Research Paper

Simulation of Urban Surface Runoff Using SWMM (Case study: Khezr Sub-Basin of Hamedan)

Amin Toranjian[1]*, Safar Marofi [2]

[1] Assist. Professor, Department of Water and Soil Engineering, Faculty Agriculture,Malayer University, Iran
[2] Professor, Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture,Bu-Ali Sina University, Iran

10.22125/IWE.2022.316195.1573

Received:
November 21, 2021
Accepted:
February 19, 2022
Available online:
August 23, 2023

Keywords:
Flood, Management, Sensitivity analysis, Verification, Water resources

Abstract

Integrated catchment management ensures optimal use of the water resources. Change in the natural catchments' characteristics like percentage of impermeability, Manning coefficient have caused change in the runoff hydrograph at the outlet of urban basin. Models could help the policy makers in design of better solutions for management of the urban runoff using simulation and assessment of different scenarios without needing trial and error. The goal of this present research is, simulating of runoff due to precipitation in the sub-basin khezr of Hamedan city using the Storm Water Management Model (SWMM). For this purpose, the quantitative amounts of runoff during seven precipitation events were recorded. The sensitivity analysis of input parameters showed that the values of impervious areas' percentage, equivalent width, and Manning coefficient of the impervious area have the highest effects on the runoff volume and peak flow. The results of the verification to estimating the peak flow and volume using the coefficients of Nash-Sutcliffe (0.69-0.95), RMSE (0.14-0.29) and %BIAS (-13.6-18.8) on the three precipitation events showed that the model has good performance for simulating the volume and peak flow of runoff in sub-basin Khezr. Finally, two scenarios were defined and applied based on the percentage of extension of impervious areas for year 2041 and precipitation intensity. The results showed, increasing runoff is significant and its prediction and management for reducing probable damages in the future is necessary.

1. Introduction

Water is considered as the most vital need of humans and is among the basic and major foundations of development in human communities. Many investment projects at the national level are done for development of infrastructure and improvement of water resources management. Development changes over the land surface complicate the balance between runoff, infiltration, and evapotranspiration. Therefore, one of the main effects of urban development is change in the amount and form of water flow due to precipitation. So that increase of the impermeable surfaces leads to increase of runoff volume and flood, reduction in the concentration time, increase in the maximum instantaneous flow rate and change of the runoff quality due to rainfall. The rainfall-runoff model is one the methods used for estimating the runoff and is an appropriate tool for studying the hydrologic processes and assessment of water resources. The SWMM model is considered as one the complete and widely used software for analysis of urban runoff which is capable of simulating the flow and urban runoff pollutant loads. Nicole et al. (2017) investigated the runoff due to precipitation in the urban basin within the Lake Tahoe basin in California. Their research revealed that the estimated runoff for five sub basins among the six investigated ones are in agreement with the actual values. Cai et al. (2021) using the general regression neural network modified the SWMM model parameters to estimate runoff in a town in Taiwan. The

results of assessments showed that application of the model with the neural network is a good tool for simulating runoff in the study area. The problems associated with urbanism have affected the city of Hamadan, too. Floods and inundation of passages in the low-level areas and downstream of the city have created numerous economic and social problems. The aim of this research is assessment and simulation of the runoff due to precipitation at the exit of Khezr sub basin in Hamadan City. The results of this study could be utilized in the management and control of surface runoffs in the area.

2. Materials and Methods

The study area is the Khezr sub basin with an area of 80.07 Km^2 which is the largest sub basin of Hamadan City at the eastern side of it. The mean slope of the sub basin is about 11% (Fig.1).

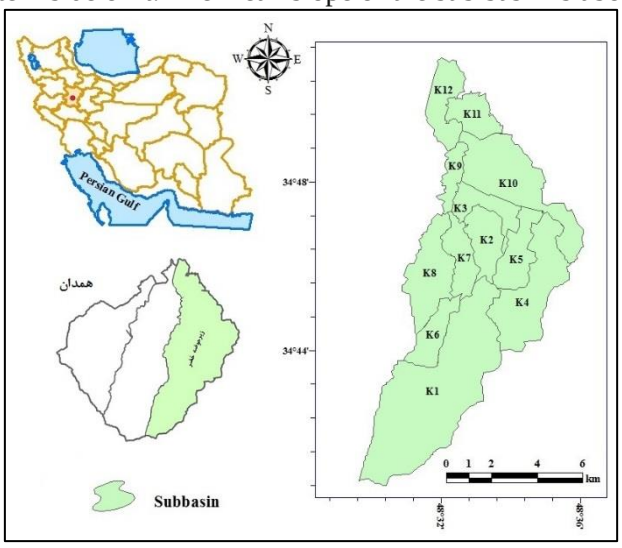


Fig 1- Map of the studied area

In this research, in order to simulate the runoff resulting from precipitation, use was made of the SWMM model.

Also for assessment and validation of the model, three criteria namely Nash–Sutcliffe efficiency (NS), Root Mean Square Error (RMSE) and Percentage Bias (BIAS) which are widely used in the urban studies, were incorporated.

After preparing the hydrological, meteorological and hydraulic data and entering them into the model, as the number of input parameters and sub basins is high, the calibration of process parameters is complicated and time consuming. Regarding the past research works in terms of the effective parameters in simulation of flow in basins, from the existing parameters eight were selected which included the percentage of permeable areas, slope, equivalent width, Manning's roughness coefficient for the permeable and impermeable areas, storage height of impermeable areas, storage height of permeable areas and percentage of impermeable areas without surface storage (Abdul-Aziz and Al-Amin, 2015).

3. Discussion and Conclusion

The results obtained from sensitivity analysis of the model in terms of changes in the peak runoff flow, showed that the parameters; percentage of impermeable areas, Manning's roughness coefficient of impermeable areas, equivalent width and slope have respectively higher to lower sensitivities. Also the results of sensitivity analysis in terms of changes in the runoff volume showed that the parameters; percentage of impermeable areas, storage height of impermeable areas, equivalent width, Manning's roughness coefficient of impermeable areas, and slope have higher to lower sensitivities, respectively. The results obtained from changing the parameters and model calibration are given in Table (1) for Khezr sub basin.

Table 1- Parameter values of calibrated model

Sub-basins	Area (ha)	With (m)	Slope (%)	Imperv (%)	N-Imperv ($s/m^{1/3}$)	N-Perv ($s/m^{1/3}$)
M1	2515	2841	31	2.2	0.019	0.05
M2	386	1372	7.7	21.4	0.019	0.15
M3	316	1119	5.1	27.3	0.019	0.15
M4	978	1930	8.5	3.1	0.011	0.10
M5	418	1556	8.8	2.3	0.019	0.05
M6	327	1030	29.5	2.2	0.019	0.05
M7	339	1077	8.0	22.5	0.011	0.15
M8	670	1660	13.6	33.9	0.011	0.15
M9	201	799	3.0	75.8	0.011	0.15
M10	1085	1766	3.9	27.6	0.011	0.15
M11	317	1324	1.8	70.7	0.011	0.15
M12	418	1376	2.1	4.4	0.011	0.15

After calibrating the model, to ensure the results of model simulation, the measured values of runoff during the three other events were used to compare with the simulation results in these events. According to the validation results, the values of NS index ranged from -0.95 to 0.61, RSME index ranged from -0.26 to 0.14 and percentage BIAS index ranged from -13.6 to 18.8. These values indicate a good agreement between the observed and modeled runoffs within the Khezr basin. The values of model validation indices for the three selected evens are presented in Table (2). The researchers defined a difference up to 25% between the model and observed peak flows as the acceptable one. Also, the acceptable difference between the observed and modeled runoff volumes during 2.5 hours is acceptable for up to 20% (Temprano 2006).

Table 2- Results of verification criteria

Event	%BIAS	RMSE	NS
2	18.8	0.26	0.91
5	-13.7	0.29	0.69
7	-13.6	0.14	0.95

The field studies and urban comprehensive plan show that on average each year 1% is added to the impermeable areas in the developing cities. On this basis, two scenarios were designed for the year 1420 (assuming a fixed percentage equal to 24% for increase of impermeable areas and different precipitation durations with the return periods of 25 and 50 years). The results obtained from executing the defined scenarios exhibit the danger of severe floods with respect to the existing condition of urban canals and passages, especially at downstream areas where the region's slope decreases. Therefore, cleaning and modifying the canals and also planning and management of floods are among essential tasks of urban managers and authorities.

4. Six important references

1) Abdul-Aziz, O. and 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
2) Cai, Q.-C.; Hsu, T.-H.; Lin, J.-Y. (2021). Using the General Regression Neural Network Method to Calibrate the Parameters of a Sub-Catchment. Water, 13, 1089. https:// doi.org/10.3390/w13081089
3) Nicole, G. Beck, G. C., Kanner, L., Mathias, M. (2017). An urban runoff model designed to inform stormwater management decisions. Journal of Environmental Management, 193, 257-269.
4) Parson, P., Baldassareeg, G., Shrodor, J. (2015). HydroMeteorological Hazards,Risks and Disaster. Elsivier, 35-64.

5) Temprano, J. Arango, O. Cagiao, J. Suarez, J. and Tejero, I. (2006). Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain".Water SA. 32(1):55-63.

6) Yazdi, M. N., Ketabchy, M., Sample, D. J., Scott, D., & Liao, H. (2019). An evaluation of HSPF and SWMM for simulating streamflow regimes in an urban watershed. Environmental Modelling & Software, 118, 211-225.

شبیه‌سازی رواناب سطحی شهری با استفاده از مدل SWMM (مطالعه موردی: زیرحوضه خضر همدان)

امین ترنجیان[۱]*، صفر معروفی[۲]

تاریخ ارسال:۱۴۰۰/۰۸/۳۰
تاریخ پذبرش:۱۴۰۰/۱۱/۳۰

مقاله پژوهشی

چکیده

مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز، تضمین کننده استفاده بهینه از منابع آب می‌باشد. تغییر ویژگی‌های حوضه‌های آبریز طبیعی مانند درصد نفوذناپذیری و ضریب زبری موجب تغییر هیدروگراف رواناب خروجی حوضه‌های شهری شده است. مدل‌ها می‌توانند با شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوهای مختلف بدون نیاز به آزمون و خطا به سیاست‌گذاران در طراحی راهکارهای بهتر مدیریت رواناب شهری کمک نمایند. هدف از تحقیق حاضر، شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارش در زیرحوضه خضر شهر همدان با استفاده از مدل مدیریت رواناب سطحی (SWMM) است. برای این منظور، ثبت مقادیر دبی رواناب خروجی در طی هفت رخداد بارش انجام گرفت. آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی مدل نشان داد، مقادیر درصد ناحیه نفوذناپذیر، عرض معادل، ضریب زبری مانینگ ناحیه نفوذناپذیر و شیب بیشترین تأثیر را بر روی حجم و دبی اوج رواناب دارند. نتایج صحت‌سنجی مدل در تخمین دبی اوج و حجم جریان با استفاده از ضریب نش- ساتکلیف (۰/۹۵-۰/۶۹)، جذر میانگین مربع خطا (۰/۲۹-۰/۱۴) و درصد بایاس (۱۸/۸-۱۳/۶-) بر روی سه رخداد بارش نشان داد، مدل تهیه شده در برآورد حجم و دبی اوج رواناب زیرحوضه خضر شهر همدان عملکرد مناسبی دارد. در نهایت دو سناریو بر اساس درصد توسعه مناطق نفوذناپذیر و شدت بارش برای سال ۱۴۲۰ تعریف و اجرا شد. نتایج نشان داد، افزایش رواناب و بار آلودگی حاصل از آن قابل ملاحظه بوده، و لزوم پیش‌بینی و مدیریت آن برای کاهش خسارات احتمالی در آینده ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، سیلاب، صحت‌سنجی، مدیریت، منابع آب.

[۱] استادیار، گروه مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران ایمیل: a.toranjian@malayeru.ac.ir * نویسنده مسئول
[۲] استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران ایمیل: marofisafar59@gmail.com

مقدمه

آب همواره به عنوان حیاتی‌ترین نیاز بشر و یکی از پایه-های اصلی و اساسی توسعه در جوامع انسانی بوده و در سطح ملی سهم زیادی از سرمایه‌گذاری‌ها صرف زیرساخت‌ها و امور زیربنایی و بهبود مدیریت منابع آب می‌شود (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۰). روند افزایش جمعیت و شهرنشینی موجب تبدیل زمینهای طبیعی به مناطق شهری و مسکونی و در نتیجه افزایش سطوح نفوذناپذیر و کاهش نفوذ آب به داخل خاک و افزایش حجم رواناب می‌شود .Chen et al). (2017ایجاد تغییرات توسعه‌ای در سطح اراضی، تعادل بین رواناب، نفوذ، تبخیر و تعرق را بر هم می‌زند. بنابراین یکی از گسترده‌ترین اثرات توسعه شهری تغییر در مقدار و شکل جریان آب حاصل از بارش است و در مقابل مقدار نفوذ باران به سمت ذخیره عمقی کاهش و در نتیجه حجم و دبی اوج سیلاب افزایش می‌یابد. افزایش سطوح نفوذناپذیر، منجر به افزایش حجم رواناب و سیلاب، کاهش زمان تمرکز، افزایش دبی حداکثر لحظه‌ای و تغییر کیفیت رواناب ناشی از نزولات جوی می‌شود. سیلاب، یک پدیدهٔ طبیعی است که در چرخه هیدرولوژیکی و ذخیره‌سازی آب نقش اساسی دارد، اما وقوع آن در مناطق مسکونی، می‌تواند موجب ناپایداری اجتماعی و اقتصادی گردد (Parson et al. 2015). پراکندگی زمانی و مکانی بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک موجب تشکیل سیلاب‌های مخرب و هدر رفتن آب‌های سطحی می‌شود. کنترل رواناب‌های سطحی و بهره‌برداری مناسب از آن می‌تواند تهدید را به فرصت و راهکاری مناسب برای استفاده بهینه از این منابع آب باشد (احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۴). مدل‌های بارش- رواناب یکی از روش‌های تخمین رواناب و ابزاری مناسب برای مطالعه فرآیندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی منابع آبی می‌باشند. دو کاربرد مهم مدل‌های بارش-رواناب، پیش‌بینی سیلاب و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی است Gautam and Holz). (2001 با توجه به اینکه در حوضه‌های شهری آب مسیر طبیعی خود را طی نکرده و غالبا مسیرهایی که توسط انسان‌ها طراحی شده است را می‌پیماید، لذا پیچیدگی مدل‌سازی بارش- رواناب در این حوضه‌ها بیشتر می‌باشد. بنابراین برای مدل‌سازی کمی و کیفی رواناب، باید مدل‌هایی متناسب با دیدگاه حوضه‌های شهری انتخاب گردد. مدل SWMM یکی از کاربردی‌ترین نرم افزارهای تحلیل رواناب سطحی است که امکان شبیه سازی جریان و بارهای آلاینده رواناب شهری و همچنین حمل آنها از میان سیستم فاضلاب مخلوط و نه تنها برای یک رخداد باران، بلکه برای دوره های طولانی را در اختیار می گذارد (ترنجیان، ۱۳۹۶). بررسی سوابق مطالعات انجام شده حاکی از تمرکز این مطالعات در شهرهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است. این موضوع دلالت بر اهمیت و توجه به جایگاه این موضوع در مدیریت شهری و تحقیق درخصوص آن دارد. بدیعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) مدل SWMM در مدیریت سیلاب شهر گرگان را ارزیابی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، این مدل توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی رواناب‌های شهری داشته و ابزار مناسبی برای طرح‌های مدیریت‌رواناب شهری و شبکه جمع‌آوری آب سطحی می‌باشد. فرخ زاده و همکاران (۱۳۹۹) برای شبیه‌سازی رواناب منطقه ۱۲ شهری تهران از مدل SWMM استفاده نمودند. در این تحقیق با استفاده از مشاهدات ناشی از چهار رگبار، رواناب در سه کانال اصلی شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان داد، درصد مناطق نفوذناپذیر بیشترین تأثیر را در ایجاد دبی‌های اوج دارد. این پژوهش بیانگر دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب شهری منطقه مورد مطالعه بود. Yao et al. (2015) تأثیر توسعه فضاهای سبز شهر پکن را بر تولید میزان رواناب بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها حاکی از افزایش۷۰ درصدی رواناب در اثر توسعه فضای نفوذناپذیر شهری و کاهش ۳۰ درصدی در اثر توسعه فضای سبز بود. Nicole et al. (2017) رواناب حاصل از بارش را در حوضه‌های شهری واقع در حوضه دریاچه تاهو کالیفرنیا بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنها نشان داد، رواناب برآوردی برای پنج زیرحوضه از شش زیرحوضه مورد بررسی با واقعیت تطابق مناسبی دارد. Yazdi et al. (2019) با استفاده از مدل SWMM و

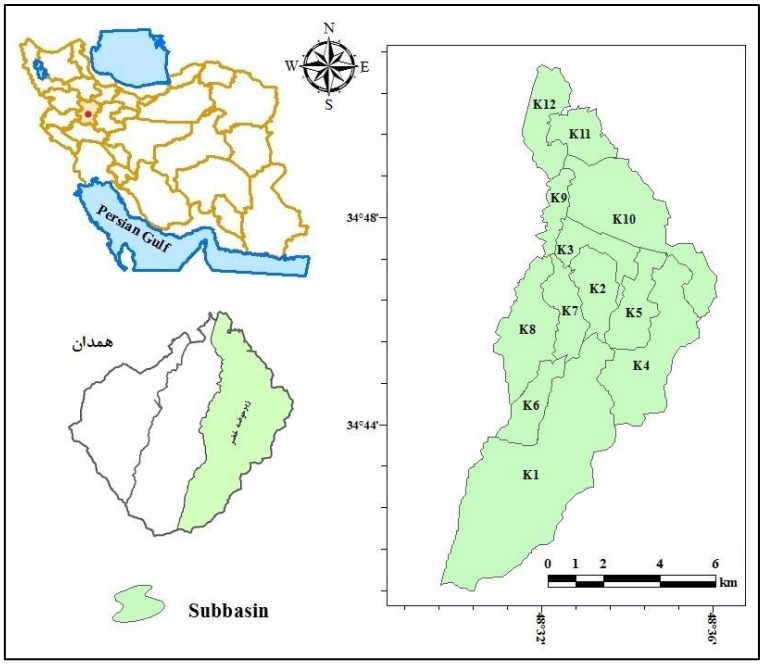
HSFP جریان حوضه رودخانه استرابلس کریک آمریکا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد مدل HSFP در شبیه‌سازی جریان پایه و مدل SWMM در شبیه‌سازی دبی اوج رودخانه عملکرد خوبی دارد. Cai et al. (2021) با استفاده از شبکه عصبی رگرسیون عمومی، پارامترهای مدل SWMM را جهت برآورد رواناب در یکی از شهری تایوان اصلاح نمودند. نتایج ارزیابی نشان داد، کاربرد ترکیبی مدل و شبکه عصبی ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی رواناب در منطقه مورد مطالعه است.

مشکلات ناشی از توسعه شهر همدان منجر به عدم توازن نفوذ و رواناب ناشی از بارش شده است. سیل و آب‌گرفتگی معابر در نقاط پست و پائین دست شهر در هنگام بارش‌های شدید، باعث ایجاد مشکلات اقتصادی و اجتماعی گردیده است. هدف از این تحقیق، ارزیابی و شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارش در خروجی زیرحوضه خضر شهر همدان است. نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت و کنترل رواناب‌های سطحی این منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روشها

منطقه مورد مطالعه

شهر همدان به عنوان مرکز استان همدان در غرب ایران، با جمعیتی در حدود ۵۶۰ هزار نفر می‌باشد که بین '۲۸ °۴۸ تا '۳۳ °۴۸ طول شرقی و '۴۵ °۳۴ تا '۴۹ °۳۴ عرض شمالی با ارتفاع ۱۷۴۱ متر از سطح دریا قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالانه ۳۱۰ میلی‌متر می‌باشد که وقوع حداکثر بارش‌های ماهانه در اسفندماه ثبت شده است. منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر سیستم‌های جوی مرکز کم فشار مدیترانه‌ای، مرکز پرفشار سیبری، مرکز پرفشار قطبی و کم فشارهای حرارتی قرار دارد. این منطقه حدود هشت ماه از سال تحت تأثیر توده هوای اقیانوس اطلس است و پس از جذب رطوبت از روی مدیترانه این توده هوا تقویت شده و بر اثر صعود به دامنه‌های زاگرس، موجب بارش در نواحی غربی ایران می‌گردد. سیستم طراحی شهری شعاعی بوده و بیشترین تراکم جمعیتی در نقاط مرکزی شهر می‌باشد. زیرحوضه خضر با مساحت ۸۰/۰۷ کیلومتر مربع، بزرگترین زیرحوضه همدان و در قسمت شرقی شهر قرار دارد. شیب متوسط حوضه حدود ۱۱ درصد است (شکل ۱).



شکل(۱): منطقه مورد مطالعه

مدل SWMM

مبنای انجام این پژوهش، آخرین نسخه مدل SWMM در سال ۲۰۱۶ میلادی است که توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا در نرم‌افزار SWMM-Version5.1 ارائه شده است.

معیارهای ارزیابی

ارزیابی مدل‌های برآورد رواناب، بر پایه بررسی کمی میزان خطای برآورد رواناب با رخداد مشاهداتی انجام می‌شود. به این منظور برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی رواناب شهر همدان با استفاده از مدل SWMM ، از سه معیار ارزیابی ناش- ساتکلیف (NS)[1] ، جذر میانگین مربع خطا(RMSE)[2] و درصد بایاس(BIAS) که بیشترین کاربرد را در مطالعات شهری دارد، استفاده شد (Donquan et al. 2020).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_s - Q_0)^2} \quad (۱)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_s - Q_o)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_o - Q_{av})^2} \quad (۲)$$

$$\%BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^{n}Q_o} \times 100 \quad (۳)$$

در این روابط، Q_s دبی شبیه‌سازی شده، Q_o دبی مشاهداتی، Q_{av} میانگین دبی مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

مقدار NS می‌تواند مثبت یا منفی باشد. بهترین حالت زمانی است که مقدار آن برابر یک باشد. در صورتی که مقدار NS مثبت باشد، نشان دهنده آن است که داده های شبیه

[1] Nash–Sutcliffe
[2] Root mean square error

سازی شده بهتر از میانگین داده های مشاهداتی است و در صورتی که منفی باشد نشان می‌دهد که خروجی مدل با ماهیت سیستم متناظر نیست (Sourisseau et al. 2008). پایین ترین مقدار قابل قبول ۰/۵ بوده و هر چه مقدار های نزدیک به یک باشد، نشان دهنده‌ی بالا بودن دقت شبیه‌سازی است (Santhi et al. 2007).

RMSE معمولاً برای بیان تفاوت بین مقادیر شبیه سازی شده و مقادیر مشاهداتی استفاده می‌شود. هر چه این ضریب کوچکتر باشد، تفاوت داده های مشاهده ای و برآورد شده کمتر و دقت پیش بینی بیشتر خواهد بود (بدیع‌زادگان و همکاران، ۱۴۰۰).

BIAS به درصد تفاوت نسبی بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در طی گامهای زمانی موجود اشاره دارد ((Tolson.and Shoemaker,2007.

روش تحقیق

برای وارد نمودن اطلاعات هیدرولوژیکی ابتدا زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه مشخص گردید. برای این منظور، نقشه‌های ارتفاعی رقومی شده(DEM[1]) با ابعاد ۲ متری در محیط ARCGIS تهیه گردید. با توجه به اینکه زیرحوضه‌های شهری خط الرأس مشخصی ندارد، برای تعیین مرز این زیرحوضه‌ها از اصل کلی خط تقسیم آب با کمک نقشه‌های ارتفاعی رقومی، نقشه‌های کاربری اراضی و بازدیدهای میدانی استفاده شد. مساحت، شیب و عرض زیر حوضه با استفاده از ابزارهای ARCGIS تهیه و درصد نفوذناپذیری هرزیرحوضه از تصاویر هوایی و نقشه‌های کاربری اراضی منطقه استخراج گردید. از آنجا که مدل با استفاده از معادله مانینگ جریان را محاسبه می‌کند، مقادیر ضریب مانینگ برای مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر زیرحوضه‌ها بر اساس جنس و کاربری زمین تعیین و در سامانه اطلاعات جغرافیایی به صورت میانگین وزنی تدقیق گردید. بر اساس جدول راهنمای مدل، مقدار مشخصه ذخیره رواناب برای مناطق نفوذناپذیر ۱/۷ و برای مناطق نفوذپذیر ۳/۶ منظور شد. برای محاسبه میزان نفوذ آب به خاک معادله اصلاح شده هورتن انتخاب و با توجه به جنس خاک و شرایط خاک، سرعت نفوذ حداقل (mm/hr) ۳/۳ ، زمان خشک شدن خاک ۷ روز و نرخ کاهش سرعت نفوذ (1/hr)۴ در نظر گرفته شد. همچنین حداکثر سرعت نفوذ با توجه به شرایط هر زیرحوضه تعیین گردید. برای انجام محاسبات عمق و سرعت جریان در مدل، وارد نمودن مشخصه‌های شیب، شکل، ابعاد و ضریب زبری کانال ضروری است. به این منظور بازدید میدانی ۲۸ نقطه در مسیر کانال و رودخانه خضر انجام شد. تخمین اولیه ضرایب مانینگ کانال و رودخانه‌های منطقه با استفاده از جدول راهنمای مدل صورت گرفت. برای ورود داده‌های هواشناسی شامل دمای میانگین، حداقل و حداکثر، سرعت باد و تبخیر از اطلاعات ایستگاه سینوپتیک سازمان هواشناسی همدان استفاده شد. پس از ورود داده‌ها، ابتدا بر روی پارامترهای انتخابی، فرایند تحلیل حساسیت انجام گرفت. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل، رواناب حاصل از هفت رخداد بارش در خروجی زیرحوضه با محدوه زمانی ۳۰ تا ۶۰ دقیقه اندازه‌گیری شد که نتایج چهار رخداد برای واسنجی و سه رخداد برای صحت‌سنجی استفاده شد. براساس نتایج آنالیز حساسیت، برای هر پارامتر مقادیر مختلفی با توجه به میزان حساسیت آنها در مدل، در محدوده مجاز منظور شد به طوری که در هر مرحله با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها مدل اجرا و نتایج ثبت گردید. با تلفیق نتایج، مقادیر بهینه انتخاب و مدل با تمامی پارامترهای کالیبره شده اجرا و با استفاده از سه معیار ارزیابی، صحت سنجی مدل انجام شد. در نهایت با استفاده از طرح جامع توسعه شهری و نظرات کارشناسان، دو سناریو تا سال ۱۴۲۰ تعریف و مدل بر اساس شرایط هر سناریو اجرا گردید.

[1] Digital elevation model

جدول (۱): دامنه مجاز تغییرات پارامترها

Parameter	Admissible range
Area	۳۰٪±
With	۳۰٪±
Slope	۳۰٪±
Imperv	۳۰٪±
N-Imperv	۰/۰۱۱
N-Perv	۰/۰-۰۲/۸
D-Imperv	۰/۲-۳/۵
D-Perv	۲/۵-۵/۱
Zero-Imperv	۲۵-۵

(Abdul-Aziz and Al-Amin 2015; Shen and Zhang 2014)

نتایج و بحث

با توجه به پژوهش‌های گذشته در خصوص پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی جریان حوضه، از بین پارامترهای موجود هشت پارامتر که شامل درصد مناطق نفوذناپذیر، شیب، عرض معادل، ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی، انتخاب شد (Abdul-Aziz and Al-Amin 2015; Shen and Zhang 2014). با توجه به دقت ARCGIS در تعیین مرز و زیرحوضه‌ها، پارامتر مساحت ثابت درنظر گرفته شد. همچنین بررسی پارامتر درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی نشان داد، تغییر این پارامتر، تأثیری در خروجی مدل منطقه نداشته و این پارامتر نیز مورد تحلیل حساسیت قرار نگرفت. نتایج به‌دست آمده از آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییرات دبی اوج رواناب نشان داد که پارامترهای درصد ناحیه نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل و شیب به ترتیب بیشترین تا کمترین حساسیت را دارد. در این بررسی، تغییرات ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر و ضریب مانینگ ناحیه نفوذپذیر تأثیری بر روی دبی اوج رواناب نداشت. با افزایش میزان پارامترهای حساس مانند درصد اراضی نفوذناپذیر، عرض معادل و شیب زیرحوضه میزان دبی اوج افزایش یافته و به این معنی است که این پارامترها با دبی اوج رابطه مستقیم دارند. پارامتر ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر با دبی اوج رابطه معکوس داشته و با کاهش آن، دبی اوج افزایش می‌یابد. با افزایش و کاهش ۳۰ درصدی مناطق نفوذناپذیر، دبی اوج به ترتیب ۲۳/۷۶ درصد افزایش و ۲۶/۲۳ درصد کاهش و در حالت معکوس، با افزایش و کاهش ۳۰ درصدی ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر به ترتیب، ۶/۳۱ درصد کاهش و ۸/۵۱ درصد افزایش داشته است. نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییرات حجم رواناب نشان داد که پارامترهای درصد ناحیه نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر و شیب به ترتیب بیشترین تا کمترین حساسیت را دارند. همچنین تغییرات ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر و ضریب زبری مانینگ ناحیه نفوذپذیر تأثیر کاهشی یا افزایش بر روی دبی نداشتند. با افزایش میزان پارامترهای درصد اراضی نفوذناپذیر، عرض معادل و شیب زیرحوضه، حجم رواناب افزایش یافته که این نشان می‌دهد، این پارامترها با حجم رواناب رابطه مستقیم دارند. ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر و ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر، با حجم رواناب رابطه معکوس داشته و با کاهش آن، حجم رواناب افزایش می‌یابد. با افزایش و کاهش ۳۰ درصدی مناطق نفوذناپذیر، حجم رواناب به ترتیب ۲۹/۰۵ درصد افزایش و ۲۹/۵۲ درصد کاهش و در حالت معکوس، با افزایش و کاهش ۳۰ درصدی ارتفاع ذخیره در مناطق نفوذناپذیر به ترتیب ۲/۵۸ درصد کاهش و افزایش داشته است.

جدول (۲):رخدادهای بارش مورد مطالعه (mm/hr)

رخداد	تاریخ	۱	۲	۳	۴
۱	2014-10-21	۲/۱	۱/۴	۰/۱	۲/۱
۲	2014-11-01	۳/۴	۰/۱	۰/۰	۰/۱

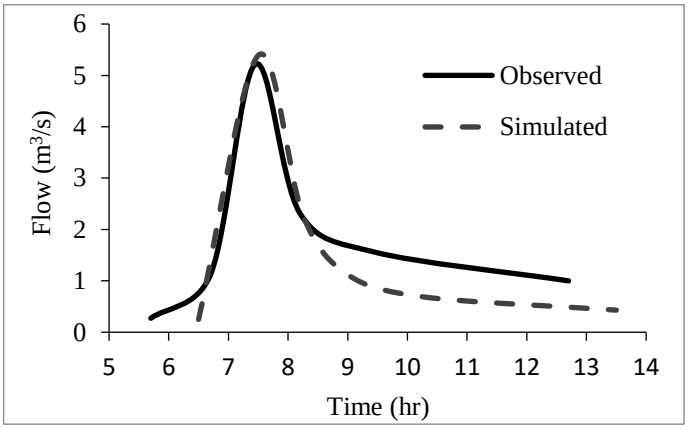
۳	2014-11-22	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۰/۵
۴	2014-11-24	۰/۱	۲/۱	۰/۸	۰/۰
۵	2015-03-17	۱/۱	۰/۰	۱/۰	۰/۰
۶	2015-04-11	۰/۸	۰/۲	۲/۱	۰/۵
۷	2015-05-10	۱/۴	۲	۰/۰	۰/۳

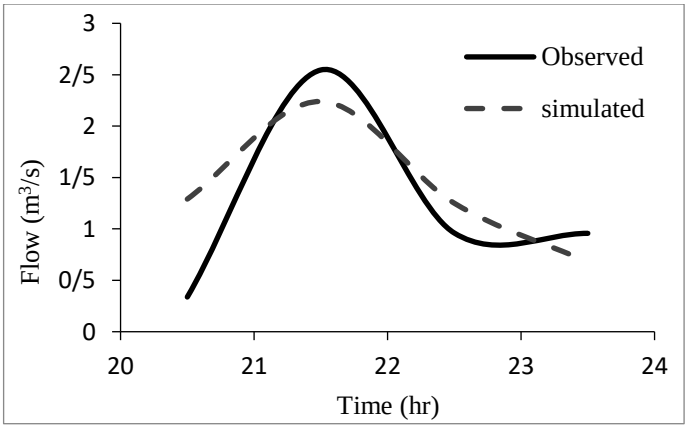
پس از بررسی نتایج تحلیل حساسیت، تدقیق پارامترها بر اساس هفت رخداد بارش اندازه‌گیری شده انجام گرفت (جدول ۲). در این مرحله چهار رخداد برای واسنجی و سه رخداد برای صحت سنجی استفاده گردید. یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در حساسیت داده‌های دبی خروجی درصد سطوح نفوذ ناپذیر می‌باشد که تاثیر زیادی بر روی کل حجم و دبی اوج رواناب دارد. شیب و ضریب مانینگ نیز بر روی زمان دبی اوج تاثیرگذار است.بر اساس نتایج واسنجی مدل، با افزایش ۱۲ درصدی ناحیه نفوذناپذیر، ۱۸ درصدی شیب و ۱۹ درصدی عرض معادل و کاهش ۵ درصدی ضریب مانینگ مناطق نفوذناپذیر، بهترین تطابق حجم و دبی اوج رواناب با داده‌های مشاهداتی صورت گرفت. مقادیر ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر به ترتیب ۱/۷ و ۳/۶ میلیمتر تخمین زده شد. نتایج حاصل از تغییر پارامترها و واسنجی مدل، در جدول (۳) برای زیرحوضه‌های خضر بیان شده است.

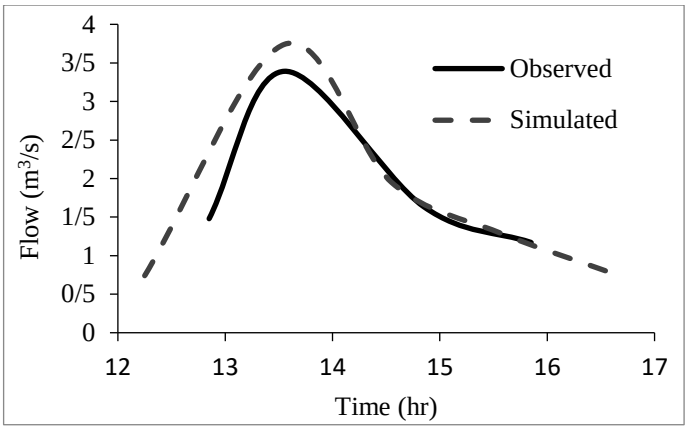
جدول (۳): مقادیر پارامترهای مدل کالیبره شده

Sub-basins	Area (ha)	With (m)	Slope (%)	Imperv (%)	N-Imperv ($s/m^{1/3}$)	N-Perv ($s/m^{1/3}$)
M1	۲۵۱۵	۲۸۴۱	۳۱	۲/۲	۰/۰۱۹	۰/۰۵
M2	۳۸۶	۱۳۷۲	۷/۷	۲۱/۴	۰/۰۱۹	۰/۱۵
M3	۳۱۶	۱۱۱۹	۵/۱	۲۷/۳	۰/۰۱۹	۰/۱۵
M4	۹۷۸	۱۹۳۰	۸/۵	۳/۱	۰/۰۱۱	۰/۱۰
M5	۴۱۸	۱۵۵۶	۸/۸	۲/۳	۰/۰۱۹	۰/۰۵
M6	۳۲۷	۱۰۳۰	۲۹/۵	۲/۲	۰/۰۱۹	۰/۰۵
M7	۳۳۹	۱۰۷۷	۸/۰	۲۲/۵	۰/۰۱۱	۰/۱۵
M8	۶۷۰	۱۶۶۰	۱۳/۶	۳۳/۹	۰/۰۱۱	۰/۱۵
M9	۲۰۱	۷۹۹	۳/۰	۷۵/۸	۰/۰۱۱	۰/۱۵
M10	۱۰۸۵	۱۷۶۶	۳/۹	۲۷/۶	۰/۰۱۱	۰/۱۵
M11	۳۱۷	۱۳۲۴	۱/۸	۷۰/۷	۰/۰۱۱	۰/۱۵
M12	۴۱۸	۱۳۷۶	۲/۱	۴/۴	۰/۰۱۱	۰/۱۵

پس از واسنجی مدل، جهت اطمینان از نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل، مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب در سه رخداد دیگر برای صحت‌سنجی با نتایج شبیه‌سازی در این رخدادها تطبیق داده شد. هیدروگراف رواناب شهری مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حوضه خضر در شکل (۲) مشاهده می‌شود.


Observed
Simulated
Flow (m3/s)
Time (hr)
0
1
2
3
4
5
6
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14


Observed
simulated
Flow (m3/s)
Time (hr)
0
0/5
1
1/5
2
2/5
3
20
21
22
23
24



شکل (۲): مقایسه هیدروگراف‌های جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب در رخدادهای ۲، ۵ و ۷

بر اساس نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل برای سه رخداد بارش، مقادیر شاخص NS بین ۰/۹۵ - ۰/۶۱، شاخص RMSE بین ۰/۲۶-۰/۱۴ و شاخص درصد BIAS، بین ۱۳/۶- تا ۱۸/۸ می‌باشد. بر اساس یافته‌های بدیع زادگان و همکاران (۱۴۰۰) و جمشیدی و همکاران (۱۳۹۹) این مقادیر، بیان‌گر انطباق خوب رواناب مشاهداتی و مدل‌سازی شده در حوضه خضر است. مقادیر شاخص‌های صحت‌سنجی مدل برای سه رخداد انتخاب شده در جدول (۴) بیان شده است. پژوهشگران میزان اختلاف دبی اوج مدل و مشاهده شده را تا ۲۵ درصد و میزان خطای حجم رواناب مشاهده‌ای و مدل‌سازی را در طی ۲/۵ ساعت را تا ۲۰ درصد قابل‌قبول تعریف کردند (Temprano 2006).

جدول (۴): نتایج معیارهای صحت‌سنجی

رخداد	%BIAS	RMSE	NS
۲	۱۸/۸	۰/۲۶	۰/۹۱
۵	-۱۳/۷	۰/۲۹	۰/۶۹
۷	-۱۳/۶	۰/۱۴	۰/۹۵

با توجه به روند رو به رشد شهرهای در حال توسعه لازم است، نوع و میزان تغییرات در چرخه هیدرولوژی مشخص و برای برنامه‌ریزی و مدیریت آن اندیشیده شود. همچنین با توجه به اینکه بارش‌ها با شدت‌های بیشتر، موجب افزایش حجم و دبی اوج رواناب می‌شود، بررسی آماری بارش ضروری است. در حوضه شهری همدان نیز هرساله با توسعه مناطق شهری و صنعتی، سطوح نفوذناپذیر حوضه افزایش می‌یابد. تحقیقات میدانی و طرح جامع شهری نشان می‌دهد، به طور متوسط هر سال یک درصد بر مناطق نفوذناپذیر شهرهای درحال توسعه اضافه می‌شود. بر این اساس دو سناریو برای سال ۱۴۲۰، با ثابت در نظر گرفتن افزایش سطوح نفوذناپذیر به مقدار ۲۴ درصد و تداوم بارش مختلف با دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰ سال طراحی گردید (جدول ۵).

جدول (۵): شدت بارش در دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰ ساله در ایستگاه فرودگاه (mm/hr)

تداوم بارش (دقیقه)	۳۰	۶۰	۹۰
دوره بازگشت ۲۵ ساله	۱۲/۰۶	۱۱/۷۲	۱۰/۶۹
دوره بازگشت ۵۰ ساله	۱۳/۳۹	۱۳/۰۶	۱۲/۱۲

شدیدترین سیلاب، از بارانی ناشی می‌شود که تداوم آن برابر زمان تمرکز حوضه آبریز باشد. زمان تمرکز، یک پارامتر فیزیکی است که مقدار آن برای هر حوضه متفاوت است که در زیر حوضه خضر زمان تمرکز در حدود ۹۰ دقیقه محاسبه شد. بر این اساس سناریو اول با دوره بازگشت ۵۰ سال و تداوم ۹۰ دقیقه و سناریو دوم با دوره بازگشت ۲۵ سال و تداوم ۶۰ دقیقه طراحی و مدل بر این اساس مجددا اجرا گردید (جدول ۶).

جدول (۶): نتایج مدل با سناریوهای تعریف شده

سناریو	Q_{pic} (m^3/s)
۱	۱۵/۹
۲	۱۵/۸

نتایج حاصل از اجرای سناریوهای تعریف شده با توجه به وضعیت کانال‌ها و معابر شهری، خطر سیلاب‌های شدید به ویژه در مناطق پائین‌دست که شیب منطقه کاهش می‌یابد را نمایان می‌سازد. بنابراین توجه مدیران شهری به پاک‌سازی و اصلاح کانال‌ها و همچنین برنامه‌ریزی و مدیریت سیلاب ضروری می‌باشد.

نتیجه‌گیری

۱- نتایج به‌دست آمده از آنالیز حساسیت مدل نشان داد که پارامترهای درصد ناحیه نفوذناپذیر، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل و شیب به ترتیب بیشترین تا کمترین حساسیت نسبت به تغییرات دبی اوج و درصد ناحیه نفوذناپذیر، ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل، ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر و شیب به ترتیب بیشترین تا کمترین حساسیت را نسبت به حجم رواناب را دارند.

۲- نتایج حاصل از واسنجی مدل در زیرحوضه خضر نشان داد با افزایش ناحیه نفوذناپذیر، شیب و عرض معادل به ترتیب به میزان ۱۲، ۱۸ و ۱۹ درصدی و کاهش ۵ درصدی ضریب زبری مانینگ مناطق نفوذناپذیر، بهترین تطابق حجم و دبی اوج رواناب با داده‌های مشاهداتی حاصل می‌شود. نتایج صحت‌سنجی مدل نیز، حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی رواناب سطحی زیرحوضه مزبور دارد.

۳- افزایش سطوح نفوذناپذیر در اثر توسعه شهری و همچنین وقوع بارش‌های با تداوم کمتر، موجب افزایش قابل توجه دبی اوج رواناب و در اثر عدم توجه به بهبود و اصلاح سیستم زهکشی شهری، باعث ایجاد مخاطرات اقتصادی و اجتماعی ناشی از سیلاب خواهد شد.

۴- مدل مدیریت رواناب شهری (SWMM)، ابزاری کارآمد برای مدل‌سازی رواناب شهری بوده و با توجه به ابزارها و خروجی‌های مدل، از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی و مدیریت بحران ناشی از سیلاب استفاده نمود.

منابع

احمدزاده، ح.، ر، سعیدآبادی و ا. نوری. ۱۳۹۴. بررسی و پهنه‌بندی مناطق مستعد به وقوع سیل با تأکید بر سیلاب‌های شهری (مطالعه موردی: شهر ماکو). هیدروژئومورفولوژی، دوره ۲، شماره ۲، ص ۱-۲۴.

بدیعی‌زاده، س.، ع. بهره مند و ا. دهقانی. ۱۳۹۵. کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولیکی- هیدرولوژیکی SWMM به منظور شبیه سازی رواناب سطحی (مطالعه موردی: شهر گرگان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۷، شماره ۱۴، ص۱۰-۱.

بدیع زادگان، ر.، س.ر. خداشناس و ک. اسماعیلی. ۱۴۰۰. آنالیز حساسیت پارامترهای تاثیرگذار بر نتایج رواناب شهری در مدلSWMM (مطالعه موردی : حوضه آبریز شمال شهر تهران). نشریه مهندسی عمران مدرس، دوره ۲۱، شماره ۵، ص ۷۳-۶۳.

ترنجیان، ا. ۱۳۹۶. مدل‌سازی کمی و کیفی رواناب در حوضه شهری همدان با استفاده از مدل مدیریت رواناب سطحی (SWMM)، رساله دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۹۵ ص.

جمشیدی، ب.، ی. طهماسبی بیرگانی، م. جعفرپور، ن. علوی بختیاروند، ع.ا. بابایی، ع. حقیقی و غ گودرزی. ۱۳۹۹. تعیین پارامترهای مدل کمی- کیفی رواناب شهر شوشتر با استفاده از واسنجی مدل SWMM. مجله پژوهش در بهداشت محیط، دوره ۶، شماره ۳، ص ۲۳۹-۲۴۹.

فرخ زاده، ب.، ا. کیانی و ا. بذرافشان. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل هیدرولوژیکی - هیدرولیکی SWMM در مدیریت رواناب‌های شهری (مطالعه موردی: منطقه ۱۲ شهرداری تهران. مجلیه اقتصاد و برنامه ریزی شهری، دوره ۱، شماره ۴، ص ۲۵۱-۲۴۳.

یوسفی، ع.، ص. خلیلیان و ح. بلالی. ۱۳۹۰. بررسی اهمیت راهبردی منابع آب در اقتصاد ایران با استفاده از الگوی تعادل عمومی. مجله اقتصاد و توسعه کشاورزی، دوره ۲۵، شماره ۱، ص ۱۲۰-۱۰۹.

Abdul-Aziz, O. and 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

Cai, Q.-C.; Hsu, T.-H.; Lin, J.-Y. (2021). Using the General Regression Neural Network Method to Calibrate the Parameters of a Sub-Catchment. Water, 13, 1089. https:// doi.org/10.3390/w13081089

Chen J, Theller L, Gitau MW, Engel BA, Harbor JM. (2017). Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States. Journal of environmental management. (187):470-81.

Donquan, Z. Jining, C. Haozheng, W. Qingyuan, T. shangbing, C. and Zheng, S. (2009) .GIS-based urban rain fall-run off modeling using an automatic catchment-discretization approach: a case study in Macaa. Environ. Earth Sci. 59: 465-472.

Gautam, D.K., and K .P., Holz. (2001). Rainfall runoff modeling using adaptive neuro-fuzzy systems, J. Hydro Information, 3:3-10.

Nicole, G. Beck, G. C., Kanner, L., Mathias, M. (2017). An urban runoff model designed to inform stormwater management decisions. Journal of Environmental Management, 193, 257-269.

Parson, P., Baldassareeg, G., Shrodor, J. (2015). HydroMeteorological Hazards,Risks and Disaster. Elsivier, 35-64.

Santhi, C. Arnold, J.G. Williams, J.R. Dugas, W.A. Srinivasan, R. and Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. J. Am Water Resour Assoc 37(5):1169-1188

Shen, J. and Zhang, Q. (2014). Parameter Estimation Method for SWMM under the Condition of Incomplete Information Based on GIS and RS. EJGE. Pp: 6095-6108.

Sourisseau, S. Basser, A. Perie, F. and Caquet, T. (2008). Calibration, validation and sensitivity analysis of an ecosystem model applied to artificial streams. Water Research, 42(4):1167-1181.

Temprano, J. Arango, O. Cagiao, J. Suarez, J. and Tejero, I. (2006). Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain".Water SA. 32(1):55-63.

Tolson, B.A. and Shoemaker, C.A. (2007). Cannonsville reservoir watershed SWAT2000 model development, calibration and validation. J Hydrol 337(1–2):68–86.

Yao, L., Chen, L., Wei, W., Sun, R. (2015). Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis. Urban Forestry & Urban Greening, 14(2), 300-308.

Yazdi, M. N., Ketabchy, M., Sample, D. J., Scott, D., & Liao, H. (2019). An evaluation of HSPF and SWMM for simulating streamflow regimes in an urban watershed. Environmental Modelling & Software, 118, 211-225.