



Determination of the Most Important Parameters Affecting the Urban Runoff in Khorramabad City using SWMM Model

Hamid Reza Hashemi¹ , Alireza Ildoromi² , Behnoosh Farokhzadeh³ 

¹. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Iran.

Email: hamidreza.hashemi.uni@gmail.com

². (Corresponding Author) Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Iran.

Email: ildoromi@gmail.com

³. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Iran.

Email: b.farokhzadeh@gmail.com

Article Info

Article Type:
Research Article

Article History:

Received:

9 April 2025

Received in revised form:

2 June 2025

Accepted:

26 August 2025

pp. 81 -106

Keywords:

Sensitivity analysis,
Model Evaluation,
Urban Runoff,
Khorramabad city,
SWMM Model calibration

ABSTRACT

Controlling flooding, and analyzing the complexity of the hydraulic and hydrological performance of parameters affecting urban flooding requires the use of new and efficient methods and modeling. The purpose of this research is to determine the most important parameters affecting urban flooding in Khorramabad and evaluate the SWMM model. Therefore, the sensitivity analysis of the variables affecting urban flooding, including the parameters of equivalent width, slope percentage, percentage of impervious areas, Manning roughness coefficient of permeable and impermeable areas, depth of permeable and impermeable areas, and percentage of impermeable areas without permeable areas, was reduced and increased by a constant amount within the acceptable range of changes, and the peak flood discharge was selected as the dependent variable for the study. The results showed that there is a significant relationship between simulated and observed runoff, and considering the Nash-Sutcliffe value of 0.994 and the Kling-Gupta relationship of 0.913, the model has acceptable efficiency for simulating precipitation and runoff. The results showed that the parameters of impervious land percentage, equivalent width, and slope had the greatest impact on the change in runoff depth and were directly related to the peak discharge rate that the percentage of impervious areas is the most influential and sensitive variable on the peak flood discharge in the model, small changes in the percentage of impervious areas will increase the peak flood discharge. The results indicate that some nodes have a higher runoff volume and cause flooding from the middle of Khorramabad city to the outlet point. Land use change, urbanization expansion on the banks of the Khorram Rud River, and consequently the increase in impervious surfaces are among the reasons for this, which must be revised and improved to improve and strengthen them, especially by changing the diameter and dimensions of the canals designed to transfer urban runoff in Khorramabad in accordance with the existing discharge appropriate and corrective measures must be taken.

Cite this article: Hashemi, H. R. , Ildoromi, A. and Farokhzadeh, B. (2025). Determination of the Most Important Parameters Affecting the Urban Runoff in Khorramabad City using SWMM Model. (e224982). *Quantitative Geomorphological Research*, 14(2), 81-106.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.518647.1557](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.518647.1557)

Extended Abstract**Introduction**

Desertification, which is the process of land destruction in dry, semi-arid and semi-humid areas, can lead to the loss of biological and economic productivity, and ultimately biodiversity and dust generation. This process affects approximately 35% of the earth's surface and 32% of the total human population(8). Desertification is caused by a combination of climate fluctuations and human activities; Climate factors: Drought and climate change intensify desertification by reducing water availability and changing precipitation patterns. Human activities: excessive cultivation, deforestation, excessive livestock grazing, inappropriate irrigation practices and unsustainable land management are among the main factors(7). Desertification is recognized as an important environmental challenge that affects ecosystem services, food security, and social well-being. This phenomenon is mainly caused by changes in land use and land cover, removal of natural plant cover. In fact, desertification is a complex phenomenon and occurs in different temporal and spatial scales, and each geographical area can have its own unique factors. There are different global experiences regarding confronting and identifying this phenomenon(4). For example, in China, extensive efforts have been made, including government policies and desertification control programs, which have led to the reversal of the expansion of desert lands(4). In Iran, despite various political measures, desertification caused by meteorological drought and excessive use of water remains a serious issue. Also, in Central Asia, the phenomenon of desertification has intensified again since the 2010s . Since dry areas are often affected by rapid soil erosion, land degradation, and desertification, continuous monitoring of land use and land cover changes is necessary, and remote sensing images are valuable resources for extraction due to having continuous spatial information and time series.

Methodology

The main source for obtaining the indicators used in this research were the Madis measurement products in the Terra satellite , which were extracted and translated by coding in the Google Earth Engine environment for the years 2005 to 2023. They were saved in geotipe format. The characteristics of the images obtained from Sanjade Madis are as follows. In order to fuzzify, the Linear function was used in the Spatial Analysis plugin of ArcGis software. It is necessary to explain that the indices were also converted to aligned indices at the same time as de-scaling, in which the large number indicates the desirability and the small number indicates the lack of desirability, and then in the same environment, the weighted sum of the indices for each year separately in the Raster algebra operations section It was obtained according to formula (1).

$$[(DI_1)] = \text{Albedo} + \text{TGSI}$$

In this research, the Arima model, which is actually a combination of these three components and is generally defined by three parameters p , d and q , was used as follows; p : degree of autoreversion (AR), d : degree of differentiation (I), q : degree of moving average (MA). To apply the Arima model on the raster layers obtained from the algebraic sum of the research indicators (DI), the Arima library was used in the R software, and the time series analysis was done until 2030.

Results and discussion

Albedo is a key indicator in environmental and climate studies that shows the ratio of solar energy reflection from the earth's surface to the incoming energy of the sun. This index shows the amount of reflection of different surfaces, including land, water, ice and plants, and plays an important role in determining temperature and climate changes. Albedo is expressed as a number between 0 and 1. Surfaces with an albedo close to 1 reflect more solar energy and are therefore cooler. Albedo index in Al-Wasit province of Iraq for the years 2005 to 2023. In the average obtained for this index during the studied period (fig 1,B), its lowest value is equal to 0.2 and the highest value is equal to 0.6. In order to investigate the time

changes of this index, the standard deviation of the discussed index was calculated during the study period. The highest value of deviation obtained was equal to 0.19, which is located in the almost central part of Alwasit province. The combination of these two indices for the different years under study gives the desert index. In order to combine these two indicators, the spatial analysis environment in ArcGIS software was used. The areas that are seen in brown to yellow color are placed at a higher risk of desertification index according to the index. These fields are often located in the upper parts of the Tigris river. A small part is also located in the southeastern part of Al-Wasit province. The most of the standard deviation in the desertification index (DI) of the region was in the areas of the north of Wasit province, east and parts of the center of the province, all of which are located in the northern parts of the Tigris river. The lowest value of deviation obtained for DI index was equal to 0.13 and the highest value of deviation obtained was equal to 0.24. Also, the lowest average value of the index in the period from 2005 to 2030 was equal to 0.7 and the highest average value obtained for the desert index was equal to 1.4 in the study period. The analysis obtained from Arima shows the continuation of the current trend in the future as well. If the lower limit of the Arima model continues in the time series analysis, it is expected that in 2030, the range of changes in the desertification index will be equal to its low value. with 0.66 and at its maximum value equal to 1.02.

Conclusion

The indices obtained from the spectral information of satellite images have various advantages in the study of phenomena such as desertification. While most of the previous researches used the NDVI index to study vegetation changes in the study of Desertification, this research, like the researches (9,10,11) used the TGSI index, which indicates the size of the soil. It is used superficially. Like other researches, the use of several important indicators in the phenomenon of desertification can identify the areas at risk of this phenomenon. Time series analysis with Arima in the R software environment can provide quick and easy monitoring of desertification phenomenon. According to the findings in the figure (13-14,

15-16), the average trend of changes in the desertification index obtained in the studied years follows a completely non-linear pattern. So that during 2005 to 2007 this trend was increasing and from 2007 to 2009 it was decreasing and then it was increasing until 2010 and then decreasing in 2011 to 2012 and then it was increasing until 2014. In general, the analysis of changes in this index shows that compared to 2005, this index has increased. The lowest value of this index is 0.72 in 2012 and the highest value is 1.44 in 2023. The intensity of desertification in the northern areas of the Tigris River and the northern and northeastern parts of this province during the studied period is high. Desertification is one of the most well-known environmental challenges in today's world. The existence of this phenomenon not only emphasizes the necessity of studying it, but also requires appropriate and available tools to monitor and control it. Various researches have dealt with the monitoring and monitoring of Desertification, in line with the previous researches, this study also aimed to provide a simple and fast tool for monitoring the Desertification in Al-Wasit province of Iraq. And by examining the background of the research, he used two indices, Albedo and TGSI. In order to monitor and predict the desertification phenomenon, Arima model was used in time series analysis. R software environment was used to implement the model. The findings of the research show that the phenomenon of desertification in the north, northeast and parts of the center of this province is considered a serious problem and this process will continue until 2030, which requires optimal planning and management. The intensification of this process can lead to various regional effects and consequences, including the formation of phenomena such as fine dust. Considering the nature of the indices used in this research, which was the annual average of the index in each year, it cannot be expected that the Arima model has sufficient accuracy for prediction and estimation due to the non-linear nature of the index obtained in the research. Therefore, it is suggested to use non-linear models for prediction.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

تعیین مهم‌ترین پارامترهای موثر بر سیلاب شهری خرم‌آباد با استفاده از مدل SWMM

حمیدرضا هاشمی^۱، علیرضا ایلدرمی^۲، بهنوش فرخزاده^۳

۱- گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: hamidreza.hashemi.uni@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: ildoromi@gmail.com

۳- گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: b.farokhzadeh@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

کنترل آبگرفتگی، سیلاب و تحلیل پیچیدگی عملکرد هیدرولیکی و هیدرولوژیکی پارامترهای موثر بر سیلاب شهری، مستلزم استفاده از روش‌ها و مدل‌سازی‌های جدید و کارآمد می‌باشد. هدف از این پژوهش تعیین مهم‌ترین پارامترهای موثر بر سیلاب شهری خرم‌آباد و ارزیابی مدل SWMM است. لذا آنالیز حساسیت متغیرهای موثر بر سیلاب شهری شامل پارامترهای عرض معادل، درصد شیب، درصد مناطق نفوذ ناپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذ پذیر و نفوذ ناپذیر، عمق ذخیره چالابی برای مناطق نفوذ پذیر و نفوذ ناپذیر و درصد مناطق نفوذ ناپذیر بدون ذخیره چالابی، در دامنه تغییرات قابل قبول به میزان ثابت کاهش و افزایش یافته و دبی اوج سیلاب به عنوان متغیر وابسته جهت بررسی انتخاب شد. نتایج نشان داد که بین رواناب شبیه‌سازی و مشاهداتی، رابطه معنی‌داری وجود دارد و با توجه به مقدار نش-سانت‌کلیف به میزان ۰/۹۹۴ و رابطه کلینگ-گوپتا به میزان ۰/۹۱۳ مدل برای شبیه‌سازی بارش و رواناب از کارایی قابل قبولی برخوردار است. نتایج نشان داد که پارامترهای درصد اراضی نفوذ ناپذیر، عرض معادل و شیب بیشترین تاثیر را بر تغییر عمق رواناب داشته و با میزان دبی اوج رابطه مستقیم دارند. با توجه به اینکه درصد مناطق نفوذناپذیری بیشترین تاثیر و حساسترین متغیر بر دبی اوج سیلاب در مدل می‌باشد، لذا تغییرات اندک در درصد مناطق نفوذ ناپذیر باعث افزایش دبی اوج سیلاب می‌شود. نتایج بیانگر این است که برخی گره‌ها دارای حجم رواناب بیشتری بوده و موجب آبگرفتگی از محدوده میانی شهر خرم‌آباد تا نقطه خروجی می‌شوند. تغییر کاربری اراضی، گسترش شهرنشینی در حاشیه رود خرم‌رود و به تبع آن افزایش سطوح نفوذناپذیر از دلایل آن است، که باید جهت اصلاح و استحکام آن‌ها به ویژه تغییر قطر و ابعاد طراحی کانال‌ها در انتقال رواناب شهری خرم‌آباد متناسب با دبی موجود تجدید نظر و اقدامات متناسب‌سازی و اصلاحی انجام گیرد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۲۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۱۳

صص. ۱۰۶-۸۱

واژگان کلیدی:

آنالیز حساسیت،

ارزیابی مدل،

رواناب شهری،

شهر خرم‌آباد،

واسنجی مدل SWMM

استناد: هاشمی، حمید رضا، ایلدرمی، علیرضا و فرخزاده، بهنوش. (۱۴۰۴). تعیین مهم‌ترین پارامترهای موثر بر سیلاب شهری خرم‌آباد با

استفاده از مدل SWMM. (e224982). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۴(۲): ۸۱-۱۰۶.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.518647.1557](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.518647.1557)

مقدمه

سیل و آب‌گرفتگی، از مشکلات اساسی بسیاری از شهرهای ایران است که از دلایل آن توسعه روز افزون شهرها و در نتیجه افزایش سطوح نفوذناپذیر و تغییر در چرخه هیدرولوژیکی آب است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ناکارآمدی شبکه زهکشی که اغلب با توجه به شرایط اقلیمی گذشته طراحی شده همراه با تجمع رسوبات و زباله‌ها در مجاری شبکه در کنار پدیده تغییر اقلیم موجب تشدید سیلاب شده است (Wu et al, 2011:371). در حال حاضر بخش وسیعی از نواحی شهری به‌وسیله سطوح نفوذناپذیر پوشیده شده که این امر منجر به تشکیل رواناب سطحی و بروز سیل و آب‌گرفتگی در معابر شهری شده است (Browne et al, 2013: 143). بنابراین با توجه به گسترش شهرنشینی در مقیاس جهانی استفاده از ابزارهای مدلسازی که ارزیابی اثرات احتمالی توسعه شهری بر اجزای مختلف بیابان آبی را موجب شود، یک نیاز ضروری است (Palanisami & Chui, 2015: 83). با وجود کارایی و عملکرد قابل قبول مدل SWMM⁺ و کاربردهای متعدد آن در مدیریت رواناب شهری، آموزش و کاربرد آن در سطح کشور چندان فراگیر نبوده، در حالی که آشنایی کامل و کافی جهت استفاده از این نرم‌افزار نیاز مبرم کارشناسان مدیریت شهری در حوزه‌های آب و برنامه‌ریزی شهری است تا بتوانند با پیش‌بینی و ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی شهری، برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تری را برای مدیریت شهری داشته باشند (Abdul-aziz & Al-Amin, 2015). در حوضه‌های آبخیز شهری افزایش سطوح نفوذناپذیر به دلیل توسعه فیزیکی، منجر به افزایش حجم رواناب، دبی اوج و کاهش مقدار نفوذپذیری و افزایش سیلاب شهری شده و این در حالی است که اغلب حوضه‌های آبخیز شهری فاقد ایستگاه هیدرومتری و آمار رواناب هستند، لذا تعیین پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز شهری با توجه به پیچیدگی سیستم زهکشی امری ضروری است (یاراحمدی و همکاران، ۱۳۹۸، ۴۱۵). بررسی‌ها نشان می‌دهد که حوضه‌های آبخیز شهری به دلیل توسعه شهرنشینی، دارای رفتار هیدرولوژیکی پیچیده‌تری نسبت به حوضه‌های طبیعی بوده لذا شناخت پاسخ هیدرولوژیکی آن‌ها به طراحی مناسب و کنترل سیلاب امری ضروری به نظر می‌رسد. (قادری دهکردی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۰۵۵). با توجه به اینکه مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبخیز، موجب استفاده بهینه از منابع آب و خاک در اکوسیستم‌های طبیعی و غیرطبیعی می‌گردد لذا برای تحقق این هدف، دسترس و جمع‌آوری اطلاعات جامع از رویکردهای متفاوت مدیریتی و اجرایی و نیز ویژگی‌های فیزیکی، اقتصادی - اجتماعی و اکولوژیکی حوضه‌های آبخیز یک نیاز و امری ضروری است (یاراحمدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۲۶). بنابراین در سال‌های اخیر در این رابطه مدل‌های مدیریت رواناب شهری به عنوان ابزاری مفید در برنامه‌ریزی و توسعه مکان‌های شهری مورد توجه قرار گرفته که مدل‌های، هیدرولوژیکی - هیدرولیکی تبدیل بارش به رواناب یکی از مدل‌هایی است که کارآمد در این رابطه است (Tikkanen, 2013: 112). بنابراین شبیه‌سازی رواناب آبخیز شهری به منظور مدیریت منابع آب، سیلاب اهمیت زیادی یافته و استفاده از مدل‌ها و نرم‌افزارهای کامپیوتری برآورد و شبیه‌سازی رواناب بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در حال حاضر نرم‌افزارها و مدل‌های بارش - رواناب متعددی با کارآمدی قابل قبول برای پیش‌بینی سیلاب توسعه یافته و بکار گرفته می‌شوند. در این رابطه مدل بارش - رواناب SWMM یکی از کارآمدترین مدل‌ها در طراحی زهکش‌ها و مدیریت رواناب شهری می‌باشد که شبیه‌سازی صحیح و پیش‌بینی احتمال خطر سیلاب شهری را برای بهبود طراحی زهکشی و اجرای فعالیت‌های اصلاحی در حد قابل قبول ارائه می‌نماید و بسیار هم مورد توجه قرار گرفته است. به‌طوری‌که تحقیقات و پژوهش‌هایی نیز در این رابطه انجام شده که از جمله می‌توان به برخی از آن‌ها اشاره نمود:

فرخزاده و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی مدیریت رواناب‌های شهری با استفاده از مدل هیدرولوژیکی - هیدرولیکی SWMM منطقه ۱۲ شهرداری تهران به این نتیجه رسیدند که تونل ۱۷ شهریور در شرقی‌ترین قسمت منطقه مورد مطالعه توان عبور رواناب با دوره بازگشت ۲۰ سال به بالا را ندارد؛ لذا ابعاد کانال باید مورد بازنگری قرار گیرد. حیدرزاده و همکاران (۱۳۹۶) در ارزیابی و آنالیز حساسیت کمیت رواناب و سیستم زهکشی در حوضه شهر بندرعباس با استفاده از مدل SWMM بیان داشتند که به ترتیب حساس‌ترین پارامترها بر اساس ضریب NS شامل درصد اراضی نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ

در مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، مساحت زیرحوضه، شیب زیرحوضه، درصد مناطق بدون ذخیره سطحی، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر و ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر می‌باشد. شهبازی و همکاران (۱۳۹۶) در تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل SWMM شهر ماهدشت، نشان دادند که حساس‌ترین پارامتر درصد اراضی نفوذناپذیر و کمترین حساسیت مربوط به پارامتر ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر است. رضایی و همکاران (۱۳۹۷) در بررسی مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر میزان رواناب منطقه ۹ شهر مشهد با استفاده از مدل SWMM بیان داشتند که مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری را دارد و می‌توان از این مدل برای طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری و تعیین اثرات مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر میزان رواناب شهری استفاده نمود. شهبازی و همکاران (۱۳۹۸) در ارزیابی اثر توسعه شهر ایزد خوزستان بر تولید رواناب با استفاده از مدل SWMM، نشان دادند که علت آب‌گرفتگی در بعضی از نقاط به دلیل نبود ظرفیت کافی آب‌گذرها به دلیل احداث پل‌های نامناسب در مسیر کانال‌ها می‌باشد که باعث کاهش ابعاد آبگذر و گرفتگی در محل گر‌ها شده است. یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۸) در ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی با استفاده از مدل SWMM در منطقه ۶ شهرداری تهران به این نتیجه رسیدند که با وجود ظرفیت کافی کانال‌ها، آب‌گرفتگی به دلیل انباشت زباله هاست. قادری دهکردی و همکاران (۱۳۹۹) در تعیین قابلیت جمع‌آوری و استحصال رواناب شهر بابلسر با بهره‌گیری از مدل SWMM نشان دادند که ضریب رواناب با دوره بازگشت ارتباط مستقیم دارد و بارش‌های بزرگ‌تر، ضریب رواناب بالاتری دارند. ناصح‌پور و همکاران (۱۳۹۹) در ارزیابی اثرات توسعه شهری استان قم بر رواناب با استفاده از مدل SWMM نشان دادند که در دو زیرحوضه ۲ و ۶ با افزایش ۷۰ و ۴۰ درصدی سطوح نفوذناپذیر موجب افزایش ۳۰ درصد مقدار رواناب شده‌اند. زاهدی‌خامنه و همکاران (۱۴۰۰) در بررسی عملکرد سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی و تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر آن در مناطق ۱۰ و ۱۱ مشهد نشان دادند که به ترتیب درصد مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل و ضریب زبری در اراضی نفوذپذیر و نفوذناپذیر بیشترین تاثیر را بر دبی خروجی دارند. یاراحمدی و همکاران (۱۴۰۱) در ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب‌های شهری مناطق نیمه‌خشک تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان دادند با افزایش دوره بازگشت در دوره پایه و آینده در برخی مجاری سیلاب‌رو و گر‌های شبکه زهکشی، آب‌گرفتگی و سیلاب وجود دارد. ارجنکی و همکاران (۱۴۰۰) در بررسی عملکرد و تعیین ابعاد بهینه شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شهرکرد با استفاده از مدل SWMM، بیان نمودند که افزایش ابعاد کانال‌ها یک راه حل عملیاتی برای رفع مشکل آب‌گرفتگی رواناب سطحی است. رفیعی و همکاران (۱۴۰۱) در ارزیابی عملکرد مدل‌های EPA SWMM و ASSA و SewerGEMS در تحلیل سیلاب شهر جدید لار نشان دادند که مدل EPA SWMM نسبت به سایر مدل‌ها، دقت بیشتری در شبیه‌سازی رواناب داشته و می‌تواند جهت طرح‌های مدیریت رواناب حوضه‌های شهری مشابه مورد استفاده قرار گیرد. یاراحمدی و همکاران (۱۴۰۱) در ارزیابی کارایی مدل SWMM به منظور بررسی گر‌های سیل‌گیر شبکه زهکشی تحت تاثیر تغییر اقلیم در شرق منطقه شش شهرداری تهران نشان دادند که سیستم جمع‌آوری رواناب سطحی منطقه پژوهش نیاز به بهسازی و اصلاح شیب معابر و ابعاد کانال‌ها برای انتقال رواناب ناشی از سیلاب را دارد. رحیمی و همکاران (۱۴۰۲) در ارزیابی شبکه زهکشی شهرشاهرود با استفاده از مدل SWMM نشان دادند که مدل دارای کارایی مناسب در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب بوده و بررسی عملکرد زهکش‌های شهری نیز نشان می‌دهد 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. امید نوری و همکاران (۱۴۰۲) در تبیین ضرورت کاربست روش‌های نوین در مدیریت رواناب شهری با رویکرد افزایش تاب‌آوری در برابر سیلاب شهر شیراز نشان دادند که در شاخص مناظر و فضاهای باز عمومی؛ روش ذخیره‌سازی سیلاب و حفاظت از آن و در شاخص منازل و فضاهای اختصاصی؛ سیستم تصفیه و بازیافت آب نسبت به سایر روش‌ها توسط کارشناسان به‌عنوان روش‌های مناسب برای اجرا در شهر شیراز انتخاب شدند. رضائی مقدم و همکاران (۱۴۰۴) در پهنه‌بندی جریان

سیلاب برای دوره‌های بازگشت مختلف با استفاده از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS در رودخانه گمناب چای نشان دادند که جریان سیلابی در بازه مورد مطالعه در دوره بازگشت‌های مختلف از حداقل ۱۰ متر تا حداکثر ۲۲۵ متر از کانال اصلی رودخانه خارج شده و وارد محدوده دشت سیلابی می‌گردد. حجازی و همکاران (۱۴۰۳) در بررسی و پهنه بندی خطر سیلاب حوضه‌های آبریز شهری ایذه- خوزستان با استفاده از مدل‌های فازی ویکور و روش خطی وزنی نشان دادند که عامل بارش، ارتفاع و شیب بیشترین تاثیر را بر ایجاد سیل در حوضه مورد مطالعه دارند و بر اساس مدل‌های WLC و VEKOR به ترتیب ۱۶ و ۱۳/۸۰ درصد از منطقه در طبقه با خطر بسیار بالا قرار دارد. صفری نامیوندی و همکاران (۱۴۰۳) در شناسایی مناطق سیل زده و تحلیل عوامل موثر در وقوع آن در جنوب شرق استان سیستان و بلوچستان بیان نمودند که در بین عوامل موثر (به جزء عوامل اقلیمی)، وضعیت ارتفاعی و شیب بیش‌ترین اثرگذاری را داشته و بخش زیادی از این منطقه، در معرض مخاطره سیلاب قرار دارد. رضایی مقدم و همکاران (۱۴۰۳) در ارزیابی پتانسیل خطر وقوع سیلاب حوضه آبریز آجی چای با استفاده از روش تحلیل آماری دو متغیره نشان دادند که بیش از ۳۰ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های زیاد و خیلی زیاد از نظر خطر وقوع سیل قرار دارند. وکلان‌شهر تبریز نیز به دلیل قرارگیری در مسیر رودخانه‌های آجی چای و مهران رود در پهنه‌های پرخطر قرار دارد.

جیانگ^۱ و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی به شبیه‌سازی سیلاب شهری با استفاده از مدل SWMM در شهر دونگوان در جنوب چین نشان دادند که برای بارندگی با دوره بازگشت یک ساله سیلابی اتفاق نخواهد افتاد. در حالی که برای دوره بازگشت های ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله، سیلاب رخ خواهد داد. کانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی اثر شهری شدن بر رخداد سیلاب های شهری شهر کنسو در ویتنام را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش رواناب ناشی از توسعه مناطق نفوذ ناپذیر شهری به طور قابل توجهی خطر سیل را افزایش می دهد. بک^۳ و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی به برآورد رواناب حاصل از رگبارهای تندری در شش زیر حوضه واقع در حوضه دریاچه تاهو در ایالت کالیفرنیا پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که رواناب برآوردی برای پنج زیرحوضه با واقعیت منطبق است. در ضمن روش BMP را برای کاهش میزان رواناب در این مناطق پیشنهاد کردند. وانگ^۴ و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی مدیریت متعارف و جامع سیلاب شهری در شهرهای ساحلی در هنگ کنگ و سنگاپور نشان دادند که مدیریت کلی سیلاب شهری می‌تواند منجر به کارایی اقتصادی، پایداری و سازگاری با محیط‌زیست در مقایسه با مدیریت معمولی سیلاب شهری شود. لیو^۵ و همکاران (۲۰۱۹) بیان داشتند که پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک علاوه بر ایجاد سیلاب‌های مخرب، موجب هدر رفت آب‌های سطحی می‌شود. از این رو مهار رواناب‌های سطحی و بهره برداری مناسب از آن‌ها می‌تواند راهکار مناسبی برای جلوگیری از هدر رفت آب و تبدیل تهدید به فرصت باشد. وانگ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه شبیه سازی و ارزیابی اقدامات تطبیقی بر اساس مدل SWMM، نشان دادند که بین وقایع بارش شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مدل انطباق خوبی وجود دارد. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) به طراحی و پیاده سازی یک چارچوب مبتنی بر SWMM برای مدیریت رواناب شهری پرداختند. نتایج نشان داد که مدل می‌تواند محاسبات را در زمان واقعی، به طور ثابت، سریع و دقیق ارائه دهد و می‌تواند به طور موثر در مدیریت لحظه‌ای رواناب شهری به کار گرفته شود. آلدیانسیاه^۶ و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به ارزیابی خطر وقوع سیل بر اساس الگوریتم‌های یادگیری ماشین در شهر کننداری اندونزی با پارامترهای جهت شیب، انحاء، ارتفاع، جریان تجمعی، جهت جریان، زمین‌شناسی، شیب، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی، بارش، فاصله از رودخانه،

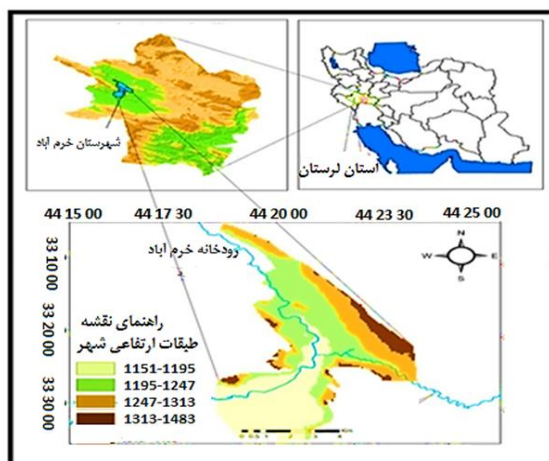
1 . Jiang
2 . Kang
3 . Beck
4 .Wang
5 . Liu
6.Aldiansyah

خاک، شاخص قدرت آبراهه، شاخص حمل رسوب، شاخص زبری زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی پرداخته و نشان دادند که از بین ۱۷ پارامتر مورد بررسی شاخص پوشش گیاهی و شیب زمین بیشترین تأثیر را بر وقوع سیل در منطقه داشته‌اند. با توجه به مرور منابع داخلی و خارجی بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیلاب شهری یکی از موضوعات مهم در سال‌های اخیر بوده که بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. طی یک دهه اخیر شهر خرم‌آباد در استان لرستان یکی از کانون‌های سیلاب شهری بوده که به طور متوسط طی هر سال با بروز سیلاب‌های مخرب مواجه بوده است. لذا با توجه به عدم وجود ایستگاه هیدرومتری یا هر پایگاهی برای اندازه‌گیری و ثبت دبی سیلاب در شهرها و با توجه به تصرف حاشیه رودخانه و تغییر کاربری اراضی شدید در سال‌های اخیر و توسعه شهرنشینی و رخدادهای سیلاب در شهر خرم‌آباد، بررسی وضعیت سیستم جمع‌آوری آب‌های حاصل از رواناب شهری و تعیین نقاط ضعف شبکه انتقال شهری با تأکید بر تعیین و ارزیابی حساسیت پارامترهای رخدادهای سیلاب در شهر خرم‌آباد ضروری است. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی وضعیت سیلاب بخشی از شهر خرم‌آباد با استفاده از مدل SWMM به منظور تعیین پارامترهای حساس در مدل، برای پیش‌بینی و تخمین رواناب و ارزیابی عملکرد مدل SWMM است، تا بتوان از نتایج آن جهت برنامه‌ریزی و اقدامات حفاظتی جهت جلوگیری از وقوع سیلاب در طول مسیر رودخانه خرم‌رود از قبیل لایروبی بستر، حفظ حریم بستر رودخانه از تصرف انسان و ایجاد دیوار ساحلی به‌خوبی استفاده نمود و باعث کاهش اثرات سیلاب و خسارت ناشی از آن گردید.

روش تحقیق

محدوده مورد مطالعه

شهر خرم‌آباد در حد فاصل 33° درجه و $20'$ تا 33° و $35'$ عرض شمالی و 48° و $10'$ تا 48° و $30'$ طول شرقی با مساحت $50/28$ کیلومتر مربع با آب و هوای مدیترانه‌ای سرد واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه آن در مجموع $445/3$ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه $17/2$ درجه سانتی‌گراد است. از لحاظ زمین‌شناسی منطقه در زون زاگرس مرتفع واقع شده و از آهک‌های متعلق به دوران سوم (پالئوسن) تشکیل شده است. رودخانه خرم‌آباد با جهتی شمالی جنوبی شهر را به دو قسمت نامساوی شرقی و غربی و رود کرگانه با جهتی شرقی-غربی، نیمه شرقی شهر را در امتداد جاده خرم‌آباد-بروجرد به دو قسمت نامساوی شمالی-جنوبی تقسیم نموده است (شکل ۱). شهر در درون دره‌ای شکل گرفته و قسمت شمالی منظره‌ای کوهستانی و ناهموار و جنوب آن چشم‌اندازی تقریباً جلگه‌ای دارد. بنابراین شهر خرم‌آباد به سه منطقه شمالی، مرکزی و جنوبی در طول مسیر خرم‌رود از شمال به جنوب تقسیم شده، که در این تحقیق به بررسی قسمتی از منطقه شمالی شامل محله‌های کیو، جهانگیر آباد، فاز یک مدیریت، پژوهنده، ناصر خسرو و شیرخوارگاه که در سیستم زهکشی شهری دارای یک خروجی مشترک می‌باشند، و به دلیل کوهستانی بودن سیلابی است با مساحتی حدود 266 هکتار به عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

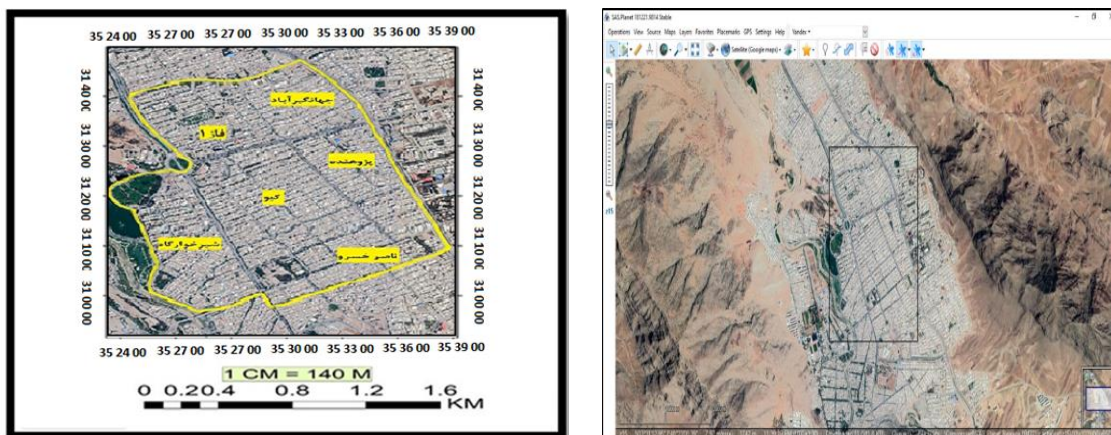


شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی شهر خرم آباد و محله‌های مورد مطالعه منطقه شمالی

داده‌های مورد نیاز در اجرای مدل SWMM:

در این مدل از داده‌های خصوصیات فیزیکی زیر حوضه‌های شهری خرم آباد، مورفولوژی و مشخصات شبکه زهکشی شهری، داده‌های هواشناسی ایستگاه خرم آباد و هیدرولوژیکی منطقه شهری که بیشتر شامل معابر شهری و کانال‌ها می‌باشد، به‌عنوان ورودی‌های مورد نیاز مدل به‌شرح زیر استفاده شده است:

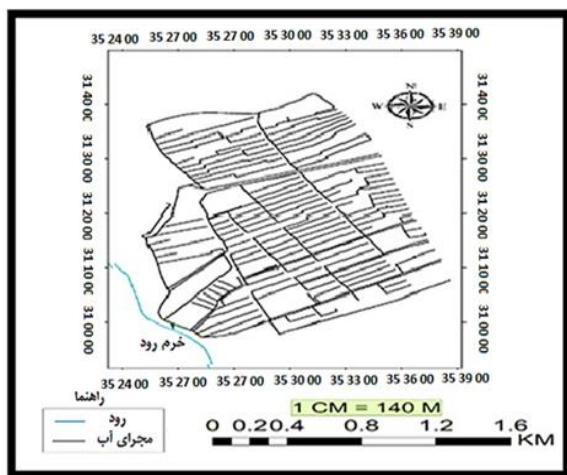
جهت تعیین مرز حوضه و واحدهای هیدرولوژیکی شهر خرم آباد و رسم زیر حوضه‌ها، کانال‌ها، منهول‌ها و ریزشگاه و خصوصیات توپوگرافی و فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی آن‌ها از تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث و نرم‌افزار SASPlanet استفاده شد. شهر خرم آباد با توجه به بافت شهری و قرار گرفتن آن در طول مسیر رودخانه خرم‌رود از شمال به جنوب به سه منطقه شمالی، مرکزی و جنوبی تقسیم می‌شود، که در این بررسی منطقه شمالی شهر خرم آباد شامل محله‌های کیو، جهانگیر آباد، فاز یک مدیریت، پژوهنده، ناصر خسرو و شیرخوارگاه به دلیل رخداد سیلاب در سال‌های اخیر و به‌جهت اینکه در سیستم زهکشی شهری دارای یک خروجی مشترک می‌باشند، به‌مساحتی حدود ۲۶۶ هکتار به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است (شکل ۲).



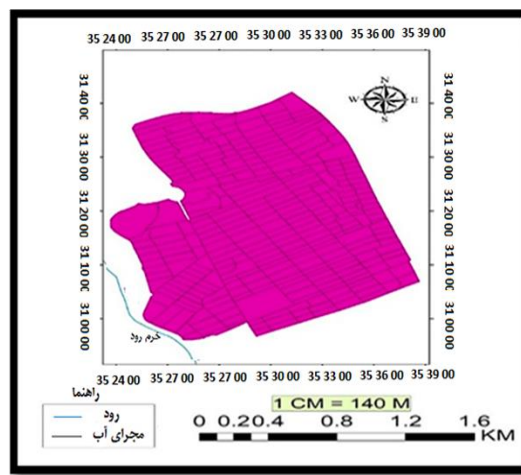
شکل ۲. تصویر استخراجی از منطقه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار SASPlanet

در این بررسی ابتدا مرز واحدهای هیدرولوژیکی شهری در منطقه شمالی شهر خرم‌آباد با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۴۰۰۰ موجود در سازمان شهرداری خرم‌آباد و با استفاده از تصویر ماهواره گوگل به صورت ژئورفرنس شده همراه با تصحیح هندسی استخراج شد. در این بررسی پارک‌های موجود در منطقه مطالعاتی، مرکز خرید کیو، بیمارستان عشایر و مجتمع مسکونی صدا و سیما هر کدام جداگانه به عنوان یک زیرحوضه در نظر گرفته شدند. توضیح اینکه زیرحوضه‌ها با توجه به شیب منطقه مطالعاتی و سیستم زهکشی و وضعیت توپوگرافی منطقه با دقت ترسیم شده است، بنابراین بر اساس توپوگرافی منطقه، ابتدا و انتهای هر کوچه و مرز مشترک خانه‌های دو کوچه مجاور، به عنوان ملاک اصلی برای تعیین مرز زیرحوضه‌ها و شبکه زهکشی مشخص و رسم شدند (شکل ۳).

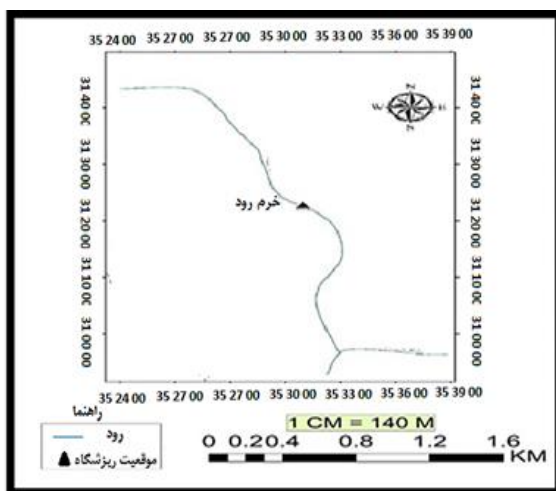
در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های شهرسازی موجود در سازمان راه و شهرسازی شهرستان خرم‌آباد به مقیاس ۱:۴۰۰۰ نقشه مسیر کانال‌ها، مسیل‌های معابر زهکشی تهیه شد. با استفاده از داده‌های موجود در شهرداری و ثبت شده در خصوص رخداد وقایع سیلاب شهر خرم‌آباد طی سال‌های گذشته و بررسی جهت حرکت رواناب در شهر خرم‌آباد، مسیرهای اصلی و فرعی کانال‌ها و جوی آب‌های هر زیرحوضه‌های شهری خرم‌آباد تعیین موقعیت و جهت بررسی انتخاب شد. در بخش شبیه‌سازی هیدرولیکی سه بخش مشخصات، موقعیت و جهت جریان کانال‌ها، منهول‌ها و ریزشگاه یا همان خروجی حوضه آبخیز شهری خرم‌آباد بررسی و وارد مدل شدند. کانال‌ها در واقع همان سیستم زهکشی منطقه مطالعاتی می‌باشند که هر کانال دو گره را به هم در مدل وصل می‌کند. مشخصات کانال‌ها و گره‌های مربوطه از طریق مشاهدات میدانی و با کمک تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث منطقه شهری خرم‌آباد و داده‌های موجود در شهرداری و راه و شهرسازی شهرستان خرم‌آباد جمع‌آوری، ثبت و وارد مدل و سپس برای تعیین مشخصات هندسی کانال استفاده شدند (اشکال ۴ و ۵). لازم به ذکر است که براساس بررسی‌های اولیه و مشاهدات میدانی از منطقه مطالعاتی شکل هندسی عمده کانال‌ها به شکل مستطیل رو باز و تعداد محدودی نیز لوله با سطح مقطع دایره‌ای در نظر گرفته شدند.



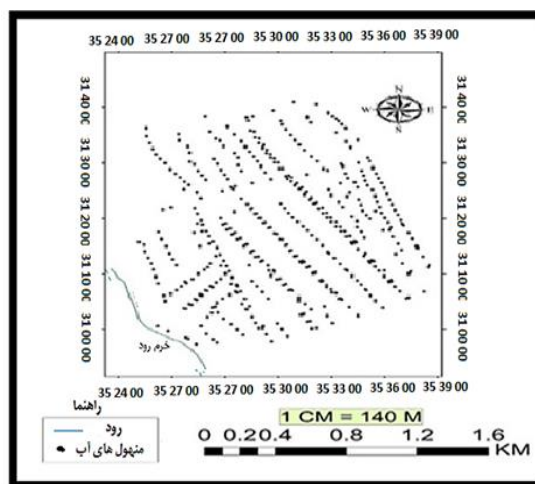
شکل ۴. نقشه کانال‌ها



شکل ۵. نقشه زیرحوضه‌ها

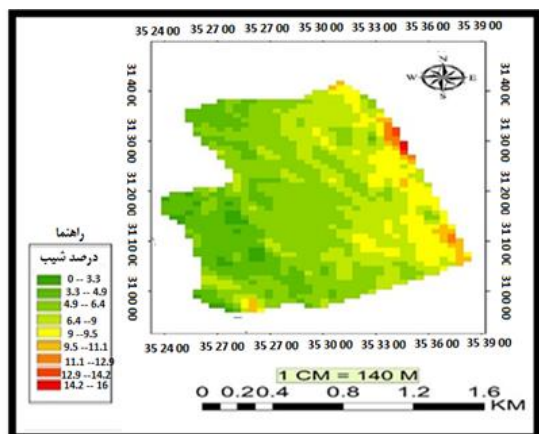


شکل ۶. نقشه ریزشگاه

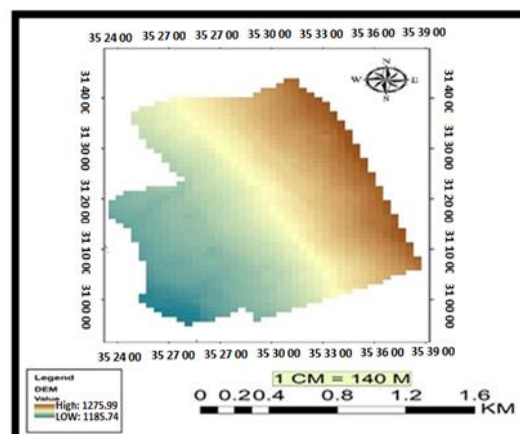


شکل ۵. نقشه منهول‌ها

برای تعیین مساحت، عرض معادل زیرحوضه‌ها و شیب از نرم‌افزار ArcGIS ۱۰٫۳ استفاده و درصد مناطق نفوذ ناپذیر و نفوذپذیر با استفاده از نقشه کاربری تهیه شد. مقادیر ضریب زبری در مناطق نفوذپذیر و نفوذ ناپذیر، ذخیره سطحی در مناطق نفوذپذیر و نفوذ ناپذیر، درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی با استفاده از داده‌های میدانی و نقشه‌های طرح جامه شهرداری توسعه شهری و کاربری خرم‌آباد تهیه گردید. در مرحله بعد اطلاعات مجاری سیستم زهکشی و محاسبه خصوصیات مجاری با بازدید میدانی و برداشت خصوصیات آن مانند مسیرها، ضریب زبری، شکل مقطع، عرض کف و سطح مقطع با مترکشی و اندازه‌گیری میدانی برداشت شد. همچنین اطلاعات مورد نیاز مربوط به اتصالات شامل محل اتصالات و ورود رواناب هر زیرحوضه به مجاری شبکه شهری و مشخصات رقوم کف، طول و عرض جغرافیایی و حداکثر عمق اتصالات با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS ۱۰٫۳ و با استفاده از مشاهدات میدانی و داده‌های موجود در شهرداری خرم‌آباد تهیه و تکمیل گردید. بعلاوه در این بررسی حداکثر عمق و طول هر کانال از طریق مشاهدات میدانی و نقشه‌های طراحی کانال‌ها در شهرداری خرم‌آباد و توسط ArcMap محاسبه و ضریب زبری کف کانال با استفاده از راهنمای مدل و جدول تعیین شد. از آنجایی که کانال‌های منطقه مطالعاتی از نوع بتنی هستند، لذا ضریب زبری ۰/۰۱۵ برای تمامی کانال‌ها وارد مدل شد. بعلاوه با توجه به هدف این بررسی که شبیه‌سازی رواناب بر اساس بارش و تعیین مهم‌ترین پارامترهای موثر در رخداد سیلاب می‌باشد، لذا جریان اولیه در کلیه مجاری صفر در نظر گرفته شد. همچنین در این بررسی ارتفاع معکوس کف منهول‌ها با توجه به عمق گره‌ها و با مشاهدات میدانی ثبت و از طریق نرم‌افزار ArcMap ۱۰٫۷ و با استفاده از ابزار IDW ابتدا نقاط ارتفاعی درون‌یابی و سپس لایه خطوط تراز ارتفاعی شهر خرم‌آباد ایجاد و شیپ فایل رستری تبدیل و نقشه DEM منطقه تهیه و در مرحله بعد نقشه در صد شیب ترسیم شد (اشکال ۷ و ۸).

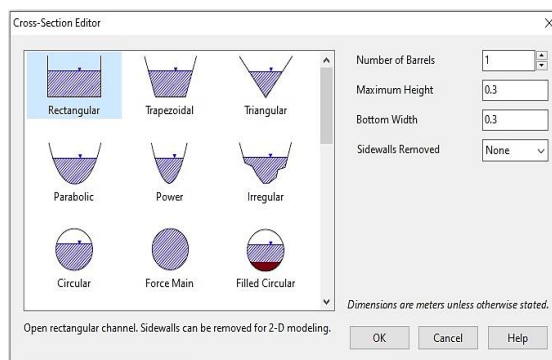


شکل ۸. نقشه درصد شیب منطقه مورد مطالعه



شکل ۹. نقشه DEM منطقه مورد مطالعه

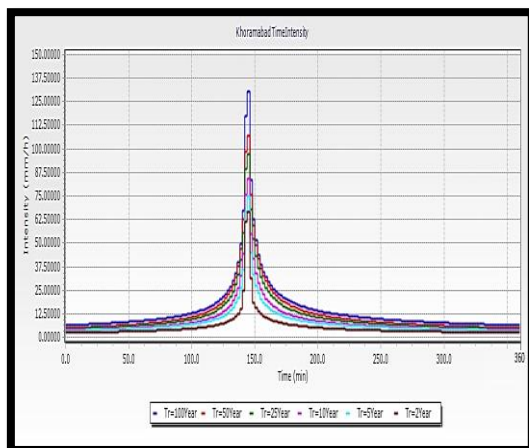
به کمک لایه DEM و اطلاعات موجود در سازمان شهرداری خرم‌آباد و با استفاده از نقشه‌های شهری اداره راه و شهرسازی موجود حداکثر عمق منهول‌ها نیز از طریق مشاهدات میدانی ثبت و با بررسی داده‌های حاصل از نقشه‌ها و مشاهدات میدانی وارد مدل و عمق آب اولیه در کلیه منهول‌ها صفر در نظر گرفته شد. ریزشگاه‌ها در واقع گرهِای پایانی سیستم زهکشی هستند که برای تعریف مرزهای پایین دست نهایی تحت مسیریابی جریان موج دینامیکی استفاده می‌شوند. با توجه به اینکه در این تحقیق جریان جانبی وجود نداشت، لذا ارتفاع معکوس کف ریزشگاه نیز با توجه به عمق ریزشگاه و بر اساس مشاهدات میدانی ثبت و با استفاده از نرم‌افزار ArcMap و به کمک لایه DEM استخراج و وارد مدل شد. جهت تعیین شرایط مرزی در گرهِ خروجی نوع شرایط مرزی بر اساس حداقل عمق جریان بحرانی و عمق جریان نرمال در مجرای ورودی به ریزشگاه تعیین و با انتخاب گزینه عمق جریان نرمال در مجرای ورودی به ریزشگاه شرایط مرزی ریزشگاه نیز تعیین شد. شرایط مرزی پایین دست نیز بر اساس الگویی که تراز آب را نسبت به ساعات مختلف شبانه روز مشخص شده، تعیین و وارد مدل شد (شکل ۹).



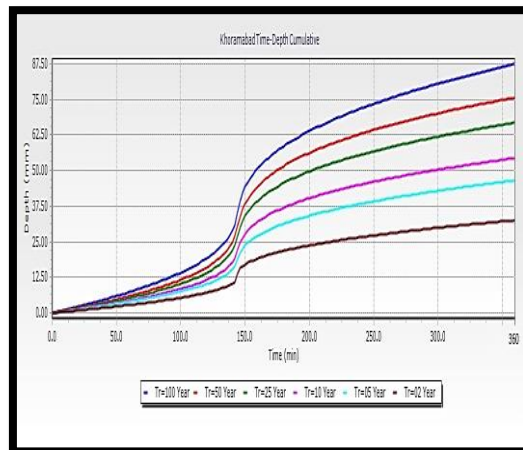
شکل ۱۰. پنجره تعیین مشخصات هندسی کانال

از آنجایی که برآورد رواناب در مدل SWMM و سایر مدل‌های جمع‌آوری رواناب شهری بر اساس مقادیر بارش، درصد مناطق نفوذناپذیر و نرخ ذخیره می‌باشد، لذا اطلاعات بارش از اساسی‌ترین و مهم‌ترین اطلاعات مورد استفاده مدل هستند. که در این بررسی جهت مدل‌سازی، از نمودارهای شدت مدت فراوانی تهیه شده در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک فرودگاه خرم‌آباد با دوره آماری ۴۸ ساله (۱۳۵۲-۱۴۰۰) استفاده شد. برای وارد کردن مقادیر بارش از بارش‌های ۶ ساعته تجمعی

و شدتی با فواصل زمانی ۲ دقیقه‌ای با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله نیز جهت دقیق‌سازی استفاده شد. در این مطالعه از شش واقعه بارش اتفاق افتاده نیز طی شش سال متناوب که بیشترین تکرار را در سری زمانی دوره داشتند، استفاده و رواناب متناظر با این رگبارها در کانال خروجی حوضه هر نیم‌ساعت یک بار اندازه‌گیری و ارتفاع رواناب و سرعت رواناب به‌صورت میدانی اندازه‌گیری شد (اشکال ۱۰ تا ۱۲).

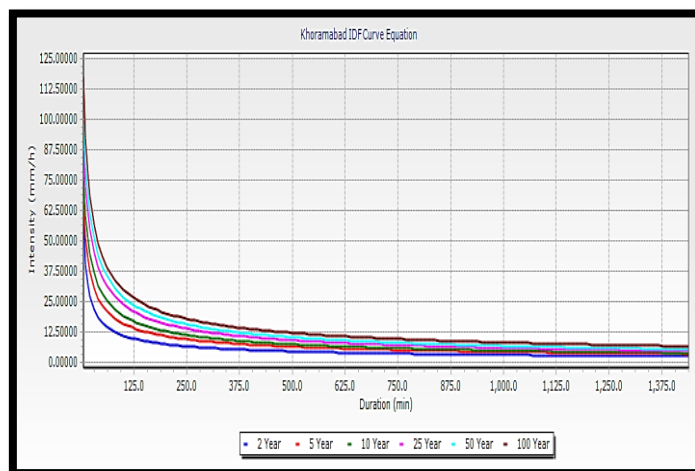


(ب)



(الف)

شکل ۱۰. الف: نمودار متناظر با ۶ واقعه بارش تجمعی با دوره‌های بازگشت ۲ و ۵ و ۱۰ و ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ ساله
شکل ۱۱. ب: نمودار متناظر با ۶ واقعه بارش شدتی با دوره‌های بازگشت ۲ و ۵ و ۱۰ و ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ ساله خرم‌آباد



شکل ۱۲. منحنی شدت-مدت-فراوانی خرم‌آباد

همچنین برای مشخص کردن بارندگی طرح ابتدا زمان تمرکز با روش کریچ تعیین و پس از محاسبه زمان تمرکز از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی مقدار بارش تجمعی استفاده و محاسبه شد و در مرحله نهایی با استفاده از روش بلوک متناوب هیدروگراف‌های رگبار در دوره بازگشت ۲۵ ساله در زمان تمرکز به‌عنوان ورودی به مدل تهیه و برای این منظور از داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک خرم‌آباد استفاده شد. لازم به ذکر است که داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی شامل مقادیر بارش تک واقعه یا پیوسته، تبخیر ماهانه، سرعت باد هستند که وارد مدل شدند. اما به دلیل فقدان آمار پارامترهای برف و تاثیر کم آن در سطح شهر صرف نظر شد و از انتخاب عدم وجود اطلاعات استفاده شد. در رابطه با تبخیر

نیز به دلیل اینکه زمان وقوع رگبارهای اندازه‌گیری شده در فصل پاییز و هوای تقریباً سرد بوده فقط آن تعداد داده‌های موجود وارد مدل شدند که در این دوره زمانی ثبت شده است. بعلاوه از شش واقعه بارش برای واسنجی استفاده و ازدو واقعه بارش برای ارزیابی مدل نیز استفاده شده که به دلیل فقدان ایستگاه اندازه‌گیری هیدرومتری جهت اندازه‌گیری دبی داخل شهر سرعت و ارتفاع رواناب متناظر با این رگبارها در برخی کانال‌ها با استفاده از خط‌کش مدرج کالیبره شده برداشت شد. بنابراین پس از وارد کردن اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار SWMM و لحاظ کردن تنظیمات ساختاری مربوطه و بررسی و اصلاح داده‌های پردازشی و ویرایش اجزای مدل، اقدام به اجرای شبیه‌سازی برای داده‌های بارشی در تمامی دوره‌های بازگشتی شد. پس از اجرای شبیه‌سازی، و موفقیت آمیز بودن اجرای شبیه‌سازی مقدار ناچیزی خطا مشاهده و به اثبات رسید. سپس در مجموع یک باران سنج با شش سری زمانی داده بارشی تجمعی و شش سری زمانی داده بارشی شدتی (که هر دو سری متناظر با هم بودند و یک نوع خروجی داشتند)، به‌همراه تعداد ۳۰۱ زیر حوضه، ۴۴۳ منهول و ۴۵۰ مجرا رسم و اطلاعات آن‌ها وارد مدل و بررسی شد. مهم‌ترین پارامترهای لازم هر زیرحوضه در مدل مساحت (هکتار)، عرض معادل (متر)، درصد شیب، درصد مناطق نفوذناپذیر، ضریب مانینگ مناطق نفوذناپذیر، درصد مناطق نفوذ پذیر، ضریب مانینگ مناطق نفوذپذیر و گره خروجی می‌باشد که اقدام به اندازه‌گیری و محاسبه و بررسی آن‌ها شد.

ارزیابی حساسیت مدل

پس بررسی پارامترهای موجود تعداد ۸ پارامتر شامل درصد اراضی نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، شیب زیر-حوضه و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی به‌عنوان مهم‌ترین عامل براساس مرور منابع در رخداد سیلاب انتخاب شد. سپس برای انجام آنالیز حساسیت از بارش طراحی در دوره بازگشت ۲۵ سال استفاده و هر کدام از هشت پارامتر مطرح شده در تمام زیر حوضه شهر خرم‌آباد به مقدار $\pm 15\%$ درصد از مقادیر اولیه کاهش و افزایش داده شد و با تغییر مقدار هر پارامتر مدل اجرا و تاثیر آن‌ها بر ارتفاع رواناب و دبی اوج سیلاب خروجی اندازه‌گیری گردید.

اعتبار و واسنجی مدل

جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM از شش واقعه بارش و از آن‌ها نیز برای ارزیابی مدل استفاده و در اعتبارسنجی مدل از هشت پارامتر مهم استفاده و پارامترهای اولیه و دامنه تغییرات آن‌ها ارزیابی شد. حساس‌ترین پارامتر با توجه به بررسی‌های اولیه مربوط به درصد اراضی نفوذناپذیر و کم‌حساس‌ترین پارامتر مربوط به ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر در نظر گرفته شد. برای فرایند واسنجی و اعتبارسنجی مدل رواناب متناظر با شش واقعه بارندگی استفاده و سرعت رواناب حاصل از بارندگی در خروجی هر زیر حوضه اندازه‌گیری و با رواناب شبیه‌سازی شده به وسیله مدل مقایسه و انطباق بین آب‌دهی و عمق رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در نهایت مورد بررسی قرار گرفت. به‌طوریکه بتوان با استفاده از این مدل پیش‌بینی خطر آب‌گرفتگی و اولویت‌بندی مناطق برای رفع مشکل آب‌گرفتگی را بررسی نمود، که در این بررسی خروجی‌های مدل نیز به صورت جدولی و گرافیکی بوده و اهم آن‌ها عبارتند از: رواناب تولیدی در زیرحوضه‌ها، جریان خروجی در گره‌ها و پیوندها، شدت بارندگی در زیر حوضه‌ها، ظرفیت پیوندهای مجاری.

شاخص‌های ارزیابی مدل

شاخص‌های کارایی مدل شامل NSE (نش-ساتکلیف)، RMSE (ریشه مربع خطا) و BIAS درصد (باپاس) مربوط به برآورد دبی اوج و حجم جریان بوده و همچنین معنی‌داری و عدم معنی‌داری میزان اختلاف بین مقادیر دبی و حجم جریان

مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط آزمون t جفتی بررسی و میزان اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مراحل واسنجی و ارزیابی مدل در سطح خطای (۰/۰۱ یا ۰/۰۵) بررسی شد. نتایج حاصل از واسنجی مدل بین دبی اوج و حجم جریان شبیه‌سازی از نظر انطباق با مقادیر مشاهداتی بررسی و از نتایج به دست آمده در فرآیند واسنجی برای برآورد مقدار بهینه پارامترها استفاده شد. فرمول محاسباتی این شاخص‌های کارایی به شکل زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{av})^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$BIAS\% = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: Q_{oi} : داده مشاهداتی (اندازه‌گیری شده)، و Q_{si} : داده شبیه‌سازی شده، و Q_{av} : میانگین داده مشاهداتی در گام زمانی i ام، و n : داده مد نظر (تعداد گام‌های زمانی) می‌باشد.

برای بررسی رابطه بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مدل از ضریب ناش ساتکلیف (NS) و مجذور میانگین مربعات خطا RMSE استفاده شد. ارزیابی مدل بر پایه بررسی کمی میزان خطای برآورد رواناب در یک واقعه مشاهداتی (غیر از وقایع مورد استفاده در مرحله واسنجی) با استفاده از مجذور میانگین مربعات خطا انجام شده که از رابطه کلینگ-گوپتا قابل محاسبه است.

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن cc : ضریب همبستگی خطی بین داده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، α : نسبت انحراف معیار داده شبیه‌سازی شده بر انحراف معیار داده مشاهداتی و β : نسبت میانگین داده شبیه‌سازی شده بر میانگین داده مشاهداتی می‌باشد. این معیار جدید ترین معیار ارزیابی برای مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی می‌باشد. این شاخص به مقایسه و بررسی مزیت‌های آن با معیار ناش-ساتکلیف می‌پردازد و به صورت (KGE) بکار گرفته می‌شود.

تعیین مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر سیلاب شهری خرم‌آباد

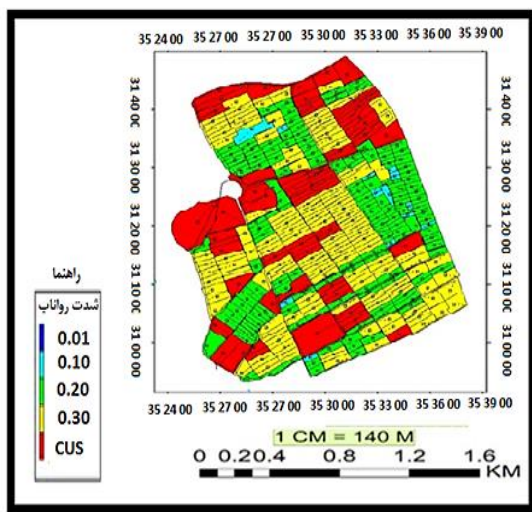
با توجه به هدف این تحقیق که تعیین پارامترهای مهم ورودی مدل SWMM و اطمینان از عملکرد مدل در شهر خرم‌آباد می‌باشد، لذا ابتدا از مقدار اولیه برآورد شده ۱۰ پارامتر درصد مناطق نفوذناپذیر، شیب، عرض معادل، ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، زمان تمرکز، شماره منحنی (CN)، ارتفاع ذخیره در مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی، به مقدار ۱۵ درصد افزایش و کاهش داده شد و ارتفاع رواناب حاصل از این تغییرات به عنوان متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفت. جهت آنالیز حساسیت مدل از بین پارامترهای موجود هشت پارامتر درصد اراضی نفوذپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذپذیر، عرض معادل، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر، شیب زیرحوزه و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی به عنوان موثرترین پارامترها انتخاب شدند. سپس از بین نتایج مختلف مدل SWMM ارتفاع رواناب به عنوان متغیر مستقل و موثرترین پارامتر برآورد انتخاب و برای انجام آنالیز حساسیت از بارش طراحی در دوره بازگشت ۲۵ سال استفاده شد. هر کدام از هشت پارامتر مطرح شده در تمام زیرحوزه آبخیز شهری خرم‌آباد به مقدار ± 15 درصد از مقادیر اولیه کاهش و افزایش داده شد و با تغییر مقدار هر پارامتر مدل اجرا و تاثیر آن‌ها بر ارتفاع رواناب و دبی اوج سیلاب خروجی اندازه‌گیری شد. جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWMM از شش واقعه بارش استفاده و از آن‌ها نیز برای ارزیابی مدل استفاده و در اعتبارسنجی مدل از هشت پارامتر مهم استفاده و پارامترهای اولیه و دامنه تغییرات آن‌ها ارزیابی شد. با توجه به بررسی اولیه داده‌ها پارامتر درصد اراضی نفوذناپذیر به عنوان حساس‌ترین و پارامتر ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر به کمترین حساسیت در نظر گرفته شد. در مرحله بعد جهت

واسنجی و اعتبارسنجی مدل، رواناب متناظر با شش واقعه بارندگی در خروجی حوضه اندازه‌گیری و با رواناب شبیه‌سازی شده به وسیله مدل مقایسه و انطباق بین آب‌دهی و عمق رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مورد بررسی قرار گرفت، نتایج مدل در قالب جداول، نقشه رواناب تولیدی و هیدروگراف زیرحوضه‌ها، بعلاوه جریان خروجی در گره‌ها و پیوندها و سیلاب رانه تا بتوان از آن‌ها در پیش‌بینی خطر آب‌گرفتگی و اولویت‌بندی مناطق بحرانی شهر خرم‌آباد برای رفع مشکل آب‌گرفتگی استفاده نمود.

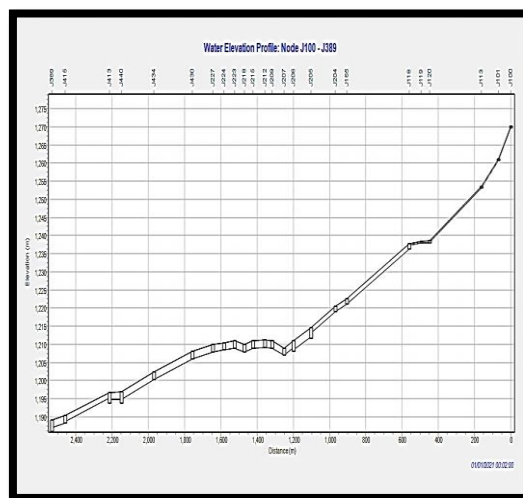
یافته‌ها

در این بررسی در مجموع یک باران سنج با شش سری زمانی داده بارشی تجمعی و شش سری زمانی داده بارشی شدتی (که هر دو سری متناظر با هم بودند و یک نوع خروجی داشتند)، با تعداد ۳۰۱ زیر حوضه، ۴۴۳ منهول و ۴۵۰ مجرا همراه با اطلاعات آن‌ها وارد مدل و بررسی شدند. از ویژگی‌های بارز و لازم زیرحوضه‌ها در مدل، می‌توان به مساحت (هکتار)، عرض معادل (متر)، درصد شیب، درصد مناطق نفوذناپذیر، ضریب مانینگ مناطق نفوذناپذیر، درصد مناطق نفوذپذیر، ضریب مانینگ مناطق نفوذ پذیر و گره خروجی هر زیرحوضه اشاره نمود که به عنوان مهم‌ترین پارامترهای موثر بر سیلاب شهری اندازه‌گیری، محاسبه و بررسی شد.

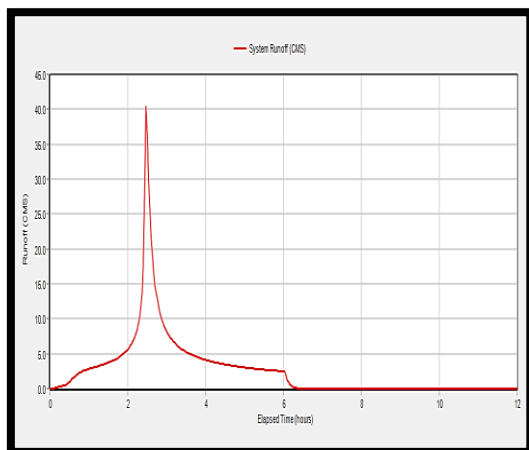
هم‌چنین از منهول‌ها نیز به عنوان خروجی زیرحوضه‌ها و رابط کانال‌ها در ترسیم شبکه زهکشی در مدل SWMM استفاده شد است. هم‌چنین برای افزایش دقت شبیه‌سازی علاوه بر کانال‌های اصلی، برای زیرحوضه‌ها، کانال مجزا که در واقع همان جوی‌های آب می‌باشند نیز رسم شد. بررسی شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه نشان داد که به جز معدودی از منهول‌های مهندسی‌ساز، اکثر منهول‌های ترسیمی در واقع محل اتصال کانال‌ها می‌باشند که به علت نیاز مدل به منهول برای اتصال دو کانال، محل اتصال جوی آب‌های کوچک‌ها در زیرحوضه‌ها نیز به عنوان منهول در نظر گرفته شدند. برای بالا بردن صحت و دقت شبیه‌سازی، تعدادی از کانال‌ها تصادفی انتخاب و مشخصات آن‌ها به صورت میدانی بررسی، ثبت و اندازه‌گیری و در نهایت مشخصات کلی کانال‌ها با توجه به آمار و اطلاعات موجود و شناختی که از منطقه مورد مطالعه وجود داشت در مدل وارد شدند. مشخصات مورد نیاز هر کانال شامل گره ورودی و خروجی، طول (متر)، عمق کانال (متر)، ضریب زبری کف کانال و شکل هندسی سطح مقطع کانال می‌باشد. که در این بررسی تعداد ۴۵۰ کانال رسم شده است. جهت رسم پروفیل طولی بین دو گره، شناسایی گره‌های اتصالی بینابین و مسیریابی جریان بین دو گره انجام و با تعیین اختلاف ارتفاع بین دو گره، پروفیل‌های طولی ترسیم شدند که به عنوان نمونه پروفیل طولی بین دو گره شماره ۱۰۰ و ۳۸۹ در شکل ۱۳ ارائه شده که نشان از اختلاف ارتفاع ۸۰ متری بین این دو گره است. سپس نقشه مقدار رواناب تولیدی در زیرحوضه‌های شبیه‌سازی شده تهیه شد. در شکل ۱۴ نقشه خروجی رواناب تولیدی حاصل از واقعه بارش با دوره بازگشت دو ساله در زمان پیک بارش یعنی دو ساعت و سی دقیقه پس از شروع بارش در زیرحوضه‌های مطالعاتی ارائه داده شده است. در مرحله بعد نمودار رواناب تولیدی حاصل از واقعه‌های بارش شش ساعته با دوره بازگشت‌های دو، پنج، ده، بیست و پنج و صد ساله در منطقه ترسیم که در اشکال ۱۵ الی ۲۰ آورده شده است. لازم به ذکر است واقعه‌های بارش از نوع شدتی می‌باشند.



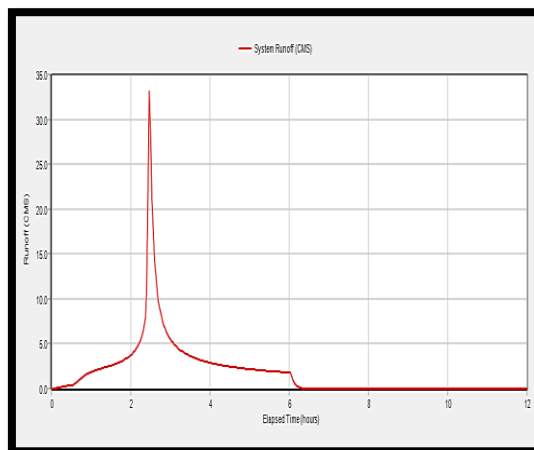
شکل ۱۴. نقشه رواناب تولیدی در زیرحوضه‌ها



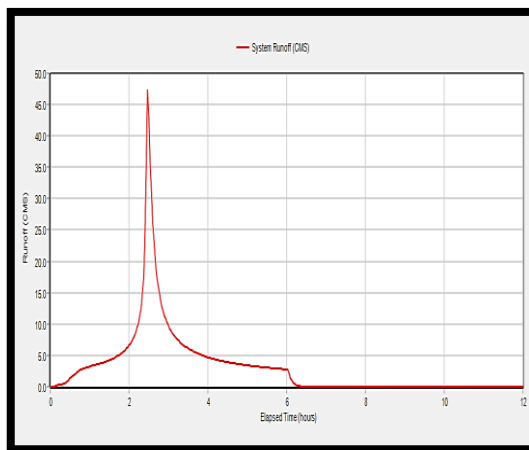
شکل ۱۳. پروفیل طولی بین دو گره ۱۰۰ و ۳۸۹



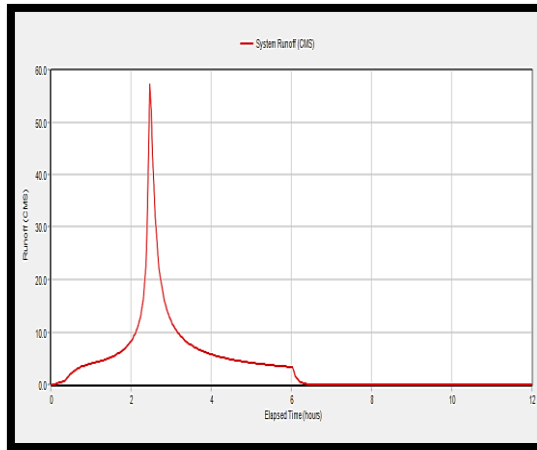
شکل ۱۶. رواناب بارش با دوره بازگشت پنج سال



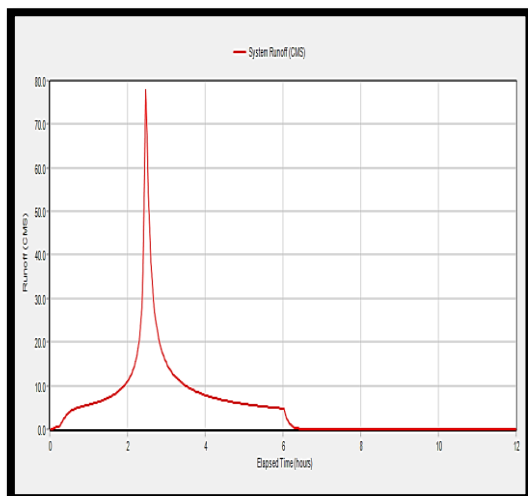
شکل ۱۵. رواناب بارش با دوره بازگشت دو سال



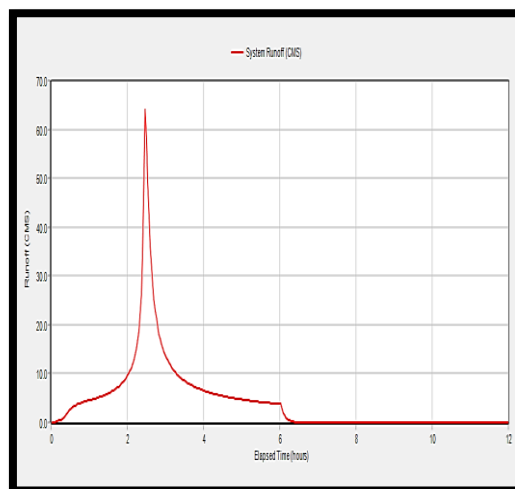
شکل ۱۸. رواناب بارش با دوره بازگشت بیست و پنج سال



شکل ۱۷. رواناب بارش با دوره بازگشت ده سال



شکل ۲۰. رواناب بارش با دوره بازگشت صد سال

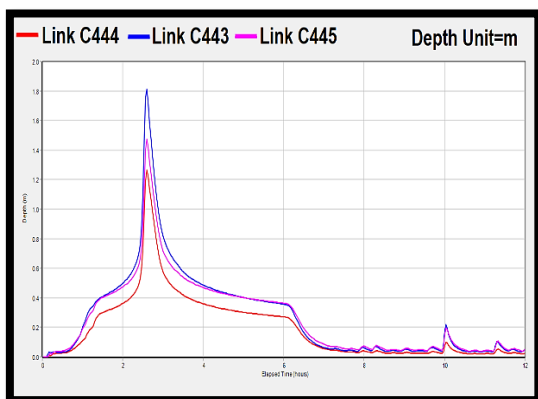


شکل ۱۹. رواناب بارش با دوره بازگشت پنجاه سال

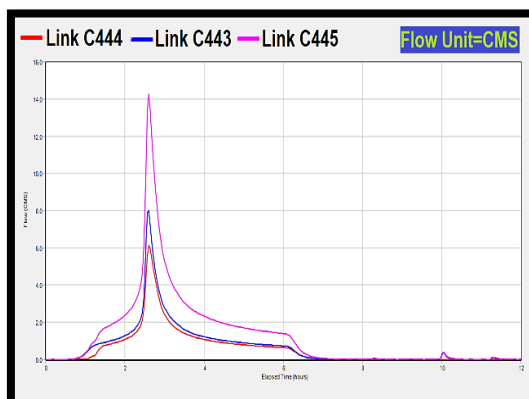
در این بررسی جهت درک بهتر عملکرد کانال‌های زهکشی حوضه مورد مطالعه، هیدروگراف سه کانال C444, C443 و C445 که کانال‌های خروجی منطقه مطالعاتی هستند، برای بارش‌های با دوره بازگشت دو و ده ساله تهیه شد. لازم به ذکر است دو کانال C443 (کانال جمع‌آوری رواناب زیرحوضه‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه) و C444 (کانال جمع‌آوری رواناب زیر حوضه‌های شمالی منطقه مورد مطالعه) در گره J389 متصل به هم می‌باشند که جریان آب درونی آن‌ها وارد کانال C445 که کانال خروجی کل منطقه مطالعاتی است، می‌شود. در ادامه، هیدروگراف‌های گره‌های J388, J415 و J389 که گره‌های خروجی منطقه مطالعاتی هستند، برای بارش‌های با دوره بازگشت دو و ده ساله تهیه شد. لازم به ذکر است دو گره J388 (گره جمع‌آوری رواناب زیرحوضه‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه) و J415 (گره جمع‌آوری رواناب زیر حوضه‌های شمالی منطقه مورد مطالعه) از طریق کانال‌های رابط در گره J389 به هم متصل شده و جریان آب درونی آن‌ها وارد کانال C445 که کانال خروجی کل منطقه مطالعاتی است، می‌شود (شکل ۲۱). سپس در ادامه، هیدروگراف دبی عبوری برای بارش با دوره بازگشت مختلف محاسبه و ترسیم شدند (اشکال ۲۲ تا ۳۱).



شکل ۲۱. محل کانال‌ها و گره‌های مورد بررسی برای بارش‌های با دوره بازگشت دو و ده ساله

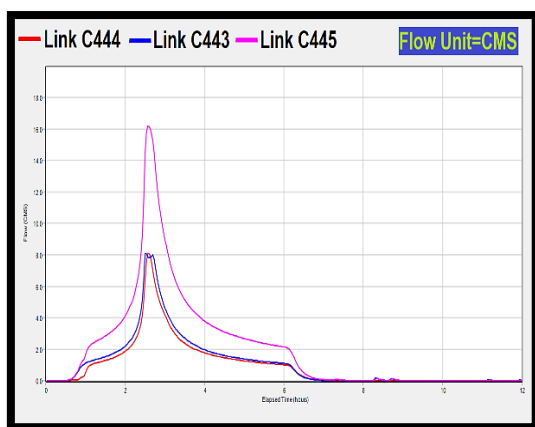


(ب)

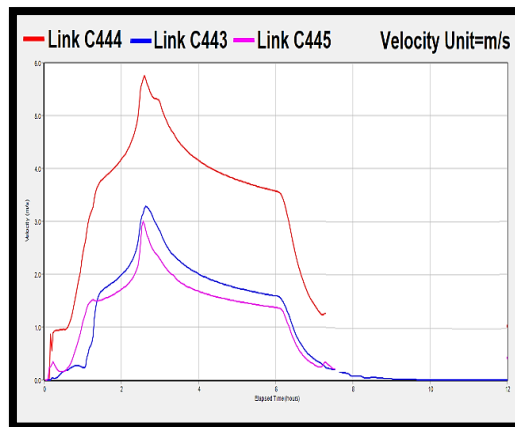


(الف)

شکل ۲۲. الف، هیدروگراف دبی عبوری برای بارش با دوره بازگشت دو سال
شکل ۲۳. ب، هیدروگراف ارتفاع جریان درون کانال‌ها برای بارش با دوره بازگشت دو سال

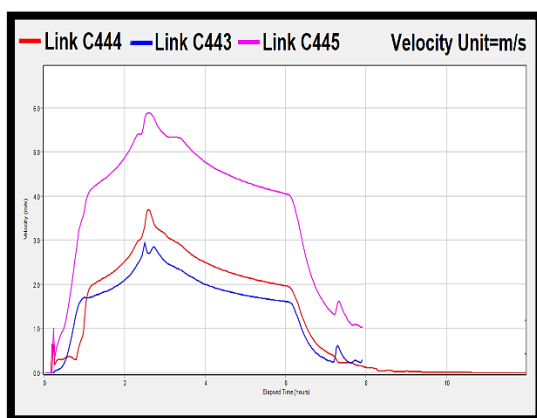


(ب)

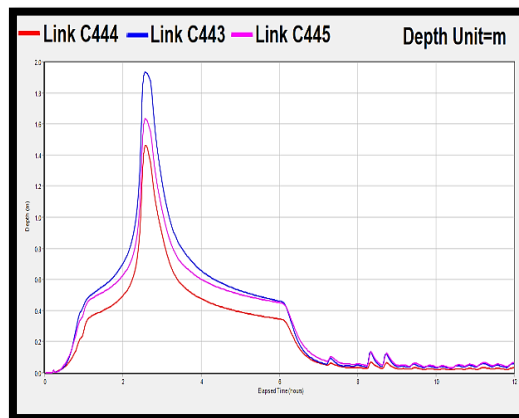


(الف)

شکل ۲۴. الف، هیدروگراف سرعت جریان عبوری برای بارش با دوره بازگشت دو سال
شکل ۲۵. ب، هیدروگراف دبی عبوری برای بارش با دوره بازگشت ده سال

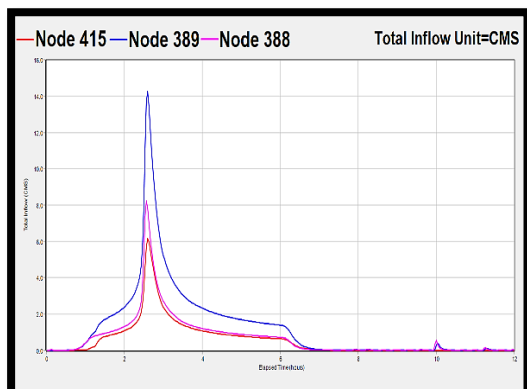


(ب)

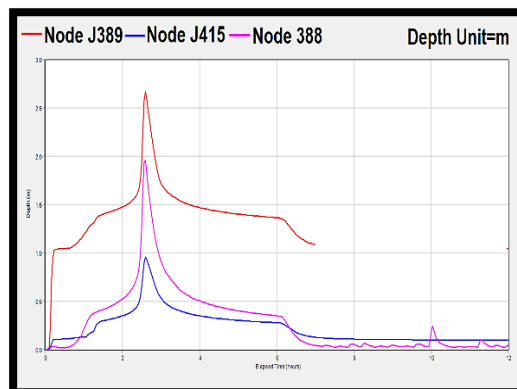


(الف)

شکل ۲۶. الف، هیدروگراف ارتفاع جریان درون کانال‌ها برای بارش با دوره بازگشت ده سال
شکل ۲۷. ب، هیدروگراف سرعت جریان عبوری برای بارش با دوره بازگشت ده سال

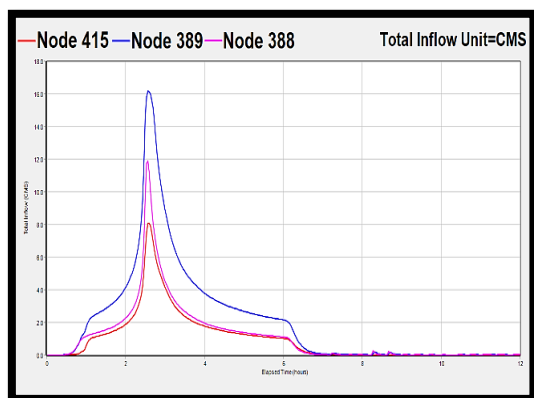


(ب)

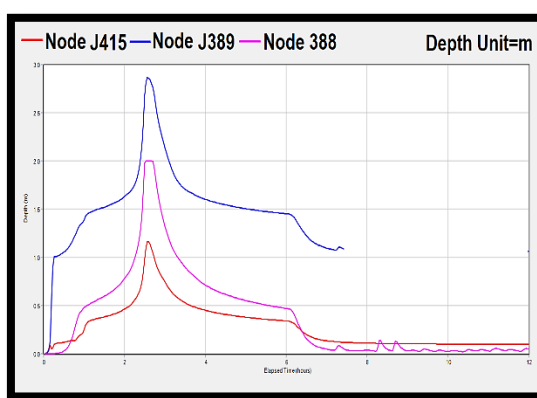


(الف)

شکل ۲۸. الف، هیدروگراف عمق جریان در گره‌ها برای بارش با دوره بازگشت دو سال
شکل ۲۹. ب، هیدروگراف جریان ورودی در گره‌ها برای بارش با دوره بازگشت دو سال



(ب)



(الف)

شکل ۳۰. الف، هیدروگراف عمق جریان در گره‌ها برای بارش با دوره بازگشت ده سال
شکل ۳۱. ب، هیدروگراف جریان ورودی در گره‌ها برای بارش با دوره بازگشت ده سال

جهت بررسی دقیق‌تر و آنالیز کامل رفتار حوضه نسبت به وقایع بارشی، با توجه به اطلاعات هر کدام از زیرحوضه‌ها شامل گره‌ها و کانال‌ها پس از شبیه‌سازی و اجرای مدل، برای وقایع بارش با دوره بازگشت‌های دو، پنج، ده، بیست و پنج، پنجاه و صد سال، رواناب منطقه مورد مطالعه محاسبه شد که با استفاده از نتایج آن، مقادیر کمی عمق بارش و رواناب متناظر، مقادیر کمی حجم بارش و رواناب متناظر و ضریب رواناب برای دوره بازگشت‌های مختلف استخراج شده است (جدول ۱۱ الی ۳). بررسی پروفیل‌های سطح آب با دوره بازگشت‌های مختلف جهت ارزیابی سیستم انتقال رواناب شهری نشان داد که کدام کانال‌ها و مجراها در اثر وقوع سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف تحت تاثیر قرار می‌گیرند و موجب آبگرفتگی شهری می‌شوند و کدام یک باید برای اجرای کنترل سیلاب شهری در الویت قرار گیرند. نتایج مدل و تراز سطح آب در پروفیل طولی مقاطع کانال‌ها نشان داد که سیستم جمع‌آوری رواناب شهری در شهر خرم‌آباد در دوره بازگشت دو و پنج سال مشکل آب گرفتگی کم‌تری دارد و در شرایط بحرانی و آبگرفتگی در دوره بازگشت‌های ۱۰ و به بالا در منطقه دچار آبگرفتگی در اکثر قسمت‌ها می‌شود و مجاری کارای خود را از دست داده و موجب بروز سیلاب می‌شوند. این موضوع به جهت افزایش انباشت رسوبات در مسیر کانال‌ها بر اساس مشاهدات میدانی به ویژه در فصل کم آبی در مسیرها که از

مناطق بالادست وارد کانال‌ها و معابر شهری شده‌اند، مزید بر علت شده و باعث افزایش احتمال تخریب کانال‌ها و مسیرها می‌شود و خطر طغیان سیلاب را افزایش داده است.

جدول ۱. مقادیر کمی عمق بارش و رواناب متناظر

دوره بازگشت بارش	مجموع بارش mm	تبخیر mm	نفوذ mm	رواناب سطحی mm
دو سال	۳۲,۵۹۰	۱,۶۱۵	۱,۵۲۰	۲۹,۴۸۷
پنج سال	۴۶,۵۹۳	۱,۶۹۷	۱,۹۴۹	۴۲,۹۷۳
ده سال	۵۴,۴۲۸	۱,۷۲۷	۲,۱۵۱	۵۰,۵۷۹
بیست و پنج سال	۶۶,۸۴۳	۱,۷۷۱	۲,۴۳۵	۶۲,۶۶۹
پنجاه سال	۷۵,۷۰۴	۱,۸۰۰	۲,۶۱۵	۷۱,۳۲۴
صد سال	۸۷,۵۰۱	۱,۸۴۲	۲,۸۴۱	۸۲,۸۶۷

جدول ۲. مقادیر کمی حجم بارش و رواناب متناظر

دوره بازگشت بارش	مجموع بارش m^3	تبخیر m^3	نفوذ m^3	رواناب سطحی m^3
دو سال	۸۶۶۹۰	۴۳۰۰	۴۰۴۰	۷۸۴۴۰
پنج سال	۱۲۳۹۴۰	۴۵۱۰	۵۱۸۰	۱۱۴۳۱۰
ده سال	۱۴۴۷۸۰	۴۵۹۰	۵۷۲۰	۱۳۳۵۴۰
بیست و پنج سال	۱۷۷۸۱۰	۴۷۱۰	۶۴۸۰	۱۶۶۷۱۰
پنجاه سال	۲۰۱۳۸۰	۴۷۹۰	۶۹۶۰	۱۸۹۷۳۰
صد سال	۲۳۳۷۶۰	۴۹۰۰	۷۵۶۰	۲۲۰۴۴۰

جدول ۳. ضریب رواناب

دوره بازگشت	دو سال	پنج سال	ده سال	۲۵ سال	۵۰ سال	۱۰۰ سال
ضریب رواناب	۰/۹۰۴	۰/۹۲۲	۰/۹۲۹	۰/۹۳۷	۰/۹۴۲	۰/۹۴۷

آنالیز حساسیت مدل SWMM

به منظور آنالیز حساسیت مدل هشت پارامتر عرض معادل، درصد شیب، درصد مناطق نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، عمق ذخیره چالابی برای مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره چالابی برای زیرحوضه‌ها به مقادیر +۱۵ و -۱۵ درصد افزایش و کاهش داده شدند. سپس ضریب رواناب برای هر کدام از این حالت‌ها محاسبه و در مرحله بعد برای ضرایب رواناب محاسبه شده به نسبت حالت‌های +۱۵ و -۱۵ درصدی و حالت بدون تغییر پارامترها نمودار مربوطه ترسیم شدند (شکل ۳۲، جداول ۴ و ۵). در مرحله بعد برای واقعه بارش با دوره بازگشت ۲۵ سال، به نسبت هر کدام از این تغییرات به صورت جداگانه مدل، جمعاً ۱۶ بار اجرا و رواناب متناظر شبیه‌سازی اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان پارامترهای درصد اراضی نفوذناپذیر، عرض معادل و شیب زیرحوضه میزان دبی اوج افزایش می‌یابد و این پارامترها با دبی اوج رابطه مستقیم دارند. در صورتی که پارامترهای ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره چالابی مناطق نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره چالابی مناطق نفوذپذیر و ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر با دبی اوج رابطه معکوس و با کاهش آن‌ها، دبی اوج افزایش می‌یابد. بنابراین درصد مناطق نفوذناپذیری بیشترین تاثیر را بر دبی اوج خروجی مدل داشته و به عنوان حساس‌ترین متغیر شناخته شد. به عبارت دیگر تغییرات اندک در درصد مناطق نفوذناپذیر باعث افزایش دبی اوج سیلاب می‌شود. هم‌چنین ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر و عرض معادل و شیب به ترتیب بعد از درصد مناطق نفوذناپذیر بیشترین تاثیر را در تغییرات دبی اوج داشته و بیانگر این است که ترتیب حساسیت پارامترها متفاوت بوده و شیب جز پارامترهای کم‌حساس محسوب می‌شود. این تفاوت بر اساس

مشاهدات میدانی از شهر خرم‌آباد و بررسی نقشه شیب و کاربری اراضی گاه‌ها به دلیل شیب کم برخی زیرحوضه‌ها در مناطق نفوذپذیر، پوشش ناهمگن سطوح در برخی مناطق و پوشش کم سبز شهری می‌باشد. بنابراین برای کاهش دبی اوج باید مقدار درصد مناطق نفوذناپذیر، شیب، عرض معادل و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی کاهش و به مقدار ضریب زبری در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر افزوده شود. این موضوع بیانگر این است که به دلیل اینکه درصد مناطق نفوذناپذیر رابطه مستقیم و ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر رابطه عکس با دبی اوج دارند می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که تصرف حاشیه رودخانه خرم رود خرم آباد در سال‌های اخیر به جهت گسترش شهرنشینی و افزایش درصد مناطق نفوذناپذیر تاثیر قابل ملاحظه و درصد مناطق نفوذپذیر و عوامل مربوط به آن مانند ضریب زبری و ارتفاع ذخیره دارای تاثیر کمتری روی دبی اوج سیلاب داشته‌اند.

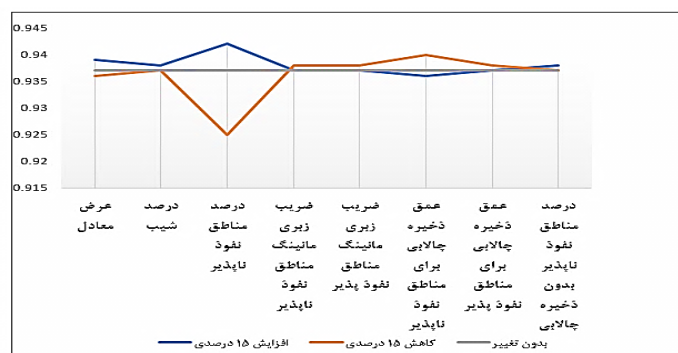
جدول ۴. عمق رواناب تولیدی حاصل از تغییر پارامترها

درصد تغییر	عمق رواناب تولیدی حاصل از تغییر پارامترها							
	عرض معادل	درصد شیب	درصد مناطق نفوذناپذیر	ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر	ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذپذیر	عمق ذخیره چالایی برای مناطق نفوذناپذیر	عمق ذخیره چالایی برای مناطق نفوذپذیر	درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره چالایی
+۱۵ درصد	۶۲,۷۳۷	۶۲,۷۰۳	۶۲,۹۷۸	۶۲,۶۱۵	۶۲,۶۴۹	۶۲,۵۳۲	۶۲,۶۴۳	۶۲,۷۱۴
-۱۵ درصد	۶۲,۵۸۲	۶۲,۶۳۷	۶۱,۸۰۸	۶۲,۷۲۶	۶۲,۶۹۰	۶۲,۸۰۵	۶۲,۶۹۵	۶۲,۶۲۳

جدول ۵. ضریب رواناب تولیدی حاصل از تغییر پارامترها

درصد تغییر	ضریب رواناب تولیدی حاصل از تغییر پارامترها							
	عرض معادل	درصد شیب	درصد مناطق نفوذناپذیر	ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر	ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذپذیر	عمق ذخیره چالایی برای مناطق نفوذناپذیر	عمق ذخیره چالایی برای مناطق نفوذپذیر	درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره چالایی
+۱۵ درصد	۰/۹۳۹	۰/۹۳۸	۰/۹۴۲	۰/۹۳۷	۰/۹۳۷	۰/۹۳۶	۰/۹۳۷	۰/۹۳۸
-۱۵ درصد	۰/۹۳۶	۰/۹۳۷	۰/۹۲۵	۰/۹۳۸	۰/۹۳۸	۰/۹۴	۰/۹۳۸	۰/۹۳۷

بررسی نمودار شکل ۳۲ نشان می‌دهد که منطقه مطالعاتی، نسبت به دو فاکتور درصد مناطق نفوذناپذیر و عمق ذخیره چالایی برای مناطق نفوذناپذیر حساسیت بیشتری دارد و با تغییر این دو عامل رواناب متناظر تغییرات بالقوه‌ای دارد و بیانگر این است که چون جریان سطحی به صورت حرکت به سمت پایین دست شیب و جریان رواناب به صورت عرض معادل هر زیرحوضه به عنوان عرض فیزیکی جریان سطحی در نظر گرفته شود، لذا با افزایش مناطق نفوذپذیر دبی به اندازه قابل توجهی کاهش می‌یابد. که این موضوع به دلیل ماهیت فیزیکی حوضه شهری خرم‌آباد بوده و نشان می‌دهد که بسیاری از پارامترهای کنترلی سیلاب و موثر در افزایش رواناب تحت تاثیر خصوصیات فیزیکی حوضه مانند شیب و وضعیت استقرار کانال‌ها و معابر بر اساس توپوگرافی و شیب حوضه شهری هستند.



شکل ۳۲. نمودار تناسب بین ضرایب رواناب

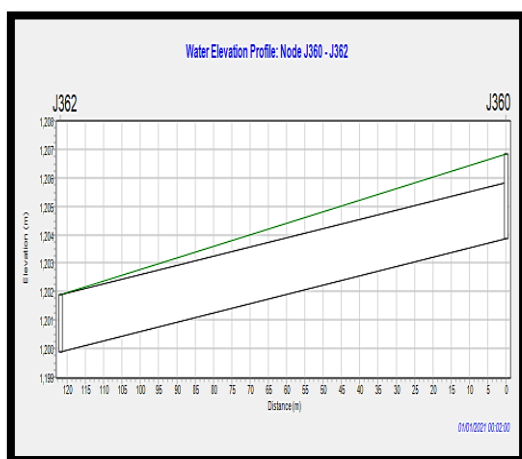
واسنجی و ارزیابی مدل SWMM

به منظور واسنجی مدل SWMM از رابطه نش-ساتکلیف و کلینگ-گوپتا بین دو سری داده آماری عمق رواناب شبیه‌سازی شده در مدل و عمق رواناب اندازه‌گیری شده بر اساس روش شماره منحنی برای محدوده مطالعاتی در دوره بازگشت‌های دو سال، پنج سال، ده سال، بیست و پنج سال، پنجاه سال و صد سال استفاده و در نهایت مقدار رابطه نش-ساتکلیف برای سری داده‌های مورد بررسی، عدد ۰/۹۹۴ محاسبه شد. از آنجاکه هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد مطلوب‌تر است در نتیجه انطباق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برقرار است و نشان‌دهنده نتایج قابل قبول مدل است (جدول ۶). با توجه به مقدار بدست آمده نش-ساتکلیف در مجموع می‌توان گفت که مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری را دارد و می‌توان از این مدل برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. بعلاوه با توجه به مقدار ۰/۹۱۳ رابطه کلینگ-گوپتا برای سری داده‌های مورد بررسی و نزدیکی این مقدار به عدد یک نتایج نشان‌دهنده انطباق خوب بین نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری و قابل قبول مدل است و می‌توان گفت که مدل SWMM دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری را دارد و می‌توان از این مدل برای طرح‌های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که شبیه‌سازی آبدی، عمق و سرعت رواناب در دو واقعه انطباق خوبی دارد و مقدار NS کارایی و دقت مدل را تایید می‌نماید. به‌طور کلی نتایج برآورد حجم رواناب نشان داد که رواناب مشاهداتی به مقدار کم قدری بیشتر از حجم رواناب شبیه‌سازی شده است و مقدار دبی اوج نیز این موضوع را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که حوضه شهری خرم‌آباد با وقایع بارشی مورد بررسی با خطر سیلاب روبرو می‌شود. با توجه به اینکه بررسی دقت مدل‌های مختلف در رخداد بارش‌هایی با شدت‌های مختلف همواره مورد تایید می‌باشد اما به دلیل عدم وجود ایستگاه‌های اندازه‌گیری در حوضه شهری خرم‌آباد اندازه‌گیری دبی برای وقایع مختلف با شدت‌های مختلف همواره متفاوت بوده، از این‌رو نتایج حاصله با توجه به موضوعات مطروحه مورد تایید است. با این حال می‌توان از نتایج بدست آمده در فرایند واسنجی برای برآورد مقدار بهینه پارامترها استفاده و در مناطق همگن دیگر با لحاظ نمودن اکثر مشابهاست استفاده نمود. چرا که مدل SWMM در برآورد رواناب و فراهم کردن خروجی در هر بخش انعطاف‌پذیری قابل قبولی برای شبیه‌سازی رواناب شهری نشان داده و می‌توان از داده‌های شبیه‌سازی جریان، به عنوان ورودی در سایر مدل‌ها استفاده نمود.

جدول ۶. داده‌های بارشی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده

دوره بازگشت بارش	دو سال	سال ۵	سال ۱۰	سال ۲۵	سال ۵۰	سال ۱۰۰
ارتفاع رواناب شبیه سازی شده مدل	۲۹/۴۸۷	۴۲/۹۷۳	۵۰/۵۷۹	۶۲/۶۶۹	۷۱/۳۲۴	۸۲/۸۶۷
ارتفاع رواناب اندازه گیری شده SCS	۲۴/۷۵۰۶۵	۳۸/۳۳۳۲۶	۴۲/۰۱۷۶۵	۵۸/۲۶۰۰۹	۶۷/۰۲۹۸۸	۷۸/۷۳۲۲

طبق نتایج حاصل از مدل، برخی کانال‌ها و گره‌هایی در شبکه به درستی رفتار نمی‌کنند و موجب ایجاد بی‌نظمی و بحرانی شدن جریان عبوری می‌شوند، که در مدل به خوبی شناسایی شده‌اند. در این تحقیق بارش با دوره بازگشت ۵۰ سال، برای بررسی کانال‌ها و گره‌های مخاطره آمیز انتخاب و بعد از شبیه‌سازی جریان در سیستم زهکشی مشخص شد گره‌های J218، J282، J207، J220 و J359 و کانال‌های C450، C442، C366، C366، C342، C367، C368 و C352 دارای آبگرفتگی قابل ملاحظه‌ای بوده و رفتار مخاطره آمیز داشتند. از آنجایی که این گره‌ها و کانال‌ها در موقعیت‌های حساس و پر رفت و آمد و متراکم شهری به‌ویژه در قسمت‌های میانی و جنوبی قرار دارند و جزء کانال‌ها و گره‌های اصلی در جریان سیستم زهکشی شهر خرم‌آباد محسوب می‌شوند، لذا می‌بایست اجزای هیدرولیکی سیستم زهکشی آنها که دارای مشکل هستند، بدون تغییر در ساختار شبکه موجود و یا احداث اجزای هیدرولیکی جدید، مورد بررسی قرار گرفته و با ارائه الگوی مطلوب و مناسبی جهت رفع نواقص هیدرولیکی از جمله عدم کفایت هیدرولیکی و طرح‌های بهسازی اصلاح شوند. لازم به ذکر است که بازسازی اجزای هیدرولیکی برای این طرح هزینه بر است، لذا می‌بایست به کمک حداکثر شیب طبیعی زمین و مقاطع هم‌سان جهت اصلاح ابعاد کانال‌های موجود و همین‌طور گره‌ها، از طریق آزمون و خطا و رابطه مانینگ، بهترین مقطع و راهکار رفع نواقص هیدرولیکی رفع نواقص سیستم زهکشی را پیشنهاد نمود. به‌طور مثال گره J360 واقع در چهار راه طیب شهر خرم‌آباد، ورودی کانال C367 عموماً در بارش‌های رگباری و مداوم سر ریز می‌کند. ساختار حال حاضر این کانال و گره در شکل‌های ۳۳ و ۳۴ ارائه شده که بعد از بهسازی سیستم زهکشی بین دو گره J360 و J362 و کانال C367، بعد از آزمون و خطا حاصل شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در صورتی که کف و سقف کانال C367 در مقطع ورودی با گره J360 یکسان شود و همین‌طور در قسمت خروجی کانال کف و سقف با گره J362 یکسان شوند می‌تواند از حالت بحرانی خارج شوند، این داده‌ها ثابت می‌کند که شیب زمین یکی از عوامل مهم در رخداد سیلاب است که اگر اصلاح شود دیگر شاهد سر ریز شدن گره J360 نخواهیم بود. بنابراین از نتایج حاصل از پروفیل‌های سطح آب در مدل می‌توان برای تهیه نقشه مناطق در معرض خطر و مدیریت حوضه‌های شهری برای کاهش خطرات شهری استفاده نمود.



شکل ۳۴. کانال اصلاح شده C367



شکل ۳۳. کانال C367

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه در ارتباط با شبیه‌سازی الگوی جریان و رواناب، مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی بسیاری طراحی شده که در حوضه‌های آبخیز شهری و رواناب شهری یکی از بهترین آن‌ها مدل SWMM می‌باشد. از آنجاکه شهر خرم‌آباد

در طول مسیل خرم رود احداث شده همواره در معرض سیلاب شهری قرار دارد؛ لذا در این تحقیق به بررسی و ارزیابی مدل SWMM به منظور شبیه‌سازی رواناب شهری و تعیین مهم‌ترین پارامترهای موثر در بروز سیلاب در بخش‌هایی از شهر خرم‌آباد پرداخته شد. نتایج نشان داد که بین شاخص ارزیابی کارایی مدل مربوط به برآورد ارتفاع رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، رابطه معنی‌داری وجود دارد و نتایج حاصل از ارزیابی مدل توسط شاخص کلینگ-گوپتا مقدار قابل قبولی را ارائه داده و نشان می‌دهد که مدل از کارایی قابل قبولی برخوردار است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شش واقعه بارش و انطباق قابل قبول بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای نشان داد که مدل دقت مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب شهری را دارد و می‌توان از این مدل برای طراحی های مدیریت رواناب شهری و طراحی شبکه زهکشی رواناب شهری در شهر خرم‌آباد استفاده نمود. نتایج نشان داد در حوضه آبخیز شهری خرم‌آباد که درصد نفوذناپذیری بیشتری دارد، پتانسیل تولید رواناب و سیل‌خیزی نیز بالاتر است و درصد مناطق نفوذناپذیر بیشترین تاثیر را در ایجاد دبی‌های اوج دارند. بر اساس نتایج می‌توان گفت که مدل SWMM می‌تواند با مدل‌سازی نفوذ به روش‌های مختلف، ضریب رواناب و پتانسیل سیل‌خیزی را به خوبی برآورد نماید. نتایج این بررسی بیانگر این است که برخی قسمت‌های شبکه شهری شامل تعدادی از گره‌ها و مجاری منتهی به مسیرهای بحرانی است که دلیل آن حجم زیاد جریان در برخی نواحی شهری به ویژه در بخش شمالی است، که این موضوع موجب انباشت جریان در پایین‌دست و عدم توانایی عبور رواناب در شرایط موجود است که باعث آب‌گرفتگی‌ها در اثر کوچک بودن سطح مقطع مجاری آب رو به دلیل بهسازی غیر اصولی به شکل دیوار چینی و حاشیه‌سازی سواحل رودخانه و نیز شیب کم در برخی از مجاری است. نتایج این تحقیق نشان داد که گره‌های خروجی برخی زیرحوضه‌ها که تعداد آن‌ها تقریباً ۳۰ درصد محدود خروجی است حجم رواناب بیشتری را دارند و موجب آبگرفتگی از محدوده میانی شهر خرم‌آباد تا نقطه خروجی می‌شوند که بیشتر به دلیل تغییر کاربری اراضی، گسترش شهرنشینی در حاشیه رود خرم رود می‌باشد که موجب افزایش سطوح نفوذناپذیر و دبی سیلاب در مناطق شهری و افزایش خطر سیل در شهر خرم‌آباد شده است، که باید جهت اصلاح و استحکام آن‌ها به دلیل حجم زیاد رواناب مورد توجه قرار گیرند و یا حداقل در خصوص قطر و ابعاد طراحی شده در انتقال رواناب شهری خرم‌آباد متناسب با دبی موجود تجدید نظر و اقدامات متناسب‌سازی و اصلاحی انجام گیرد. با توجه به اینکه اغلب رواناب زیرحوضه‌ها در مسیر زهکش اصلی شهر یعنی رود خرم رود فرا گرفته‌اند. حجم رواناب بسیار زیاد بوده که می‌بایست طرح ساماندهی حاشیه رودخانه خرم‌رود مورد توجه قرار گیرد. نتایج این بررسی بر اساس مشاهدات میدانی نشان داد که علت آبگرفتگی در برخی کانال‌ها و مجاری به دلیل نبود ظرفیت کافی مجاری است هم‌چنین گاهی با وجود ظرفیت کافی برخی کانال‌ها که مدل آن را تایید کرده آب‌گرفتگی به دلیل انباشت رسوبات در بستر رودخانه خرم‌رود به ویژه در فصل کم‌آبی می‌باشد. در این پژوهش با توجه به عدم دسترسی به داده‌های نفوذ، از روش SCS برای برآورد نفوذ استفاده و نتایج نشان داد که سطوح غیر قابل نفوذ از جمله مناطق مسکونی، پشت بام‌ها، جاده‌های آسفالت و غیره بیشترین سهم را در پتانسیل سیل‌خیزی محدوده مطالعاتی دارند. در این مطالعه ترتیب پارامترها از حساس‌ترین تا کم حساس‌ترین شامل درصد مناطق نفوذناپذیر، عمق ذخیره چالابی مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر، شیب زیرحوضه، عمق ذخیره چالابی مناطق نفوذپذیر، ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره چالابی می‌باشد که با یافته‌های حیدرزاده و همکاران (۱۳۹۶)، شهبازی و همکاران (۱۳۹۶)، رضایی و همکاران (۱۳۹۷) به خوبی مطابقت دارد. بنابراین درصد مناطق نفوذناپذیر بیشترین تاثیر را بر دبی اوج خروجی مدل داشته و به‌عنوان حساس‌ترین متغیر شناخته شد. به عبارت دیگر تغییرات اندک در درصد مناطق نفوذناپذیر باعث افزایش دبی اوج سیلاب می‌شود. هم‌چنین ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر و عرض معادل و شیب به ترتیب بعد از درصد مناطق نفوذناپذیر بیشترین تاثیر را در تغییرات دبی اوج داشته‌اند و بیانگر این است که ترتیب حساسیت پارامترها متفاوت بوده و شیب جز پارامترهای کم حساس محسوب می‌شود. این تفاوت بر اساس مشاهدات میدانی از شهر خرم‌آباد و بررسی نقشه شیب و کاربری ارضی گاهی به دلیل شیب کم برخی زیرحوضه‌ها در مناطق نفوذپذیر، پوشش

ناهمگن سطوح در برخی مناطق و پوشش کم سبز شهری می‌باشد. بنابراین برای کاهش دبی اوج باید مقدار درصد مناطق نفوذ ناپذیر، شیب، عرض معادل و درصد مناطق نفوذ ناپذیر بدون ذخیره سطحی کاهش و به مقدار ضریب زبری در مناطق نفوذ پذیر و نفوذپذیر، ارتفاع ذخیره در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر افزوده شود. این موضوع بیانگر این است که به دلیل اینکه درصد مناطق نفوذناپذیر رابطه مستقیم و ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر رابطه عکس با دبی اوج دارند می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که تصرف حاشیه رودخانه خرم‌رود شهر خرم‌آباد در سال‌های اخیر به جهت گسترش شهرنشینی بر اثر افزایش درصد مناطق نفوذناپذیری تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی دبی اوج سیلاب دارد. در نتیجه تاثیرگذاری مناطق نفوذپذیر و عوامل مربوط به آن مانند ضریب زبری و ارتفاع ذخیره کمتر خواهد بود. علاوه بر این بر اساس نتایج فرایند واسنجی می‌توان برآورد قابل قبولی از مقدار بهینه پارامترها در مناطقی که از لحاظ همگنی مشابه منطقه مورد نظر هستند انجام و استفاده نمود. همچنین با توجه به قابلیت‌های مدل در برآورد رواناب و توانایی مدل در ارائه خروجی‌های قابل قبول و متنوع و انعطاف‌پذیری خوب مدل برای ترکیب با مدل‌های دیگر می‌توان از هیدروگراف جریان در هر بخش به‌عنوان ورودی برای مدل‌های دیگر استفاده نمود. که پیشنهاد می‌شود که از داده‌های حاصل از مدل سیلاب شهر خرم‌آباد را با مدل‌های دیگر بررسی نمود. در همین راستا با توجه به نتایج بدست آمده از مدل و آنالیز حساسیت و تعیین پارامترهای حساس برای شهر خرم‌آباد می‌توان از داده‌های حاصل از مدل در بحث اصلاح و بهبود شرایط شهر خرم‌آباد و تهیه نقشه راه و اقدامات مناسب و اصلاحی از سوی دستگاه‌های اجرایی استفاده موثری نمود. با توجه به اینکه فضاهای باز مانند زمین‌های بایر و فضای سبز مکان مناسبی برای انتقال سیلاب شهری هستند، می‌توان با تغییرات کوچک هندسی در خیابان‌ها و محله‌ها، سطوح نفوذپذیر را افزایش داد تا براساس افزایش زبری این مناطق میزان دبی این مناطق را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. از آنجایی که استفاده از سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری غیر قابل اجتناب است، پیشنهاد می‌شود که اقدامات حفاظتی جهت جلوگیری از وقوع سیلاب در طول مسیر رودخانه از قبیل لایروبی بستر، حفظ حریم بستر رودخانه از تصرف انسان و ایجاد دیوار ساحلی صورت گیرد.

منابع

- امیدی ارجنکی، مجید؛ ظریف صنایعی، حمیدرضا، ر و حیدرزاده، هیشم. (۱۴۰۰). بررسی عملکرد و تعیین ابعاد بهینه شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی با استفاده از مدل SWMM. *نشریه مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر*، ۵۳، (۶)، ۲۵۶۱-۲۵۸۰.
- رحیمی، محمدعلی؛ امامقلی زاده، صمد؛ کرمی، غلام‌حسین؛ دلقدنی، مهدی و گنجی نوروزی، زهرا. (۱۴۰۲). ارزیابی شبکه زهکشی شهری با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: شهر شاهرود). *نشریه آبیاری و آب ایران*، ۱۴(۲)، ۱۴۶-۱۶۳.
- رفیع رفیعی، محمد؛ رسولی، داریوش؛ ذوالقدر، مسیح و مهدی، مهدی. (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد مدل‌های EPA SWMM و ASSA و SewerGEMS در تحلیل سیلاب شهری جمع‌آوری شده توسط شبکه زهکش‌های سطحی (مطالعه موردی شهر جدید لار). *نشریه مهندسی آب*، ۱۵(۵۴)، ۱۰۷-۱۲۴.
- رضائی‌مقدم، محمدحسین، ح؛ مختاری، داود؛ رحیم پور، توحید و اسکندری، میثم. (۱۴۰۴). پهنه‌بندی جریان سیلاب برای دوره‌های بازگشت مختلف با استفاده از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه گمناب چای). *نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۳(۴).
- رضایی مقدم، محمد حسین و رحیم پور، توحید. (۱۴۰۳). ارزیابی پتانسیل خطر وقوع سیلاب با استفاده از روش تحلیل آماری دو متغیره (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی چای). *نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۲(۴)، ۹۱-۱۰۷.
- رضایی، فاطمه؛ بهره مند، عبدالرضا؛ بردی شیخ، واحد؛ دستورانی، محمد تقی و تاج بخش، محمد. (۱۳۹۷). تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر میزان رواناب شهری با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: شهر مشهد، منطقه ۹). *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۹(۱۸)، ۱۳۵ تا ۱۴۵.

- زاهدی خامنه، حامد و خدانشناس، سیدرضا. (۱۴۰۰). بررسی عملکرد سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی و تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر آن (مطالعه مناطق ۱۰ و ۱۱ مشهد). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۵(۵)، ۱۰۶۷-۱۰۸۰.
- شهبازی، علی؛ فرجی، محمد و دهداری، سمیه. (۱۳۹۸). اثر توسعه شهری بر تولید رواناب با استفاده از مدل SWMM، مطالعه موردی: شهرستان ایذه، استان خوزستان. *نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۳)، ۷۵۰ تا ۷۵۸.
- شهبازی، علی؛ خلیقی سیگارودی، شهرام؛ ملکیان، آرش و سلاجقه، علی. (۱۳۹۶). تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل مدیریت رواناب شهری SWMM (مطالعه موردی: شهر ماهدشت). *پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۰(۱۴)، ۶۷ تا ۷۵.
- صفری نامیوندی، مهدی؛ گنجائیان، حمید؛ نصرتی، مژگان و محمدیان، کثوم. (۱۴۰۳). شناسایی مناطق سیل‌زده و تحلیل عوامل موثر در وقوع آن (مطالعه موردی: جنوب شرق استان سیستان و بلوچستان). *نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۳(۲)، ۱۹۴-۱۸۱.
- حجازی، اسد...؛ نگهبان، سعید؛ موسوی، سیده معصومه و امین‌زاده، محمدادی. (۱۴۰۳). بررسی و پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه‌های آبریز شهری با استفاده از مدل‌های فازی ویکور و روش خطی وزنی (مطالعه موردی: حوضه آبریز ایذه- خوزستان). *نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۳(۲)، ۷۰-۵۱.
- حیدرزاده، مریم و نوحه‌گر، احمد. (۱۳۹۶). ارزیابی و آنالیز حساسیت کمیت رواناب و سیستم زهکشی در حوضه شهری ساحلی با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: بخشی از شهر بندرعباس). *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۴(۳)، ۲۰۳ تا ۲۱۸.
- فرخزاده، بهموش؛ بذرافشان، ام‌البنین و کیانی، آرمان. (۱۳۹۶). مدیریت رواناب‌های شهری با استفاده از مدل هیدرولوژیکی- هیدرولیکی SWMM (مطالعه موردی: منطقه ۱۲ شهرداری تهران). وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه ملایر- دانشکده مرتع و آبخیزداری و شیلات و محیط زیست. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۱۳ص.
- قادری دهکردی، نگین؛ سلیمانی، کریم؛ کاویان، عطا... و رشیدپور، مصطفی. (۱۳۹۹). بهره‌گیری از مدل SWMM در تعیین قابلیت جمع‌آوری و استحصال رواناب شهر بابلسر، استان مازندران. *نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲(۴)، ۱۰۵۵-۱۰۶۴.
- ناصر پور، مرضیه؛ خزیمه نژاد، حسین و فروتن، الهام. (۱۳۹۹). ارزیابی اثرات توسعه شهری بر رواناب با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: استان قم). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۲(۱۲)، ۷۹-۸۹.
- نوری، محبوبه؛ حسینی، سیدموسی و منصوریان، حسین. (۱۴۰۲). تبیین ضرورت کاربست روش‌های نوین در مدیریت رواناب‌های شهری با رویکرد افزایش تاب‌آوری در برابر سیلاب (نمونه موردی: شهر شیراز). *پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۳۸(۲۷)، ۲۷-۴۹.
- یاراحمدی، یزدان؛ یوسفی، حسین؛ جهانگیر، محمدحسین و ساداتی‌نژاد، جواد. (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی هیدرولوژیکی SWMM. *نشریه اکوهیدرولوژی*، ۶(۲)، ۴۱۵-۴۲۵.
- یاراحمدی، یزدان؛ قضاوی، رضا و قاسمیه، هدی. (۱۴۰۰). ارزیابی کارایی مدل SWMM به منظور بررسی گره‌های سیل‌گیر شبکه زهکشی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: شرق منطقه شش شهرداری تهران). (۴)۴، ۳۲۶-۳۳۰.
- یاراحمدی، یزدان؛ قضاوی، رضا و قاسمیه، هدی. (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب‌های شهری مناطق نیمه‌خشک تحت تأثیر تغییر اقلیم. *نشریه اکوهیدرولوژی*، ۹(۴)، ۷۸۳-۷۹۵.
- Abdul-Aziz, O., & Al-Amin, S. (2015). *Climate, land use and hydrologic sensitivities of stormwater quantity and quality in a complex coastal-urban watershed*. Urban Water J. Pub.Online: 03 Jan 2015.
- Aldiansyah, S., & Wardani, F.(2023). Evaluation of flood susceptibility prediction based on a resampling method using machine learning. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 937-961.
- Beck, N.G., Conley, G., Kanner, L., & Mathias, M. (2017). An urban runoff model designed to inform stormwater management decisions. *J Environ Manage*, 193, 69-257.

- Browne, S., Lintern, A., Jamali, B., Leitão, J. P., & Bach, P. M. (2021). Stormwater management impacts of small urbanising towns: The necessity of investigating the 'devil in the detail'. *Science of The Total Environment*, 757, 143835.
- Braud, I., Fletcher, T.D., & Andrieu, H. (2013). Hydrology of Peri-Urban catchments: processes and modeling. *J. Hydrol.* 485,1-4.
- De Almeida, I.K., Almeida, A.K., Steffen, J.L., & Sobrinho, T.A. (2016). Model for Estimating the Time of Concentration in Watersheds. *Water Resour Manage*, DOI10.1007/s11269-016-1383-x.
- Farokhzadeh, B., Kiani, A., & Omolbanin Bazrafshan, O. (2021). Evaluation of SWMM hydrological-hydraulic model in urban runoff management (Case study: District 12 of Tehran Municipality), *Urban Economics and Planning*, 1(4), 243-251. [In Persian].
- Ghaderi, N., Soleimani, K., Kaviani, A., & Rashidpoor, M. (2021). The use of SWMM model in determining the ability to collect and extract runoff in Babolsar, Mazandaran Province. *Watershed Engineering and Management*, 12(4), 1055-1064. [In Persian].
- Hejazi, A., Negahban, S., Mousavi, M., & Aminzadeh, M. (2024). Assessment and mapping of urban watershed flood by using fuzzy VIKOR and weighted linear combine models (Case study: Catchment Izeh- Khuzestan). *Quantitative Geomorphological Research*, 13(2), 51-70. [In Persian].
- Heydarzadeh, M., & Nohegar, A. (2017). Assessment and Sensitivity analysis quantity of runoff and drainage system in coastal urban area by SWMM Model (case study: part of Bandar Abbas city). *Water and Soil Conservation*, 24(3), 203-218. [In Persian].
- Jiang, L., Chen, Y., & Wang, H. (2015). Urban flood simulation based on the SWMM model. *Proc Int Assoc Hydrol Sci*, 368, 91-186.
- Kang, N., Kim, S., Kim, Y., Noh, H., Hong, S., & Kim, H. (2016). Urban drainage system improvement for climate change adaptation. *Water*, 8(7), 268.
- Le, i., & Mathias, M. (2017). An urban runoff model designed to inform stormwater management decisions. *J Environ Manage*. 193, 69-257.
- Liu, G., Chen, L., Shen, Z., Xiao, Y., & Wei, G. (2019). A fast and robust simulation-optimization methodology for stormwater quality management. *Journal of Hydrology*, 576, 520-527
- Li, C., Wang Xiong, J.Z., & Chen, P. (2014). Sensitivity Analysis for Urban Drainage Modeling Using Mutual Information. *Entropy*. 16:5738-5752. Doi: 10.3390/e16115738.
- Nasehpour, M., Khozayemnezhad, H., & Forootanm, E. (2021). Evaluation of Urban Development Impacts on Runoff Using SWMM Model (Case Study: Qom Province). *Journal Environmental science and technology*, Published: 2021-02-19. [In Persian].
- Noori, M., Rezaei, M.R., Hosseini, S.M., & Mansourian, H. (2023). Explaining the necessity of using modern methods in the management of urban runoff with the approach of increasing resilience against floods (case study: Shiraz city). *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 11(1), 27-49. [In Persian].
- Omidi Arjenaki, M., Zarif Sanayei, H.R., & Heidarzadeh, H. (2021). Investigation of Performance and Determination of Optimal Dimensions of Surface Runoff Collection Network Using SWMM Model, *Amirkabir Journal of Civil Engineering (Amirkabir J Civil Eng)*, 53(6), 2561-2580. [In Persian].
- Palanisamy, B., & Chui, T.F.M. (2015). Rehabilitation of concrete canals in urban catchments using low impact development techniques. *J. Hydrol.* 523:309-319.
- Rahimi, M.A., Emamgholizadeh, S., karami, Gh., Delghandi, M., & Ganji Norouzi, Z. (2024). Evaluation Urban Drainage Network Using SWMM Model (Case Study: Shahrood City), *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 14(2), 146-163. [In Persian].
- Rafie Rafiee, M., Rasouli, D., zolghadr, M., & Mahbod, M. (2022). Evaluation of EPA SWMM, ASSA and Sewer GEMS Models in Analysis of Urban Flood Collected by Surface Drainage

- Network (Case Study: Lar New City), *Water Resources Engineering*, Published : 2022-10-23. [In Persian].
- Rezaei Moghaddam, M.R., Mokhtari, D., Rahimpour, T., & Skandar, M. (2025). Flood Flow zoning for different return periods using hydrodynamic model HEC-RAS (Case Study: Gomanab Chai River), *Quantitative Geomorphological Research*, 13(4), 23-36. [In Persian].
- Rezayi moghadam, M.R., & Rahimpour, T. (2024). Evaluating of Flood hazard potential using bivariate statistical analysis method (Case study: Aji Chai basin). *Quantitative Geomorphological Research*, 12(4), 91-107. [In Persian].
- Rezayi, F., Bahremand, A., Berdi Sheikh, V., Dastorani, M., & Tajbakhsh, M. (2019). Determination of the Most Important Parameters Affecting the Urban Runoff using SWMM Model (Case Study: Mashhad City, District 9), *Journal of Watershed Management Research*, 9(18). [In Persian].
- Safari namivandi, M., Ganjaeian, H., Nosrati, M., & Mohammadian, K. (2024). Identification of flooded areas and analysis of factors influencing its occurrence (Case study: Southeast of Sistan and Baluchestan province), *Quantitative Geomorphological Research*, 13(2), 181-194. [In Persian].
- Shahbazi, A., faraji, M., & dehdari, S. (2019). Effect of urban development on runoff generation by SWMM, case study: Khuzestan Province, Izeh, *Watershed Engineering and Management*, 11(3), 750-758. [In Persian].
- Shahbazi, A., Khalighi Sigarodi, Sh., Malekian, A., & Salajegh, A. (2017). Sensitivity analysis of input parameters of SWMM model to urban runoff management (Case study: Mahdasht town). *Watershed Management Research*, 30(114). [In Persian].
- Tikkanen, H. (2013). *Hydrological modeling of a large urban catchment using a stormwatermanagement model (SWMM)*. M.Sc. Thesis. Aalto University, 165p.
- Winz, I., Brierley, G., & Trowsdale, S. (2011). Dominant perspectives and the shape of urban storm water futures. *Urban Water J*, 8(6), 337-349.
- Wang, M., Zhang, D.Q., Adhityan, A., Ng, W.J., Dong, J.W., & Tan, S.K. (2018). Conventional and holistic urban stormwater management in coastal cities: a case study of the practice in Hong Kong and Singapore, *J Water Resour Dev*, 34(2), 192-212.
- Walsh, C. J., Booth, D. B., Burns, M. J., Fletcher, Wang, Y., Wang, H., Wang, M., Wu, Y., Liu, H., & Huang, H. (2020). Study on the Simulation and Evaluation of LID Adaptation Measures Based on SWMM, *Journal of Water Resources Research*, 9(1), 22-32.
- Wu, J.B., Guo, K.Z., Wang, M.X., & Xu, B. (2011). *Research and extraction of the hydrological characteristics based on GIS and DEM*. Proceedings of the 2011 IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. Wuhan, Pp: 371-374.
- Yarahmadi, Y., Yousefi, H., Jahangir, M.H., & Sadatineghad, S.J. (2019). Evaluation of the network performance of surface water collection and guidance using the SWMM Hydrological Model (Case Study: District 6 of Tehran Municipality). *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 6 (2). [In Persian].
- Yarahmadi, Y., ghazavi, R., & ghasemiyeh, H. (2022). Evaluating the efficiency of the SWMM model in order to investigate the flooding nodes of the drainage network under the influence of climate change (Case study: East of Six District of Tehran Municipality), *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences (JMAS)*, 4(4). [In Persian].
- Yarahmadi, Y., ghazavi, R., & ghasemiyeh, H. (2023). Evaluate the performance of urban runoff collection network in semi-arid areas affected by climate change, *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 9(4), 783-795. [In Persian].
- Zahedi Khameneh, H., & Khodashenas, S.R. (2022). Performance Evaluation of stormwater collection system and sensitivity analysis of parameters affecting it (study of districts 10 and 11 of Mashhad), *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 15(5), 1067-1080. [In Persian].