of Tarbiat Modares University

دامنه وسیع خصوصیات مختلف باران محققان را ملزم به ساخت سامانه‌های شبیه ساز با قابلیت تغییرپذیری در خصوصیات جریان ورودی به سامانه نموده است. لذا گزارش‌های متعددی مبنی بر تغییر خصوصیات بارش از طریق تغییر در دبی ورودی به سامانه، فشار پمپ، نوع نازل، تعداد، نحوه چینش و فعالیت نازل‌ها موجود است که پایه طراحی‌ها و مطالعات بعدی قرار می‌گیرند [۴، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۴، ۳۵، ۳۶ و ۴۱]. با توجه به بررسی‌های به‌عمل آمده، انواع مختلف شبیه ساز باران با خصوصیات مختلف در خارج از کشور طراحی و ساخته شده و دارای عملکرد متفاوت بوده است. به نحوی که انجام مطالعات، واسنجی و آزمون اطلاعات مرتبط با بارش‌های ایجاد شده در شبیه سازهای باران در هر منطقه تحقیقاتی و متناسب با شرایط اقلیمی حاکم بر آن‌ها ضروری بوده و در عین حال ارائه اطلاعات مرتبط با باران ایجاد شده به‌منظور امکان تعمیم نتایج حاصل از کاربرد آن‌ها در شرایط واقعی تأکید شده است. حال آن که تحقیقات در زمینه ی طراحی، ساخت و آزمون شبیه سازهای باران با قابلیت شبیه سازی دامنه وسیعی از خصوصیات باران طبیعی و همچنین نازل‌های مورد استفاده در شبیه سازی در داخل کشور مورد توجه قرار نگرفته و تنها به استفاده از شبیه سازهای وارداتی و یا ساخته شده مبتنی بر اجزای وارداتی پرداخته شده است. بنابراین از آن جایی که طراحی، ساخت و کاربرد نازل‌های قابل استفاده در باران سازها با توجه به شرایط حاکم بر کشور از ضروریات محسوب می‌شود، لذا گروه مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس اقدام به طراحی و ساخت سامانه بزرگ شبیه ساز باران و نازل‌های مناسب و قابل نصب جهت شبیه سازی باران متناسب با شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه مورد مطالعه نمود.

تحقیق حاضر در نظر دارد کارایی نازل ساخته شده با نام قراردادی Apd4 را در فشارهای مختلف بررسی نموده و

اختصاصی Apd4 نشان داده شده است.

در آزمون تک نازل از یک پایه با ارتفاع متغیر و حداکثر پنج متر استفاده شد. برای تعیین شدت بارش و توزیع مکانی آن در قاعده مخروط بارش برای هر نازل منفرد، از ظروف استوانه‌ای لبه تیز با قطر دهانه ۱۰ سانتی متر با فواصل ۲۰ سانتی متر بین مراکز آنها [۱۵]، استفاده شد.

مقدار و توزیع شدت در سطح مورد نظر، با اعمال بارش در فشارهای ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال و اندازه گیری آب جمع شده در ظروف در مدت ۱۵ دقیقه تعیین شد [۱۱ و ۲۵]. برای هر شدت بارش، شاخص‌های آماری شامل حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات محاسبه شد. برای ارزیابی یک نواختی زمانی و مکانی بارش نیز، ضریب یکنواختی کریستین سن^۱ (CC)، با استفاده از شدت اندازه‌گیری شده در هر ظرف (X_i)، شدت متوسط (m) و تعداد ظروف (n) طبق رابطه (۱) محاسبه شد [۶، ۲۸، ۲۹ و ۳۱].

$$CC = [1 - \sum_i^n |X_i - m| / m * n] \times 100 \quad (1)$$

در این پژوهش برای اندازه گیری قطر و توزیع قطری قطرات باران شبیه سازی شده، از روش عکس برداری با دوربین‌های سرعت بالا [۳۸] به واسطه دقت و کارایی بالا [۱] استفاده شد. تصاویر قطرات باران شبیه سازی شده در فشارهای مختلف، با استفاده از دوربین دیجیتال کانن^۲ با سرعت بالای ۱/۴۰۰۰ فریم در ثانیه و وضوح تصویر بالای ۱۸/۷ مگاپیکسل، ثبت شده و قطر افقی هر قطره، با دقت ۰/۱ میلی متر، اندازه گیری شد. سپس داده‌های فراوانی و اندازه قطرات، در جداول مربوطه گردآوری شد [۳۳]. هم‌چنین به منظور اطمینان از نزدیک به عمود بودن زاویه ی برخورد قطرات با سطح زمین، وضعیت تقارن، وسعت و یکنواختی پهنه ی مخروط ایجاد شده، تصاویر سرعت بالا از عملکرد نازل تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. سپس با مقایسه نتایج به دست آمده توسط لاوز^۳ اختلاف موجود بین سرعت تولید شده توسط نازل مورد نظر در این پژوهش و سرعت حد باران طبیعی بررسی شد [۲۵]. در نهایت، ترکیب نازل‌ها در کنار یکدیگر و هم‌چنین استفاده هم زمان از چندین نوع نازل برای دست یابی به دامنه‌ای از شدت‌های مختلف مورد توجه قرار گرفت. تمام آزمون‌های مرحله قبل در این مرحله نیز، برای تعیین خصوصیات باران شبیه سازی شده در محدوده تحت پوشش سامانه بارش، تکرار شد.

طراحی واحد کنترل مرکزی

انتخاب پمپ

انتخاب پمپ بر اساس مقدار دبی و فشار مورد نیاز صورت گرفت. فشار کل سامانه از مجموع فشار ثابت و فشار متغیر به دست آمد. با توجه به مساحت تحت پوشش سامانه و حداکثر

1. Christiansen
2. Canon
3. Laws

شدت پیش بینی شده برای شبیه سازی، حداکثر دبی مورد نیاز تعیین و سپس با توجه به آن و کاتالوگ‌های ارائه شده توسط شرکت‌های سازنده، نوع پمپ مورد نیاز مشخص شد.

انتخاب دبی سنج

برای اندازه گیری دبی با دقت بالا، از دبی سنج الکترومغناطیسی DN25 استفاده شد. زیرا علاوه بر داشتن دقت بالا و حساس نبودن به تغییرات فشار و دما، سرعت جریان سیال را بدون ایجاد مانع در مقابل جریان، از قشر خارجی لوله اندازه می‌گیرد. با توجه به اساس کار این نوع دبی سنج‌ها و ضرورت تحت فشار بودن جریان و پر بودن کامل مقطع هیدرولیکی لوله در آن‌ها، تغییر تدریجی قطر ورودی نیز انجام گرفت.

انتخاب فشارسنج

برای پایش تغییرات فشار در سامانه، از فشارسنج TG6bar صفحه نمایش گر ۱۰ سانتی متری، به سبب قیمت مناسب و دقت ۰/۲۵ بار، استفاده شد.

طراحی شبکه باران ساز

در طراحی شبکه باران ساز کلیه محدودیت‌های خاص به منظور برخورداری از کارایی بالاتر لحاظ شد [۳۹]. بنابراین پس از محاسبه پارامترهای هیدرولیکی طرح شامل حداکثر دبی مورد نیاز برای کل سطح، تعداد نازل‌ها، فاصله نازل‌ها، حداکثر دبی خروجی از هر نازل و حداکثر ارتفاع ریزش، سایر محدودیت‌های موجود در منابع، بازبینی و کنترل شد. دامنه محدودیت‌های موجود در منابع بیش‌تر تجربی بوده و بنابراین از موارد تجربی موجود، فقط در تخمین‌های اولیه و کنترل و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های هیدرولیکی استفاده شد. هم‌چنین حداکثر دبی مورد نیاز برای کل سطح، تعداد نازل‌ها و نیز حداکثر فاصله ی نازل‌ها به ترتیب از روابط ۵ تا ۷ استفاده شد [۳۸].

$$Q=AI \quad (5)$$

$$n = Q/q \quad (6)$$

$$d = L/l \quad (7)$$

که در آن Q حداکثر دبی مورد نیاز برای کل سطح (متر مکعب بر ساعت)، A مساحت تحت پوشش سامانه بارش (متر مربع)، I حداکثر شدت پیش بینی شده در شبیه سازی (میلی متر بر ساعت)، n تعداد نازل، q دبی هر نازل (متر مکعب بر ساعت)، L طول لوله ی فرعی و نهایتاً I حداکثر قطر سطح خیس شده (متر) می‌باشد.

تحلیل روابط بین متغیرهای بارش مصنوعی

در نهایت روابط دبی- فشار و قطر میانه- فشار در نرم‌افزار Excel 2007 نسخه ۲۰۰۷ بررسی و در قالب نمودارهای مربوطه ارائه و مقایسه بهینه دامنه‌های مورد نظر تعیین شد.

نتایج و بحث

مراحل آزمون ویژگی‌های باران

شدت باران شبیه سازی شده در فشارهای مختلف

در شبیه سازی باران متناسب با شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه

جدول ۱- شدت‌های شبیه سازی شده و درصد توزیع قطری قطرات تولید شده در فشارهای مختلف توسط نازل Apd4

Table 1. Simulated intensities and simulated drop size distribution in different pressures by nozzle Apd4

فشار عملکرد (کیلوپاسکال)				
Operating Pressure (Kp)				
100	50	30	10	
57.58	56.05	48.45	41.02	شدت بارش محاسبه شده (میلی متر بر ساعت) Calculated rain intensity (mm h ⁻¹)
طبقه قطری قطرات (میلی متر)				
Class of drop diameter (mm)				
43.42	35.82	26.83	13.16	< 0.5
23.68	29.83	24.02	21.05	0.5-1
19.74	13.14	14.61	24.67	1-1.5
13.16	18.43	19.96	14.47	1.5-2
0.00	0.87	6.16	9.21	2-2.5
0.00	1.42	4.66	11.53	2.5-3
0.00	0.35	2.91	3.95	3-3.5
0.00	0.03	0.00	1.63	3.5-4
0.00	0.00	0.85	0.02	4-4.5
0.00	0.1	0.00	0.32	4.5-5

سردا [۱۱]، کاورت و جردن [۱۴]، ایزرلو و همکاران [۴۱] و هم‌چنین محمودآبادی و همکاران [۲۵] در مطالعات خود به نتایج مشابه دست یافتند. این در حالی است که قطر میانه در شبیه ساز حاضر کم‌تر از مقدار گزارش شده ۲ تا ۳ میلی متر توسط گریسون و اداس [۱۸]، ۵/۷۱ تا ۵/۸۱ میلی متر توسط هاردواج و سینگ [۷]، ۲/۵۸ میلی متر توسط بتونی و گریسمر [۶] و ۲/۴ میلی متر توسط استوز و همکاران [۳۷] می‌باشد. توزیع قطری قطرات در محدوده ی ۰/۳ تا ۴/۷ میلی متر و بیش‌ترین فراوانی در محدوده ی قطری ۰/۳ تا ۲ میلی متر، در فشار ۱۰ کیلوپاسکال قرار گرفت. این در حالی است که سردا [۱۱] در آزمون ویژگی‌های باران شبیه سازی شده، ۳ میلی متر را به عنوان حداکثر قطر قطره ی ایجاد شده توسط نازل مورد استفاده در شبیه ساز ارائه نمودند. در حالی که بلنکوایز و همکاران [۸] حداکثر قطر قطره تولید شده در شبیه ساز باران خود را ۷ و با میانه ی قطری ۱/۷۱ میلی متر اعلام کردند. هم‌چنین ایزرلو و همکاران [۴۱] در مطالعات خود بر روی چندین شبیه ساز باران در اروپا ۶/۵ میلی متر را حداکثر قطر باران تولید شده توسط شبیه ساز WA و ۰/۳۷ میلی متر را حداقل قطر باران تولید شده توسط شبیه ساز LR دانستند. نتایج موجود در جدول ۱ حاکی از آن است که با افزایش فشار شدت بارش افزایش می‌یابد که با اظهارات کادال و همکاران [۲۱] مطابقت دارد. هم‌چنین دامنه ی قطری قطرات ایجاد شده در فشارهای مختلف نیز متفاوت است. به‌نحوی که آنالیز آماری داده‌های به‌دست آمده اختلاف معنی داری بین تغییرات فشار با تغییرات شدت بارش و هم‌چنین اندازه قطرات در سطح پنج درصد

مورد مطالعه، ویژگی‌های باران از قبیل شدت، مدت و توزیع زمانی و مکانی در اقلیم مورد نظر بررسی شد. در این راستا شدت‌ها و تداوم‌های مهم از نظر تولید روان آب و ایجاد فرسایش مورد توجه قرار گرفت. بر همین اساس در جدول ۱ شدت‌های شبیه سازی شده توسط نازل Apd4 به صورت تک نازل، در فشارهای مختلف محاسبه و ارائه شده است.

اندازه و توزیع اندازه قطرات باران شبیه سازی شده تخمین اندازه قطرات تولید شده توسط نازل Apd4 با استفاده از روش عکس‌برداری صورت گرفت. نتایج ارزیابی حاصل از پردازش تصویر توزیع قطری قطرات تولید شده توسط نازل Apd4 در جدول ۱ نشان داده شده است.

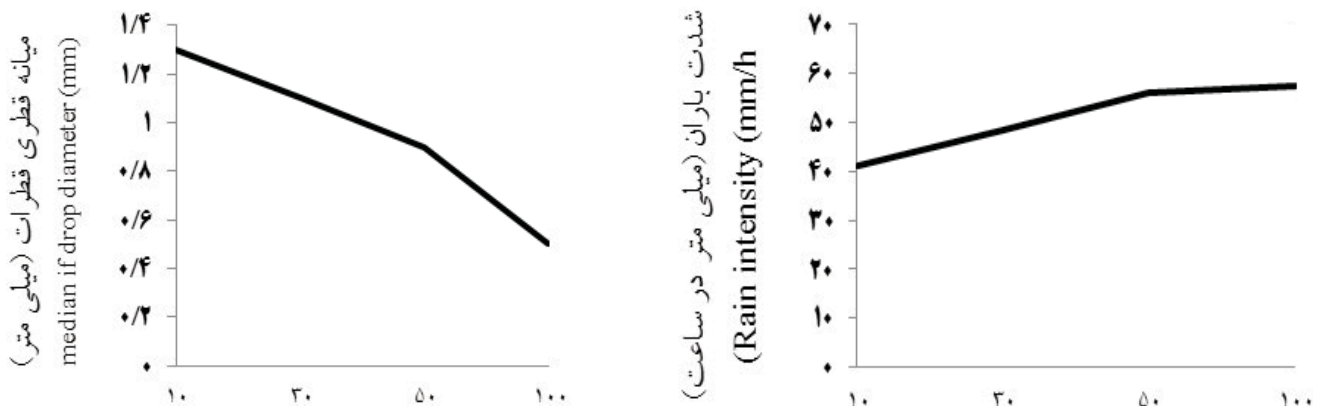
از آن جایی که محدوده ی قطری قطرات باران طبیعی بین ۰/۱ تا ۵ میلی متر گزارش شده است [۲۶ و ۴۵]، لذا اندازه قطرات ایجاد شده طی پژوهش فعلی با مقادیر گزارش شده در باران طبیعی مطابقت دارد. همان طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود میانه ی قطری قطرات در فشار ۱۰ کیلوپاسکال در طبقه قطری ۱ تا ۱/۵ میلی متر و هم‌چنین در فشارهای ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال در محدوده ی قطری ۰/۵ تا ۱ میلی متر قرار گرفت که با نتایج تحقیقات نازیاک و همکاران [۲۲] مبنی بر تخمین میانه قطری قطرات باران شبیه سازی شده در شدت ۲/۲۵ تا ۱۰۲ میلی متر بر ساعت در محدوده ی قطری ۰/۵۳ تا ۱/۴۵، مطابقت دارد. از طرفی قطرات با قطر کم‌تر از یک میلی متر در هر سه فشار بیش‌ترین فراوانی را به خود اختصاص دادند.

یکدیگر را می‌توان دلیل متلاشی شدن قطرات و کاهش ابعاد آن‌ها دانست. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون ویژگی‌های باران شبیه سازی شده در این پژوهش، محدوده ی فشار کم‌تر از ۵۰ کیلوپاسکال به لحاظ تولید قطراتی با اندازه و توزیع مشابه تر و دارا بودن تطابق بیشتر با خصوصیات باران طبیعی منطقه مورد مطالعه (عبداللهی و همکاران [۲])، به‌عنوان محدوده ی فشار بهینه برای نازل مورد استفاده در شبیه ساز باران موردنظر انتخاب شد.

سرعت قطرات باران شبیه سازی شده

نظر به عملکرد نسبی به‌تر نازل Apd4 و فشار عملکرد ۱۰ کیلوپاسکال در ایجاد قطر و شدت مناسب بارندگی، سایر کنترل‌های لازم تنها در خصوص این نازل صورت گرفت. به همین منظور سرعت قطرات در حال سقوط در فاصله ی نیم متری از سطح زمین نیز با استفاده از روش عکس‌برداری با سرعت بالا اندازه‌گیری و نتایج حاصل از تحلیل یک نمونه از قطرات ایجاد شده و توزیع اندازه و سرعت قطرات به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، سرعت قطره در

را تأیید نمود. روند تغییرات مزبور و همچنین نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ و جدول ۲ نشان داده شده است افزایش شدت بارش به گونه‌ای بود که با افزایش فشار بیش‌تر از ۵۰ کیلوپاسکال اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. حداقل شدت بارش در فشار ۱۰ کیلوپاسکال و حداکثر آن در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال محاسبه شد. علت این امر را می‌توان به افزایش دبی خروجی از نازل در اثر افزایش فشار نسبت داد که با اظهارات سردا [۱۱] مبنی بر وجود رابطه عکس بین فشار و شدت باران مطابقت نداشت. در حالی که با نتایج گزارش شده توسط کادال و همکاران [۲۱] مشابه می‌باشد. از طرفی اندازه قطرات با افزایش شدت، کاهش معنی‌داری را نشان دادند. به گونه‌ای که در فشار ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال اختلاف اندازه قطرات با یکدیگر معنی‌دار شد که با اظهارات گریسون و اداس [۱۸] مطابقت دارد. در حالی که کاهش اندازه قطرات با افزایش فشار از ۳۰ به ۵۰ کیلوپاسکال معنی‌دار نبود. افزایش سرعت جریان و به تبع آن افزایش برخورد قطرات با



شکل ۳- تغییرات شدت بارش در فشارهای مختلف (راست) و تغییرات اندازه قطرات باران شبیه سازی شده در فشارهای مختلف در نازل Apd4 (چپ)

Fig 3. Variations of rain intensity in different pressures (right), variation of drop size of simulated rainfall in different pressures in nozzle Apd4 (left)

جدول ۲- تجزیه آماری اثر تغییرات فشار بر تغییرات شدت بارش و اندازه قطرات با استفاده از آزمون توکی

Table 2. Statistical analysis of effect of pressure variation on rain intensity variation and drop size using Tukey Test

سطح معنی داری Significant value	آماره F F Index	فشار (کیلوپاسکال) Pressure (Kp)				
		100	50	30	10	
0.00	81.32	0.72)a55.63	1.55)a55.79	1.00)b)48.45	38.38(2.44)c	میانگین شدت بارش (میلی متر بر ساعت) Mean of rain intensity (mm h ⁻¹)
000.	27.12	0.1)c)0.4	0.06)cb)0.83	0.1)b)1.00	1.33 (0.2)a	میانگین قطر قطرات (میلی متر) Median of drop diameter (mm)

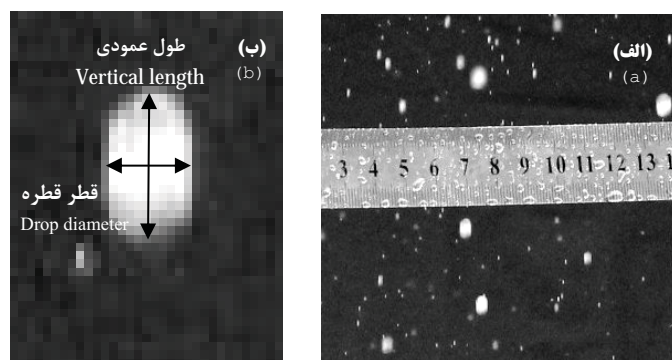
نکته: اعداد داخل پرانتز نشان گر مقادیر انحراف معیار داده‌ها می‌باشد.

Figures in parentheses denote standard deviation of data.

قطره ۷/۳۶ متر در ثانیه محاسبه شده در این پژوهش، مشابهت زیادی به مقادیر ارائه شده توسط، کستین و گیلومر [۱۳]، گریسون و اداس [۱۸] و اپما و ریزیس [۱۶] دارد. در حالی که هاردواج و سینگ [۷] سرعت برخورد ۵/۷۱ متر بر ثانیه را برای بزرگ ترین قطره شبیه سازی شده با قطر ۵/۸۱ میلی متر از ارتفاع ۱/۴ متر گزارش نمودند.

زاویه ی برخورد قطرات با سطح زمین برای اندازه گیری زاویه برخورد قطرات باران با سطح زمین از عکس برداری از حاشیه مخروط بارش و محاسبه زاویه برخورد قطره با سطح زمین استفاده شد. با بررسی تصاویر تهیه شده مخروط بارش تولید شده توسط نازل Apd4 در فضای اتوکد نسخه ۲۰۱۰ بازسازی

فاصله ی نیم متری از سطح زمین در محدوده ی ۴/۸ تا ۹ متر در ثانیه متناسب با افزایش قطر قطرات محاسبه شد که با نتایج کاتیراولو و همکاران [۴۲] مطابقت دارد. سرعت سقوط برای قطر میانه، ۶/۴ متر در ثانیه بوده که با توجه به نتایج ارائه شده توسط لاوز به نقل از گریسون و اداس [۱۸]، به سرعت حد باران طبیعی نزدیک است، هر چند در محدوده ی قطری بالاتر از ۲/۵ میلی متر سرعت سقوط قطرات، کم تر از سرعت حد قطرات با ابعاد مشابه در باران طبیعی بوده است. در هر حال علی رغم این که سرعت ۱۷/۴۵ درصد از قطرات باران شبیه سازی شده در هنگام برخورد با سطح پلات کم تر از سرعت حد قطرات باران طبیعی است، ولی متوسط سرعت سقوط



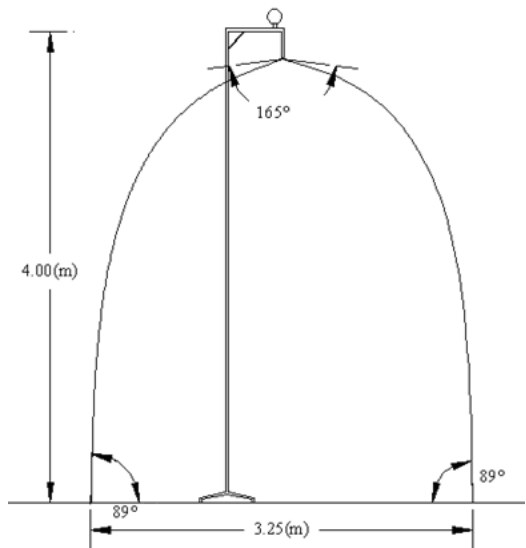
شکل ۴- نمونه ای از قطرات شبیه سازی شده طی آزمایش (الف) و مؤلفه های اصلی اندازه گیری شده یک قطره (ب)

Fig. 4. Sample of simulated drops during test processing (a) and main measuring parameters of one drop (b)

جدول ۳- توزیع اندازه و سرعت سقوط قطرات در نازل Apd4 با فشار عملکرد ۱۰ کیلو پاسکال

Table 3. Size distribution and velocity of falling drops in nozzle Apd4 with operating pressure of 10 Kp

سرعت سقوط قطره (متر در ثانیه) Drop falling velocity (m s ⁻¹)	متوسط مقدار کشیدگی قطره در حین سقوط (میلی متر) Mean of drop kurtosis through falling (mm)	متوسط طول عمودی قطره (میلی متر) Mean of veridical length of drop (mm)	طبقه قطری قطرات (میلی متر) Class of drop diameter (mm)
4.8	2.4	2.9	<0.5
5.2	2.6	3.6	0.5-1
6.4	3.2	4.7	1-1.5
7.0	3.5	5.5	1.5-2
7.8	3.9	6.4	2-2.5
8.0	4.0	7.0	2.5-3
8.2	4.1	7.6	3-3.5
8.4	4.2	8.2	3.5-4
8.8	4.4	8.9	4-4.5
9.0	4.5	9.5	4.5-5



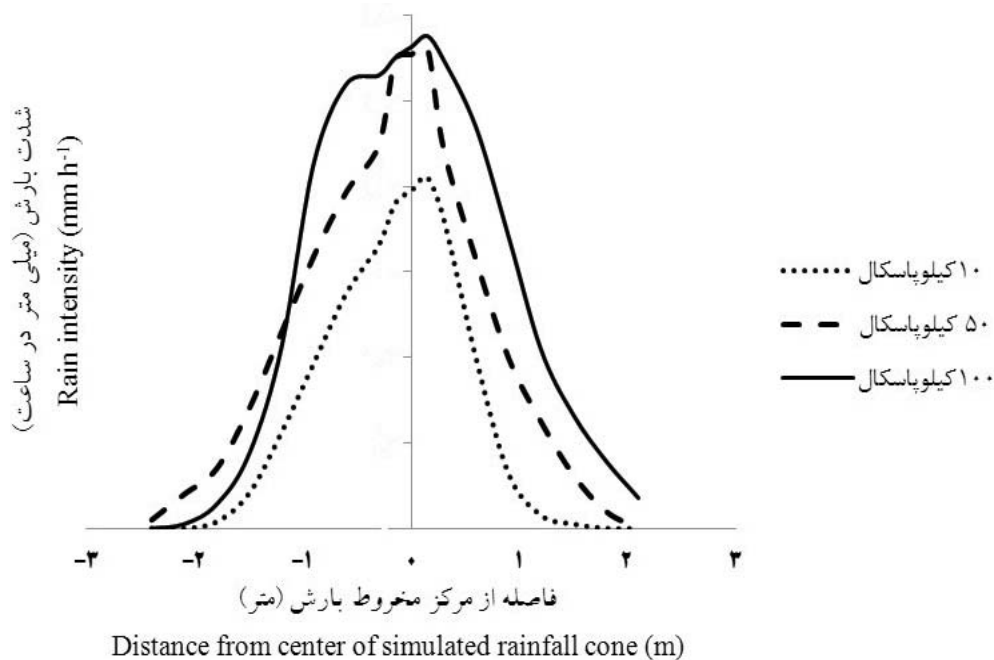
شکل ۵- مخروط بارش تولید شده توسط نازل Apd4
 Fig 5. Cone of simulated rainfall by Nozzle Apd4

افزایش می‌یابد. به منظور کمی کردن تغییرات مقدار آب جمع شده در ظروف نمونه‌برداری از ضریب تغییرات استفاده شد. هم‌چنین ضریب یکنواختی با استفاده از رابطه کریستین سن (رابطه ۱) برای هر یک از فشارهای مذکور به منظور بررسی یکنواختی در سطح پلات به صورت جداگانه محاسبه و در جدول ۴ ارائه شد. بعد از بررسی نتایج، در فشار ۱۰ کیلوپاسکال بیش‌ترین و در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال کم‌ترین مقدار ضریب تغییرات مشاهده شد. محدوده ی ضریب یکنواختی در مطالعه حاضر در آزمون تک نازل بین ۸۲ تا

و ترسیم شد. با توجه به زاویه کل نزول ۱۶۵ درجه و با استفاده از روابط مثلثاتی قطر محاسباتی مخروط بارش در نازل مذکور برابر با ۶۰/۷۶ متر و قطر سطح خیس شده برابر با ۳/۲۵ متر ناشی از ریزش باران از ارتفاع ۴ متری بود. اختلاف مذکور، نزدیک به عمود بودن زاویه برخورد قطرات به سطح زمین را تأیید می‌کند که با توجه به نتایج ارائه شده توسط سودهیر و پاندا [۳۷] این زاویه ی برخورد در بارش شبیه سازی شده قابل قبول می‌باشد.

یکنواختی باران شبیه سازی شده

به سبب اهمیت توزیع زمانی و مکانی بارش در حین انجام آزمایش، در این مطالعه با استفاده از ظروف استوانه‌ای لبه تیز با سطح مقطع ۷۸۵۰ میلی متر مربع در بازه ی زمانی ۱۵ دقیقه، شدت باران به صورت نسبتی از حجم بارش جمع شده در ظرف نمونه‌برداری بر مساحت ظرف در مدت زمان یک ساعت محاسبه شد. نمودار توزیع شدت بارش تک نازل Apd4 روی محور فرعی با فاصله از مرکز قاعده مخروط بارش، در سه فشار عملکرد ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال، در شکل ۶ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود شدت بارش دریافتی در مرکز مخروط بارش در هر سه فشار عملکرد در حداکثر مقدار خود بوده و با دور شدن از مرکز در شعاع قاعده مخروط بارشی، تراکم قطرات باران و به تبع آن شدت باران شبیه سازی شده کاهش می‌یابد. این کاهش شدت در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال تا شعاع حدوداً یک متر از مرکز قاعده مخروط بارشی کم‌تر از دو فشار ۱۰ و ۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد. هم‌چنین با توجه به شکل مشاهده می‌شود که شدت بارش با افزایش فشار



شکل ۶- نمودار توزیع یکنواختی شدت بارش تک نازل به ترتیب در سه فشار عملکرد ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال
 Fig 6. Graph of uniformity distribution of rain intensity created by single nozzle in 3 operating pressures of 10, 50 and 100 Kp

توجه به این که حداقل سطح پوشش نازل‌ها متعلق به فشار عملکرد ۱۰ کیلوپاسکال می‌باشد، لذا به‌عنوان بحرانی ترین فشار عملکرد جهت کنترل یکنواختی شدت در طول پلات در نظر گرفته شد. تغییر روند کاهشی مطابق جدول ۵ ادامه یافت تا در فاصله ۱/۶ و ۱/۵ متر، ضریب یکنواختی به ترتیب برابر با ۸۶/۶۷ و ۸۴/۷۵ درصد در فشار ۱۰ کیلوپاسکال محاسبه شد. بنابراین مشاهده شد که با ادامه ی روند کاهشی با تعداد نازل یکسان، ضریب یکنواختی کاهش می‌یابد. هم‌چنین در فاصله ۱/۶ متر نیز در افزایش ضریب یکنواختی، تغییر قابل توجهی مشاهده نشد. لذا فاصله ی ۱/۷ متر با ضریب یکنواختی قابل قبول ۸۶/۲۲ درصد (محمودآبادی و همکاران [۲۵]) به‌عنوان فاصله بهینه جهت نصب نازل‌ها انتخاب شد. حال به‌منظور افزایش شدت بارش از شبکه ی نازل‌های فرعی مستقر بین نازل‌های اصلی استفاده شد. به گونه‌ای که چهار نازل اصلی قادر به تولید باران در دامنه شدت‌های ۳۰ تا ۶۰ میلی متر بر ساعت به ترتیب در فشارهای ۱۰ تا ۵۰ کیلوپاسکال می‌باشند و شدت‌های بیش‌تر مستلزم به‌کارگیری پنج نازل فرعی در فواصل بین چهار نازل اصلی و طرفین آن‌ها به‌منظور ایجاد هم‌پوشانی مخروط‌های بارش و شبیه‌سازی شدت‌های بالاتر است.

بنابراین با به‌کارگیری ترکیب مناسبی از ۹ نازل در سطح یک پلات، در نهایت شدت‌های باران در محدوده ی ۳۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت قابل شبیه‌سازی می‌باشد. در جدول ۶ ترکیب‌های مختلف عملکرد نازل‌های اصلی و فرعی، شدت متوسط ایجاد شده و ضریب

۹۵ درصد محاسبه شد که با نتایج بتونی و گریسمر [۶] با ضریب یکنواختی ۹۱/۷ درصد مطابقت دارد. در حالی که بیش‌تر از مقدار گزارش شده ۷۵ درصد توسط ناواس و همکاران [۲۹]، ۵۸ تا ۷۳ درصد توسط مانستر و همکاران [۲۸]، ۷۵ تا ۸۱ درصد توسط ردی و همکاران [۳۱] و هم‌چنین ۶۲ تا ۷۶ درصد توسط ویلسون و همکاران [۴۴] می‌باشد. هم‌چنین، نتایج نشان داد که با افزایش فشار و به تبع آن شدت بارش شبیه سازی شده یکنواختی در سطح پلات آزمایشی افزایش می‌یابد که با نتایج ویلسون و همکاران [۴۴] مطابقت دارد. کاتیراولو و همکاران [۴۲] ضریب یکنواختی بالای ۶۲ درصد را حد قابل قبول در شبیه سازی‌های باران دانستند.

به‌منظور بررسی توزیع بارش در سطح پلات، آزمون یکنواختی برای مجموعه ی نازل‌ها در فشار منتخب، مجدداً تکرار شد. توزیع یکنواختی مجموعه ی دو نازل مورد آزمون قرار گرفته و نتایج حاصل از آن‌ها به طول پلات شش متری تعمیم داده شد. حداکثر فاصله ی قرارگیری دو نازل از یکدیگر به صورت آزمون و خطا تعیین شد [۸]. به این صورت که فاصله ۲/۱۰ متر به‌دست آمده در گام محاسباتی، به‌عنوان اولین فاصله مورد آزمون قرار گرفت و ضریب یکنواختی و تعداد نازل‌های مورد نیاز برای پوشش دادن یک پلات شش متری تعیین شد. خلاصه نتایج به‌دست آمده در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که با کاهش فاصله ی نازل‌ها از هم، ضریب یکنواختی افزایش می‌یابد. پرز-رودریگواز و همکاران [۴۵] در پژوهش خود به نتایج مشابهی دست یافتند. با

جدول ۴- ضریب یکنواختی و تغییرات در چهار فشار عملکرد بررسی شده برای نازل Apd4

Table 4. Uniformity and variations coefficient in four operating pressure for nozzle Apd4

فشار (کیلوپاسکال)				متغیر مورد بررسی
100	50	30	10	
95.15	83.77	83.01	82.74	ضریب یکنواختی کریستین سن (درصد) Cristiansen uniformity coefficient (%)
0.04	0.10	0.12	0.13	ضریب تغییرات Variations coefficient

جدول ۵- تغییرات ضریب یکنواختی با تغییر فاصله ی نازل‌ها از یکدیگر

Table 5. Variation of uniformity coefficient with varying nozzles distances

حداکثر فاصله ی نازل‌ها از یکدیگر (متر)							فشار (کیلوپاسکال) Pressure (Kp)	تعداد نازل‌های مورد نیاز Number of nozzles
1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10		
4	4	4	4	4	4	3	10	ضریب یکنواختی (درصد)
84.75	86.67	86.22	83.81	79.34	76.98	72.46	30	Uniformity coefficient
Not calculated		89.47	89.21	87.54	85.81	83.34	50	
		91.86	93.26	93.10	92.44	90.59		

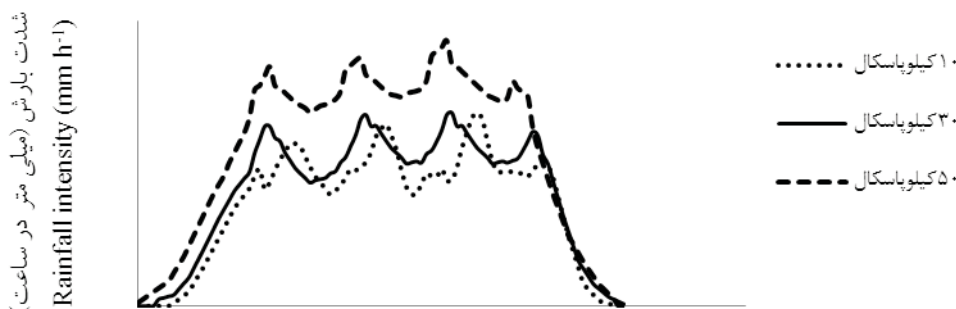
جدول ۶- ترکیب‌های مختلف عملکرد نازل‌های اصلی و فرعی، شدت متوسط ایجاد شده و ضریب یکنواختی آن‌ها

Table 6. Different compound of main and secondary nozzles operating, their mean intensities and uniformity coefficient

ضریب یکنواختی (درصد) uniformity coefficient (%)	متوسط شدت باران شبیبه سازی شده (میلی متر بر ساعت) Mean of rain intensity (mm h ⁻¹)	فشار عملکرد (کیلو پاسکال) Pressure (Kp)	حالت‌های مختلف ترکیب نازل‌های اصلی و فرعی Different compound of main and secondary nozzles
86.22	33.78	10	۴ نازل اصلی 4 main nozzles
89.47	43.20	30	
97.36	60.13	50	
97.36	66.81	10	۴ نازل اصلی و ۵ نازل فرعی 4 main and 5 secondary nozzles
93.08	85.11	30	
94.59	123.36	50	
94.47	75.77	30+10	
96.12	97.16	50+10	
95.28	76.31	10+30	
94.97	106.83	50+30	
94.50	93.28	10+50	
92.55	102.27	30+50	

نکته: اعداد سمت راست و چپ در ستون مربوط به فشار عملکرد به ترتیب مربوط به نازل‌های اصلی و فرعی می‌باشد.

Note: The right and left figures in pressure column represent main and secondary nozzles, respectively.



شکل ۷- نمودار تغییرات شدت باران در حالت فعال بودن چهار نازل اصلی
Fig. 7. Variation of rain intensity with four main active nozzles

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت شبیه‌سازهای باران در تسریع و افزایش دقت مطالعات فرسایش و رسوب، دانشگاه تربیت مدرس اقدام به طراحی، ساخت و واسنجی آزمایشگاه بزرگ شبیه‌ساز باران و فرسایش و رسوب نمود. هم‌چنین به‌منظور شبیه‌سازی باران متناسب با شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه مطالعاتی، اقدام به طراحی و ساخت نازلی مناسب با قابلیت نصب و کاربرد آسان در سامانه مذکور شد و آزمون‌های خصوصیات باران شبیه‌سازی شده از قبیل اندازه، میانه و توزیع قطری قطرات، سرعت برخورد قطرات با سطح پلات و زاویه عملکرد و برخورد با سطح با استفاده از ثبت تصاویر سرعت بالا و هم‌چنین آزمون‌های یکنواختی برای تک نازل و ترکیب مختلف مجموعه نازل‌ها در فشارهای مختلف روی نازل طراحی

یکنواختی در هر یک از حالت‌های مذکور در سطح پلات شش متری ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود ضریب یکنواختی در آزمون مجموعه‌ی نازل‌ها و در حالت ترکیب مختلف نازل‌های اصلی و فرعی بین ۸۶/۲۲ تا ۹۷/۳۶ درصد محاسبه شده است. گریسون و اداس [۱۸] در تحقیقات خود محدوده‌ی ضریب یکنواختی ۷۵ تا ۹۵ درصد را برای باران شبیه‌سازی شده با محدوده‌ی شدت ۶ تا ۱۵۰ میلی‌متر را گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. شکل ۷ نمودار توزیع شدت بارش مجموعه چهار نازل اصلی Apd4 روی محور طولی پلات شش متری، در فشار عملکرد ۱۰، ۳۰ و ۵۰ کیلوپاسکال، را نشان می‌دهد.

Conservation Researches Journal. 20(6): 67-86.(In Persian)

4. Abudi, I. Carmi, G. and Berliner, P. 2012. Rainfall Simulator for Field Runoff Studies. Journal of Hydrology. 454-455: 76-81.

5. Aksoy, H. Unal, N.E. Cokgor, S. Gedikli, A. Yoon, J. Koca, K. Inci S.B. and Eris, E. 2012. A Rainfall Simulator for Laboratory-Scale Assessment of Rainfall-runoff-Sediment Transport Processes over a Two-Dimensional Flume. Catena. 98: 63-72.

6. Battany, M.C. and Grismer, M.E. 2000. Development of a Portable Field Rainfall Simulator for Use in Hillside Vineyard and Erosion Studies. Agricultural Water Management. 22: 235-248.

7. 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 Exposition, Las Vegas, Nevada, February 2007(24-28), 63-70.

8. Bubenzer, G.D. 1979. Inventory of Rainfall Simulators. In Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop. Tucson Arizona, March 7-9. Department of Agriculture Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals. 120-130.

9. Carvalho, S.C.P. de Lima, J.L.M.P. and de Lima, M.I.P. 2013. Combining Spray Nozzle Simulators with Meshes: Characterization of Rainfall Intensity and Drop Properties. Geophysical Research Abstracts. 15: EGU2013-7634.

10. Cerda, A. 1997. Rainfall Drop Size Distribution in the Western Mediterranean Basin. Valencia. Spain. Catena. 30: 169-182.

11. Corona, R. Cortis, C. Wilson, T.G. Montaldo, N. and Albertson, J.D. 2011. Design and Testing of A Plot Scale Rainfall Simulator in Sardina. Italy for calibration of a distributed hydrologic model. American Geophysical Union. 32: 2-11.

12. Costin, A.B. and Gilmour, D.A. 1970. Portable Rainfall Simulator and Plot Unit for Use in Field Studies of Infiltration. Runoff and Erosion. Journal of Applied Ecology. 7(1): 193-200.

13. Covert, A. and Jordan, P. 2009. A Portable Rainfall Simulator. Techniques for Understanding

شده زائده دار با کد قراردادی Apd4، به عنوان مناسب ترین نازل، انجام گرفت. در نهایت فشار بهینه برای ایجاد قطرات با بیشترین شباهت با قطرات باران طبیعی، بین ۱۰ تا ۵۰ کیلوپاسکال تعیین شد. میانگین قطری قطرات شبیه سازی شده در این پژوهش در طبقه قطری ۱ تا ۱/۵ و با محدوده ی قطری کم تر از ۰/۵ تا ۴/۷ میلی متر و زاویه ی برخورد قطرات با سطح پلات نزدیک به عمود (۸۹ درجه) ثبت شد. سرعت سقوط قطرات متناسب با ابعاد آن‌ها در محدوده ۴/۸ تا ۹ متر بر ثانیه به دست آمد. لذا با تغییر دامنه فشار بهینه و ترکیب ۲۷ نازل فعال و غیر فعال در کل سطح ۴۲ متر مربعی، دامنه شدت‌های ۳۰ تا ۱۲۰ میلی متر بر ساعت با ضریب یکنواختی ۸۰ تا ۹۵ درصد قابل شبیه سازی می‌باشد. متناسب با محاسبات انجام شده در زمینه ی حداکثر دبی مورد نیاز در سامانه برابر با ۶/۳ مترمکعب، فشار، تعداد نازل‌ها، مقادیر افت اصطکاک، سرعت مخصوص و همچنین با استفاده از منحنی‌های عملکرد ارائه شده در کاتالوگ کارخانه‌های سازنده، پمپ سانتریفوژ مدل CBT 751 و دبی سنج الکترومغناطیسی مدل DN25 به منظور نصب در سامانه ی آب رسانی انتخاب و تهیه شد.

به طور کلی وجود تنوع گسترده در طراحی و ساخت انواع مختلف شبیه‌سازهای تحقیقاتی مؤید عدم وجود شبیه ساز باران کاملاً ایده آل و استاندارد می‌باشد. به هر تقدیر در این پژوهش سعی شد تا با بررسی معایب و نقاط ضعف مطالعات پیشین، خصوصیات باران شبیه سازی شده تا حد امکان به خصوصیات باران طبیعی منطقه ی مورد مطالعه نزدیک تر شود. حال با توجه به ضرورت شبیه سازی دقیق خصوصیات باران در ابعاد وسیع برای مطالعات فرسایش و رسوب، تحلیل میزان اثرگذاری سایر مؤلفه‌ها از قبیل ایجاد باد مصنوعی و اثر درجه حرارت، سختی و اسیدیته آب مورد استفاده در سامانه بر خصوصیات باران شبیه‌سازی شده در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع

1. Abdollahi, Z. Sadeghi, S.H.R. and Khaledi Darvishan, A.V. 2011a. Estimating Drop Size Distribution by using Stain Method, 1st National Conference on Sustainable Agriculture, Khozestan, Iran, May 2011(25-26), 5p.(In Persian)

2. Abdollahi, Z. Sadeghi, S.H.R. and Khaledi Darvishan, A.V. 2011b. Estimating Drop Size Distribution of Natural Rainfall in Mazandaran Climate, Third Iranian Geography Student Congress. Tehran. Iran, May 2011(24-25), 6p.(In Persian)

3. Abdollahi, Z. Sadeghi, S.H.R. and Khaledi Darvishan, A.V. 2013. Design, Production and Testing of Nozzles of Rainfall Simulator. Soil and Water

24. Mahmud Abadi, M. Ruhipoor, H. Arabkhedri, M. and Refahi, H.Gh. 2002. Calibration, Spatial Distribution and Simulated Rain Characteristics, *Journal of Watershed Management Engineering and Science*. 1(1): 39-50.(In Persian)
25. 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: 1393- 1412.
26. Meyer, L.D. and Harmon, W.C. 1979. Multiple Intensity Rainfall Simulator for Erosion Research on Row Side Slopes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 22(1): 100-103.
27. Munster, C.L. Taucer, P.I. Wilcox, B.P. Porter 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.
28. Navas, A. Alberto, F. Machin, J. and Galan, A. 1990. Design and Operation of a Rainfall Simulator for Field Studies of Runoff and Soil Erosion. *Soil Technology*. 3(4): 385-397.
29. Pérez-Latorre, F.J. de Castro, L. and Delgado, A. 2010. A Comparison of Two Variable Intensity Rainfall Simulators for Runoff Studies. *Soil and Tillage Research*. 107: 11-16.
30. Reddy, Ch. Satish Kumar, U. Mishra, P.K. and Kumathe, S.S. 2007. Hydrological Response of Surface Configurations under Simulated Conditions Using CRIDA Rainfall Simulator. *Karnataka Journal Agricultural Science*. 20(2): 338-341.
- 31-Sadeghi, S.H.R. 2009. Study and Measurement of Water Erosion. TMU Press. 200p.(In Persian)
32. 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 Northern Coastal Area of *Hydrological Science Journal*, 58(6):1-9.
33. Saghafian, B. Ghermez Cheshmeh, B. Ghafari, A.R. Telvari, A.R. and Charkhabi, A.H. 2007. Evaluating of Criteria for Rain Simulator Compatible to Climate of Iran. *Soil conservation and Watershed the Effects of Rainfall on Soil Erodibility. Watershed Management Bulletin*. 13(1): 5-9.
14. Dunkerley, D. 2008. Rain Event Properties in Nature and in Rainfall Simulation Experiments A Comparative Review with Recommendations for Increasingly Systematic Study and Reporting. *Hydrological Processes*. 22: 4415–4435.
15. Epema, G.F. and Riezebos, H.Th. 1983. Fall velocity of Water Drops at Different Heights as a Factor Influencing Erosivity of Simulated Rain. *Rainfall Simulation. Runoff and Soil Erosion. Catena Supplement*. 41-17.
16. Esteves, M. Planchon, O. Lapetite, J.M. Silvera, N. and Cadet, P. 2000. The EMIRE Large Rainfall Simulator Design and Field Testing. *Earth Surface Processes and Landforms*. 25(7): 681-690.
17. Grierson, I.T. and Oadas, J.M. 1977. A Rainfall Simulator for Field Studies of Runoff and Soil Erosion. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 22: 37-44.
- 18 .Gunn, R. and Kinzer, G.D. 1949. The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets. *Journal of Meteorology*. 6: 243-248.
19. Juras, R. Pavlásek, J. Děd, P. Tomášek V. and Máca, P. 2013. A Portable Simulator for Investigating Rain-on-Snow Events. *Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementary Issues*. 57(1): 73-89.
- 20-Kadale, A.S. Pendke, M.S. Deshmukh, H.G. and Payal, S.D. 2009. Hydraulics of Rainfall Simulator. *International Journal of Agricultural Engineering*. 2(1): 46-49.
21. Knasiak, K. Schick, R.J. and Kalata, W. 2007. Multiscale Design of Rain Simulator, ILASS Americas, 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Chicago, IL, May 2007,1-7.
22. Lal, R. 2004. *The Method of Research in Soil Erosion*. Translated by Mahmodzade Ahmad. Uroma university press. 688p.(In Persian)
23. Mahmud Abadi M. and Arabhedri, M. 2005. Evaluation of Rainfall Intensity and Uniformity in Rainfall Simulator of Soil Conservation and Watershed Management Institute. Ninth Congress of soil Science. Tehran, Iran, Aug 2005(27-30), 4p.(In Persian)

41. Iserloh, T. Ries, J.B. Arnáez, J. Boix-Fayos, C. Butzen, V. Cerdà, A. Echeverría, M.T. Fernández-Gálvez, J. Fister, W. Geißler, C. Gómez, A. Gómez-Macpherson, H. Kuhn, N.J. Lázaro, R. León, F.J. Martínez-Mena, M. Martínez-Murillo, J.F. Marzen, M. Mingorance, M.D. Ortigosa, L. Peters, P. Regüés, D. Ruiz-Sinoga, J.D. Scholten, T. Seeger, M. Solé-Benet, A. Wengel, R. and Wirtz, S. 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena*: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>.
42. Kathiravelu, G. Lucke, T. White, R. and Nichols, W.B. 2014. Review on design requirements of a rainfall simulator for urban storm water studies, Storm water Queensland Conference. At RACV Noosa Resort. Noosa. Queensland. Australia. 1-13.
43. Wilson, T.G. Cortis, C. Montaldo, N. and Albertson, J.D. 2014. Development and testing of a large, transportable rainfall simulator for plot-scale runoff and parameter estimation. *Hydrology Earth System Science*. 18: 4169–4183.
44. You, C.H. and Lee, D.I. 2015. Decadal Variation in Raindrop Size Distributions in Busan, Korea, *Advances in Meteorology*. Doi:10.1155/2015/329327.
45. Perez-Rodriguez, R. Marques, M.J. Jimenez, L. Garcia-Ormaechea, S. and Bienes, R. 2009. Testing of Rainfall Simulator Nozzles for Suitability within Soil Erosion Plots. *Advances in Geocology*. 40: 191-200.
- Management Research Institute. 70p.(In Persian)
34. Sawatsky, L.F. Dick, W.J. Cooper, D.L. and Kegs, M. 1996. Rainfall Simulator to Measure Erosion of Reclaimed Surfaces. 20th Annual Mine Reclamation Symposium. Canada, 22 May 1996, 14p.
35. Sousa Júnior, S. F. and Siqueira, E.Q. 2011. Development and Calibration of a Rainfall Simulator for Urban Hydrology Research, 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011, 12p.
36. Steves, M. Planchon, O. Lapetite, J.M. Silvera, N. and Cadet, P. 2000. The 'EMIRE' Large Rainfall Simulator Design and Field Testing. *Earth Surface Processes and Landforms*. 25: 681-690.
37. 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: 159-167.
38. Taebi, A. and Chamani, M.R. 2005. Urban Water Distribution Network. Esfahan University of Technology Press. 600p.(In Persian)
39. Toy, T.J. Foster, G.R. and Renard, K.G. 2002. Soil Erosion. John Wiley and Sons. Inc. New York. 338p.
40. Williams, J.D. Wilkins, D.E. McCool, D.K. Baarstad, L.L. Klepper, B.L. and Papendick, R.I. 1998. A New Rainfall Simulator for Use in Low-Energy Rainfall Areas. *American Society of Agricultural Engineers*. 14(3): 243-247.

*Abstract***Variation of Simulated Rainfall Characteristics by Permuting Intake Discharge and Water Pressure**Z. Abdollahi¹, S. H. Sadeghi² and A. Khaledi Darvishan³

Received: 2013/06/25 Accepted: 2016/07/31

Studying natural rainfall characteristics is very difficult due to the unpredictable, rare and random nature of natural rainfall. The rainfall simulator, as an alternate effective approach, facilitates quick measurements of different hydrologic components. However, calibrated suitable conditions and optimization of governing situation have been rarely taken in to account. Therefore, the Nozzle Type Rainfall Simulator Laboratory was established at Tarbiat Modares University to simulate rainfall similar to storm events happened in Mazandaran Province climate. In the current study, the potency of creating different rainfall intensities by permuting intake discharge, water pressure and nozzle decoration and also their effects on simulated rainfall characteristics were investigated. The results indicated that in different water pressure, the simulated rainfall characteristics were significantly different. The results also showed that drop size distribution and their velocities produced by manufactured nozzle coded as Apd4, in optimum pressure (10 to 50 Kp), were 0.5 to 4.7 mm and 4.8 to 9 m s⁻¹ respectively. Besides, the results also indicated that a rainfall with intensity of 30 to 120 mm h⁻¹ with coefficient of uniformity ranged from 80 to 95 % by 27 nozzle spacing 0.85 m could be properly simulated under intake optimum pressure.

Keywords: *Mazandaran climate, Drop size distribution, High speed imaging method, Rainfall simulator, optimum pressure*

1. Former MSc Student, Department of Watershed science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University.

2. Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University. Noor46417-76489, Mazandaran Province, Iran. Corresponding Author, Email: sadeghi@modares.ac.ir.

3. Assistant professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University. Noor46417-76489, Mazandaran Province, Iran.