



Investigating the effectiveness of the SWMM model in simulating and evaluating the capacity of Kalat Naderi urban channels for the passage of flood flows

Zinat Hesami^a, Mohammad Taghi Dastorani^{b*}, Fateme Rezaei Garavi^c

^aMSc Graduate in Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

^bProfessor in watershed sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

^cPhD in Watershed Sciences and Engineering, Regional Water Company of Kalat-Nader, Razavi Khorasan Province, Iran.

Received: 30 July 2023

Revised: 21 September

Accepted: 19 November 2023

Abstract

Urban development and industrialization, combined with the lack of proper drainage systems and the disorder of canals and channels, have had adverse effects on urban areas, leading to flooding of roads and inundation. This research, conducted in a region of Kalat city, aimed to analyze these issues. First, the physical characteristics of the area—such as area size, slope, equivalent width, percentage of impervious surfaces, and other parameters—were estimated. After determining the average water flow velocity, the concentration time of the study area was calculated based on the length of the largest waterway.

Using rainfall parameters such as intensity-duration-frequency (IDF) and the temporal and spatial distribution of rainfall, the SWMM (Storm Water Management Model) was simulated, sensitivity-analyzed, and evaluated for different return periods. Sensitivity analysis revealed that among the eight parameters analyzed, the percentage of impervious surfaces had the greatest effect on peak flow rate.

To calibrate and evaluate the model, five measured events were analyzed. Three events were used for calibration, where criteria such as Nash-Sutcliffe Efficiency (NS), Root Mean Square Error (RMSE), BIAS%, and Kling-Gupta Efficiency (KGE) were employed to assess performance. The calibration results indicated good agreement between simulated and observed runoff, with NS values greater than 0.5 for all three events.

For model evaluation, two additional events were analyzed using the same criteria. The RMSE values for the calibration simulations were 0.01, 0.003, and 0.01 cubic meters per second, respectively, while the RMSE values for the evaluation simulations were 0.04 and 0.04 cubic meters per second. These results demonstrate the model's acceptable performance.

The findings indicate a strong agreement between simulated and observed runoff, proving that the SWMM model has the required accuracy for urban runoff simulation. Thus, this model can be effectively used for urban runoff management plans and drainage network design. Additionally, it was determined that the upstream watershed of the study area, characterized by good permeability and a small size, supports channels with suitable dimensions for return periods ranging from 2 to 50 years.

Keywords: Urban runoff, SWMM model, Drainage System, Sensitivity Analysis, Rainfall-Runoff Simulation, Calibration and Evaluation.

*.Corresponding author: Mohammad Taghi Dastorani

Email:dastorani@um.ac.ir


Tel:+989133575425


How to cite this Article: Hesami, Z., Dastorani, M. T., & rezayi, F. (2024). Investigating the effectiveness of the SWMM model in simulating and evaluating the capacity of Kalat Naderi urban channels for the passage of flood flows. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(3), 56-74.





بررسی کارایی مدل SWMM در شبیه‌سازی و ارزیابی ظرفیت کانال‌های شهری کلات نادری جهت عبور جریان‌های سیلابی

زینت حصامی - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران 

محمدتقی دستورانی^۱ - استاد دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران 

فاطمه رضایی - دکترای علوم و مهندسی آبخیز، کارشناس شرکت آب منطقه‌ای شهرستان کلات نادر، خراسان رضوی ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۸

چکیده

توسعه شهری و صنعتی‌شدن جوامع و همچنین عدم وجود سیستم زهکشی مناسب و نابسامانی کانال‌ها و مسیل‌ها تأثیرات نامطلوبی بر حوزه‌های شهری داشته و سبب آبرگرفتی معابر سطح شهر و ایجاد سیلاب می‌گردد. در این تحقیق که در منطقه‌ای از شهر کلات انجام شد، ابتدا مشخصات فیزیکی حوزه (مساحت، شیب، عرض معادل، درصد مناطق نفوذناپذیر و سایر پارامترها) برآورد و پس از تعیین سرعت متوسط آب، زمان تمرکز منطقه مورد مطالعه با توجه به طول بزرگ‌ترین آبگذر تعیین گردید. سپس با استفاده از پارامترهای بارندگی همچون شدت-مدت- فراوانی و توزیع زمانی و مکانی بارش مدل مذکور برای دوره بازگشت‌های مختلف شبیه‌سازی، آنالیز حساسیت و ارزیابی گردید. با انجام آنالیز حساسیت مشخص شد از بین ۸ پارامتر استفاده شده بیشترین تأثیر را درصد مناطق نفوذناپذیر روی میزان دبی اوج دارد. برای واسنجی و ارزیابی مدل از ۵ واقعه اندازه‌گیری شده استفاده شد و نتایج آن با دبی محاسبه شده توسط مدل مقایسه شد. سه واقعه برای واسنجی مدل استفاده شد و جهت تجزیه و تحلیل نتایج از عوامل معیار Nash، RMSE، BIAS% و KGE استفاده گردید. نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که شبیه‌سازی سه واقعه انتخاب شده انطباق خوبی بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد که مقدار NS برای وقایع بیشتر

از ۰.۵ می‌باشد. دو واقعه نیز برای ارزیابی مدل استفاده شد و جهت تجزیه و تحلیل نتایج از عوامل معیار ذکر شده در مرحله واسنجی استفاده شد. همچنین مقادیر RMSE برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از واسنجی مدل SWMM به ترتیب برابر ۰.۰۱، ۰.۰۰۳ و ۰.۰۱ مترمکعب بر ثانیه و برای وقایع شبیه‌سازی حاصل از ارزیابی مدل ۰.۰۴، ۰.۰۴ مترمکعب بر ثانیه شد که نشان‌دهنده‌ی نتایج قابل قبول مدل است. در نتیجه می‌توان گفت انطباق خوبی بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد و این موضوع نشان می‌دهد 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 با تعیین اثرات مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر میزان رواناب شهری در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. با توجه به اینکه حوزه آبخیز بالادست منطقه مطالعاتی نفوذپذیری مناسبی داشته و همچنین وسعت زیادی ندارد کانال‌ها برای دوره بازگشت‌های ۲ تا ۵۰ ساله دارای ابعاد مناسب هستند.

کلیدواژه‌ها: رواناب شهری، مدل SWMM، سیستم زهکشی، تحلیل حساسیت، شبیه‌سازی بارش-رواناب، کالیبراسیون و ارزیابی.

۱-مقدمه

باران یکی از رویدادهای طبیعی است که اگر بتوانیم راهکارهای مناسبی را برای جمع‌آوری درست و به موقع انجام دهیم می‌تواند بسیاری از نیازهای ضروری بشر را تأمین کند. هرگاه بارانی با شدت زیاد بر روی حوضه‌ای می‌بارد، به دلیل کاهش نفوذپذیری خاک در همان اوایل بارندگی، آب بر روی خاک جاری شده و از طریق مسیل‌ها به رودخانه‌ها می‌پیوندد. نقش مسیل‌ها در هدایت و انتقال آب جاری شده به سمت رودخانه‌ها غیرقابل انکار بوده که در صورت نادیده گرفتن شرایط مورفولوژیکی آن و دخل و تصرف در حریم آن، می‌تواند باعث به وجود آمدن خسارات مالی و جانی شود (Alizadeh, 2015). تغییر الگوی استفاده از زمین و افزایش سطوح شهری باعث بر هم خوردن پروسه‌های هیدرولوژیکی منطقه و بر هم خوردن تعادل طبیعی آب می‌گردد. کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب، منجر به افزایش پیک سیلاب حتی در بارش‌های کم در دوره زمانی کوتاه مدت می‌گردد. در حوضه‌های شهری حدود ۹۰٪ اما در حوضه‌های غیرشهری (حوضه‌های جنگلی) ۲۵٪ از بارندگی به رواناب تبدیل می‌شود (Sheng & Wilson, 2009) فشار فعالیت‌های مضر بشری اغلب سبب افزایش سیلاب‌ها می‌شود (Istomina, Kocharyan & Lebedeva, 2005).

سیلاب جریان‌های شدید رودخانه‌ها و طغیان سیلاب دشت‌هاست که به‌عنوان یک پدیده طبیعی در تنظیم چرخه بیوژئوشیمیایی سطح زمین و ذخیره سازی آب نقش اساسی دارد، اما وقوع آن در مناطق مسکونی و در زمان‌های خاص، می‌تواند ویرانگر بوده و ناپایداری سکونتگاه‌های انسانی را فراهم آورد (Paron, Di Baldassarre & Shrodor, 2023). در صورتی که این رویداد به‌صورت غیرمنتظره و با شدت زیاد باشد می‌تواند باعث ایجاد خسارات فراوانی گردد. مطالعه پارامترهای محیطی که باعث ایجاد سیل می‌شود بیانگر این است که دخالت‌های انسان در چرخه طبیعی آب به‌وسیله تخریب پوشش گیاهی در عرصه آبخیز، استفاده غیراصولی از اراضی، افزایش سطوح نفوذناپذیر و مانند آن امکان به وقوع پیوستن سیل در مناطق مختلف را فراهم می‌کند (Ghanavati, Karam & Aghaalikhani, 2013). پراکنندگی‌های نامنظم زمانی و مکانی بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باعث ایجاد سیلاب‌های ویرانگر و همچنین هدر رفتن آب‌های سطحی است که موضوع بسیار حائز اهمیتی است. به همین جهت مهار رواناب‌های سطحی و بهره‌برداری مناسب از آن می‌تواند راهکار مناسبی برای جلوگیری از هدر رفتن آب و تبدیل تهدید به فرصت می‌باشد. مشخص نمودن مناطق مستعد تولید رواناب و سیل و مناطق در معرض آبرفتگی یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در موفقیت طرح‌های مدیریت سیلاب است (Ahmadzadeh, Saeedabadi & Nouri, 2015). تعیین نقش عوامل انسانی یا ساخت‌وسازهای بدون برنامه در آبرفتگی معابر و همچنین طراحی و احداث آگذرها بدون در نظر گرفتن شیب و شکل زمین در آبرفتگی بالاترین نقش را دارا می‌باشد (Afshari Azad & Pourkey, 2012). بی‌شک برای رفع معضلاتی همانند ورود سیلاب به پهنه شهرها، آبرفتگی معابر، نامناسب بودن و نبود امکانات زیر بنایی برای ایجاد فضاهای سبز درون و پیرامون شهرها بخصوص برای ایجاد تفرجگاه و پناهگاه‌های و نقاط امن برای استفاده در زمان وقوع حوادث غیرمترقبه توجه به آبخیزداری شهری در کشور نه‌تنها ضرورتی گریزناپذیر است بلکه یک الزام است (Fallah Zawareh, Kamali & Mirzaei, 2013) شهری شدن فرآیندی است که در طی آن اراضی طبیعی و کشاورزی به مناطق ساخته دست بشر مبدل می‌شود و برنامه‌ریزی برای توسعه و گسترش شهرها در درجه اول نیازمند شناخت ویژگی‌های زیربنای شهری است. در نواحی شهری بخش زیادی از زمین به‌وسیله مواد غیرقابل نفوذ پوشیده شده است که ویژگی‌های این مواد کاهش نفوذناپذیری و تشکیل سریع رواناب سطحی است که باعث ایجاد سیل بدون ارتباط با دشت سیلابی

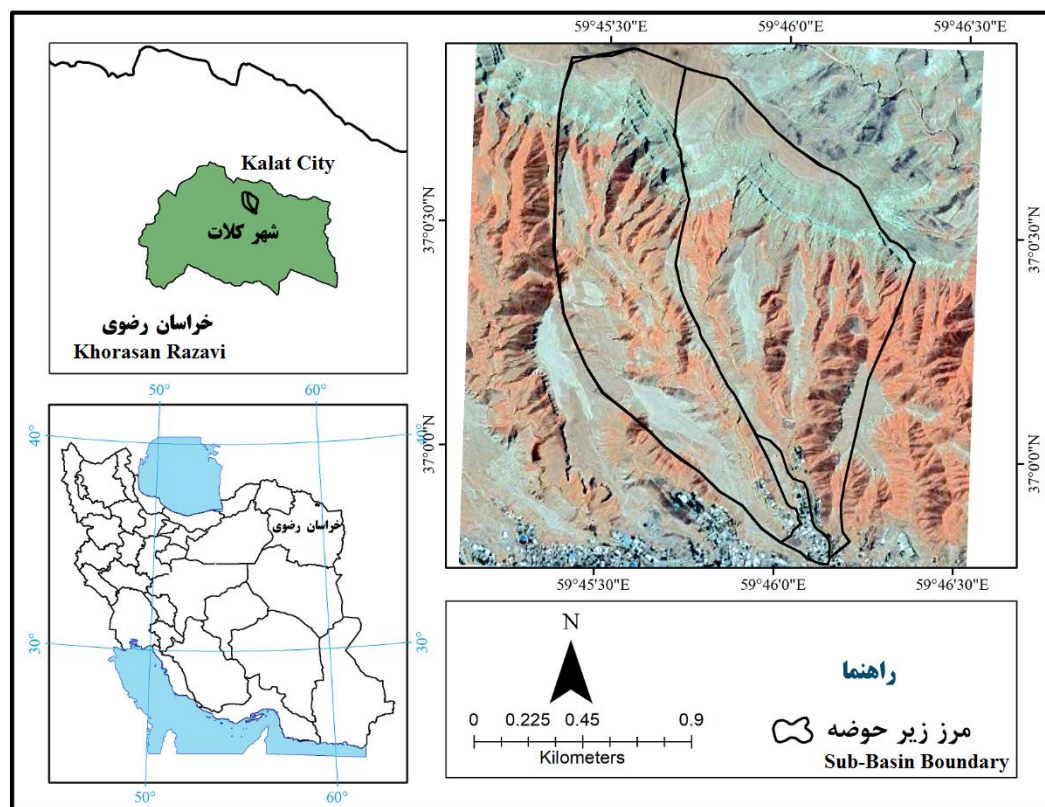
می‌شود. البته باید توجه داشت که پیچیدگی‌های محیط شهری و زیرساخت‌های مربوط به زهکشی تأثیر زیادی بر تشکیل رواناب سطحی دارد (Chen, Hill & Urbano, 2009). حجم رواناب در حوزه‌های شهری به میزان زیادی تحت تأثیر ویژگی‌های سطوح نفوذناپذیر است (Ogden, Pradhan, Downer & Zahner, 2011). یکی از معضلات مدیریت در بخش شهری، جمع‌آوری رواناب‌های شهری در هنگام بارش و جلوگیری از خسارت به تأسیسات شهری می‌باشد که با توجه به اهمیت این موضوع بررسی و برآورد سیلاب‌های شهری، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در حوزه‌های شهری دبی اوج سیلاب برای طراحی شبکه زهکشی و انتقال رواناب بسیار مؤثر است (Khorsandi Kouhanestani & Zolfaghary, 2016). حال در شرایطی که شبکه زهکشی به شکل مناسبی طراحی نشده یا ناقص شکل گرفته باشد موجب تمرکز بیشتر رواناب‌ها در مناطق با شیب کمتر می‌شود یا اینکه از به هم پیوستن رواناب‌های متعدد در نقاطی با شیب بیشتر، جریان‌های سیلابی با قدرت تخریب بالا تشکیل می‌گیرد. در این حالت جریان معمول نداشته و سبب بحران‌آفرینی می‌شود. هر چه حجم آب و میزان شیب بیشتر باشد قدرت تخریب آن بالاتر می‌رود. در نقاط سکونت‌گاهی شاید حتی فرصت تخلیه ساکنین فراهم نشود (Hejazizadeh, Khosravi & Naserzadeh, 2011). اتخاذ روش‌های صحیح در مدیریت آبخیزهای شهری امری انکارناپذیر و ضروری است از این رو مدیران و برنامه‌ریزان شهری برای اجرای این امر مهم به برآورد میزان رواناب با درجه اطمینان بالایی نیاز دارند (Shahbazi, Khaliqi Sygarodi, Malekian & Salajegheh, 2014). یکی از کلیدی‌ترین فعالیت‌ها در حوزه عمران و بهسازی شهری، جمع‌آوری، هدایت و مدیریت رواناب‌های سطحی است. به همین جهت موضوع جمع‌آوری، هدایت و بازیابی رواناب‌های سطحی امروزه به یکی از مسائل مهم در اداره کلانشهرها مبدل شده است. مدیریت یکپارچه‌ی حوضه‌های آبخیز، تضمین‌کننده‌ی استفاده‌ی بهینه از منابع آب‌و‌خاک در اکوسیستم‌های طبیعی و غیرطبیعی است. برای رسیدن به این هدف، به اطلاعات جامعی از رویکردهای متفاوت مدیریتی و اجرایی و نیز ویژگی‌های فیزیکی، اقتصادی-اجتماعی و اکولوژیک حوضه‌های آبخیز نیاز است (Yarahmadi, Yousefi, Jahangir & Sadatineghad, 2019). سامانه‌های جمع‌آوری و کنترل آب‌های سطحی ناشی از بارندگی از اجزاء مهم برنامه‌ریزی و عمران مناطق شهری هستند و هرگونه سهل‌انگاری در طراحی صحیح آن‌ها می‌تواند برای جوامع شهری مشکل‌آفرین باشد. لذا به منظور پیش‌بینی عملکرد

هیدرولیکی کل سامانه، نیاز به استفاده از روش‌های محاسباتی پیشرفته و مدل‌سازی‌های جدید و کارآمدتر وجود دارد. کاهش پیامدهای زیان‌بار ناشی از سیلاب‌های شهری معمولاً با برآورد دقیق رواناب شهری و انتخاب روش مناسب کنترل آن محقق می‌شود. به این منظور، لازم است میزان رواناب شهری به‌درستی برآورد شود که به این منظور محققین در سال‌های اخیر به مدل‌سازی روی آورده‌اند. از جمله مدل‌های پر کاربرد در مدیریت رواناب مدل SWMM به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای محاسبات زهکشی شهری و مدیریت رواناب می‌باشد (Arman, Shahbazi, Faraji & Dehdari, 2019). SWMM یک مدل توزیعی است، بدین معنی که منطقه مورد مطالعه را می‌توان به هر تعداد از زیر حوزه‌های نامنظم تقسیم نمود تا بتوان اثرات تغییرپذیری مکانی در توپوگرافی، مسیر عبور زهکش‌ها، پوشش اراضی و خصوصیات خاک در تولید رواناب را به‌طور کامل دخالت داد (Soleimani, Behzadian & Ardeshir, 2016). جهت جمع‌آوری و مدیریت این رواناب‌ها لازم است شبکه زهکشی و کانال‌های شهری از ظرفیت و کارایی لازم برخوردار باشند. هدف از تحقیق حاضر بررسی کارایی شبکه زهکشی شهری در بخشی از شهر کلات نادر است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان کلات از شهرستان‌های استان خراسان رضوی می‌باشد. این شهرستان در شمال شرقی ایران و خراسان قرار گرفته است که در مختصات جغرافیایی ۵۹ درجه و ۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه تا ۶۰ درجه و ۲۷ دقیقه و ۲۵ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. حوزه آبخیز شهری کلات مساحتی در حدود ۱۵۸۶۹.۲۳ هکتار را دارا می‌باشد. این حوزه به‌صورت یک حوزه آبخیز هیدرولوژیک بوده و تمامی رواناب آن از طریق رودخانه کلات عبور نموده و از کشور خارج می‌گردد. (شکل ۱)



شکل ۱- مشخصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Geographical characteristics of the study area

۲-۲- محاسبه پارامترهای مورد نیاز مدل SWMM

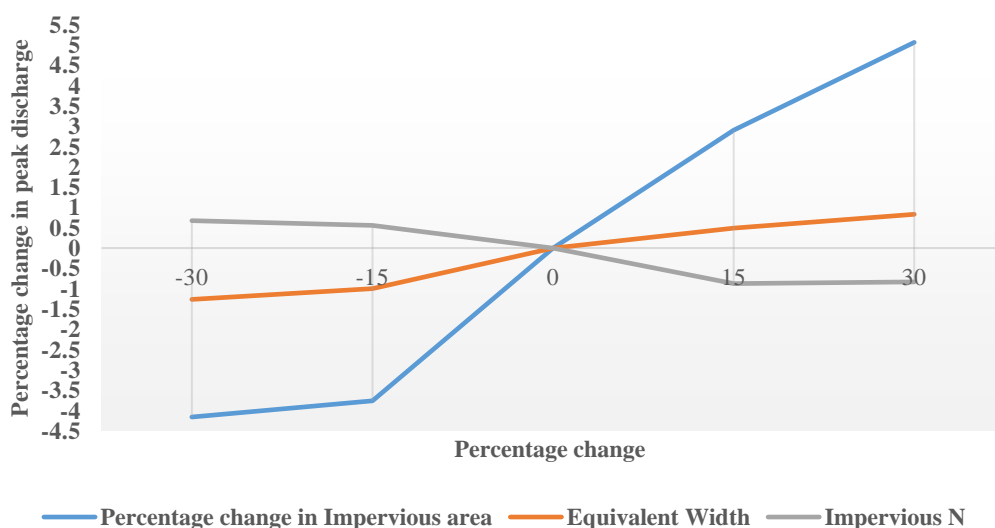
به منظور شبیه‌سازی بارش- رواناب از مدل SWMM استفاده شد. تعیین مرز حوزه‌ها و زیر حوزه‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۰۰۰، نقشه‌های بلوک‌های ساختمانی اداره راه و شهرسازی، بازدیدهای میدانی و نیز با توجه به شیب و نحوه حرکت آب و خروجی مربوط به هر زیر حوزه انجام گردید. برای محاسبه عرض معادل از روش مستطیل معادل استفاده شده است. برای تعیین ضریب زبری جریان روی سطوح نفوذپذیر، نفوذناپذیر و آبگذرها و همچنین تعیین ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر از راهنمای مدل و جداول کمکی استفاده شده است. به منظور تعیین میزان نفوذ روش حفاظت خاک آمریکا (SCS) به کار برده شده است. اطلاعات مربوط به آبگذرها (شکل مقطع، بیشینه عمق و طول آبگذر)، اطلاعات اتصالات (رقوم کف آبگذر در محل اتصال، بیشینه عمق اتصال) و در نهایت اطلاعات مربوط به

رقوم کف گره خروجی از طریق بازدیدهای میدانی انجام شده است. همچنین اطلاعات مربوط به مساحت، محیط، شیب و طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه که در بخش های مختلفی از مدل استفاده شده به وسیله نرم افزار GIS استخراج گردیده است.

۳-۲- واسنجی مدل SWMM

در این مطالعه برای بررسی حساسیت مدل بارش-رواناب، از روش آنالیز حساسیت مطلق استفاده شد. به این ترتیب که مقدار اولیه هشت پارامتر مؤثر ارائه شده در جدول (۱)، ۳۰ درصد کاهش و افزایش یافته و مدل برای آن ها اجرا شد. این کار با استفاده از هیتوگراف های تولید شده در روش بلوک های تناوبی با دوره بازگشت ۲۵ سال برای کل حوضه انجام گردید و جمعاً ۴۰ بار مدل اجرا شد. به عنوان مثال اگر عرض معادل زیر حوضه ها ۳۰ درصد کاهش یابد و بقیه پارامترها ثابت باقی بماند، مقدار دبی اوج ۱/۲۶ درصد کاهش می یابد.

در شکل (۲) درصد تغییرات مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل و ضریب زبری مانینگ در مناطق نفوذناپذیر را که بیشترین تأثیرات را بر دبی اوج داشتند برای مقایسه بهتر آورده شده است.



شکل ۲- درصد تغییرات عرض معادل، درصد مناطق نفوذناپذیر، N نفوذناپذیر و تأثیر آن بر دبی اوج بر حسب درصد

Fig.2. Percentage of changes in equivalent width, percentage of Impervious areas, Impervious N and its effect on peak discharge in percentage

پس از اجرای مدل در مرحله آنالیز حساسیت و تعیین تأثیرگذارترین پارامترها از ۵ واقعه اندازه‌گیری شده سه واقعه برای واسنجی انتخاب شد. اندازه‌گیری عمق رواناب حاصل از هر واقعه بارندگی در گام زمانی ده‌دقیقه‌ای انجام گردید. برای واسنجی مدل هشت پارامتر مهم انتخاب شد. در بین این عوامل شیب، عرض معادل و درصد مناطق نفوذناپذیر با استفاده از GIS محاسبه می‌شود و خطای در محاسبه آن‌ها عمدتاً به روش محاسبه آن‌ها مربوط می‌شود. مقادیر این سه پارامتر در زیر حوضه‌های متفاوت با هم فرق دارد اما خطای در محاسبه آن‌ها با هم مشابه است (Rostami Khalaj, 2012). از آنجایی که واسنجی مدل با توجه به پارامترهای متعدد کاری سخت و زمان‌بر است برای یک واسنجی دقیق و مناسب باید پارامترها را به حداقل رساند (Jinkang, Shunping, Youpeng, Xu & Singh, 2007). در این مطالعه پارامترهای مهم انتخاب و واسنجی از آن‌ها استفاده شد و با توجه به همگن بودن منطقه مورد مطالعه برای به حداقل رساندن زمان واسنجی و بالا بردن دقت مقادیر سایر پارامترها برای تمام زیر حوضه‌ها به مقدار یکسان در نظر گرفته شد و به مقدار اولیه به میزان ثابت افزوده یا کاسته گردید. این روش به‌طور گسترده‌ای برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Temprano, Arango, Cagiao, Suarez & Tejero, 2006).

جدول ۱- مقادیر اولیه و پارامترهای مهم برای واسنجی مدل SWMM

Table- 1 Initial values and key parameters for calibrating the SWMM model

مقادیر اپتیمم Optimum Values	منبع Source	مقیاس تغییرات Scale of Changes	مقادیر اولیه Initial Values	عوامل Parameter
-	Temprano et al., 2006	30±	-	درصد مناطق نفوذناپذیر Percentage of Impervious areas
-	Temprano et al., 2006	30±	-	شیب (%) Slope%
-	Temprano et al., 2006	30±	-	عرض معادل (متر) Equivalent width
0.018	Huber & Dickinson, (1992)	0.011-0.033	0.013	N-نفوذناپذیر Impervious N
0.2	Temprano et al., 2006	0.02-0.8	0.05	N-نفوذپذیر Pervious N

2	Huber & Dickinson, (1992)	0.3-2.5	1.778	ارتفاع ذخیره مناطق نفوذناپذیر (mm) Elevation of Impervious area storage(mm)
4.1	Tsihrintzis & Hamid, (1998)	2.5-5.1	3.81	ارتفاع ذخیره مناطق نفوذپذیر (mm) Elevation of Pervious area storage(mm)
18	Huber & Dickinson, (1992)	5-20	16	درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی Percentage of Pervious areas

میزان صحت فرایند واسنجی با استفاده از معیار کارایی ضریب ناش ساتکلیف^۱ و مجذور میانگین مربعات خطا^۲، BIAS و معیار ارزیابی کلینگ - گوپتا^۳ محاسبه شد. - محاسبه این معیارها از طریق معادلات ۱ تا ۴ انجام می گیرد.

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

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

$$BIAS\% = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (3)$$

که در این معادلات؛ Q_{sim} دبی شبیه سازی شده و Q_{obs} دبی مشاهداتی و زمان t ، برابر میانگین دبی مشاهداتی و n تعداد داده ها می باشد. مقدار NS می تواند مثبت یا منفی باشد بهترین حالت زمانی است که مقدار آن برابر یک باشد. در صورتی که مقدار NS مثبت بشد نشان دهنده این است که روند داده های شبیه سازی شده بهتر از میانگین داده های مشاهداتی است و در صورتی که منفی باشد نشان می دهد که خروجی مدل با ماهیت سیستم متناظر نیست (Sourisseau, Bassères, Périé & Caquet, 2008; Arabi, Govindaraju

¹ Nash-Sutcliff

² RMSE

³ Kling-Gupta Efficiency

(Hantush, 2002 &). زمانی که مقدار NS نزدیک به یک باشد نشان‌دهنده‌ی بالا بودن دقت شبیه‌سازی است (Santhi et al., 2001). همچنین هر چه مقدار مجذور میانگین مربعات خطا کوچک‌تر باشد، تفاوت داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده کمتر بوده و دقت پیش‌بینی مدل بیشتر خواهد بود، خطای کل در حجم جریان بوده، مقادیر مثبت و منفی این ضریب نشان‌دهنده بیش‌تر یا کمتر بودن حجم جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی است.

۲-۴- معیار ارزیابی کلینگ-گوپتا *kling-Gupta Efficiency*

این معیار (KGE) معیار ارزیابی برای مقایسه هیدروگرافهای شبیه‌سازی شده و مشاهده شده می‌باشد. گوپتا و همکاران (۲۰۰۹) با معرفی این شاخص به مقایسه و بررسی مزیت‌های آن با معیار معروف ناش - ساتکلیف پرداخته‌اند. این معیار در سال ۲۰۱۲ توسط کلینگ و همکاران به‌صورت بازبینی شده (KGE) بکار گرفته شد

$$KGE = \sqrt{(r - 1)^2 + (a - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4)$$

در فرمول مذکور r ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری می‌باشد. α نسبت انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی به انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری است. β نسبت میانگین مقادیر شبیه‌سازی به میانگین مقادیر اندازه‌گیری (مشاهداتی) است. بهترین مقدار برای معیار ارزیابی کلینگ-گوپتا عدد یک می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق کامل هیدروگراف‌ها می‌باشد. در معیار بازبینی شده کلینگ-گوپتا بجای α از γ استفاده می‌شود که نسبت ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی به ضریب تغییرات مقادیر مشاهداتی می‌باشد.

۲-۵- ارزیابی مدل SWMM

پس از واسنجی مدل بر اساس بارش رواناب‌های مشاهداتی بایستی بدانیم که نتایجی که مدل ارائه می‌کند چه میزان قابل‌اطمینان است. به این فرایند صحت‌سنجی یا ارزیابی مدل گفته می‌شود. برای این منظور از ۲ واقعه برای صحت‌سنجی مدل استفاده خواهد شد. برای بررسی اینکه بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مدل چه مقدار انطباق وجود دارد از یکسری توابع احتمالی استفاده می‌شود. صحت فرآیند

ارزیابی با استفاده از معیار کارایی Nash-Sutcliffe مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، BIAS و کلینگ-گوپتا محاسبه می گردد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج واسنجی مدل SWMM

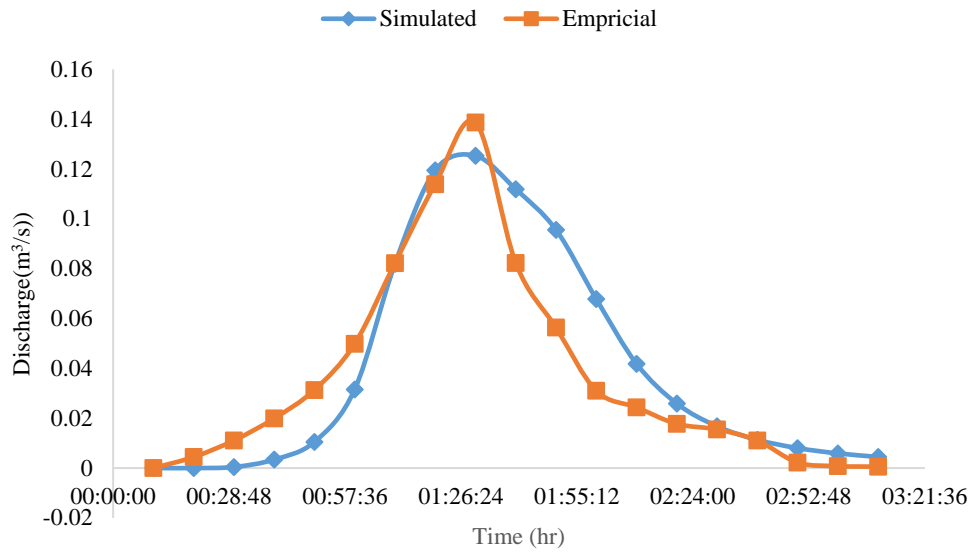
همان طور که در بخش قبل ذکر شد سه واقعه بارش-رواناب مربوط به تاریخ های ۱۴۰۱/۰۲/۰۲ (واقعه دوم)، ۱۴۰۱/۰۲/۱۱ (واقعه سوم) و ۱۴۰۱/۰۲/۱۸ (واقعه چهارم) برای واسنجی مدل استفاده شد و جهت تجزیه و تحلیل نتایج از معیارهای Nash، RMSE، BIAS% و KGE استفاده شد. اگر در فرایند واسنجی مقدار معیار Nash بیشتر از ۰/۵ باشد نشان دهنده این است که فرآیند واسنجی از دقت کافی برخوردار است و نتایج در حد معنی داری قابل قبول است (Lhomme, Bouvier & Perrin, 2004).

نتایج آماری حاصل از فرایند واسنجی در جدول (۲) آورده شده است و هیدروگراف خروجی دبی جریان وقایع در شکل های (۳) تا (۵) قابل مشاهده است.

جدول ۲- نتایج واسنجی مدل SWMM در خروجی حوزه آبخیز مورد مطالعه

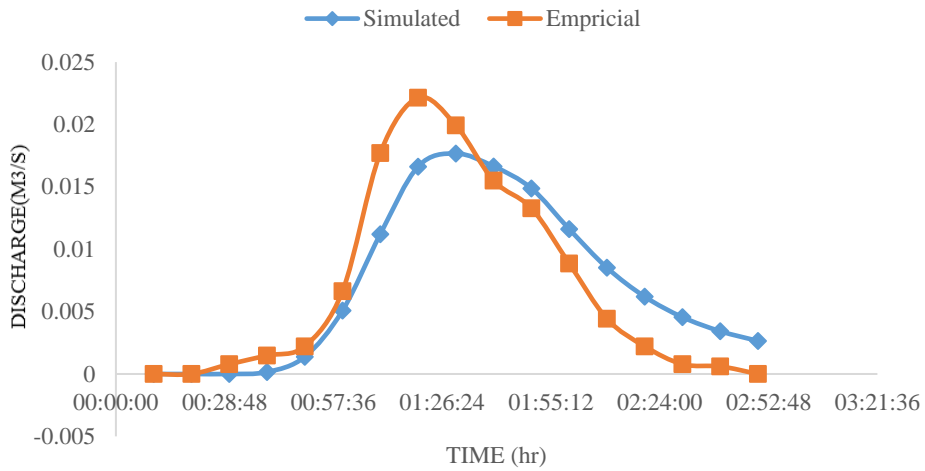
Table 2- The results of calibration of the SWMM model at the outlet of the study watershed

KGE	BIAS%	RMSE	NS	Date
0.88	0.79	0.01	0.77	2022.04.22
0.74	0.12	0.003	0.8	2022.05.01
0.54	0.59	0.01	0.77	2022.05.08



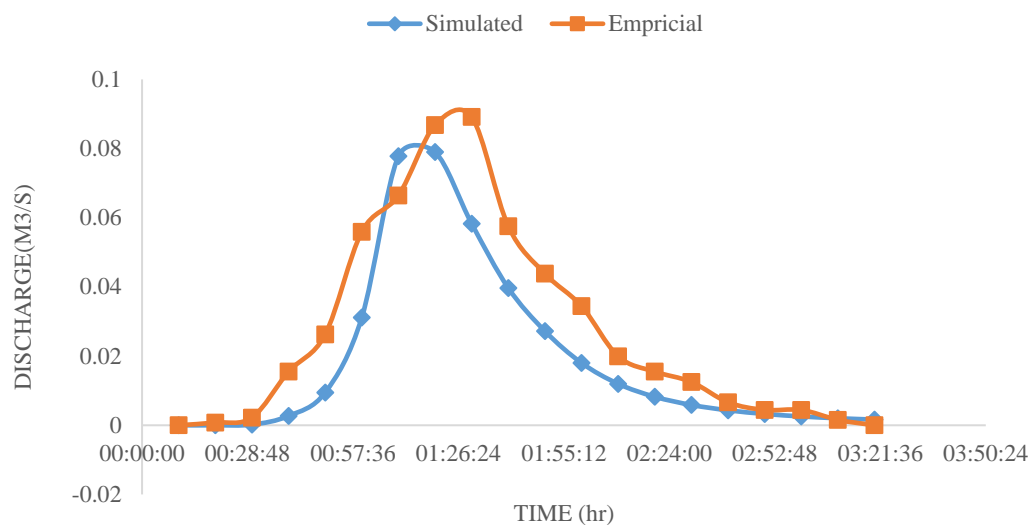
شکل ۳- هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه دوم در مرحله واسنجی مدل

Fig.3. Empirical and simulated discharge hydrographs for the second event in the model calibration stage



شکل ۴- هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه سوم در مرحله واسنجی مدل

Fig.4. Empirical and simulated discharge hydrographs for the third event in the model calibration stage



شکل ۵- هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه چهارم در مرحله واسنجی مدل

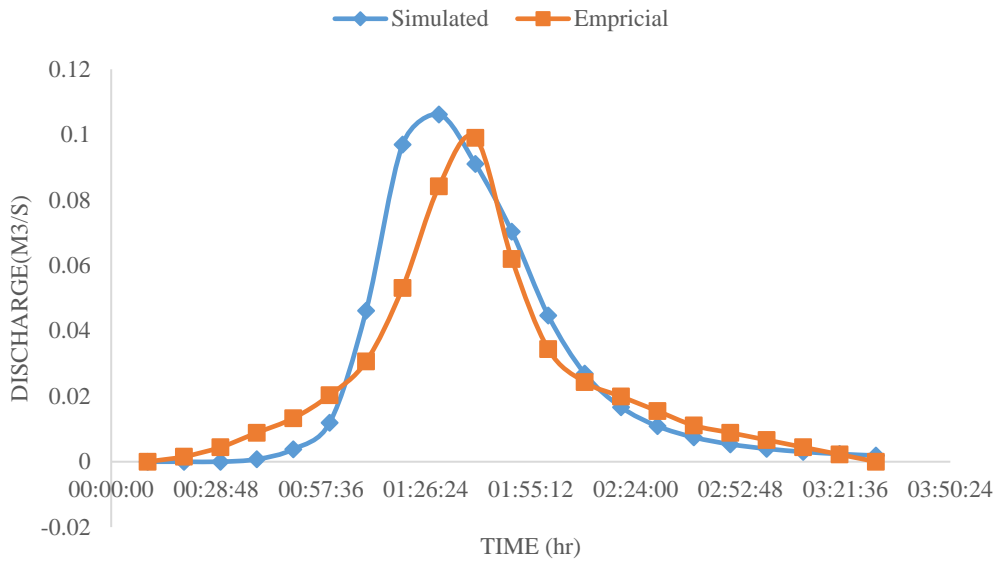
Fig.5. Empirical and simulated discharge hydrographs for the fourth event in the model calibration stage

۳-۲- نتایج ارزیابی مدل SWMM

وقایع اول و پنجم برای ارزیابی مدل استفاده شد و جهت تجزیه و تحلیل نتایج از عوامل معیار Nash، مجذور میانگین خطا (RMSE)، BIAS% و KGE استفاده شد. نتایج حاصل از فرایند ارزیابی در جدول (۳) ارائه شده است و هیدروگراف خروجی دبی وقایع اول و پنجم در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده است.

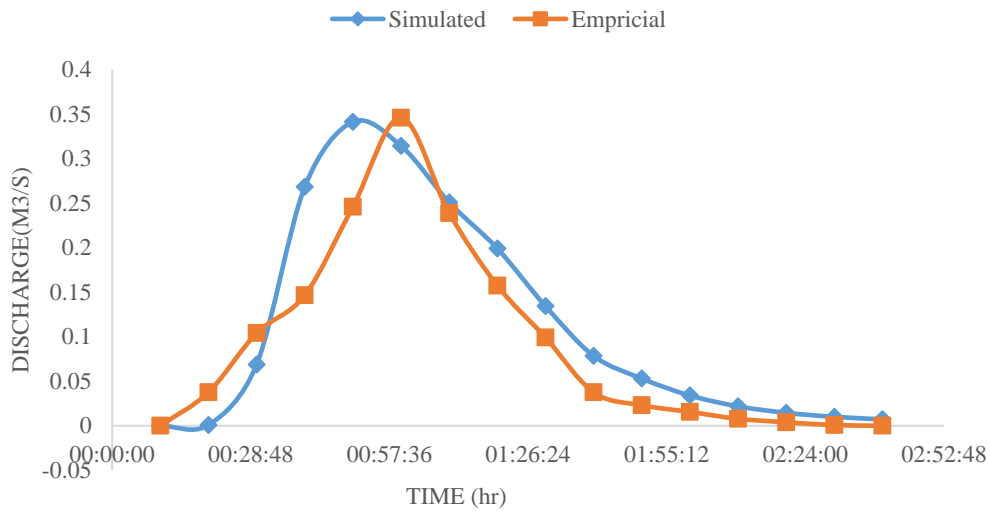
جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل SWMM در خروجی حوزه آبخیز مورد مطالعه برای وقایع اول و پنجم
Table 3- Evaluation results of the SWMM model at the outlet of the studied watershed for the first and fifth events

KGE	BIAS%	RMSE	NS	Date
0.83	6.71	0.04	0.73	2022.04.18
0.78	2.31	0.04	0.73	2022.05.09



شکل ۶- هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه اول در مرحله ارزیابی مدل

Fig.6. Empirical and simulated discharge hydrographs for the first event in the model evaluation phase



شکل ۷- هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دبی برای واقعه پنجم در مرحله ارزیابی مدل

Fig.7. Empirical and simulated discharge hydrographs for the fifth event in the model evaluation stage

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که در سه واقعه بررسی شده مقادیر برآورد شده با مقادیر مشاهده‌ای انطباق خوبی دارد و مقدار NS (ناش ساتیکلیف) برای واقعه دوم و سوم و چهارم به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۸ و ۰/۷۷ است و بیشتر از ۰/۵ می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت انطباق قابل ملاحظه‌ای بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد و این می‌تواند نشان‌دهنده‌ی این باشد که مدل SWMM دقت موردنیاز 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 که با یافته‌های فیلیپس و همکاران (Phillips, Yu, Thompson & De Silva, 2005)، زپو (Zoppou, 2001)، عینلو (Ainlou, 2014)، شهبازی و همکاران (Shahbazi et al., 2014) و رستمی (Rostami Khalaj, 2012) مطابقت دارد. علاوه بر این می‌توان از نتایج بدست آمده در فرآیند واسنجی برای برآورد مقدار بهینه پارامترها استفاده نمود و در مناطق دیگر که از لحاظ همگنی مشابه منطقه مورد نظر هستند، استفاده نمود. این نتایج با نتایج چویی و بل (Choi & Ball, 2002)، مطابقت دارد. با توجه به قابلیت‌های مدل SWMM در برآورد رواناب و فراهم کردن خروجی در هر بخش که نیاز است می‌توان نتیجه گرفت که مدل SWMM انعطاف‌پذیری قابل قبولی برای ترکیب با مدل‌های دیگر را دارد (Dongquan et al., 2009) و از هیدروگراف جریان در هر بخش به‌عنوان ورودی برای مدل‌های دیگر استفاده نمود (Lin, Hsieh, Kuo, Liao & Chen, 2006).

نتایج ارزیابی مدل SWMM کارایی و دقت مدل را تأیید کرد و در مورد دو واقعه‌ای که برای ارزیابی استفاده شد مقدار NS بالاتر از ۰/۵ اندازه‌گیری شد. مقدار ضریب ناش ساتیکلیف برای هر دو واقعه اول و پنجم ۰/۷۳ بدست آمد و کارایی مدل SWMM را برای شبیه‌سازی بارش رواناب در مناطق شهری تأیید می‌کند. همچنین مقادیر RMSE برای هر دو واقعه اول و پنجم در فرآیند ارزیابی ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه بدست آمده است که نشان‌دهنده نتایج قابل قبول مدل است. مقادیر BIAS % نشان‌دهنده درصد تغییرات بین میانگین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در n فاصله زمانی است که مقادیر بدست آمده صحت فرآیند واسنجی را تأیید می‌کنند. لذا با توجه به قابلیت و توانایی مدل SWMM و مدل ASSA در

شبیه‌سازی رواناب شهری و تعیین ابعاد بهینه شبکه زهکشی و با توجه به مشکلات آبگرفتگی منطقه مورد نظر، در این تحقیق استفاده از مدل مذکور در جهت اهداف تحقیق موردنظر مناسب تشخیص داده شد. ارزیابی عملکرد شبکه زهکشی منطقه مورد مطالعه در دوره بازگشت‌های مختلف نشان داد که آبراهه‌ها و کانال‌های این منطقه برای عبور سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف مشکلی نداشته و می‌توانند سیلاب‌های مورد نظر را از خود عبور دهند.

References

- Afshari Azad, M. R., & Pourkey, H. (2012). The Urban Morphology and Passages Flooding of Rasht City. *Environmental Based Territorial Planing (Amayesh)*, 5(17), 25-40. [In Persian]
- Ahmadzadeh, H., Saeedabadi, R., & Nouri, E. (2015). A Study and Zoning of the Areas Prone to Flooding with an Emphasis on Urban Floods (Case Study: City of Maku). *Hydrogeomorphology*, 2(2), 1-24. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.2.1.0>
- Ainlou, F. (2014). *The effect of land use change and urban development on runoff production (case study: Zanjan city)*. Master's thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. [In Persian]
- Alizadeh, A. (2015). Principles of Applied Hydrology (40th ed.). Mashhad: Imam Reza University Press. [In Persian]
- Arabi, M., Govindaraju, R. S., & Hantush, M. M. (2002). A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practice. *Journal of Hydrology*, 333, 459-471. [In Persian] <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.012>
- Arman, N., 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] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.115272.1353>
- Chen, J., Hill, A. A., & Urbano, L. D. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology*, 373(1-2), 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.021>
- Choi, K. S., & Ball, J. E. (2002). Parameter estimation for urban runoff modelling. *Urban Water*, 4, 31-41. [http://dx.doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00072-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00072-3)
- Dongquan, Z., Jining, C., Haozheng, W., Qingyuan, T., Shangbing, C., & Zheng, S. (2009). GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach: a case study in Macau. *Environmental Earth Sciences*, 59, 465-472. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0045-1>
- Fallah Zawareh, F., Kamali, B., & Mirzaei, M. (2013). Investigating the influence of rainfall time pattern in SWMM and HEC-HMS models. In *Proceedings of the 6th National Congress On Civil Engineering, Semnan University, Semnan*. [In Persian] <https://civilica.com/doc/120602/>

- Ghanavati, E., Karam, A., & Aghaalikhani, M. (2013). Flood risk zonation in the farahzad basin (Tehran) using Fuzzy model. *Geography and Environmental Planning*, 23(4), 121-138. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085362.1391.23.4.8.2>
- Hejazizadeh, Z., Khosravi, F., & Naserzadeh, M. H. (2011). Crisis management in the new city of Baharestan by using geographic information system, relying on flood and determining suitable urban drainage routes for disposal of surface water. *Applied Researches in Geographical Sciences*, 11(20), 31-50. [In Persian] <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-594-fa.html>
- Huber, W. C., & Dickinson, R. E. (1992). *Storm water management model user's manual*. Georgia: Environmental Protection Agency.
- Istomina, M. N., Kocharyan, A. G., & Lebedeva, I. P. (2005). Floods: genesis. socioeconomic and environmental impacts. *Water Resources*, 32(4), 349-358. <https://doi.org/10.1007/s11268-005-0045-9>
- Jinkang, D., Shunping, X., Youpeng, X., Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2007). Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*, 336(3-4), 334-346. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.015>
- Khorsandi Kouhanestani, Z., & Zolfaghary, M. (2016). An Investigation of the Effect of Pervious Surfaces Distribution on Flood Hydrograph Peak in Urban Regions. *International Bulletin of Water Resources and Development*, 4(1), 237-245. [In Persian] <https://www.magiran.com/p1549663>
- Lhomme, J., Bouvier, C., & Perrin, J. L. (2004). Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.006>
- Lin, S. S., Hsieh, S. H., Kuo, J. T., Liao, Y. P., & Chen, Y. C. (2006). Integrating legacy components into a software system for storm sewer simulation. *Environmental Modelling & Software*, 21(8), 1129-1140. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.05.012>
- Ogden, F. L., Pradhan, N. R., Downer, C. W., & Zahner, J. A. (2011). Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment. *Water Resource Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010550>
- Paron, P., Di Baldassarre, G., & Shroder, J. F. (2023). *Hydro-Meteorological Hazards, Risks and Disaster*. Elsevier. <https://shop.elsevier.com/books/hydro-meteorological-hazards-risks-and-disasters/paron/978-0-12-819101-9>
- Phillips, B. C., Yu, S., Thompson, G. R., & De Silva, N. (2005). 1D and 2D modelling of urban drainage systems using XP-SWMM and TUFLOW. In *10th International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen, Denmark, 21-26.
- Rostami Khalaj, M. (2012). Sensitivity analysis of variables affecting on urban flooding using SWMM model. *Journal of Watershed Management Research*, 3(5), 81-91. [In Persian] <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-56-fa.html>
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources.

- JAWRA *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>
- Shahbazi, A., Khaliqi Sygarodi, S., Malekian, A., & Salajegheh, A. (2014). Selection of the best empirical formula to estimate time of concentration in urban watersheds (Case study: Mahdasht town). *Journal of Range and Watershed Managment*, 67(3), 419-435. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jrwm.2014.52835>
- Sheng, J., & Wilson, J. P. (2009). Watershed urbanization and changing flood behavior across the Los Angeles metropolitan region. *Natural Hazards*, 48, 41-57. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9241-7>
- Soleimani, M., Behzadian, K., & Ardeshtir, A. (2016). Evaluatiopn of Strategies for Modifying Urban Storm Water Drainage System Using Risk-based Criteria. *Journal of Water and Wastewater*, 26(6), 16-29. [In Persian] https://www.wjournal.ir/article_11135.html
- Sourisseau, S., Bassères, A., Périé, F., & Caquet, T. (2008). Calibration, validation and sensitivity analysis of an ecosystem model applied to artificial streams. *Water research*, 42(4-5), 1167-1181. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.039>
- Temprano, J., Arango, O., Cagiao, J., Suarez, J., & Tejero, I. (2006). Storm water quality calibration by SWMM: a case study in Northern Spain. *Water SA*, 32(1), 55-63. <https://doi.org/10.4314/wsa.v32i1.5240>
- Tsihrintzis, V., & Hamid, R. (1998). Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. *Hydrol Process*, 12(2), 311-329. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199802\)12:2%3C311::AID-HYP579%3E3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12:2%3C311::AID-HYP579%3E3.0.CO;2-R)
- 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 Ecohydrology*, 6(2), 415-429. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ije.2019.277930.1071>
- Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, 16(3), 195-231. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)