



دانشگاه گولستان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیستم، شماره ششم، ۱۳۹۲

<http://jwsc.gau.ac.ir>

طراحی، ساخت و آزمون نازل‌های شبیه‌ساز باران

زهرا عبداللهی^۱، *سید حمیدرضا صادقی^۲ و عبدالواحد خالدی‌درویشیان^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، آستاد گروه مهندسی آبخیزداری،

دانشگاه تربیت مدرس، ^۲دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۹۱/۳/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۸/۲۲

چکیده

شبیه‌ساز باران یکی از بنیادی‌ترین ابزارهای پژوهشی در مطالعات مربوط به فرسایش و فرآیندهای مربوط می‌باشد. از این‌رو تلاش‌های متعددی در زمینه طراحی، ساخت و واسنجی باران‌سازهای مختلف، متناسب با نیاز پژوهشی و شرایط اقلیمی مختلف در جهان انجام پذیرفته است. حال آن‌که استفاده از نمونه‌های وارداتی به سبب هزینه‌ی زیاد و هم‌چنین تفاوت با شرایط اقلیمی موردنظر همواره دچار مشکل بوده است. بنابراین ساخت و طراحی شبیه‌ساز مناسب برای شرایط حاکم بر کشور با قابلیت کاربرد زیاد ضروری است. در همین راستا در این پژوهش اقدام به طراحی، ساخت و آزمون نازل‌های شبیه‌ساز باران متناسب با شرایط اقلیمی استان مازندران گردید. در همین خصوص به منظور انتخاب نازل مناسب با قابلیت دسترسی، نصب و کاربرد آسان، بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه نازل‌های مورد استفاده در سایر شبیه‌سازهای موجود و خصوصیات هر یک از آن‌ها و هم‌چنین یافتن جایگزینی مناسب با قابلیت دسترسی بیش‌تر انجام گرفت. هم‌چنین با بررسی ساختار درونی انواع مختلف نازل‌های در دسترس، اقدام به طراحی و ساخت نازل مناسب جهت شبیه‌سازی باران گردید. در نهایت نازل طراحی شده زائده‌دار با کد قراردادی Apd4 به‌عنوان مناسب‌ترین نازل انتخاب و آزمون‌های خصوصیات باران شبیه‌سازی شده از طریق ثبت تصاویر سرعت بالا و ظروف جمع‌آوری

*مسئول مکاتبه: sadeghi@modares.ac.ir

کننده انجام پذیرفت. میانه قطری، سرعت و زاویه برخورد قطرات شبیه‌سازی شده در این پژوهش به ترتیب $1/4$ و $6/4$ متر بر ثانیه و 89 درجه ثبت گردید.

واژه‌های کلیدی: آزمون یک‌نواختی، عکس‌برداری سرعت بالا، شبیه‌سازی باران، طراحی نازل شبیه‌ساز باران.

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین عوامل تهدید کمیت و کیفیت خاک است که پیامدهای ناخواسته آن را می‌توان به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات امروزی زیست‌بوم‌های مختلف تلقی نمود (صادقی، ۲۰۱۰). از طرفی بخش وسیعی از کشور ایران از نظر وضعیت فرسایش و تولید رسوب در شرایط بحرانی قرار دارد و انجام پژوهش‌های مربوط به اندازه‌گیری میزان فرسایش و رسوب با هدف تبیین روش‌های مناسب حفاظت خاک امری لازم و حیاتی است. از آنجایی‌که جمع‌آوری اطلاعات مربوط به جنبه‌های مختلف فرآیند فرسایش در عرصه‌های طبیعی و شرایط مختلف آب و هوایی به واسطه محدودیت‌های مالی و زمانی، شرایط سخت فیزیکی و نوسانات غیرقابل پیش‌بینی، میسر نمی‌باشد، بنابراین شبیه‌سازی فیزیکی در شرایط تحت کنترل، یکی از بهترین گزینه‌های جایگزین به‌حساب می‌آید (پارسون و لاسلز، ۲۰۰۰؛ صادقی، ۲۰۱۰). بنابراین در سال‌های اخیر از شبیه‌ساز باران، به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین ابزار پژوهشی، به‌طور وسیعی در پژوهش‌های مربوط به فرسایش و فرآیندهای مربوط استفاده شده است.

شبیه‌ساز باران 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 نزدیک‌تر می‌باشد (توی و همکاران، ۲۰۰۲). از طرفی شرکت‌های تجاری سازنده شبیه‌ساز باران بسیار اندک هستند و بنابراین این امر پژوهش‌گران را ملزم به ساخت انواع شبیه‌سازها با ویژگی‌های مختلف نموده به نحوی‌که گزارش‌های متعددی مبنی بر ساخت و آزمون این‌گونه شبیه‌سازها (روس و همکاران، ۱۹۸۵؛ ویلکوکس و همکاران، ۱۹۸۶؛ گورنت و همکاران، ۱۹۹۰؛ ساواتسکی و همکاران، ۱۹۹۶؛ استوز و همکاران، ۲۰۰۰؛ ثقفیان و همکاران، ۲۰۰۲؛ مونستر و همکاران، ۲۰۰۶؛ نازیاک و همکاران، ۲۰۰۷؛ ردی و همکاران، ۲۰۰۷؛ کاورت و جوردن، ۲۰۰۹؛ سنگوسا و همکاران، ۲۰۱۰ و دانشگاه آرم‌فیلد

انگلستان، ۲۰۱۱) ارائه شده است. در همین راستا طراحان شبیه‌سازهای باران در پی دستیابی به شش خصوصیت فیزیکی باران طبیعی، متناسب با اقلیم منطقه مورد مطالعه، از جمله توزیع اندازه قطرات (بابنزر، ۱۹۷۹؛ ایستوز و همکاران، ۲۰۰۰؛ بلنکوایز و همکاران، ۲۰۰۳)، سرعت برخورد قطرات (گان و کینزر، ۱۹۴۹؛ ناواس و همکاران، ۱۹۹۰؛ بلنکوایز و همکاران، ۲۰۰۳)، شدت بارش یک‌نواخت و توزیع تصادفی اندازه قطرات (گریرسون، ۱۹۷۷؛ بلنکوایز و همکاران، ۲۰۰۳؛ نازیاک و همکاران، ۲۰۰۷)، یک‌نواختی بارش در کل پلات آزمایشی (بلنکوایز و همکاران، ۲۰۰۳)، زاویه عمودی برخورد قطره به سطح پلات (ایستوز و همکاران، ۲۰۰۰؛ بلنکوایز و همکاران، ۲۰۰۳؛ صادقی، ۲۰۱۰)، بازسازی الگوی رگبار در شدت و تداوم معنی‌دار (مایر و هارمون، ۱۹۷۹؛ بلنکوایز و همکاران، ۲۰۰۳؛ صادقی، ۲۰۱۰) اقدام به استفاده از انواع مختلف نازل‌های در دسترس نموده‌اند.

حال از آن‌جایی که خصوصیات شبیه‌سازهای مختلف متناسب با اقلیم مورد مطالعه و هدف پژوهش، متفاوت می‌باشد، بنابراین استفاده از آن‌ها به‌منظور امکان تعمیم نتایج حاصل از کاربرد آن‌ها در اقلیم‌های متفاوت، مستلزم انجام مطالعات، واسنجی و آزمون اطلاعات مرتبط با بارش‌های ایجاد شده در شبیه‌سازهای باران در هر منطقه پژوهشی و متناسب با شرایط اقلیمی حاکم بر آن‌هاست. به هر تقدیر پژوهش‌ها در زمینه طراحی و ساخت شبیه‌سازهای باران در داخل کشور به‌طور گسترده مورد توجه قرار نگرفته و اغلب به استفاده از شبیه‌سازهای وارداتی و یا ساخته شده مبتنی بر اجزای وارداتی پرداخته شده است (وهابی و نیک‌کامی، ۲۰۰۸؛ رئیس‌یان، ۲۰۰۳؛ فیض‌نیا و همکاران، ۲۰۰۵؛ مرادی و همکاران، ۲۰۰۶؛ حسن‌زاده نفوتی، ۲۰۰۸؛ سلیمان‌خانی، ۲۰۱۰؛ غلامی گوهره و همکاران، ۲۰۱۰). از طرفی به‌سبب عمر کوتاه نازل‌ها در شبیه‌سازهای وارداتی به‌جهت زنگ‌زدگی، خوردگی، ساییدگی و مسدود شدن، نیاز به تعویض مکرر می‌باشد. در حالی که تاکنون هیچ مطالعه‌ای در زمینه ارزیابی خصوصیات نازل‌ها به‌منظور جایگزین کردن آن‌ها در سامانه باران‌ساز انجام نگرفته است. بنابراین در این پژوهش تلاش گردیده تا ضمن مطالعه گسترده خصوصیات نازل‌های مختلف در کشور، قابلیت‌های عمومی و تخصصی هر یک در شبیه‌سازی باران به‌دقت ارزیابی شده و در نهایت یک نازل مناسب جهت فرارگیری در سامانه شبیه‌ساز دانشگاه تربیت مدرس انتخاب گردد.

مواد و روش‌ها

شبیه‌ساز بزرگ باران دانشگاه تربیت مدرس: شبیه‌ساز بزرگ باران با ابعاد ۶ در ۱ متر، عمق فلوم نیم متر، ارتفاع بارش بالغ بر ۶ متر، فلوم با قابلیت تغییر شیب از صفر تا ۳۰ درصد، امکان مطالعات نشست و نفوذ در خاک‌های مختلف مستقر بر لایه‌های زهکشی ایجاد شده، ورود روان‌آب از بالادست کرت‌ها در سه تکرار و با لحاظ حریم حدوداً نیم متر (کاتو و همکاران، ۲۰۰۸) با استفاده از صفحات فلزی، گالوانیزه و با قاب فلزی در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس ساخته شد. شکل ۱ شمایی از آزمایشگاه بزرگ باران دانشگاه تربیت مدرس را نشان می‌دهد.



شکل ۱- شمایی از آزمایشگاه بزرگ باران دانشگاه تربیت مدرس.

انتخاب نازل مناسب: برای انتخاب نازل مناسب از بیشترین تعداد نازل‌های قابل دسترس موجود و هم‌چنین طراحی و ساخت نازل‌های جدید استفاده شد. بهترین نازل با لحاظ جمیع شرایط و ایجاد تعادل بین خصوصیات مختلف موردنظر از قبیل الگوی کلی ریزش، مساحت سطح خیس شده و اندازه عمومی قطرات از طریق انجام آزمایش‌های متعدد روی هر یک از نازل‌ها به‌صورت آزمون و خطا و تبیین الگوهای رفتاری تغییرات و بررسی روند تغییرات محقق شد. سپس آزمون دقیق خصوصیات باران در رابطه با نازل‌های برخوردار از عمل‌کرد برتر صورت گرفته و درنهایت بهترین نازل تهیه شده بر اساس شاخص‌های ارزیابی کارایی شبیه‌سازهای باران انتخاب گردید.

آزمون نازل‌های موجود: در این مرحله از انواع نازل‌های موجود مورد استفاده و قابل دسترس در آبیاری بارانی در داخل کشور و متصور برای امکان شبیه‌سازی ویژگی‌های مطلوب و موردنظر باران‌های طبیعی استفاده گردید. سپس عملکرد کلیه آن‌ها مورد آزمون قرار گرفت.

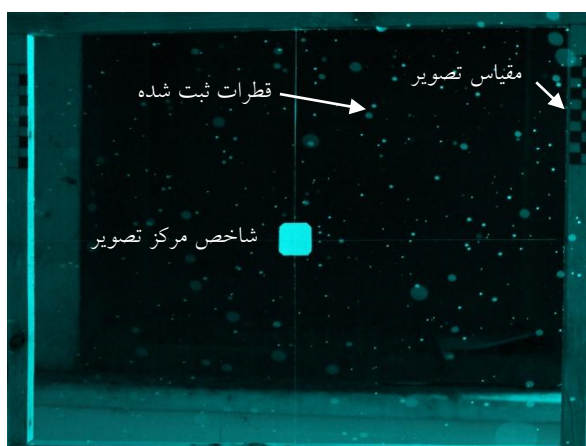
طراحی نازل: علاوه بر آزمون نازل‌های موجود در کشور و همچنین ضرورت دستیابی به نازل‌های مناسب و درواقع امکان شبیه‌سازی باران‌های طبیعی، مبادرت به طراحی و ساخت نازل گردید. در این راستا الگوهای حاکم بر شکل بخش‌های درونی نازل‌های موجود مدنظر قرار گرفته و سپس با رعایت قوانین هیدرولیکی برنولی حاکم بر جریان پیوسته در آن‌ها و همچنین با توجه به امکان ساخت در تعداد زیاد، سهولت و هزینه، اقدام به استفاده از استوانه‌های آکرولیک فشرده با قطرهای ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر و موجود در بازار گردید. در این ارتباط متدهای ۰/۵ تا ۸ میلی‌متر، جهت پیاده‌سازی ایده‌ها و طرح‌های بخش درونی نازل مورد استفاده قرار گرفته و سپس کارایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

آزمون نازل‌ها: در آزمون تک‌نازل 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 سانتی‌متر با فواصل ۲۰ سانتی‌متر بین مراکز آن‌ها (دونکرلی، ۲۰۰۸)، استفاده گردید. مقدار و توزیع شدت در سطح موردنظر، با اعمال بارش در فشارهای مختلف و اندازه‌گیری آب جمع شده در ظروف در مدت ۱۵ دقیقه تعیین شد (سردا، ۱۹۹۷؛ محمودآبادی و همکاران، ۲۰۰۷). این آزمایش‌ها در مورد همه نازل‌ها به‌طور جداگانه تکرار گردید. برای هر شدت بارش، شاخص‌های آماری شامل کمترین، بیشترین، میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات محاسبه شد. برای ارزیابی یک‌نواختی زمانی و مکانی بارش نیز، ضریب یک‌نواختی کریستین‌سن (CC)، با استفاده از شدت اندازه‌گیری شده در هر ظرف (X_i)، شدت متوسط (m) و تعداد ظروف (n) طبق رابطه (۱) محاسبه گردید (ناواس و همکاران، ۱۹۹۰؛ باتانی و گریسمر، ۲۰۰۰؛ مونستر و همکاران، ۲۰۰۶؛ ردی و همکاران، ۲۰۰۷).

$$CC = [1 - \sum_i^n |X_i - m| / m.n] \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این پژوهش برای اندازه‌گیری قطر و توزیع قطری قطرات باران شبیه‌سازی شده، از روش عکس‌برداری با دوربین‌های سرعت بالا (سودهیر و پاندا، ۲۰۰۰) به واسطه دقت و کارایی بالا (عبداللهی و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده گردید. تصاویر قطرات باران شبیه‌سازی شده در فشارهای

مختلف، با استفاده از دوربین دیجیتالی Canon با سرعت بالا $1/4000$ فریم در ثانیه و وضوح تصویر بالا $18/7$ مگاپیکسل، ثبت گردید. شکل ۲ نمونه‌ای از تصویر ثبت‌شده را نشان می‌دهد. همچنین به‌منظور اطمینان از خصوصیات قطری بارش، نزدیک به عمود بودن زاویه برخورد قطرات با سطح زمین، وضعیت تقارن، وسعت و یکنواختی پهنه مخروط ایجاد شده، تصاویر سرعت بالا از عملکرد نازل تهیه و مورد بررسی قرار گرفت.







شکل ۲- تصویر ثبت شده از قطرات باران با استفاده از دوربین Canon EOS 550D

در نهایت از مقایسه نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده و همچنین نتایج به‌دست آمده توسط پژوهش‌گران دیگر (هو، ۲۰۰۳) در زمینه بررسی خصوصیات نازل‌های مختلف، مناسب‌ترین نازل از جهت تولید قطرات مشابه با قطرات باران طبیعی، سهولت نصب و استفاده و صرفه اقتصادی انتخاب گردید. از آنجایی که شبیه‌ساز باران به‌عنوان یک ابزار پژوهشی مورد توجه قرار گرفته و هزینه و زمان دو اصل جدایی‌ناپذیر در فعالیتهای پژوهشی محسوب می‌شوند، بنابراین اساس انتخاب نوع نازل موردنیاز در طراحی شبیه‌ساز باران، از بین نازل‌های با قابلیت بیشترین شبیه‌سازی خصوصیات باران طبیعی، سهولت دسترسی بوده است. از دیگر عوامل تعیین‌کننده در انتخاب نوع نازل، شامل سطح شبیه‌سازی، دامنه شدت‌های مورد هدف شبیه‌سازی، ضرورت ساخت و دقت موردنیاز و همچنین میزان هزینه تخصیص یافته می‌باشند. علاوه‌بر موارد فوق، سهولت نصب و سازگاری نازل با سایر اجزاء شبیه‌ساز نیز مدنظر قرار گرفت.

نتایج و بحث

آزمون نازل‌های موجود: به منظور انتخاب یک نازل مناسب جهت نصب در سامانه شبیه‌ساز باران تحت فشار مطالعات گسترده‌ای در روند طراحی و ساخت شبیه‌سازهای مورد استفاده در جهان انجام گرفت. نتایج بررسی مطالعات انجام گرفته در زمینه طراحی، ساخت و واسنجی شبیه‌سازهای باران نشان داد طراحان باران‌سازها برای شبیه‌سازی شش خصوصیت اصلی باران طبیعی از نازل‌های مختلفی استفاده نموده‌اند (هومفری و همکاران، ۲۰۰۲؛ بلنکوایز و همکاران، ۲۰۰۳؛ سیمون و همکاران، ۲۰۰۴؛ ردی و همکاران، ۲۰۰۷ و کاورت و جوردن، ۲۰۰۹). از بین نازل‌های مورد استفاده در صنعت و کشاورزی در کشور، انواع مختلفی از نازل‌های مورد استفاده در آبیاری بارانی تهیه و آزمون شدند. نتایج حاصل از بررسی خصوصیات نازل‌های آبیاری معمول و موجود در کشور در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات تعدادی از نازل‌های مورد استفاده در آبیاری بارانی به همراه خصوصیات هر کدام.

شکل	الگوی پاشش	شعاع پاشش (متر)	فشار عملکرد (اتمسفر)	دبی عمل‌کرد (لیتر در ساعت)	کد نازل	نوع نازل
	چتر ملایم	۰/۹-۰/۳	۴ تا ۰/۵	۲۵ ۲۴/۵	Mini Bubbler- EPDM CORONA	بابلر
	تمام مخروط	۵/۸ تا ۳	۲/۸ تا ۱/۴	۱۲۰ تا ۶۰	PS	هانتلر
	تمام مخروط و متناوب	۱۳ تا ۱۱/۱	۴ تا ۱/۵	۱۷۰۰ تا ۴۷۰	020	RC
	خطی				GP 4002	
	مخروط میان‌تهی				GP 1368	
	مخروط میان‌تهی	۲ تا ۰/۵	۴ تا ۱	۱۴۴ تا ۶۸	GP 4001 MJ WHc	میکروجت
	مخروط میان‌تهی				MJ H	
	مخروط میان‌تهی				0.5St2	
	سوزنی	-	-	-		
	مخروط میان‌تهی	۹/۴ تا ۵/۵	۳/۲۵ تا ۱/۷۵	۴۷۰ تا ۱۴۰	R10	نلسون

جهت آب در تمام نمونه‌ها از بالا به پایین می‌باشد.

از آنجایی که یک‌نواختی بارش در سطح پلات از معیارهای اساسی در شبیه‌سازی باران محسوب می‌شود، بنابراین الگوهای بارشی هر یک از نازل‌ها به‌دقت بررسی شدند. با توجه به مطالعات انجام گرفته و نتایج به‌دست‌آمده الگوی بارشی تمام مخروط، به جهت دارا بودن تقارن، یک‌نواختی قابل قبول در قاعده مخروط بارش و امکان برقراری هم‌پوشانی نسبتاً مناسب با مخروط‌های بارشی مجاور، به لحاظ عملی، به‌عنوان مناسب‌ترین الگوی بارشی جهت شبیه‌سازی باران انتخاب گردید. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، از بین نازل‌های تهیه شده تنها دو نازل هانتر و RC، امکان ایجاد الگوی بارشی تمام مخروط را فراهم کردند. ساختار این نازل‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده است که بیشترین کارایی را در حالت قرارگیری کامل در خاک دارا می‌باشند. بنابراین به‌سبب طریقه خاص نصب و عدم سازگاری با سایر اجزاء شبیه‌ساز و شبکه آب‌رسانی طراحی شده قابلیت استفاده در شبیه‌ساز نام برده را دارا نبودند. نازل‌های آب‌پاش نیز که در آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌سبب عدم تولید تلاطم در خطوط جریان و به‌تبع آن دامنه قطری مشابه با باران طبیعی و عدم یک‌نواختی مناسب مورد تأیید قرار نگرفت.

ساخت نازل: با توجه به نتایج به‌دست آمده هیچ یک از نازل‌های آزمون شده به تنهایی قادر به تأمین تمام خصوصیات مدنظر در شبیه‌سازی باران نبودند و هم‌چنین با توجه به ضرورت دستیابی به نازل‌های مناسب و درواقع امکان شبیه‌سازی بهتر باران‌های طبیعی، مبادرت به طراحی و ساخت نازل گردید. بنابراین با ایده گرفتن از مکانیسم نازل‌های بررسی شده، اقدام به طراحی نازلی با هدف شبیه‌سازی باران، گردید. بعد از جست‌وجوی گسترده، استوانه‌های اکرولیک فشرده به‌منظور پیاده‌سازی ایده‌های موردنظر، به‌سبب دارا بودن خصوصیتی از قبیل تغییرپذیری، استحکام، قیمت مناسب، قابلیت اتصال به شبکه آب‌رسانی و شفاف بودن و امکان رؤیت و پایش تغییرات درون آن انتخاب شدند. به هر یک از نازل‌های طراحی شده یک کد ۴ یا ۵ بخشی و مؤید خصوصیات اصلی نازل اختصاص یافت. در گام اول با بهینه‌سازی میکروجت مدل GP 4001 با الگوی بارشی میان‌تهی، سعی بر کاهش زاویه مخروط نزول، با استفاده تغییر جهت منافذ به سمت مرکز به‌منظور پر کردن خلأ مرکزی شد. نتیجه ایجاد الگوی بارشی چند مخروطی بود. بنابراین با توجه به تأثیرپذیری ابعاد قاعده مخروط از تغییر فشار پشت نازل وجود خلأ و هم‌پوشانی نامتعادل و هم‌چنین عدم تصادفی بودن قطرات و به‌تبع آن دامنه قطری محدود از دلایل رد این نازل با کد قراردادی 5ir.dv بودند.

از آنجایی که تصادفی بودن، به سبب طی مسافت زیاد قبل از برخورد به سطح زمین و برخورد قطرات به یکدیگر در نتیجه جریان هوا و وزش باد، یکی از خصوصیات باران طبیعی است (کاورت و جوردن، ۲۰۰۹)، بنابراین جهت ایجاد قطرات تصادفی و دامنه وسیعی از اندازه قطرات، باید برخورد قطرات با یکدیگر افزایش یابند. بنابراین سعی شد که ساختار درونی نازل به گونه‌ای طراحی شود که ایجاد تلاطم در خطوط جریان را تأمین نماید. در این راستا با الهام گرفتن از ساختار درونی میکروجت 0.5St2 با الگوی بارشی سوزنی، تلاش شد با ناهمگن کردن مجرای عبوری و تغییر سرعت جریان در داخل نازل طبق قانون برنولی، جریان را متلاطم نمود. طبق این قانون، تغییر مقاطع مجرای عبوری جریان منجر به تغییر سرعت خطوط جریان گشته و به تبع آن، با تغییر ناگهانی و مکرر سرعت، خطوط جریان متلاطم می‌شود. همین امر سبب تغییر مسیر و تفکیک خطوط جریان در تمام پهنای مخروط متقارن می‌گردد. بنابراین به سبب بررسی اثر تعداد مقاطع مختلف در مسیر جریان و همچنین قطر منفذ ورودی بر تفکیک خطوط جریان و اندازه قطرات ایجاد شده، نازل‌هایی با انواع مختلف حالت‌های متصور ساخته و آزمون شدند. نتایج آزمون نازل‌های طراحی شده در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲- خصوصیات نازل‌های طراحی شده بر اساس ملاک‌های مختلف.

ملاک	کد قراردادی	خصوصیات ساختاری نازل	نتیجه	نتیجه به دست آمده	
تغییر مقاطع درونی (به منظور ایجاد تلاطم در خطوط جریان)	WS3St/1	با یک مقطع و قطر منفذ ورودی ۳ میلی‌متر	ایجاد الگوی بارشی سوزنی	عدم تبعیت خطوط جریان از ساختار درونی نازل به سبب بالا بودن دبی و به تبع آن سرعت جریان	
	WS2.5St/3	با سه مقطع و قطر منفذ ورودی ۲/۵ میلی‌متر			
	WS2St/4	با چهار مقطع و قطر منفذ ورودی ۲ میلی‌متر			
انحراف مقطع ورودی (به منظور افزایش نیروی چسبندگی سیال و دیواره‌ی درونی نازل در ابتدای نازل)	0.5A4	با یک مقطع مایل و قطر منفذ ورودی ۰/۵ میلی‌متر	ایجاد الگوی بارشی تمام مخروط نامتقارن و قطرات بسیار ریز	ناشی از کوچک بودن قطر منفذ ورودی	
	1A5	با دو مقطع مایل و قطر منفذ ورودی ۱ میلی‌متر	ایجاد الگوی بارشی تمام مخروط نامتقارن و قطراتی با دامنه قطری مطلوب	انحراف محور درونی نازل	
تغییر مقطع جری (به منظور حفظ تاثیر نیروی چسبندگی و ایجاد مخروط متقارن بارش)	2St6	با شش مقطع مستقیم و قطر منفذ ورودی ۲ میلی‌متر	ایجاد الگوی بارشی تمام مخروط متقارن با ابعاد متفاوت	-	
	1St4Cn	با چهار مقطع مستقیم و قطر منفذ ورودی ۱ میلی‌متر			
	1St5Cn	با پنج مقطع مستقیم و قطر منفذ ورودی ۱ میلی‌متر			

به منظور بررسی ارتباط بین قطر منفذ ورودی و دبی خروجی جریان در این پژوهش، دبی خروجی از دو نازل 0.5A4 و 1A5 (جدول ۲) در فشارهای مختلف مورد آزمون قرار گرفت. نتایج مربوطه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به داده‌های جدول ۳ مشاهده شد که با افزایش قطر منفذ ورودی، دبی خروجی به صورت صعودی افزایش یافت. این درحالی بود که روند صعودی ثابت نبوده و با افزایش فشار عمل کرد بیش تر می گردید. هم چنین قطر منفذ ورودی بر میانه قطری قطرات ایجاد شده نیز اثرگذار بوده است. بنابراین جریان خروجی از نازل با قطر منفذ ورودی ۰/۵ میلی متر، در فشار ۱/۵ اتمسفر، به صورت ذرات بسیار ریز با دبی برابر ۱۱/۴ لیتر در ساعت اندازه گیری شد.

جدول ۳- دبی خروجی (لیتر بر ثانیه) از نازل‌های 0.5A4 و 1A5 در سه فشار عمل کرد.

نازل	فشار عملکرد (کیلوپاسکال)		
	۱۵۰	۱۰۰	۵۰
0.5A4	۱۱/۴	۱۰/۲	۹
1A5	۵۶/۴	۴۸	۳۶

آزمون چندین نازل با مقاطع مختلف به صورت جزئی نیز نشان داد در صورتی که چینش مقاطع مختلف به گونه ای باشد که نازل بتواند چرخش و تلاطم در جریان آب ایجاد کند، مخروط بارش متقارن ایجاد می شود (جدول ۲). نتایج نشان داد که در این طراحی، ابعاد منفذ ورودی، تعداد مقاطع، طول مقاطع، ابعاد آخرین مقطع، وجود یا عدم وجود مقطع قیفی شکل در بخش خروجی نازل و طول و قطر قاعده قیف خروجی، نقش به سزایی در تشکیل یا عدم تشکیل مخروط متقارن بارش دارند. در این راستا در ساختار نازل‌های ساخته شده پیشین، تغییرات لازم اعمال شد. نتایج آزمون‌ها نشان دادند که در تمام این نمونه‌ها، جریان آب به صورت مخروطی و محل برخورد قطرات به سطح زمین به صورت تصادفی و غیر ثابت بود. در صورتی که قطر مخروط ریزش با توجه به روابط مثلثات و لحاظ زاویه کل ریزش ۱۰ درجه از ارتفاع ۴ متر در حدود ۶۹/۹ سانتی متر برآورد شد. شدت باران محاسبه شده در نازل‌های مطالعاتی در جدول ۴ آمده است. همان طور که مشاهده می شود شدت باران‌های شبیه سازی شده به سبب تراکم قطرات در واحد سطح بسیار بالاست.

از آنجایی که راه حل منطقی به منظور تولید بارانی با شدت کم تر، افزایش ابعاد مخروط بارش جهت کاهش تراکم قطرات در واحد سطح بود، بنابراین جهت افزایش زاویه نزول و قطر قاعده مخروط بارش ایده های مختلفی از قبیل افزایش آشفتگی جریان در اثر اختلاط هوا با سیال پمپ شده در سامانه، وجود مانعی به منظور جهت دهی به خطوط جریان در خروجی نازل و ایجاد یک مقطع قیفی در ابتدای نازل اجرا شد. برهم خوردن تقارن مخروط بارش در هوادهی یک جهتی و دو جهتی، متمرکزتر شدن مخروط بارشی به سبب کاهش نیروی چسبندگی سیال و جداره داخلی نازل در هوادهی چهارجهته، برهم خوردن توزیع مکانی اندازه قطرات هنگام استفاده از مانع مفتولی مارپیچی شکل در خروجی نازل و در نهایت افزایش نسبی ابعاد مخروط بارش و کاهش چشم گیر شدت بارش شبیه سازی شده نسبت به نمونه های طراحی شده قبلی با استفاده از ایجاد حالت گریز از مرکز ناشی از مقطع قیفی شکل در ورودی نازل، به ترتیب از نتایج به دست آمده از آزمون هر یک از نازل های طراحی شده نام برده بود. نتایج حاصل از آزمون نازل های سری Spl (دارای یک مانع مفتولی مارپیچ در خروجی) نشان داد که وجود مانع سبب محدودیت دامنه عملکرد نازل می شود. چرا که تنها در صورتی نازل می تواند بهترین عملکرد را داشته باشد که جریان با فشار زیاد به مانع برخورد نموده و متلاشی شود. در غیر این صورت مانع به طور عکس عمل نموده و باعث تجمع قطرات و تشکیل قطرات درشت تر می شود.

جدول ۴- شدت باران محاسبه شده در نازل های 1St4Cn و 1St5Cn, 2St6 در فشار ۱۵۰ کیلو پاسکال.

کد نازل	قطر مخروط ایجاد شده (متر)	شدت باران تولید شده توسط نازل های طراحی شده (میلی متر در ساعت)
2St6	۰/۶۷	۸۰۳/۳۱
1St4Cn	۰/۵۸	۳۴۳/۹۴
1St5Cn	۰/۷۳	۲۵۸/۱۶

در گام بعد با لحاظ یک مقطع قیفی شکل در ابتدا نازل و تأمین چرخش و تلاطم مطلوب تا حد ایجاد مخروط با خصوصیات مورد هدف و هم چنین اعمال مقاطع کوتاه و بلند در مسیر جریان مخروط بارش با ابعاد و ویژگی های مطلوب تری ایجاد گشت. در ادامه با تغییر تعداد مقاطع ساختاری،

قطر مخروط بارش و شدت‌های ایجاد شده، اندازه‌گیری و محاسبه گردید. نتایج حاصل از آزمون ویژگی‌های باران ایجاد شده توسط دو نازل 1.5Cn5 و 1.5Cn6 در جدول ۶ خلاصه گردیده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌گردد علی‌رغم افزایش یک‌نواختی مخروط و کاهش چشم‌گیر شدت باران شبیه‌سازی شده نسبت به نمونه‌های قبلی، متوسط شدت محاسبه شده برای نازل‌های 1.5Cn6 و 1.5Cn5 در حد بیشترین شدت‌های باران ثبت شده با دوام کم‌تر از ۳۰ دقیقه و دوره بازگشت کم‌تر از ۱۰۰ سال در ایستگاه‌های شمالی کشور (رامسر، نوشهر و قائم‌شهر) با حداقل و بیشترین به ترتیب ۴/۶ و ۱۵۴/۹۴ میلی‌متر در ساعت (وزارت نیرو، ۱۹۹۱) بوده است. شدت‌های بارندگی در منطقه اقلیمی مرطوب شمال کشور در جدول ۵ گردآوری شده است.

جدول ۵- شدت‌های بارندگی در منطقه اقلیمی مرطوب شمال کشور (mm/h).

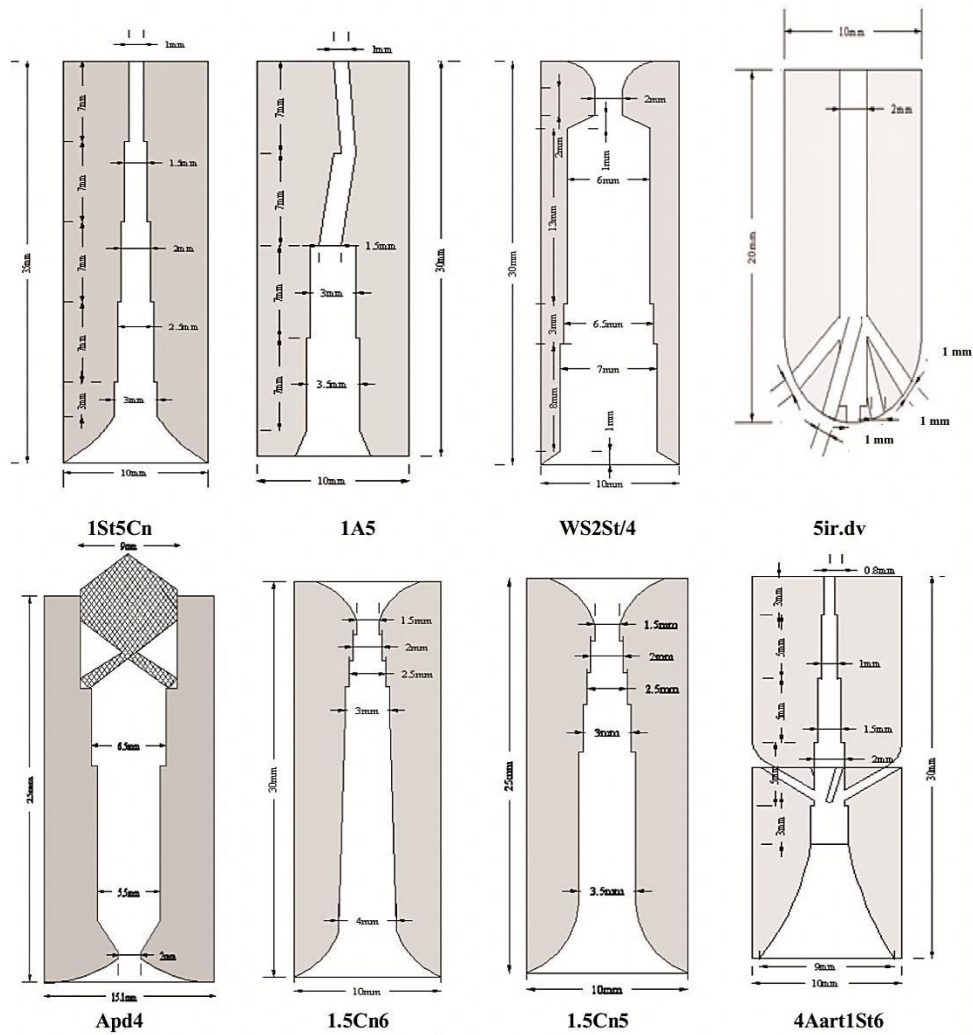
ایستگاه	P ₂ ³⁰	P ₁₀ ³⁰	P ₂ ⁵⁴⁰	P ₁₀₀ ¹⁰	P ₁₀ ⁶⁰
رامسر	۲۴/۱۲	۶۰/۶۴	۴/۴۹	۱۳۳/۱۵	۴۴/۲۵
نوشهر	۲۲/۳۸	۳۷/۶۷	۵/۶۵	۸۳/۶۸	۳۳/۵۹
قراخیل قائم‌شهر	۲۱/۰۹	۳۶/۲۲	۴/۶۷	۱۵۴/۹۲	۲۷/۵۵

استفاده از یک مانع در ورودی نازل به‌ویژه در ترکیب با ایده تغییر مقاطع در ساختار درونی نازل به جهت ایجاد قطرات تصادفی به‌عنوان گزینه بعدی مورد بررسی قرار گرفت. به‌این منظور از دو صفحه هلالی‌شکل عمود برهم در ورودی نازل با زاویه ۴۵ درجه استفاده شد. تعداد و ابعاد مقاطع به‌گونه‌ای با سعی و خطا تعیین گردید که نازل بهترین عملکرد و متناسب با اهداف پژوهش را دارا باشد. بعد از آزمون نمونه‌های طراحی شده، نازل نهایی با کد Apd4 به‌عنوان بهترین نازل انتخاب گردید و نتایج حاصل در جدول ۶ خلاصه گردید. جزئیات طراحی برخی از نمونه‌های طراحی شده در شکل ۳ نشان داده شده است. مانع فلزی در ورودی نازل که شامل دو صفحه هلالی عمود برهم بوده و روی هر صفحه یک روزنه جهت عبور آب تعبیه شده است. این دو صفحه عمود برهم با زاویه ۴۵ درجه در ورودی نازل قرار گرفته و سبب جهت‌دهی در خطوط جریان می‌گردد. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود میانه قطری نازل Apd4 به‌طور متوسط ۱/۴ میلی‌متر محاسبه شد که با نتایج پژوهش‌های نازیباک و همکاران (۲۰۰۷) مبنی بر تخمین میانه قطری قطرات باران شبیه‌سازی شده در

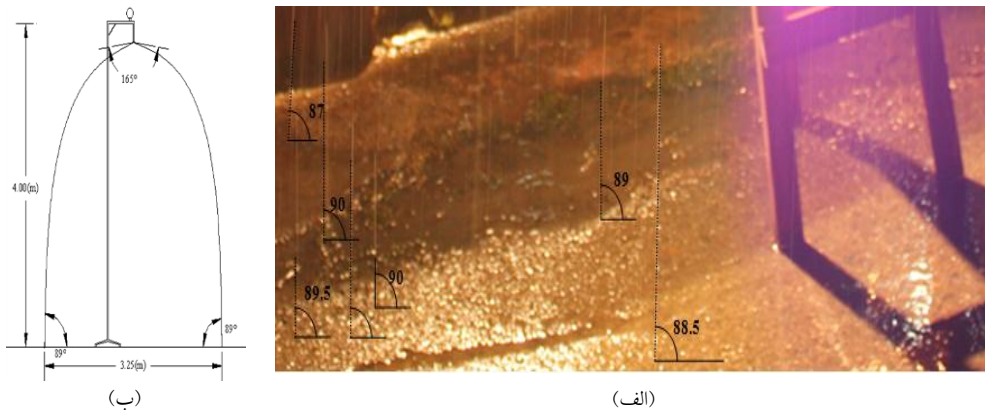
شدت ۲۵/۲ تا ۱۰۲ میلی‌متر در ساعت در محدوده‌ی قطری ۰/۵۳ تا ۱/۴۵، مطابقت دارد. سردا و همکاران (۱۹۹۷)، کاورت و جوردن (۲۰۰۹) و همچنین محمودآبادی و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعات خود به نتایج مشابه دست یافتند. این در حالی است که قطر میانه در شبیه‌ساز حاضر کم‌تر از مقدار گزارش شده ۲ تا ۳ میلی‌متر توسط گریرسون و اوداس (۱۹۷۷)، ۵/۷۱ تا ۵/۸۱ میلی‌متر توسط باردواج و سینگ (۱۹۹۲)، ۲/۵۸ میلی‌متر توسط باتانی و گریسمر (۲۰۰۰) و ۲/۴ میلی‌متر توسط استون و همکاران (۲۰۰۰) می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از پردازش تصاویر تهیه شده نشان داد سرعت سقوط برای قطر میانه، ۶/۴ متر در ثانیه بوده که با توجه به نتایج ارائه شده توسط لاوس (۱۹۴۱) به نقل از گریرسون و اوداس (۱۹۷۷)، به سرعت حد باران طبیعی نزدیک است و مشابهت زیادی به مقادیر ارائه شده توسط، کوستین و گیلیمور (۱۹۷۰)، گریرسون و اوداس (۱۹۷۷) و اپما و ریزیس (۱۹۸۳) دارد. به‌منظور اطمینان از برخورد قطرات به‌صورت نزدیک به عمود در حواشی مخروط نزول، پس از بررسی تصاویر تهیه شده از لحظه برخورد قطرات با سطح زمین، زاویه برخورد قطره از طریق بازسازی تصویر در فضا اتوکد محاسبه گردید. قطرات بعد از طی مسافتی، تحت تأثیر نیروی جاذبه تغییر مسیر داده و به‌طور تقریبی به‌صورت عمودی سقوط می‌کنند. با توجه به تصاویر تهیه شده و زاویه کل نزول ۱۶۵ درجه، با استفاده از روابط مثلثاتی قطر محاسباتی مخروط بارش در نازل نام برده 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 نام برده، نزدیک به عمود بودن زاویه برخورد قطرات به سطح زمین را تأیید می‌کند. شکل ۴ نمونه‌ای از تصویر تهیه شده از لحظه برخورد قطرات شبیه‌سازی شده با سطح زمین در حاشیه مخروط نزول و تصویر بازسازی شده از زاویه برخورد قطرات در فضا اتوکد را نشان می‌دهد.

جدول ۶- ویژگی هریک از نازل‌های 1.5Cn5، 1.5Cn6 و Apd4 در فشار عملکرد ۱۵۰ کیلوپاسکال.

کد نازل	دبی (لیتر در ساعت)	زاویه بارش (درجه)	قطر مخروط بارش (متر)	میانه قطری قطرات (میلی‌متر)	متوسط شدت تولید شده (میلی‌متر در ساعت)
1.5Cn5	۹۵	۷۹	۱/۱۰	۳/۱	۲۱۰/۳۵
1.5Cn6	۱۱۱/۲۴	۸۶	۱/۲۵	۲/۸	۱۸۶
Apd4	۵۴۰	۱۶۵	۳/۲۵	۱/۴	۵۹/۶



شکل ۳- جزئیات طراحی برخی از نمونه‌های طراحی شده (جهت جریان در تمام نمونه‌ها از بالا به پایین است).



شکل ۴- نمونه‌ای از تصویر تهیه شده از لحظه برخورد قطرات شبیه‌سازی شده با سطح زمین در حاشیه مخروط نزول (الف) و تصویر بازسازی شده از زاویه برخورد قطرات در فضا اتوکد (ب).

هم‌چنین به سبب اهمیت توزیع زمانی و مکانی بارش در هنگام انجام آزمایش، در این مطالعه ضریب یکنواختی با استفاده از رابطه کریستین‌سن محاسبه گردید. در نهایت ضریب یکنواختی و ضریب تغییرات نازل طراحی شده Apd4 در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۹۵/۱۵ و ۰/۰۴ درصد محاسبه شد که با نتایج باتانی و گریسمر با ضریب یکنواختی ۹۱/۷ درصد مطابقت دارد. در حالی که بیش‌تر از مقدار گزارش شده ۷۵ درصد توسط ناواس و همکاران (۱۹۹۰)، ۵۸ تا ۷۳ درصد توسط مونستر و همکاران (۲۰۰۶) و ۷۵ تا ۸۱ درصد توسط ردی و همکاران (۲۰۰۷) می‌باشد.

به منظور راه‌اندازی شبکه شبیه‌ساز باران و ایجاد باران شبیه‌سازی شده یکنواخت در سطح ۴۲ متر مربع، فواصل مختلف قرارگیری نازل‌ها و نحوه عملکرد شبکه نازل‌ها در هر یک از حالت‌های متصور و فشارهای مختلف عملکرد مورد آزمون قرار گرفت و در نهایت با ترکیب ۲۷ نازل فعال و غیرفعال در کل سطح ۴۲ متر مربعی، دامنه شدت‌های ۳۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر در ساعت با ضریب یکنواختی ۸۰ تا ۹۵ درصد قابل شبیه‌سازی شد. متناسب با محاسبات انجام شده در زمینه بیشترین دبی مورد نیاز در سامانه، فشار و تعداد نازل‌ها، در نهایت اجزاء سامانه آبرسانی در شبیه‌ساز نام‌برده انتخاب و تهیه گردید.

جمع‌بندی و پیشنهادها

در این پژوهش، جهت شبیه‌سازی خصوصیات باران طبیعی متناسب با اقلیم مورد مطالعه اقدام به طراحی و ساخت نازل گردید. در نهایت نازل طراحی شده زائده‌دار با کد قراردادی Apd4 به‌عنوان مناسب‌ترین نازل انتخاب و آزمون‌های خصوصیات باران شبیه‌سازی شده از قبیل میانه 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 انجام گرفت. میانه قطری قطرات شبیه‌سازی شده در این پژوهش در طبقه قطری ۱ تا ۱/۵ و زاویه برخورد قطرات با سطح پلات نزدیک به عمود (۸۹ درجه) ثبت گردید. سرعت سقوط نیز برای قطر میانه، ۶/۴ متر در ثانیه محاسبه گردید. به‌طور کلی وجود تنوع گسترده در طراحی و ساخت انواع مختلف شبیه‌سازهای پژوهشی بیانگر نبود شبیه‌ساز باران به‌طور کامل ایده‌آل و استاندارد می‌باشد. در این پژوهش سعی شد تا با بررسی معایب و نقاط ضعف مطالعات پیشین، خصوصیات باران شبیه‌سازی شده حتی‌المقدور به خصوصیات باران طبیعی منطقه مورد مطالعه نزدیک‌تر گردد. بنابراین با توجه به نتایج حاصل در پژوهش فعلی تحلیل تداوم توانمندی نازل و سامانه ارائه شده تحت شرایط کاربرد مستمر و درازمدت، امکان‌سنجی مراحل ساخت و تولید انبوه و اقتصادی‌سازی فرآیند مزبور و در نهایت امکان‌سنجی ساخت و کاربرد نازل‌های بهینه با استفاده از سایر مصالح موجود مثل فلز یا پلاستیک پیشنهاد می‌شود.

منابع

1. Abdollahi, Z., Sadeghi, S.H.R. and Khaledi Darvishan, A.V. 2011. Estimating drop size distribution by using stain method. P 1-5, First National Conference on Sustainable Agriculture, Khozestan, Iran.
2. Battany, M.C. and Grismer, M.E. 2000. Development of a portable field rainfall simulator for use in hillside vineyard runoff and erosion studies. Hydrological processes J. 14: 1119-1129.
3. Bhardwaj, A. and Singh, R. 1992. Development of portable rainfall simulator infiltrometer for infiltration. runoff and erosion studies. Agricultural water management J. 22: 235-248.
4. Blanquies, J., Scharff, M. and Hallock, B. 2003. The design and construction of a rainfall simulator. International erosion control association (IECA). P 63-70, Thirty fourth Annual conference and exposition, Las Vegas, Nevada.

5. Bubenzer, G.D. 1979. Inventory of rainfall simulators, In proceedings of the rainfall simulator workshop. P 120-130, Department of agriculture science and education administration agricultural reviews and manuals, Tucson Arizona.
6. Cerda, A. 1997. Rainfall drop size distribution in the western Mediterranean basin. Valencia. Spain, *Catena J.* 30: 169–182.
7. Costin, A.B. and Gilmour, D.A. 1970. Portable rainfall simulator and plot unit for use in field studies of infiltration. *Runoff and erosion. Applied ecology J.* 7: 1. 193-200.
8. Covert, A. and Jordan, P. 2009. A portable rainfall simulator. Techniques for understanding the effects of rainfall on soil erodibility. *Watershed management bulletin J.* 13: 1. 5-9.
9. 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 J.* 22: 4415– 4435.
10. 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 J. supplement.* 41-17.
11. 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 J.* 25: 7. 681-690.
12. Feiznia, S., Khajeh, M. and Ghayumian, J. 2005. Evaluation of physical, chemical and weather factors in sediment yield due to surface erosion into Loss soil. Tehran, *J. of Pajohesh and Sazandegi.* 66: 14-24. (In Persian)
13. Gholami Gohareh, R., Sadeghi, S.H.R. and Mirnia, S.Kh. 2010. The role of fire on variability of runoff and sediment. P 179-183, Fourth national Conference on erosion and sediment, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
14. Grierson, I.T. and Oadas, J.M. 1977. A rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Agricultural engineering research J.* 22: 37-44.
15. Guerrant, D.G., Miller, W.W., Mahannah, C.N. and Narayanan, R. 1990. Infiltration evaluation of four mechanical rainfall simulation techniques in sierra Nevada watersheds. *American water resources association J.* 26: 1. 127-134.
16. Gunn, R. and Kinzer, G.D. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets. *Meteorology J.* 6: 243-248.
17. Hasanzadeh Nafuti, M., Feiznia, S., Ahmadi, H., Peirovan, H. and Ghayumian, J. 2008. Evaluation of efficacy of physical and chemical characteristics of Marn on sediment yield using physical model. *J. of geology engineering, Iran.* 1: 1. 35-48. (In Persian)
18. Ho, S.P. 2003. Water Spray suppression and intensification of high flash point hydrocarbon pool fires. Phd dissertation. Faculty of the worcester polytechnic institute, Massachusetts, England, 280p.

19. Humphry, J.B., Daniel, T.C., Edwards, D.R. and Sharpley, A.N. 2002. A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. *Applied engineering in agriculture J.* 18: 2. 199–204.
20. Kato, H., Onda, Y., Tanaka, Y. and Asano, M. 2008. Field measurement of infiltration rate using an oscillating nozzle rainfall simulator in the cold. Semiarid grassland of Mongolia, *CATENA J.* 76: 3. 173-181.
21. Knasiak, K., Schick, R.J. and Kalata, W. 2007. Multi-scale design of rain simulator. *ILASS Americas*. P 1-7, Twenties annual conference on liquid atomization and spray systems, Chicago.
22. Mahmud Abadi, M., RuhiPur, H., Arabhedri, M. and Refahi, H. 2007. Calibration, spatial distribution and simulated rain characteristics. *Tehran, J. of watershed management engineering and science. Iran.* 1: 1. 39-50. (In Persian)
23. 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 J.* 22: 1. 100-103.
24. Moradi, H.R. Ghazanfarapur, N. and Feiznia, S. 2006. Evaluation of sensitivity of Quaternary sediments, Sanjari pediment, Esfahan. *J. of water and watershed.* 3: 2. 52-60. (In Persian)
25. 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 J.* 49: 4. 915-924.
26. 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 J.* 3: 4. 385-397.
27. Parsons, A.J. and Lascelles, B. 2000. Rainfall simulation in geomorphology. *Earth surface processes and landforms J.* 25: 7. 679-679.
28. Raisian, R. 1998. Study of erosion and sediment in Gorgak region using rainfall simulator. Technical report. Soil conservation and watershed management research institute, Chaharmahal Bakhtiari, Iran, 156p. (In Persian)
29. 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 agricultural science J.* 20: 2. 338-341.
30. Roth C.H., Meyer, B., Frede H.G. and Gottingen, R. 1985. A portable rainfall simulator for studying factors affecting runoff. *Infiltration and soil loss, CATHENA J.* 12: 79-85.
31. Sadeghi, S.H.R. 2009. Study and management of watery erotion. TMU press, 200p. (In Persian)
32. Saghafian, B., Ghermez Cheshmeh, B., Ghafari, A.R., Telvari, A.R. and Charkhabi, A.H. 2002. Evaluating of criteria for manuscript of rainimolator

- prepared with climate of Iran, Technical report, soil conservation and watershed management institute, Iran, 70p. (In Persian)
33. Sangüesa, C., Arumí, J., Pizarro, R. and Link, O. 2010. A rainfall simulator for the in situ study of superficial runoff and soil erosion. Chilean agricultural research J. 70: 1. 178-182.
 34. Sawatsky, L.F., Dick, W.J., Cooper, D.L. and Kegs, M. 1996. Rainfall simulator to measure erosion of reclaimed surfaces. P 1-7, Twenties annual mine reclamation symposium, Canada.
 35. Simone, A., Vignali, V., Bregali, V. and Maglionico, M. 2004. Surface runoff: A rainfall simulator for wash-off modeling and road safety auditing under different rainfall intensities. Proceeding of the sistema interativo de informações dos vestibulares (SIIV). P 1-7, Second International congress, Italy.
 36. Soleimankhani, Z. 2010. Comparison of time differences between runoff and sediment yielded by small plot of rainfall simulator in rangeland and forest of Kodir region. Thesis of master science in watershed management engineering, Tarbiat Modares University, 112p. (In Persian)
 37. Sudheer, K.P. and Panda, R.K. 2000. Digital Image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles. Agricultural water management J. 45: 159-167.
 38. Toy, T.J., Foster, G.R. and Renard, K.G. 2002. Soil erosion, John Wiley and Sons. Inc., New York, 338p.
 39. Vahabi, J. and Nik Kami, D. 2008. Assessing dominant factors affecting soil erosion using a portable rainfall simulator. Sediment research J. 23: 376-386.
 40. Wilcox, B.P., Karl Wood, M., Tromble, J.T. and Ward, T.J. 1986. A hand-portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. Range management J. 39: 4. 375-377.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(6), 2013
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Designing, manufacturing and testing rainfall simulator nozzles

Z. Abdollahi¹, *S.H.R. Sadeghi² and A.V. Khaledi Darvishan³

¹Graduate, M.Sc. Student Dept., of Watershed Management Engineering, Tarbiat Modares,

²Professor Dept., of Watershed Management Engineering Tarbiat Modares, ³Ph.D. Student,
Dept., of Watershed Management Engineering, Tarbiat Modares

Received: 05/29/2012 ; Accepted: 11/12/2012

Abstract

Rainfall simulator is one of the most effective instruments for using in soil erosion studies. Thus, many researches have been conducted in order to design, manufacture and calibrate various rainfall simulators commensurate with aim of study and climatic conditions all around the world. However, using the imported nozzles in Iran is not feasible due to high cost, and different climatic conditions. Therefore, the current study has tried to evaluate some various nozzles' characteristics made by the authors in order to simulating natural rainfall happened in Mazandaran Province climate. For this purpose, a minute evaluation was made for a number of rainfall characteristics produced by nozzles used in other rainfall simulators as well as those made by the authors. The results of the study revealed that the nozzle designed and manufactured by the authors and coded as Apd4 could successfully simulate the natural rain under consideration. The medium drop size, velocity and fall angle of the simulated rain were respectively recorded by high speed imaging of 1.4 mm, 6.4 m s⁻¹ and 89°.

Keywords: High speed imaging method, Nozzle design, Nozzle type, Rainfall simulator, Uniformity test.

* Corresponding author; Email: sadeghi@modares.ac.ir