Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics
Research Article
https://doi.org

Comparative Analysis of Construction Costs of Urban Drainage network in Different Hydraulic Simulation Methods: a Case Study in Ghaderabad County, Fars Province

Masih Zolghadr[1], Farzan Jahanbakhsh[2], Mohammad Rafie Rafiee[1], Abazar Fathi[3]

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.

Abstract

Introduction: In this research, the comparison of different routing methods and their impact on the hydraulic characteristics and dimensions of storm water conveyance pipes and the construction cost of different options is investigated. For this purpose, the rainfall-runoff simulation model (SWMM), is used for 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 method 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 whereas all momentum terms were included. 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. Moreover, 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

ویراستاری نشده

مقاله پژوهشی

https://doi.org/

انجمن هیدرولیک ایران

نشریه هیدرولیک

مقایسه هزینه اجرایی خطوط جمع آوری و دفع آبهای سطحی در روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدرولیکی، مطالعه موردی شهرستان قادرآباد استان فارس

مسیح ذوالقدر[۱]، فرزان جهانبخش[۲]، محمدرفیع رفیعی[۱]، اباذر فتحی[۳]

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.

چکیده: تغییرات اقلیم در سراسر جهان منجر به افزایش رخداد سیلاب‌های مخرب شهری گردیده‌است. لذا طراحی شبکه‌های جمع آوری و دفع آب‌های سطحی با ظرفیت مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر یک مطالعه‌ی موردی در رابطه با شبیه سازی هیدرولیکی سیلاب با استفاده از مدل عددی یک بعدی می‌باشد که در استان فارس- شهرستان قادرآباد انجام شده‌است. 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 آب‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که میانگین 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. همچنین میانگین بیشینه عمق آب در مجرا در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی ٪۱.۸بیشتر، و نسبت به روش‌های موج سینماتیک و جریان ماندگار به ترتیب ، ٪۱۱.۱ و ٪۸ کمتر بوده‌است. میانگین 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 شده‌است. 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 ٪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.

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

۱- مقدمه

پیش بینی‌های جمعیتی نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰، ۶۸ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی خواهند کرد و بیشتر رشد جمعیت جهان در شهرها صورت می‌گیرد (Floud, 1997). از طرفی انتظار می‌رود با روند تغییر اقلیم که به نقطه غیر قابل بازگشت رسیده‌است، تداوم سیلاب‌های مخرب.... در مناطق شهری بیشتر گردد. همچنین با توجه به افزایش سرعت گسترش شهرنشینی در دشت‌های سیلابی از طریق افزایش سطح نفوذناپذیر، ویرانگری‌های سیل روند افزایشی داشته و تلفات جانی و مالی زندگی بشری در حال افزایش می‌باشد. همچنین، شبکه‌های زهکشی موجود در اکثر شهرهای کشورهای در حال توسعه قدیمی هستند و شهرنشینی با سرعت بالا به طور قابل توجهی از ساخت زیرساخت‌های شهری پیشی گرفته است، در نتیجه شهرها را در برابر سیلاب‌ها آسیب‌پذیرتر می‌کند. این عوامل ترکیبی منجر به افزایش فراوانی و شدت سیلاب شهری می‌شود. اجماع فزاینده‌ای وجود دارد که تغییرات آب و هوایی منجر به رویدادهای بارش شدیدتر می‌شود (Du et al., 2012; Yin et al., 2016; Gu et al., 2019).

برای پیشگیری ازخسارات وقوع سیلاب می‌بایست درک صحیحی از این مقوله برای پژوهشگران به وجود آید و با

بکارگیری رهیافت‌های علمی و عملی مناسب اثرات مخرب سیلاب را کاهش داد (Peruma et al., 1998).

جهت هدایت ایمن سیلاب‌های شهری لازم است ابعاد کانال‌ها با توجه به دوره بازگشت منتخب به درستی تخمین زده شود. بدین منظور نیز لازم است شبیه سازی هیدرولیکی یا به عبارتی روندیابی جریان صورت پذیرد. به طور کلی، روش‌های محاسباتی روندیابی سیلاب به دو دسته هیدرولوژیکی و هیدرولیکی تقسیم می‌گردد. سه قانون بقاء جرم، اندازه‌ی حرکت و انرژی، معرف هیدرولیک در کانال-های باز می‌باشند که مجموعه این معادلات (پیوستگی و مومنتوم) در حالت غیرماندگار به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی و تحت عنوان معادلات سنت ونانت نامیده می‌شوند. معادله یک بعدی سنت ونانت بسیار محبوب 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 چه تعداد از عبارات معادله اندازه حرکت در معادلات سنت ونانت به هنگام روندیابی سیلاب استفاده شود، روندیابی هیدرولیکی به چهار روش، جریان ماندگار[1]، موج سینماتیک[2]، موج پخشیدگی[3] و موج دینامیک[4] تقسیم می‌شوند. جریان ماندگار، ساده ترین نوع روندیابی ممکن را نشان می‌دهد، با این فرض که در هر مرحله زمان محاسباتی، جریان یکنواخت و ثابت است. بنابراین هیدروگراف‌های ورودی در بالادست مجرا را بدون تغییر شکل به پایین دست انتقال می‌دهد. این نوع روندیابی، ذخیره کانال، اثرات آب برگشتی، تلفات ورودی/خروجی، معکوس شدن جریان یا جریان تحت فشار را نمی‌تواند در نظر بگیرد. درمعادله موج سینماتیک، نیروهای ثقل و اصطکاک در تعادل با هم بوده و از نیروی اینرسی و فشار صرفه نظر می‌شود. این روش روندیابی معادله پیوستگی را به همراه شکل ساده شده معادله حرکت در هر مجرا حل کرده، سپس فرض می‌کند که شیب سطح آب با شیب مجرا برابر است. روندیابی موج سینماتیک اجازه می‌دهد تا ویژگی های جریان از نظر مکانی و زمانی در داخل یک مجرا تغییر کنند. بنابراین جریان ورودی از کانال عبور می‌کند. با این حال، این شکل از روندیابی نمی‌تواند اثرات آب برگشتی، تلفات 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 سوابق مشاهده شده در مراحل بالادست و پایین دست یا هیدروگراف‌های روی یک رودخانه باشد مناسب است. در مطالعات گذشته نشان داده شده است که روش موج پخشیدگی برای طیف گسترده‌ای از شرایط جریان کانال باز، به ویژه در رودخانه‌ها و جریان‌های طبیعی مانند سیلاب شهری به اندازه کافی دقیق است (Cappelaere, 1997). در معادله موج دینامیک، تمامی عبارات معادله اندازه‌ی حرکت در نظر گرفته می‌شود. این روش با وجود اینکه بیشترین هزینه‌ی محاسباتی را دارد، اما در مقابل، دقت بهتری از نتایج را نسبت به معادله موج سینماتیک و موج پخشیدگی وجریان ماندگار به دست می‌دهد. روندیابی موج دینامیک (پویا) معادلات جریان سنت ونانت یک بعدی را کامل حل می‌کند و بنابراین دقیق ترین نتایج را از لحاظ نظری ایجاد می‌کند. روندیابی موج دینامیک می‌تواند برای ذخیره‌سازی کانال، آب برگشتی، تلفات ورودی/خروجی، معکوس شدن جریان، و جریان تحت فشار مورد استفاده قرار بگیرد. روندیابی هیدرولوژیکی فقط بر پایه معادله پیوستگی یک بعدی استوار است، در حالیکه در روش‌های هیدرولیکی، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت، که همان معادلات سنت ونانت هستند، به طور همزمان به صورت تحلیلی یا عددی حل می‌شوند. تفاوت دیگر بین این دو دسته روش‌های روندیابی، در این است که در روش‌های هیدرولوژیکی، هیدروگراف جریان در طی فرآیند روندیابی فقط در یک نقطه واقع در پایین دست محاسبه و لذا دبی جریان نسبت به زمان در یک فاصله ثابت از محل هیدروگراف بالادست استخراج می‌گردد، در حالیکه در روش‌های هیدرولیکی، به طور همزمان می‌توان هیدروگراف جریان را در هر فاصله از نقطه‌ای که هیدروگراف بالادست آن معلوم است، محاسبه کرد و همزمان دبی، عمق آب و سایر مشخصات جریان سیلاب را بر اساس تابعی از زمان و مکان تعیین نمود. با توجه به پیچیده بودن روندیابی سیلاب و خسارات ناشی از سیل، پیشرفت در این زمینه لازم و ضروری می‌باشد. لذا روش هیدرولیکی در طراحی سیستم‌های جمع آوری و دفع آب‌های سطحی شهری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در

[1] Steady Flow
[2] Kinematic Wave
[3] Diffusive Wave
[4] Dynamic Wave

یک مطالعه، Tsai et al. (2003) به بررسی دقت و کاربرد روش موج سینماتیک و غیر اینرسی و مدل موج دینامیک نیمه ماندگار جهت روندیابی جریان غیرماندگار پرداخت. از این مطالعه، نتیجه گرفته شد که حضور اثر آب برگشتی پایین‌دست مشخصات انتشار موج را تغییر داده و بنابراین معیارهای کاربرد مدل‌های سینماتیک، غیر اینرسی و موج دینامیکی نیمه ماندگار را تغییر داده‌است (Tsai, 2003). در پژوهشی دیگر روش‌های هیدرولیکی روندیابی سیل و مقایسه آن‌ها با هم و نیز با سایر روش‌های هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در رابطه با برتری یک روش نسبت به سایر روش‌ها دریافتند که در یک رودخانه و موقعیت توپولوژیکی خاص نمی‌توان به طور قاطع نظر داد و باید در هر محل دقت و صحت هر یک از روش‌ها مورد آزمون قرار گرفته شود (Yongzhi et al., 2012). تجزیه و تحلیل پارامترهای مدل SWMM برای برآورد رواناب شهری در یک منطقه نیمه خشک مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به دست آمده، پارامترهای مدل SWMM که بر روی اوج و حجم رواناب تاثیر می‌گذارند، شامل میزان تغییرات عمق مخزن، عرض مسیر جریان، درصد منطقه نفوذ ناپذیر و ضریب مانینگ می‌باشد. نتایج معیارهای ارزیابی عملکرد نشان داد که مدل SWMM از دقت خوبی برای شبیه سازی فرآیند بارندگی-رواناب در منطقه نیمه خشک برخوردار است. همچنین آن‌ها دریافتند که انتخاب متغییر ورودی نیز جهت تجزیه و تحلیل دقت و حساسیت مدل SWMM دارای اهمیت می‌باشد (Rabori et al., 2017). تعیین اثرات پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی بر تولید رواناب در یک حوضه آبریز، در شهر استانبول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که در حوضه آبریز مورد مطالعه، موثرترین پارامتر تولید رواناب در مدل SWMM، میزان بارش می‌باشد. همچنین درصد نفوذ ناپذیری و درصد شیب کمترین پارامترها در میان سایر پارامترهای تاثیر گذار بر خروجی بودند (Akdoğan et al., 2016). در پژوهشی دیگر، مدیریت و مدل سازی سیلاب شهری را با استفاده از مدل SWMM مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی آن‌ها در استفاده از SWMM نظارت بر کیفیت و مقادیر ناشی از سرریز شدن حوضه‌های آبریز فرعی بوده است. نتایج مطالعه نشان داد که استفاده از مدل SWMM نتایج خوبی را ارائه می‌دهد. بر این اساس می‌توان برنامه ریزی صحیحی برای طراحی کانال‌ها 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 منهول‌های (چاهک‌های بازدید) یک خط لوله اصلی سیستم زهکشی سطحی شهری بررسی شده است. همچنین تجزیه و تحلیل حساسیت برای دبی اوج سیل زیر حوضه مورد بررسی قرار گرفته است. مدل SWMM برای شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب و روندیابی سیلاب در مجاری، مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی مونت کارلو و روش L.H.S[1] برای تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. نتایج نشان داد که ضریب تغییرات عمق آب در گره‌ها از ۱۲٪ تا ۶۶٪ متغیر است و توزیع احتمال آن چولگی مثبت قابل توجهی دارد، که منجر به کاهش ریسک شکست می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که در بیشتر زیرحوضه‌ها، مساحت و بارش مهم‌ترین تاثیر را در تعیین دبی اوج سیل و عدم قطعیت آن بر جای می‌گذارد. سایر پارامترهای موثر به ترتیب ضریب زبری سطوح نفوذ ناپذیر، درصد نفوذ ناپذیری پوشش، شماره منحنی سطوح نفوذ ناپذیر، ضریب زبری سطوح قبلی و شیب می‌باشند (Sharifan et al., 2010). در مطالعه‌ای دیگر اثرات تغییر آب و هوا و سیل بر روی سیستم فاضلاب یکی از شهرهای کشور عراق با استفاده از مدل SWMM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که SWMM یک ابزار بسیار قدرتمند در پیش‌بینی حجم و مکان سیل در شدت‌های مختلف بارندگی می‌باشد و قابلیت راه‌حل‌های پیشنهادی برای به حداقل رساندن سیل را ارزیابی می‌کند (Mohammed et al., 2021). Yuan وهمکاران با استفاده از مدل SWMM یک ارزیابی موردی از انتقال عوامل بیولوژیکی تحت سناریوهای مختلف بارندگی و سطوح شهری آسفالت، چمن و بتن انجام دادند. نویسندگان برای کالیبره کردن پارامتر شستشو (washoff)، از غلظت هاگ (spore) در آسفالت و بتن در آزمایش میدانی استفاده کردند. نتایج مدل کالیبره شده SWMM در شبیه سازی غلظت هاگ مشابه با نتایج میدان بود. در این تحقیق نشان داده شد که چگونه میتوان با استفاده از مدل SWMM، غلظت هاگ را در شرایط بارندگی های متفاوت از نظر مقدار، شدت و مدت محاسبه کرد و مسیرهای عبور رواناب را در

[1] Latin Hypercubic sampling method

شرایط اضطراری تعیین کرد و اصلاح نمود (Yuan et al. 2023).

در مطالعه دیگری با استفاده از مدل SWMM، ارزیابی کنترل رواناب را در شهر پر جمعیت هنگ کنگ انجام مورد بررسی قرار گرفت. سیستم زهکشی پیچیده و استفاده های بسیار متفاوت از زمین، چالش های بسیار زیادی برای استفاده از مدل برای محققین به همراه داشت. بنابراین محققین از روش توسعه کم تاثیر (Low Impact Development) برای کنترل سیلاب در نقاط پر جمعیت استفاده کردند. محققین نتیجه گرفتند که استفاده از روش توسعه کم تاثیر می تواند رواناب کل و بیشینه را به مقدار ۳۵ تا ۴۵ درصد در دوره های بازگشت ۲، ۱۰ و ۵۰ ساله کاهش دهد. بطور کلی نویسندگان اظهار داشتند که مدل SWMM یک مدل قابل اعتماد برای تخمین رواناب در جوامع شهری بسیار پر جمعیت بوده و از طرفی 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 مناطق شهری استفاده شد. محققین سیلاب های شهری را تحت مناطق توسعه شهری (different urban development degree) در درجات مختلف صفر تا ۸۰ درصد و توسعه کم تاثیر (low-impact development) تحت ۵ دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال را مورد بررسی قرار دادند. محققین به این نتیجه رسیدند که با افزایش درجه توسعه شهری، دبی بیشینه سیستم زهکشی به طور فزایندهای افزایش می یابد. نویسندگان اظهار داشتند اجرای اقدامات توسعه کم تاثیر به طور قابل توجهی اثر کاهش سیلاب سطحی، تخلیه سیستم 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 مشخصات هیدرولیکی و ابعاد مجاری انتقال آب‌های سطحی و هزینه اجرائی گزینه‌های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور از مدل شبیه سازی بارش - رواناب (SWMM)، توسعه یافته توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده، که برای شبیه سازی یک رویداد بارش منفرد یا شبیه سازی بلند مدت کمیت و کیفیت رواناب در مناطق شهری استفاده می‌شود، جهت شبیه سازی هیدرولیکی استفاده شده است. شهر قادرآباد نیز به عنوان مطالعه موردی و با هدف اجرای گزینه‌های مختلف شبیه سازی مورد توجه قرار گرفته که در ادامه معرفی گردیده‌است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، شهر قادر آباد از توابع استان فارس (در کشور ایران) می‌باشد. گستره مورد مطالعه براساس سیستم مختصات کارتزین (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 ثانیه قرار دارد. این شهر در شمال استان فارس با ارتفاع ۱۹۰۰ متر از سطح آزاد دریا قرار گرفته است و مساحت آن ۱۳۲۸ کیلومتر مربع است. شکل(۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

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

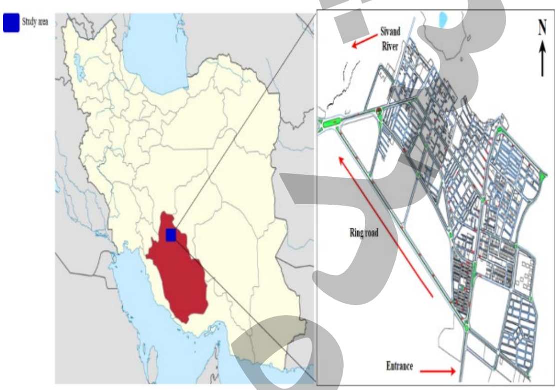

Fig.1 Location of the study area
شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه

ناگهانی ظرفیت عبور جریان در کانال شده و پس‌زدن آب در این نقاط، موجب آبگرفتگی در این بخش‌ها گردیده‌است. بر اساس بازدیدهای میدانی صورت گرفته و بررسی نقشه‌های 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. سیستم دفع آب‌های سطحی این معابر متشکل از جداول با ابعاد مختلف بنحوی است که سیلاب را به سمت پایین‌ترین نقطه شهر از نظر ارتفاعی هدایت می‌کند. لازم به ذکر است که این مناطق جزو مناطق مشکل دار از نظر رواناب‌های سطحی بوده و هرساله محتمل خسارات ناشی از سیلاب‌های شهری می‌گردد.

۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مقایسه روش‌های مختلف روندیابی جریان و تاثیر آن‌ها بر مشخصات هیدرولیکی و ابعاد مجاری انتقال آب‌های سطحی و هزینه مقایسه اجراء گزینه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جهت طراحی خطوط انتقال آب های سطحی علاوه بر لزوم تبدیل بارش به رواناب (شبیه سازی هیدرولوژیکی) بایستی شبیه سازی 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 حوضه ها و هم در مسیل‌ها و شبکه‌های آب‌های سطحی شهری و شبیه سازی به صورت جریان آزاد و تحت فشار وجود دارد. از طرفی دیگر با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه رواناب شهری، مدل SWMM نشان داده است که از توانایی مناسبی برای برآورد سیلاب های شهری برخوردار می باشد و اساسا نیز به همین منظور توسعه یافته است، هرچند توانایی شبیه سازی سیلاب در حوضه های برون شهری را نیز داراست. بدین منظور از مدل یک بعدی EPA[1]-SWMM[2] جهت شبیه سازی رواناب و محاسبه ابعاد مجاری انتقال طراحی شده توسط روش‌های مختلف روندیابی استفاده شده است. سپس جهت 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 برنامه ریزی و بودجه می‌باشد. اطلاعات پایه سیستم شامل فهرست بهای از سال ۷۰ تاکنون به اضافه‌ی اطلاعات تکمیلی آیتم (کدهای اضافه یا کسر بها و شرح‌های مربوطه، اثر واحد، شرح مختصر و...) و ضرایب مصالح مصرفی خاص، حمل برای تمامی فهرست بها وشاخص‌های فصلی، رشته‌ای و کلی برای تمام سال‌ها است. نرم افزار تکسا جهت انجام متره و برآورد نویسی، صورت وضعیت نویسی، تهیه برنامه زمان بندی، مابه التفاوت نویسی، تعدیل نویسی، تهیه آنالیز بهاء و پیشنهاد قیمت پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شود.

۳-۱- مطالعات هیدرولوژی

هدف اصلی مطالعات هیدرولوژی در طرح‌های جمع آوری و دفع آب‌های سطحی، برآورد رواناب سطحی حوضه‌های شهری و برون شهری محدوده مورد مطالعه است و با استفاده از نتایج این مطالعات ضمن روندیابی و ترکیب هیدروگراف‌ها در نقاط مورد نیاز امکان ارزیابی شرایط موجود، ظرفیت سنجی هیدرولیکی، برآورد حجم سیلاب کنترلی و اصلاح شبکه فراهم می‌گردد. در ابتدای مطالعات، منطقه به طور کامل مورد بازدید میدانی قرار گرفت و سپس با استفاده از نقشه های سازمان نقشه برداری کشوری و همچنین نقشه های برداشت شده توسط شهرداری منطقه مورد مطالعه، مسیر حرکت آب و مرز حوضه ها تعیین گردید، بطوریکه وسعت حوضه‌های برون شهری حدود ۳۶۱.۲ هکتار و حوضه های درون شهری ۳۰۲.۷ هکتار می‌باشد. موقعیت حوضه مطالعاتی 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 می‌گردد. شبکه جمع آوری آب‌های سطحی شامل جداول مستطیلی روباز در ابعاد متنوع می‌باشد که با بررسی‌های میدانی برداشت گردید. لازم به ذکر است که جهت بررسی رواناب حوضه ابتدا باید اطلاعات فیزیوگرافی آن مشخص گردد. این اطلاعات به صورت شناسنامه شامل نام خیابان و کوچه، شماره کانال، درجه سیستم، نوع سیستم جمع‌آوری رواناب، ابعاد مقطع (طول، عرض و ارتفاع)، مختصات شروع

[1]U.S. Environmental Protection Agency

[2]Storm Water Management Model

سیستم جمع‌آوری رواناب و مختصات خاتمه این سیستم و حتی نوع ورودی آن می‌باشد. پس از برداشت اطلاعات ذکر شده در عملیات صحرایی این اطلاعات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پس از انطباق با نقشه‌های ۱:۲۰۰۰ منطقه و تصحیح اطلاعات مشکوک و در مواردی برداشت مجدد داده‌ها، این اطلاعات بر روی نقشه‌های ۱:۲۰۰۰ منطقه پیاده گردید. در مرحله بعد با استفاده از اطلاعات پیاده شده برروی نقشه‌های منطقه، مرز محدوده شهری تدقیق و با استفاده از موقعیت و جهت شیب کانال‌های موجود در سطح این حوضه، به ۱۹ زیرحوضه شهری و ۴ زیر حوضه برون شهری تقسیم گردید که در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

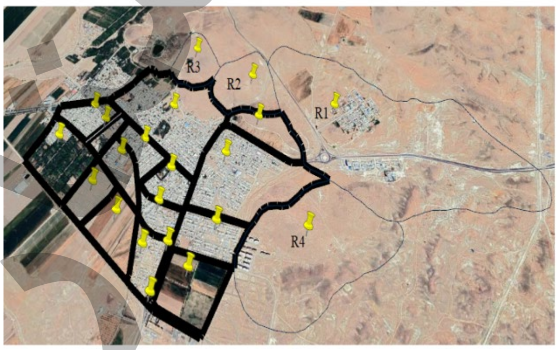

Fig. 2 Location of the study basin (Rural basins are marked with R)

شکل ۲ موقعیت حوضه مورد مطالعه (حوضه‌های برون شهری با R مشخص شده‌اند)

در حال حاضر در اکثر مطالعات مربوط به بررسی سیلاب شهری، از داده‌های بارندگی به عنوان پایه استفاده می‌شود و سپس مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی- بارش رواناب مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wang et al., 2022). یکی از عوامل مورد نیاز در تهیه و توسعه مدل هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز شناخت توزیع زمانی بارش می‌باشد. با توجه به موقعیت ایستگاه‌های منطقه در محدوده مورد مطالعه، طول دوره آماری، قابلیت گسترش آمار و شرایط مشابه اقلیمی، در نهایت ۱۴ ایستگاه باران سنجی انتخاب گردید. انتخاب ایستگاه‌های مذکور به گونه‌ای بوده‌است که اولاً محدوده مورد مطالعه را تحت پوشش آماری خود قرار داده و ثانیا گویای تغییرات بارش در ترازهای مختلف ارتفاعی باشند. شکل ۳ موقعیت ایستگاه ها را نشان می‌دهد.

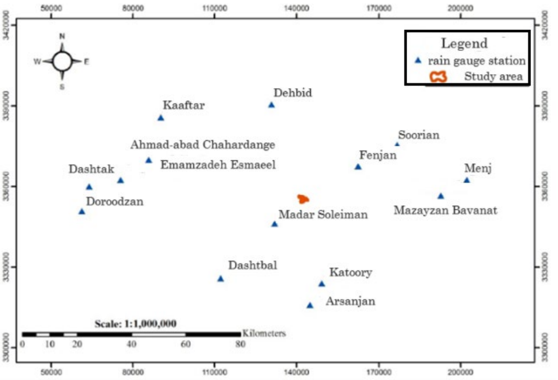

Fig. 3 Study area boundary and the location of considered stations

شکل ۳ محدوده منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده

پس از بررسی وضعیت ایستگاه‌های بارندگی مشخص گردید که ایستگاه مادرسلیمان که در مجاورت حوضه مطالعاتی قرار گرفته است، از کیفیت آماری مناسب نسبت به حوضه مورد مطالعه و سایر ایستگاه‌ها برخوردار است که در ادامه توضیحات تکمیلی در این خصوص ارائه شده است.

با توجه به اینکه تیپ‌های شدید مانند A1 کمترین مقدار و تیپ‌های تأخیری مثل B بیشترین مقدار در دبی پیک سیلاب را نشان دادند. بنابراین تیپ A2 سازمان حفاظت خاک آمریکا (که نتایج آن بین دوتیپ یاد شده قرار می‌گیرد) به عنوان الگوی بارندگی جهت برآورد سیلاب حوضه مورد مطالعه انتخاب گردیده است.

لازم به ذکر است که در مطالعاتی که هدف آن ها طراحی شبکه جمع آوری و دفع آبهای سطحی است، انتخاب الگوی توزیع زمانی بارش از حساسیت خاصی برخوردار است. اما با توجه به اینکه هدف مطالعه حاضر مقایسه گزینه های مختلف روندیابی است، انتخاب الگوی فوق از حساسیت کمتری برخوردار است.

جهت انجام مطالعات هواشناسی، تمامی آمار و اطلاعات مورد نیاز ایستگاه‌های هواشناسی حوضه مورد مطالعه، شناسایی و جمع آوری شدند. پس از بررسی وضعیت آماری ایستگاه‌های یاد شده، و با توجه به اینکه در اکثر منابع هیدرولوژی مثل Mahdavi (1992) طول دوره آماری مناسب، ۳۰ سال یا بیشتر عنوان شده است. با توجه به 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 عموما برای تعیین شدت بارندگی، از روابط تجربی در بسیاری نقاط جهان (از جمله ایران) اســـتفاده می‌گردد. به عنوان مثال می توان به رابطه بل بر اســـاس داده های امریکا، کوتیاری و گارد در هندوســـتان، فرری و فرو برای ایتالیا وآلیلا در کانادا اشـاره نمود. در ایران نیز، Ghahraman and Abkhezr (2004) به این نتیجه رســـیدند که رابطه آنها که در این تحقیق نیز مورد اســـتفاده قرار گرفته اســـت، از دقت مناســـبی برای تخمین شـدت بارندگی برخوردار است. این رابطه در سایر نقاط کشـور مورد اسـتفاده قرار گرفته و نتایج مناسـبی را ارائه داده اســـت. بنابراین در این تحقیق از روش قهرمان-آبخضر استفاده شد. از طرفی بسیاری از محققین 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 مطالعه برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سـاله محاسـبه شـد و منحنی‌های شدت- مدت- فراوانی تهیه شده و در شکل (۴) نشان داده شده‌است. رابطه قهرمان-آبخضر عبارت است از:

$$t \le 1hr \qquad (1)$$
$$R_t^T = 0.1299t^{0.4952}[0.4608+0.2349Ln(T-0.62)]R_{60}^{10}$$

$$1 \le t \le 2hr \qquad (2)$$
$$R_t^T = 0.1372t^{0.4778}[0.4608+0.2349Ln(T-0.62)]R_{60}^{10}$$

$$2 \le t \le 9hr \qquad (3)$$
$$R_t^T = 0.2009t^{0.3937}[0.5565+0.1948Ln(T-0.8)]R_{60}^{10}$$

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

که در معادلات فوق، R_t^T مقدار بارندگی با تداوم و دوره بازگشت معین(mm)، T دوره بازگشت (سال)، t تداوم بارش(min) و R_{1440}^2 حداکثر بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال می‌باشد. میزان تداوم بارش تا ۵۴۰ دقیقه و دوره بازگشت تا ۱۰۰ سال می‌باشد؛ زیرا معادلات قهرمان - آبخضر استفاده شده در این مطالعه، در تدام بارش و دوره بازگشت‌های بیشتر نتایج ضعیفی را ارائه داده‌است.

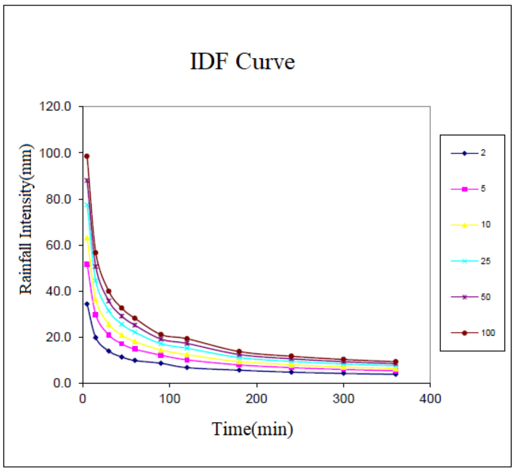

Fig. 4 Intensity - Duration - Frequency curve of precipitation in the study area

شکل۴ نمودار منحنی شدت - مدت - فراوانی بارش در منطقه مورد مطالعه

پس از بررسی وضعیت ایستگاه‌های بارندگی مشخص گردید که ایستگاه مادرسلیمان که در مجاورت حوضه مطالعاتی قرار گرفته است، از کیفیت مناسب تری نسبت به سایر ایستگاه‌ها برخوردار است. همچنین این ایستگاه دارای ۳۴ سال آماری می‌باشد. مهمترین دلیل مناسب تر بودن این ایستگاه، بیشتر بودن سال های آماری، نزدیکی به منطقه مورد مطالعه نسبت به سایر ایستگاه ها و داده های بیشتر بوده است. همانگونه که قبلا اشاره شد، تعدادی ایستگاه در مجاورت منطقه مطالعاتی وجود دارد. بین آمار ایستگاههای دارای آمار ناقص و ایستگاههای 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 بعنوان ایستگاه مبنا انتخاب گردید. علاوه بر طول دوره آماری مناسب، آمار مفقود کمتر این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه ها جزو عوامل موثر در انتخاب این ایستگاه بوده است. علاوه بر آن، نتایج آزمون همگنی نشان می دهد که آمار ایستگاه مادر سلیمان همگن بوده است.

بدین ترتیب این ایستگاه به عنوان ایستگاه معرف بارندگی حوضه مورد مطالعه انتخاب شده‌است. در ادامه با استفاده از مطالعه گرادیان بارش، میانگین بارندگی ســـالانه برای حوضـــه مورد مطالعه ۲۷۶ میلیمتر و حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته برای حوضه مورد مطالعه ۴۴ میلیمتر محاسبه شد.

۳-۲- انتخاب دوره بازگشت مناسب جهت ارزیابی و انجام طراحی‌های لازم

انتخاب دوره بازگشت مناسب بستگی به عواملی مثل کاربری اراضی، اهمیت سازه‌های موجود در منطقه، احتمال وجود سیلاب برون شهری، شیب کلی منطقه و ... دارد. با افزایش دوره بازگشت میزان خسارت ناشی از سیلاب کاهش یافته اما در مقابل میزان هزینه برای ایجاد تاسیسات نیز افزایش پیدا می‌نماید. لذا انتخاب دوره بازگشت طراحی بایستی با توجه به نسبت هزینه‌های لازم (ساخت، بهره برداری و نگهداری) به منافع حاصله و کاهش خسارت در سطوح احتمالاتی مختلف صورت گیرد. اما با توجه به اینکه خسارت‌ها و منافع ناشی از وقوع سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف (مثل ترافیک، رکود فعالیت آلودگی زیست محیطی و تلفات جانی و مالی) را نمی‌توان به سادگی به ریال تبدیل نمود، می‌توان از روش‌های ساده‌تر مثل ضوابط و استانداردهای تهیه شده در این زمینه استفاده کرد. بدین منظور از پیشنهادات Ministry of Energy (1992) استفاده شده‌است.

جدول ۱ دوره بازگشت پیشنهادی بر اساس 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

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

در این مطالعه، از بین روش‌های موجود برآورد سیلاب نظیر منطقی شهری، اشنایدر، SCS، USGS، هیدروگراف واحد، سانتا باربارا، شیکاگو و ...، مدل مخزن غیرخطی پایه گذاری شده براساس ترکیب المان‌های جریان‌های روزمینی و جریان‌های کانالیزه شده، که قابلیت محاسبه سیلاب در قسمت‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر را دارا می‌باشد، انتخاب گردیده‌است. علت این موضوع علاوه بر مطالعه تحقیقات پیشین به علت مبنای فیزیکی، نگاه توزیعی، امکان بررسی جداگلنه نواحی 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 فوق‌الذکر در این مطالعه از مدل ریاضی SWMM جهت برآورد سیلاب استفاده گردید.

۳-۳- مدل SWMM

همانگونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، در این مطالعه از مدل SWMM جهت شبیه سازی رواناب در منطقه مورد مطالعه 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 دینامیکی یک بعدی می‌باشد که توانایی شبیه سازی کمی و کیفی رواناب را دارد و عمدتا در مناطق شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل به طور گسترده در سراسر جهان برای برنامه ریزی، تجزیه و تحلیل و طراحی مربوط به رواناب آب طوفان[1]، فاضلاب ترکیبی[2]، فاضلاب بهداشتی[3] و سایر سیستم‌های 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 کانال و مجرا، با استفاده از معادله یک بعدی سنت-ونانت اداره می‌شود و در بخش انتقال نیز معادله سنت-ونانت را با استفاده از روش تفاضلات محدود ضمنی و ضریب متوالی حل می‌کند. معادله پیوستگی و مومنتوم عبارت است از:

[1]Storm Water Runoff
[2]Combined Sewers
[3]Sanitary Sewers

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

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

Kinematic

Diffusive

Dynamic

رابطه (۵) پیوستگی و رابطه (۶) اندازه حرکت نام دارد، که در آن Q (m³/s) دبی جریان، S_f شیب انرژی، V سرعت متوسط جریان(m/s)، q دبی ورودی یا خروجی در طول کانال()، x فاصله در امتداد جهت جریان(m)، S_0 شیب کانال، g (m/s²) شتاب گرانش و A سطح مقطع جریان(m²) می‌باشد (Mays, 2001).

۳-۴- گزینه‌های مختلف طراحی

مسیر دفع آب‌های سطحی در شکل (۵) نمایش داده شده‌است(main pipe). این مسیر نهایتا به رودخانه سیوند که از مجاور منطقه مورد مطالعه عبور می‌کند، وارد می‌گردد. یک کانال روباز از ابتدای خیابان پروین اعتصامی وارد مجرای زیرزمینی شده و به سمت میدان مطهری جریان می یابد و این خط انتقال از جاده کمربندی به سمت غرب امتداد می‌یابد. در مسیر کمربندی خطوط فرعی دیگری که از شمال به جنوب جریان دارند، امکان ورود به این خط اصلی را دارند. لذا خط انتقال فوق الذکر به عنوان خط اصلی در نظر گرفته شده و خطوط ورودی به آن خطوط فرعی درجه دوم می‌باشند.

باتوجه به آنچه در قبل گفته شد، داده‌های ورودی مورد نیاز نرم افزار SWMM جمع آوری و جهت 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 جهت شبیه سازی زیر حوضه‌ها، داده‌های مربوط به گره‌ها و داده‌های لازم جهت ایجاد خطوط انتقال(لوله‌ها و کانال‌های 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 مطالعه شبیه سازی شد. در ادامه داده‌های خروجی که شامل دبی، عمق آب در مجرا، سرعت و ابعاد مجاری برداشت، و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. 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 اضافه‌ی اطلاعات تکمیلی آیتم (کدهای اضافه یا کسر بها و شرح‌های مربوطه، اثر واحد، شرح مختصر و...) و ضرایب 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 تمام سال‌ها است. در این پژوهش، طراحی خطوط انتقال اصلی و فرعی بر اساس اینکه در گره‌ها سیل زدگی وجود نداشته باشد، انجام شده‌است. در صورت لزوم در مناطقی از خطوط لوله دوقلو نیز استفاده شده‌است.

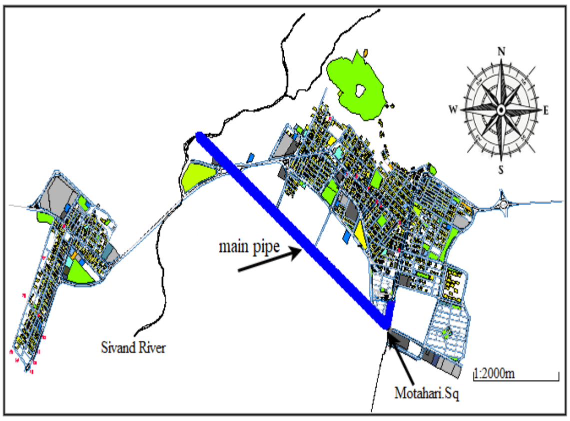

Fig. 5 Surface runoff drainage path

شکل ۵ مسیر دفع آب‌های سطحی

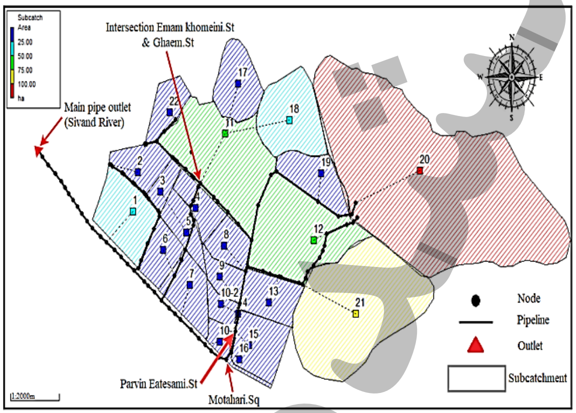

Fig. 6 Watershed delineation of Qaderabad County in SWMM model

شکل ۶ جانمایی حوضه‌های آبریز شهرستان قادر آباد در مدل SWMM

۴- نتایج و بحث

در این تحقیق برای صحت سنجی نتایج، اندازه گیری میدانی در طی بارندگی های مختلفی انجام شد و در یکی از آن ها که نزدیک به بارندگی طرح بوده (بارندگی ۹۸/۱/۶) است مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در چند نقطه از منطقه مورد مقایسه قرار گرفته است که به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه گردیده است. همچنین نقاط مورد نظر در شکل شماره ۷ نمایش داده شده است. در این نقاط عمق جریان به وسیله متر و خط کش و سرعت جریان به وسیله جسم شناور اندازه گیری شده است. از آنجا که مهم ترین پارامتر در تعیین ابعاد و ظرفیت مجاری عمق جریان می باشد، اندازه گیری عمق با تکرار به دست آمده و میانگین گیری شده است. هرچند جهت افزایش دقت، پارامتر سرعت هم از میانگین گیری سه باره حاصل شده است.

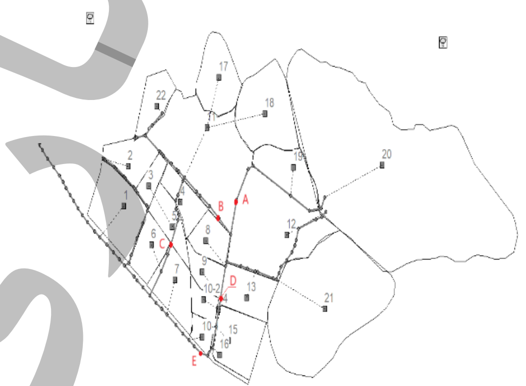

Fig. 7 Measured points for comparing field observations and numerical simulation

شکل۷ نقاط اندازه‌گیری شده جهت مقایسه نتایج میدانی و شبیه سازی عددی

جدول ۲ مقایسه نتایج اندازه گیری میدانی و مدل عددی در نقاط 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	Relarive Error (%)	Observed	Simulated	Relarive 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

همانطور که از جدول فوق مشخص است حداکثر خطا در برآورد عمق و سرعت جریان به حدود ۲۰ درصد محدود می‌شود. علت این اختلاف را می‌توان به عوامل مختلفی مرتبط دانست. از جمله اینکه در مدل عددی، استخراج مقادیر حداکثر عمق و سرعت ساده بوده اما در اندازه‌گیری میدانی برآورد حداکثر عمق و سرعت جریان بستگی به قضاوت مهندسی داشته و ممکن است با مدل عددی از این نظر تفاوت داشته باشد. همچنین وجود احتمالی موانع خارجی و تغییرات موضعی ضریب زبری در مدل عددی در نظر گرفته نشده است. در مجموع مقادیر خطا نشان می‌دهد که مدل عددی توانایی خوبی در برآورد پارامترهای جریان دارد.

پس از ورود داده‌های بارندگی به مدل، شبیه سازی در دوره بازگشت منتخب به ۴ روش موج دینامیک، پخشیدگی، سینماتیک و جریان ماندگار انجام شده است و ابعاد مجاری انتقال تعیین گردیده‌است. هزینه‌های اجرایی هریک محاسبه و بایکدیگر مقایسه شده‌است. که در این قسمت یافته های مهم ارائه می‌گردد. شکل شماره ۶ جانمایی زیرحوضه‌ها در مدل را نشان می‌دهد. مدل نهایی متشکل از ۱۹ حوضه شهری و ۴ حوضه برون شهری می‌باشد. حوضه‌های برون شهری که در شمال شرقی حوضه قرار دارند با حروف 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 عدم سیل زدگی در گره‌ها انجام شده‌است. همانطور که در قسمت انتخاب سیلاب با دوره بازگشت مناسب گفته شد، با توجه به وضعیت منطقه مورد مطالعه که مستقل از حوضه برون شهری بوده و دارای مشکلات 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 مورد بررسی قرار گرفت.

انتخاب دوره بازگشت مناسب بستگی به عواملی مثل کاربری اراضی، اهمیت سازه‌های موجود در منطقه، احتمال وجود سیلاب برون شهری، شیب کلی منطقه و ... دارد. با افزایش دوره بازگشت میزان خسارت ناشی از سیلاب کاهش یافته اما در مقابل میزان هزینه برای ایجاد تاسیسات نیز

افزایش پیدا می‌نماید. لذا انتخاب دوره بازگشت طراحی بایستی با توجه به نسبت هزینه‌های لازم (ساخت، بهره برداری و نگهداری) به منافع حاصله و کاهش خسارت در سطوح احتمالاتی مختلف صورت گیرد. اما با توجه به اینکه خسارت‌ها و منافع ناشی از وقوع سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف (مثل ترافیک، رکود فعالیت آلودگی زیست محیطی و تلفات جانی و مالی) را نمی‌توان به سادگی به ریال تبدیل نمود، لذا از ضوابط و استانداردهای تهیه شده در این زمینه استفاده می‌گردد. در این تحقیق از استانداردهای رایج کشور (Ministry of Energy, 1992) استفاده گردید که در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه‌به وضعیت منطقه مورد مطالعه که مستقل از حوضه های برون شهری بزرگ (ردیف ۳ جدول ۱) بوده و از طرفی در بسیاری نقاط (مثل شهرک دانشگاه، محدوده میدان مطهری، کمربندی) دارای مشکلات شیب بوده (ردیف ۲) و با استناد به Ministry of Energy (1992) سیلاب با دوره بازگشت پنج سال انتخاب شد.

هیدروگراف‌های خروجی دبی و عمق در خروجی خط انتقال اصلی مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر دبی خروجی برای روش موج دینامیک در دقیقه ۵۷، موج پخشیدگی و موج سینماتیک در دقیقه ۵۶ و برای جریان ماندگار در دقیقه ۲۱ اتفاق افتاد. مقدار حداکثر 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) هیدروگراف‌های دبی خروجی در خط انتقال اصلی نشان داده شده‌است.

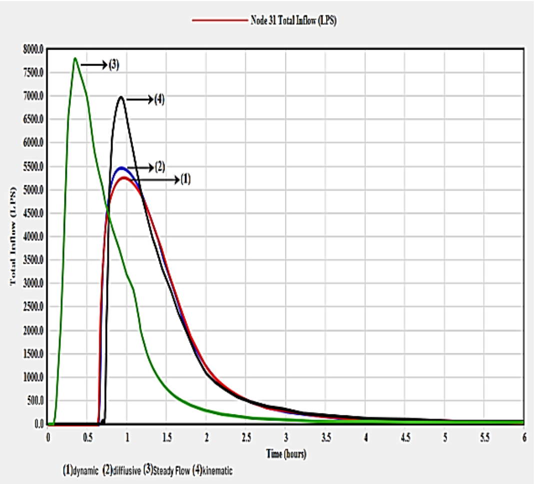

Fig. 8 Comparison of discharge hydrographs from 4 implemented methods

شکل۸ مقایسه هیدروگراف دبی خروجی ۴ روش انجام شده

همچنین حداکثر 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 حداکثر 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 هیدروگراف خروجی عمق در خط انتقال اصلی در شکل (۹) برای ۴ روش مذکور نشان داده شده‌است.

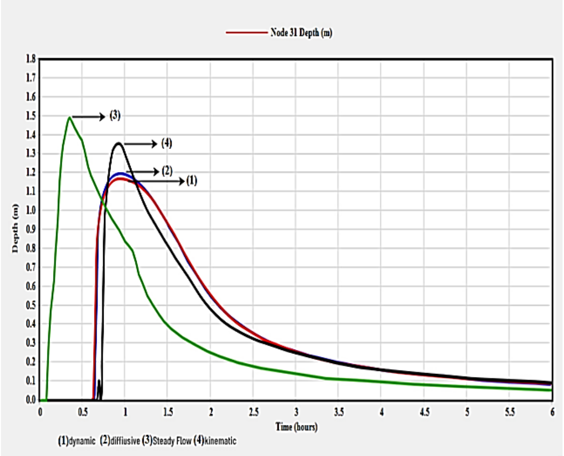

Fig. 9 Comparison of water depth hydrographs from 4 implemented methods

شکل ۹ مقایسه هیدروگراف عمق آب خروجی ۴ روش انجام شده

در شکل (۱۰) حداکثر تراز سطح آب در طول مسیر اصلی خط انتقال درجه یک نمایش داده شده است. از این پروفیل برای تعیین قطر لوله در هریک از روش‌ها می‌توان استفاده نمود. در ابتدا تراز سطح آب در روش Dynamic و Diffusive تقریبا 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 ابتدای مسیر از لوله‌های یک قلو برای هر ۴ روش استفاده شده اما در ادامه‌ی مسیر خط انتقال و از گره شماره ۱۲۶ تا انتهای مسیر، در روش‌های (۴) و (۳) از مجراهای دو قلو استفاده شده است. این در حالیست که در روش (۲) و (۱) در تمامی مسیر از لوله‌های یک قلو استفاده شده است.

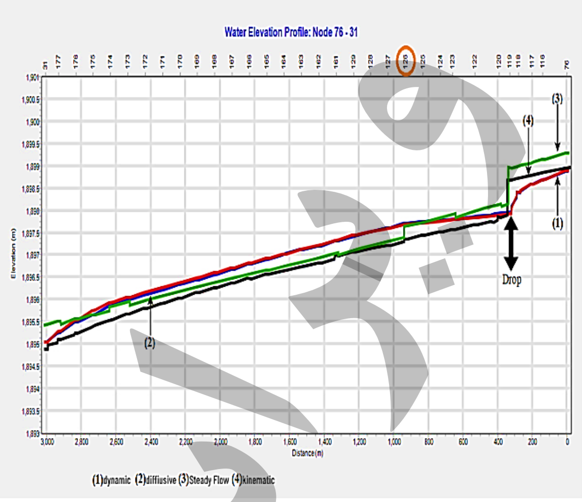

Fig. 10 Comparison of maximum water surface profiles in 4 implemented method

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

از مقایسه‌ی ابعاد مجراهای استفاده شده در هر روش می‌توان دریافت که روش موج دینامیک و روش موج پخشیدگی به ابعاد مجراهای یکسانی منجر می‌گردند. 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 مجاری 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 ملندگار بود. در جدول(۳) مشخصات هیدرولیکی به دست آمده از مدل SWMM و همچنین هزینه‌های اجرایی نهایی مربوط به هر روش ارائه شده است.

جهت محاسبه هزینه‌های اجرایی ابتدا طراحی در هر گزینه انجام شده و پس از تعیین ابعاد مجاری و مسیر آنها، قیمت لوله، بهای حمل، نصب، تجهیز کارگاه، عملیات عمرانی شامل خاکبرداری و خاکریزی و غیره در نرم‌افزار تکسا لحاظ گردیده و به عنوان ورودی به آن معرفی شده است. سپس نرم‌افزار با رجوع به فهرست بهای موجود اقدام به محاسبات ریالی و متره و برآورد می‌نماید.

جدول ۳ مشخصات هیدرولیکی و هزینه های اجرایی خط لوله اصلی در روش های مختلف

Table 3 Hydraulic specifications and construction costs of the main pipeline in different methods

Methods	Return Period(years)	Total Rainfall(mm)	Q_{max} (lit/s)	Y_{mean} (m)	D_{mean} (m)	V_{max} (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

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر روش‌های مختلف روندیابی هیدرولیکی سیلاب بر مشخصات هیدرولیکی و ابعاد مجاری 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 جهت بررسی رواناب حوضه مورد مطالعه 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، حداقل ۰.۳٪ کمتر بود.

II. میانگین بیشینه عمق در خط لوله انتقال اصلی در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی حداقل ۱.۸٪ بیشتر، و نسبت به روش‌های موج سینماتیک و جریان ماندگار، حداقل ۸٪ کمتر بود.

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

IV. میانگین ابعاد مجاری 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 حداقل 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 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.

VI. هیدروگراف خروجی دبی در خط لوله انتقال اصلی نشان داد که حداکثر 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.

VII. هیدروگراف خروجی عمق در خط انتقال اصلی نشان داد که حداکثر عمق خروجی در سیلاب با دوره بازگشت ۵، در روش موج دینامیک نسبت به روش موج پخشیدگی، موج سینماتیک و جریان ماندگار حداقل ۱٪ کمتر بود.

با توجه به اینکه روش موج دینامیک جملات معادله اینرسی را به طور کامل لحاظ می‌کند، نتایج به واقعیت نزدیک تر بوده و علی رغم هزینه محاسباتی بیشتر منجر به برآورد واقع بینانه‌تر و کاهش هزینه‌های اجرایی نسبت به سایر روش‌ها می‌گردد. لذا لازم است این موضوع مدنظر طراحان و اداره کنندگان شبکه جمع آوری و دفع آب‌های سطحی قرار گیرد.

۶- فهرست علایم

حداکثر جریان خروجی(m^3/s)	Qmax
میانگین حداکثر عمق(m)	Ymean
میانگین قطر وزنی مجرا (m)	Dmean
حداکثر سرعت(m/s)	Vmax
مقدار بارندگی با تداوم و دوره بازگشت معین(mm)	R_t^T
دوره بازگشت (سال)	T
تداوم بارش(min)	t
حداکثر بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال	R_{1440}^2
دبی جریان (m^3/s)	Q
شیب انرژی	S_f
سرعت متوسط جریان(m/s)	V
دبی ورودی یا خروجی در طول کانال	q
فاصله در امتداد جهت جریان(m)	x
شیب کانال	S_0
شتاب گرانش (m/s^2)	g
سطح مقطع جریان(m^2)	A

۷- منابع

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

Akdoğan, Z. and 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. "Accurate diffusive wave routing," Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123, no. 3, pp. 174-181, 1997.

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.

Rabori, A. M.R. and Ghazavi, M. A. (2017). Reveshty, "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. "Storm Water Management Model User’s Manual Version 5. 1, no," September. Cincinnati, OH, vol. 45268, 2015.

Sharifan. R. Roshan, A. Aflatoni, M. Jahedi, A. and 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. and Yan, D. (2022). Urban flood forecasting based on the coupling of numerical weather model and stormwater model: A case study of Zhengzhou city. Journal of Hydrology: Regional Studies, 39, 100985.

Yin, J. Yu, D. Yin, Z. Liu, M. and 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.

Liu, Y., Zhang, W. and Cui, X. (2012). Flood Emergency Management Using Hydrodynamic Modelling. Procedia Engineering Journal, 28, 750-753.

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.

Zheng, H. Huang, E. and Luo. M. (2020). Applicability of Kinematic Wave Model for Flood Routing under Unsteady Inflow. Water, 12(9), 2528.

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. (In Persian)

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, vol. 46(5), 2573-2582.

Harsha, S. S. Agarwal, S. and Kiran, C. H. (2020). Urban Flood Modelling and Management using Storm Water Management Model.

Khanmohammdai, N. and 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. (In Persian)

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

Mahdavi, M. (1992). Applied Hydrology. University of Tehran Press. Iran, 437P. (In Persian)

Mays, L. W. (2001). Stormwater collection systems design handbook. McGraw-Hill Education.

Ministry of Energy, Publication No. 118-3. (1992). Bases and Design Criteria for Sewage and Storm Water Collection System, Accessed 12 February 2024; https://sazeplus.com/n-118/ (In Persian)

Mohammed, M. H. Zwain, H. M. and 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.

Peruma, M. Ranga Raju, K.G. (1998). Variable-parameter stage hydrograph routing method: 1. Theory. Journal of hydrology eng., ASCE, 3(2), 115-121.

Qahraman, B. and 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. (In Persian)