

# Comparative Analysis of Construction Costs of Urban Drainage Network in Different Hydraulic Simulation Methods: A Case Study in Qaderabad County, Fars Province

Masih Zolghadr<sup>1\*</sup>, Farzan Jahanbakhsh<sup>2</sup>, Mohammad Rafie Rafiee<sup>1</sup>, Abazar Fathi<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of water sciences and engineering, Jahrom University, Fars, Iran.

2- Post graduate student of Irrigation and drainage, Jahrom university, Fars, Iran.

3- Post graduate student of Hydraulic Structures, faculty of agriculture, Shiraz university, Fars, Iran.

\* [Zolghadr.masih@jahromu.ac.ir](mailto:Zolghadr.masih@jahromu.ac.ir)

Received: 21 July 2023

Accepted: 26 October 2023

Discussion: 21 December 2024



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** In this research, the comparison of different flow routing methods and their impact on the hydraulic characteristics and dimensions of storm water conveyance pipes and the construction cost of different options is considered. For this purpose, the rainfall-runoff simulation model (SWMM), is used for flow routing. Qaderabad city is taken into consideration as a case study with the aim of implementing different simulation options. The purpose of this study is to compare the construction cost of different hydraulic simulation options.

**Methodology:** In general, in SWMM model, the routing of the flow in the pipe and conduit is governed by using the one-dimensional Saint-Venant equation. The Saint-Venant equation is solved using the implicit finite difference method. Different options are available in this model including steady flow, Kinematic wave, Diffusion wave and fully dynamic. All methods are considered in this study to gain a better understanding of each methods on outputs and construction expenses as well.

**Results and Discussion:** After setting up the model, the simulation was conducted in the selected return period with four mentioned simulation option methods: Dynamic, Diffusive, Kinematic and Steady flow. Subsequently, the dimensions of the pipes were determined. The construction cost of each flood routing method was calculated and compared with each other. The dimensions of the conduits were selected according to the dimensions of the concrete pipes available in the market and the existence of sufficient freeboard. Hence, no flooding was expected to occur in the nodes. Generally, the outputs of two fully dynamic and diffusive methods were similar showing the minimal effect of inertia term. However the results were quite different for other two methods. The first two methods yielded shallower depths leading to smaller dimensions and lower construction costs. Another comparison between flow depth, discharge, time to hydrograph peak were also conducted. Construction costs were calculated using TAKSA software. The results suggest that applying fully dynamic simulation, despite more computational costs, puts the engineers on the safe side with lower construction costs.

**Conclusion:** The average dimensions of the conduits used in the main conveyance pipeline were the same in the dynamic wave method and the diffusive wave method, but compared

to the kinematic wave and uniform flow method, it was at least 9.8% lower.

The dynamic wave method and the diffusive wave method had the same construction costs due to the same dimensions of the pipes used. However, the construction costs of these two methods were 55.7% lower than the kinematic wave method and 54% lower than the uniform flow method. The construction costs of the kinematic wave method were 2.2% higher than the uniform wave method.

**Keywords:** Flow routing, rainfall-runoff model, SWMM, urban flooding, TAKSA.



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of  
the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# مقایسه هزینه اجرایی خطوط جمع آوری و دفع آبهای سطحی در روش های مختلف شبیه سازی هیدرولیکی: مطالعه موردی شهرستان قادرآباد استان فارس

مسیح ذوالقدر<sup>۱\*</sup>، فرزانه جهاانبخش<sup>۲</sup>، محمدرفعی رفیعی<sup>۱</sup>، اباذر فتحی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه جهرم، فارس ایران.

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه جهرم، فارس، ایران.

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، فارس، ایران.

\* jbazargan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱ و وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** تغییرات اقلیم در سراسر جهان منجر به افزایش رخداد سیلاب های مخرب شهری گردیده است. لذا طراحی شبکه های جمع آوری و دفع آب های سطحی با ظرفیت مناسب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. پژوهش حاضر یک مطالعه ای موردی در رابطه با شبیه سازی هیدرولیکی سیلاب با استفاده از مدل عددی یک بعدی می باشد که در استان فارس- شهرستان قادرآباد انجام شده است. روندیابی هیدرولیکی با استفاده از ۴ روش موج دینامیک، موج پخشیدگی، موج سینماتیک و جریان ماندگار انجام شده و تاثیر هر روش بر مشخصات هیدرولیکی و ابعاد مجاری انتقال آب های سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که میانگین بیشینه دبی در روش موج دینامیک نسبت به روش های موج پخشیدگی ۰.۳٪، موج سینماتیک ۱۹.۴٪ و جریان ماندگار ۲۷.۴٪ کمتر بوده است. همچنین میانگین بیشینه عمق آب در مجرا در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی ۱.۸٪ بیشتر، و نسبت به روش های موج سینماتیک و جریان ماندگار به ترتیب ۱۱.۱٪ و ۸٪ کمتر بوده است. میانگین بیشینه سرعت در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی ۴٪ کمتر و نسبت به روش های موج سینماتیک ۴۲٪ و جریان ماندگار ۳۸٪ بیشتر بوده است. هزینه های اجرایی هر یک از روش ها نیز با یکدیگر مقایسه شده است. روش موج دینامیک و موج پخشیدگی با توجه به یکسان بودن ابعاد مجاری استفاده شده، هزینه های اجرایی یکسانی داشتند. اما هزینه های اجرایی این دو روش نسبت به روش موج سینماتیک ۵۵.۷٪ و نسبت به روش جریان ماندگار ۵۴٪ کمتر بود. همچنین هزینه های اجرایی روش موج سینماتیک ۲.۲٪ بیشتر از روش موج ماندگار بود.

**کلیدواژگان:** روندیابی جریان، مدل بارش رواناب، نرم افزار SWMM، سیلاب شهری، نرم افزار تکسا.

## ۱- مقدمه

سرعت گسترش شهرنشینی در دشت های سیلابی از طریق افزایش سطح نفوذناپذیر، ویرانگری های سیل روند افزایشی داشته و تلفات جانی و هدر رفت مالی زندگی بشری در حال افزایش می باشد. همچنین، شبکه های زهکشی موجود در بیشتر شهرهای کشورهای در حال توسعه قدیمی هستند و شهرنشینی با سرعت بالا به طور قابل توجهی از ساخت زیرساخت های شهری پیشی گرفته است، در نتیجه شهرها را در برابر سیلاب ها آسیب پذیرتر می کند. این

پیش بینی های جمعیتی نشان می دهد که تا سال ۲۰۵۰، ۶۸ درصد از جمعیت جهان در منطقه های شهری زندگی خواهند کرد و بیشتر رشد جمعیت جهان در شهرها صورت می گیرد (Floud, 1997). از سوی دیگر انتظار می رود با روند تغییر اقلیم که به نقطه بازگشتناپذیری رسیده است، تداوم سیلاب های زیانبار و ویرانگر... در منطقه های شهری بیشتر شود. همچنین با توجه به افزایش

عامل‌های ترکیبی منجر به افزایش فراوانی و شدت سیلاب شهری می‌شود. اجماع فزاینده‌ای وجود دارد که تغییرپذیری‌های آب و هوایی منجر به رویدادهای بارش شدیدتر می‌شود (Du et al., 2012; Yin et al., 2016; Gu et al., 2019).

برای پیشگیری آسیب و زیان‌های رخداد سیلاب می‌بایست درک درست و دقیقی از این مقوله برای پژوهشگران به وجود آید و با به‌کارگیری رهیافت‌های علمی و عملی مناسب اثرگذاری‌های آسیب و زیان‌های سیلاب را کاهش داد (Peruma et al., 1998).

برای هدایت ایمن سیلاب‌های شهری لازم است ابعاد آبراهه(کانال)ها با توجه به دوره بازگشت منتخب به درستی برآورد شود. بدین منظور نیز لازم است شبیه سازی هیدرولیکی یا به عبارتی روندیابی جریان صورت پذیرد. به طور کلی، روش‌های محاسبه‌شدنی روندیابی سیلاب به دو دسته هیدرولوژیکی و هیدرولیکی تقسیم شود. سه قانون بقاء جرم، اندازه‌ی حرکت و انرژی، معرف هیدرولیک در آبراهه‌های باز می‌باشند که مجموعه این معادله‌ها (پیوستگی و مومنوم) در حالت ناماندگار به صورت معادله‌های دیفرانسیل جزئی و با عنوان معادلات سنت و نانت نامیده می‌شوند. معادله یک بعدی سنت و نانت بسیار پذیرفتنی بوده و بقای جرم و اندازه‌ی حرکت را در نظر گرفته و می‌تواند در حوزه‌های مختلفی اعمال شود (Zheng et al., 2020). در واقع باتوجه به اینکه شماری از عبارت‌های معادله اندازه حرکت در معادله‌های سنت و نانت به هنگام روندیابی سیلاب استفاده شود، روندیابی هیدرولیکی به چهار روش، جریان ماندگار<sup>۱</sup>، موج سینماتیک<sup>۲</sup>، موج پخشیدگی<sup>۳</sup> و موج دینامیک<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند. جریان ماندگار، ساده ترین نوع روندیابی ممکن را نشان می‌دهد، با این فرض که در هر مرحله زمان محاسبه‌شدنی، جریان یکنواخت و ثابت است. بنابراین آب‌نگار (هیدروگراف)های ورودی در بالادست مجرا را بدون تغییر شکل به پایین دست انتقال می‌دهد. این نوع

روندیابی، ذخیره آبراهه، اثرگذاری‌های آب برگشتی، هدر روی ورودی/خروجی، معکوس شدن جریان یا جریان تحت فشار را نمی‌تواند در نظر بگیرد. در معادله موج سینماتیک، نیروهای ثقل و اصطکاک در تعادل با هم بوده و از نیروی اینرسی و فشار صرف نظر می‌شود. این روش روندیابی معادله پیوستگی را به همراه شکل ساده شده معادله حرکت در هر مجرا حل کرده، پس از آن فرض می‌کند که شیب سطح آب با شیب مجرا برابر است. روندیابی موج سینماتیک اجازه می‌دهد تا ویژگی‌های جریان از نظر مکانی و زمانی در درون یک مجرا تغییر کنند. بنابراین جریان ورودی از آبراهه عبور می‌کند. با این حال، این شکل از روندیابی نمی‌تواند اثرگذاری‌های آب برگشتی، هدر روی ورودی و خروجی و یا جریان تحت فشار را در نظر بگیرد (Rossman, 2015). در معادله موج پخشیدگی، نیروهای گرانش و فشار و اصطکاک در تعادل با هم هستند. این روش به ویژه برای برنامه‌های مسیریابی سیلاب، برای زمانی که داده‌های موجود شامل پیشینه‌های مشاهده شده در مرحله‌های بالادست و پایین دست یا نتایج و بررسی‌های گذشته نشان داده شده است که روش آبراهه باز، به ویژه در رودخانه‌ها و جریان‌های طبیعی مانند سیلاب شهری به اندازه کافی دقیق است (Cappelaere, 1997). در معادله موج دینامیک، همه‌ی عبارت‌های معادله اندازه‌ی حرکت در نظر گرفته می‌شود. این روش با وجود اینکه بیشترین هزینه‌ی محاسبه‌شدنی را دارد، اما در مقابل، دقت بهتری از نتایج را نسبت به معادله موج سینماتیک و موج پخشیدگی و جریان ماندگار به دست می‌دهد. روندیابی موج دینامیک (پویا) معادله‌های جریان سنت و نانت یک بعدی را کامل حل می‌کند و بنابراین دقیق ترین نتایج را از لحاظ نظری ایجاد می‌کند. روندیابی موج دینامیک می‌تواند برای ذخیره‌سازی آبراهه، آب برگشتی، هدر روی ورودی/خروجی، معکوس شدن جریان، و جریان تحت فشار استفاده شود. روندیابی آب‌شناختی (هیدرولوژیکی) تنها بر پایه معادله پیوستگی یک بعدی استوار است، در حالی که در روش‌های هیدرولیکی، معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت، که همان معادله‌های سنت و نانت هستند، به طور همزمان به صورت تحلیلی یا

1. Steady Flow
2. Kinematic Wave
3. Diffusive Wave
4. Dynamic Wave

نشان داد که مدل SWMM از دقت خوبی برای شبیه سازی فرآیند بارندگی-رواناب در منطقه نیمه خشک داشته است. همچنین آنان دریافتند که انتخاب متغیر ورودی نیز برای تجزیه و تحلیل دقت و حساسیت مدل SWMM دارای اهمیت می باشد (Rabori et al., 2017). تعیین اثرگذاری های فراسنجه های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی بر تولید رواناب در یک حوضه آبریز، در شهر استانبول بررسی شد. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که در حوضه آبریز مورد مطالعه، موثرترین فراسنجه تولید رواناب در مدل SWMM، میزان بارش می باشد. همچنین درصد نفوذ ناپذیری و درصد شیب کمترین فراسنجه ها در میان دیگر فراسنجه های تاثیرگذار بر خروجی بودند (Akdoğan et al., 2016). در پژوهشی دیگر، مدیریت و مدل سازی سیلاب شهری را با استفاده از مدل SWMM بررسی کردند. هدف اصلی آنان در استفاده از SWMM نظارت بر کیفیت و مقدارهای ناشی از سرریز شدن حوضه های آبریز فرعی بوده است. نتایج بررسی ها نشان داد که استفاده از مدل SWMM نتایج خوبی را ارائه می دهد. بر این مبنا می توان برنامه ریزی بهینه ای برای طراحی آبراهه ها ارائه داد و کنترل و مدیریت سیل را انجام داد (Harsha et al., 2020). طی یک تحقیق، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت عمق آب در منهول های (چاهک های بازدید) یک خط لوله اصلی سامانه زهکشی سطحی شهری بررسی شده است. همچنین تجزیه و تحلیل حساسیت برای دبی اوج سیل زیر حوضه بررسی شده است. مدل SWMM برای شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب و روندیابی سیلاب در مجراها، استفاده شده است. شبیه سازی مونت کارلو و روش L.H.S1 برای تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. نتایج بررسی ها نشان داد که ضریب تغییرپذیری های عمق آب در گره ها از ۱۲٪ تا ۶۶٪ متغیر است و توزیع احتمال آن چولگی مثبت قابل توجهی دارد، که منجر به کاهش خطرپذیری (ریسک) شکست می شود. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که در بیشتر زیرحوضه ها، مساحت و بارش مهم ترین تاثیر را در تعیین دبی اوج سیل و عدم قطعیت آن بر جای می گذارد. دیگر فراسنجه های موثر به

عددی حل می شوند. تفاوت دیگر بین این دو دسته روش های روندیابی، در این است که در روش های هیدرولوژیکی، آبنگار جریان در طی فرآیند روندیابی تنها در یک نقطه واقع در پایین دست محاسبه و لذا دبی جریان نسبت به زمان در یک فاصله ثابت از محل آبنگار بالادست استخراج می شود، در حالی که در روش های هیدرولیکی، به طور همزمان می توان آبنگار جریان را در هر فاصله از نقطه ای که آبنگار بالادست آن معلوم است، محاسبه کرد و همزمان دبی، عمق آب و دیگر مشخصه های جریان سیلاب را بر اساس تابعی از زمان و مکان تعیین کرد. با توجه به پیچیده بودن روندیابی سیلاب و آسیب و زیان های ناشی از سیل، پیشرفت در این زمینه لازم و ضروری می باشد. لذا روش هیدرولیکی در طراحی سامانه (سیستم) های گردآوری و دفع آب های سطحی شهری می تواند استفاده شود. در یک پژوهش، Tsai (2003) به بررسی دقت و کاربرد روش موج سینماتیک و غیر اینرسی و مدل موج دینامیک نیمه ماندگار جهت روندیابی جریان ناماندگار پرداخت. از این بررسی، نتیجه گرفته شد که حضور اثر آب برگشتی پایین دست مشخصه های انتشار موج را تغییر داده و بنابراین معیارهای کاربرد مدل های سینماتیک، غیر اینرسی و موج دینامیکی نیمه ماندگار را تغییر داده است (Tsai, 2003). در پژوهشی دیگر روش های هیدرولیکی روندیابی سیل و مقایسه آن ها با هم و نیز با دیگر روش های هیدرولوژیکی بررسی و ارزیابی شد. آنان در رابطه با برتری یک روش نسبت به دیگر روش ها دریافتند که در یک رودخانه و موقعیت شناختی (توپولوژیکی) خاص نمی توان به طور قاطع نظر داد و باید در هر محل دقت و درستی هر یک از روش ها آزمون و ارزیابی شود (Yongzhi et al., 2012). تجزیه و تحلیل (پارامتر) های مدل SWMM برای برآورد رواناب شهری در یک منطقه نیمه خشک بررسی شد. بنابر نتایج به دست آمده، فراسنجه های مدل SWMM که بر روی اوج و حجم رواناب تاثیر می گذارند، شامل میزان تغییرپذیری های عمق مخزن، عرض مسیر جریان، درصد منطقه نفوذ ناپذیر و ضریب مانینگ می باشد. نتایج معیارهای ارزیابی عملکرد

روش توسعه کم تاثیر، اثر بخشی قابل توجهی در کنترل سیلاب دارد (Zhuang et al., 2023). در پژوهشی دیگر، از یک مدل کوپل توزیعی جدید برای سیلاب ناشی از بارندگی-رواناب توسعه منطقه‌های شهری استفاده شد. محققان سیلاب های شهری را در مناطق توسعه شهری (different urban development degree) در درجه‌های مختلف صفر تا ۸۰ درصد و توسعه کم تاثیر (low-impact development) در ۵ دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال را بررسی کردند. محققان به این نتیجه رسیدند که با افزایش درجه توسعه شهری، دبی بیشینه سامانه زهکشی به طور فزاینده‌ای افزایش می یابد. پژوهشگران اظهار داشتند اجرای اقدام‌های توسعه کم تاثیر به طور قابل توجهی اثر کاهش سیلاب سطحی، تخلیه سامانه زهکشی و کنترل رواناب را بهبود بخشیده است و اثر آن با افزایش درجه توسعه شهری افزایش یافته است (Li et al., 2023).

در این پژوهش، مقایسه روش‌های مختلف روندیابی و تاثیر آن‌ها بر مشخصه‌های هیدرولیکی و ابعاد مجراهای انتقال آب‌های سطحی و هزینه اجرائی گزینه‌های مختلف بررسی و ارزیابی شد. بدین منظور از مدل شبیه سازی بارش - رواناب (SWMM)، توسعه یافته توسط کارگذاری (آژانس) حفاظت محیط زیست ایالات متحده، که برای شبیه سازی یک رویداد بارش منفرد یا شبیه سازی بلند مدت کمیت و کیفیت رواناب در منطقه‌های شهری استفاده می‌شود، برای شبیه سازی هیدرولیکی استفاده شده است. شهر قادرآباد نیز به عنوان بررسی موردی و با هدف اجرای گزینه‌های مختلف شبیه سازی مورد توجه قرار گرفته که در ادامه معرفی شده است.

## ۲- منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی، شهر قادر آباد از توابع استان فارس (در کشور ایران) می‌باشد. گستره مورد بررسی برمبنای سامانه مختصات کارتیزین (درجه، دقیقه و ثانیه) در حدود طول‌های جغرافیایی ۵۳ درجه، ۱۵ دقیقه و ۱۴ ثانیه تا ۵۳ درجه، ۱۶ دقیقه و ۴۵ ثانیه و عرض‌های شمالی ۳۰ درجه، ۱۵ دقیقه و ۵۷ ثانیه تا ۳۰ درجه، ۱۷ دقیقه و ۰۶

ترتیب ضریب زبری سطح‌های نفوذ ناپذیر، درصد نفوذ ناپذیری پوشش، شماره منحنی سطح‌های نفوذ ناپذیر، ضریب زبری سطوح پیشین و شیب می‌باشند (Sharifan et al., 2010). در پژوهشی دیگر اثرگذاری‌های تغییر آب و هوا و سیل بر روی سامانه فاضلاب یکی از شهرهای کشور عراق با استفاده از مدل SWMM بررسی شد. نتایج نشان داد که SWMM یک ابزار بسیار توانمند در پیش‌بینی حجم و مکان سیل در شدت‌های مختلف بارندگی می‌باشد و قابلیت راه‌حل‌های پیشنهادی برای به کمینه رساندن سیل را ارزیابی می‌کند (Mohammed et al., 2021). Yuan و همکاران با استفاده از مدل SWMM یک ارزیابی موردی از انتقال عامل‌های زیستی (بیولوژیکی) با پیش‌فرض (سناریو)های مختلف بارندگی و سطح‌های شهری آسفالت، چمن و بتن انجام دادند. پژوهشگران برای واسنجی (کالیبره) کردن فراسنجه شستشو (washoff)، از غلظت هاگ (spore) در آسفالت و بتن در آزمایش میدانی استفاده کردند. نتایج مدل واسنجه شده SWMM در شبیه سازی غلظت هاگ همانند با نتایج میدان بود. در این تحقیق نشان داده شد که چگونه می‌توان با استفاده از مدل SWMM، غلظت هاگ را در شرایط بارندگی‌های متفاوت از نظر مقدار، شدت و مدت محاسبه کرد و مسیرهای عبور رواناب را در شرایط اضطراری تعیین و اصلاح نمود (Yuan et al., 2023).

در پژوهش دیگری با استفاده از مدل SWMM، ارزیابی کنترل رواناب در شهر پر جمعیت هنگ کنگ انجام و بررسی شد. سامانه زهکشی پیچیده و استفاده‌های بسیار متفاوت از زمین، چالش‌های بسیار زیادی برای استفاده از مدل برای محققان به همراه داشت. بنابراین محققان از روش توسعه کم تاثیر (Low Impact Development) برای کنترل سیلاب در محل‌های پر جمعیت استفاده کردند. محققان نتیجه گرفتند که استفاده از روش توسعه کم تاثیر می‌تواند رواناب کل و بیشینه را به مقدار ۳۵ تا ۴۵ درصد در دوره‌های بازگشت ۲، ۱۰ و ۵۰ ساله کاهش دهد. به طور کلی پژوهشگران اظهار داشتند که مدل SWMM یک مدل قابل اعتماد برای برآورد رواناب در جامعه‌های شهری بسیار پر جمعیت بوده و از سوی دیگر

از جدول‌های با ابعاد مختلف بنه صورتی است که سیلاب را به سمت پایین‌ترین نقطه شهر از نظر ارتفاعی هدایت می‌کند. لازم به یادآوری است که این منطقه‌ها جزو منطقه‌های مشکل‌دار از نظر رواناب‌های سطحی بوده و هرساله محتمل آسیب و زیان‌های ناشی از سیلاب‌های شهری می‌شوند.

### ۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مقایسه روش‌های مختلف روندیابی جریان و تاثیر آن‌ها بر مشخصه‌های هیدرولیکی و ابعاد مجراهای انتقال آب‌های سطحی و هزینه مقایسه اجراء گزینه‌های مختلف بررسی شده است. برای طراحی خطوط انتقال آب‌های سطحی افزون‌بر لزوم تبدیل بارش به رواناب (شبیه‌سازی هیدرولوژیکی) بایستی شبیه‌سازی هیدرولیکی به منظور روندیابی جریان در خطوط مورد نظر و برآورد ظرفیت هیدرولیکی نیز صورت گیرد. مدل SWMM توانایی انجام هر دو فرآیند را دارد. در این مدل امکان محاسبه هیدروگراف هم در حوضه‌ها و هم در مسیل‌ها و شبکه‌های آب‌های سطحی شهری و شبیه‌سازی به صورت جریان آزاد و تحت فشار وجود دارد. از سوی دیگر با توجه به نتایج بررسی و ارزیابی‌های انجام شده در زمینه رواناب شهری، مدل SWMM نشان داده است که دارای توانایی مناسبی برای برآورد سیلاب‌های شهری می‌باشد و در اصل نیز به همین منظور توسعه یافته است، هرچند توانایی شبیه‌سازی سیلاب در حوضه‌های برون شهری را نیز داراست. بدین منظور از مدل یک بعدی EPA<sup>1</sup>-SWMM<sup>2</sup> برای شبیه‌سازی رواناب و محاسبه ابعاد مجراهای انتقال طراحی شده توسط روش‌های مختلف روندیابی استفاده شده است. سپس برای برآورد مالی و مقایسه ریالی روش‌های مختلف روندیابی هیدرولیکی از نرم افزار تکسا نسخه ۰۰۳ استفاده شده‌است. اساس کار این نرم افزار به‌کارگیری فهرست بها و بخشنامه‌های سازمان ریزی و بودجه می‌باشد. اطلاعات پایه سامانه شامل فهرست بهای از سال ۷۰

ثانیه قرار دارد. این شهر در شمال استان فارس با ارتفاع ۱۹۰۰ متر از سطح آزاد دریا قرار گرفته است و گستره آن ۱۳۲۸ کیلومتر مربع است. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

توسعه شهری و افزایش ساخت و سازها در سطح شهر قادرآباد و پیرامون آن سبب شده‌است که از میزان سطح‌های نفوذپذیر حوضه کاسته شده و بخش عمده‌ای از بارندگی به رواناب تبدیل شده و حجم آن‌ها افزایش یابد. با توجه به افزایش کارایی هیدرولیکی سطح‌های نفوذناپذیر، ضمن کاهش زمان تمرکز، بیشینه بده سیلاب‌ها نیز افزایش یافته است. بنابراین ناکارآمدی شبکه گردآوری و دفع آب‌های سطحی موجود دور از انتظار نیست. همچنین برابر بازدیدهای میدانی و شکایت شهروندان، در بعضی نقطه‌ها تغییر ناگهانی شیب آبراهه‌های موجود که متأثر از تغییر شیب طبیعی زمین و خیابان احداث شده بوده است، باعث کم شدن

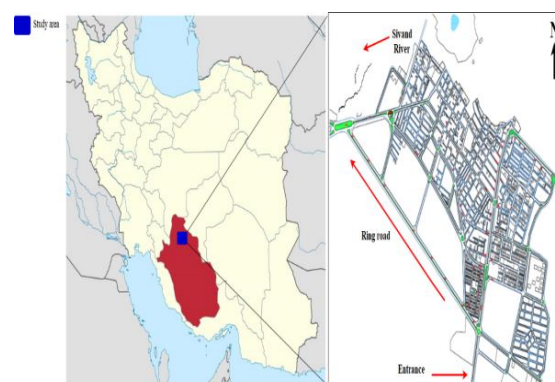


Fig. 1 Location of the study area

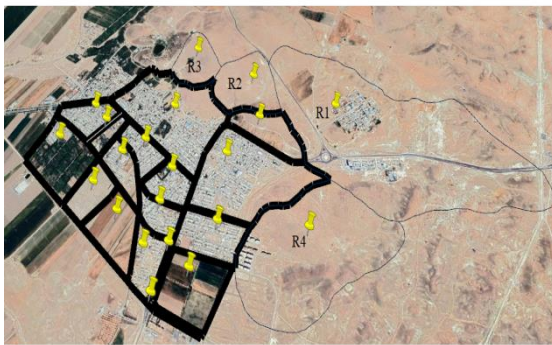
شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه

ناگهانی ظرفیت عبور جریان در آبراهه شده و پس‌زدن آب در این نقطه‌ها، موجب آبگرفتگی در این بخش‌ها شده‌است. بنابر بازدیدهای میدانی صورت گرفته و بررسی نقشه‌هایناهمواری یا پستی و بلندی (توپوگرافی) موجود، شیب کلی شهر قادرآباد به سمت جنوب و شرق شهر می‌باشد. معابر اصلی شهر شامل بلوار مطهری (۱)، بلوار امام خمینی (۲)، بلوار پاسداران (۳) و خیابان شهرداری (۴) می‌باشد و با این معابر دسترسی به کل شهر امکان پذیر است. سامانه دفع آب‌های سطحی این معابر متشکل

1. U.S. Environmental Protection Agency

2. Storm Water Management Model

سامانه گردآوری رواناب و مختصات پایانی این سامانه و حتی نوع ورودی آن می‌باشد. پس از برداشت اطلاعات یاد شده در عملیات صحرایی این اطلاعات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پس از همخوانی با نقشه‌های ۱:۲۰۰۰ منطقه و تصحیح اطلاعات مشکوک و در مواردی برداشت دوباره داده‌ها، این اطلاعات بر روی نقشه‌های ۱:۲۰۰۰ منطقه پیاده شد. در مرحله بعد با استفاده از اطلاعات پیاده شده بر روی نقشه‌های منطقه، مرز محدوده شهری به دقت مشخص و با استفاده از موقعیت و جهت شیب آبراه‌های موجود در سطح این حوضه، به ۱۹ زیرحوضه شهری و ۴ زیر حوضه برون شهری تقسیم شد که در شکل (۲) نشان داده شده‌است.



**Fig. 2** Location of the study basin  
(Rural basins are marked with R)

شکل ۲ موقعیت حوضه مورد مطالعه

(حوضه‌های برون شهری با R مشخص شده‌اند)

در حال حاضر در بیشتر پژوهش‌های مربوط به بررسی سیلاب شهری، از داده‌های بارندگی به عنوان پایه استفاده می‌شود و سپس مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی بارش رواناب استفاده قرار می‌شود (Wang et al., 2022). از جمله عواملی مورد نیاز در تهیه و توسعه مدل هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز شناخت توزیع زمانی بارش می‌باشد. با توجه به موقعیت ایستگاه‌های منطقه در محدوده مورد نظر، طول دوره آماری، قابلیت گسترش آمار و شرایط همانند اقلیمی، در نهایت ۱۴ ایستگاه باران‌سنجی انتخاب شد. انتخاب ایستگاه‌های یاد شده به گونه‌ای بوده‌است نخست اینکه محدوده مورد بررسی را تحت پوشش آماری خود قرار داده و دوم اینکه گویای تغییرپذیری‌های بارش در ترازهای مختلف ارتفاعی باشند.

تاکنون به اضافه‌ی اطلاعات تکمیلی موردها (کدهای اضافه یا کسر بها و شرح‌های مربوطه، اثر واحد، شرح مختصر و...) و ضریب‌های مصالح مصرفی خاص، حمل برای همه‌ی فهرست بها و شاخص‌های فصلی، رشته‌ای و کلی برای همه سال‌ها است. نرم افزار تکسا برای انجام متره و برآورد نویسی، صورت وضعیت نویسی، تهیه برنامه زمان بندی، مابه‌التفاوت نویسی، تعدیل نویسی، تهیه تجزیه و تحلیل بها و پیشنهاد قیمت پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شود.

### ۳-۱- بررسی‌های هیدرولوژی

هدف اصلی مطالعات هیدرولوژی در طرح‌های گردآوری و دفع آب‌های سطحی، برآورد رواناب سطحی حوضه‌های شهری و برون شهری محدوده مورد بررسی است و با استفاده از نتایج این بررسی‌ها ضمن روندیابی و ترکیب آب‌نگارها در نقطه‌های مورد نیاز امکان ارزیابی شرایط موجود، ظرفیت سنجی هیدرولیکی، برآورد حجم سیلاب کنترلی و اصلاح شبکه فراهم می‌شود. در آغاز کاربری‌ها، منطقه به طور کامل مورد بازدید میدانی قرار گرفت و آن‌گاه با استفاده از نقشه‌های سازمان نقشه برداری کشوری و همچنین نقشه‌های برداشت شده توسط شهرداری منطقه مورد بررسی، مسیر حرکت آب و مرز حوضه‌ها تعیین شد، به طوری که گستره حوضه‌های برون شهری حدود ۳۶۱/۲ هکتار و حوضه‌های درون شهری ۳۰۲/۷ هکتار می‌باشد. موقعیت حوضه مورد بررسی در شکل (۲)، ارائه شده‌است. شیب غالب حوضه به سمت جنوب می‌باشد و در حال حاضر رواناب حوضه به سمت میدان مطهری (ورودی شهر واقع در جنوب آن) جریان یافته و به علت وجود شیب معکوس در انتهای خیابان مطهری منجر به آبگرفتگی می‌شود. شبکه جمع آوری آب‌های سطحی شامل جدول‌های مستطیلی روباز در ابعاد گوناگون می‌باشد که با بررسی‌های میدانی برداشت شد. لازم به یادآوری است که برای بررسی رواناب حوضه در آغاز باید اطلاعات (فیزیوگرافی) آن مشخص گردد. این اطلاعات به صورت شناسنامه شامل نام خیابان و کوچه، شماره کانال، درجه سیستم، نوع سیستم گردآوری رواناب، ابعاد مقطع (طول، عرض و ارتفاع)، مختصات آغازین

شکل ۳ موقعیت ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

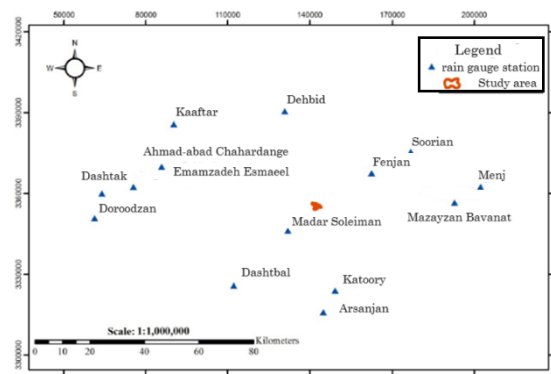


Fig. 3 Study area boundary and the location of considered stations

شکل ۳ محدوده منطقه مورد بررسی و موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده

اینکه آمار مشترک موجود در طول دوره زمانی ۳۴ ساله بوده است، همین دوره آماری ۳۴ ساله (۶۴-۶۵ تا ۹۸-۹۷) انتخاب شد لازم به توضیح است که به طور کلی برای تعیین شدت بارندگی، از رابطه‌های تجربی در بسیاری از کشورهای جهان (از جمله ایران) استفاده می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به رابطه بل بر مبنای داده‌های امریکا، کوتیاری و گارد در هندوستان، فرری و فرو برای ایتالیا و آلیلا در کانادا اشاره کرد. در ایران نیز، (Ghahraman and Abkhezr (2004) بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که رابطه آنان در سال ۱۳۸۳ که در این تحقیق نیز استفاده شده است، از دقت مناسبی برای برآورد شدت بارندگی برخوردار است. این رابطه در دیگر نقطه‌های کشور استفاده شده و نتایج مناسبی را ارائه داده است. بنابراین در این تحقیق از روش قهرمان-آبخضر استفاده شد. از سوی بسیاری از محققان دیگر از جمله، (Aghajani and Karami (2015)، (Ghahraman et al. (2010)، (Khanmohammadi and Rezai (2013) نیز از این روش استفاده کرده‌اند. لذا در این تحقیق نیز با استفاده از روش قهرمان-آبخضر، شدت‌های بارندگی کوتاه مدت در محدوده منطقه مورد بررسی برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله محاسبه شد و منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی تهیه شده و در شکل (۴) نشان داده شده‌است. رابطه قهرمان-آبخضر عبارت است از:

$$t \leq 1hr \quad (1)$$

$$R_t^T = 0.1299t^{0.4952} [0.4608 + 0.2349 \ln(T - 0.62)] R_{60}^{10}$$

$$1 \leq t \leq 2hr \quad (2)$$

$$R_t^T = 0.1372t^{0.4778} [0.4608 + 0.2349 \ln(T - 0.62)] R_{60}^{10}$$

$$2 \leq t \leq 9hr \quad (3)$$

$$R_t^T = 0.2009t^{0.3937} [0.5565 + 0.1948 \ln(T - 0.8)] R_{60}^{10}$$

$$R_{60}^{10} = e^{0.291} (R_{1440}^2)^{0.694} \quad (4)$$

که در معادله‌های بالا، مقدار بارندگی با تداوم و دوره بازگشت معین ( $mm$ )،  $T$ ، دوره بازگشت (سال)،  $t$  تداوم بارش ( $min$ ) و  $R_{1440}^2$  بیشترین بارش ۲۴ ساعته با دوره

پس از بررسی وضعیت ایستگاه‌های بارندگی مشخص شد که ایستگاه مادرسلیمان که در مجاورت حوضه موردنظر قرار گرفته و دارای کیفیت آماری مناسب نسبت به حوضه مورد بررسی و دیگر ایستگاه‌ها است که در ادامه توضیح‌های تکمیلی در این زمینه ارائه شده است. با توجه به اینکه تیپ‌های شدید مانند A۱ کمترین مقدار و تیپ‌های تأخیری مثل B بیشترین مقدار در دبی اوج (پیک) سیلاب را نشان دادند. بنابراین تیپ A۲ سازمان حفاظت خاک آمریکا (که نتایج آن بین دوتیپ یاد شده قرار می‌گیرد) به عنوان الگوی بارندگی برای برآورد سیلاب حوضه مورد بررسی انتخاب شده است.

لازم به یادآوری است که در پژوهش‌هایی که هدف آن‌ها طراحی شبکه گردآوری و دفع آب‌های سطحی است، انتخاب الگوی توزیع زمانی بارش دارای حساسیت خاصی است. اما با توجه به اینکه هدف این پژوهش مقایسه گزینه‌های مختلف روندیابی است، انتخاب الگوی بالا حساسیت کمتری داشته است.

برای انجام بررسی‌های هواشناسی، همه‌ی آمار و اطلاعات مورد نیاز ایستگاه‌های هواشناسی حوضه مورد نظر، شناسایی و گردآوری شدند. پس از بررسی وضعیت آماری ایستگاه‌های یاد شده، و با توجه به اینکه در بیشتر منبع‌های هیدرولوژی مثل (Mahdavi (1992) طول دوره آماری مناسب، ۳۰ سال یا بیشتر عنوان شده است. با توجه به

مادر سلیمان همگن بوده است.

بدین ترتیب این ایستگاه به عنوان ایستگاه معرف بارندگی حوضه مورد بررسی انتخاب شده است. در ادامه با استفاده از بررسی گرادیان بارش، میانگین بارندگی سالانه برای حوضه مورد بررسی ۲۷۶ میلیمتر و بیشترین بارندگی ۲۴ ساعته برای حوضه مورد بررسی ۴۴ میلیمتر محاسبه شد.

### ۲-۳- انتخاب دوره بازگشت مناسب برای

#### ارزیابی و انجام طراحی های لازم

انتخاب دوره بازگشت مناسب بستگی به عامل هایی چون کاربری اراضی، اهمیت سازه های موجود در منطقه، احتمال وجود سیلاب برون شهری، شیب کلی منطقه و ... دارد. با افزایش دوره بازگشت میزان آسیب و زیان های ناشی از سیلاب کاهش یافته اما در مقابل میزان هزینه برای ایجاد تاسیسات نیز افزایش پیدا می نماید. لذا انتخاب دوره بازگشت طراحی بایستی با توجه به نسبت هزینه های لازم (ساخت، بهره برداری و نگهداری) به سودهای حاصله و کاهش آسیب و زیان ها در سطح های احتمالی مختلف صورت گیرد. اما با توجه به اینکه آسیب و زیان ها و سودهای ناشی از رخداد سیلاب در دوره بازگشت های مختلف (مثل تردد ترافیک)، رکود فعالیت آلودگی زیست محیطی و هدرروی جانی و مالی) را نمی توان به سادگی به ریال تبدیل کرد، می توان از روش های ساده تر مانند ضوابط

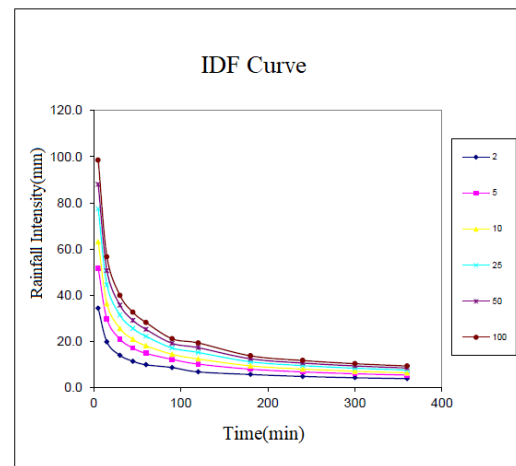
جدول ۱ دوره بازگشت پیشنهادی بر مبنای نشریه ۱۱۸-۳

وزارت نیرو

**Table 1** Recommended return periods based on Publication No. 118-3 of the Ministry of Energy

Characteristics of the urban area	Return period(years)
1- If there is enough slope in the area and the damage caused by flood is low.	1-2
2- In areas with insufficient slope, buildings are vulnerable and flood damage is high.	2-5
3- Facilities that force the floodwaters of large suburban basins to pass through the city.	50

بازگشت ۲ سال می باشد. میزان تداوم بارش تا ۵۴۰ دقیقه و دوره بازگشت تا ۱۰۰ سال می باشد؛ زیرا معادله های قهرمان - آبخضر استفاده شده در این بررسی، در تداوم بارش و دوره بازگشت های بیشتر نتایج ضعیفی را ارائه داده است.



**Fig. 4** Intensity - Duration - Frequency curve of precipitation in the study area

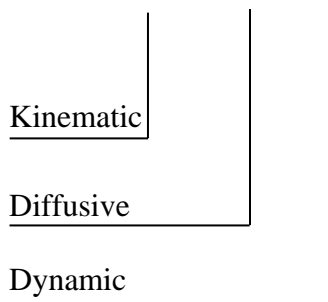
شکل ۴ نمودار منحنی شدت - مدت - فراوانی بارش در منطقه مورد بررسی

پس از بررسی وضعیت ایستگاه های بارندگی مشخص شد که ایستگاه مادر سلیمان که در مجاورت حوضه مورد نظر قرار گرفته است، دارای کیفیت مناسب تری نسبت به دیگر ایستگاه ها است. همچنین این ایستگاه دارای ۳۴ سال آماری می باشد. مهم ترین دلیل مناسب تر بودن این ایستگاه، بیشتر بودن سال های آماری، نزدیکی به منطقه مورد بررسی نسبت به دیگر ایستگاه ها و داده های بیشتر بوده است. همان گونه که پیشتر اشاره شد، شماری ایستگاه در مجاورت منطقه بررسی وجود دارد. بین آمار ایستگاه های دارای آمار ناقص و ایستگاه های دیگر، تک به تک ضریب همبستگی محاسبه شد و با در نظر گرفتن اینکه ضریب همبستگی آنها با کدام ایستگاه بیشترین است، ایستگاه مادر سلیمان به عنوان ایستگاه مبنا انتخاب شد. افزون بر طول دوره آماری مناسب، آمار گم شده کمتر این ایستگاه نسبت به دیگر ایستگاه ها جزو عامل های موثر در انتخاب این ایستگاه بوده است. افزون بر آن، نتایج آزمون همگنی نشان می دهد که آمار ایستگاه

فاضلاب ترکیبی<sup>۲</sup>، فاضلاب بهداشتی<sup>۳</sup> و دیگر سامانه‌های زهکشی استفاده می‌شود. همچنین مدل SWMM میزان توسعه رواناب و داده‌های ورودی برای چندین رویداد سیل را طراحی و محاسبه می‌کند. به طور کلی در مدل SWMM، روندیابی جریان در آبراهه و مجرا، با استفاده از معادله یک بعدی سنت-نانت اداره می‌شود و در بخش انتقال نیز معادله سنت-نانت را با استفاده از روش تفاضل‌های محدود ضمنی و ضریب متوالی حل می‌کند. معادله پیوستگی و مومنوم عبارت است از:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \quad (5)$$

$$S_f - S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6)$$



رابطه (۵) پیوستگی و رابطه (۶) اندازه حرکت نام دارد، که در آن  $Q$  (دبی جریان)  $(m^3/s)$ ،  $S_f$  شیب انرژی،  $V$  سرعت میانگین جریان  $(m/s)$ ،  $q$  دبی ورودی یا خروجی در طول آبراهه<sup>(۱)</sup>،  $x$  فاصله در امتداد جهت جریان  $(m)$ ،  $S_0$  شیب آبراهه،  $g$  شتاب گرانش  $(m/s^2)$  و  $A$  سطح مقطع جریان  $(m^2)$  می‌باشد (Mays, 2001).

### ۳-۴- گزینه‌های مختلف طراحی

مسیر دفع آب‌های سطحی در شکل (۵) نمایش داده شده‌است (main pipe). این مسیر در نهایت به رودخانه سیوند که از مجاور منطقه مورد بررسی عبور می‌کند، وارد می‌شود. یک آبراهه روباز از ابتدای خیابان پروین اعتصامی وارد مجرای زیرزمینی شده و به سمت میدان مطهری جریان می‌یابد و این خط انتقال از جاده کمربندی به سمت غرب امتداد می‌یابد. در مسیر کمربندی خطوط

و استانداردهای تهیه شده در این زمینه استفاده کرد. بدین منظور از پیشنهادات (Ministry of Energy (1992) استفاده شده‌است.

با توجه به وضعیت منطقه مورد بررسی که مستقل از حوضه برون شهری بوده و دارای مسئله‌های شیب بوده و با استناد به (Ministry of Energy (1992)، سیلاب با دوره بازگشت پنج سال انتخاب شده‌است.

در این بررسی، از بین روش‌های موجود برآورد سیلاب مانند منطقه‌ی شهری، اشنایدر، SCS، USGS، آب‌نگار واحد، سانتا باربارا، شیکاگو و ...، مدل مخزن غیرخطی پایه گذاری شده بر مبنای ترکیب عنصر (المان)‌های جریان‌های روزمینی و جریان‌های کانالیزه شده، که قابلیت محاسبه سیلاب در قسمت‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر را دارا می‌باشد، انتخاب شده‌است. علت این موضوع افزون بر مرور نتایج تحقیقات پیشین به علت مبنای فیزیکی، نگاه توزیعی، امکان بررسی جداگانه ناحیه‌های نفوذپذیر و نفوذ ناپذیر و همچنین قابلیت شبیه سازی پاسخ غیرخطی حوضه به بارندگی اضافی می‌باشد. البته بایستی به مناسب بودن آن برای هر دو حالت حوضه شهری و برون شهری نیز اشاره کرد. با توجه به موارد یاد شده بالا در این تحقیق از مدل ریاضی SWMM جهت برآورد سیلاب استفاده شد.

### ۳-۳- مدل SWMM

همان‌گونه که در قسمت‌های پیش اشاره شد، در این تحقیق از مدل SWMM برای شبیه سازی رواناب در منطقه مورد بررسی استفاده شده‌است. مدل SWMM توسط سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA) در سال ۱۹۷۱ توسعه یافت و از آن زمان تاکنون چندین ارتقاء اساسی را پشت سر گذاشته است. نرم افزار SWMM یک مدل پویایی (دینامیکی) یک بعدی می‌باشد که توانایی شبیه سازی کمی و کیفی رواناب را دارد و به طور عمده در منطقه‌های شهری استفاده می‌شود. این مدل به طور گسترده در سراسر جهان برای برنامه ریزی، تجزیه و تحلیل و طراحی مربوط به رواناب آب طوفان<sup>(۱)</sup>

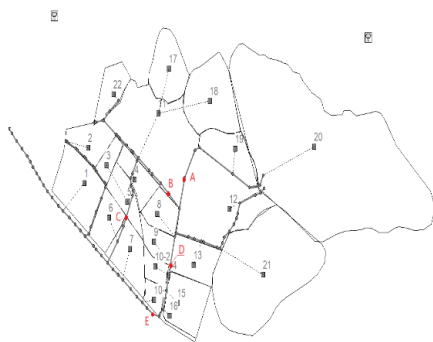
2. Combined Sewers  
3. Sanitary Sewers

1. Storm Water Runoff

شبهه سازی شد. در ادامه داده‌های خروجی که شامل دبی، عمق آب در مجرا، سرعت و ابعاد مجراهای برداشت، و تجزیه و تحلیل قرار شد. سپس با استفاده از نرم افزار تکسا، هزینه اقتصادی ۴ روش مذکور محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. اطلاعات پایه نرم افزار شامل آخرین فهرست بهای موجود به اضافه اطلاعات تکمیلی موردها (کدهای اضافه یا کسر بها و شرح‌های مربوطه، اثر واحد، شرح مختصر و...) و ضریب‌های مصالح مصرفی خاص حمل برای تمامی فهرست بها و پیوست‌های ۱ و ۲ و ۳ آهن آلات و سیمان و شاخص‌های فصلی، رشته‌ای و کلی برای همه‌ی سال‌ها است. در این پژوهش، طراحی خطوط انتقال اصلی و فرعی بر مبنای اینکه در گره‌ها سیل‌زدگی وجود نداشته باشد، انجام شده است. در صورت لزوم در منطقه‌هایی از خطوط لوله دوقلو نیز استفاده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

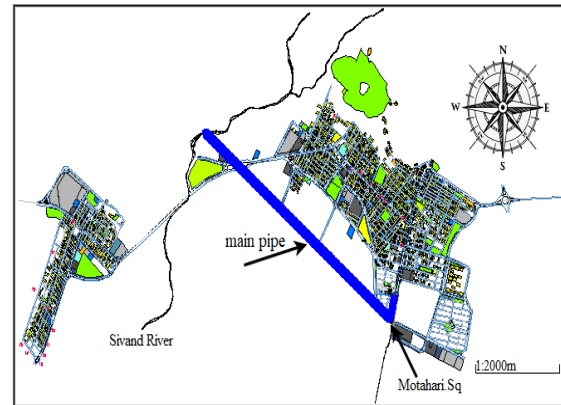
در این تحقیق برای صحت سنجی نتایج، اندازه‌گیری میدانی در طی بارندگی‌های مختلفی انجام شد و در یکی از آن‌ها که نزدیک به بارندگی طرح بوده (بارندگی ۹۸/۱/۶) است مقادیر اندازه‌گیری شده و شبهه سازی شده در چند نقطه از منطقه مقایسه شده است که به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه گردیده است. همچنین نقطه‌های مورد نظر در شکل شماره ۷ نمایش داده شده است. در این نقطه‌ها عمق جریان به وسیله متر و خط کش و سرعت جریان به وسیله جسم شناور اندازه‌گیری شده



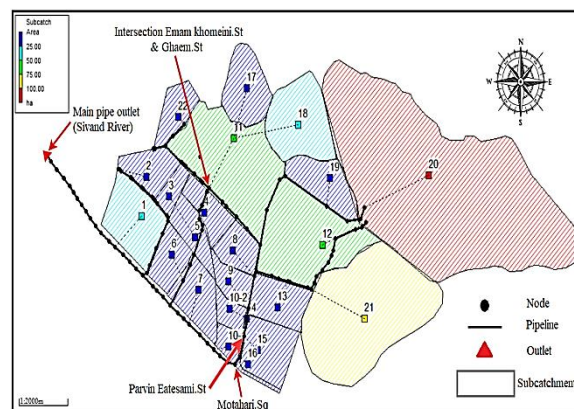
**Fig. 7** Measured points for comparing field observations and numerical simulation

شکل ۷ نقطه‌های اندازه‌گیری شده جهت مقایسه نتایج میدانی و شبهه سازی عددی

فرعی دیگری که از شمال به جنوب جریان دارند، امکان ورود به این خط اصلی را دارند. لذا خط انتقال فیاد شده بالا به عنوان خط اصلی در نظر گرفته شده و خطوط ورودی به آن خطوط فرعی درجه دوم می‌باشند.



**Fig. 5** Surface runoff drainage path  
شکل ۵ مسیر دفع آب‌های سطحی



**Fig. 6** Watershed delineation of Qaderabad County in SWMM model

شکل ۶ جانمایی حوضه‌های آبریز شهرستان قادر آباد در مدل SWMM

باتوجه به آنچه در پیش گفته شد، داده‌های ورودی مورد نیاز نرم افزار SWMM جمع آوری و برای مدل‌سازی و روندیابی در محیط این نرم افزار پیاده شد. داده‌های ورودی مورد نیاز شامل داده‌های بارندگی برای دوره بازگشت سیلاب با مدت ۵ سال، داده‌های لازم برای شبهه سازی زیر حوضه‌ها، داده‌های مربوط به گره‌ها و داده‌های لازم برای ایجاد خطوط انتقال (لوله‌ها و آبراهه‌های روباز و...) به مدل داده شد. سپس مدل با استفاده از ۴ روش جریان ماندگار، موج سینماتیک، موج پخشیدگی و موج دینامیک در خطوط اصلی و فرعی منطقه مورد بررسی

نهایی متشکل از ۱۹ حوضه شهری و ۴ حوضه برون شهری می‌باشد. حوضه‌های برون شهری که در شمال شرقی حوضه قرار دارند با حرف R در شکل ۵ نمایش داده شده‌است. ابعاد مجاری باتوجه به ابعاد لوله‌های بتنی موجود در بازار، وجود عمق آزاد کافی (حدود ۲۰٪ ظرفیت لوله) برای قسمت اعظم حوضه و نبود سیل‌زدگی در گره‌ها انجام شده‌است. همان‌طور که در قسمت انتخاب سیلاب با دوره بازگشت مناسب گفته شد، با توجه به وضعیت منطقه مورد بررسی که مستقل از حوضه برون شهری بوده و دارای مسئله‌های شیب بوده و با استناد به (Ministry of Energy 1992)، سیلاب با دوره بازگشت پنج سال مناسب به نظر می‌رسد. بنابراین هزینه‌های اقتصادی ۴ روش شبیه سازی شده در مدل SWMM، برای سیلاب با دوره بازگشت ۵ سال و با استفاده از ترکیب مجراهای یک قلو و دو قلو بررسی شد.

انتخاب دوره بازگشت مناسب بستگی به عامل‌هایی مانند کاربری اراضی، اهمیت سازه‌های موجود در منطقه، احتمال وجود سیلاب برون شهری، شیب کلی منطقه و ... دارد. با افزایش دوره بازگشت میزان آسیب و زیان‌های ناشی از سیلاب کاهش یافته اما در مقابل میزان هزینه برای ایجاد تاسیسات نیز افزایش پیدا می‌کند. لذا انتخاب دوره بازگشت طراحی بایستی با توجه به نسبت هزینه‌های لازم (ساخت، بهره برداری و نگهداری) به سودهای حاصله و کاهش آسیب و زیان‌ها در سطح‌های احتمالی مختلف صورت گیرد. اما با توجه به اینکه آسیب و زیان‌ها و سودهای ناشی از رخداد سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف (مانند تردد، رکود فعالیت آلودگی زیست محیطی و تلفات جانی و هدرروی مالی) را نمی‌توان به سادگی به ریال تبدیل کرد، لذا از ضوابط و استانداردهای تهیه شده در این زمینه استفاده می‌شود. در این تحقیق از استانداردهای رایج کشور (Ministry of Energy 1992) استفاده شد که در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به وضعیت منطقه مورد بررسی که مستقل از حوضه‌های برون شهری بزرگ (ردیف ۳ جدول ۱) بوده و

جدول ۲ مقایسه نتایج اندازه‌گیری میدانی و مدل عددی در نقطه‌های A تا E

**Table 2** Comparison of field measurement results and numerical model at points A to E

Desired Points	Flow depth (m)			Flow velocity (m/s)		
	Observed	Simulated	Relative Error (%)	Observed	Simulated	Relative Error (%)
A	0.36	0.29	19.44	3.61	4	10.80
B	0.38	0.34	10.53	1.86	1.6	13.98
C	0.52	0.58	11.54	2.12	1.89	10.85
D	0.68	0.75	10.29	3.96	3.16	20.20
E	1.12	1.04	7.14	2.85	3.16	10.88

است. از آنجا که مهم‌ترین فراسنجه در تعیین ابعاد و ظرفیت مجاری عمق جریان می‌باشد، اندازه‌گیری عمق با تکرار به دست آمده و میانگین‌گیری شده است. هرچند جهت افزایش دقت، پارامتر سرعت هم از میانگین‌گیری سه باره حاصل شده است.

همان‌طور که از جدول بالا مشخص است حبیبترین خطا در برآورد عمق و سرعت جریان به حدود ۲۰ درصد محدود می‌شود. علت این اختلاف را می‌توان به عامل‌های مختلفی مرتبط دانست. از جمله اینکه در مدل عددی، استخراج مقادیرهای بیشینه عمق و سرعت ساده بوده اما در اندازه‌گیری میدانی برآورد حداکثر عمق و سرعت جریان بستگی به داوری مهندسی داشته و ممکن است با مدل عددی از این نظر تفاوت داشته باشد. همچنین وجود احتمالی بازدارنده‌های بیرونی و تغییرپذیری‌های موضعی ضریب زبری در مدل عددی در نظر گرفته نشده است. در مجموع مقادیرهای خطا نشان می‌دهد که مدل عددی توانایی خوبی در برآورد فراسنجه‌های جریان دارد.

پس از ورود داده‌های بارندگی به مدل، شبیه‌سازی در دوره بازگشت منتخب به ۴ روش موج دینامیک، پخشیدگی، سینماتیک و جریان ماندگار انجام شده است و ابعاد مجراهای انتقال تعیین شده است. هزینه‌های اجرایی هر یک محاسبه و بایکدیگر مقایسه شده‌است. که در این قسمت یافته‌های مهم ارائه می‌شود. شکل شماره ۶ جانمایی زیرحوضه‌ها در مدل را نشان می‌دهد. مدل

نیمرخ (پروفیل) برای تعیین قطر لوله در هر یک از روش‌ها می‌توان استفاده نمود. در آغاز تراز سطح آب در روش Dynamic و Diffusive تا حدودی نزدیک به هم و پایین‌تر از روش‌های kinematic و Steady flow می‌باشد. اما در ادامه‌ی مسیر خط انتقال، تراز سطح آب در روش‌های (۴) و (۳) بالاتر از روش‌های (۲) و (۱) قرار می‌گیرد؛ علت این است که در آغاز مسیر از لوله‌های یک قلو برای هر ۴ روش استفاده شده اما در ادامه‌ی مسیر خط انتقال و از گره شماره ۱۲۶ تا پایان مسیر، در روش‌های (۴) و (۳) از مجراهای دو قلو استفاده شده است. این در حالی است که در روش (۲) و (۱) در همه‌ی مسیر از لوله‌های یک قلو استفاده شده است.

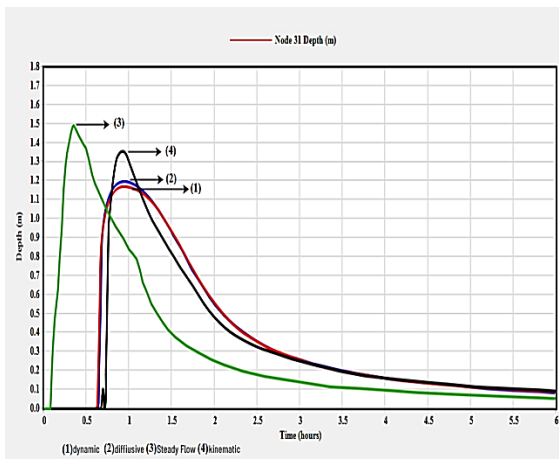


Fig. 9 Comparison of water depth hydrographs from 4 implemented methods

شکل ۹ مقایسه آب نگار عمق آب خروجی ۴ روش انجام شده

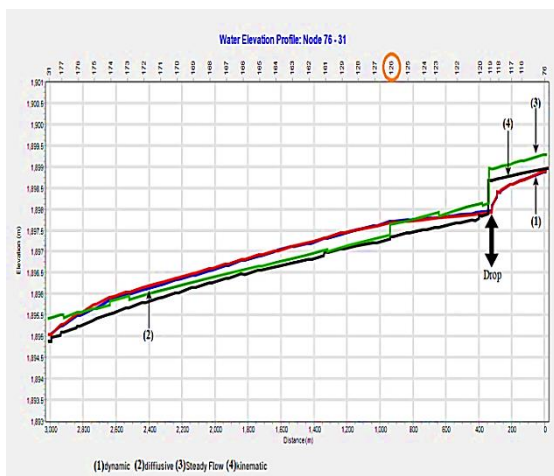


Fig. 10 Comparison of maximum water surface profiles in 4 implemented methods

شکل ۱۰ مقایسه نیمرخ بیشینه تراز سطح آب در ۴ روش انجام شده

از طرفی در بسیاری نقاط (مثل شهرک دانشگاه، محدوده میدان مطهری، کمربندی) دارای مسئله‌های شیب بوده (ردیف ۲) و با استناد به (Ministry of Energy (1992) سیلاب با دوره بازگشت پنج سال انتخاب شد. آب‌نگارهای خروجی دبی و عمق در خروجی خط انتقال اصلی بررسی شد. بیشینه دبی خروجی برای روش موج دینامیک در دقیقه ۵۷، موج پخشیدگی و موج سینماتیک در دقیقه ۵۶ و برای جریان ماندگار در دقیقه ۲۱ رخ داد. مقدار بیشینه دبی خروجی در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی ۳٪، موج سینماتیک ۲۳/۹٪ و در جریان ماندگار ۳۲/۱٪ کمتر بود. در شکل (۸) آب‌نگارهای دبی خروجی در خط انتقال اصلی نشان داده شده‌است.

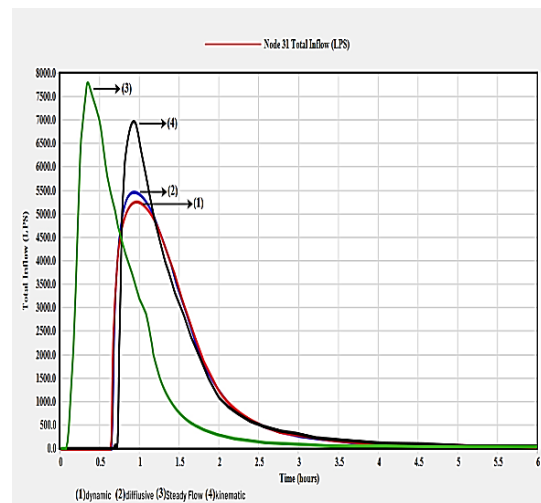


Fig. 8 Comparison of discharge hydrographs from 4 implemented methods

شکل ۸ مقایسه آب نگار دبی خروجی ۴ روش انجام شده

همچنین بیشینه عمق خروجی در خط انتقال اصلی برای روش موج دینامیک و موج سینماتیک در دقیقه ۵۴، و برای روش موج پخشیدگی و جریان ماندگار به ترتیب در دقیقه‌های ۵۳ و ۲۱ اتفاق افتاد. مقدار بیشینه عمق آب خروجی از مجراها نیز در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی، موج سینماتیک و جریان ماندگار به ترتیب ۱/۶٪، ۱۳/۲٪ و ۲۰/۸٪ کمتر بوده است. مقایسه آب‌نگار خروجی عمق در خط انتقال اصلی در شکل (۹) برای ۴ روش یاد شده نشان داده شده‌است.

در شکل (۱۰) بیشینه تراز سطح آب در طول مسیر اصلی خط انتقال درجه یک نمایش داده شده است. از این

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر روش‌های مختلف روندیابی هیدرولیکی سیلاب بر مشخصه‌های هیدرولیکی و ابعاد مجراهای انتقال آب‌های سطحی با استفاده از مدل SWMM انجام شد. همچنین هزینه‌ی اقتصادی روش‌های مختلف روندیابی هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار تکسا محاسبه شد. سیلاب با دوره بازگشت ۵ سال برای بررسی رواناب حوضه مورد بررسی انتخاب شد. نتایج به دست آمده نشان داد:

I. بیشینه دبی در خط لوله انتقال اصلی با دوره بازگشت ۵ سال، در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی، موج سینماتیک و جریان ماندگار، دست کم ۰/۳٪ کمتر بود.

II. میانگین بیشینه عمق در خط لوله انتقال اصلی در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی دست کم ۱/۸٪ بیشتر، و نسبت به روش‌های موج سینماتیک و جریان ماندگار، دست کم ۸٪ کمتر بود.

III. بیشینه سرعت در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی دست کم ۴٪ کمتر بود؛ اما نسبت به روش موج سینماتیک و جریان ماندگار دست کم ۳۸٪ بیشتر بود.

IV. میانگین ابعاد مجراهای استفاده شده در خط لوله انتقال اصلی در روش موج دینامیک و موج پخشیدگی یکسان بود؛ اما نسبت به روش موج سینماتیک و جریان ماندگار دست کم ۹/۸٪ کمتر بود. در جدول ۵ ابعاد مجاری برای سیلاب با دوره بازگشت ۵ سال ارائه شده است.

V. روش موج دینامیک و موج پخشیدگی با توجه به یکسان بودن ابعاد مجاری استفاده شده، هزینه‌های اجرایی یکسانی داشتند. اما هزینه‌های اجرایی این دو روش نسبت به روش موج سینماتیک ۵۵۷/۷٪ و نسبت به روش جریان ماندگار ۵۴٪ کمتر بود. همچنین هزینه‌های اجرایی روش موج سینماتیک ۲/۲٪ بیشتر از روش موج ماندگار بود.

VI. آب‌نگار خروجی دبی در خط لوله انتقال اصلی نشان داد که بیشینه دبی خروجی در سیلاب با دوره بازگشت ۵ سال، در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی، موج سینماتیک و جریان ماندگار حداقل ۳٪ کمتر بود.

از مقایسه‌ی ابعاد مجراهای استفاده شده در هر روش می‌توان دریافت که روش موج دینامیک و روش موج پخشیدگی به ابعاد مجراهای یکسانی منجر می‌شوند. اما در روش موج سینماتیک و جریان ماندگار ابعاد مجراهای استفاده شده بیشتر بود. به طور کلی می‌توان گفت در روش موج دینامیک و موج پخشیدگی میانگین وزنی ابعاد مجاری نسبت به روش موج سینماتیک ۳۸٪ و نسبت به روش جریان ماندگار ۳۹/۴٪ کمتر بوده است. بیشینه دبی در روش موج دینامیک نسبت به روش‌های موج پخشیدگی ۰/۳٪، موج سینماتیک ۱۹/۴٪ و جریان ماندگار ۲۷/۴٪ کمتر بوده است. اما میانگین بیشینه عمق آب در مجرا در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی ۱/۸٪ بیشتر، و نسبت به روش‌های موج سینماتیک و جریان ماندگار به ترتیب ۱۱/۱٪ و ۸٪ کمتر بوده است. همچنین بیشینه سرعت در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی ۴٪ کمتر و نسبت به روش‌های موج سینماتیک ۴۲٪ و جریان ماندگار ۳۸٪ بیشتر بوده است. هزینه‌های اجرایی هر یک از روش‌ها نیز با یکدیگر مقایسه شده است. روش موج دینامیک و موج پخشیدگی با توجه به یکسان بودن ابعاد مجراهای استفاده شده، هزینه‌های اجرایی یکسانی داشتند. اما هزینه‌های اجرایی این دو روش نسبت به روش موج سینماتیک ۵۵/۷٪ و نسبت به روش جریان ماندگار ۵۴٪ کمتر بود. همچنین هزینه‌های اجرایی روش موج سینماتیک ۲/۲٪ بیشتر از روش موج ماندگار بود. در جدول (۳) مشخصه‌های هیدرولیکی به دست آمده از مدل SWMM و همچنین هزینه‌های اجرایی نهایی مربوط به هر روش ارائه شده است.

برای محاسبه هزینه‌های اجرایی آغاز طراحی در هر گزینه انجام شده و پس از تعیین ابعاد مجراها و مسیر آنها، قیمت لوله، بهای حمل، نصب، تجهیز کارگاه، عملیات عمرانی شامل خاکبرداری و خاکریزی و غیره در نرم‌افزار تکسا شده گ و به عنوان ورودی به آن معرفی شده است. سپس نرم‌افزار با رجوع به فهرست بهای موجود اقدام به محاسبه‌های ریالی و متری و برآورد آن‌ها می‌کند.

جدول ۳ مشخصه‌های هیدرولیکی و هزینه‌های اجرایی خط لوله اصلی در روش‌های مختلف

Methods	Return Period(years)	Total Rainfall(mm)	Q <sub>max</sub> (lit/s)	Y <sub>mean</sub> (m)	D <sub>mean</sub> (m)	V <sub>max</sub> (m/s)	cost (\$USD)
Dynamic	5	14.7	5671.60	1.61	2.08	2.91	1,299,009.83
Diffusive	5	14.7	5690.97	1.58	2.08	3.03	1,299,009.83
Kinematic	5	14.7	7035.52	1.76	3.36	1.69	2,735,836.48
Steady Flow	5	14.7	7812.59	1.75	3.44	1.79	2,675,095.62

## ۷- منابع‌ها

Aghajani, N. & Karami, H. (2015). Extraction of IDF Curves from Daily Precipitation Data (Case Study: Mashhad Synoptic Station). Proc. of 10<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Iran.

Akdoğan, Z. & Güven, B. (2016). Assessing the sensitivity of SWMM to variations in hydrological and hydraulic parameters: a case study for the city of Istanbul. *Global NEST Journal*, 18(4), 831-841.

Cappelaere, B. (1997). Accurate diffusive wave routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(3), 174-181.

Du, J., Quian, L., Rui, H., Zuo, T., Zheng, D., Xu, Y. & Xu, C.-Y. (2012). Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 464, 127-139.

Floud, J. (1997). Urban and housing indicators. *Urban studies*, 34(10), 1635-1665.

Ghahraman, B., Shamkoiean, H. & Davari, K. (2010). Extracting regional equations for precipitation intensity-duration-frequency (IDF) using linear moments theory (Case study: Khorasan provinces). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(4), 132-142.

Gu, X., Zhang, Q., Li, J., Singh, V.P., Liu, J., Sun, P. & Cheng, C. (2019) Attribution of global soil moisture drying to human activities: A quantitative viewpoint. *Geophysical Research Letters*, 46(5), 2573-2582.

Harsha, S.S., Agarwal, S. & Kiran, C.H. (2020). Urban Flood Modelling and Management using Storm Water Management Model. *Test Engineering & Management*, 83, 6160-6167.

Khanmohammadi, N. & Rezai, H. (2013). Application of Grey Theory Rainfall – Runoff Modeling for Years of Data Lacking(Case Study: Shahrchay Watershed, Urmia). *Water and Soil Science Journal*, 23(4), 73-86.

Li, D., Hou, J., Zhou, Q., Lyu, J., Pan, Zh., Wang,

VII. آب‌نگار خروجی عمق در خط انتقال اصلی نشان

داد که بیشینه عمق خروجی در سیلاب با دوره بازگشت ۵، در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی، موج سینماتیک و جریان ماندگار دست‌کم ۱٪ کمتر بود. با توجه به اینکه روش موج دینامیک جمله‌های معادله اینرسی را به طور کامل لحاظ می‌کند، نتایج به واقعیت نزدیک تر بوده و به رغم هزینه محاسبه شدنی بیشتر منجر به برآورد واقع بینانه‌تر و کاهش هزینه‌های اجرایی نسبت به دیگر روش‌ها می‌شود. لذا لازم است این موضوع مدنظر طراحان و اداره کنندگان شبکه گردآوری و دفع آب‌های سطحی قرار گیرد.

## ۶- فهرست نشانه‌ها

Q <sub>max</sub>	بیشینه جریان خروجی (m <sup>3</sup> /s)
Y <sub>mean</sub>	میانگین بیشینه عمق (m)
D <sub>mean</sub>	میانگین قطر وزنی مجرا (m)
V <sub>max</sub>	بیشینه سرعت (m/s)
R <sub>t</sub> <sup>T</sup>	میزان بارندگی با تداوم و دوره بازگشت معین (mm)
T	دوره بازگشت (سال)
t	تداوم بارش (min)
R <sub>1440</sub> <sup>2</sup>	بیشینه بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال
Q	دبی جریان (m <sup>3</sup> /s)
S <sub>f</sub>	شیب انرژی
V	سرعت میانگین جریان (m/s)
q	دبی ورودی یا خروجی در طول آبراهه
x	فاصله در امتداد جهت جریان (m)
S <sub>0</sub>	شیب آبراهه
g	شتاب گرانش (m/s <sup>2</sup> )
A	سطح مقطع جریان (m <sup>2</sup> )

- Journal of Hydrology: Regional Studies*, 39, 100985, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100985>.
- Yin, J., Yu, D., Yin, Z., Liu, M. & He, Q. (2016). Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China. *Journal of Hydrology*, 537, 138-145.
- Yuan, L., Mikelonis, A.M. & Yan. E. (2023). Using SWMM for emergency response planning: A case study evaluating biological agent transport under various rainfall scenarios and urban surfaces. *Journal of Hazardous Materials*, 458, 131747, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131747>.
- Zheng, H., Huang, E. & Luo. M. (2020). Applicability of Kinematic Wave Model for Flood Routing under Unsteady Inflow. *Water*, 12(9), 2528, <https://doi.org/10.3390/w12092528>.
- T., Sun, X., Yu, G. & Tang, J. (2023). Urban rainfall-runoff flooding response for development activities in new urbanized areas based on a novel distributed coupled model, *Urban Climate*, 51, 101628, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101628>.
- Liu, Y., Zhang, W. & Cui, X. (2012). Flood Emergency Management Using Hydrodynamic Modelling. *Procedia Engineering Journal*, 28, 750-753.
- Mahdavi, M. (1992). Applied Hydrology. University of Tehran Press, Iran, 437p.
- Mays, L.W. (2001). Stormwater Collection Systems Design Handbook. McGraw-Hill Education.
- Ministry of Energy (1992). Bases and Design Criteria for Sewage and Storm Water Collection System, Publication No. 118-3.
- Mohammed, M.H., Zwain, H.M. & Hassan, W.H. (2021). Modeling the impacts of climate change and flooding on sanitary sewage system using SWMM simulation: a case study. *Results in Engineering*, 12, 100307, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100307>.
- Peruma, M. & Ranga Raju, K.G. (1998). Variable-parameter stage hydrograph routing method: 1. Theory. *Journal of Hydrology Eng.*, 3(2), 115-121.
- Qahraman, B. & Abkhazr, H.R. (2004). Correction of Intensity-Duration-Frequency Relationships of Rainfall in Iran. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 8(8), 56-67.
- Rabori, A.M.R. & Ghazavi, M.A. (2017). Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 10(5), 284-294.
- Rossman, L.A. (2015). Storm Water Management Model, User's Manual Version 5.1, EPA- 600/R-14/413b, Cincinnati, OH.
- Sharifan, R., Roshan, A., Aflatoni, M., Jahedi, A. & Zolghadr, M. (2010). Uncertainty and sensitivity analysis of SWMM model in computation of manhole water depth and subcatchment peak flood. *Procedia-social and Behavioral Sciences*, 2(6), 7739-7740.
- Tsai, C.W. (2003). Applicability of kinematic, noninertia, and quasi-steady dynamic wave models to unsteady flow routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(8), 613-627.
- Wang, H., Hu, Y., Guo, Y., Wu, Z. & Yan, D. (2022). Urban flood forecasting based on the coupling of numerical weather model and stormwater model: A case study of Zhengzhou city.