

Calibration and Evaluation of the SWMM Model in Runoff Simulation in District 9 of Mashhad City

F. Rezayi^{1*}, A. Bahremand², V. Berdi Shaikh³, M.T. Dasturani⁴, S.M. Tajbakhsh⁵

1,2,3-PhD Student, Associate Professor & Associate Professor, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran. 4- Professor, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. 5- Assistant Professor, University of Birjand, Birjand, Iran.

*(Corresponding Author Email: Frezayi25@yahoo.com)

Received: 14-10-2017

Accepted: 15-10-2018

کالیبراسیون و ارزیابی مدل SWMM در شبیه‌سازی رواناب منطقه ۹ شهرداری مشهد

فاطمه رضایی^{۱*}، عبدالرضا بهره‌مند^۲، واحد بردی شیخ^۳، محمد تقی دستورانی^۴، سید محمد تاج‌بخش^۵

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۴- استاد دانشگاه فردوسی مشهد. ۵- استادیار دانشگاه بیرجند.

*(نویسنده‌ی مسئول، (E-Mail: Frezayi25@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۳

Abstract

Urban runoff problems are comprised of two distinct but interdependent types. To control the quantity and quality, volume and the peak flow of runoff, downstream flooding and the flooding potential in the downstream must be reduced. These problems are subject to conducted flood control systems and methods. Nowadays, the protection of receiving waters is one of the engineers' concerns which cannot be simply achieved due to its reliance on the complexity and fluctuation of the flood. This needs comprehensive planning, design, and management of such systems which can be obtained through an efficient method and by use of urban runoff calculation and control models. In this research, the runoff simulation of district 9 of Mashhad municipality is carried out using the SWMM model. To calibrate and evaluate the model, 4 and 2 rainfall occurrences were measured at the basin outlet. The model calibration results showed a good agreement between the simulations of the four incidents with a NS higher than 0.5. The evaluation results confirm the SWMM model's performance and accuracy for NS values above 0.5. For simulated incidents derived from the calibration and validation of the SWMM model, the Kling Gupta (KGE) index values was higher than 0.5. These values confirm the model results. Therefore, there is a good agreement between the simulated and observed runoff volumes which is an indication of the good performance of the SWMM model in predicting urban flood and this model can then be used in urban flood management projects and drainage network planning in Mashhad.

Keywords: Calibration, Evaluation, Runoff simulation, SWMM model, District 9 of Mashhad municipality.

چکیده

مشکلات رواناب شهری از دو نوع مجزا ولی وابسته به هم هستند. کمیت و کیفیت، کنترل مقادیر حجم و دبی اوج رواناب نیازمند کاهش پتانسیل فرسایش کناری و سیل خیزی پایین‌دست است. این مشکلات تابع سیستم‌های سیلاب حوضه‌ی آبخیز و روش‌های کنترل اجرا شده هستند. امروزه حفاظت آب‌های پذیرنده از دغدغه‌های مهندسی است که به سادگی بسته به پیچیدگی و تغییرپذیری سیلاب میسر نمی‌شود. این امر مستلزم برنامه‌ریزی جامع، طراحی و مدیریت این قبیل سیستم‌ها است که می‌تواند در قالب یک روش کارآمد و با استفاده از مدل‌های محاسبه و کنترل رواناب شهری تحقق یابد. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی رواناب منطقه ۹ شهرداری مشهد از مدل SWMM^۱ استفاده شد و به منظور کالیبراسیون و ارزیابی مدل SWMM به ترتیب ۴ و ۲ واقع بارندگی در خروجی حوضه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل نشان داد که شبیه‌سازی چهار واقعه بررسی شده انطباق خوبی دارد و مقدار NS^۲ برای وقایع بیشتر از ۰/۵ می‌باشد. نتایج ارزیابی مدل SWMM کارایی و دقت مدل را با مقدار NS بالاتر از ۰/۵ تأیید می‌کند. همچنین مقادیر ضریب کلینگ گوپتا برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از واسنجی و ارزیابی مدل SWMM، بیشتر از ۰/۵ شد که نشان‌دهنده نتایج قابل قبول مدل است. در نتیجه انطباق خوبی بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد و مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری را دارد. بنابراین این مدل می‌تواند برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: کالیبراسیون، ارزیابی، مدل SWMM، شبیه‌سازی رواناب، منطقه ۹ شهرداری مشهد.

انجام گرفته علت اصلی آبگرفتگی‌ها را کوچک بودن سطح مقطع مجاری آبرو و همچنین شیب کم و معکوس در برخی نقاط عنوان نموده است. نتایج شبیه‌سازی آب‌گرفتگی‌های ناشی از بارندگی‌های طرح در منطقه مورد مطالعه با آنچه که هر ساله در آنجا روی می‌دهد صحت شبیه‌سازهای مدل را تأیید می‌کند.

قاسمی و مغربی (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWMM به بررسی میزان تأثیر حوضچه‌های تأخیری بر کاهش رواناب پرداختند و نشان دادند استفاده از حوضچه‌های تأخیری در منطقه آب و برق مشهد با وجود مساحت محدود کارگشا بوده و موجب کاهش دبی اوج هیدروگراف، افزایش رخداد زمان پیک سیلاب و در نتیجه کنترل و مدیریت بهینه سیلاب می‌شود. به این ترتیب در دو مرحله مدل‌سازی، جانمایی برای دو سناریو دو مکان و سه مکان مناسب جهت احداث حوضچه‌های کنترل سیلاب شناسایی شد که در صورت استفاده از دو مخزن، دبی پیک ۳۱ درصد و در صورت استفاده از سه مخزن، دبی پیک ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.

Hsu و همکاران (۲۰۰۰) از ترکیب دو مدل SWMM و مدل دو بعدی پخشیدگی جریان سطحی برای شبیه‌سازی سیلاب در حوزه شهری چین تاییه استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که مدل ترکیبی ابزار مناسبی برای تجزیه و تحلیل سیلاب شهری ناشی از سرریز شدن آب از شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی و سیلاب ناشی از تخریب ایستگاه‌های پمپاژ می‌باشد.

Phillips و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه‌ای اقدام به مدل‌سازی یک بعدی و دو بعدی سیستم زهکشی شهری با استفاده از مدل XP-SWMM و TUFLOW کردند و از مدل TUFLOW برای بالابردن قابلیت‌های مدل XP-SWMM استفاده کردند. نتایج نشان داد که ترکیب و استفاده از مدل‌هایی مانند مدل‌های ذکر شده برای تهیه نقشه آب‌گرفتگی در مناطق شهری و طراحی سیستم زهکشی بسیار مفید است و اطلاعات مفیدی را برای کاربران فراهم می‌کند.

Jang و همکاران (۲۰۰۷) از مدل SWMM برای مدیریت رواناب شهری در قبل و بعد از توسعه شهر و در چهار منطقه در کره استفاده کردند. نتایج نشان داد این مدل می‌تواند خطاهایی از قبیل دبی اوج کوچکتر و زمان تا اوج طولانی‌تر برای شرایط بعد از توسعه را برطرف کند. بنابراین مدل پیشنهاد شده می‌تواند جوابگوی ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی برای توسعه برنامه‌ریزی شهری باشد.

Dongquan و همکاران (۲۰۰۹) برای شبیه‌سازی بارش و رواناب در حوزه شهری Macau از مدل SWMM و GIS استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از GIS در به‌دست آوردن برخی از پارامترهای مهم مدل SWMM بسیار مفید است و

امروزه با توسعه شهرنشینی و گسترش شهرها مدیریت حوزه‌های شهری بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. شهرسازی باعث برهم زدن تعادل اکولوژیک حوضه، روند پایدار هیدرولوژیکی و افزایش نفوذناپذیری حوضه شده است. با افزایش وسعت شهرها، شبکه هیدروگرافی و آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه در حال تغییر می‌باشد. بنابراین اعمال مدیریت در حوزه‌های شهری نیازمند تمهیدات ویژه‌ای است که در قالب آب‌خیزداری شهری مطرح می‌شود.

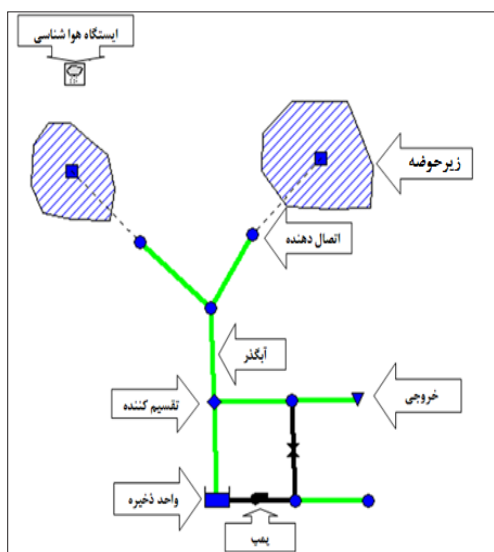
احمدیان (۱۳۹۱) با استفاده از مدل SWMM در منطقه هشتگرد جدید از بین هشت پارامتر ورودی به مدل از قبیل درصد اراضی نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر، عرض معادل، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر، شیب زیرحوضه و درصد مناطق بدون ذخیره سطحی، بیان کردند ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، شیب زیرحوضه و درصد مناطق نفوذناپذیر به ترتیب بیشترین تأثیر را در تغییر دبی اوج دارند که دلیل آن را به ماهیت فیزیکی حوزه نسبت دادند.

عینلو (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای درستی و تطابق شبیه‌سازی‌های مدل SWMM بر اساس وقایع بارش-رواناب مشاهداتی را تأیید نمود.

بدیعی‌زاده (۱۳۹۰) در تحقیق خود ابعاد بهینه شبکه زهکشی نسبت به بارش طرح با دوره بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله را از طریق شبیه‌سازی رواناب سطحی و با استفاده از مدل SWMM در شهر گرگان تعیین کردند. آن‌ها ادعا کردند که مدل SWMM برآورد نسبتاً خوبی از مولفه‌های جریان داشته است و در تعیین ابعاد بهینه کانال‌های زهکشی قابلیت خوبی دارد. برای دوره بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله به ترتیب ۱۲/۴۸، ۳۰/۵۸ و ۴۰/۱۱ درصد از طول شبکه زهکشی در شرایط بحرانی وجود داشته و سایر قسمت‌ها در دوره بازگشت منتخب از عملکرد خوبی برخوردار است.

کریمی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی از مدل EPA-SWMM برای شبیه‌سازی کمی سیلاب ناشی از بارندگی در بخش‌هایی از حوزه شهری بابل‌سر استفاده کردند. شبیه‌سازی برای رگبارهای ۲ ساعته با دوره بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله و برای مدت ۱۲ ساعت انجام پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی کمی سیلاب نشان داد از ۲۵۹ گره موجود در شبکه مجاری زیرزمینی و سطحی ۳۲، ۵۷ و ۶۰ گره به ترتیب در دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ سال دچار سیلاب شدند. بررسی‌های میدانی و نقشه‌های موجود رقوم ارتفاعی شبکه جمع‌آوری رواناب شهری و شبیه‌سازی‌های

استفاده قرار می‌گیرد. مولفه رواناب SWMM روی مجموعه‌ای از زیرحوضه‌هایی که باران دریافت می‌کنند عمل کرده و رواناب و بارهای آلاینده را تولید می‌نماید. بخش روندیابی مدل، رواناب را از طریق شبکه لوله‌ها، کانال‌ها و تاسیساتی چون پمپ‌ها و تنظیم کننده‌های جریان منتقل می‌کند. این مدل کمیت و کیفیت رواناب تولید شده در هر زیرحوضه، سرعت، دبی و عمق جریان در هر لوله و کانال را در هر زمانی از دوره شبیه‌سازی می‌کند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۲- مثال موضوعات نمایشی مورد استفاده در مدل SWMM

• داده‌های مورد نیاز مدل SWMM

ورودی‌های مورد نیاز مدل عبارتند از خصوصیات فیزیکی زیرحوضه‌ها، مشخصات شبکه زهکشی و داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی منطقه مورد مطالعه که به شرح زیر می‌باشند:

- تعیین مرز حوزه و واحدهای هیدرولوژیک شهری:

برای تعیین مرز واحدهای هیدرولوژیک شهری از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۰۰۰، نقشه مسیر کانال‌ها، مسیل‌های زهکشی و نقشه بلوک‌های ساختمانی که از اداره کل راه و شهرسازی استان خراسان و شهرداری مشهد دریافت شد، استفاده شد. سپس بر اساس جهت حرکت رواناب روی کلیه معابر، مسیرهای اصلی و فرعی کانال‌ها و جوی‌های آب زیرحوضه‌ها تعیین شد. مساحت، عرض معادل زیرحوضه‌ها و شیب متوسط مستقیماً با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS محاسبه شد و درصد مناطق نفوذناپذیر با استفاده از نقشه کاربری به‌دست‌آمد. مقادیر ضریب زبری در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، ذخیره سطحی در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی از تلفیق اطلاعات میدانی و نقشه‌های کاربری در نرم‌افزار ArcGIS به‌دست‌آمد.

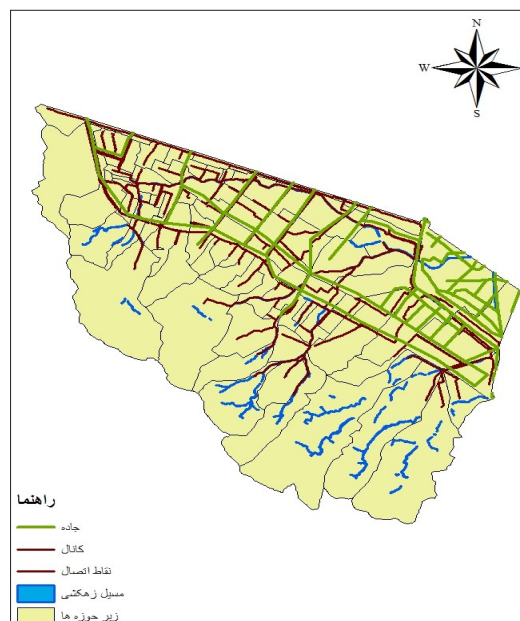
مدل SWMM در صورتی که پارامترهای کافی در داشته باشد انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه‌ای دارد.

Chen و همکاران (۲۰۱۰) مدل دو بعدی UIM^۲ را با مدل یک بعدی SWMM برای شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرسطحی برای تهیه نقشه آب گرفتگی ادغام کردند. باتوجه‌به اینکه در این مطالعه مقدار بارندگی و ظرفیت کانال است علت آب گرفتگی می‌تواند نتیجه تمرکز جریان در یک کانال در مدت زمان کوتاه باشد. همچنین نتایج نشان داد ترکیب یک مدل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نتایج بهتری نسبت به استفاده از یک نوع مدل دارد.

مواد و روش‌ها

• منطقه مطالعاتی

این تحقیق در منطقه ۹ شهرداری مشهد به‌دلایلی از جمله ۱- حساسیت به سیل‌خیزی از سمت حوضه‌های بالا دست حوضه‌های آبخیز حصار، گلستان، زشک و جاغرق، ۲- دارای سابقه سیل‌خیزی کمتر از ۴۰ سال، ۳- داشتن کانال‌های تقریباً منظم و ۴- داشتن ایستگاه هیدرومتری انجام شد. در شکل (۱) مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۱- جهت کانال‌ها و مسیل‌های زهکشی در منطقه

• مدل SWMM

مدل SWMM یک مدل شبیه‌ساز بارش-رواناب پویا با مبنای فیزیکی است که برای شبیه‌سازی‌های تک‌واقعه‌ای یا طولانی مدت (پیوسته) کمیت و کیفیت رواناب حوزه‌های شهری مورد

- اطلاعات مجاری سیستم زهکشی:

برای محاسبه خصوصیات مجاری، بازدید میدانی و یادداشت خصوصیات آن مانند طول آبرو، ضریب زبری، شکل مقطع، عرض کف و سطح مقطع الزامی است که در این مطالعه اطلاعات مورد نیاز برداشت شد.

- اطلاعات مورد نیاز اتصالات:

مشخصات اتصالات و محل ورود رواناب هر زیرحوضه به مجاری شبکه زهکشی از طریق بازدید میدانی و مشخصات آن‌ها از قبیل رقوم کف، طول و عرض جغرافیایی و حداکثر عمق اتصالات با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۴ مشخص شد.

- اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژی:

مقادیر بارش (تک‌واقعه یا پیوسته)، تبخیر ماهانه، سرعت باد و همچنین اطلاعات و پارامترهای برف از جمله این اطلاعات می‌باشد. باتوجه به فرضیات استفاده از مدل در واقع رگباری برخی از اطلاعات ذکر شده تأثیر عمده‌ای بر نتایج مدل نداشته و حساسیت چندانی ندارند. با این وجود این اطلاعات با فرض واقع رگباری و به شکل زیر در مدل جایگزین شد.

باتوجه به فرضیات و امکانات مدل در خصوص دما از انتخاب عدم وجود اطلاعات استفاده شد. از آنجایی که زمان وقوع رگبارهای اندازه‌گیری شده در فصلی بوده که هوا سرد است میزان تبخیر برابر صفر در نظر گرفته شد.

برآورد رواناب در مدل SWMM و سایر مدل‌های جمع‌آوری رواناب شهری بر اساس مقادیر بارش می‌باشد بنابراین اطلاعات ذکر شده از مهمترین و اساسی‌ترین اطلاعات مورد استفاده

مدل هستند. در این مطالعه شش واقعه رگباری برای ارزیابی و واسنجی مدل استفاده شد.

• آنالیز حساسیت مدل SWMM

آنالیز حساسیت هشت پارامتر درصد اراضی نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، شیب زیرحوضه و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی انجام شد. از بین نتایج مختلف مدل SWMM، دبی اوج سیلاب که مؤثرترین پارامتر برآورد سیلاب است به‌عنوان متغیر وابسته برای بررسی در نظر گرفته می‌شود. برای انجام آنالیز حساسیت از بارش طراحی بادوره بازگشت ۲۵ سال استفاده شد (بدیعی زاده، ۱۳۹۴). هرکدام از هشت پارامتر مطرح شده در تمام زیرحوضه‌ها به مقدار ± 5 ، ± 10 ، ± 15 و ± 30 درصد از مقادیر اولیه کاهش و افزایش داده شد و با تغییر مقدار هر پارامتر مدل اجرا و تأثیر آن‌ها بر دبی اوج سیلاب خروجی حوضه اندازه‌گیری شد.

• واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM

از چهار واقعه ۱۳۹۳/۱۰/۲۰، ۱۳۹۳/۱۱/۲۶، ۱۳۹۳/۱۲/۲ و ۱۳۹۳/۱۲/۱۵ از چهار واقعه ۱۳۹۳/۱۲/۱۵ برای واسنجی مدل و از دو واقعه ۱۳۹۴/۱/۷ و ۱۳۹۴/۱/۱۱ برای ارزیابی مدل استفاده شد. به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل از هشت پارامتر مهم استفاده شد که پارامترهای اولیه و دامنه تغییرات آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر اولیه و دامنه تغییرات قابل قبول متغیرهای مدل SWMM

متغیر	مقادیر اولیه	دامنه تغییرات مجاز	منبع
درصد مناطق نفوذناپذیر	-	± 30	Temprano و همکاران (۲۰۰۶)
شیب (%)	-	± 30	Temprano و همکاران (۲۰۰۶)
عرض معادل (متر)	-	± 30	Temprano و همکاران (۲۰۰۶)
ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر	۰/۰۱۳	۰/۰۱۱-۰/۰۳۳	Huber و Dickinson (۱۹۹۲)
ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر	۰/۰۵	۰/۰۲-۰/۰۸	Huber و Dickinson (۱۹۹۲)
ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر (mm)	۱/۷۷۸	۰/۳-۲/۵	Huber و Dickinson (۱۹۹۲)
ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر (mm)	۳/۸۱	۲/۵-۵/۱	Tsihrintzis و Hamid (۱۹۹۸)
درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی	۱۶	۵-۲۰	Huber و Dickinson (۱۹۹۲)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2} \quad (6)$$

$$BIAS \% = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (7)$$

Q_{sim} دبی شبیه‌سازی شده، Q_{obs} دبی مشاهداتی در زمان i ام، Q_{av} میانگین دبی مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار NS می‌تواند مثبت یا منفی باشد و بهترین حالت زمانی است که مقدار آن برابر یک باشد. در صورتی که مقدار NS مثبت باشد بیانگر برتری داده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به میانگین داده‌های مشاهداتی است و در صورتی که منفی باشد نشان می‌دهد که خروجی مدل با ماهیت سیستم متناظر نیست (حسین‌زاده و جهادی طرقي، ۱۳۸۶). پایین‌ترین مقدار قابل قبول NS ۰/۵ است و هرچه مقدار NS نزدیک به یک باشد نشان دهنده‌ی بالا بودن دقت شبیه‌سازی است (Santhi و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین هر چه مقدار مجذور میانگین مربعات خطا کوچکتر باشد تفاوت داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده کمتر و دقت پیش‌بینی مدل بیشتر خواهد بود. $BIAS^A$ خطای کل در حجم جریان است و مقادیر مثبت و منفی این ضریب نشان دهنده بیشتر یا کمتر بودن متوسط حجم جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی است (Dongquan و همکاران، ۲۰۰۹).

• معیار ارزیابی کلینگ-گوپتا

این معیار جدیدترین معیار ارزیابی برای مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده می‌باشد. (Gupta و همکاران، ۲۰۰۹) ضمن معرفی این شاخص به مقایسه و بررسی مزیت‌های آن با معیار معروف ناش-ساتکلیف پرداختند. این معیار توسط (Kling و همکاران، ۲۰۱۲) به صورت بازبینی شده (KGE^B) به کار گرفته شد.

$$KGE = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (8)$$

در رابطه ۸، r ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری می‌باشد. آلفا نسبت انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی به انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری است. بتا نسبت میانگین مقادیر شبیه‌سازی به میانگین مقادیر اندازه‌گیری (مشاهداتی) است. بهترین مقدار برای معیار ارزیابی کلینگ-گوپتا عدد یک می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق کامل هیدروگراف‌ها می‌باشد. در معیار بازبینی شده کلینگ-گوپتا به جای آلفا از گاما استفاده می‌شود که نسبت ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی به ضریب تغییرات مقادیر مشاهداتی می‌باشد.

از آنجاکه ایستگاه اندازه‌گیری هیدرومتری جهت اندازه‌گیری دبی در داخل شهر وجود ندارد سرعت و ارتفاع رواناب متناظر با این رگبارها در کانال ۲۵۲۶ با استفاده از خط‌کش رود (Rod) کالیبره و زمان پیمایش آب برداشت شد. این خط‌کش برای اندازه‌گیری سرعت جریان در کانال یا رودخانه استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری سرعت آب در هر نقطه از کانال یا رودخانه خط‌کش رود به حالت عمودی و به شکلی که آب با لبه تیز خط‌کش تماس داشته باشد در بستر نهر یا رود قرار داده می‌شود. در این حالت قسمت مدرج A قرائت می‌شود که بیانگر عمق آب می‌باشد، در صورتی که در این نقطه خط‌کش طوری قرار گیرد که آب با لبه پهن خط‌کش برخورد کند و ارتفاع آب از قسمت B قرائت شود مقدار B بزرگتر از A خواهد شد. تفاضل این دو مقدار (رابطه ۲) پرش یا جهش آبی نامیده می‌شود و بر اساس آن می‌توان سرعت را از رابطه (۱) به دست آورد. مهدوی (۱۳۸۸) در رابطه (۳) که فرمول خط‌کش کالیبره شده (توسط مولینه) برای محاسبه سرعت در خط‌کش Rod است (پارامتر v) جایگزین کرد و سرعت واقعی را به دست آورد. خط‌کش توسط میکرومولینه دانشگاه گرگان با تعداد زیادی اندازه‌گیری هم‌زمان سرعت با خط‌کش و با مولینه در نهرها و کانال‌های شهری کالیبره شده و فرمول خط‌کش به صورت رابطه (۳) تعیین شد. با استفاده از رابطه (۳) سرعت برآوردی با خط‌کش به سرعت مولینه تبدیل می‌شود (بدیعی‌زاده، ۱۳۹۰).

$$v = \sqrt{2 \times gh} \quad (1)$$

$$h = h_2 - h_1$$

$$(2)$$

$$V = 1.0732 \times v \times 0.0385 \quad (3)$$

در روابط فوق: v سرعت آب (متر بر ثانیه) و g شتاب جاذبه زمین متر بر مجذور ثانیه و h اختلاف ارتفاع آب در دو طرف خط‌کش به متر و V سرعت با استفاده از خط‌کش رود است.

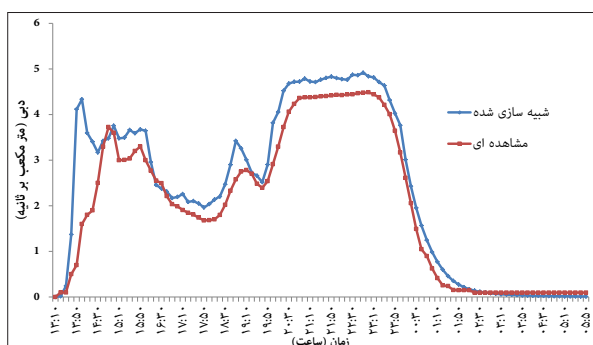
• شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل SWMM

در این مطالعه از شش واقعه نمونه برداری صورت گرفت که چهار مورد برای واسنجی و دو مورد برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. از رایج‌ترین روابط ریاضی که در اکثر مطالعات هیدرولوژی شهری از آن‌ها استفاده می‌شود عوامل ضریب ناش ساتکلیف^۵ و مجذور میانگین مربعات خطا^۶ بایاس و معیار ارزیابی کلینگ-گوپتا^۷ می‌باشد. در این تحقیق از چهار معیار ذکر شده برای بررسی صحت واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

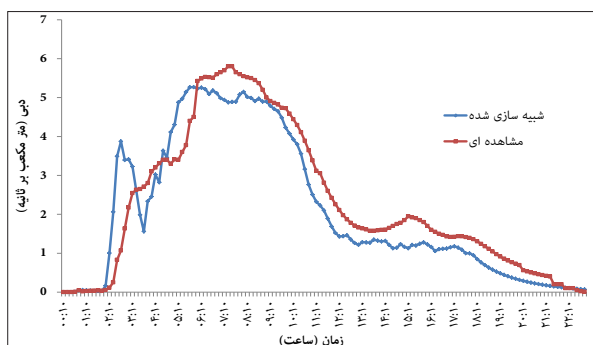
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{av})^2} \quad (5)$$

جدول ۲- نتایج واسنجی مدل SWMM

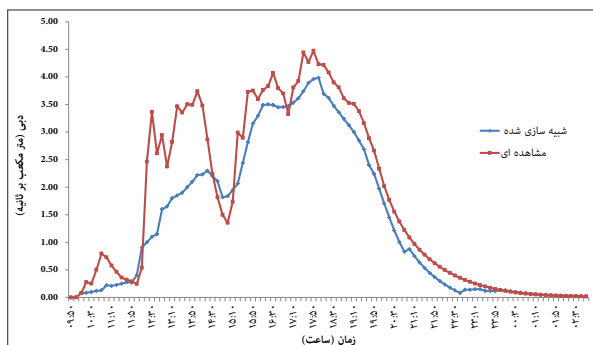
تاریخ بارندگی	معیار Nash	RMSE	% BIAS	KGE
۱۳۹۳/۱۰/۲۰	۰/۸۵	۰/۶	-۱۶/۷۳	۰/۷۶۷
۱۳۹۳/۱۱/۲۶	۰/۸۷	۰/۶۵	۸/۵۶	۰/۸۵۵
۱۳۹۳/۱۲/۲	۰/۸	۰/۵۸	-۲۵/۵	۰/۷۶
۱۳۹۳/۱۲/۱۵	۰/۶۳	۰/۹۱	-۱۲/۵	۰/۶۱



شکل ۳- نتایج واسنجی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه اول



شکل ۴- نتایج واسنجی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی جریان برای واقعه دوم



شکل ۵- نتایج واسنجی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی جریان برای واقعه سوم

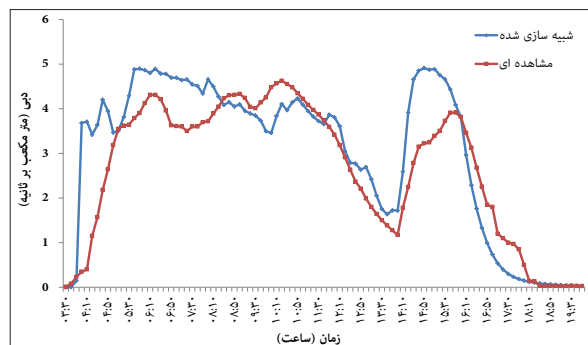
• نتایج مربوط به آنالیز حساسیت پارامترها

واسنجی عبارت است از اصلاح پارامترهای ورودی به نحوی که بهترین برازش را با داده‌های مشاهده‌ای داشته باشد و اعتبارسنجی عبارت است از ارزیابی مدل با عواملی که از طریق واسنجی اصلاح شده است. در بین هشت پارامتر بررسی شده در این مطالعه درصد مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری در مناطق نفوذناپذیر و عرض معادل به ترتیب تأثیر بیشتری در تغییر دبی اوج داشته است (حسین‌زاده و جهادی طرقي، ۱۳۸۶) و با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. اگر جریان سطحی به صورت حرکت به سمت پایین شیب باشد (حوضه مستطیلی) در این صورت عرض معادل زیرحوضه، عرض فیزیکی جریان سطحی است و اگر در این حالت درصد مناطق نفوذناپذیر افزایش یابد دبی به اندازه قابل توجه افزایش می‌یابد. به عنوان مثال اگر به مقدار اولیه درصد مناطق نفوذناپذیر در منطقه مورد مطالعه ۳۰٪ افزوده شود مقدار دبی اوج ۳/۷ درصد افزوده می‌شود و اگر به مقدار اولیه ضریب زبری در مناطق نفوذناپذیر ۳۰٪ افزوده شود دبی اوج ۱/۸ درصد کاسته می‌شود. اما اگر به مقدار اولیه شیب ۳۰٪ افزوده شود مقدار دبی اوج ۰/۹۳ درصد افزایش می‌یابد. در مورد ضریب زبری در مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر افزایش ضریب زبری موجب کاهش دبی اوج می‌شود که دلیل آن این است که با افزایش ضریب زبری سرعت حرکت آب کاهش می‌یابد و زمان تمرکز افزایش می‌یابد ولی زمان پایه هیدروگراف افزایش می‌یابد و از دبی اوج کاسته می‌شود.

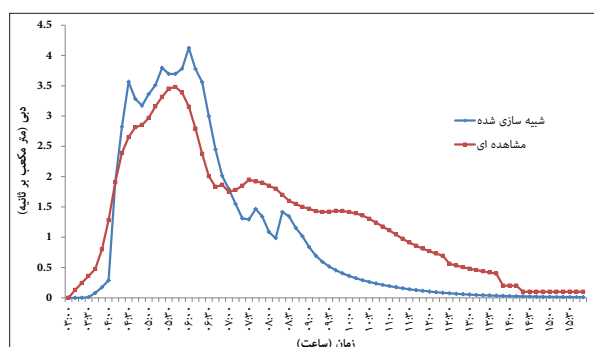
• نتایج واسنجی مدل SWMM

در بخش قبل ذکر شد چهار واقعه ۱۳۹۳/۱۰/۲۰ (واقعه اول)، ۱۳۹۳/۱۱/۲۶ (واقعه دوم)، ۱۳۹۳/۱۲/۲ (واقعه سوم) و ۱۳۹۳/۱۲/۱۵ (واقعه چهارم) برای واسنجی مدل استفاده شد و جهت تجزیه و تحلیل نتایج از عوامل معیار Nash و KGE استفاده شد. اگر در فرایند واسنجی مقدار معیار Nash بیشتر از ۰/۵ باشد نشان‌دهنده این است که فرآیند واسنجی از دقت کافی برخوردار است و نتایج در حد معناداری قابل قبول است (Santhi و همکاران، ۲۰۰۱). نتایج آماری حاصل از فرآیند واسنجی در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین هیدروگراف خروجی دبی جریان وقایع در شکل‌های (۳) تا (۶) قابل مشاهده است.

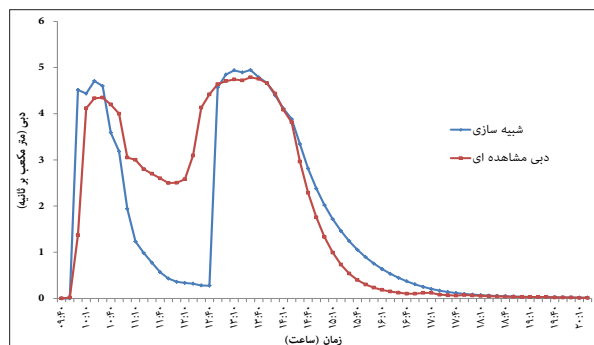
ضریب کلینگ گویا برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از واسنجی مدل SWMM برابر ۰/۷۶، ۰/۸۵، ۰/۷۶ و ۰/۶۱ و برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از ارزیابی مدل SWMM برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۴ به‌دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده نتایج قابل قبول مدل است. باتوجه‌به شکل‌های (۳) تا (۸) انطباق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی برقرار است و نشان دهنده نتایج قابل قبول مدل می‌باشد. بدیعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) از مدل مذکور در شبیه‌سازی رواناب شهر گرگان استفاده کردند و بیان نمودند مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب سطحی را داشته که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.



شکل ۶- نتایج واسنجی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه چهارم



شکل ۷- نتایج ارزیابی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه پنجم



شکل ۸- نتایج ارزیابی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه ششم

• نتایج ارزیابی مدل SWMM

دو واقعه ۱۳۹۴/۱/۱۱ و ۱۳۹۴/۱/۷ برای ارزیابی مدل استفاده شد و جهت تجزیه و تحلیل نتایج از عوامل معیار Nash و KGE استفاده شد. نتایج حاصل از فرآیند ارزیابی در جدول (۳) ارائه شده است و هیدروگراف خروجی دبی، عمق جریان و سرعت جریان واقعه دوم در شکل‌ها (۷) و (۸) نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل SWMM

تاریخ بارندگی	معیار Nash	RMSE	% BIAS	KGE
۱۳۹۴/۱/۷	۰/۶	۰/۶۱	۲۱/۶۵	۰/۷۷
۱۳۹۴/۱/۱۱	۰/۶۱	۱/۱۴	۱۲/۴۳	۰/۷۴

باتوجه‌به نتایج جدول‌های (۲) و (۳) اگر در فرآیند واسنجی و ارزیابی مدل مقدار معیار ناس ساتکلیف بیشتر از ۰/۵ باشد نشان‌دهنده این است که فرآیند واسنجی و ارزیابی دقت کافی دارد و نتایج در حد معناداری قابل قبول است. مقادیر RMSE برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از واسنجی مدل SWMM برابر ۰/۶۵، ۰/۵۸، ۰/۹۱ و ۰/۶۱ و برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از ارزیابی مدل SWMM برابر ۰/۶۱ و ۱/۱۴ شد. همچنین مقدار

اولین موضوعی که در مدل‌های هیدرولوژیکی مطرح است تعیین دقیق مرز حوزه و زیر حوزه‌های منطقه مورد مطالعه است. باتوجه به اینکه در حوزه‌های شهری خط الراس و خط القعر مشخصی جهت تعیین مرز حوزه وجود ندارد تعیین مرز در حوزه‌های کوهستانی و شهری بسیار مشکل است اما از یک اصل کلی تبعیت می‌کند که آن تعیین مرز بر اساس خط تقسیم آب است. در این مطالعه DEM دقیقی از منطقه در دسترس نبود و بعد از بررسی میدانی استفاده از نقاط ارتفاعی نقشه کاربری اراضی مرز زیر حوزه‌ها بسته شد. همچنین از سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت به‌دست‌آوردن سایر پارامترهای ورودی به مدل‌های بارش-رواناب از جمله مساحت، عرض معادل زیر حوزه‌ها و شیب متوسط و درصد مناطق نفوذپذیر استفاده شد که نتایج قابل قبولی به‌دست‌آمد و این نتایج با نتیجه تحقیقات (Ball و Choi، ۲۰۰۲؛ Seth و همکاران، ۲۰۰۶؛ Dongquan و همکاران، ۲۰۰۹) مطابقت دارد.

زمان تمرکز حوضه به‌عنوان مهم‌ترین عامل انتخاب رگبارهای طرح از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی هر منطقه بوده و در نتیجه از عوامل موثر بر رواناب حداکثر می‌باشد. باتوجه به اهمیت زمان تمرکز در برآورد سیلاب و شکل هیدروگراف سیلاب و نقشی که سیلاب‌ها در تخریب تأسیسات، ابنیه آبی و اماکن مسکونی دارند محاسبه زمان تمرکز در پروژه‌های آب‌خیزداری، سدسازی و هیدرولوژی شهری امری جدی محسوب می‌شود. از طرفی توسعه شهرها، مناطق مسکونی و افزایش مناطق نفوذناپذیر باعث کاهش زمان تمرکز در حوزه‌های شهری شده است اما در بعضی مواقع کاهش شیب و ناکارآمدی سیستم زهکشی باعث افزایش زمان تمرکز شده است. از بین روش‌های مختلف برآورد زمان تمرکز از روش صحرایی با استفاده از خط‌کش Rod کالیبره شده استفاده شده است که در نهایت باتوجه به محاسبات انجام شده زمان تمرکز حوضه برابر با یک ساعت محاسبه شد. همچنین برای محاسبه سرعت از روش خط‌کش Rod کالیبره شده استفاده شد.

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ترکیب آن با مدل‌های هیدرولوژیکی (Hsu، ۲۰۰۰؛ Todini، ۱۹۹۹؛ Wang و همکاران، ۲۰۰۸) و هیدرولوژیکی در حوزه‌های پیچیده شهری جهت به‌دست‌آوردن نتایج دقیق‌تر افزایش روز افزونی داشته و باعث شده تا GIS نقش کلیدی در مطالعات بارش-رواناب در حوزه‌های شهری داشته باشد. علاوه بر آن گسترش تکنیک‌های GIS و استفاده از ابزارهایی چون نقشه کاربری اراضی، نقشه مناطق نفوذناپذیر، مدل رقمی ارتفاع (DEM)، عکس‌های هوایی دیجیتالی، نقشه

خطوط ارتفاعی و نقشه شبکه زهکشی می‌توانند پارامترهای ورودی برای مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی را فراهم کنند (Seth و همکاران، ۲۰۰۶). در این تحقیق استفاده از GIS باعث سرعت بخشیدن به محاسبات و شبیه‌سازی‌های مدل شده است.

نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که شبیه‌سازی دبی در چهار واقعه بررسی شده، انطباق خوبی دارد و مقدار NS (ناش‌ساتیکلیف) برای واقعه اول تا چهارم به‌ترتیب برابر با ۰/۸۵، ۰/۸۷، ۰/۸ و ۰/۶۳ می‌باشد. همچنین مقادیر RMSE برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از واسنجی مدل SWMM به‌ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۶۵، ۰/۵۸ و ۰/۹۱ و مقدار ضریب کلینگ گوپتا برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از واسنجی مدل SWMM به‌ترتیب برابر ۰/۷۶، ۰/۸۵، ۰/۷۶ و ۰/۶۱ به‌دست‌آمد. در نتیجه انطباق قابل ملاحظه‌ای بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد که می‌تواند نشان‌دهنده دقت مورد نیاز مدل SWMM، برای شبیه‌سازی رواناب شهری باشد.

این مدل می‌تواند برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه استفاده شود و با یافته‌های (Zoppou، ۲۰۰۱؛ Phillips و همکاران، ۲۰۰۵) مطابقت دارد. علاوه بر این از نتایج به‌دست‌آمده در فرایند واسنجی می‌توان برای برآورد مقدار بهینه پارامترها استفاده نمود و در مناطق دیگر که از لحاظ همگنی مشابه به منطقه مورد نظر هستند استفاده نمود، این نتایج با نتایج (Ball و Choi، ۲۰۰۲) مطابقت دارد.

نتایج ارزیابی مدل SWMM کارایی و دقت مدل را با مقدار NS بالاتر از ۰/۵ تأیید می‌کند. همچنین مقادیر RMSE برای واقعه پنجم و ششم به‌ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۱/۱۴ و مقدار ضریب کلینگ گوپتا برای این دو واقعه به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۴ محاسبه شد. این نتایج نشان‌دهنده قابل قبول بودن مدل است. همچنین نشان می‌دهد که مدل مذکور قابلیت شبیه‌سازی رواناب سطحی را دارد و کارایی مدل SWMM را برای شبیه‌سازی بارش رواناب در مناطق شهری تأیید می‌کند که با نتایج سایر تحقیق‌ها (بدیعی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴؛ کریمی و همکاران ۱۳۹۴) مطابقت دارد.

پی‌نوشت

- 1- Storm Water Management Model
- 2- Nash –Sutcliffe
- 3- Urban Inundation Model
- 4- Geographic Information System
- 5- Nash-Sutcliffe

ban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach, (case study in Macau). *Environ Earth Sci*, 59: 465-472.

Gupta Hoshin V., Harald K., Koray K. Y. and Guillermo F2009. Martinez. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377: 80-91.

Huber W.C. and Dickinson R.E. 1992. Storm water management model user's manual, version 4. Environmental Protection Agency, Georgia.

Hsu M.H., Chen S.H. and Chang T.J. 2000. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. *Journal of Hydrology*, 234: 21-37.

Jang S., Cho M., Yoon J., Yoon Y., Kim S., Kim G., Kim L. and Aksoy H. 2007. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. *Desalination*, 212: 344-356.

Kling H., Fuchs M. and Paulin M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425: 264-277.

Nash J.E. and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting though conceptual models. Part 1-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.

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: 1169-1188.

Phillips B.C., Yu S., Thompson G.R. and Silva N. 2005. 1D and 2D Modelling of urban drainage systems using XP-SWMM and TUFLOW, 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark, 21-26.

Seth I., Soonthornnonda P. and Christensen E.R. 2006. Use of GIS in Urban Storm-Water Modeling. *Journal of Environmental Engineering*, 132(12): 1550-1552.

Todini E. 1999. An operational decision support system for flood risk mapping, forecasting and man-

6- RMSE
7- Kling-Gupta
8- BIAS

منابع

احمدیان، م. ۱۳۹۱. بررسی رواناب شهری با استفاده از مدل SWMM به منظور کاهش خطر سیل (مطالعه موردی: شهر جدید هشتگرد). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات.

بدیعی زاده، س. ۱۳۹۰. بهینه سازی شبکه زهکشی شهر گرگان از طریق شبیه سازی رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

بدیعی زاده، س.، بهره مند، ع.ر.، دهقانی، ا.ا. و نوار، ن. ۱۳۹۴. مدیریت سیلاب شهری از طریق شبیه سازی رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM در شهر گرگان. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۲(۴): ۱-۱۶.

حسین زاده، س.ر.، جهادی طریقی، م. ۱۳۸۶. اثرات گسترش شهر مشهد بر الگوی زهکشی طبیعی و تشدید سیلاب شهری. پژوهش های جغرافیایی، ۶۱: ۱۴۵-۱۵۹.

عینلو، ف. ۱۳۹۳. اثر تغییر کاربری و توسعه شهری بر تولید رواناب (مطالعه موردی: شهر زنجان). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.

قاسمی، ث. و مغربی، م. ۱۳۹۴. حوضچه های تأخیری، راه کاری جهت توسعه و مدیریت پایدار شهری. نشریه سامانه های سطوح آبیگیر باران. ۳(۶): ۱-۱۴.

کریمی، و.ا.، سلیمانی، ک.، حبیب نژاد روشن، م. و شاهدی، ک.گ. ۱۳۹۴. شبیه سازی جریان در مجاری آب روی زیرزمینی و سطحی با مدل EPA-SWMM (مطالعه موردی: حوزه شهری بابلسر). پژوهش نامه مدیریت حوزه آبخیز. ۶(۱۱): ۱۶۲-۱۷۰.

مهدوی، م. ۱۳۸۸. هیدرولوژی کاربردی. جلد ۱. انتشارات دانشگاه. دانشگاه تهران. تهران.

Chen A.S., Hsu M.H., Huang C.J. and Lien W.Y. 2010. Analysis of the Sanchunginundation during Typhoon Aere, 2004. *Natural Hazards*, 56(1): 59-79.

Choi K.S. and Ball J.E. 2002. Parameter estimation for urban runoff modelling. *Urban Water*, 4: 31-41.

Dongquan Z., Jining C., Haozheng W., Qingyuan T., Shangbing C. and Zheng S. 2009. GIS-based ur-

- agement. *Urban Water*, 1: 131-143.
- Wang X., Gu X., Wu Z. and Wang C. 2008. Simulation of flood inundation of Guiyang city using remote sensing, GIS and hydrologic model. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII. Part B8. 775-778.
- Temprano J., Arango O., Cagiao J., Suarez J. and Tejero I. 2006. Storm water quality calibration by SWMM: a case study in Northern Spain. *Water SA*, 32(1): 55-63.
- Tsihrintzis V. and Hamid R. 1998. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. *Hydrol Process*, 12(2): 311-329.
- Zoppou C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, 16: 195-231.