

Research Paper

Evaluation Urban Drainage Network Using SWMM Model (Case Study: Shahrood City)Mohammad Ali Rahimi¹, Samad Emamgholizadeh^{2*}, Gholam Hossein karami³, Mahdi Delghandi⁴, Zahra Ganji Noroozi⁵

¹ Master of Water Structure Engineering, Department of Water and Soil Engineering, Agriculture Collage, Shahrood University of Technology, Iran. Email: mohammadalii906@gmail.com

² Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Civil Engineering Collage, Shahrood University of Technology, Iran Email: s_gholizadeh517@yahoo.com

³ Associate Professor, Department of Applied Geology, Earth Sciences Collage, Kharazmi University, Iran. Email: g.karami@khu.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Department of Water and Soil, Agriculture Collage, Shahrood University of Technology, Iran. Email: delghandi@gmail.com

⁵ Assistant Professor, Department of Water and Soil, Agriculture Collage, Shahrood University of Technology, Iran. Email: z_ganji@shahroodut.ac.ir

[10.22125/IWE.2023.357737.1666](https://doi.org/10.22125/IWE.2023.357737.1666)

Received:
August 24, 2022
Accepted:
April 17, 2023
Available online:
December 30, 2023

Keywords:
Urban flood, SWMM model, runoff, hydrograph, Shahrood

Abstract

The change of land use and the reduction of permeable surfaces due to urban development are one of the main reasons for the increase in the peak discharge and the volume of rainfall runoff, which causes flooding of roads and damage to urban areas. By accurately estimating the amount of runoff and properly designing the urban drainage network, as well as managing this runoff, the damages of urban floods can be reduced. SWMM rainfall-runoff model is one of the most efficient models in the design of drains and urban runoff management. Since the hydrological models must be evaluated before use, in this study the SWMM model was evaluated using 6 rainfall-runoff events for the city of Shahrood and the efficiency of the urban drainage network for floods with return periods of 2 to 15 years was investigated. For this purpose, six flood hydrographs of precipitation events were measured at the two main outlets of the city. The results showed that the SWMM model with the mean square root of the normalized error (NRMSE) of about 20% and $R^2=0.90$ in the validation stage has a suitable efficiency in simulating the flood hydrograph. Also, the examination of the performance of urban drains showed for precipitation with a return period of 2, 5, 10, and 15 years, 9.1, 31.8, 36.4, and 41% of the canals are flooded, respectively.

1. Introduction

Flood is one of the most important and dangerous climatic events that threaten human societies. In most cases, human activities cause the destruction of the environment and as a result intensify the effects of natural factors during floods (Qian et al., 2021). Changing the use of agricultural land for urban development has increased impervious surfaces. With the expansion of impervious surfaces, the natural water balance is disrupted and causes a decrease in permeability, a decrease in concentration time, and

* **Corresponding Author:** Samad Emamgholizadeh

Address: Department of Water and Environmental Engineering, Civil Engineering Collage, Shahrood University of Technology

Email: s_gholizadeh517@yahoo.com

an increase in runoff, which eventually increases the peak discharge and the volume of runoff and causes flooding of roads, pollution of water sources and reduction of groundwater aquifers. Normally, natural beds can absorb and transfer a significant amount of generated runoff, but with the change of land use, there is opportunity for water to penetrate into the land is reduced (GebreEgziabher et al., 2020). In recent years, researchers have used the SWMM model as a powerful model to predict urban watershed rainfall-runoff (Zhu et al., 2023).

2. Materials and Methods

One of the basic steps in conducting flood studies is dividing the study area into sub-basins and hydrological units (Alizadeh, 1400). In this research, to separate the urban basin into hydrological units, in the first step, based on the land use map and topography, the initial boundary of the sub-basins was drawn using Arc map software. In the second step, using Google Earth software and determining the slope and height points under the watersheds, the basin borders were corrected. In the last stage, with a field visit to the water transfer channels of the city and determining the slope of these channels, the borders of the sub-basins were modified, and finally, the study area was divided into 18 sub-basins.

Evaluation of the SWMM model

SWMM hydrological model should be calibrated before use. Since there was no hydrometric station for hydrograph measurement in the studied basin, the runoff flow was measured at 10-minute intervals at the outlet of the sub-basins (Outlets number one and two). For this purpose, a micromolina was used to measure the flow velocity and Meter was used to measure the flow depth. By determining the average velocity and cross-sectional area of the flow at different times, the flood discharge at different times (flood hydrograph) was calculated. To evaluate the model, 6 precipitation events were used to calibrate the model, and three precipitation events were used for validation.

The maximum flood occurs when the duration of the rainfall is equal to the concentration time of the basin (Alizadeh, 1400). Therefore, to calculate the concentration time of the basin, two relations of California and Kerpich were used. In this research, to calculate precipitation with different return periods, due to the lack of intensity, duration and frequency (IDF) curves, the relationships proposed by Ghahraman et al.

Precipitation distribution pattern

After calculating the amount of precipitation in the design, the amount of precipitation intensity was calculated using the triangular hydrograph method.

In this method, the hyetograph of precipitation is considered triangular so that the base of the triangle is equal to the duration of precipitation and its height (h) is determined from equation (1). In this study, because the precipitation duration of the design is equal to the concentration time (60 minutes), the value of T_d was also considered equal to 60 minutes; The time to reach the maximum intensity of precipitation (t_a) is also calculated from equation (2). The value of r was estimated to be 0.45 for Shahrood based on the distribution pattern of precipitation in the region (Chow et al., 1988).

$$h = \frac{2p}{T_d} \quad (1)$$

$$t_a = T_d \cdot r \quad (2)$$

3. Results

Validation results

The results of the validation for output number one (O1) show that the difference between the simulated peak discharge and observations (error) in 5 rainfall events is less than 7% and in only one rainfall event the error value is 17.3%. These error values show that the peak flow in the validation stage is well estimated. Statistical indices, NRMSE, MBE, and R2 have been used to evaluate the ability of the model in hydrograph simulation. Based on the obtained R2 values, there is a high correlation between the observed and simulated discharge. The average value of NRMSE is about 22%, which shows the percentage of acceptable error in flood hydrograph simulation. The average values of MBE for the two outlets No. 1 and 2 are -0.036 and -0.053 m³/s, respectively, which shows that the simulated flow rate model has estimated less than the actual value, which is a small difference.

Runoff simulation results with different return periods

The evaluated SWMM model was implemented based on the design rain with different return periods. According to the results of the percentage changes of precipitation in different return periods, compared to 2-year precipitation for return periods of 5, 10, 15, 20 and 50 years, respectively, 1.47, 1.82, 2.01, 2.12 and 2.51. It is obtained while in outlet number one, the ratio of the peak discharge caused by these rains to the 2-year rainfall is 1.71, 1.99, 2.13, 2.22 and 2.47, respectively. With the hydraulic simulation of the water transmission channels, it was determined that with 2-year rainfall, about 10% of the channels get flooded, and when the planned rainfall reaches 50 years, the percentage of flooding reaches 45%.

4. Discussion and Conclusion

In this study, the SWMM model was evaluated using 6 rainfall-runoff events for the city of Shahrood, and the efficiency of the urban drainage network for floods with return periods of 2 to 50 years was investigated. For this purpose, the flood hydrograph of 6 rainfall events was measured at the two main outlets of the city. The results of the model evaluation showed the appropriate efficiency of the model in simulating the flood hydrograph (NRMSE about 20% and R2 about 0.90 in the validation stage). The examination of the performance of urban drains also showed that for rains with a return period of 2, 5, 10 and 15 years, 9.1%, 31.8%, 36.4% and 41% of the canals are flooded, respectively.

5. Six important references

- 1) Qian, L., W. Feng, Y. Yang, H. Zhengce, L. Mantao. and G. Yuntao. 2021. Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: a case study in Guangxi, China. arXiv preprint arXiv:2112.10347.
- 2) GebreEgziabher. M and Y. Demissie. 2020. Modeling Urban Flood Inundation and Recession Impacted by Manholes. Department of Civil and Environmental Engineering, 12(1160): 1-22.
- 3) Zhu, Y., C. Xu, Z. Liu, D. Yin, H. Jia, and Y. Guan. 2023. Spatial layout optimization of green infrastructure based on life-cycle multi-objective optimization algorithm and SWMM model. Resources, Conservation and Recycling, 191, p.106906.
- 4) Alizadeh, A. 2022. Principles of applied hydrology. 45th edition, Imam Reza University Press.
- 5) Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mars. 1988. Applied Hydrology, Mcgraw-Hill, 572.
- 6) Ghahraman, B. and H. Abkhazr. 2013. Agricultural sciences and techniques and natural resources. Year 8, Number 2, pp. 1-13.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to



ارزیابی شبکه زهکشی شهری با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: شهر شاهرود)

محمدعلی رحیمی^۱، صمد امامقلی زاده^{۲*}، غلامحسین کرمی^۳، مهدی دلقندی^۴، زهرا گنجی نوروزی^۵

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

مقاله پژوهشی

چکیده

تغییر کاربری اراضی و کاهش سطوح نفوذپذیر ناشی از توسعه شهری، یکی از دلایل اصلی سبب افزایش دبی اوج و حجم رواناب ناشی از بارش‌ها شده است که این موضوع باعث آبگرفتگی معابر و خسارت به مناطق شهری می‌گردد. با برآورد دقیق میزان رواناب و طراحی مناسب شبکه زهکشی شهری و همچنین مدیریت این رواناب می‌توان از خسارات سیلاب‌های شهری کاست. مدل بارش-رواناب SWMM یکی از کاراترین مدل‌ها در طراحی زهکش‌ها و مدیریت رواناب شهری می‌باشد. از آنجایی که مدل‌های هیدرولوژیکی قبل از استفاده باید مورد ارزیابی قرار گیرند، بنابراین در این مطالعه مدل SWMM با استفاده از ۶ رخداد بارش-رواناب برای شهر شاهرود ارزیابی شد و کارایی شبکه زهکش شهری برای سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۵ سال مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور هیدروگراف سیلاب ۶ رخداد بارش در دو خروجی اصلی شهر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد مدل SWMM با داشتن میانگین ریشه دوم مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) حدود ۲۰ درصد و R^2 حدود ۰/۹۰ در مرحله اعتبارسنجی دارای کارایی مناسب در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب بوده است. همچنین بررسی عملکرد زهکش‌های شهری نیز نشان داد که برای بارش‌های با دوره بازگشت ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ سال، به ترتیب ۹/۱، ۳۱/۸، ۳۶/۴ و ۴۱ درصد کانال‌ها دچار آبگرفتگی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: رواناب، سیلاب شهری، شاهرود، مدل SWMM، هیدروگراف

^۱ کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

Email: mohammadalii906@gmail.com

^۲ استاد، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود (نویسنده مسول)

Email: s_gholizadeh517@yahoo.com

^۳ دانشیار، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران Email: g.karami@khu.ac.ir

^۴ استادیار، گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود Email: delghandi@gmail.com

^۵ استادیار، گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود Email: z_ganji@shahroodut.ac.ir



مقدمه

(Akdogan et al., 2016). در سال‌های اخیر، مدل SWMM یا مدل مدیریت رواناب برای شبیه‌سازی بارش-رواناب مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (Zhu et al., 2023). در تحقیقات مختلفی کارایی این مدل مورد بررسی قرار گرفته شده است. از جمله؛ بدیعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) برای شبیه‌سازی رواناب سطحی شهر گرگان از مدل هیدرولوژیکی-هیدرولیکی SWMM استفاده کردند. ایشان به منظور ارزیابی مدل از چهار واقعه بارش-رواناب کمک گرفتند. نتایج نشان داد که مدل با دقت مناسبی دبی اوج و حجم جریان را شبیه‌سازی کرده است. شهبازی و همکاران (۱۳۹۶) مؤثرترین پارامترهای ورودی به مدل SWMM را بررسی کردند. بدین منظور حساسیت مدل به ۱۰ پارامتر شامل درصد مناطق نفوذناپذیر، شیب، عرض معادل، ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر و نفوذناپذیر، زمان تمرکز، شماره منحنی (CN)، ارتفاع ذخیره در مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی تعیین شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی از سه واقعه بارندگی استفاده کردند. نتایج نشان داد که حساس‌ترین پارامتر، درصد سطوح نفوذناپذیر و کم‌اثرترین پارامتر مربوط به ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر است. باقلانی و همکاران (۱۳۹۸) با به‌کارگیری مدل SWMM بارش-رواناب شهر ایلام را بررسی کردند و عنوان نمودند که دبی اوج و حجم جریان شبیه‌سازی شده انطباق خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد و مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی سیلاب را دارد. آرمان و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مدل SWMM رواناب سطحی شهر ایذه را شبیه‌سازی نمودند. ارزیابی مدل SWMM نشان داد که انطباق خوبی بین دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود دارد. ایشان برای بررسی ارزیابی مدل از سه رخداد بارش استفاده کردند. یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۸) با به‌کارگیری مدل SWMM و پنج رخداد بارش، رواناب منطقه ۶ تهران را شبیه‌سازی کردند. برای اعتبارسنجی از ۵ واقعه بارندگی استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از ارزیابی مدل نشان داد انطباق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود دارد و همچنین عنوان نمودند از این مدل می‌توان برای طراحی مناسب‌تر سیستم‌های زهکشی استفاده کرد.

سیل یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی با احتمال رخداد بسیار است که جوامع بشری را تهدید می‌کند. در بیشتر موارد فعالیت‌های انسان از جمله توسعه شهرنشینی، تغییر کاربری اراضی، تخریب محیط‌زیست و با از بین بردن پوششی گیاهی باعث افزایش سیلاب شهری می‌شود (Qian et al., 2021). با افزایش شهرسازی سطوح نفوذناپذیر افزایش می‌یابد (Sadeghi et al., 2022). گسترش سطوح نفوذناپذیر تعادل آبی طبیعی به هم می‌خورد و سبب کاهش نفوذپذیری، کاهش زمان تمرکز و افزایش رواناب می‌شود (Fazal Ahamed et al., 2019). بسترهای طبیعی به‌طور معمول توانایی جذب و انتقال مقدار قابل‌توجهی از رواناب‌های ایجاد شده را دارند اما با تغییر کاربری اراضی فرصت نفوذ آب به درون زمین کاهش می‌یابد (GebreEgziabher et al., 2020). هنگامی که بارش‌هایی با شدت زیاد رخ دهد که بیش‌تر از حد توان جذب گیاهان و خاک باشد، کانال‌های انتقال آب پتانسیل عبور رواناب را ندارند (Khaleghi., 2017)؛ بنابراین دبی پیک هیدروگراف و حجم رواناب افزایش یافته و سبب آب‌گرفتگی معابر می‌شود. (Li et al., 2022). در حال حاضر، با پیشرفت علوم کامپیوتر، مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی توانسته‌اند با بهره‌گیری از اطلاعات لازم، مدل‌های بارش-رواناب و معادلات حاکم بر جریان آب را حل نمایند (Marko et al., 2018) عمدتاً این مدل‌ها برای درک بهتر روابط پیچیده بارش-رواناب در حوضه‌های شهری گسترش یافته‌اند (Hu et al., 2021). امروزه مدل‌سازی در حوضه‌های شهری با توجه به اهمیت منابع آبی از جمله سیلاب گسترش زیادی یافته است (Yang et al., 2022). مدل‌ها برای تبدیل بارش به رواناب و همچنین روندیابی رواناب، نیازمند برآورد تعدادی پارامتر می‌باشند. برآورد این پارامترها که به‌منظور نزدیکی خروجی مدل به مقادیر مشاهداتی صورت می‌پذیرد؛ ارزیابی مدل (واسنجی و اعتبارسنجی) نام دارد (Mousavi et al., 2012). مهندسان در سال‌های اخیر از مدل‌های متعدد ریاضی و تجربی بارش-رواناب برای پیش‌بینی رواناب استفاده کرده‌اند، از جمله این مدل‌ها می‌توان به MIDUSS، RISURSIM و URBAN SWMM اشاره کرد



شبیه‌سازی شده انطباق خوبی با واقعیت دارد. در ضمن آن‌ها راهکارهای مدیریتی (BMP) را برای کاهش میزان رواناب در این مناطق پیشنهاد کردند (Beck et al., 2017). آسک و همکاران سیلاب شهر روانوک با دو مدل SWMM و GSSHA با ۹ رخداد بارش شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی سیلاب‌ها دارند، لذا مدل SWMM توانایی بیشتری برای بررسی شرایط هیدرولیکی نسبت به مدل GSSHA دارد (ASCE et al., 2021).

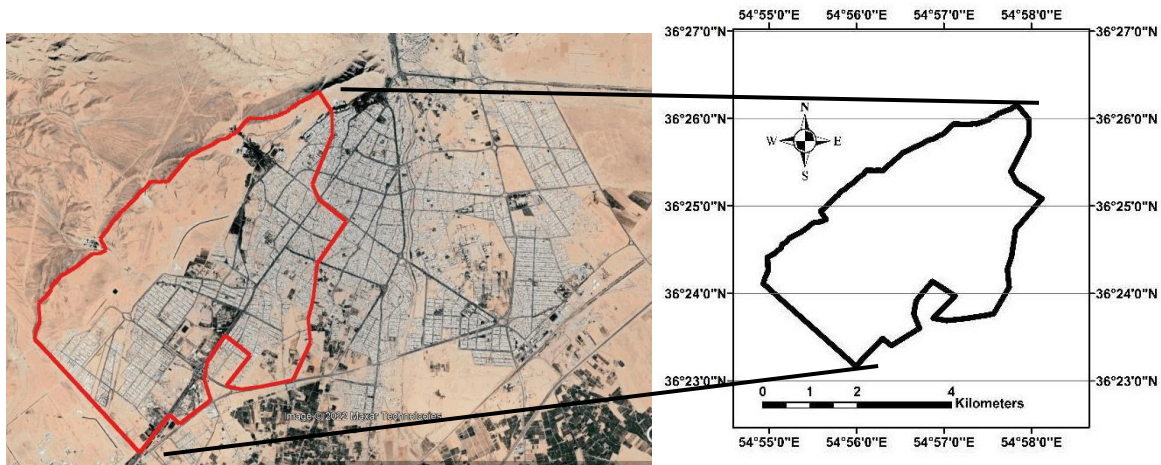
بیشتر شهرها درون حوضه‌های آبخیز قرار دارند که می‌بایست از لحاظ هیدرولوژی و هیدرولیکی که نسبت به حوضه‌های طبیعی از پیچیدگی بیشتری برخوردار هستند مورد بررسی قرار گیرند. شهرستان شاهرود در دامنه کوه و محل عبور سیلاب‌های فصلی قرار گرفته است و با توجه به اینکه در فصول مختلف سال بارش‌هایی با شدت زیاد رخ می‌دهد و از طرفی به علت وجود شبکه ضعیف زهکشی شهری، خیابان‌ها دچار آبگرفتگی می‌شوند. از این رو برای جلوگیری از بروز این مشکلات و کنترل سیلاب‌ها و بهبود شبکه زهکشی، لازم است کارایی شبکه زهکشی شهری با استفاده از مدل SWMM مورد بررسی قرار گیرد و نقاط ضعف شبکه مشخص گردد. برای این منظور ابتدا بایستی مدل SWMM برای منطقه مورد مطالعه ارزیابی شود. بنابراین هدف اصلی این پژوهش ارزیابی مدل SWMM و سپس استفاده از آن برای بررسی کارایی شبکه زهکشی شهر شاهرود می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه تحقیق حاضر، بخشی از شهر شاهرود به مساحت ۱۳۹۵ هکتار و ارتفاعی معادل ۱۳۸۰ متر می‌باشد (شکل ۱). شهر شاهرود با جمعیتی بالغ بر ۱۵۰۰۰۰ نفر (طبق سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵) در شمال استان سمنان قرار دارد. متوسط درجه حرارت و بارندگی این شهر به ترتیب ۱۵ درجه سانتیگراد و ۱۵۰ میلی‌متر در سال است. اقلیم منطقه نیز بر اساس روش دومارتن در محدوده خشک قرار می‌گیرد.

رفیع‌رفیعی و همکاران (۱۴۰۰) شبیه‌سازی سیلاب شهری شهر لار را با مقایسه سه نرم‌افزار SWMM، ASSA و SewerGemes انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها از شش رخداد بارش-رواناب استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل SWMM مقدار دبی و حجم رواناب را به خوبی پیش‌بینی کرده است و همچنین مدل SWMM توانایی و دقت بیشتری در شبیه‌سازی سیلاب نسبت به مدل‌های ASSA و SewerGemes دارد. امیدی ارجنکی و همکاران (۱۳۹۹) با کمک مدل SWMM شبیه‌سازی رواناب سطحی شهر شهرکرد را انجام دادند. در این پژوهش به منظور ارزیابی مدل از چهار رویداد بارش-رواناب استفاده شد. نتایج نشان داد مدل توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی سیلاب دارد و پیش‌بینی سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله نشان داد که کانال‌های انتقال آب ظرفیت کافی نداشته و باعث آبگرفتگی خیابان می‌شود. همچنین با انجام آنالیز حساسیت مشخص شد که پارامتر عرض معادل حوضه حساس‌ترین پارامتر مؤثر بر میزان رواناب می‌باشد.

هانگ و همکاران شبیه‌سازی رواناب شهری شهر جینان را با مدل SWMM انجام دادند. آن‌ها برای اعتبارسنجی و واسنجی مدل ۱۴ واقعه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل قابلیت خوبی برای شبیه‌سازی سیلاب در شهرهای بزرگ را دارد (Huang et al., 2017). جیانگ و همکاران شبیه‌سازی سیلاب شهری در شهر دونگوان در جنوب چین را با مدل SWMM انجام دادند. نتایج نشان داد برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله سیل اتفاق خواهد افتاد ولی با دوره بازگشت یک ساله سیلابی رخ نخواهد داد (Jiang et al., 2015). مشیو و همکاران عدم قطعیت پارامترهای SWMM را بر اساس روش GLUE برای شهر پکن تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد که دو پارامتر زبری کانال و سطح غیرقابل نفوذ از مهم‌ترین پارامترهای ورودی مدل SWMM می‌باشند و همچنین روش GLUE یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل پارامترها و عدم قطعیت است (Meishui et al., 2016). بک و همکاران به برآورد رواناب حاصل از رگبارهای تندی در حوضه دریاچه تاهو در کالیفرنیا پرداختند. نتایج نشان داد رواناب



شکل (۱) حوضه مورد مطالعه در شهر شاهرود

برای داشتن زیرحوضه‌های همگن، بر اساس نقشه کاربری اراضی و توپوگرافی مرز اولیه زیرحوضه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arc map ترسیم شد (شکل ۲)، در مرحله دوم با استفاده از نرم‌افزار Google Earth و تعیین شیب و نقاط ارتفاعی زیر حوضه‌ها، مرزهای ترسیم شده اصلاح گردید. در مرحله آخر با بازدید میدانی از کانال‌های انتقال آب سطح شهر و تعیین شیب این کانال‌ها مرزهای زیرحوضه‌ها، مورد بازبینی نهایی قرار گرفت. و در نهایت منطقه مورد مطالعه به ۱۸ زیرحوضه تقسیم شد که به ترتیب، رواناب زیرحوضه‌های ۱ تا ۱۰ در خروجی شماره یک و ۱۱ تا ۱۸ در خروجی شماره دو اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM

در هر حوضه‌ای با توجه به خصوصیات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی آن، فرآیند بارش-رواناب متفاوتی اتفاق می‌افتد. بنابراین مدل‌های هیدرولوژیکی از جمله مدل SWMM قبل از استفاده باید ارزیابی (واسنجی و اعتبارسنجی) شوند از آنجایی که در حوضه مورد بررسی، ایستگاه هیدرومتری جهت اندازه‌گیری هیدروگراف وجود نداشت در خروجی زیر حوضه‌ها (دو خروجی شماره یک و دو) مقدار دبی رواناب به فواصل ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. برای این منظور از میکرومولینه برای اندازه‌گیری سرعت جریان و از شاخص مدرج برای اندازه‌گیری ارتفاع جریان استفاده شد. با توجه به مستطیل شکل بودن خروجی دو زیرحوضه، سطح مقطع جریان به راحتی محاسبه گردید.

مدل (SWMM Storm Water Management Model)

مدل SMMM یک مدل پویای شبیه‌ساز کمی و کیفی بارش-رواناب است. شبیه‌سازی کمی در این مدل طی دو مرحله هیدرولوژیکی و هیدرولیکی انجام می‌شود. در مرحله هیدرولوژیکی پارامترهای ورودی از جمله بارش، تبخیر، ذوب برف، ذخیره سطحی، نفوذ و تبادل مجاری با آب‌های زیرزمینی وارد مدل شده که مقدار رواناب را محاسبه می‌کند. در مرحله هیدرولیکی، مدل با توجه به نتایج هیدرولوژیکی، روندیابی رواناب را در مجاری انجام می‌دهد و در نهایت هیدروگراف رواناب را در خروجی حوضه شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین مقدار عمق آب در کانال‌های زهکش نیز قابل تعیین می‌باشد. در این مدل از معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتم استفاده می‌شود. در این مطالعه برای برآورد نفوذ از روش شماره منحنی، برای روندیابی جریان از موج دینامیک و برای محاسبه عمق آب در سطح زیرحوضه‌ها از معادله بیلان آب استفاده شد (Ahamed et al., 2019 and Basim et al., 2019).

بدون شک یکی از مراحل اساسی در انجام مطالعات سیلاب، تقسیم‌بندی پهنه مطالعاتی به زیرحوضه‌ها و واحدهای هیدرولوژیک می‌باشد. مهم‌ترین عوامل در تعیین زیرحوضه‌ها، شامل کاربری اراضی، شبکه آبراهه‌ای، وضعیت توپوگرافی و نفوذپذیری زمین می‌باشد (علیزاده، ۱۴۰۰). در این تحقیق تفکیک حوضه شهری به واحدهای هیدرولوژیک طی چند مرحله انجام شد. در مرحله اول،



استفاده شدند و بقیه رخدادها به دلایل مختلف مانند کوتاه بودن زمان بارش، بارش همزمان باران و برف و ... حذف شدند. در نهایت شش رخداد بارش مورخ ۱۳۹۹/۱/۲۲، ۱۳۹۹/۱/۲۳ (شامل دو بارندگی صبح و عصر)، ۱۳۹۹/۲/۷، ۱۳۹۹/۲/۱۴ و ۱۳۹۹/۲/۱۴ برای ارزیابی مدل استفاده شدند (جدول ۱).

جدول (۱) مشخصات رخدادهای بارش مورد استفاده در ارزیابی مدل

رویداد	۱۳۹۹/۱/۲۲	۱۳۹۹/۱/۲۳	۱۳۹۹/۲/۷	۱۳۹۹/۲/۱۴
شماره بارش	۱	۲	۳	۴
بارش (mm)	۵/۸	۲/۲	۳/۱	۲۳/۲
تداوم (h)	۲/۳	۰/۸	۰/۷	۲/۳
	صبح	عصر		

برآورد کمتر از مقادیر مشاهداتی است. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی آماره‌های RMSE، MBE، NRMSE و MAE برابر صفر می‌شود (Mattar et al., 2017 and Mereu et al., 2009).

(۱)

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2)(\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}$$

(۲)

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

(۳)

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{X}}$$

(۴)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i) \quad (۵)$$

که در روابط فوق Y_i مقادیر مشاهداتی، X_i مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{X} میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{Y} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد سال‌های آماری مورد مطالعه است.

سرعت جریان نیز در نقاط مختلف سطح مقطع جریان (در قالب یک شبکه مستطیلی) اندازه‌گیری شد. با تعیین سرعت متوسط و سطح مقطع جریان در زمان‌های مختلف، دبی سیلاب در زمان‌های مختلف (هیدروگراف سیلاب) محاسبه گردید. در مجموع هیدروگراف ۱۳ بارش، اندازه‌گیری شد که از این تعداد ۶ رخداد برای ارزیابی مدل

برای واسنجی مدل SWMM، از پارامترهای شیب حوضه، ضریب مانینگ مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، عمق چالاب در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر و عرض معادل حوضه استفاده می‌شود (Du et al., 2007). در این پژوهش برای واسنجی مدل، از سه رخداد بارش مشاهداتی ۱، ۳ و ۶ و برای اعتبارسنجی از سه رخداد دیگر یعنی بارش‌های شماره (۲، ۴ و ۵) استفاده شد. در این تحقیق با توجه به مطالعات گذشته، پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر مدل انتخاب شدند و ضرایب انتخابی برای زیرحوضه‌های مختلف، با درصد ثابتی کم یا زیاد شدند تا مدل واسنجی گردد.

برای ارزیابی کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی از شاخص‌های آماری ضریب تعیین R^2 ، میانگین ریشه دوم مربعات خطا^۷ (RMSE)، RMSE نرمال شده^۸ (NRMSE)، میانگین اریبی خطا^۹ (MBE) و میانگین خطای مطلق^{۱۰} (MAE) کمک گرفته شد. حداقل مقدار RMSE، NRMSE، MAE صفر است و که نشان دهنده کارایی عالی و یا خوب مدل در شبیه‌سازی متغیر مورد بررسی می‌باشد و برای تعیین تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها از معیار MBE استفاده می‌شود. MBE منفی نشانگر تمایل مدل به

4-Mean Bias Error

5-Mean Absolute Error

1-Coefficient of Determination

2-Root Mean Square Error

3-Normalized RMSE



بارش طرح

الگوی توزیع بارش

پس از محاسبه مقدار بارش طرح، مقدار شدت بارش با استفاده از روش های توگراف مثلثی محاسبه گردید. در این روش های توگراف بارش به صورت مثلثی در نظر گرفته می شود به طوری که قاعده مثلث برابر با مدت بارش و ارتفاع آن (h) از رابطه (۸) تعیین می گردد، در این مطالعه با توجه به اینکه مدت بارش طرح برابر با زمان تمرکز (۶۰ دقیقه) می باشد، مقدار T_d نیز برابر با ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد؛ زمان رسیدن به حداکثر شدت بارش (t_a) نیز از رابطه (۹) محاسبه می شود مقدار r در این رابطه برای مناطق مختلف متفاوت است که از بررسی الگوی توزیع بارش در منطقه برآورد می شود و با مطالعه رخدادهای بارش سالهای قبل، مقدار r برای شاهرود ۰/۴۵ برآورد گردید (Chow et al., 1988).

(۸)

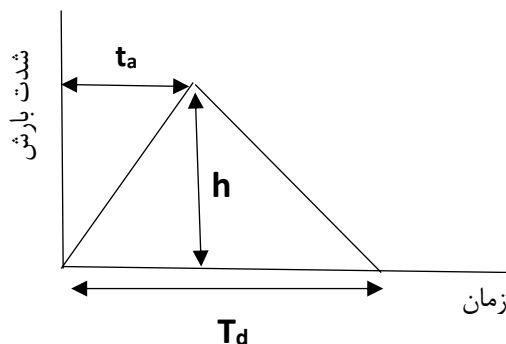
$$h = \frac{2p}{T_d}$$

(۹)

$$t_a = T_d \cdot r$$

در این روابط، p مقدار بارش می باشد، بقیه پارامترها نیز

داخل متن شرح داده شده اند



شکل (۳) روش هیتوگراف مثلثی

منطقه مورد مطالعه به ۱۸ زیرحوضه تقریباً همگن تقسیم شد (شکل ۴). با توجه به نقشه کاربری اراضی و بازدید میدانی از منطقه، کانالهای اصلی هر زیرحوضه مشخص و مشخصات آنها برداشت شد، این مشخصات شامل موقعیت کانال، طول کانال، شکل و ابعاد کانال می باشند. در شکل

شدیدترین سیلاب مربوط به بارشی است که تداوم آن برابر با زمان تمرکز حوضه باشد (علیزاده، ۱۴۰۰). لذا برای محاسبه بارش طرح از تداوم برابر با زمان تمرکز استفاده شد و جهت محاسبه زمان تمرکز حوضه، از دو رابطه کالیفرنیا و کریچ استفاده شد. در این پژوهش برای محاسبه بارش طرح با دوره های بازگشت مختلف، به علت عدم وجود منحنی های شدت، مدت و فراوانی (IDF) از روابط پیشنهادی قهرمان و همکاران (۱۳۸۳) استفاده شد (روابط ۶ و ۷).

$$R_t^T = A t^B [a_1 + a_2 \ln(T - a_3)] R_{60}^{10} \quad (۶)$$

$$R_{60}^{10} = e^{0.291} (R_{1440}^2)^{0.694} \quad (۷)$$

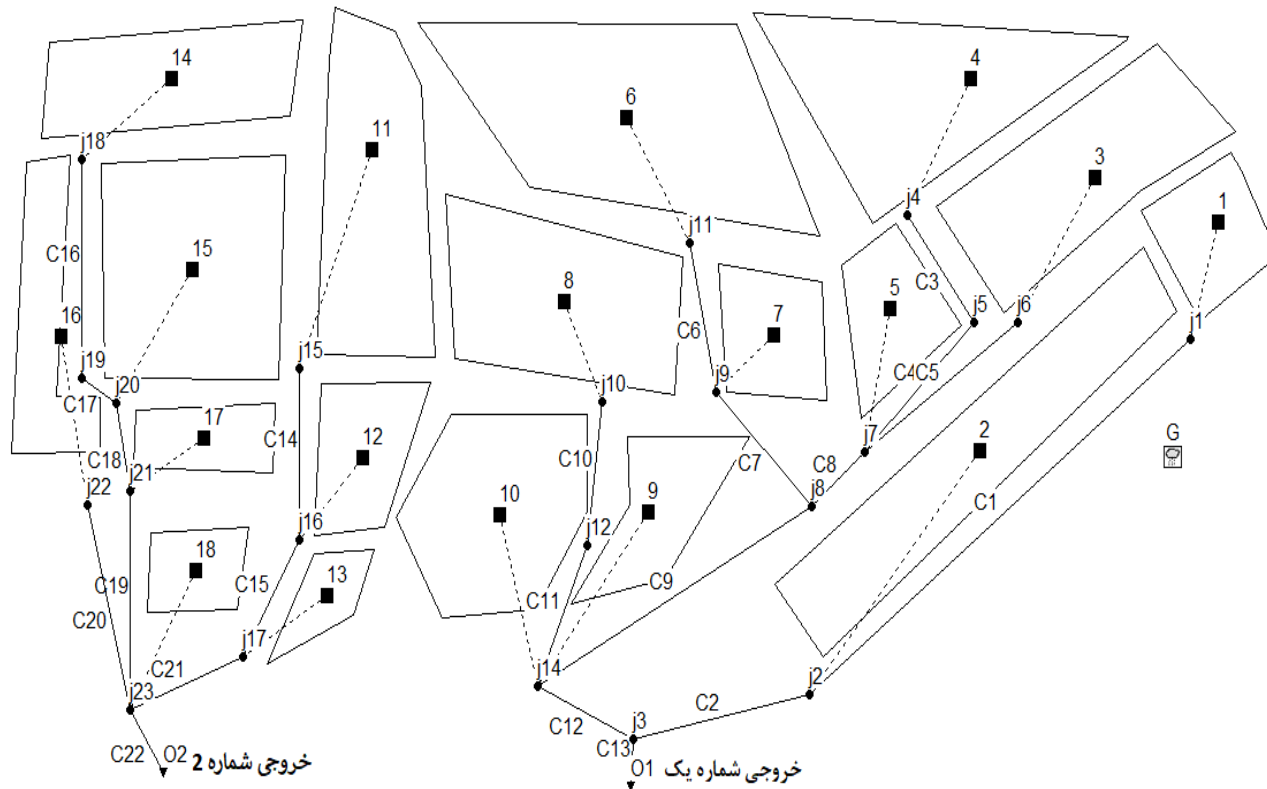
که در روابط فوق t مدت بازگشت برحسب دقیقه، T دوره بازگشت برحسب سال، R_{60}^{10} مقدار باران یک ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال برحسب میلی متر R_t^T مقدار باران t دقیقه ای مورد نظر با دوره بازگشت T سال، R_{1440}^2 میانگین حداکثر باران روزانه A، B و a_1 ، a_2 و a_3 ضرایب رابطه هستند که مقادیر آنها طبق پیشنهاد قهرمان و آبخضر (۱۳۸۳) به ترتیب ۰/۱۲۹۹، ۰/۴۹۵۲، ۰/۴۶۰۸، ۰/۲۳۴۹ و ۰/۶۲ تعیین شده است.

نتایج و بحث

تعیین دقیق مشخصات فیزیکی زیر حوضه ها از جمله مساحت، محیط، عرض معادل، درصد مناطق نفوذناپذیر، شیب و عمق چالاب جهت شبیه سازی بارش-رواناب امری ضروری است. برای افزایش دقت برآورد این پارامترها،



(۴) شماتیک زیرحوضه‌ها و مجاری بین زیرحوضه‌ها و در نهایت خروجی‌ها نمایش داده شده است.



شکل (۴) زیرحوضه‌ها، مجاری و اتصالات سیستم شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه در محیط مدل-نتایج واسنجی

شده در جدول (۲) و مقادیر اولیه و بهینه شده در جدول (۳) ارائه شده است. مقادیر دبی اوج و حجم رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و اختلاف آن دو در جدول (۴) و (۵) ارائه شده است.

برای واسنجی مدل از ۳ رخداد بارش به شماره‌های ۱، ۳ و ۶ استفاده شد و پارامترهای مؤثر بر هیدروگراف سیل در مرحله واسنجی کاهش یا افزایش داده شد. دامنه تغییرات پارامترهای اولیه پیشنهادی طبق مطالعات انجام

جدول (۲) دامنه تغییرات پارامترهای اولیه جهت اجرای واسنجی پارامترهای مهم مدل SWMM (اروند و همکاران، ۱۳۹۸)

منابع	محدوده تغییرات	پارامترهای واسنجی شده
(Huber et al., 1992)	۰/۰۲-۰/۸۰	ضریب مانینگ مناطق نفوذپذیر
(Huber et al., 1992)	۰/۰۱۱-۰/۰۳۳	ضریب مانینگ مناطق نفوذناپذیر
(Tsihrintzis et al., 1998)	۲/۵-۷(mm)	ذخیره چالاب مناطق نفوذپذیر
(Huber et al., 1992)	۰/۳-۲/۵(mm)	ذخیره چالاب مناطق نفوذناپذیر
(Temprano et al., 2006)	± ۳۰٪	درصد سطوح نفوذناپذیر
(خالقی و همکاران، ۲۰۱۰)	± ۱۰٪	عرض معادل



جدول (۳) مقادیر پارامترهای اولیه و بهینه شده نتایج اجرای واسنجی مدل SWMM

پارامتر	مقادیر اولیه	مقادیر بهینه	میزان تغییر پارامتر
عرض معادل	برای هر زیرحوضه متفاوت است	برای هر زیرحوضه متفاوت است	+ ۱۰٪
درصد سطوح نفوذناپذیر	برای هر زیرحوضه متفاوت است	برای هر زیرحوضه متفاوت است	- ۱۰٪
ضریب مانینگ مناطق نفوذناپذیر	۰/۰۱	۰/۰۰۹۵	- ۵٪
ضریب مانینگ مناطق نفوذپذیر	۰/۱۲	۰/۱۳	+ ۸/۳٪
ذخیره چالاب مناطق نفوذناپذیر	۲/۲۰	۲/۵۰	+ ۱۳/۶٪
ذخیره چالاب مناطق نفوذپذیر	۳/۱۰	۳/۵۰	+ ۱۲/۹٪

جدول (۴) مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی دبی اوج و حجم رواناب در مرحله واسنجی برای خروجی شماره ۱

پارامتر	دبی اوج ($\frac{m^3}{s}$)		حجم رواناب (m^3)		زمان رسیدن به دبی اوج (دقیقه)		اختلاف (درصد)	اختلاف (درصد)	اختلاف (دقیقه)	رخداد
	مشاهداتی	شبیه سازی	مشاهداتی	شبیه سازی	مشاهداتی	شبیه سازی				
۱	۲/۲۳	۲/۳۵	۱۴۲۱۳	۱۱۶۵۵	۲۱/۹۰	۹۰	۵/۴۰	۲۱/۹۰	۹۰	۱
۳	۱/۱۵	۱/۱۷	۵۰۴۹	۴۳۷۷	۱۵/۳۰	۴۰	۱/۷۰	۱۵/۳۰	۴۰	۳
۶	۱/۰۷	۱/۰۴	۶۵۱۵	۶۵۶۴	۰/۸۰	۵۰	۲/۹۰	۰/۸۰	۵۰	۶

جدول (۵) مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی دبی اوج و حجم رواناب در مرحله واسنجی برای خروجی شماره ۲

پارامتر	دبی اوج ($\frac{m^3}{s}$)		حجم رواناب (m^3)		زمان رسیدن به دبی اوج (دقیقه)		اختلاف (درصد)	اختلاف (درصد)	اختلاف (دقیقه)	رخداد
	مشاهداتی	شبیه سازی	مشاهداتی	شبیه سازی	مشاهداتی	شبیه سازی				
۱	۱/۴۰	۱/۵۰	۶۸۱۷	۶۹۶۰	۲/۱۰	۸۰	۷/۱۰	۲/۱۰	۸۰	۱
۳	۰/۶۹	۰/۷۲	۲۲۴۶	۲۵۴۷	۱۳/۴۰	۳۰	۴/۳۰	۱۳/۴۰	۳۰	۳
۶	۰/۶۹	۰/۶۴	۳۷۴۲	۳۹۰۳	۴/۳۰	۴۰	۷/۸۰	۴/۳۰	۴۰	۶

در رخداد شماره ۶ مقدار خطای مدل کمتر از ۵ درصد می باشد.

نتایج اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل SWMM، از ۳ رخداد بارش ۲، ۴ و ۵ که در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته بودند استفاده شد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای خروجی شماره یک در جدول (۶) و برای خروجی شماره ۲ در جدول (۷) ارائه شده است.

بر اساس جداول (۴) و (۵) می توان گفت که مدل SWMM دبی اوج را با دقت خوبی (خطای کمتر از ۸ درصد) برآورد کرده است. مقدار خطای مدل در خروجی شماره ۲ اندکی بیشتر از خروجی شماره یک بوده است. در مورد زمان رسیدن به دبی اوج (T_{peak}) نیز در دو رخداد از سه رخداد مورد بررسی خطا صفر است؛ اما در رخداد شماره ۶، مدل در هر دو خروجی ۲۰ دقیقه در برآورد T_{peak} خطا داشته است. در مورد حجم رواناب، مقدار درصد خطا نسبت به دبی اوج و T_{peak} بیشتر بوده است ولی با این وجود مقدار خطا در هر سه رخداد کمتر از ۲۲ درصد است به طوریکه



جدول (۶) مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دبی اوج و حجم رواناب در مرحله اعتبارسنجی برای خروجی شماره یک

پارامتر	دبی اوج ($\frac{m^3}{s}$)		حجم جریان (m^3)		اختلاف (درصد)	پارامتر
	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی		
رخداد ۲	۰/۶۱	۰/۵۲	۲۵۶۱	۲۵۷۴	۱۷/۳	۰/۵
۵	۰/۶۴	۰/۶۰	۳۲۰۴	۲۷۳۳	۶/۷۰	۱۷/۱۰
۴	۱۲	۱۲/۵۵	۴۳۴۱۸	۴۱۵۵۰	۴/۶۰	۴/۵۰
میانگین	---	---	---	---	۹/۵۰	۷/۳۰

جدول (۷) مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دبی اوج و حجم رواناب در مرحله اعتبارسنجی برای خروجی شماره ۲

پارامتر	دبی اوج ($\frac{m^3}{s}$)		حجم جریان (m^3)		اختلاف (درصد)	پارامتر
	مشاهداتی	شبیه‌سازی	مشاهداتی	شبیه‌سازی		
رخداد ۲	۰/۳۴	۰/۳۳	۱۶۶۹	۱۵۲۷	۳	۹/۴۰
۵	۰/۳۹	۰/۳۸	۱۷۳۵	۱۵۹۰	۲/۶	۹/۱۰
۴	۱۱/۵۶	۱۱/۹۰	۳۵۳۹۴	۳۳۱۵۹	۲/۹	۶/۷۰
میانگین آمارها	---	---	---	---	۲/۸	۸/۴۰

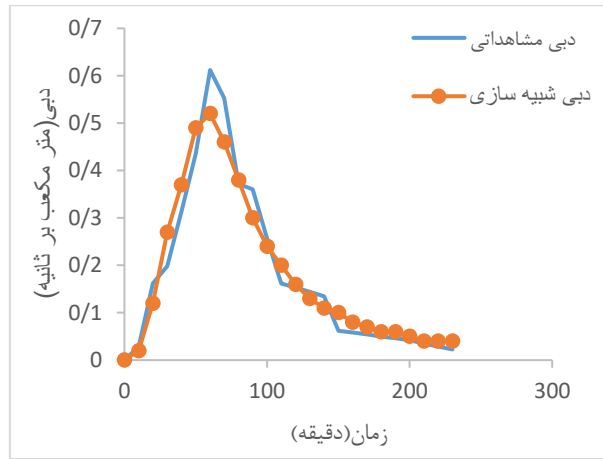
مورد حجم رواناب نیز در هر ۶ مورد (۳ رخداد بارش در دو خروجی) مقدار خطا کمتر از ۱۸ درصد است و تنها یک رخداد (رخداد شماره ۵) در خروجی شماره یک، خطای ۱۷ درصد را نشان می‌دهد در ۵ مورد دیگر خطا کمتر از ۱۰ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل SWMM توانایی بالایی در شبیه‌سازی دو خصوصیت اصلی سیلاب یعنی دبی اوج و حجم سیلاب دارد. در ادامه هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهداتی بارش‌ها در دو خروجی منطقه، در

با توجه به جدول ۶ و ۷ مشخص است که مدل با دقت خیلی مناسبی توانسته است دبی اوج را شبیه‌سازی کند به طوریکه درصد اختلاف دبی اوج شبیه‌سازی و مشاهداتی در هر سه رخداد و هر دو خروجی کمتر از ۱۸ درصد است این در حالیست که تنها در رخداد شماره ۲ و خروجی شماره یک، خطا ۱۷/۳ درصد می‌باشد و در ۵ مورد دیگر خطا کمتر از ۷ درصد است، این مقادیر خطا نشان می‌دهد دبی اوج در مرحله اعتبارسنجی به‌خوبی برآورد شده است. در

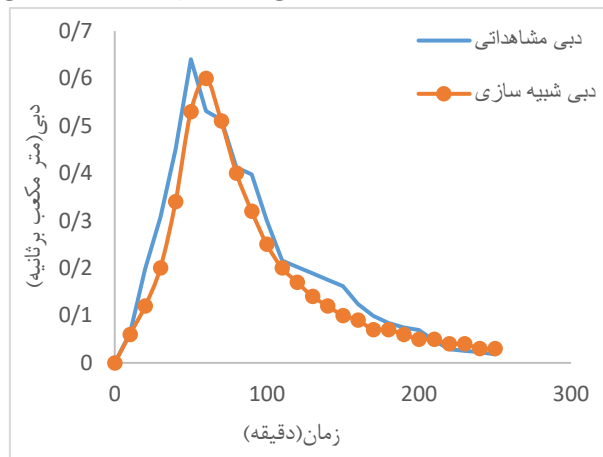


است. در محاسبه این شاخص‌ها از دبی نظیر به نظیر هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهداتی در زمانهای مختلف استفاده شده است.

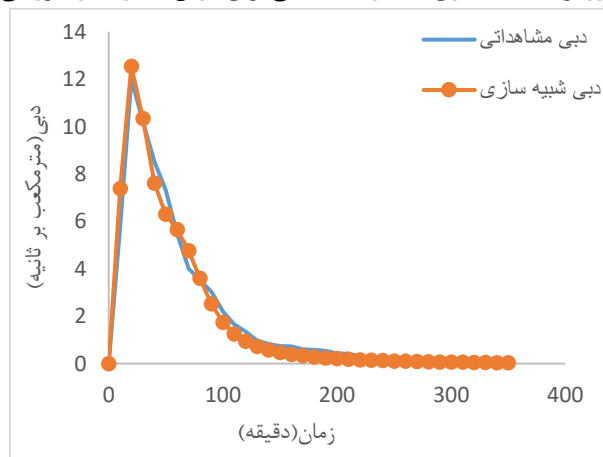
شکل‌های (۴ تا ۹) ارائه شده است. برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف از شاخص‌های آماری $RMSE$ ، $NRMSE$ ، MBE ، MAE و R^2 استفاده شده



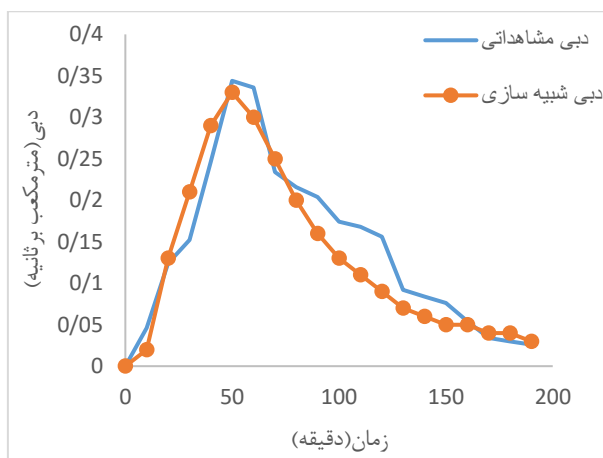
شکل (۴) هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای بارش شماره ۲ و خروجی شماره یک



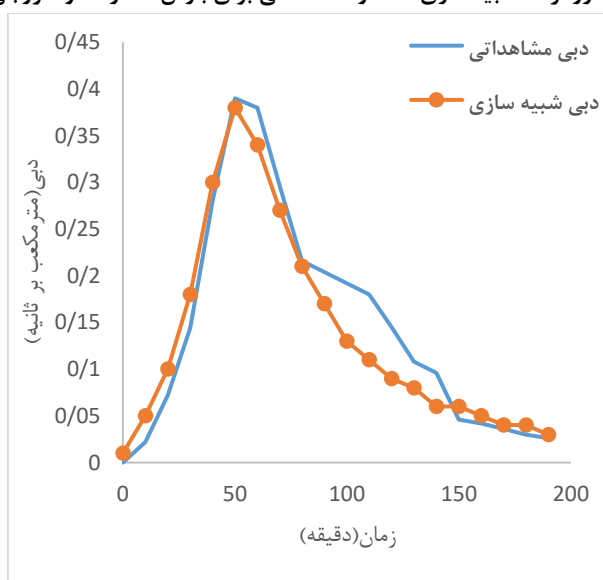
شکل (۵) هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای بارش شماره ۵ و خروجی شماره یک



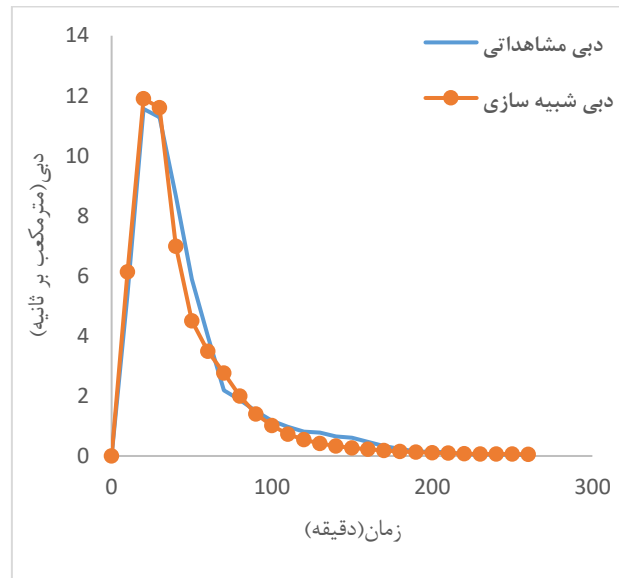
شکل (۶) هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای بارش شماره ۴ و خروجی شماره یک



شکل (۷) هیدروگراف شبیه سازی شده و مشاهداتی برای بارش شماره ۲ و خروجی شماره ۲



شکل (۸) هیدروگراف شبیه سازی شده و مشاهداتی برای بارش شماره ۵ و خروجی شماره ۲



شکل (۹) هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای بارش شماره ۴ و خروجی شماره ۲

جدول (۸) شاخص‌های آماری مرحله اعتبارسنجی برای خروجی شماره یک

R ²	دبی ($\frac{m^3}{s}$)				پارامتر بارش
	MBE ($\frac{m^3}{s}$)	MAE ($\frac{m^3}{s}$)	NRMSE (%)	RMSE ($\frac{m^3}{s}$)	
۰/۹۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳	۲۲	۰/۰۴	۲
۰/۹۴	-۰/۰۳	۰/۰۴	۲۴	۰/۰۵	۵
۰/۹۰	-۰/۰۸	۰/۲۸	۲۱	۰/۴۳	۴
۰/۹۳	-۰/۰۳۶	۰/۱۲	۲۲	۰/۱۷	میانگین آماره‌ها

جدول (۹) شاخص‌های آماری مرحله اعتبارسنجی برای خروجی شماره ۲

R ²	دبی ($\frac{m^3}{s}$)				پارامتر بارش
	MBE ($\frac{m^3}{s}$)	MAE ($\frac{m^3}{s}$)	NRMSE (%)	RMSE ($\frac{m^3}{s}$)	
۰/۹۱	-۰/۰۱	۰/۰۳	۲۱	۰/۰۳	۲
۰/۹۰	-۰/۰۱	۰/۰۳	۲۷	۰/۰۴	۵
۰/۹۸	-۰/۱۴	۰/۳۰	۲۲	۰/۴۹	۴
۰/۹۳	-۰/۰۵۳	۰/۱۲	۲۳	۰/۱۸	میانگین آماره‌ها

مقدار NRMSE (در رخداد شماره ۵ و خروجی شماره ۲) برابر با ۲۷ درصد می‌باشد این در صورتی است که در بقیه موارد مقدار NRMSE حدود ۲۰ درصد است به‌طور میانگین مقدار NRMSE در دو خروجی ۱ و ۲ به‌ترتیب ۲۲ و ۲۳ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است مقداری از این خطا مربوط به تأخیر زمانی مربوط به دو هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی می‌باشد گواه این مطلب،

همانگونه که از اشکال ۴ تا ۹ مشخص است در هر سه رخداد بارش و در هر دو خروجی، مدل SWMM توانسته است به‌خوبی شکل هیدروگراف را شبیه‌سازی نماید. بر اساس مقادیر R² در جداول ۸ و ۹ مشخص است که همبستگی بالایی بین دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. مقدار NRMSE نیز نشان از درصد خطای قابل قبول در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل دارد چرا که حداکثر



نانجینگ چین را با خطای ۱۴ درصد تعیین کردند آن‌ها عنوان کردند که مدل SWMM توانایی بالایی در شبیه‌سازی بارش-رواناب دارد.

نتایج شبیه‌سازی رواناب با دوره‌های بازگشت مختلف

برای محاسبه زمان تداوم بارش طرح، ابتدا زمان تمرکز با استفاده از دو روش کالیفرنیا و کریچ محاسبه گردید که بر اساس این دو روش زمان تمرکز به ترتیب ۵۸/۷ و ۵۸/۹ دقیقه تعیین شد. زهکش‌های شهری اغلب با دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله، (بسته به اهمیت) طراحی می‌شوند (Chow et al., 1988) و اروند و همکاران، (۱۳۹۸) اما در مواردی که احتمال خسارت به تأسیسات زیاد باشد؛ طراحی زهکش‌ها می‌تواند با دوره بازگشت تا ۵۰ سال صورت گیرد (وزارت نیرو). لذا در این مطالعه بارش طرح بر اساس زمان تداوم ۶۰ دقیقه در دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سال با استفاده از روابط قهرمان (۱۳۸۳) محاسبه شد. بدین منظور ابتدا دوره بازگشت ۱۰ ساله با تداوم ۶۰ دقیقه‌ای از رابطه (۶) و سپس با استفاده از رابطه (۵)، مقدار بارش در دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه گردید (جدول ۱۰). مدل ارزیابی شده SWMM، بر اساس باران طرح با دوره‌های بازگشت مختلف اجرا گردید و مشخصات اصلی هیدروگراف یعنی دبی اوج و حجم رواناب برای هر کدام از باران‌های طرح محاسبه شد (جدول ۱۱). مقدار دبی اوج در خروجی شماره ۱ برای دوره‌های بازگشت مختلف بین ۳/۹ تا ۹/۶۳ مترمکعب بر ثانیه تعیین گردید. در خروجی شماره ۲ نیز مقدار دبی اوج برای دوره‌های بازگشت مختلف تقریباً مشابه خروجی یک می‌باشد

درصد خطای پایین حجم رواناب شبیه‌سازی شده می‌باشد (جدول ۶ و ۷). به طوری که میانگین درصد خطای شبیه‌سازی حجم رواناب برای دو خروجی ۱ و ۲ به ترتیب ۷/۳ و ۸/۴ درصد می‌باشد. مقادیر MBE نیز نشان می‌دهد که در برخی از رخدادهای شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر مشاهداتی بوده است و در برخی رخدادهای برعکس می‌باشد به طوری که بیشترین مقدار MBE مربوط به بارش ۴ در خروجی شماره ۲ و برابر با ۰/۱۴- مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. ولی به طور کلی میانگین MBE برای دو خروجی شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۰/۰۳۶- و ۰/۰۵۳- مترمکعب بر ثانیه است که نشان می‌دهد مدل دبی شبیه‌سازی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است که این اختلاف ناچیز می‌باشد. در مطالعات مشابه، نیز کارایی مدل SWMM در شبیه‌سازی رواناب شهری به اثبات رسیده است. بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۹) مدل SWMM را با ۵ رخدادهای بارش برای شمال شهر تهران مورد ارزیابی قرار دادند ایشان خطای مدل را حدود ۱۰ درصد تعیین کردند. خطای مدل SWMM برای شهر لار با استفاده از ۶ رخدادهای بارش-رواناب ۷ درصد تعیین شد (رفیعی، ۱۴۰۰). آرمان و همکاران (۱۳۹۸) با ۳ رخدادهای بارش رواناب شهری شهر ایزه را با خطای ۱۷ درصد شبیه‌سازی کردند، ژو و همکاران (۲۰۲۳) با ۴ رخدادهای بارش-رواناب مدل SWMM را برای بخش کوچکی از شهر پکن ارزیابی کردند در این مطالعه، مدل خطای ۳۳ درصدی را به نمایش گذاشت زکی‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) با ۳ رخدادهای بارش-رواناب، رواناب یک منطقه از کلان شهر تهران را با خطای ۲۸ درصد مدل کردند. یانگ و همکاران (۲۰۲۲) با ۴ رخدادهای بارش-رواناب، و استفاده از مدل SWMM حجم رواناب بخشی از شهر

جدول (۱۰) مقدار بارش طرح دوره‌های بازگشت مختلف با تداوم ۶۰ دقیقه‌ای

دوره بازگشت	۲	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۵۰	۱۰۰
بارش طرح (میلی‌متر)	۶/۳	۹/۳	۱۱/۵	۱۲/۷	۱۳/۴	۱۴/۳	۱۵/۸	۱۷/۸



جدول (۱۱) دبی اوج و حجم جریان با دوره‌های بازگشت مختلف برای خروجی شماره یک

دوره بازگشت (سال)	دبی اوج ($\frac{m^3}{s}$)	حجم رواناب (m^3)
۲	۳/۹۰	۱۲۹۶۳
۵	۶/۶۷	۲۰۴۵۱
۱۰	۷/۷۸	۲۴۶۵۱
۱۵	۸/۲۷	۲۶۶۹۷
۲۰	۸/۶۹	۲۷۸۲۵
۲۵	۹/۱۵	۲۹۰۹۷
۵۰	۹/۶۳	۳۱۱۱۰

جدول (۱۲) دبی اوج و حجم جریان با دوره‌های بازگشت مختلف برای خروجی شماره ۲

دوره بازگشت (سال)	دبی اوج ($\frac{m^3}{s}$)	حجم رواناب (m^3)
۲	۲/۵۳	۷۹۳۵
۵	۴/۵۷	۱۲۸۸۵
۱۰	۵/۹۷	۱۶۴۰۷
۱۵	۶/۷۳	۱۸۳۹۹
۲۰	۷/۱۶	۱۹۵۱۵
۲۵	۷/۷۴	۲۱۰۰۳
۵۰	۸/۷۰	۲۳۴۲۷

بارش‌های با دوره بازگشت مختلف تقریباً یکسان است و همین امر باعث می‌گردد که در بارش‌های با دوره بازگشت کمتر، نسبت بارشی که به رواناب تبدیل می‌شود در مقایسه با بارش‌های با دوره بازگشت بزرگتر، کمتر باشد.

با توجه به اینکه پارامترهای واسنجی مدل SWMM برای زیرحوضه‌ها در دو خروجی شماره یک و ۲ با هم یکسان بود؛ می‌توان از مدل واسنجی شده برای شبیه‌سازی دیگر بخش‌های شهر (با توجه به مشابه بودن از نظر کاربری اراضی) نیز استفاده کرد. بنابراین با شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارش‌های طرح، حجم رواناب ناشی از این بارش‌ها تعیین شد (جدول ۱۳)

با توجه به نتایج جدول ۱۰ و ۱۱ درصد تغییرات بارش در دوره‌های بازگشت مختلف، نسبت به بارش ۲ ساله برای دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۵۰ سال به ترتیب ۱/۴۷، ۱/۸۲، ۲/۰۱، ۲/۱۲ و ۲/۵۱ بدست می‌آید در حالیکه در خروجی شماره یک، نسبت دبی اوج ناشی از این بارش‌ها به بارش ۲ ساله به ترتیب ۱/۷۱، ۱/۹۹، ۲/۱۳، ۲/۲۲ و ۲/۴۷ می‌باشد که نشان می‌دهد در بارش‌های با دوره بازگشت پایین، نسبت دبی اوج در مقایسه با نسبت بارش عدد بزرگتری می‌باشد. با افزایش دوره بازگشت این دو نسبت به هم نزدیک می‌شوند که دلیل این امر این است که مقدار تلفات بالقوه و بارش (تلفات برگاب، نفوذ و چالاب) برای



جدول (۱۳) حجم رواناب و درصد آبگرفتگی حوضه شهر شاهرود
برای بارش‌های طرح با دوره‌های بازگشت مختلف

دوره بازگشت (سال)	حجم رواناب (m ³)	درصد آبگرفتگی
۲	۵۷۴۵۰	۹/۱
۵	۱۲۵۱۰۹	۳۱/۸
۱۰	۱۶۱۰۵۸	۳۶/۴
۱۵	۱۷۹۳۹۷	۴۱
۲۰	۱۸۹۵۵۵	۴۵/۵
۲۵	۲۰۲۳۳۸	۴۵/۵
۵۰	۲۲۳۱۸۲	۴۵/۵

اعتبارسنجی خطای مدل در برآورد دبی اوج و حجم جریان در خروجی شماره یک به ترتیب کمتر از ۱۰ و ۸ درصد می‌باشد. خطای مدل در خروجی شماره ۲ برای دبی اوج حتی از خروجی شماره یک، نیز کمتر بود (حدود ۳ درصد). اما برآورد حجم جریان در هر دو خروجی با خطای یکسان صورت گرفت (حدود ۸ درصد). برای همین کارایی مدل در برآورد هیدروگراف سیلاب از شاخص‌های آماری مختلف استفاده شد که مقدار متوسط این آماره‌ها ($MBE = -0.36$, $MAE = 0.12 \frac{m^3}{s}$, $NRMSE = 22\%$) نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل در تخمین هیدروگراف سیلاب می‌باشد مقایسه شکل هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهداتی نیز نشان داد که به‌طور کلی مدل توانسته است شکل هیدروگراف را به‌دقت خوبی شبیه‌سازی نماید. با محاسبه بارش طرح در دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۵۰ سال مشخص شد که مقدار دبی اوج در خروجی شماره ۱ برای دوره‌های بازگشت مختلف بین ۳/۹ تا ۹/۶۳ مترمکعب بر ثانیه تعیین گردید. در خروجی شماره ۲ نیز مقدار دبی اوج برای دوره‌های بازگشت مختلف تقریباً مشابه خروجی یک می‌باشد. شبیه‌سازی هیدرولیکی بارش‌های طرح نیز آبگرفتگی مجاری را مشخص نمود. با بارش ۲ ساله حدود ۱۰ درصد از مجاری دچار آبگرفتگی می‌شوند که با رسیدن بارش طرح به بارش ۵۰ ساله، درصد آبگرفتگی به ۴۵ درصد می‌رسد.

با شبیه‌سازی هیدرولیکی مجاری انتقال آب مشخص گردید که در هر بارش با دوره بازگشت مشخص، کدام کانال‌ها دچار آبگرفتگی می‌شوند. تعداد این کانال‌ها مشخص گردید و با تقسیم بر تعداد کل کانال‌ها، درصد آبگرفتگی کانال‌ها برای هر کدام از باران‌های طرح در جدول ۱۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است در منطقه مورد مطالعه، اکثر کوچه‌ها فاقد کانال می‌باشند و تنها خیابان‌ها دارای سیستم زهکشی می‌باشند. همانگونه که از جدول ۱۳ پیداست حتی با بارش ۲ ساله نیز حدود ۱۰ درصد از مجاری دچار آبگرفتگی می‌شوند که با رسیدن بارش طرح به بارش ۲۰ ساله، درصد آبگرفتگی به ۴۵ درصد می‌رسد. لازم به ذکر است که دلیل یکسان بودن درصد آبگرفتگی مجاری در بارش ۲۰ تا ۵۰ ساله این است که حدود ۵۵ درصد از مجاری منطقه مورد مطالعه به اندازه‌ای کافی بزرگ و پر شیب است که نه با بارش ۲۰ ساله و نه با بارش ۵۰ ساله دچار آبگرفتگی نمی‌شوند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیکی SWMM 5.1 در بررسی شبکه زهکشی شهر شاهرود صورت پذیرفت. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل، رواناب حاصل از رخداد بارش در دو خروجی حوضه مورد مطالعه توسط مولینه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد در مرحله



منابع

- امیدی ارجنکی، م.، ح. ظریف صنایعی و م. حیدرزاده چوری. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی رواناب سطحی شهری و الویت‌بندی زیرحوضه‌های بحرانی با استفاده از مدل SWMM و روش TOPSIS (مطالعه موردی: شهر شهرکرد). مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۴، ص ۹۹-۱۱۳.
- آرمان، ن.، ع. شهبازی، م. فرجی و س. دهداری. ۱۳۹۸. اثر توسعه شهری بر تولید رواناب با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی شهرستان ایذه، استان خوزستان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۱۱، شماره ۳، ص ۷۵۰-۷۵۸.
- بافلانی، م.، ن. رستمی و م. توکلی. ۱۳۹۸. شناسایی عوامل موثر بر بروز سیلاب شهری در حوزه آبخیز شهر ایلام" نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۱۱، شماره ۲، ص ۵۲۳-۵۳۶.
- بدیعی‌زاده، س.، ع. بهره‌مند و ا. دهقانی. ۱۳۹۵. کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولیکی-هیدرولوژیکی SWMM به‌منظور شبیه‌سازی رواناب سطحی (مطالعه موردی، شهر گرگان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، سال هفتم، شماره ۱۴، ص ۱-۱۰.
- رفیع‌رفیعی، م.، د. رسولی، م. ذوالفقار و م. مهبد. ۱۴۰۰. ارزیابی عملکرد مدل‌های EPA SWMM و ASSA و SewerGEMS در تحلیل سیلاب شهری جمع‌آوری شده توسط شبکه زهکش‌های سطحی (مطالعه موردی شهر جدید لار). مجله مهندسی منابع آب، دوره ۱۴، شماره ۵۱.
- شهبازی، ع.، ش. خلیقی سیگارودی، آ. ملیکان و ع. سلاجقه. ۱۳۹۶. تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل مدیریت رواناب شهری SWMM (مطالعه موردی شهر ماهدشت). پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۱۱۴، ص ۶۷-۷۵.
- علیزاده، ا. ۱۴۰۰. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ چهل و پنجم، انتشارات دانشگاه امام رضا(ع).
- قهرمان، ب و ح. آبخضر. ۱۳۸۳. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. سال ۸، شماره ۲، ص ۱-۱۳.
- وزارت نیرو، مبنای و ضوابط طراحی شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی و فاضلاب‌های شهری. نشریه شماره ۳-۱۱۸. انتشارات سازمان برنامه و بودجه. ۷۱/۰۰/۷۷.
- یاراحمدی، ی.، ح. یوسفی، م. جهانگیر و س. ساداتی‌نژاد. ۱۳۹۸. ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی با از مدل هیدرولیکی-هیدرولوژیکی SWMM. اکو هیدرولوژی، دوره ۶، شماره ۲، ص ۴۱۵-۴۲۹.
- امیدی ارجنکی، م.، ح. ظریف صنایعی و م. حیدرزاده چوری. ۱۴۰۰. بررسی عملکرد و تعیین ابعاد بهینه جمع‌آوری رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM. نشریه مهندسی عمران امیر کبیر، دوره ۵۳، شماره ۶، ص ۲۵۶۱-۲۵۸۰.
- بدیع زادگان، ر.، س. خداشناس و ک. اسماعیلی. ۱۳۹۹. واسنجی مدل SWMM در حوضه آبخیز شمال شهر تهران. نشریه مرتع و آبخیزداری، دوره ۷۳، شماره ۴، ص ۷۰۹-۷۲۴.
- Akdogan, Z. and B. Güven. 2016. Assessing the sensitivity of SWMM to variations in hydrological and hydraulic parameters: A case study for the city of Istanbul. Global Nest Journal, 18(4), pp.831-841.
- ASCE, M., F. ASCE and A.M. ASCE. 2021. Modeling Storm Sewer Networks and Urban Flooding in Roanoke, Virginia, with SWMM and GSSHA. Journal of Hydrologic Engineering, 26(1).
- Basim, K., H. Waqed and A. Ghofran. 2019. Analysis of the effect of climate change on rain fall intensity and expected flooding by using ANN and SWMM program. Journal of Engineering and Applied Sciences, 14(5): 973-984.
- Beck, N.G., G. Ganley, L. Kanner and M. Mathies. 2017. An urban runoff model designed to inform storm water management decisions. J environ manage, (193): 257-269.
- Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mars. 1988. Applied Hydrology, Mcgraw-Hill, 572.
- Du, J.K., S.P. Xie, Y.P. Xu, C.Y. Xu and V.P. Singh. 2007. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. Journal of Hydrol, (336):334-346.



Fazal Ahamed, S.M and Agarwal S. 2019. Urban Flood Modeling and Management using SWMM for New R.R. Pet Region, Vijayawada, India. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), (7): 2277-3878.

GebreEgziabher. M and Y. Demissie. 2020. Modeling Urban Flood Inundation and Recession Impacted by Manholes. Department of Civil and Environmental Engineering, 12(1160): 1-22.

Hu, C., J. Xia, D. She, Z. Song, Y. Zhang and S. Hong. 2021. A new urban hydrological model considering various land covers for flood simulation. Journal of Hydrology, 603, p.126833.

Huang, Y.H and C.G. Wu. 2014. Application of the storm water management model to a piedmont city: a case study of Jinan city, China. Water science & Technology, 7(5): 858-864.

Huber, W.C and R.E. 1992. Dickinson. Storm water management model user manual. Version environmental protection agency Georgia, 268.

Jiang, L., Y. Chen and H. Wang. 2015. Urban flood simulation based on the swmm model. Proc int Assoc hydrol sci, (368):186-191.

Khaleghi, M.K. 2017. The influence of deforestation and anthropogenic activities on runoff generation. Journal of forest science, 63(6): 245-253.

Li, H., H. Ishidaira, Y. Wei, K. Souma and J. Magome. 2022. Assessment of sponge city flood control capacity according to rainfall pattern using a numerical model after multi-Source validation. Water, 14(5), p.769.

Marko. K., A. Elfeki, N. Alamri and A. Chaabani. 2018. Two-Dimensional Flood Inundation Modelling in Urban Areas Using WMS, HEC-RAS and GIS (Case Study in Jeddah City, Saudi Arabia). 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1), 12-15 November, Sousse, Tunisia, 265-267.

Mattar, M.A and A.I. Alamoud. 2017. Gene expression programming approach for modeling the hydraulic performance of labyrinth-channel emitters. Computers and Electronics in Agriculture, (142):450-460.

Meishui, L., Y. Xiaohua, S. Boyang, C. Lei and S. Zhenyao. 2016. Parameter uncertainty analysis of swmm based on the method of Glue. 7th international conference on biology, environment and chemistry, (98) of IPCBEE. 6pp.

Mousavi. S.J., K.C. Abbaspour, B. Kamali, M. Amini, H. Yang. 2012. Uncertainty-based automatic calibration of HEC-HMS model using sequential uncertainty fitting approach. Journal of Hydroinformatics, 14(2):286-309.

Qian, L., W. Feng, Y. Yang, H. Zhengce, L. Mantao and G. Yuntao. 2021. Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: a case study in Guangxi, China. arXiv preprint arXiv:2112.10347.

Sadeghi, F., M. Rubinato, M. Goerke and J. Hart. 2022. Assessing the performance of LISFLOOD-FP and SWMM for a small watershed with scarce data availability. Water, 14(5), p.748.

Temprano, J, O. Arango, J. Cagiao, J. Suarez, I. Tejero. 2006. Storm Water quality calibration by SWMM a case study in Northern Spain. Water SA, (32):55- 63.

Tsihrintzis, V and R. amid. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. Hydrol. 1998; (12):311-329.

Yang, Q., Z. Ma and S. Zhang. 2022. Urban Pluvial Flood Modeling by Coupling Raster-Based Two-Dimensional Hydrodynamic Model and SWMM. Water, 14(11), p.1760.

Zhu, Y., C. Xu, Z. Liu, D. Yin, H. Jia and Y. Guan. 2023. Spatial layout optimization of green infrastructure based on life-cycle multi-objective optimization algorithm and SWMM model. Resources, Conservation and Recycling, 191, p.106906.

Zakizadeh, F., A. Moghaddam Nia, A. Salajegheh, L.A. Sanudo-Fontaneda and N. Alamdari. 2022. Efficient Urban Runoff Quantity and Quality Modelling Using SWMM Model and Field Data in an Urban Watershed of Tehran Metropolis. Sustainability, 14(3), p.1086