

## واسنجی مدل SWMM در حوضه آبخیز شمال شهر تهران

- ❖ رضا بدیع زادگان؛ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گرایش سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ❖ سعیدرضا خدائشناس\*؛ استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ❖ کاظم اسماعیلی؛ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### چکیده

براساس معیارهای شهری و مدیریت کلان شهرها، یکی از مسائل مهم، کنترل رواناب‌های سطحی و هدایت آن‌ها به سمت کانال‌های زهکشی می‌باشد. به این منظور و برای اطلاع از عکس‌العمل حوضه‌های آبخیز شهری و شبیه‌سازی پدیده بارش-رواناب در این حوضه‌ها، از مدل‌های نرم‌افزاری استفاده می‌شود. از این رو با توجه به اطلاعات کم بارش و رواناب، در حوضه‌های شهری، معمولاً این مدل‌ها بدون واسنجی و یا با واسنجی‌های غیر واقعی به کار گرفته می‌شوند که باعث می‌شود که نتایج از واقعیت دور باشد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های واقعی ایستگاه هواشناسی شمال تهران و ایستگاه هیدرومتری مقصودبیک (زرگنده)، نرم‌افزار SWMM مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت و پارامترهای ورودی به مدل، به‌دست آمدند. برای کالیبراسیون این مدل از سه رویداد بارندگی برای واسنجی مدل و از دو رویداد برای صحت‌سنجی آن استفاده شد. براساس اطلاعات به‌دست آمده از مقادیری شبیه‌سازی و مشاهداتی این رویدادهای بارندگی، دبی بیشینه، حجم رواناب خروجی و زمان اوج سیلاب مورد مقایسه قرار گرفت. میزان RMSE برای هیدروگراف خروجی از حوضه زرگنده برای وقایع اول تا پنجم به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۲۲، ۰/۴، ۰/۳۷ و ۰/۱۶ و ضریب NSC برابر با ۰/۹۱، ۰/۹۴، ۰/۹۳، ۰/۹۴ و ۰/۹۴ به‌دست آمد. همچنین میزان درصد اختلاف دبی بیشینه سیلاب، مدل‌سازی و مشاهداتی برای وقایع اول تا پنجم به ترتیب ۷/۳۳، ۹/۶۹، ۵/۸، ۵/۶ و ۹/۹۳ و برای حجم رواناب این درصد اختلاف به ترتیب ۸/۸۲، -۳/۰۸، ۸/۸، ۱۹/۴۳- و ۵/۱۱ به‌دست آمد. با توجه به این نتایج، عملکرد مدل SWMM در شبیه‌سازی رواناب‌های ناشی از بارندگی در این منطقه قابل قبول بوده و می‌تواند به جهت مدیریت و کنترل رواناب‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد.

**کلید واژگان:** ایستگاه هیدرومتری مقصودبیک، حوضه آبخیز شهری، مدل بارش-رواناب SWMM، واسنجی و صحت‌سنجی مدل.

## ۱. مقدمه

و دقت مدل SWMM برای این پژوهش را نشان می‌دهد [۹]. در مطالعه موردی دیگری با کمک نرم‌افزار SWMM رواناب شهر گرگان مورد شبیه‌سازی قرار گرفت که در این مطالعه به جهت واسنجی مدل از چهار رویداد بارندگی و اندازه‌گیری ارتفاع رواناب با کمک خط‌کش Rod و اندازه‌گیری سرعت رواناب توسط میکرومولینه در خروجی حوضه آبخیز استفاده شد. همچنین از دو رویداد بارندگی دیگر برای صحت‌سنجی استفاده شده است. در این تحقیق بیان شد که دبی و حجم رواناب شبیه‌سازی شده انطباق خوبی با مقادیر مشاهداتی داشته و نشان دهنده دقت مناسب مدل SWMM جهت شبیه‌سازی رواناب شهری در این منطقه می‌باشد [۲]. سیستم رواناب شهری غرب شهر کرمان از نظر کمی و کیفی مورد مطالعه قرار گرفت که هدف از این پژوهش تشخیص خطر آب گرفتگی سیستم‌های زهکشی شهری به کمک مدل SWMM و یک سیستم چند شاخصه جهت محاسبه تغییرات مکانی خطر آب گرفتگی می‌باشد [۱۴]. در پژوهشی علمی رواناب حوضه‌ای در شمال غرب شهر سانتاندر در اسپانیا با کمک نرم‌افزار SWMM مورد شبیه‌سازی و پیش‌بینی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، درصد سطوح نفوذناپذیر، به عنوان حساس‌ترین پارامتر در شبیه‌سازی مدل شناخته شد که تأثیر زیادی بر حجم رواناب و دبی اوج جریان دارد. همچنین ضریب زبری و عرض معادل زیرحوضه‌ها و شیب آن‌ها تأثیر به‌سزایی در زمان دبی پیک هیدروگراف شبیه‌سازی شده دارند. از نتایج دیگر این تحقیق می‌توان به انطباق نتایج صحت‌سنجی و اختلاف کم ۴٪ حجم رواناب مدل‌سازی و مشاهداتی اشاره نمود [۲۲]. در مطالعه‌ای دیگر، شبکه جمع‌آوری رواناب‌های سطحی شهر هالیپاچا کشور لتونی با دو نرم‌افزار InfoWork CS و SWMM 5 مورد مدل‌سازی قرار گرفتند. برای واسنجی مدل از اطلاعات دبی پمپاژ تصفیه‌خانه فاضلاب برای دو رویداد بارندگی در سال ۲۰۰۴ و برای صحت‌سنجی مدل از اطلاعات بارش و رواناب یک رویداد بارندگی استفاده شد.

شهر تهران روی مخروط افکنه و دشت آبرفتی رودخانه‌های که از رشته کوه‌های البرز سرچشمه می‌گیرند بنا شده است. در حدود ۳۰ الی ۴۰ سال قبل کاربری اراضی بیشتر نواحی شمالی شهر تهران اکثراً باغات، مزارع یا اراضی بایر بوده ولی با گسترش روز افزون شهر تهران این اراضی جای خود را به خیابان‌ها، بزرگراه‌ها و ساختمان‌های مسکونی و تجاری داده و به علت قیمت بالا و مرغوب بودن اراضی تعرض به حریم رودخانه‌هایی که از کوه‌های شمالی شهر سرچشمه می‌گیرند آغاز شد و مسیر طبیعی این رودخانه‌ها جای خود را به کانال‌هایی از جنس سنگ و ملات یا بتن داده‌اند. در چهارم مرداد سال ۱۳۶۶ با بارش رگباری شدید در حوضه‌های گلابدره و دربند، سیل شدیدی به وقوع پیوست که باعث خسارت‌های مالی و جانی فراوانی شد. در ۲۶ فروردین ماه ۱۳۹۱ بارندگی حدود ۱۷/۸ میلیمتر ثبت شده در ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد، باعث آبگرفتگی مناطق مختلفی از شهر تهران و وارد شدن آب به داخل تونل در حال ساخت خط ۴ مترو تهران شد. اینچنین وقایعی اهمیت بررسی و مدل‌سازی رواناب‌های سطحی شهری تهران را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی رواناب‌های شهری مدل‌های نرم‌افزاری مختلفی موجود می‌باشند. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا EPA مدل SWMM را معرفی کرده که این مدل یک مدل دینامیک شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد که می‌تواند مقادیر کمی و کیفی رواناب برای مناطق شهری را مدل‌سازی نماید. طی سال‌های اخیر پژوهشگران متعددی از امکانات این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی سیستم زهکشی سطحی و زیرزمینی شهرها استفاده کرده‌اند. در پژوهشی به صورت مطالعه موردی، واسنجی و ارزیابی مدل SWMM جهت شبیه‌سازی رواناب شهری شهرک امام علی (ع) شهر مشهد انجام گرفت که در این تحقیق از دو رویداد بارندگی برای واسنجی و یک رویداد برای ارزیابی مدل استفاده شد که مقایسه نتایج (دبی، عمق و سرعت) شبیه‌سازی مدل و اطلاعات برداشت شده از رواناب خروجی از حوضه، کارایی

شهر تهران پر جمعیت‌ترین شهر و پایتخت کشور ایران، در جنوب رشته کوه‌های البرز واقع شده است. از نظر ارتفاعی گستره این شهر از ارتفاع ۱۸۰۰ متر تا حدود ۹۰۰ متر نسبت به دریاها آزاد تغییر می‌کند. میزان متوسط بارندگی در شهر تهران حدوداً برابر ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد که در نواحی شمالی شهر این میزان به حدود ۵۰۰ میلی‌متر هم می‌رسد. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل چهار حوضه آبخیز گلابدره، دربند، سعدآباد و زرگنده می‌باشد که سه حوضه ابتدایی شامل بخش‌های کوهستانی نیز هستند. محدوده مطالعاتی از نظر مکانی از شمال توسط رشته کوه‌های البرز و از قسمت شرقی به خیابان دربند و شریعتی و از قسمت غربی به خیابان‌های سرلشگر فلاحی (زعفرانیه) و ولیعصر و از قسمتی جنوب به خیابان فیاضی (فرشته) محدود می‌شود. به جهت مشخص نمودن محدوده حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه و زیر حوضه‌های آنها از نقشه‌های کاربری اراضی (با مقیاس ۱:۲۰۰۰) دریافت شده از شهرداری منطقه یک شهر تهران که از نقشه‌های سازمان نقشه‌برداری در سال ۱۳۸۵ تهیه شده و اطلاعات شبکه‌های اصلی و فرعی کانال‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی استفاده شد. که در نهایت منطقه مورد مطالعه به ۵۶ زیرحوضه شهری و ۸ زیرحوضه کوهستانی تقسیم شد. خلاصه‌ای از اطلاعات هر یک از حوضه‌های اصلی در جدول (۱) و موقعیت محدوده مورد مطالعه و حوضه‌های آبخیز در شکل (۱) ارائه شده است.

واسنجی و صحت‌سنجی در نرم‌افزار InfoWork CS انجام شد و سپس اطلاعات مدل به نرم‌افزار 5 SWMM منتقل گردید. پژوهشگران این تحقیق بیان نمودند که ارتباط و همبستگی مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی بین دو نرم‌افزار وجود دارد از طرفی نرم‌افزار InfoWork CS در کالیبراسیون مفیدتر بود ولی هزینه و خرید اشتراک سالیانه نرم‌افزار InfoWork CS رایگان بودن نرم‌افزار 5 SWMM را توجیه می‌کند [۱۱]. مدل‌سازی کمی و کیفی رواناب شهر اسکودای استان جوهور کشور مالزی با سه کاربری مسکونی، تجاری و صنعتی با آب و هوای استوایی گرمسیری انجام شده است. در این تحقیق برای تحلیل حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج خروجی مدل (دبی پیک و عمق رواناب) بازه تغییرات  $\pm 10\%$  برای درصد مساحت اراضی نفوذ ناپذیر (Imp%) و عرض معادل (W) زیرحوضه‌ها در نظر گرفته شده است نتایج این مدل‌سازی بیانگر تطابق مناسب مدل و نتایج مشاهداتی می‌باشد [۳].

این پژوهش با هدف مدل‌سازی پدیده بارش-رواناب در قسمتی از حوضه آبخیز شمال شهر تهران با نرم‌افزار SWMM و واسنجی و ارزیابی نتایج این مدل با اطلاعات پنج رویداد بارندگی متناظر با رواناب ثبت شده از آنها در خروجی حوضه آبخیز زرگنده (ایستگاه هیدرومتری مقصودبیک) انجام شده است.

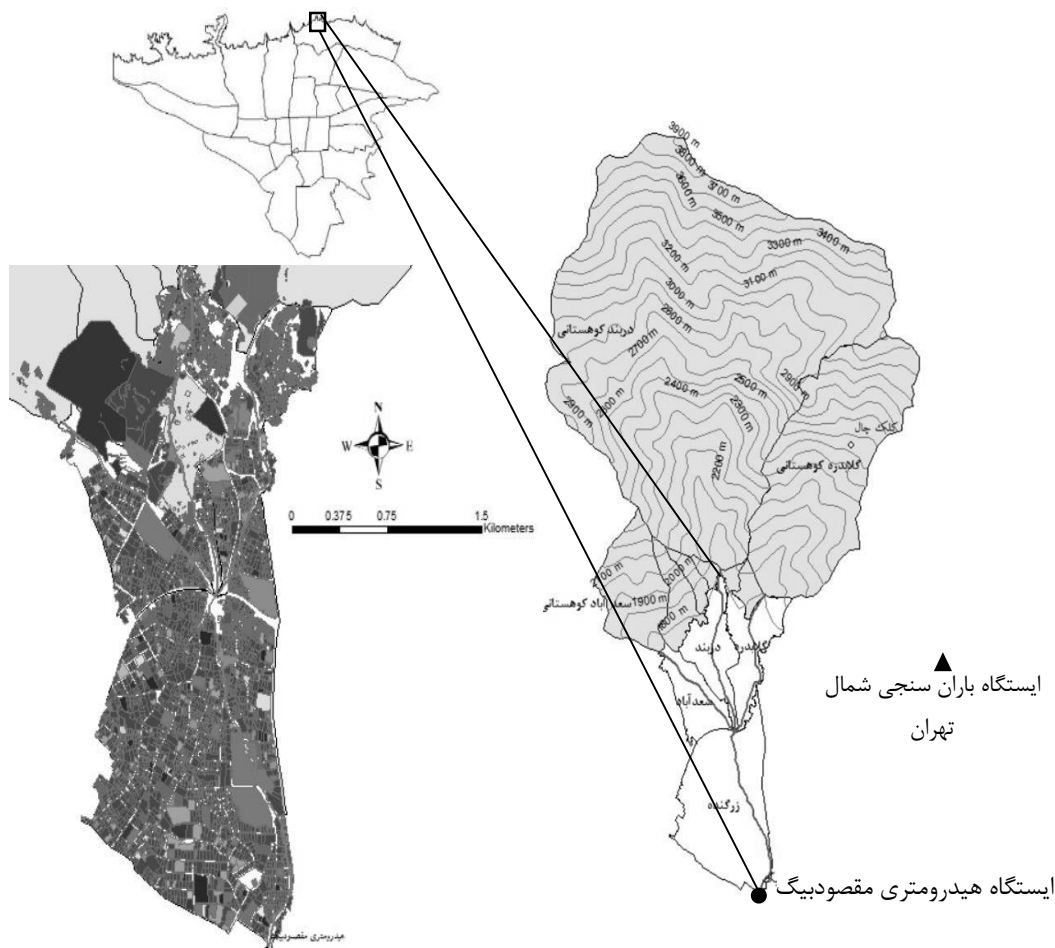
## ۲. روش‌شناسی

### ۲.۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات حوضه‌های اصلی منطقه مورد مطالعه

مشخصات	حوضه‌ها زیر	مساحت (ha)	کاربری غالب	کانال یا مسیل اصلی	های فرعی جوی
گلابدره شهری	۱۳	۱۰۱/۱۹	مسکونی با تراکم متوسط (۳۰٪)	مستطیلی با دیواره‌های سنگی بتنی	مستطیلی روباز و رو بسته بتنی
دربند شهری	۷	۹۲/۲۷	فضای سبز (۶۳٪) (کاخ سعد آباد)	مستطیلی با دیواره‌های سنگی بتنی	مستطیلی روباز و رو بسته بتنی
سعدآباد شهری	۹	۷۷/۵	مسکونی با تراکم متوسط (۳۵٪)	مستطیلی با دیواره‌های سنگی بتنی	مستطیلی روباز و رو بسته بتنی
زرگنده شهری	۲۷	۲۹۴/۰۱	مسکونی با تراکم متوسط (۴۳٪)	مستطیلی با دیواره‌های سنگی بتنی	مستطیلی روباز و رو بسته بتنی

-	مقطع طبیعی واریزه‌ای	کوهستانی	۶۱۹/۶۶	۲	گلابدره کوهستانی
-	مقطع طبیعی سنگی	کوهستانی	۲۲۰۱/۲۸	۵	دریند کوهستانی
-	سست مقطع طبیعی با خاک	کوهستانی	۱۵۴/۴۵	۱	سعدآباد کوهستانی



شکل ۱. موقعیت حوضه مورد مطالعه و کاربری اراضی در مناطق شهری

شهری به صورت تک رویداد و چند رویداد را دارا می‌باشد. معادلات مورد استفاده در این مدل معادله بقای جرم - (پیوستگی) و معادله مومنتم است که به معادلات سنت-وانانت معروف می‌باشد (روابط ۱ و ۲). این نرم افزار با حل کردن این معادلات به سه روش، روندیابی جریان ماندگار، روندیابی موج سینماتیکی و روندیابی موج دینامیکی اقدام به شبیه‌سازی می‌کند [۱۶].

## ۲.۲. توصیف مدل شبیه‌سازی

مدل SWMM یک مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی - هیدرولیکی و کیفیت آب می‌باشد که در سال ۱۹۷۱ توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) ارائه شد که تاکنون چندین مرتبه مورد ارزیابی و ارتقاء قرار گرفته است. این نرم افزار توانایی شبیه‌سازی رواناب‌های حوضه‌های

۱ Saint Venant Equations.

نرم افزار SWMM برای شبیه سازی کمی رواناب های شهری به سه دسته اطلاعات اصلی نیازمند است: ۱- مشخصات فیزیکی زیرحوضه ها ۲- اطلاعات وقایع بارش ۳- اطلاعات نفوذ آب در خاک.

### ۱،۳،۲. مشخصات فیزیکی زیرحوضه ها:

مشخصات فیزیکی زیرحوضه ها شامل مساحت زیرحوضه ها ( $A_i$ )، درصد مناطق غیر قابل نفوذ هر یک از زیرحوضه ها ( $Imp\%$ )، عرض معادل زیرحوضه ها ( $W_i$ )، شیب متوسط زیرحوضه ها ( $S_i$ ) و ذخیره نگهداشت سطحی مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر ( $D_{store}$ ) و ضریب زبری سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر ( $n$ ) می باشد. اغلب اطلاعات مربوط به مشخصات زیرحوضه ها براساس اطلاعات نقشه های کاربری اراضی سازمان نقشه برداری و شهرداری تهران (سال ۱۳۹۰) و عکس های هوایی منطقه مورد مطالعه، دریافت شده از نرم افزار Google Earth، استخراج شده است. در زمینه محاسبه درصد اراضی نفوذناپذیر دو موضوع مطرح می باشد. اول درصد کل اراضی نفوذناپذیر زیرحوضه ها که همان سطوح پشت بام ها، سنگفرش و آسفالت کف خیابان ها و ... می باشد که براساس نقشه کاربری اراضی با کمک نرم افزار ArcGIS مورد محاسبه قرار گرفت، مسئله بعدی میزان درصدی از این اراضی که در تولید رواناب مشارکت دارند می باشد. براساس شرایط ساخت و سازهای شهری قسمتی از بارندگی روی اراضی نفوذناپذیر شهری در تولید رواناب مشارکت نداشته و مؤثر نمی باشند. به طور مثال در ساختمان های قدیمی رواناب حاصل از بارندگی توسط ناودان های نصب شده به سمت معابر هدایت می شوند ولی براساس پیشنهاد طرح جامع شهری و قانون تصویب شده در سال ۱۳۷۱ که لازم الاجرا می باشد، رواناب ساختمان ها ساخته شده پس از این سال به داخل چاه های جذبی در داخل همان ساختمان ها هدایت شده و به معابر منتقل نمی شود از طرفی در ساختمان های شمالی ابتدا حیاط و سپس ساختمان قرار گرفته و در ساختمان های جنوبی حیاط در پشت ساختمان قرار گرفته است بنابراین در ساختمان های جنوبی سطح حیاط و در ساختمان های

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{معادله ۱}$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad \text{معادله ۲}$$

در رابطه بالا  $A$  سطح مقطع جریان،  $Q$  دبی جریان،  $y$  عمق آب،  $S_f$  شیب خط انرژی،  $S_o$  شیب کف کانال،  $g$  شتاب ثقل،  $x$  و  $t$  به ترتیب متغیرهای مکانی و زمانی می باشند.

روندپایی جریان ماندگار ساده ترین نوع روندپایی می باشد که با فرض یکنواخت و ماندگار بودن جریان هیدروگراف جریان ورودی به یک مجرا را به خروجی منتقل می کند. این روش از حل معادلات سنت و نانت نمی تواند ذخیره آبراهه ها، اثرات برگشت آب، تلفات ورودی و خروجی، جریان معکوس و تحت فشار در مجاری را مدل سازی کند. همچنین این روش به گام های زمانی حساس نمی باشد و تنها برای تحلیل اولیه و شبیه سازی جریان پیوسته بلند مدت مناسب است. در روندپایی به روش موج سینماتیکی معادله پیوستگی به همراه شکل ساده معادله مومنتم حل می گردد که در حل این معادله، شیب سطح آب با شیب کف مجرا برابر در نظر گرفته می شود. حداکثر جریانانی که این روش می تواند شبیه سازی نماید جریان نرمال در حالت پر می باشد. این روش از روندپایی، امکان شبیه سازی جریان برگشتی یا معکوس و جریان تحت فشار را ندارد. روندپایی به روش موج دینامیکی معادلات سنت و نانت یک بعدی را به صورت کامل بدون هیچ گونه ساده سازی را حل می کند. این روش برعکس دو روش قبلی ذخیره آبراهه ها، برگشت آب و تلفات انرژی در ورودی و خروجی در مجرای و جریان معکوس و تحت فشار را شبیه سازی می کند [۱۶]. در این تحقیق برای شبیه سازی جریان در مجاری از روش موج دینامیکی جریان با فواصل زمانی ۳۰ دقیقه استفاده شده است.

### ۳،۲. پارامترهای ورودی به مدل:



بارندگی که سه رویداد به جهت واسنجی مدل و دو رویداد دیگر برای صحت سنجی نتایج به کار گرفته شد. پارامترهای متعدد و تعداد زیاد زیرحوضه‌ها، فرآیند واسنجی مدل را پیچیده و زمان‌بر می‌کند. به همین خاطر برای واسنجی دقیق‌تر یک مدل، باید بر پارامترهایی با تأثیرگذاری بیشتر تمرکز کرد و تعداد پارامترها جهت واسنجی مدل را باید به حداقل رساند [۷]. به همین خاطر در این مطالعه هشت پارامتر مهم از جمله درصد نفوذناپذیری زیرحوضه‌ها، درصد شیب و عرض معادل زیرحوضه‌ها، ضریب مانینگ n مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، عمق ذخیره مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر و شماره منحنی CN مورد واسنجی قرار گرفتند. مقدار اولیه این پارامترها براساس اطلاعات نقشه‌های پایه و کاربری اراضی و همچنین براساس پیشنهاد مراجع و جداول ارائه شده در داخل نرم افزار SWMM انتخاب یا به‌دست آمدند. در زمان واسنجی برای به حداقل رساندن زمان و بالا بردن دقت واسنجی، مقادیر اولیه برای همه زیرحوضه‌ها به مقدار یکسانی در نظر گرفته شد و این مقدار به میزان یکسانی اضافه یا کاسته شد تا نتایج مدل و نتایج مشاهده‌ای خروجی با یکدیگر مطابقت پیدا کنند و میزان بهینه این مقادیر به‌دست بیاید. شایان ذکر است این روش در زمینه واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده است [۲۲]. در جدول (۲) مقادیر اولیه و بازه تغییرات مجاز و مقادیر نهایی پارامترهای ورودی به مدل ارائه شده است.

شد که نسبتاً انطباق مناسبی بین خط برف محاسبه شده با خط برف در نقشه‌های هوایی وجود داشت.

#### ۴,۳,۲. نفوذ آب در خاک:

مدل بارش-رواناب SWMM به سه روش هورتون، گرین آمپ و سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) میزان نفوذ آب در خاک مناطق نفوذپذیر را مدل‌سازی می‌کند. در این تحقیق با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی و خاکشناسی شهر تهران و تفکیک مساحت کاربری اراضی هر یک از زیرحوضه‌ها با به‌کارگیری نرم‌افزار ArcGIS و ضرایب روش SCS، شماره منحنی CN هر یک از زیرحوضه‌ها به‌صورت وزنی به‌دست آمد [۴].

#### ۴,۲. واسنجی و صحت سنجی نتایج مدل بارش -

##### رواناب:

از آنجا که مدیریت و کنترل سیلاب‌های شهری و جلوگیری از مخاطرات آن برای شهرهای بزرگ از مسائل پیش رو برای شهرداری‌ها می‌باشد، از این رو مدل‌سازی و آگاهی از پاسخ حوضه‌های آبخیز شهری به بارندگی‌های احتمالی یکی از مسائل مهم در مدیریت شهرها می‌باشد. همچنین به دلیل غیر قابل پیش‌بینی بودن رگبارهای احتمالی و به علت مشکلات جمع‌آوری اطلاعات و هزینه بر بودن ثبت و گردآوری آن‌ها، از این رو به جهت نزدیک‌تر شدن نتایج مدل‌سازی به شرایط واقعی واسنجی و پس از آن، صحت سنجی نتایج خروجی مدل ضروری می‌باشد. در این تحقیق برای مدل‌سازی بارش - رواناب، پنج رویداد

جدول ۲. بازه تغییرات مجاز پارامترهای ورودی به مدل و میزان اولیه و نهایی مقادیر ورودی

حوضه‌های کوهستانی		حوضه‌های شهری		بازه تغییرات مجاز	پارامترهای ورودی به مدل
مقادیر نهایی	مقادیر اولیه	مقادیر نهایی	مقادیر اولیه		
۳۶	۴۰	۷۰/۲۴	۷۸/۰۵	* ۱۰٪±	متوسط نفوذناپذیر کل زیرحوضه‌ها (/.)
۳۳/۱۶	۳۸/۵۶	۵/۸۳	۶/۷۹	* ۳۰٪±	متوسط شیب کل زیرحوضه‌ها (/.)
۶۹۶/۳۳	۷۶۵/۲	۱۲۷/۸۹	۱۴۰/۵۴	* ۳۰٪±	(m) متوسط عرض معادل کل زیرحوضه‌ها
۰/۲	۰/۱۳	۰/۳	۰/۱۵	** ۰/۰۱ - ۰/۸	مناطق نفوذپذیر زیرحوضه‌ها n

۰/۰۲۲	۰/۰۲	۰/۰۱۱	۰/۰۱	** ۰/۰۱-۰/۰۳	مناطق نفوذناپذیر زیرحوضه‌ها n
۲/۵	۱/۲۷	۱/۷	۱/۲۷	*** ۱/۲۷-۲/۵۴	ذخیره مناطق نفوذناپذیر (mm)
۵/۱	۲/۵۴	۴/۲	۲/۵۴	*** ۲/۵۴-۷/۶۲	ذخیره مناطق نفوذپذیر (mm)
۷۵	۷۷	۷۷/۲	۷۹/۳	**** ۱۰۰-۴۰	شماره منحنی تلفات نفوذ (CN)

\* [۲۲]

\*\* [۶، ۵]

\*\*\* [۱، ۲۲]

\*\*\*\* [۱۲]

NOF در مواقعی که اطلاعات مدل برای واسنجی موجود باشند قابل قبول می‌باشد [۱۰]. بازه تغییرات NSC می‌تواند بین عدد یک تا  $\infty$  متغیر باشد و پایین‌ترین مقدار قابل قبول آن ۰/۵ است و هر چه این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد دقت شبیه‌سازی بالاتر مدل را نشان می‌دهد [۲۳].

- رگرسیون خطی:

$$P_i = \gamma O_i \quad \text{معادله ۶}$$

در این روش بین مقادیر دبی مشاهداتی  $O_i$  و دبی محاسباتی  $P_i$  خطی برازش داده می‌شود و شیب این خط  $\gamma$  با شیب خط ۱:۱ مورد مقایسه قرار می‌گیرد. به‌طور کلی بهترین نتایج مستلزم آن است که میزان شیب خط ( $\gamma$ ) برازش شده و ضریب تعیین رگرسیون  $R^2$  تا حد امکان به عدد یک نزدیک باشد [۳]. نتایج معیارهای ارزیابی واسنجی و صحت‌سنجی در جداول (۴، ۵) ارائه شده است.

۶،۲. حجم رواناب، دبی اوج و زمان پیک سیلاب:

از آنجای که میزان حجم رواناب، دبی اوج و زمان پیک سیلاب در زمینه مدیریت و هشدار سیلاب جزء پارامترهای مهم به حساب می‌آیند بنابراین با توجه به نتایج مدل‌سازی و نتایج مشاهداتی این پارامترهای برای هر پنج رویداد بارندگی در جدول (۵) ارائه شده است. در وقایع بارندگی

۵،۲. معیارهای ارزیابی مدل بارش رواناب:

در این تحقیق برای بررسی میزان انطباق نتایج دبی مشاهداتی و محاسباتی خروجی از حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری مقصودبیک از روابط ریاضی و آماری زیر استفاده شده است.

- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، تابع هدف نرمال شده (NOF) و ضریب ناش-ساتکلیف (NSC):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{معادله ۳}$$

$$NOF = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad \text{معادله ۴}$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{معادله ۵}$$

در روابط بالا  $P_i$  مقادیر دبی محاسباتی و  $O_i$  مقادیر دبی مشاهداتی، n تعداد داده مشاهداتی یا محاسباتی و  $\bar{O}$  میانگین دبی مقادیر مشاهداتی می‌باشند. هرچه میزان ریشه میانگین مربعات خطا RMSE و تابع هدف نرمال شده NOF کوچکتر و نزدیک به صفر باشد نشان دهنده تفاوت کمتر بین نتایج مشاهده‌ای و محاسباتی و دقت پیش‌بینی بالای مدل می‌باشد. مقادیر صفر تا یک برای

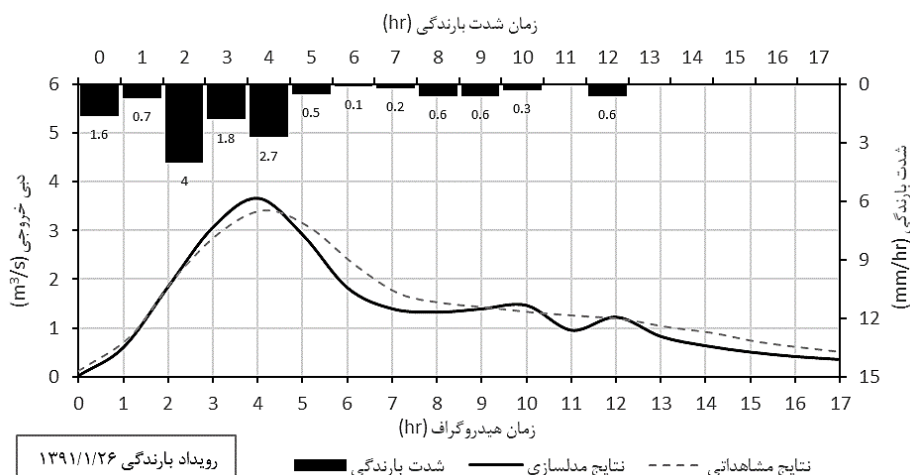


سطوح زیرحوضه‌ها، ۹٪ از عرض معادل و ۱۴٪ از شیب زیرحوضه‌ها کم شد. این میزان از تغییرات مناسب‌ترین مقدار با توجه به حاشیه خطایی بوده که در تخمین این پارامترها مجاز شناخته شده است. سایر محققین نیز در پروسه واسنجی مدل‌هایشان همین میزان تغییرات را در بازه مجاز مشخص شده، اعمال نمودند. در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار XP-SWMM که قابلیت واسنجی اتوماتیک را دارد در پروسه واسنجی ۲۵٪ کاهش برای درصد اراضی نفوذناپذیر و ۸ درصد کاهش برای عرض معادل زیرحوضه‌ها در نظر گرفته شده است [۱۵]. همچنین در مدل‌سازی رواناب شهر سانتاندر در اسپانیا در واسنجی مدل ۱۰٪ کاهش برای درصد اراضی نفوذناپذیر، ۳۰٪ کاهش عرض معادل و ۳۰٪ کاهش برای شیب هر کدام از زیرحوضه‌ها در نظر گرفته شد تا نتایج خروجی مدل کالیبره و تطابق مناسبی با نتایج مشاهداتی داشته باشد [۲۲]. در شکل‌های (۲ تا ۶) نتایج هیدروگراف مدل‌سازی و مشاهداتی خروجی از حوضه زرگنده در محل ایستگاه هیدرومتری مقصودبیک ارائه شده است. همچنین نتایج معیارهای ارزیابی واسنجی و صحت‌سنجی مدل در جدول‌های (۴، ۵) ارائه شده است.

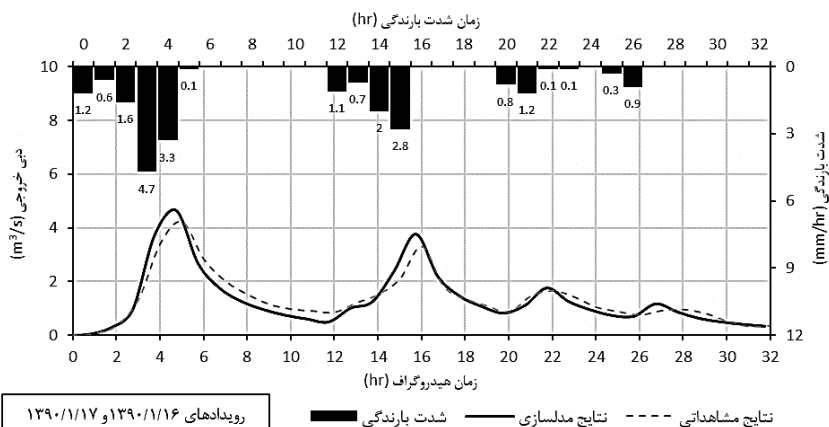
که شامل چند رویداد بارش می‌باشند و هیدروگراف خروجی دارای چند پیک سیلاب می‌باشد بزرگترین پیک، معیار مقایسه قرار گرفته شد. شایان ذکر است برای محاسبه حجم رواناب خروجی سطح زیر منحنی هیدروگراف سیل برابر با حجم رواناب در نظر گرفته شد که بر همین اساس، به روش ذوزنقه‌ای، مساحت زیر منحنی هیدروگراف مدل‌سازی و مشاهداتی اندازه‌گیری شده است [۱۲].

### ۳. نتایج :

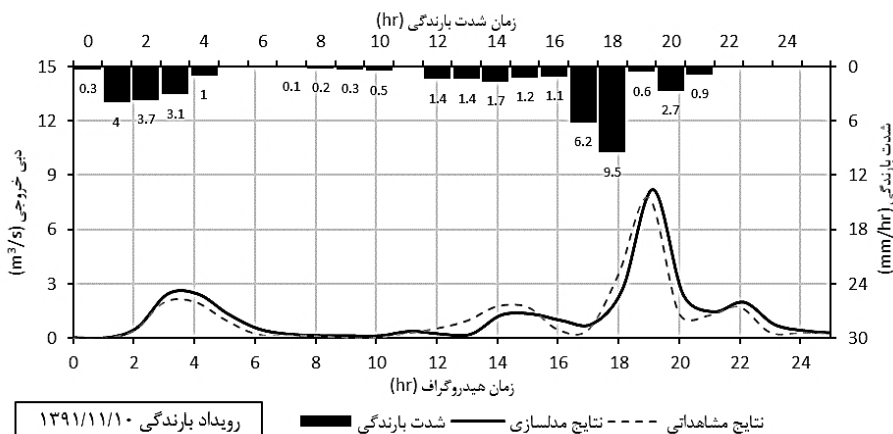
در پروسه واسنجی مدل بارش-رواناب با توجه به مقادیر اولیه و نهایی پارامترهای ورودی به مدل، درصد مساحت سطوح نفوذناپذیر زیرحوضه‌ها، حساس‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر در میزان حجم رواناب و دبی بیشینه سیلاب انتخاب شد. از طرف دیگر شیب زیرحوضه‌ها، ضریب زیری مانینگ  $n$  و عرض معادل، بر زمان پیک سیلاب تأثیرگذار می‌باشند. این موضوع در سایر پژوهش‌ها نیز تأیید شده است [۱۷، ۲۲]. همچنین در پروسه واسنجی مدل به جهت به دست آمدن مناسب‌ترین هم‌خوانی، نتایج هیدروگراف خروجی مدل‌سازی و مشاهداتی از حوضه آبخیز زرگنده، حدود ۱۰٪ از مقادیر اولیه درصد نفوذناپذیری



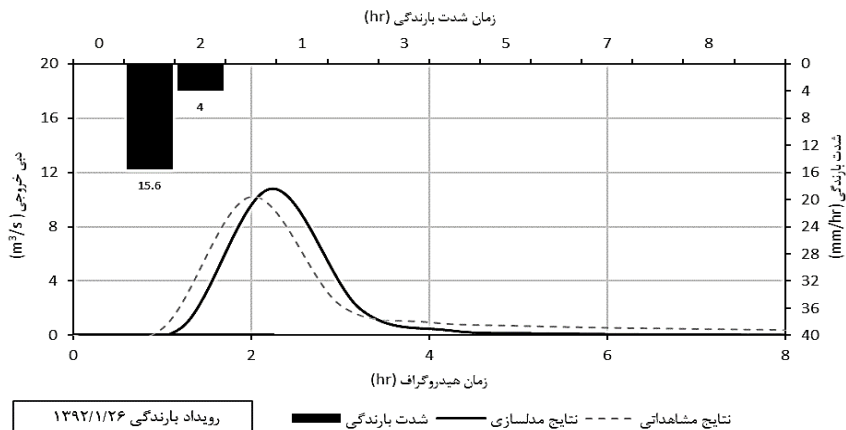
شکل ۲. هیدروگراف مدل‌سازی و مشاهداتی رویداد اول (واسنجی) به تاریخ ۱۳۹۱/۱/۲۶



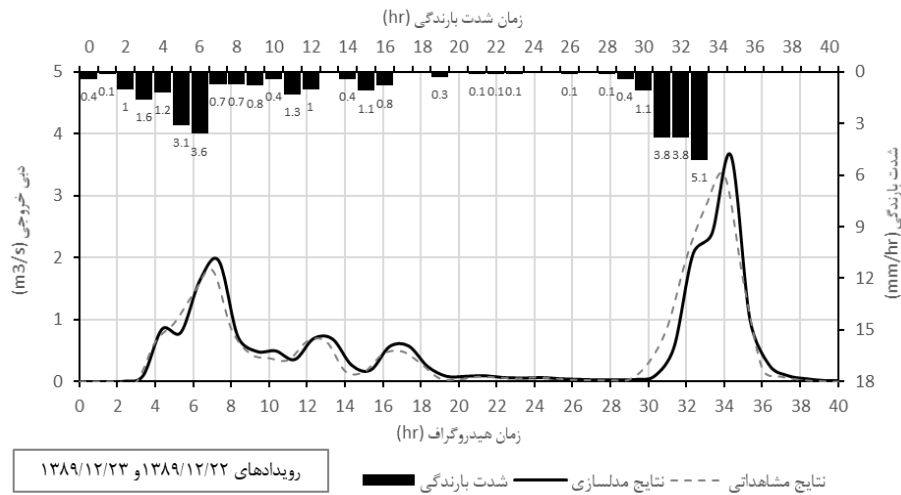
شکل ۳. هیدروگراف مدل سازی و مشاهداتی رویداد دوم (واسنجی) به تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۷



شکل ۴. هیدروگراف مدل سازی و مشاهداتی رویداد سوم (واسنجی) به تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۱۰



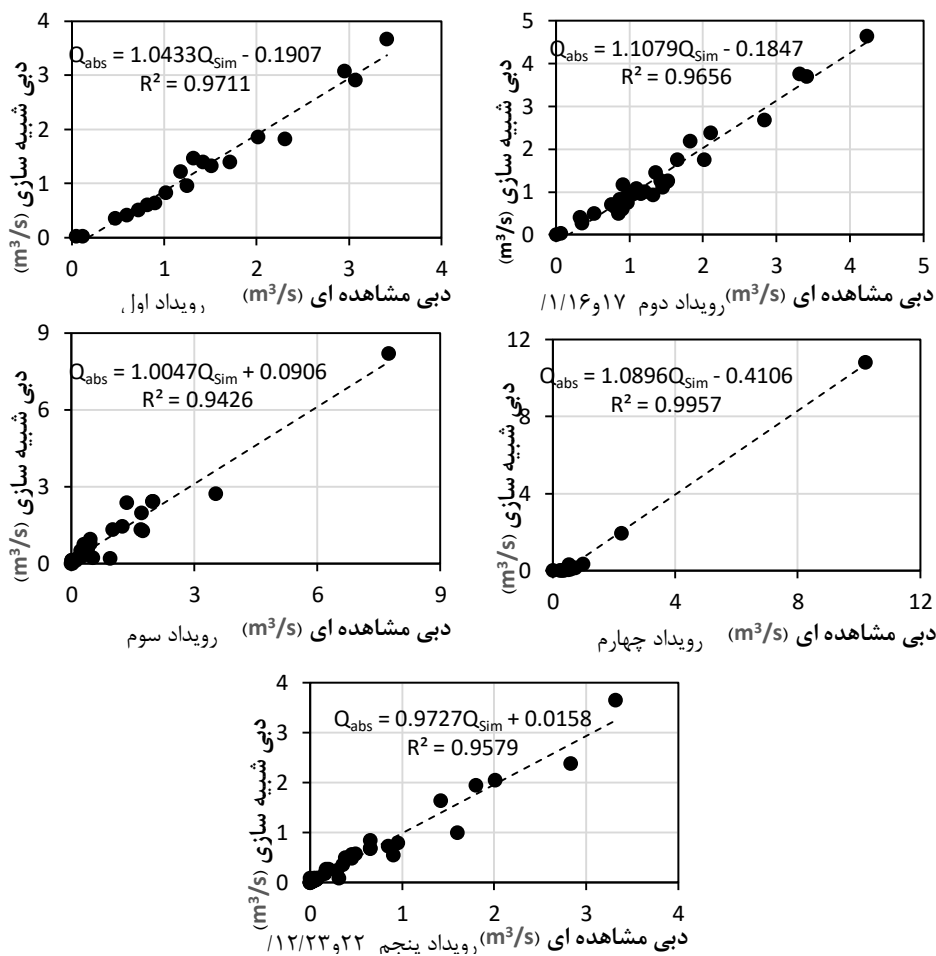
شکل ۵. هیدروگراف مدل سازی و مشاهداتی رویداد چهارم (صحت سنجی) به تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۶



شکل ۶. هیدروگراف مدل‌سازی و مشاهداتی رویداد پنجم (صحت‌سنجی) به تاریخ ۲۲ و ۲۳/۱۲/۱۳۸۹

جدول ۳. نتایج دبی اوج، حجم رواناب و زمان اوج سیلاب مدل‌سازی و مشاهداتی.

نتایج مدل‌سازی					
رویداد	رویداد اول	رویداد دوم	رویداد سوم	رویداد چهارم	رویداد پنجم
تاریخ	۱۳۹۱/۱/۲۶	۱۳۹۰/۱/۱۷ و ۱۶	۱۳۹۱/۱۱/۱۰	۱۳۹۲/۱/۲۶	۱۳۸۹/۱۲/۲۳ و ۲۲
دبی اوج سیلاب (m <sup>3</sup> /s)	۳/۶۶	۴/۶۴	۸/۲	۱۰/۷۹	۳/۶۵
حجم رواناب (m <sup>3</sup> )	۸۷۰۶۶	۱۵۲۴۹۶	۱۱۰۸۰۸	۵۰۷۴۲	۸۲۰۰۳
زمان اوج سیلاب (hr:min)	۳:۵۲	۴:۴۵	۱۹:۱۰	۲:۱۴	۳۴:۲۲
نتایج مشاهداتی					
دبی اوج سیلاب (m <sup>3</sup> /s)	۳/۴۱	۴/۲۳	۷/۷۵	۱۰/۲۱	۳/۳۲
حجم رواناب (m <sup>3</sup> )	۹۵۴۷۲	۱۵۷۳۷۴	۱۰۱۸۴۷	۶۲۹۹۱	۷۷۵۰۸
زمان اوج سیلاب (hr:min)	۴:۱۵	۵:۰۰	۱۸:۵۰	۲:۰۰	۳۴:۰۰



شکل ۷. مقادیر دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWMM در مقابل دبی مشاهداتی

جدول ۴. نتایج ارزیابی واسنجی دبی‌های مدل‌سازی در نرم‌افزار SWMM با دبی‌های مشاهده‌ای

$R^2$	$\gamma$	NSC	NOF	RSME	تاریخ	رویداد
۰/۹۷	۱/۰۴	۰/۹۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۱۳۹۱/۱/۲۶	اول
۰/۹۶	۱/۱	۰/۹۴	۰/۱۷	۰/۲۲	۱۳۹۰/۱/۱۷ و ۱۶	دوم
۰/۹۴	۱	۰/۹۳	۰/۳۶	۰/۴	۱۳۹۱/۱۱/۱۰	سوم

جدول ۵. نتایج ارزیابی صحت سنجی دبی‌های مدل‌سازی در نرم‌افزار SWMM با دبی‌های مشاهده‌ای

$R^2$	$\gamma$	NSC	NOF	RSME	تاریخ	رویداد
۰/۹۹	۱/۰۸۹	۰/۹	۰/۳۲	۰/۳۷	۱۳۹۲/۱/۲۶	چهارم

۰/۹۶	۰/۹۷۲	۰/۹۴	۰/۳	۰/۱۶	۱۳۸۹/۱۲/۲۳ و ۲۲	پنجم
------	-------	------	-----	------	-----------------	------

نفوذناپذیری زیرحوضه‌ها، ۹٪ از عرض معادل و ۱۴٪ از شیب زیرحوضه‌ها کم شده است.

۲- براساس پارامترهای ارزیابی سه رخداد واسنجی و دو رخداد صحت‌سنجی مدل میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای وقایع اول تا پنجم به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۲۲، ۰/۴، ۰/۳۷ و ۰/۱۶ به دست آمده که هرچقدر این پارامتر کوچکتر باشد نشان‌دهنده انطباق قابل قبول نتایج دبی خروجی به دست آمده از مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی می‌باشد. همچنین ضریب ناش - ساتکلیف (NSC) برای این وقایع مدل‌سازی شده به ترتیب ۰/۹۱، ۰/۹۴، ۰/۹۳، ۰/۹ و ۰/۹۴ به دست آمده که نزدیک بودن مقادیر این ضریب به عدد یک نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

۳- با رسم مقادیر دبی خروجی مشاهداتی و مدل‌سازی و برازش خطی مستقیم بین آن‌ها میزان ضریب رگرسیون خطی حدوداً نزدیک به یک به دست آمده و ضریب تعیین رگرسیونی این برازش‌ها برای وقایع اول تا پنجم به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۶، ۰/۹۴، ۰/۹۹ و ۰/۹۶ به دست آمده که این موضوع به همخوانی و نزدیکی نتایج شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب به واقعیت دلالت دارد.

۴- میزان درصد اختلاف دبی اوج سیلاب مدل‌سازی و مشاهداتی برای وقایع اول تا پنجم به ترتیب ۷/۳۳، ۹/۶۹، ۵/۸، ۵/۶ و ۹/۹۳ و برای حجم رواناب این درصد اختلاف به ترتیب ۸/۸۲-، ۳/۰۸-، ۸/۸، ۱۹/۴۳- و ۵/۱۱ به دست آمده است.

همان‌طور که از جدول های (۴ و ۵) می‌شود مقادیر همه پارامترهای آماری در حدود قابل قبول می‌باشند. براساس نتایج جدول (۳) که میزان دبی اوج، حجم رواناب و زمان اوج سیلاب را نشان می‌دهد میزان درصد اختلاف دبی اوج سیلاب مدل‌سازی و مشاهداتی برای رویدادهای اول تا پنجم به ترتیب ۷/۳۳، ۹/۶۹، ۵/۸، ۵/۶، ۹/۹۳ و برای حجم رواناب این درصد اختلاف به ترتیب ۸/۸۲-، ۳/۰۸-، ۸/۸، ۱۹/۴۳- و ۵/۱۱ به دست آمده است. همچنین میزان اختلاف زمان اوج رواناب در حالت مدل‌سازی و مشاهداتی حداقل ۱۴ و حداکثر ۲۳ دقیقه به دست آمده است. میزان اختلاف پیک جریان در مدل‌سازی رواناب حوضه شهر سانتاندر اسپانیا حدود ۲۰ درصد و حداکثر اختلاف زمانی پیک سیلاب را ۵ دقیقه اعلام شده [۲۲] و همچنین در مدل‌سازی مشابه‌ای برای حوضه آبخیز رودخانه دوامیشی واشنگتن آمریکا، میزان خطای ۲۵ درصدی برای دبی پیک با سه رخداد بارندگی گزارش شده است [۱۳].

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری:

با توجه به نتایج مدل‌سازی پنج رویداد بارندگی در سطح حوضه‌های سعدآباد، دربند، گلابدره و زرگنده و مقایسه نتایج رواناب مدل‌سازی، خروجی از حوضه‌های زرگنده در محل ایستگاه هیدرومتری مقصودبیک با نتایج مشاهداتی این ایستگاه نتایج زیر ارائه می‌شود:

۱- در پروسه واسنجی مدل برای به دست آمدن مناسب‌ترین همخوانی نتایج هیدروگراف خروجی مدل‌سازی و مشاهداتی حدود ۱۰٪ از مقدار اولیه درصد

## References

[1] ASCE, (1992), Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems, New York, NY.

- [2] Badiezadeh, S., Bagremand, A. and Dehghani, A, A. (2015). Urban flood management by simulation of surface runoff using SWMM model in Gorgan city, Golestan Province- Iran. *Journal of Water and Soil Conservatio*. 22(4). 155-170.
- [3] Chow, M. F., Yusop, Z. and Toriman, M. E. (2012). Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using Storm Water Management Model. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 9. 737-748.
- [4] Chow, V, T., Maidment, D, R. and Mays, L, W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, inc. Publisher.
- [5] Crawford, N.H. and Linsley, R.K., (1966). *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Civil Engineering Department, Stanford University. Tech. Report No. 39.
- [6] Huber, W. and Dickinson, R. (1988) *Stormwater Management Model. User's Manual*. U.S. Environmental Research Agency. Office of Research and Development. Ver 4, Part A.
- [7] Jinkang, D., Shunping, X., Youpeng, X. and Chong-Yu, X. (2007) Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*.336(3). 334-346.
- [8] Karimi, V., Solaimani, K., Habibnejad, M. and Shahedi, K. (2015). Simulation of Flow in Open & Closed Conduits by EPA-SWMM Model (Case Study: Babolsar Urban Watershed). *Journal of Watershed Management Research*. 6 (11). 162-170.
- [9] Khalighi Sigarodi, Sh., Rostami Khalaj, M., Mahdavi, M. and Salajegheh, A. (2015). Calibration and validation SWMM model in order to simulate urban runoff (Case Study: Imam Ali Town in Mashhad). 63(3).487-498.
- [10] Kornecki, TS., Sabbagh GJ. and Storm DE. (1999) Evaluation of runoff, erosion and phosphorus modeling system-SIMPLE. *Journal of the American Water Resources Association*. 4. 807 - 820.
- [11] Koudelak, P. and West, S. (2007). Sewerage network modelling in Latvia, use of InfoWorks CS and Storm Water Management Model 5 in Liepaja city. *Water and Environment Journal*. 22(2). 81-87.
- [12] Mahdavi, M. (2005). *Applied Hydrology*, 4ed Edition, University of Tehran press.
- [13] McCuen, R. (1996), *Hydrology*, FHWA-SA-96-067, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [14] Moradi, M. and Darbandi, S. (2017). Approach for appraising spate risks in urban drainage systems using stormwater management model. *Watershed Engineering and Management*. 9(3). 276-291.
- [15] Ovbiebo, T. and SHE, N. (1995) Urban runoff quality modeling in a subbasin of the Duwamish River using XP-SWMM. *Proc. Watershed Management Symposium Held in San Antonio, Texas, USA. August 14-19. ASCE, New York*. 320-329.
- [16] Rossman, L. R. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. United States Environmental Protection Agency (EPA).
- [17] Rostami, M., Mahdavi, M., Khalighi, Sh. and Salajeghe, A. (2012). Sensitivity Analysis of Variables Affecting on Urban Flooding Using SWMM Model. *Journal of Watershed Management Research*. 3 (5). 81-91.
- [18] Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. and Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources, *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5). 1169-1188.
- [19] Sourisseau, S., Basser, A., Perie, F. and Caquet, T. (2008). Calibration, validation and sensitivity analysis of an ecosystem model applied to artificial streams, *Water Research*, 42(4). 1167-1181.
- [20] Tehran Engineering & Technical Consulting Org. (2011). *Tehran Stormwater Management Master Plan*. 2 (1) Meteorology.
- [21] Tehran Engineering & Technical Consulting Org. (2011). *Tehran Stormwater Management Master Plan*. 2 (2, 3) Hydrology.
- [22] Temprano, J. Arango, O. Cagiao, J. Suarez, J. and Tejero, I. (2006) Stormwater quality calibration by SWMM: a case study in northern Spain. *Water SA* 32(1). 55-63.
- [1] [23] Tsihrintzis, V. and Hamid, R. (۱۹۹۸). Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. *Hydrol Process*, 12: 2. 311-329. Ansari Ghojghar, M., Pourgholam-Amiji, M., Bazrafshan, J., Hosseini-Moghari, S. M., Liaghat, A., & Araghinejad, Sh. (2020). Performance Evaluation of Genetic Algorithm and GA-SA Hybrid Method in Forecasting Dust Storms (Case Study: Khuzestan Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*

(Articles in Press). (In Persian)

- [2] Araghinejad, S. (2013). Data-driven modeling: using MATLAB® in water resources and environmental engineering (Vol. 67). Springer Science & Business Media.
- [3] Araghinejad, Sh., Ansari Ghojghar, M., Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., & Bazrafshan, J. (2019). The Effect of Climate Fluctuation on Frequency of Dust Storms in Iran. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(21), 13-32. (In Persian)
- [4] Azad, A., Karami, H., Farzin, S., Saeedian, A., Kashi, H., & Sayyahi, F. (2018). Prediction of water quality parameters using ANFIS optimized by intelligence algorithms (case study: Gorganrood River). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(7), 2206-2213.
- [5] Cao, R., Jiang, W., Yuan, L., Wang, W., Lv, Z., & Chen, Z. (2014). Inter-annual variations in vegetation and their response to climatic factors in the upper catchments of the Yellow River from 2000 to 2010. *Journal of Geographical Sciences*, 24(6), 963-979.
- [6] Davis, L. (1991). *Handbook of genetic algorithms*.
- [7] Dorigo, M. (1992). *Optimization, learning and natural algorithms*. PhD Thesis, Politecnico di Milano.
- [8] Farajzadeh Asl, M., & Alizadeh, Kh. (2011). Spatial Analysis of Dust storm in Iran. *The Journal of Spatial Planning*, 15(1), 65-84. (In Persian)
- [9] Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer Science & Business Media.
- [10] Hassanzadeh, Y., Abdi Kordani, A., & Fakheri Fard, A. (2012). Drought Forecasting Using Genetic Algorithm and Conjoined Model of Neural Network-Wavelet. *Journal of Water and Wastewater*, 23(3), 48-59. (In Persian)
- [11] Jalalkamali, A. (2015). Using of hybrid fuzzy models to predict spatiotemporal groundwater quality parameters. *Earth Science Informatics*, 8(4), 885-894.
- [12] Jang, J. S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3), 665-685.
- [13] Mahmoodimahpash, N., & Souri, B. (2020). Detecting origin of dust-fall using ions ratio and morphology of the particles in western Iran. *Journal of Natural Environment*, 73(2), 355-367. (In Persian)
- [14] Mehrabi, Sh., Soltani, S., & Jafari, R. (2015). Investigating the Relationship between Climatic Parameters and the Exposure of Greenhouses (Case Study: Khuzestan Province). *Journal of Water and Soil Science*, 19(71), 69-80. (In Persian)
- [15] Mehri, Y., Mehri, M., & Soltani, J. (2020). Evaluation of combined Models with Optimization Approach of PSO and GA in ANFIS for Predicting of Dispersion Coefficient in Rivers. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 45-59. (In Persian)
- [16] Mohammadi Ghaleni, M., & Ebrahimi, K. (2013). Evaluation of direct search and genetic algorithms in optimization of muskingum nonlinear model parameters - a flooding of Karoun river, Iran. *Water and Irrigation Management*, 2(2), 1-12. (In Persian)
- [17] Mozafari, Gh. A., Shafie, Sh., & Hemati, H. R. (2016). Predicting monthly precipitation of Kermanshah synoptic station using the hybrid model of neural network and wavelet. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(6), 135-152. (In Persian)
- [18] Nabizadeh, M., Mosaedi, A., & Dehghani, A. (2012). Intelligent estimation of stream flow by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Water and Irrigation Management*, 2(1), 69-80. (In Persian)
- [19] Nadiri, A. A., Taherkhani, Z., & Sadeghi Aghdam, F. (2017). Prediction of ground water level of Bostan Abad using combining artificial intelligence models. *Iran Water Resources Research*, 13(3), 43-55. (In Persian)
- [20] O'Loingsigh, T., McTainsh, G. H., Tews, E. K., Strong, C. L., Leys, J. F., Shinkfield, P., & Tapper, N. J. (2014). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Research*, 12, 29-40.
- [21] Prudêncio, R. B., & Ludermir, T. B. (2003). *Neural network hybrid learning: genetic algorithms & Levenberg-*

- Marquardt. In *Between Data Science and Applied Data Analysis* (pp. 464-472). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [22] Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Goudie, A. S., & Kahn, R. A. (2013). Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: the case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. *Science of the total environment*, 463, 552-564.
- [23] Sepehri, M., Ildoromi, A. R., Hosseini, S. Z., Nori, H., Mohammadzade, F., & Artimani, M. M. (2018). The combination of neural networks and genetic algorithms is a way to estimate the Peak flood. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11(39), 23-28. (In Persian)
- [24] Shafaei, M., Fakheri Fard, A., Darbandi, S., Ghorbani, M. (2014). Prediction Daily Flow of Vanyar Station Using ANN and Wavelet Hybrid Procedure. *Irrigation and Water Engineering*, 4(2), 113-128. (In Persian)
- [25] Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation* (IEEE Cat. No. 01TH8546), 1, 81-86.
- [26] Sobhani, B., Safarian Zengir, V., & faizollahzadeh, S. (2020). Modeling and prediction of dust in western Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 52(1), 17-35. (In Persian)
- [27] Socha, K., & Dorigo, M. (2008). Ant colony optimization for continuous domains. *European journal of operational research*, 185(3), 1155-1173.
- [28] Sreedhara, B. M., Rao, M., & Mandal, S. (2019). Application of an evolutionary technique (PSO-SVM) and ANFIS in clear-water scour depth prediction around bridge piers. *Neural Computing and Applications*, 31(11), 7335-7349.
- [29] Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.
- [30] Yarmoradi, Z., Nasiri, B., Mohammadi, Gh. H., & Karampour, M. (2018). Trend analysis of dusty day's frequency in Eastern parts of Iran associated with Climate Fluctuations. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(18), 1-14. (In Persian)
- [31] Zeinali, B. (2016). Investigation of frequency changes trend of days with dust storms in western half of Iran. *Journal of Natural Environment hazards*, 5(7), 100-87. (In Persian)