

شبیه‌سازی هایتوگراف بارش بر اساس روندیابی مخازن متوالی

محمد ابراهیم بنی‌حبیب^{۱*} و بهمن وزیری^۲

^۱ دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران و ^۲ دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۳

چکیده

از آنجا که انجام بسیاری از تحقیقات آب و خاک نیازمند ایجاد باران مصنوعی می‌باشد، لذا دستگاه‌های شبیه‌ساز باران یک ابزار کاربردی در این زمینه تحقیقاتی می‌باشد. به همین دلیل، تا کنون در تحقیق‌های مختلف، دستگاه‌های شبیه‌ساز باران متنوعی، طراحی، ساخته و به کار گرفته شده‌اند. هر چند دستگاه‌های شبیه‌ساز ساخته شده تا کنون امکان شبیه‌سازی میزان شدت بارش را فراهم می‌آورند، ولی در عین حال شبیه‌سازی تغییرات زمانی بارش به وسیله این دستگاه‌ها نیازمند سیستم‌هایی پرهزینه و پیچیده‌ای بوده که امکان استفاده از آن‌ها را در آزمایش‌های صحرایی مشکل می‌نماید. لذا، در این تحقیق، سعی شد تا با کمک روندیابی مخازن متوالی دستگاه شبیه‌ساز بارشی طراحی و ساخته شود که در عین سادگی و هزینه پایین ساخت، بتواند امکان ایجاد هایتوگراف بارش را همانند بارش‌های طبیعی فراهم آورده و در آزمایش‌های صحرایی بدین منظور مورد استفاده قرار گیرد. نتایج واسنجی دستگاه نشان‌دهنده خطای کمتر از پنج درصد می‌باشد. همچنین، نتایج نشان‌دهنده شبیه‌سازی هایتوگراف مشاهداتی بارش ایستگاه نیاوران با این دستگاه با خطای ۶/۱ درصدی است. همچنین، این دستگاه امکان شبیه‌سازی بارش و ایجاد هایتوگراف بارش تا مدت زمان بارش سه ساعت و شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت را دارا می‌باشد. لذا، دستگاه پیشنهادی و مدل عددی آن می‌تواند برای ایجاد هایتوگراف بارش مصنوعی در آزمایش‌های میدانی بررسی نفوذ آب باران و فرسایش پاشمانی کاربرد داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: بارش مصنوعی، تغییرات زمانی بارش، دستگاه شبیه‌ساز بارش، شدت بارش، فرسایش پاشمانی

مقدمه

امکان پیش‌بینی میزان فرسایش ناشی از بارش‌های مختلف را برای آن‌ها فراهم می‌آورند (Martinez و همکاران، ۲۰۰۱). هر چند تفاوت‌هایی بین بارش‌های شبیه‌سازی شده با این دستگاه‌ها و بارش‌های طبیعی وجود دارد، در عین حال امکان برقراری همبستگی خوبی بین داده‌های به‌دست آمده از فرسایش خاک ناشی از بارش‌های شبیه‌سازی شده به وسیله این دستگاه‌ها و فرسایش ناشی از بارش‌های طبیعی در

شبیه‌سازهای بارش ابزاری کاربردی برای ایجاد بارش‌های مصنوعی با مدت زمان و شدت مشخص بوده و به این منظور در مطالعات مختلف آب و فرسایش خاک به کار می‌روند. در واقع شبیه‌سازهای بارش امکان اندازه‌گیری میزان فرسایش و رواناب سطحی ناشی از بارش‌هایی با شدت و مدت زمان معلوم را برای محققان فراهم نموده و در عین حال،

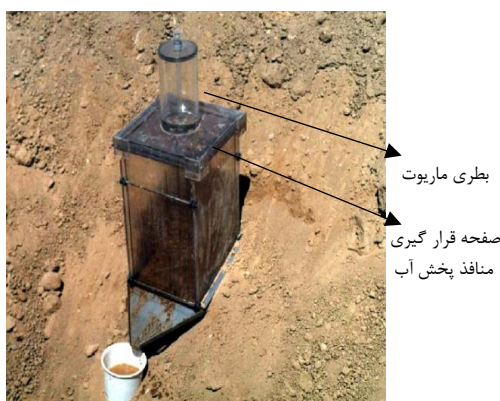
* مسئول مکاتبات: banihabib@ut.ac.ir

می‌شود. یک نمونه از این دستگاه، در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمونه دستگاه شبیه‌ساز باران با تکنولوژی نازل‌های پخش آب

در روش دوم، قطرات باران شبیه‌سازی شده بر اثر نیروی ثقل از منافذ تعبیه شده در دستگاه سقوط می‌کنند. عموماً تنظیم شدت بارش در این شبیه‌سازها به کمک دستگاهی معروف به بطری ماریوت صورت می‌گیرد. یک نمونه مشابه این دستگاه در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمونه دستگاه شبیه‌ساز باران با تکنولوژی بطری ماریوت (Kamali و همکاران، ۲۰۱۵)

این شبیه‌سازها از دو بخش اصلی تشکیل شده که شامل یک بطری ماریوت^۳ جهت تنظیم میزان آب خروجی و یک قسمت که محل قرار گرفتن منافذ خروج آب می‌باشد (Huang و همکاران، ۲۰۱۳). بطری ماریوت وسیله‌ای برای تنظیم نرخ ثابت خروج آب از مخزن بوده و از یک مخزن استوانه‌ای یا مکعبی شکل و یک لوله جهت ورود هوا به داخل آن تشکیل

حوزه‌های آبخیز وجود دارد (Hamed و همکاران، ۲۰۰۲). به علاوه، داده‌های به‌دست آمده از مطالعات انجام شده به‌وسیله شبیه‌سازهای بارش می‌تواند به‌منظور واسنجی، صحت‌سنجی و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی فرسایش خاک نیز به‌کار گرفته شود (Sangüesa و همکاران، ۲۰۱۰). لذا، این دستگاه‌ها به‌عنوان یک وسیله کاربردی در مطالعات فرسایش خاک کاربرد فراوان دارند.

تا کنون در تحقیقات مختلف برای اندازه‌گیری میزان فرسایش خاک، رواناب و نفوذ از دستگاه‌های شبیه‌ساز باران به‌طور گسترده استفاده شده است (Foster و همکاران، ۲۰۰۰؛ Fernandez و همکاران، ۲۰۰۸؛ Grierson و Oades، ۱۹۷۷؛ Moore و همکاران، ۱۹۸۳؛ Esteves و همکاران، ۲۰۰۰). Aoki و Sereno (۲۰۰۶) از یک دستگاه شبیه‌ساز بارش کوچک جهت مطالعه نفوذ آب در خاک در سطحی مربعی شکل با ابعاد ۰/۲۵ متر استفاده کردند. ارتفاع این شبیه‌ساز بارش ۱/۵ متر و فشار لازم جهت تشکیل قطرات باران به کمک آب موجود در مخزن آن قابل تامین بود. Cornelis و همکاران (۲۰۰۴) به کمک یک تونل باد و دستگاه شبیه‌ساز باران به بررسی تاثیر باد و مشخصات بارش بر میزان فرسایش از سطح خاک پرداختند. در این تحقیق، از یک شبیه‌ساز بارش با سه خط لوله مجهز به آبیاش‌هایی استفاده شد که به کمک جریان آب تحت فشار قادر به شبیه‌سازی بارش با شدت‌های مختلف بودند.

شبیه‌سازی بارش در این دستگاه‌ها غالباً با استفاده از دو روش متفاوت انجام می‌گیرد که بر این اساس می‌توان آن‌ها را به دو دسته اصلی شبیه‌ساز با نازل تحت فشار^۱ و شبیه‌ساز قطره‌ساز^۲ تقسیم‌بندی کرد (Corona و همکاران، ۲۰۱۳؛ Mahmoodbadi و Arabkhedri، ۲۰۱۱). در روش نوع اول، شبیه‌سازی بارش به کمک نازل‌های پخش آب صورت می‌گیرد. در این روش نازل‌هایی برای پخش آب در دستگاه تعبیه شده که بر اساس تنظیم فشار آب پشت این نازل‌ها امکان تنظیم میزان دبی آب خروجی از آن‌ها و در نتیجه تغییر شدت بارش شبیه‌سازی شده فراهم

¹ Nozzle rainfall simulator

² Drop-forming simulator

³ Mariotte bottle

قابل اتکا در مطالعات آب و خاک از قبیل مطالعات فرسایش خاک، نفوذپذیری خاک، رواناب سطحی و ... استفاده از دستگاه‌های شبیه‌ساز با قابلیت ایجاد بارش با شدت متغیر در طول زمان، مورد نیاز می‌باشد. در عین حال، بخش زیادی از این تحقیقات، به‌منظور شبیه‌سازی هر چه بهتر شرایط واقعی، نیازمند آزمایش‌های صحرایی می‌باشند. لذا سادگی، قابل حمل بودن و ارزان بودن سه عامل بسیار مهم برای دستگاه‌های شبیه‌ساز بارش مورد استفاده در این گونه تحقیقات می‌باشند. بنابراین، در این تحقیق، سعی شد تا با طراحی و آزمایش دستگاه بارش‌نگار ساز امکان ساخت دستگاهی ساده، ارزان و قابل حمل برای تولید هایتوگراف‌های مختلف بارش، جهت شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر بارش‌های مختلف در مطالعات مختلف آب و خاک فراهم شود.

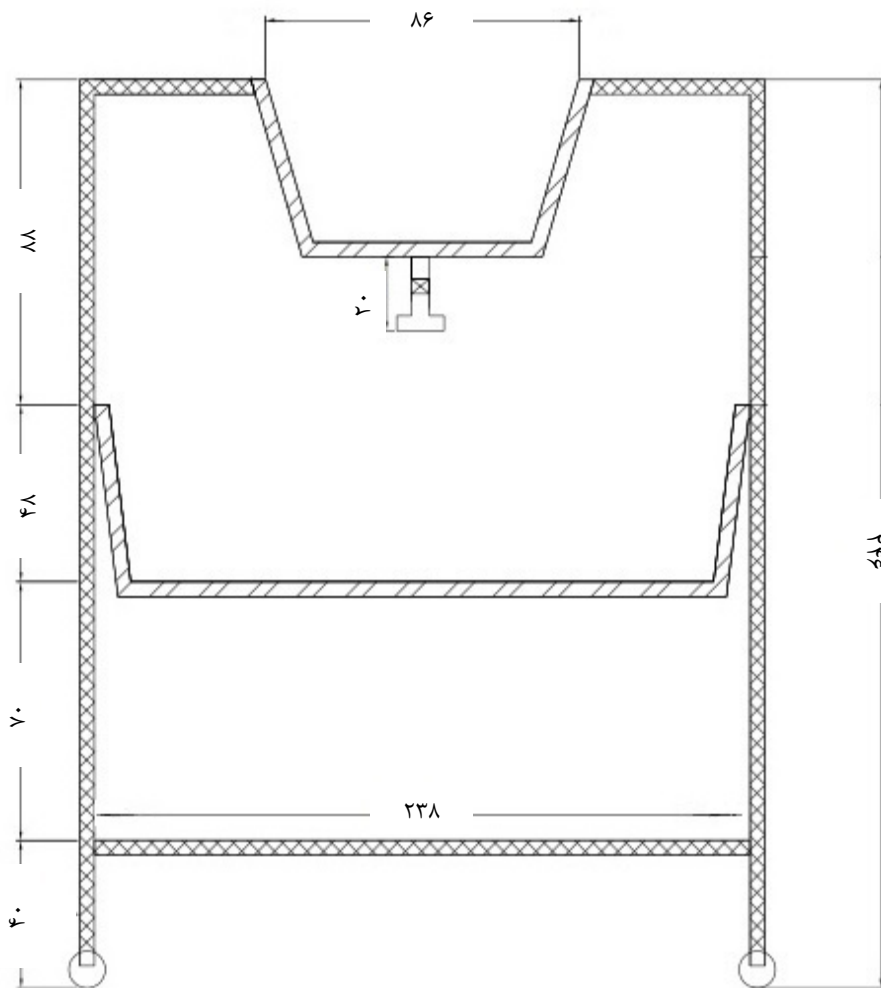
مواد و روش‌ها

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، نقیصه اصلی در شبیه‌سازهای بارش موجود، عدم امکان ساخت هایتوگراف مختلف بارش بوده و هدف از ساخت دستگاه بارش‌نگار ساز رفع این نقیصه در شبیه‌سازهای باران موجود می‌باشد. با طراحی و ساخت دستگاه بارش‌نگار ساز که در شکل ۳ نشان داده شده، سعی شد تا امکان تولید هایتوگراف‌های مختلف بارش را بر اساس تکنولوژی دستگاه‌های شبیه‌ساز بارش قطره‌ساز و به کمک تغییرات به‌وجود آمده در طراحی و نحوه عملکرد آن‌ها بر اساس مدل تانک فراهم آورد. مدل تانک قبلاً به‌وسیله برخی پژوهشگران (Gatzke و همکاران، ۲۰۰۰) برای شبیه‌سازی سیلاب استفاده شده که اینجا برای شبیه‌سازی باران توسعه داده شده است. دستگاه بارش‌نگار ساز از دو بخش اصلی ساخته شده است که شامل یک مخزن جهت نگهداشت آب و تنظیم فشار آب روی روزنه‌های خروج آب و یک قسمت که طراحی ابعاد آن بسته به سطح مورد آزمایش قابل تغییر بوده و محل قرار گرفتن روزنه‌های خروج آب می‌باشد.

شده که این لوله با حرکت عمودی در داخل مخزن بطری ماریوت امکان تنظیم میزان هوای ورودی به داخل آن و در نتیجه تنظیم میزان آب خروجی از مخزن را متناسب با این میزان هوای ورودی فراهم می‌آورد.

تا کنون باران‌سازهای مختلفی به‌منظور شبیه‌سازی شدت‌های مختلف بارش و تغییرات زمانی آن‌ها ساخته و در تحقیقات مختلف به‌کار گرفته شده است. Moore و همکاران (۱۹۸۳) از دستگاه باران‌ساز استفاده کردند که به کمک نازل‌های تحت فشار امکان شبیه‌سازی شدت بارش‌هایی بین ۳/۵ تا ۱۸۵ میلی‌متر بر ساعت را با ضریب یکنواختی ۸۰/۲ تا ۸۳/۷ درصد در محیطی به ابعاد ۶/۱×۴/۶ متر فراهم می‌آورد. Esteves و همکاران (۲۰۰۰) در تحقیق خود از باران‌ساز استفاده کردند که می‌توانست شدت بارش‌هایی بین ۶۰ تا ۷۶ میلی‌متر بر ساعت را در محیطی به ابعاد پنج در پنج متر شبیه‌سازی کند. Fister و همکاران (۲۰۱۲) دستگاه شبیه‌ساز بارشی را برای شبیه‌سازی بارش در محیطی به مساحت ۲/۲ متر مربع طراحی کردند. این دستگاه قابلیت شبیه‌سازی بارش‌هایی را بین ۸۵ تا ۹۶ میلی‌متر بر ساعت را با ضریب یکنواختی ۶۰ درصد شبیه‌سازی داشت. در تمام این تحقیقات از باران‌سازهایی با نازل تحت فشار یا باران‌سازهای با آبپاش‌های جارویی^۱ استفاده شده است. این باران‌سازها امکان شبیه‌سازی شدت‌های متغیر بارش را دارند. در عین حال، مشکل عمده باران‌سازهای جارویی یا آبپاش‌های متناوب، استفاده از قطعات پیچیده در طراحی آن‌ها بوده که حتی ممکن است برای شبیه‌سازی بارش‌های متغیر در طول زمان نیاز به کامپیوتر داشته باشند که به مراتب موجب پیچیده‌تر شدن و گران‌تر شدن این دستگاه‌ها می‌شود (Wilson و همکاران، ۲۰۱۴). به علاوه، در شرایط طبیعی، شدت بارش، در طول زمان بارش ثابت نبوده و از شدت کم شروع شده و پس از طی زمانی به اوج رسیده و سپس کاهش یافته و در نهایت بارش متوقف می‌شود. بنابراین، به‌منظور حصول به نتایج دقیق و

¹ Sweeping sprinklers



شکل ۳- نمونه و ابعاد دستگاه بارش نگار ساز (ابعاد بر حسب سانتی متر)

مخازن دستگاه می‌باشد. معادله حاکم بر جریان خروجی از هر یک از مخازن را می‌توان طبق رابطه (۱) بیان کرد (Zribi و Almutairi, ۲۰۰۶).

$$Q_t = CA\sqrt{2gh_t} \quad (1)$$

که در آن، Q_t جریان خروجی از مخزن، C ضریب روزنه خروجی مخزن، A سطح مقطع روزنه خروجی مخزن، g شتاب ثقل و h_t ارتفاع آب در مخزن در لحظه t می‌باشد. از طرف دیگر، طبق تعریف دبی خروجی از مخزن را می‌توان معادل تغییرات حجم مخزن در واحد زمان دانست که این تغییرات را در بازه‌های زمانی کوچک می‌توان طبق رابطه (۲) بر حسب تغییرات ارتفاع آب در مخزن بیان نمود.

$$\frac{dV}{dt} = \pi r^2 \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

از آنجا که جداره‌های مخزن مورد استفاده در دستگاه، دارای مقدار کمی شیب بوده، لذا مقدار شعاع در لحظه t در رابطه (۲) تابعی از مقدار h بوده که طبق رابطه (۳) قابل محاسبه می‌باشد.

$$r = R1 + \frac{R2 - R1}{H} h_t \quad (3)$$

که در آن، r شعاع مخزن در لحظه t ، $R1$ شعاع کف مخزن، $R2$ شعاع سطح مخزن در بالاترین نقطه و H ارتفاع مخزن می‌باشد. با جای‌گذاری رابطه (۳) در رابطه (۲) و معادل‌سازی آن با رابطه (۱)، رابطه (۴) با منقطع نمودن معادله دیفرانسیل به‌دست خواهد آمد.

$$CA\sqrt{2gh_t} = \pi(R1 + \frac{R2 - R1}{H} h_t)^2 \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (4)$$

که در آن، مقادیر شعاع سطح و کف مخزن، ارتفاع مخزن و سطح مقطع دهانه ارفیس مخزن مشخص و قابل اندازه‌گیری می‌باشد. لذا، با اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع آب در مخزن در فواصل زمانی مشخص امکان تعیین مقدار C یا همان ضریب روزنه مخزن و واسنجی رابطه (۴) وجود خواهد داشت. بدین ترتیب با مشخص بودن مقدار C و با قرار دادن مقدار ارتفاع اولیه آب مخزن در معادله (۴) امکان برآورد میزان ارتفاع آب در بازه‌های زمانی بعدی بر اساس مقدار C وجود خواهد داشت. همچنین، به‌منظور اندازه‌گیری میزان خطای این برآورد از رابطه مقدار میانگین خطای مطلق طبق رابطه (۵) استفاده شد.

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_o - X_c|}{X_o} \quad (5)$$

بخش اول دستگاه از یک مخزن نگهداشت آب تشکیل شده که خروجی در انتهای آن به‌منظور خروج آب از مخزن اول به همراه یک شیر برای تنظیم میزان خروجی تعبیه شده است. وجود شیر خروجی در انتهای دریچه مخزن اول نیز امکان تنظیم هایتوگراف خروجی را با تنظیم میزان خروج آب از مخزن اول و در نتیجه تنظیم ارتفاع آب روی روزنه‌های خروجی مخزن دوم فراهم آورده و می‌توان هایتوگراف‌های بارش متنوع‌تری را به کمک تنظیم این شیر خروجی آب ایجاد کرد. در انتهای شیر خروجی نیز به‌منظور جلوگیری از ایجاد تلاطم در سطح آب مخزن پایینی ناشی از خروج حجم زیاد آب از مخزن بالا، یک دوش در نظر گرفته شده تا به کمک آن آب خروجی در سطح مخزن پایین پخش شده و از ایجاد تلاطم در سطح آب مخزن پایین جلوگیری شود. وظیفه مخزن بالا، نگهداشت میزان آب مورد نیاز در طول بارش و تنظیم میزان خروج این آب به کمک شیر تعبیه شده در انتهای آن و در نتیجه فشار آب بر روی روزنه‌های مخزن دوم در طول مدت بارش می‌باشد.

در قسمت پایین این مخزن تنظیم فشار، مخزن دیگری قرار گرفته که در کف آن تعداد ۵۰ روزنه خروجی آب با قطر یک میلی‌متر تعبیه شده است. شدت باران شبه‌سازی شده تابعی از قطر این روزنه‌ها می‌باشد. به‌منظور امکان شبه‌سازی بارش با شدت‌های مختلف میزان خروج آب از این روزنه‌ها با تنظیم قطر روزنه خروجی انجام می‌شود. به‌منظور تنظیم شدت بارش، روزنه‌هایی با قطر یک میلی‌متر در کف مخزن پایین ایجاد شده و قطر روزنه‌های خروجی به کمک قرار دادن نخ‌های پلاستیکی با ضخامت‌های مختلف در این سوراخ‌ها تنظیم می‌شود. بدین ترتیب میزان خروج آب از روزنه‌ها با ضخامت این نخ‌ها قابل تنظیم خواهد بود. از طرف دیگر، قرار گرفتن این نخ‌ها در روزنه‌های خروج آب باعث می‌شود تا به‌دلیل جریان یافتن آب از حاشیه این نخ‌ها آب خروجی از روزنه‌ها به‌صورت قطره‌ای خارج شده و شرایط بارش هرچه دقیق‌تر به شرایط طبیعی نزدیک‌تر شود.

به‌منظور امکان ایجاد بارش‌های مشخص به‌وسیله دستگاه، نیاز به مدل‌سازی دینامیکی جریان آب در

در برابر ارتفاع آب مشاهداتی (نمودار ب) برای مخزن بالایی دستگاه نمایش داده شده است.

در شکل ۴- الف، مقادیر ارتفاع آب مشاهداتی در طول زمان در کنار ارتفاع آب محاسباتی به دست آمده از رابطه (۴) بر اساس مقادیر پارامتر C_1 برای مخزن بالا نمایش داده شده است. در این نمودار، محور عمودی مقادیر ارتفاع آب مخزن بر حسب سانتی متر و محور افقی زمان بر حسب ثانیه می باشد. همان طور که مشخص است، مقادیر ارتفاع آب محاسباتی در مخزن بالا در ابتدای نمودار دارای انطباق قابل قبولی بوده و این روند تا پس از ۲۵۰ ثانیه از شروع کاهش ارتفاع آب در مخزن بالا ادامه دار می باشد. هر چند پس از طی این زمان و در اواسط نمودار شاهد فاصله دار شدن این مقادیر از یکدیگر هستیم، اما دوباره این مقادیر به یکدیگر نزدیک شده و مقادیر ارتفاع آب محاسباتی و مشاهداتی تا حد زیادی بر یکدیگر منطبق می باشند. همچنین، در شکل ۴- ب نیز مقادیر ارتفاع آب محاسباتی و ارتفاع آب مشاهداتی در برابر یکدیگر به ترتیب در محورهای عمودی و افقی نمایش داده شده است. همان طور که در شکل ۴- ب نیز پیداست، داده ها بر نیم سازه ربع اول تا حد زیادی منطبق بوده و فقط در بخشی از اواسط و انتهای نمودار از نیم سازه ربع اول فاصله گرفته اند که این امر نشان از نزدیک بودن مقادیر محاسبه شده برای ارتفاع آب مخزن بالا از رابطه (۴) و مقدار ارتفاع آب مشاهده شده در عمل می باشد. همچنین، اختلافی که بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در هر دو نمودار در اواسط و انتهای کار قابل مشاهده است، می تواند ناشی از خطای اندازه گیری و قرائت سطح آب در مخزن باشد که در ادامه، میزان دقیق این خطای نسبی با توجه به داده های فوق از رابطه (۵) محاسبه شد که معادل ۰/۰۴۵ برای مخزن بالا بوده و کمتر از پنج درصد می باشد. لذا، با توجه به همه این موارد، می توان نتیجه گرفت که مقادیر ارتفاع آب محاسباتی با دقت قابل قبولی می تواند برآورد مناسبی برای مقادیر ارتفاع آب واقعی آب در مخزن بالایی دستگاه با توجه به مقدار ضریب روزنه محاسبه شده باشد.

که در آن، $MARE$ مقدار میانگین خطای مطلق، X_o مقدار داده مشاهداتی، X_c مقدار داده محاسبه شده و n تعداد داده ها می باشد.

بنابراین، با مشخص بودن ارتفاع آب در مخزن در بازه های زمانی مختلف، امکان محاسبه میزان خروجی آب از مخزن از طریق رابطه (۱) و در نتیجه محاسبه شدت بارش تولید شده و در نهایت دستیابی به های توگراف بارش تولیدی وجود خواهد داشت. بدین ترتیب امکان تنظیم دستگاه برای تولید های توگراف های مختلف بارش فراهم خواهد آمد.

نتایج و بحث

بر اساس مطالب مطرح شده در بخش قبل، در مرحله اول، اقدام به واسنجی رابطه (۴) و برآورد مقدار پارامتر C در این رابطه شد. به این منظور، مقادیر تغییرات ارتفاع آب در هر یک از مخازن در فاصله زمانی ۳۰ ثانیه ثبت و با توجه به این که مقدار پارامتر C ثابت نبوده و تابعی از مقدار ارتفاع آب در مخزن می باشد، بهترین رابطه برای برآورد مقدار پارامتر C برای هر یک از مخازن بر اساس داده های مشاهداتی استخراج شد که در روابط (۶) و (۷) نمایش داده شده است. همان طور که در روابط (۶) و (۷) نمایش داده شده است، مقدار C تابعی از مقدار نسبت ارتفاع آب به قطر روزنه می باشد.

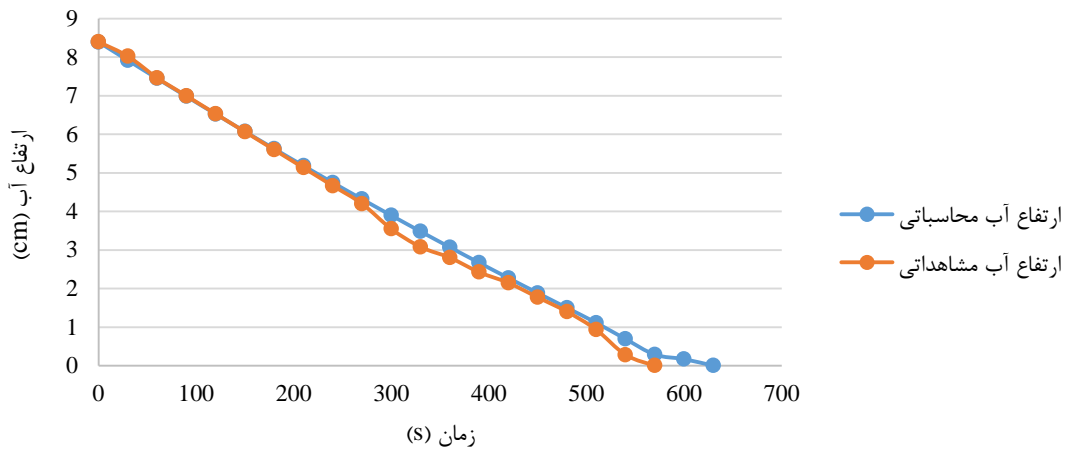
$$C_1 = 1.3 \left(\frac{h_1}{D_1} \right)^{-0.275} \quad (6)$$

$$C_2 = 2.3 \left(\frac{h_2}{D_2} \right)^{-0.25} \quad (7)$$

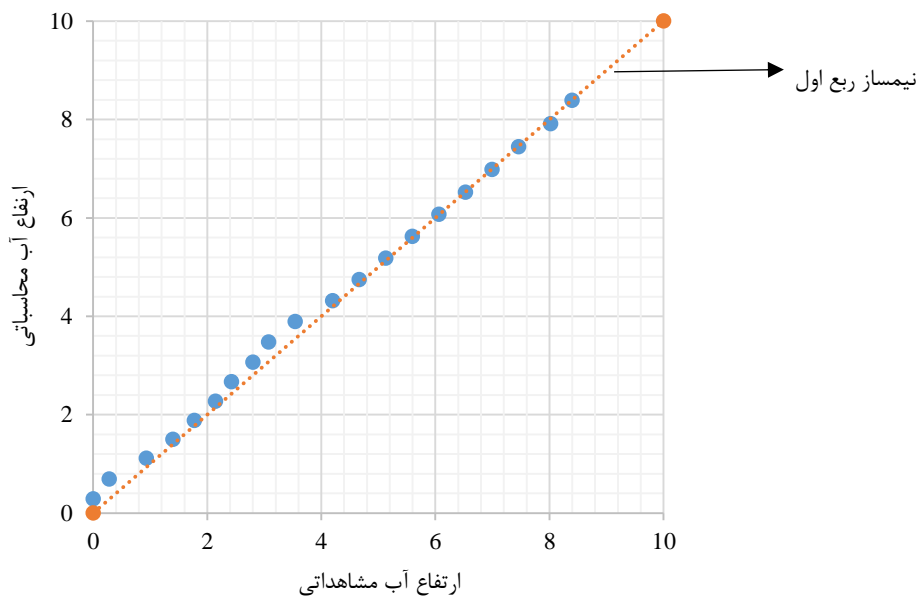
که در آن، h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع آب در مخزن بالا و پایین، D_1 و D_2 به ترتیب قطر روزنه خروج آب از مخزن بالا و مجموع قطر روزنه های خروجی آب از مخزن پایین و C_1 و C_2 به ترتیب مقادیر ضریب روزنه برای مخازن بالا و پایین می باشد.

در مرحله بعد، بر اساس مقادیر به دست آمده از روابط (۶) و (۷) برای پارامتر C_1 و C_2 مقادیر پارامتر h در رابطه (۴) برای هر یک از مخازن محاسبه شده و با مقادیر h مشاهداتی مقایسه شد. بر این اساس، در شکل ۴ مقادیر ارتفاع آب محاسباتی و مشاهداتی در طی زمان (نمودار الف) و مقادیر ارتفاع آب محاسباتی

(الف)



(ب)



شکل ۴- الف) مقادیر ارتفاع آب محاسباتی و مشاهداتی برای مخزن بالایی دستگاه در زمان‌های مختلف و ب) مقادیر ارتفاع آب محاسباتی در برابر ارتفاع آب مشاهداتی برای مخزن بالایی دستگاه

در برابر یکدیگر نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵- الف نمایش داده شده است، مقادیر ارتفاع آب محاسباتی به‌جز بخش‌هایی از اواسط و انتهای نمودار انطباق خوبی با مقادیر ارتفاع آب مشاهداتی داشته که قرار گرفتن داده‌ها بر نیم‌ساز ربع اول در شکل ۵- ب نیز به‌جز بخش‌هایی از ابتدا و انتهای این نمودار موید این مطلب است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، فاصله گرفتن مقادیر ارتفاع آب محاسباتی و مشاهداتی در بخش‌هایی از دو نمودار از یکدیگر

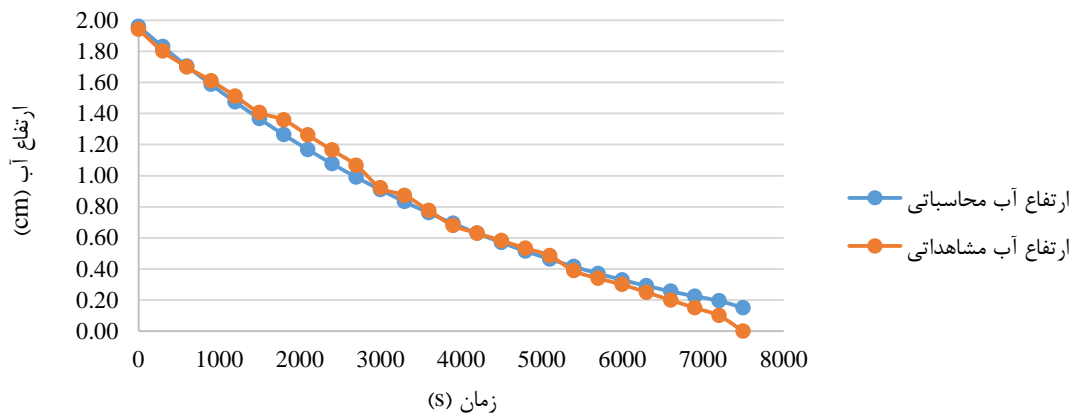
در شکل ۵، نتیجه واسنجی دستگاه برای مخزن پایین نمایش داده شده است. در این شکل، مقادیر ارتفاع آب محاسباتی و مشاهداتی در طی زمان (نمودار الف) و مقادیر ارتفاع آب محاسباتی در برابر ارتفاع آب مشاهداتی (نمودار ب) برای مخزن پایینی دستگاه نشان داده شده است.

در شکل ۵- الف و ب مقادیر ارتفاع آب مشاهداتی و ارتفاع آب محاسباتی از رابطه (۴) بر اساس مقادیر پارامتر C_2 برای مخزن پایین به‌ترتیب در طی زمان و

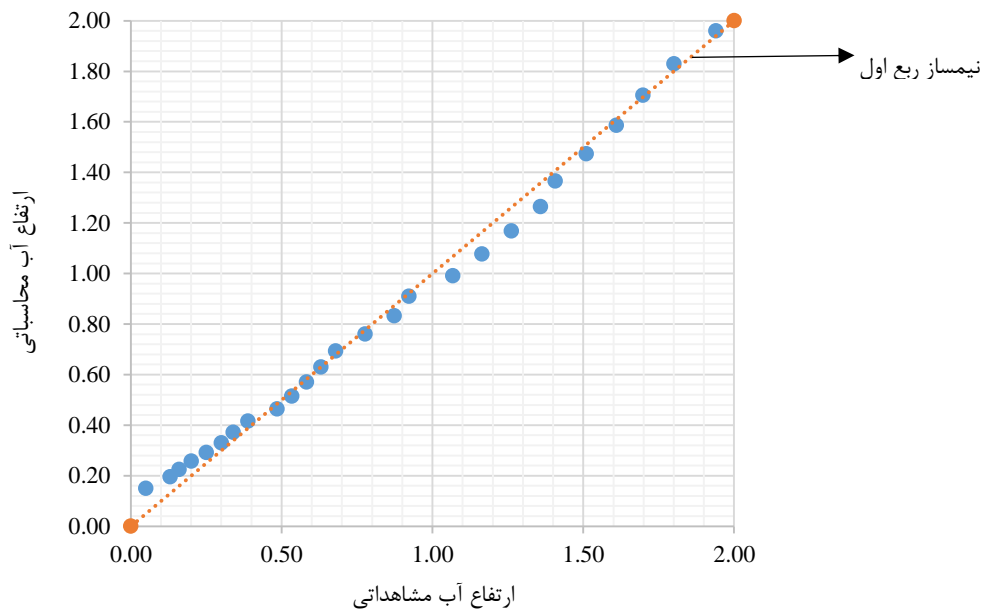
نشان‌دهنده برآورد قابل قبول و با دقت بالای ارتفاع آب محاسباتی از رابطه (۴) بر اساس مقدار پارامتر C_2 برای میزان ارتفاع واقعی آب در مخزن پایینی دستگاه می‌باشد.

می‌تواند به علت خطای قرائت داده در هنگام داده‌برداری باشد که در اینجا نیز میزان این خطا برآورد طبق رابطه (۵) محاسبه و معادل ۰/۰۴۹ به دست آمد که نزدیک به پنج درصد می‌باشد. لذا، شکل ۵ و همچنین، میزان خطای محاسبه شده

(الف)



(ب)



شکل ۵- الف) مقادیر ارتفاع آب محاسباتی و مشاهداتی برای مخزن پایینی دستگاه در زمان‌های مختلف و ب) مقادیر ارتفاع آب محاسباتی در برابر ارتفاع آب مشاهداتی برای مخزن بالایی دستگاه

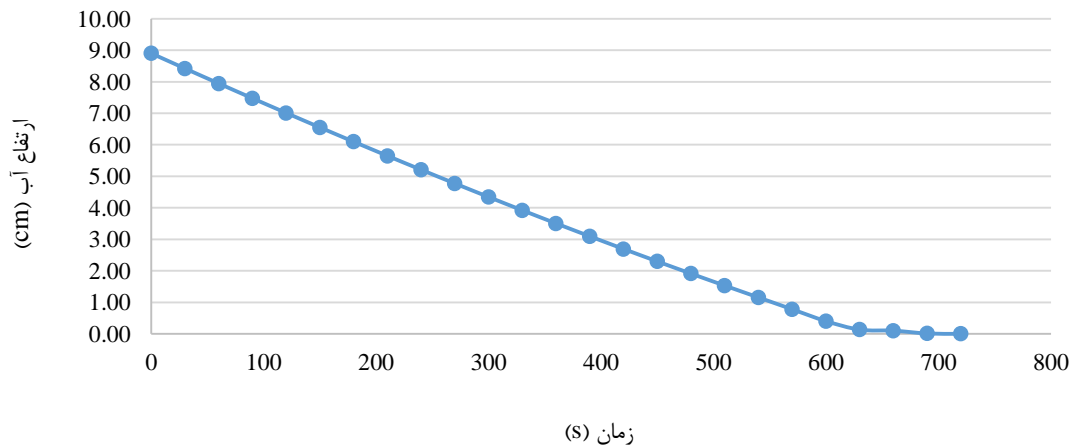
وجود داشته و بر این اساس می‌توان هایتوگراف بارش خروجی از دستگاه را به ازای ارتفاع آب‌های اولیه مختلف در مخزن دستگاه برآورد کرد. بر همین اساس، مدل روندیابی مخازن دستگاه بر اساس روابط (۴)، (۶)

حال با توجه به امکان محاسبه مقادیر پارامتر C از روابط (۶) و (۷) برای هر یک از مخازن و با جای‌گذاری این مقادیر به دست آمده در رابطه (۴)، امکان برآورد مقدار ارتفاع آب در هر یک از مخازن

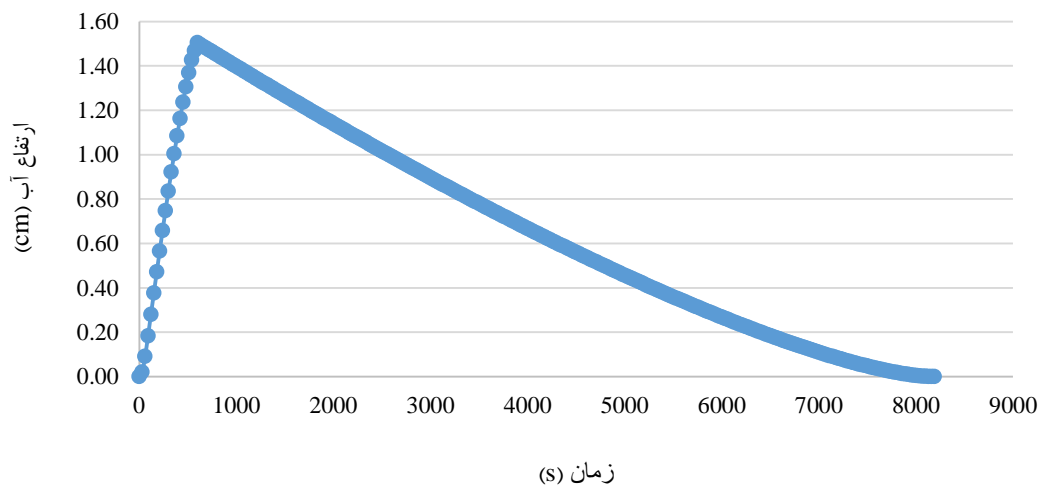
از این ارتفاع آب اولیه، ارتفاع آب در مخازن دستگاه به کمک روندیابی مخازن به‌وسیله ماکروی نوشته شده در محیط نرم‌افزار Excel در حالت شیر کاملاً باز مخزن اول و قطر روزنه خروجی یک میلی‌متر مخزن پایین، در بازه‌های زمانی ۳۰ ثانیه محاسبه و در نهایت هایتوگراف خروجی به‌دست آورده شد. در شکل شماره ۶- الف و ب، به‌ترتیب روند تغییرات ارتفاع آب در مخزن بالا و پایین دستگاه بر اساس تنظیمات فوق و محاسبات صورت گرفته، نمایش داده شده است.

و (۷) به کمک ماکرونویسی در محیط نرم‌افزار Excel تهیه شد. بدین ترتیب، امکان محاسبه و مشاهده تغییرات ارتفاع آب در هر یک از مخازن دستگاه و هایتوگراف بارش خروجی به ازای حالات مختلف باز و بستن بودن شیر خروجی آب مخزن بالا، قطر روزنه- های مخزن پایین و همچنین، ارتفاع آب اولیه در مخزن بالا وجود دارد. در مرحله بعد، به‌منظور نمایش هایتوگراف خروجی دستگاه، ارتفاع آب نه سانتی‌متر در مخزن بالا به‌عنوان ارتفاع آب اولیه در نظر گرفته شد و با استفاده

(الف)



(ب)



شکل ۶- الف) تغییرات ارتفاع آب مخزن بالا در برابر زمان و ب) تغییرات ارتفاع آب مخزن پایین در برابر زمان

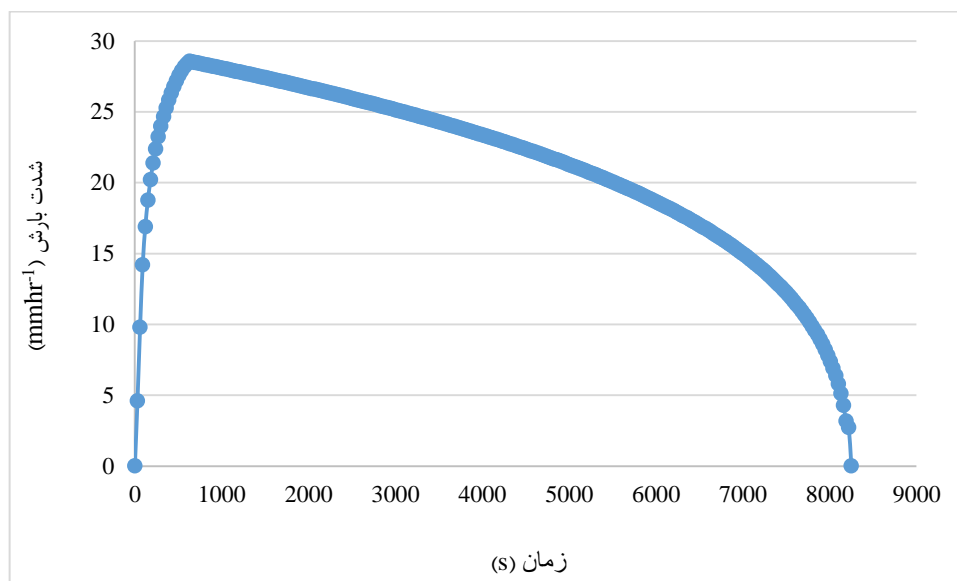
مخزن از ارتفاع آب اولیه نه سانتی‌متر شروع به تخلیه کرده و با یک شیب ثابت این روند ادامه یافته تا نهایتاً کل آب حجم مخزن بالا پس از نزدیک به ۷۰۰ ثانیه تخلیه شده و وارد مخزن پایینی دستگاه می‌شود. این

در شکل ۶- الف، ارتفاع آب در مخزن بالا بر حسب سانتی‌متر در محور عمودی و مقدار زمان بر حسب ثانیه در محور افقی نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ارتفاع آب در این

مختلف وجود خواهد داشت. در شکل ۶- ب، تغییرات سطح آب در مخزن پایینی دستگاه بر حسب سانتی‌متر در محور عمودی و زمان بر حسب ثانیه در محور افقی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، پس از زمان خالی شدن مخزن بالا یعنی نزدیک به ۷۰۰ ثانیه که در شکل ۶- الف نشان داده شد، ارتفاع آب در این مخزن به اوج رسیده و پس از طی زمان ۸۰۰۰ ثانیه این مخزن خالی می‌شود. این مدت زمان تخلیه تابعی از قطر روزنه خروجی مخزن پایینی دستگاه بوده که با تغییر آن علاوه بر تغییر شدت بارش خروجی، مدت زمان تخلیه این مخزن و در نتیجه مدت زمان بارش تولید شده نیز تغییر خواهد کرد.

در شکل ۷، هایتوگراف بارش تولیدی نمایش داده شده است. در این نمودار شدت بارش ایجاد شده به وسیله دستگاه در محور عمودی بر حسب میلی‌متر بر ساعت و زمان بر حسب ثانیه در محور افقی نمایش داده شده است.

زمان تخلیه، همان‌طور که در شکل‌های ۶- ب و ۷ نمایش داده شده، به‌طور مستقیم بر زمان رسیدن به نقطه اوج هایتوگراف خروجی تاثیر می‌گذارد. چرا که با خالی شدن آب از مخزن بالایی به تدریج ارتفاع آب در مخزن پایینی دستگاه بالا رفته و نهایتاً با تخلیه مخزن بالا، ارتفاع آب در مخزن پایینی دستگاه به حداکثر مقدار خود خواهد رسید. با حداکثر شدن ارتفاع آب در مخزن پایینی دستگاه، خروجی آب از مخزن پایینی دستگاه نیز به حداکثر خود می‌رسد. چرا که بیشترین ارتفاع آب بر روی روزنه‌های خروجی مخزن قرار گرفته و از آنجا که طبق رابطه (۱) دبی خروجی روزنه تابعی از این ارتفاع آب خواهد بود، لذا بیشترین خروجی نیز در این نقطه مشاهده شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که زمان خروج آب از مخزن بالایی تاثیر مستقیمی بر شکل هایتوگراف بارش خروجی دستگاه داشته و بدین ترتیب با تنظیم شیر تعبیه شده در خروجی مخزن بالایی دستگاه، امکان ایجاد هایتوگراف‌های مختلفی با زمان‌های رسیدن به اوج



شکل ۷- هایتوگراف بارش تولید شده

از مخزن بالایی ارتفاع آب در این مخزن کاهش یافته و این در حالی است که با پر شدن مخزن پایینی با آب خروجی از مخزن بالا شدت باران خروجی از دستگاه از صفر شروع به زیاد شدن کرده و همچنان که آب از مخزن بالا خارج می‌شود، با زیاد شدن ارتفاع آب روی روزنه‌های خروجی مخزن پایین این شدت زیاد شده

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، شدت بارش ایجاد شده پس از طی زمانی معادل با زمان به اوج رسیدن ارتفاع آب در مخزن پایینی دستگاه به اوج خود رسیده و سپس با تخلیه کامل مخزن پایینی دستگاه به صفر می‌رسد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ و بنا بر آنچه بیان شد، می‌توان دریافت که با خروج آب

شد، امکان شبیه‌سازی بارش با شدت‌هایی بین ۷/۷۴ تا ۲۸/۵۷ میلی‌متر بر ساعت وجود داشت و می‌تواند سطحی به مساحت ۰/۵ متر مربع را پوشش دهد. دستگاه شبیه‌ساز بارش Cerda و همکاران (۱۹۹۷) قابلیت شبیه‌سازی باران‌هایی تا شدت ۵۵ میلی‌متر بر ساعت را در سطحی به وسعت ۰/۲۴ متر مربع داشت. Fernandez و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیق خود از دستگاه باران‌سازی با قابلیت شبیه‌سازی بارش‌هایی با شدت بالاتر یعنی بین صفر تا ۱۲۰ میلی‌متر بر ساعت با سطح پوشش ۰/۲۵ متر مربع استفاده کردند. لذا دستگاه ساخته شده نسبت به دستگاه‌های مشابه خود می‌تواند سطح بزرگ‌تری را مورد پوشش قرار داده و در حد متوسط این دستگاه‌ها، شبیه‌سازی شدت‌های مختلف بارش را انجام دهد. در عین حال، این دستگاه قابلیت شبیه‌سازی بارش‌های طولانی را نداشته و با توجه به حجم مخزن می‌تواند حداکثر تا سه ساعت بارش با شدت‌هایی بین صفر تا ۳۰ میلی‌متر بر ساعت را شبیه‌سازی کند.

در مرحله بعد، به‌منظور ارزیابی امکان تولید هایتوگراف‌های طبیعی با این دستگاه، اقدام به شبیه‌سازی هایتوگراف بی‌بعد بارش ایستگاه هواشناسی نیاوران در استان تهران شد. در جدول ۱، توزیع زمانی بارش در ایستگاه نیاوران نمایش داده شده است (Banihabib, ۲۰۱۶؛ Banihabib و همکاران، ۲۰۱۵).

تا در نهایت با خالی شدن مخزن بالا و قرار گرفتن حداکثر ارتفاع آب بر روی روزنه‌های خروجی آب مخزن پایین به حداکثر شدت بارش می‌رسد. در ادامه نیز با خروج آب از مخزن پایین و در نتیجه کاهش ارتفاع آب بر روی روزنه‌های خروجی، شدت بارش شروع به کاهش کرده تا در نهایت با اتمام آب در مخزن پایین آب خروجی از این مخزن قطع شده و بارش متوقف شده است. بدین ترتیب، به کمک این دستگاه شدت بارش تولیدی دارای توزیع زمانی شده و شدت بارش باران در طول مدت بارش همانند شرایط طبیعی از صفر شروع شده و پس از رسیدن به اوج بارش دوباره به نقطه صفر بازگشته و به این ترتیب هایتوگراف بارش تشکیل می‌شود. در عین حال، این دستگاه قابلیت تولید هایتوگراف‌های مختلف با مشخصات متفاوت را داشته و می‌توان شدت، مدت و زمان رسیدن به نقطه اوج هایتوگراف را به‌وسیله آن تنظیم و بارش‌های مختلفی را به این روش تولید نمود. بر این اساس، محدوده شدت بارش‌هایی که می‌توان با این دستگاه شبیه‌سازی کرد، بین صفر تا ۳۰ میلی‌متر بر ساعت بوده و می‌تواند سطحی دایره‌ای شکل تا مساحت ۳/۱۴ متر مربع را تحت پوشش قرار دهد. این مقادیر در دستگاه‌های باران‌ساز با فناوری مشابه (قطره‌ساز) که در تحقیق‌های مختلف به‌کار گرفته شده متفاوت می‌باشد. برای مثال در باران‌سازی که به‌وسیله Foster و همکاران (۲۰۰۰) به‌کار گرفته

جدول ۱- توزیع زمانی بارش در ایستگاه نیاوران

زمان				درصد بارش
۲۵ درصد سوم	۲۵ درصد دوم	۲۵ درصد اول	۲۵ درصد چهارم	
۲۹/۱	۴۰/۷۴	۱۱/۱	۱۹/۴۱	

شده به ازای تنظیمات مختلف دستگاه، در هر بار اجرای مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر داده‌های مشاهداتی در هر یک از چارک‌های زمانی مقایسه و مقدار خطا به کمک رابطه (۵) محاسبه شد. بر این اساس، کم‌ترین مقدار خطای به‌دست آمده و تنظیمات دستگاه برای ایجاد هایتوگراف مربوطه در جدول ۲ نمایش داده شده است.

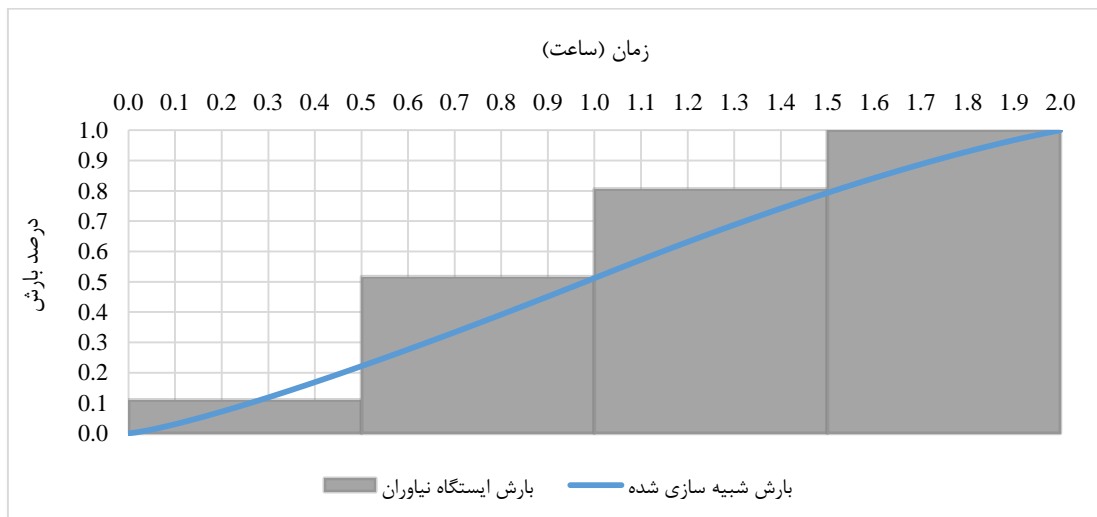
بدین منظور، مدل نوشته شده برای هایتوگراف تولیدی دستگاه به ازای مقادیر مختلف ارتفاع آب اولیه مخزن بالا، قطر روزنه مخزن بالا و قطر روزنه‌های خروجی مخزن پایین برای بارش دو ساعته اجرا و مقادیر درصد عمق بارش ایجاد شده به‌وسیله دستگاه در هر یک از چارک‌های زمانی بارش با مقادیر جدول ۱ مقایسه شد. به‌منظور مشخص نمودن دقیق‌ترین شبیه‌سازی صورت گرفته از بین هایتوگراف‌های تولید

جدول ۲- توزیع زمانی بارش در ایستگاه نیاوران

MARE	تنظیمات دستگاه				پارامتر
	قطر روزنه‌های مخزن (mm) پایین	میزان بازشدگی شیر مخزن بالا (درصد)	قطر روزنه مخزن بالا (cm)	ارتفاع اولیه آب در مخزن بالا (cm)	
۰/۰۶۱	۰/۸۵	۳۳	۰/۶	۵/۵	مقدار

به‌خوبی در این چارک‌های شبیه‌سازی کرده و بیشترین مقدار اختلاف شبیه‌سازی در چارک اول می‌باشد (شکل ۸). این مقدار خطای شبیه‌سازی در کل بارش با توجه به جدول ۲ معادل شش درصد برآورد شده است. لذا، با توجه به جدول ۲ و شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که دستگاه توانسته به‌خوبی بارش ایستگاه مربوطه را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

در شکل ۸، هایتوگراف تجمعی بارش شبیه‌سازی شده و بارش ایستگاه نیاوران به نمایش درآمده است. در این شکل، در محور افقی زمان بر حسب ساعت و درصد بارش نیز در محور عمودی نمایش داده شده است. در چارک‌های دوم تا چهارم، با توجه به منطبق شدن نمودار بارش شبیه‌سازی شده بر نقاط انتهایی هر چارک، دستگاه توانسته بارش ایستگاه مذکور را



شکل ۸- هایتوگراف تجمعی بارش شبیه‌سازی شده و بارش ایستگاه نیاوران

نتیجه‌گیری

و ساده باشد. بر این اساس، با قرار گرفتن دو مخزن متوالی و به کمک استفاده از روندیابی در چند تانک (مخزن) متوالی، دستگاه شبیه‌ساز بارشی طراحی و ساخته شد که بتواند هایتوگراف بارش را تولید نماید. سپس، این دستگاه بر اساس داده‌های مشاهداتی واسنجی شد که نتایج نشان‌دهنده خطای واسنجی کمتر از پنج درصد می‌باشد. بر اساس نتایج واسنجی، مدل روندیابی مخازن دستگاه تهیه و به کمک آن یک بارش مصنوعی شبیه‌سازی شد. در ادامه نیز به منظور ارزیابی قابلیت دستگاه در شبیه‌سازی بارش‌های واقعی، اقدام به شبیه‌سازی یک هایتوگراف بارش

هر چند دستگاه‌های شبیه‌ساز کنونی امکان شبیه‌سازی بارش با شدت ثابت را به‌خوبی دارند، ولی با توجه به این‌که در طبیعت بارش‌ها غالباً با شدت ثابت رخ نمی‌دهند و دستگاه‌های شبیه‌ساز بارش با قابلیت تولید شدت متغیر بارش در طول زمان اغلب گران قیمت و پیچیده می‌باشند، لذا در این تحقیق سعی به طراحی دستگاهی به‌منظور شبیه‌سازی بارش بر اساس تکنولوژی شبیه‌سازهای قطره‌ساز شد که امکان ایجاد هایتوگراف‌های مختلف بارش را به‌منظور هر چه دقیق‌تر شبیه‌سازی داشته و در عین حال ارزان

می‌تواند حداکثر تا سه ساعت بارش با شدت‌هایی بین صفر تا ۳۰ میلی‌متر بر ساعت را شبیه‌سازی کند.

تشکر و قدردانی

از مدیریت پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، جناب آقای دکتر نیک‌کامی، که با ایجاد امکان بازدید از باران‌سازهای پژوهشکده موجبات شروع این تحقیق را فراهم نمودند و از توضیحات مسئولین، اعضای محترم هیات علمی و تکنسین‌های آن پژوهشکده صمیمانه تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

ایستگاه نیاوران در تهران شد که نتایج نشان‌دهنده شبیه‌سازی این هایتوگراف با خطای شش درصد می‌باشد. لذا، بر اساس این نتایج، می‌توان گفت که به کمک این دستگاه می‌توان بارش‌هایی با شدت متغیر در طول زمان و همچنین، با هایتوگراف‌های متفاوت از نظر زمان رسیدن به اوج و طول مدت بارش را شبیه‌سازی کرد. در عین حال، این دستگاه قابلیت شبیه‌سازی بارش‌های طولانی و تغییرات لحظه‌ای در طول مدت بارش را نداشته و با توجه به حجم مخزن

منابع مورد استفاده

1. Almutairi, N.B. and M. Zribi. 2006. Sliding mode control of coupled tanks. *Mechatronics*, 16(7): 427-441.
2. Aoki, A.M. and R. Sereno. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia*, 23: 23-31.
3. Banihabib, M.E. 2016. Performance of conceptual and black-box models in flood warning systems. *Cogent Engineering*, 3(1): 1-13.
4. Banihabib, M.E., A. Arabi and A. A. Salha. 2015. A dynamic artificial neural network for assessment of land-use change impact on warning lead-time of flood. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 5(2): 163-178.
5. Cerdà, A., S. Ibáñez and A. Calvo. 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, 11(2): 163-170.
6. Cornelis, W.M., G. Erpul and D. Gabriels. 2004. The ICE wind tunnel for wind and water interaction research. *Wind and Rain Interaction in Erosion*, (50): 59-68.
7. Corona, R., T. Wilson, L.P. D'Adderio, F. Porcù, N. Montaldo and J. Albertson. 2013. On the estimation of surface runoff through a new plot scale rainfall simulator in Sardinia, Italy. *Procedia Environmental Sciences*, 19: 875-884.
8. Esteves, M., O. Planchon, J.M. Lapetite, N. Silveira and P. Cadet. 2000. The EMIRE large rainfall simulator: design and field testing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 681-690.
9. Fernández-Gálvez, J., E. Barahona and M.D. Mingorance. 2008. Measurement of infiltration in small field plots by a portable rainfall simulator: application to trace-element mobility. *Water, Air, and Soil Pollution*, 191(1-4): 257-264.
10. Fister, W., T. Iserloh, J.B. Ries and R.G. Schmidt. 2012. A portable wind and rainfall simulator for in situ soil erosion measurements. *Catena*, 91: 72-84.
11. Foster, I.D.L., M.A. Fullen, R.T. Brandsma and A.S. Chapman. 2000. Drip screen rainfall simulators for hydro and pedo geomorphological research: the coventry experience. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(7): 691-707.
12. Gatzke, E.P., E.S. Meadows, C. Wang and F.J. Doyle. 2000. Model based control of a four-tank system. *Computers and Chemical Engineering*, 24(2-7): 1503-1509.
13. Grierson, I.T. and J.M. Oades. 1977. A rainfall simulator for field studies of run-off and soil erosion. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(1): 37-44.
14. Hamed, Y., J. Albergel, Y. Pépin, J. Asseline, S. Nasri and P. Zante. 2002. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion-sensitive semiarid catchment. *Catena*, 50: 1-16.
15. Huang, J., P. Wu and X. Zhao. 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena*, 104: 93-102.
16. Kamali, K., A. Jafari Ardakani and M. Eslami. 2015. The relationship determine between measured soil erodibility using simulator and Wischmeier nomograph and Bisal method. *Watershed Management Research (Pajouhesh and Sazandegi)*, 107: 66-72 (in Persian).
17. Mahmoudabadi, M. and M. Arabkhedri. 2011. Rainfall and erosion simulation laboratory soil conservation and watershed management research institute: characteristics, capabilities and application. *Iranian Irrigation and Water Engineering*, 1(3): 1-11 (in Persian).

18. Martínez-Mena, M., R. Abadía, V. Castillo and J. Albaladejo. 2001. Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *Cuaternario y Geomorfología*, 15(1-2): 31-43.
19. Moore, I.D., M.C. Hirschi and B.J. Barfield. 1983. Kentucky rainfall simulator. *Transactions of the ASAE*, 26(4): 1085-1089.
20. Sangüesa, C., J. Arumí, R. Pizarro and O. Link. 2010. A rainfall simulator for the in situ study of superficial runoff and soil erosion. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(1): 178-182.
21. Wilson, T.G., C. Cortis, N. Montaldo and J.D. Albertson. 2014. Development and testing of a large, transportable rainfall simulator for plot-scale runoff and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10): 4169-4183.

Simulation of rainfall hyetograph based on cascades tanks routing

Mohammad Ebrahim Banihabib^{*1} and Bahman Vaziri²

¹ Associate Professor, Abouraihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran and ² PhD Student, Abouraihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 05 October 2017

Accepted: 12 December 2017

Abstract

Since most of water and soil researches require artificial rainfall simulation, thus rainfall simulators are applied instruments in this field of study. For this reason, various rain simulators have been designed, built and employed in researches till now. Even though all rainfall simulators provide good simulation for rainfall intensity, but simulation of varied rainfall are expensive and complicated, and their field studies cannot conducted easily. Thus, in this research, in order to simulate rainfall similar to natural rain and applicable for field tests, it is aimed to design and build a simple and affordable rainfall simulator using flow cascades reservoirs (tanks) routing. The result of calibration of simulator showed its error less than 5%. Moreover, simulation of observed hyetograph of Niyavaran station showed an error of 6.1%. The simulator can simulate hyetographs with three hours duration and 30 mm per hour of intensity. Consequently, the proposed instrument and its numerical model can be applied for simulating artificial rainfall hyetograph in rainfall erosion and infiltration field research tests.

Keywords: Artificial rainfall, Rainfall intensity, Rainfall simulator, Rainfall temporal variation, Splash erosion

* Corresponding author: banihabib@ut.ac.ir