

تحلیل شاخص پایداری سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: منطقه ۱۱ شهرداری تهران)

بریچهره بهزادی^۱، عباس روزبهانی^{۲*}، علیرضا مساح بوانی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۲/۳۱)

چکیده

بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر فرایندهای هیدرولوژیکی، به‌ویژه سیلاب‌های شهری، برای سازگاری و تعدیل آثار آن اهمیت زیادی دارد. در مطالعه حاضر، ابتدا با هدف ارزیابی وضعیت سیستم‌های زهکشی شهری، تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی ناحیه یکم منطقه ۱۱ شهر تهران در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ با استفاده از ۱۰ مدل AOGCM تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 بررسی شد. سپس، یک سناریوی میانه به عنوان حالت تجمعی از نتایج تمام مدل‌های اقلیمی یادشده در نظر گرفته شد. پس از آن، با استفاده از نرم‌افزار SWMM وضعیت شبکه فرعی زهکشی منطقه در شرایط موجود و همچنین حالت میانه تمام سناریوهای یادشده در شرایط آبی بررسی شد. در نهایت، عملکرد شبکه با محاسبه شاخص‌های کارایی شامل اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری ارزیابی شد. برای شبیه‌سازی سیلاب‌های منطقه، از رگبار طرح با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی سیلاب نشان می‌دهد در شرایط فعلی با وقوع بارشی با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال، در مجموع ۲۳/۲۵ درصد و در شرایط آبی حدود ۲۲ درصد از طول کانال‌های منطقه دچار آب‌گرفتگی خواهند شد. شاخص پایداری شبکه نیز تحت تأثیر این بارش‌ها بررسی و مشخص شد. پایداری سیستم زهکشی منطقه در شرایط فعلی ۷۷/۸۹ درصد و در شرایط آبی تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۷۷/۷۳ و ۷۷/۶۱ درصد است. به‌طور کلی، مشخص شد در دوره آبی تحت تأثیر هر دو سناریوی تغییر اقلیم حجم سیلاب و تعداد نقاط آب‌گرفتگی شبکه در مقایسه با شرایط کنونی افزایش چشمگیری نخواهد داشت.

کلیدواژگان: آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری، پایداری، تغییر اقلیم، رواناب شهری.

مقدمه

همواره سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی به عنوان یکی از اجزا و زیرساخت‌های مهم شهری، برای جمع‌آوری و انتقال رواناب به خارج از مناطق شهری وجود داشته‌اند [۱]. به‌رغم پیشرفت‌هایی که در سال‌های اخیر صورت گرفته، چالش طراحی نوعی سیستم زهکشی کارآمد و مطمئن با توجه به پیامدهای ناشی از وقوع تغییر اقلیم همچنان وجود دارد، چراکه این پدیده می‌تواند افزایش درخور توجهی در فراوانی وقوع و شدت سیلاب‌های شهری ایجاد کند [۲]. امروزه، با توسعه شهرنشینی نیز، وقوع سیلاب‌های گسترده سبب ایجاد خسارت‌های جانی و مالی فراوان و آثار مخرب برحوضه‌های شهری شده است. در این مناطق به دلیل افزایش سطوح نفوذناپذیر و در نتیجه افزایش حجم و دبی پیک رواناب، وجود سازه‌های جمع‌آوری و انتقال آب، تمرکز جمعیتی، فعالیت‌های صنعتی و آلودگی‌های ناشی از آن، آثار تغییر اقلیم و پیامدهای آن بر اجزای مختلف چرخه منابع آب شدیدتر شده و واکنش نسبت به این تغییرات سریع‌تر است [۳].

با توجه به افزایش دما و نیز افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جهان، تغییر در مقدار و زمان وقوع رخداد‌های حدی مانند بارش‌های حداکثر نیز احتمال بیشتری دارد. بنابراین، تغییر در فراوانی وقوع رخداد‌های حدی بسیاری از مناطق، دور از انتظار نیست و ممکن است به افزایش خطر رخداد سیلاب‌های بهاره همراه با کاهش جریان‌های رودخانه‌ای در تابستان منجر شود [۴]. این‌گونه تغییرات در وقایع حدی هیدرولوژیکی نکات مهمی برای بهبود طراحی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب به همراه خواهد داشت.

بسیاری از پژوهشگران در تحقیقات خود گفته‌اند که افزایش مقادیر معیارهای طراحی به دلیل وقوع پدیده تغییر اقلیم، با توجه به نوع منطقه می‌تواند به ۲۰ تا ۸۰ درصد برسد [۵]. این مسئله سیستم‌های زهکشی فعلی را که براساس دوره بازگشت مشخصی طراحی شده‌اند با چالش مواجه می‌کند، زیرا در انتقال مقادیر رواناب افزایش‌یافته ناشی از وقوع تغییر اقلیم، با کمبود ظرفیت مواجه می‌شوند. علاوه بر این، طراحی سیستم‌های زهکشی برای آینده نیز، نیازمند در نظر گرفتن افزایش شدت و

فراوانی وقوع بارش‌های آتی است تا میزان اضافه‌بار سیستم، در سطح اطمینان قابل قبولی حفظ شود [۶]. ارزیابی سیستم‌های منابع آب، از دغدغه‌های محققان و تصمیم‌گیرندگان این بخش در دهه‌های اخیر است. به این منظور، شاخص‌های مختلفی مانند آسیب‌پذیری^۱، برگشت‌پذیری^۲ و اطمینان‌پذیری^۳، معیارهایی هستند که امروزه برای بررسی توانایی سامانه‌های آبی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷]. آنچه انسان را در مدیریت هرچه بهتر سیلاب یاری می‌کند، شناخت پارامترهای مؤثر در بروز این پدیده است. براساس مدل‌سازی‌ها و بررسی‌های انجام‌شده، احتمال وقوع بارش‌های با شدت زیاد به علت افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و وقوع پدیده تغییر اقلیم در آینده افزایش خواهد یافت. بنابراین، می‌توان از تغییر اقلیم به عنوان چالشی عمده به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه نام برد که سبب تشدید بارش‌های حدی و نیز موجب وقوع سیلاب‌های شدید می‌شود [۸].

در سال‌های اخیر، مطالعات بسیاری در زمینه بررسی آثار تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی و سیلاب‌های شهری، شبیه‌سازی جریان و ارزیابی کارایی شبکه زهکشی حوضه‌های شهری و ارائه راه‌کارهای مدیریتی برای کنترل جریان و افزایش سازگاری با وقایع حدی ناشی از وقوع تغییر اقلیم و بهبود زیرساخت‌های شهری انجام شده است. در ادامه، به برخی از این تحقیقات به‌اختصار اشاره می‌شود: شریفیان و همکارانش عدم قطعیت و قابلیت اطمینان عمیق آب در منهول‌های سیستم زهکشی شیراز و شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب و روندیابی جریان در مجاری آب را با استفاده از مدل SWMM^۴ و شبیه‌ساز مونت کارلو و روش L.H.S^۵ برای آنالیز عدم قطعیت تحلیل کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد پارامترهای مربوط به زیرحوضه‌ها و بارندگی بیشترین تأثیر را بر دبی پیک سیل، قابلیت اطمینان و عدم قطعیت آن دارند [۹].

Zaghloul & Mutairi از مدل SWMM برای تخمین رواناب حاصل از بارش در مناطق شهری کویت و صحت‌سنجی اجرای شبکه زهکشی موجود استفاده کردند.

1. Vulnerability
2. Resiliency
3. Reliability
4. Storm Water Management Model
5. Latin Hypercube Sampling

ذخایر سطحی و کاهش میزان فاضلاب‌های ورودی نیز برای سازگاری با تغییر اقلیم ارائه شد [۱۳].

بیرگانی و یزدان دوست برگشت‌پذیری سیستم زهکشی شهری را به صورت ظرفیت و توانایی سیستم برای واکنش به بارش‌هایی بیشتر از بارش طرح و خارج شدن از وضعیت آشفتگی تعریف کردند. در تحقیق یادشده به منظور تعیین برگشت‌پذیری سیستم زهکشی سیلاب منطقه ۲۲ شهر تهران، ابتدا به مدل‌سازی شبکه با نرم‌افزار SWMM پرداخته شد. نتایج مدل‌سازی شامل حجم، مدت و توزیع مکانی سیلاب می‌شد. سپس، آنها با ایجاد یک سیستم فزایی، عدم قطعیت موجود در معیارهای مؤثر برگشت‌پذیری را پوشش دادند. معیارهای بررسی شده در دو دسته کلی واکنش سیستم به سیلاب و بهبود آن دسته‌بندی شده‌اند. هدف از پژوهش یادشده، بررسی عملکرد اقداماتی نظیر بام سبز، ساختار نگه‌داشت مصنوعی، سنگ‌فرش نفوذپذیر و عریض و عمیق کردن کانال‌ها در میزان برگشت‌پذیری است [۱۴].

Lars Willuweit و همکارانش آثار تغییر اقلیم و سناریوهای برنامه‌ریزی اقتصادی در الگوهای رواناب شهری را در حوضه دوبلین واقع در ایرلند برای تعیین الگوهای رواناب شهری تحت سناریوهای جدید اقلیمی مختلف، با استفاده از مدل‌های دینامیکی شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مقدار رواناب شهری سالانه می‌تواند تا ۳ درصد کاهش داشته باشد و رواناب ماهانه در فصل زمستان ۳۰ درصد افزایش و در تابستان ۲۸ درصد کاهش یابد. همچنین، رشد شهری می‌تواند سالانه ۱۵ درصد مقدار رواناب را افزایش دهد و ترکیب اثر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی ممکن است سبب افزایش تولید رواناب سالانه بین ۲/۹ تا ۲۱ درصد و افزایش رواناب ماهانه تا ۵۷ درصد شود [۱۵].

Ahmed Sadik و همکارانش آثار بارش‌های حدی بر سیستم‌های زهکشی در کانادا را بررسی کردند. آنها پس از تعیین بارش طرح با استفاده از داده‌های بارش مشاهداتی، تغییرات اقلیمی منطقه را براساس سناریوی اقلیمی A₂ ارزیابی کردند. عمق بارش طراحی محاسبه‌شده از داده‌های مشاهداتی و مدل‌های شبیه‌ساز اقلیمی به عنوان داده ورودی برای شبیه‌سازی سیستم وارد مدل SWMM شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد به علت افزایش عمق بارش در

نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل SWMM به دلیل برخی قابلیت‌های گرافیکی و همگرایی سریع، برای طراحی بهینه پارامترهای زهکشی مناطق شهری در مقایسه با روش منطقی مناسب‌تر است و به طراحی دقیق‌تر شبکه زهکشی منجر می‌شود. همچنین، استفاده از بارش طراحی با دوره بازگشت پنج‌ساله، برای طراحی شبکه زهکشی کویت مناسب نیست [۱۰].

ویلیامز و همکارانش آثار تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی و وضعیت زهکشی حوضه‌های شهری را ارزیابی کردند. آنها دریافتند از جمله تأثیراتی که تغییر اقلیم بر بارش‌های شدید کوتاه‌مدت و سیستم فاضلاب دارد، عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی شده مدل‌های اقلیمی برای بارش‌های حدی در بازه‌های زمانی کوتاه در مقیاس محلی، دشواری تعیین روند تغییر اقلیم در سری زمانی بارش‌های حدی به علت تداوم آثار تغییر اقلیم بر سیستم زهکشی شهری و سایر زیرساخت‌های شهری و سامانه‌های آبی است [۱۱].

یزدان دوست و همکارانش آثار تغییر اقلیم را بر روند سیلاب‌های شهری و عملکرد سیستم زهکشی شهر تهران با مدل SWMM بررسی کردند. آنها به منظور بررسی تغییر اقلیم، از مدل IPCM4 تحت دو سناریوی A₂ و B₁ و از مدل LARS-WG¹ برای ریزمقیاس‌نمایی بهره بردند و با روش‌های تجربی، منحنی‌های IDF را استخراج کردند. در نهایت، با استفاده از مدل SWMM عملکرد سیستم زهکشی برای شرایط اقلیمی موجود و دو سناریوی A₂ و B₁ را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده افزایش حجم سیلاب و تعداد گره‌های سیلابی نسبت به وضع موجود بود [۱۲].

Darren و همکارانش عملکرد زهکش‌های شهری آنتاریو را با در نظر گرفتن ۱۵ درصد افزایش در شدت بارش و فرض وقوع پدیده تغییر اقلیم با نرم‌افزار SWMM مدل‌سازی کردند و روش‌هایی برای کاهش دبی پیک به سطح فعلی ارائه دادند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده افزایش ۱۹ درصدی حجم رواناب، ۱۳ درصدی دبی پیک و ۲۴ درصدی هزینه لوله‌ها بود. راه‌کارهای جایگزین کردن سیستم لوله‌گذاری، قطع ارتباط مناطق نفوذناپذیر، افزایش

براساس سناریوهای جدید انتشار گازهای گلخانه‌ای مختلف مستخرج از گزارش پنجم^۳ IPCC با کمک قابلیت‌های مدل SWMM بررسی می‌شود. در نهایت، نیز کارایی شبکه در شرایط فعلی و آتی با استفاده از شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و در نهایت شاخص پایداری ارزیابی می‌شود. مدل‌سازی شرایط پس از وقوع تغییر اقلیم با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها سبب ایجاد دیدی کلی نسبت به وضعیت آتی منطقه خواهد شد که می‌تواند تصمیم‌های مدیریتی و راهبردهای تطبیقی را به منظور سازگاری با پیامدهای ناشی از آن ارائه دهد.

روش‌شناسی تحقیق

در پژوهش حاضر شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی ناحیه ۱ منطقه ۱۱ شهر تهران به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب و مدل‌سازی این شبکه در سطح کانال‌های فرعی جمع‌آوری رواناب منطقه با استفاده از نرم‌افزار SWMM در شرایط فعلی و نیز با لحاظ وقوع پدیده تغییر اقلیم براساس سناریوهای جدید اقلیمی مستخرج از گزارش پنجم IPCC انجام می‌شود. سپس، شاخص‌های کارایی شبکه شامل آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری، اعتمادپذیری و شاخص پایداری به عنوان نوآوری‌های پژوهش بررسی خواهد شد. مراحل انجام پژوهش حاضر به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه نیز معرفی محدوده مطالعاتی و مفاهیم کلیدی استفاده‌شده در پژوهش و تشریح و تفسیر هر یک از مراحل نمایش داده‌شده در فلوجارت ارائه خواهند شد.

منطقه مطالعاتی

منطقه ۱۱ شهرداری تهران با مساحت ۱۲/۰۶ کیلومتر مربع و جمعیت تقریبی ۲۸۳ هزار نفر، در مرکز شهر تهران واقع شده است. این منطقه تقریباً ۸/۱ درصد از مساحت کل تهران را شامل می‌شود و از شمال با منطقه ۶، از غرب با منطقه ۱۰، از شرق با منطقه ۱۲، از جنوب با منطقه ۱۶ و از جنوب غربی با منطقه ۱۷ همسایه است و بیشترین مرز مشترک را با منطقه ۱۲ دارد. براساس آخرین طرح جامع شهر تهران مصوب سال ۱۳۸۶، بخش

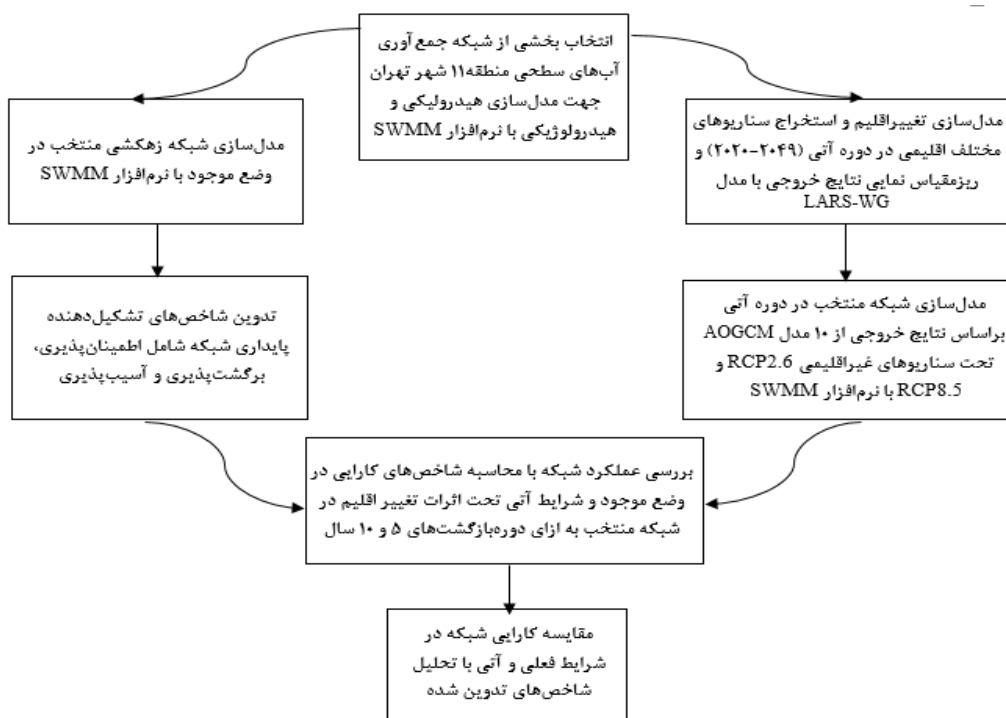
آینده، عملکرد حوضچه‌های ذخیره و شبکه فاضلاب افت می‌کند و ظرفیت انتقال سیلاب‌های آتی را نخواهد داشت و شبکه زهکشی منطقه نیازمند به‌روزرسانی استانداردهای فعلی سیستم‌های جمع‌آوری، انتقال و حوضچه‌های ذخیره است [۱۶].

بیینش و همکارانش از طریق ترکیب عملکرد هیدرولیکی شبکه زهکشی رواناب سطحی با تابع عملکرد سیستم، به کمی‌سازی شاخص برگشت‌پذیری در مقابله با سیل پرداختند. به این منظور، پس از تعیین مقادیر بارش حدی به ازای دوره بازگشت‌های مختلف، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی حوضه سیل‌برگردان غرب در تهران، با دو سناریوی وجود داشتن و نداشتن^۱ BMP صورت گرفت. سپس، میزان عملکرد و بازگشت‌پذیری سیستم، در یک گره سیلابی تحت بارش‌های حدی با دوره بازگشت‌های مختلف برآورد شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد با افزودن یک جوی‌باغچه به سیستم زهکشی شهری، مدت سیل‌گرفتگی در گره منتخب شبکه و حجم آب‌گرفتگی آن به ترتیب تا میزان ۱۵ و ۴۷ درصد کاهش یافته و شاخص برگشت‌پذیری نسبت به سیل نیز از ۰/۳۷ درصد تا ۵/۸۹ درصد افزایش می‌یابد [۱۷].

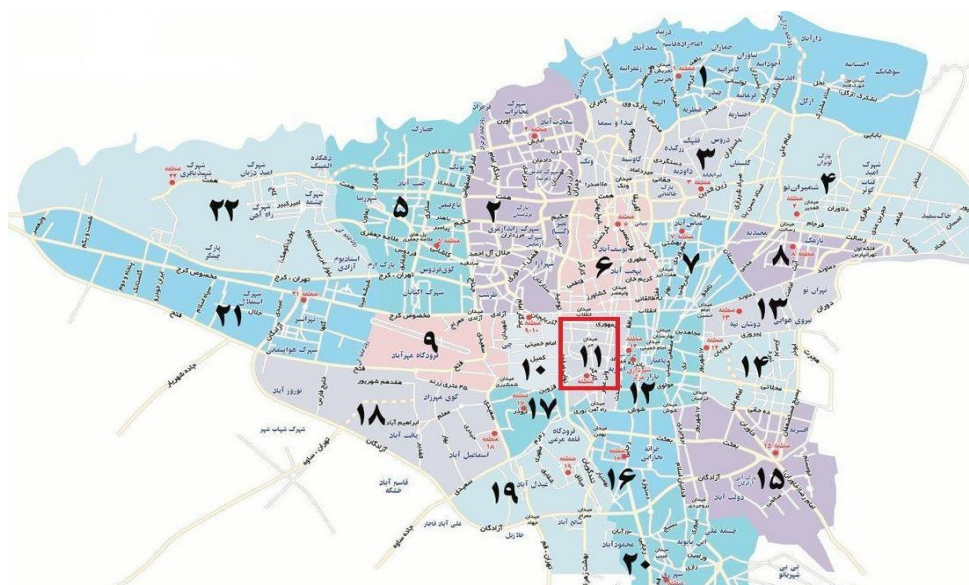
جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد تا کنون در ایران و حتی در سطح بین‌المللی مطالعه‌ای که به تحلیل و بررسی وضعیت سیستم‌های زهکشی شهری در سطح مسیل‌های درجه ۳ و ۴ براساس شاخص‌های کارایی شامل اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری^۲ و لحاظ وقوع پدیده تغییر اقلیم و پیامدهای آن در بخش شهری پرداخته باشد، صورت نگرفته و عمده استفاده از این شاخص‌ها در بخش مخازن و برنامه‌ریزی منابع آب بوده است. بنابراین، با توجه به اهمیت بحث آب‌گرفتگی در سطح خیابان‌ها و معابر عمومی و خسارت‌های ناشی از آن به خصوص تحت تأثیر تغییر اقلیم که به تشدید وقوع سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف منجر می‌شود، ناحیه ۱ منطقه ۱۱ شهر تهران به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده و عملکرد شبکه زهکشی منطقه در سطح کانال‌های درجه ۳ و ۴ در شرایط کنونی و شرایط تغییر اقلیم

است. بالاترین سطح این منطقه ارتفاعی معادل ۱۲۱۶ متر و پست‌ترین سطح آن، ارتفاع ۱۱۱۱ متر نسبت به سطح دریاهای آزاد دارد. بر این اساس، متوسط ارتفاع منطقه ۱۱۰۳ متر و شیب متوسط آن ۲ درصد است. محدوده منطقه مد نظر و هم‌جواری آن با مناطق دیگر شهرداری تهران در شکل ۲ نشان داده شده است.

عمده کاربری اراضی منطقه مسکونی است و یا به معابر و راه‌های دسترسی اختصاص دارد. این منطقه از نظر تاریخی یکی از مراکز مهم میراث فرهنگی محسوب می‌شود و وجود مراکز مهم سیاسی، دانشگاهی، نظامی، چندین سفارتخانه و نیز مراکز مهم اقتصادی و بازارهای تخصصی، به آن اهمیت زیادی داده



شکل ۱. فلوچارت تحقیق

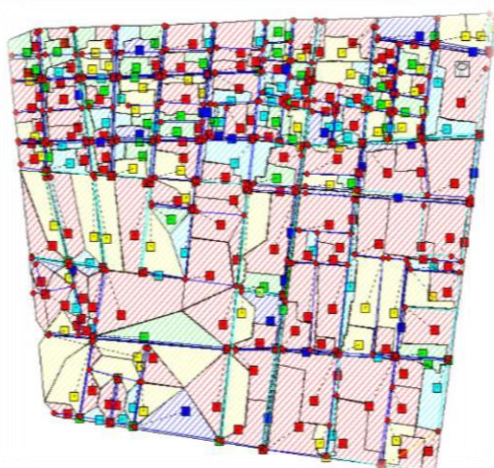


شکل ۲. منطقه ۱۱ شهرداری تهران و موقعیت آن در شهر تهران

۱۱ شهر تهران استفاده شده است. این ناحیه در مجموع ۳۲۱ کانال درجه ۳ و ۴ با طولی حدود ۴۸ کیلومتر دارد.

معرفی مدل SWMM

این مدل که نخستین بار در سال ۱۹۷۱ توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا ارائه شده و تا کنون چندین بار ارتقا یافته است، برای برنامه‌ریزی، آنالیز و طراحی سیستم‌های زهکشی شهری، مجاری جمع‌آوری سیلاب و فاضلاب شهری استفاده می‌شود. SWMM نوعی مدل شبیه‌ساز بارش رواناب پویا با مبنای فیزیکی است که قابلیت احتساب پدیده‌های تبخیر، چلاب، ذوب برف، نفوذ عمقی و جریان‌های زیرسطحی را دارد. ورودی‌های مورد نیاز آن عبارت‌اند از: خصوصیات فیزیکی زیرحوضه‌ها، مشخصات شبکه زهکشی و داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی منطقه. در این مدل برآورد سیلاب با روش موج سیستماتیک^۲ و ترکیب المان‌های جریان‌های روزمینی و کانالیزه‌شده صورت می‌پذیرد و قابلیت مدل‌سازی هم‌زمان پارامترهای هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و کیفی آب را داراست [۲۰] و مهم‌ترین خروجی آن، هیدروگراف سیلاب ورودی و خروجی از زیرحوضه‌ها، میزان سیل‌گرفتنی اتصالات، پروفیل سطح آب، میزان ظرفیت اشغال‌شده، عمق، سرعت و عدد فرود در زمان‌های مختلف در مجاری و نقاط بحرانی است [۲۱]. شمایی کلی از محیط این نرم‌افزار در سطح ناحیه ۱ منطقه ۱۱ شهر تهران در شکل ۳ ارائه شده است:



شکل ۳. مدل ناحیه ۱ منطقه ۱۱ تهران در محیط نرم‌افزار SWMM

کلان‌شهر تهران با مساحتی حدود ۶۸ هزار هکتار به گونه‌ای قرار گرفته که علاوه بر رواناب حاصل از بارندگی در سطوح شهری، همواره تحت تأثیر سیلاب‌های حاصل از حوضه‌های برون‌شهری شمال و شرق نیز قرار دارد. حوضه‌های اصلی درون‌شهری تهران براساس زهکش‌های اصلی شهر به حوضه‌های شرقی، غربی، مرکزی و حوضه چیتگر در غرب رودخانه کن، تقسیم می‌شوند. در این تقسیم‌بندی منطقه ۱۱ شهر تهران در حوضه آبریز مرکزی قرار دارد و رواناب آن بیشتر توسط تونل‌های اصلی خیام، نواب، دولت‌خواه و نهر فیروزآبادی زهکشی می‌شود.

گرچه انتقال سیلاب‌های شهری به خارج از شهر توسط کانال‌های اصلی انجام می‌شود، اما جمع‌آوری رواناب از سطح معابر اصلی و فرعی به عهده کانال‌های درجه ۳ و ۴ است. ظرفیت کافی و عملکرد مناسب این کانال‌ها به تسریع فرایند زهکشی سیلاب از سطح منطقه منجر می‌شود. مجموع طول ۱۱۹۳ کانال درجه ۳ و ۴ منطقه ۱۱، ۱۷۶/۶۸ کیلومتر است [۱۸] که موارد متعددی از انباشت زباله در مجاری، کمبود دریچه‌های ورود سیلاب به کانال‌های سرپوشیده، ظرفیت کم کانال‌ها و آب‌گرفتگی هنگام بارندگی ناشی از سه مشکل یادشده، در منطقه قابل مشاهده است. شایان یادآوری است درجه کانال‌های شبکه فرعی با توجه به ابعاد آنها تعیین می‌شود. بر این اساس، کانال‌های درجه ۳ عرضی بین ۳۵ تا ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاعی بین ۴۰ تا ۹۰ سانتی‌متر دارند. کانال‌های درجه ۴ نیز به عرض حداکثر ۳۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر هستند [۱۹].

مدل‌های تبدیل بارش به رواناب در مناطق شهری

برای مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی شبکه زهکشی به منظور برآورد سیلاب و انجام اقدامات مدیریتی لازم در منطقه، مدل‌های ریاضی کارآمدی نظیر^۱ ASSA، SEWER-GEMS SWMM، STORM-CAD و... وجود دارد که با توجه به وضعیت و مساحت منطقه مطالعاتی، روش مد نظر برای انجام محاسبات، شهری یا غیرشهری بودن منطقه و فرعی یا اصلی بودن کانال‌های بررسی شده، انتخاب نوع مدل به عهده کاربر است. بنابراین، با توجه به قابلیت‌های مدل SWMM، در پژوهش حاضر نیز از این نرم‌افزار برای مدل‌سازی شبکه زهکشی ناحیه یکم منطقه

دربرگیرنده چگونگی تغییرات آبی این گازهاست، تحت عنوان RCP^۵ ارائه کرده است. این سناریوها چهار خط سیر با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 دارند که در میزان واداشت تابشی، غلظت گاز CO₂ و... با هم متفاوت‌اند. سناریوهای یادشده براساس مشخصات مختلفی مانند سطح تکنولوژی، وضع اقتصادی، وضع اجتماعی و غیره در آینده هستند و در هر شرایطی می‌توانند به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی منجر شوند [۲۳]. نام‌گذاری سناریوهای خانواده RCP براساس میزان واداشت‌های تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، تا پایان قرن ۲۱ انجام شده است، به طوری که سناریوی RCP2.6 کمترین و سناریوی RCP8.5 بیشترین تغییرات را برای دوره آبی، نسبت به دوره پایه تخمین زده است [۲۴]. نتایج این سناریوها از سال ۱۸۵۰ تا پایان قرن ۲۱ را پوشش می‌دهد و تا سال ۲۹۰۰ نیز فرموله شده است. در پژوهش حاضر نیز از بین این چهار سناریو، دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به عنوان حد بالا و پایین این طیف از تغییرات، برای شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند که مشخصات این سناریوها به شرح زیر است:

RCP 2.6: این سناریو توسط تیم مدل‌سازی IMAGE

از مؤسسه ارزیابی‌های محیطی هلند طراحی شده است. طبق این سناریو، واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ وات بر مترمربع می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد و مقدار دی‌اکسید کربن موجود در اتمسفر ۴۹۰ ppm خواهد بود. برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی، باید گازهای گلخانه‌ای به میزان درخور توجهی کاهش یابند. این سناریو جمعیت جهان را در سال ۲۱۰۰، حدود هفت میلیارد نفر پیش‌بینی کرده است. در این سناریو رشد تکنولوژی‌های جدید نسبت به دیگر سناریوها بیشتر و به دلیل کم بودن مقدار رشد جمعیت و استفاده از انرژی‌های نو میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر از دیگر سناریوهاست.

RCP 8.5: بدون به‌کارگیری هیچ‌گونه سیاست کاهش

آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب‌وهوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت، به

در این نرم‌افزار انتخاب روش انجام محاسبات، به عهده کاربر و براساس ویژگی‌های منطقه است. با توجه به کاربری اراضی، وضعیت توپوگرافیک غیر یکنواخت منطقه، عدم شبیه‌سازی آلودگی آب زیرزمینی و آب حاصل از ذوب برف، روش SCS^۱ به عنوان روش تبدیل بارش به رواناب انتخاب شد. با توجه به اینکه روش SCS TR-55 برای محاسبه زمان تمرکز در حوضه‌های شهری مناسب است، از آن برای برآورد زمان تمرکز زیرحوضه‌ها استفاده شده است. درخور یادآوری است روش SCS TR-55 برای محاسبه زمان تمرکز حوضه‌هایی که در آن تجمع آب روی زمین وجود ندارد مانند حوضه‌های جنگلی، مناسب نیست. با توجه به خصوصیات فیزیکی خاک، پوشش گیاهی منطقه و... مقدار نفوذ نیز با روش Horton و استخراج هیدروگراف واحد با روش SCS محاسبه شده‌اند. روندیابی به روش موج دینامیکی^۲، معادلات جریان سنت‌ونانت یک‌بعدی را حل می‌کند و نتایج تئوری دقیقی ارائه می‌دهد. از این روش می‌توان برای روندیابی ذخیره آبراهه‌ها، برگشت آب، تلفات انرژی در ورودی و خروجی‌ها، جریان‌های معکوس و تحت‌فشار استفاده کرد. بر این اساس، در پژوهش حاضر نیز از روش موج دینامیکی برای روندیابی هیدرولیکی جریان استفاده شده است.

تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره آبی

مدل‌های AOGCMs^۳

در حال حاضر، روش‌های مختلفی برای تولید سناریوی اقلیمی در دوره‌های آبی وجود دارد که معتبرترین آن‌ها مدل‌های AOGCMs هستند. این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی استوارند و روابط ریاضی آن‌ها معمولاً در یک شبکه سه‌بعدی با مقیاس مکانی افقی ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر و ۱۰ تا ۲۰ لایه در اتمسفر و ۳۰ لایه در اقیانوس در سطح کره زمین حل می‌شوند [۲۲]. مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آبی است و چون تعیین دقیق میزان انتشار این گازها در آینده امکان‌پذیر نیست، IPCC در سال ۲۰۱۰ طی گزارش پنجم خود (AR5^۴)، سناریوهای غیراقلیمی مختلفی را که

1. Soil conservation service
2. Dynamic Wave
3. Atmosphere - Ocean General Circulation Model
4. IPCC Fifth Assessment Report

5. Representative Concentration Pathways

با توجه به میزان جمعیت و نیاز آنها به تأمین انرژی، استفاده از انواع انرژی بیش از دیگر سناریوها در نظر گرفته شده است.

در نهایت، پس از انتخاب سناریوهای غیر اقلیمی یادشده، سیستم زهکشی منطقه مطالعاتی طبق نتایج خروجی ۱۰ مدل AOGCM تحت این دو سناریو، شبیه‌سازی شد. سپس، عملکرد سیستم زهکشی ناحیه در شرایط فعلی و سپس در حالت میانه تمام سناریوها برای شرایط آبی با مدل SWMM ارزیابی شد. در جدول ۱ مشخصات ۱۰ مدل اقلیمی به‌کاررفته در پژوهش حاضر ارائه شده است:

طوری که ادامه این روند به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ منجر می‌شود. غلظت گاز دی‌اکسید کربن نیز به ۱۳۷۰ ppm می‌رسد و روند افزایشی خواهد داشت. این سناریو توسط تیم مدل‌سازی MESSAGE و مؤسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA^۱ طراحی شده و مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است. در این سناریو میزان جمعیت در سال ۲۱۰۰ حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد بود. میزان تولید ناخالص داخلی در کشورهای توسعه‌یافته به دلیل افزایش جمعیت و سطح پایین تکنولوژی کم است. در این سناریو

جدول ۱. مشخصات مدل‌های AOGCMs-AR5 استفاده‌شده در تحقیق حاضر

شماره	مدل اقلیمی	دقت مکانی (طول * عرض)	مرجع
۱	CESM1(WACCM)	2.5 x 1.88	National Center for Atmospheric Research USA
۲	CSIRO-Mk3.6.0	1.875 x 1.86	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Queensland Climate Change Centre of Excellence Australia
۳	MPI-ESM-LR	1.875 x 1.85	Max Planck Institute for Meteorology Germany
۴	GISS-E2-H	2.5 x 2	NASA Goddard Institute for Space Studies USA
۵	GISS-E2-R	2.5 x 2	
۶	MIROC-ESM	2.81 x 1.77	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan
۷	CanESM2	79 x 2.81.2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Canada
۸	HadGEM2-es	25 x 1.87.1	Met Office Hadley Centre UK
۹	CNRM-CM5	4 x 1.4.1	Centre National de Recherches Météorologiques, Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique France
۱۰	GFDL-CM3	2 x 2.5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA

در تحقیق حاضر ابتدا روند تغییرات پارامترهای بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه دوره پایه ایستگاه مهرآباد بررسی شد و پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، این متغیرها ریزمقیاس شده و تغییرات روزانه آنها در سطح ایستگاه سینوپتیک مهرآباد به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مطالعاتی برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ نسبت به دوره پایه ۱۹۸۱-۲۰۱۰ بررسی شد. این بررسی در چهار مرحله اصلی بررسی صحت و کیفیت داده‌های استفاده‌شده، بررسی روند متغیرهای مطالعه‌شده، ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی و بررسی تغییرات متغیرهای پیش‌بینی‌شده نسبت به دوره پایه انجام گرفت.

ریز مقیاس‌نمایی^۲ خروجی مدل‌های AOGCMs

در پژوهش حاضر برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های AOGCMs، از مدل LARS-WG استفاده شده است. LARS-WG یکی از مدل‌های مشهور مولد داده‌های تصادفی آب‌وهواست که برای تولید مقادیر بارش و دماهای بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیمی حال و آینده استفاده می‌شود، به طوری که خواص آماری داده‌های تولیدشده مانند انحراف معیار، میانگین و توزیع داده‌ها مشابه دوره مشاهداتی است.

1. International Institute For Applies System Analysis
2. Down Scaling

برای گذردهی سیلابی با دوره بازگشت پنج سال طراحی شده‌اند، در انتقال سیلاب با دوره بازگشت ۱۰ سال، ناتوانی سیستم را نشان نخواهند داد. بنابراین، در پژوهش حاضر، پس از حذف کانال‌هایی که دوره بازگشت طراحی پنج‌ساله داشتند، صرفاً به اعلام درصد کانال‌هایی پرداخته شده که به‌رغم داشتن دوره بازگشت طراحی ده‌ساله، با وقوع این سیلاب دچار کمبود ظرفیت شده‌اند.

بررسی عملکرد شبکه فرعی زهکشی منطقه مطالعاتی با استفاده از شاخص‌های کارایی

چگونگی پایش و ارزیابی سیستم‌های منابع آب همواره از دغدغه محققان و تصمیم‌گیرندگان این بخش در دهه‌های اخیر بوده است. به این منظور، شاخص‌های کارایی نظیر قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری معیارهایی هستند که امروزه برای بررسی توانایی سامانه‌های آبی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷]. در ادامه، چگونگی بررسی شاخص‌های کارایی سیستم زهکشی منطقه مطالعاتی، در شرایط کنونی و همچنین طبق سناریوی میانه تحت اثر هر ۱۰ مدل اقلیمی بررسی شده در پژوهش به تفکیک ارائه شده است:

• شاخص اطمینان‌پذیری

اطمینان‌پذیری یا قابلیت اطمینان با این مفهوم تعریف می‌شود که یک سیستم تا چه حد در حالت مطمئن و عدم شکست کار خواهد کرد. به بیان دیگر، این شاخص در یک سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی به صورت نسبت طول کانال‌های دارای ظرفیت مناسب برای انتقال رواناب ایجادشده، به کل طول کانال‌هاست و از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$\text{Rel Index} = \frac{L_f}{L} \times 100\% \leq \text{Rel Index} \leq 100\% \quad (1)$$

L_f نشان‌دهنده طول کانال‌هایی است که در انتقال رواناب ایجادشده ظرفیت کافی دارند و L کل طول کانال‌ها در شبکه بررسی شده است.

• شاخص برگشت‌پذیری

برگشت‌پذیری به توانایی سیستم برای بازگشت به سرویس‌دهی معمول در تأمین اهداف از پیش تعیین‌شده، پس از وقوع شکست سیستم گفته می‌شود [۲۶]. در واقع، برگشت‌پذیری توانایی سیستم برای بازیابی خود، پس از

از آنجا که در پژوهش حاضر از بارش‌های حدی شش‌ساعته برای مدل‌سازی استفاده شده و خروجی‌های مدل LARS-WG به صورت روزانه است، برای به دست آوردن بارش‌های شش‌ساعته دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۴۹)، باید روابط چندک فراوانی بین بارش‌های روزانه و بارش‌های شش‌ساعته دوره پایه در ترم سری‌های حداکثر سالانه با استفاده از برازش یک توزیع آماری مناسب به‌دست آید. متداول‌ترین توزیع‌های آماری استفاده شده در هیدرولوژی شامل توزیع نرمال، لوگ نرمال دو و سه متغیره، پیرسون و لوگ پیرسون نوع ۳، گامبل و مقادیر حدی تعمیم‌یافته است [۲۵] که در پژوهش حاضر با توجه به بررسی مقادیر حداکثر بارش، از توزیع سه‌پارامتره مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV^1)، برای برآورد مقادیر بارش حداکثر با احتمالات وقوع مشخص در منطقه مطالعاتی استفاده شده است. به این منظور، با فرض اینکه روند تغییرات بارش در آینده مشابه دوره پایه خواهد بود، به سری داده‌های حداکثر بارش سالانه ۶ و ۲۴ ساعته دوره پایه، تابع توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته برازش داده می‌شود تا به ازای دوره بازگشت‌های مختلف، مقادیر بارش حداکثر سالانه در تداوم مد نظر به‌دست آید. سپس، با تعیین ارتباط بین این مقادیر و تقسیم آنها بر یکدیگر، به ازای هر دوره بازگشت ضریبی به دست می‌آید که از آن برای محاسبه بارش‌های شش‌ساعته دوره آبی استفاده می‌شود.

مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی منطقه مطالعاتی با نرم‌افزار SWMM

۷/۶ درصد (معادل ۳/۶۵۱ کیلومتر) از طول کانال‌های شبکه فرعی جمع‌آوری رواناب سطحی ناحیه یک منطقه ۱۱، دارای دوره بازگشت طراحی پنج‌ساله و ۹۲/۴ درصد (معادل ۴۴/۳۷۸ کیلومتر) از طول کانال‌ها، دوره بازگشت طراحی ۱۰ ساله دارند. بنا به گزارش طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی شهر تهران، دوره بازگشت طراحی کانال‌ها با توجه به موقعیت و اهمیت آنها تعیین می‌شود.

با توجه به این موضوع که عملکرد هر کانال باید با توجه به دوره بازگشت طراحی آن ارزیابی شود، بنابراین هر سناریو یک بار تحت بارش با دوره بازگشت پنج سال و بار دیگر تحت بارش با دوره بازگشت ۱۰ سال، اجرا شده است. توجه به این نکته ضروری است که ناتوانی کانال‌هایی که

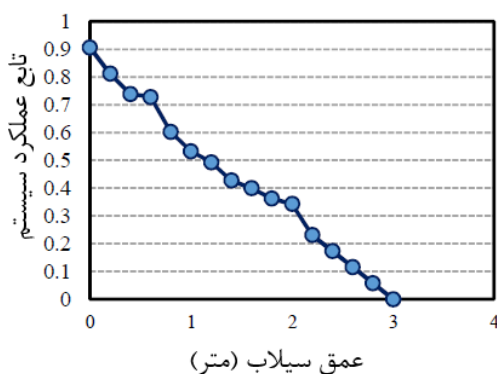
$$Dx = 15.369x + 7.1764 \quad (2)$$

در رابطه یادشده، x عمق آب‌گرفتگی (متر) و D درصد خسارت ناشی از سیل به ازای عمق x است. مقدار خسارت به وجودآمده به ازای عمق صفر سیلاب در معادله یادشده، مربوط به ساختمان‌های دارای زیرزمین و طبقات زیر همکف است.

تابع عملکرد سیستم در مقابله با سیل و آب‌گرفتگی به صورت رابطه ۳ در نظر گرفته شد [۲۸]. توابع عملکرد زیرساخت زهکشی، عملکرد کلی یک سیستم زهکشی را به عمق سیل ارتباط می‌دهد. این نوع توابع، مدل‌های ریاضی هستند که یک ویژگی از عملکرد سیستم را به عددی در محدوده صفر تا یک مرتبط می‌کنند. شاخص یک، نشان‌دهنده عملکرد کامل و شاخص صفر، مربوط به کمترین سطح از عملکرد سیستم است [۲۹].

$$U(x) = 1 - \frac{Dx}{D_{max}} \quad (3)$$

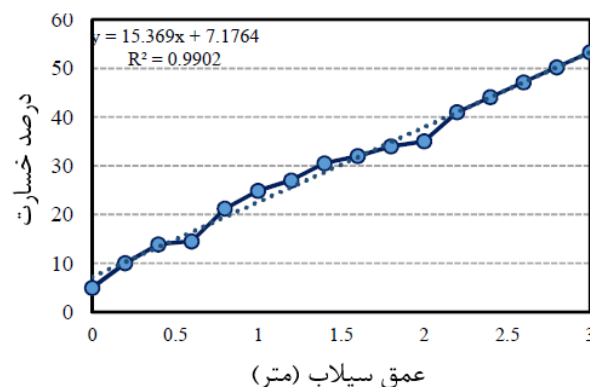
که D_{max} بیشترین خسارت سیل است که به ازای عمق بیشینه آب‌گرفتگی که اتفاق می‌افتد و براساس پژوهش‌های پیشین سه متر در نظر گرفته شده [۲۸] محاسبه می‌شود. بر این اساس، مقدار درصد خسارت معادل $53/283$ درصد به‌دست آمده است. شکل ۴-الف منحنی عمق-خسارت استفاده شده برای مناطق مسکونی ایران و شکل ۴-ب تابع عملکرد سیستم زهکشی براساس منحنی عمق-خسارت یادشده و معادله ۳ نشان می‌دهد.



(ب)

وقوع شکست است و براساس دوره‌ای که طول می‌کشد تا شرایط نامطلوب سیستم طی شود، تعیین می‌شود [۳]. در پژوهش حاضر عملکرد و بازگشت‌پذیری شبکه زهکشی ناحیه ۱ منطقه ۱۱ شهر تهران تحت تأثیر بارش‌های حدی شش‌ساعته بررسی شده است. از آنجا که زیرساخت‌های زهکشی شهری برای دوره بازگشت مشخصی طراحی می‌شوند، در شرایط وقوع بارش‌های حدی و مواجهه با پدیده‌هایی مانند تغییر اقلیم و توسعه شهری دچار کاهش عملکرد خواهند شد. بر این اساس، در پژوهش حاضر نیز شاخص بازگشت‌پذیری شبکه در زمان وقوع بارش‌های حدی به ازای دوره بازگشت ۵ و ۱۰ سال کمی‌سازی شده است. به این منظور، عملکرد شبکه زهکشی شهری ناحیه بر پایه شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی و هیدرولوژیکی و با به‌کارگیری منحنی عمق-خسارت سیل و تابع عملکرد زیرساخت زهکشی رواناب اندازه‌گیری شد تا در نهایت بتوان بازگشت‌پذیری سیلاب را کمی‌سازی کرد.

به دلیل نبود داده‌های ثبت‌شده، میزان خسارت ناشی از سیلاب در محدوده مطالعاتی به ازای اعماق مختلف آب‌گرفتگی، از منحنی عمق-خسارت توسعه داده‌شده توسط تجربی‌شنی و ملک‌محمدی در سال ۲۰۰۹ برای مناطق مسکونی ایران استفاده شد و با برآزش خطی به نقاط ثبت‌شده در این منحنی (با این فرض که تغییرات به صورت خطی باشد)، معادله درصد خسارت بر حسب عمق آب‌گرفتگی، به صورت رابطه ۲ به‌دست آمد [۲۷]:



(الف)

شکل ۴. الف) منحنی عمق-خسارت مناطق مسکونی ایران؛ ب) مقادیر تابع عملکرد سیستم به ازای اعماق مختلف سیلاب شهری [۲۶]

• شاخص آسیب‌پذیری

آسیب‌پذیری اساساً نشان‌دهنده شدت شکست‌های یک سیستم است و می‌تواند به صورت میانگین شکست‌ها [۳۲]، میانگین ماکزیمم کمبودها در یک دوره متوالی شکست در سیستم [۳۳] و احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین [۳۴] تعریف شود. در پژوهش حاضر شاخص آسیب‌پذیری براساس نسبت ارتفاع رواناب ایجادشده در هر کانال به بیشترین عمق آب‌گرفتگی تعریف شده که عمق بیشینه آب‌گرفتگی، براساس پژوهش‌های پیشین سه متر در نظر گرفته شده [۲۸] و طبق رابطه ۵ به دست آمده است:

$$\text{Vul Index} = \frac{H_x}{H_{\max}} \quad (5)$$

در رابطه یادشده H_x ارتفاع رواناب ایجادشده و H_{\max} حداکثر عمق آب‌گرفتگی است. این رابطه نیز صرفاً برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری در یک کانال، ارائه شده است. بنابراین برای محاسبه این شاخص برای کل شبکه بررسی شده به ازای هر دوره بازگشت، باید از مقادیر آسیب‌پذیری همه کانال‌ها، میانگین‌گیری شود.

• شاخص پایداری

شاخص پایداری جمع‌بندی معیارهای عملکرد سیستم در یک شاخص کلی، برای تسهیل در مقایسه و تصمیم‌گیری بین گزینه‌های مختلف مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب است [۳۵]. این شاخص پس از توسعه رابطه پیشنهادی Loucks (1997)، توسط Sandoval Solis و همکارانش در سال ۲۰۱۱ توسعه یافت [۳۶] و با میانگین‌گیری وزنی از سه شاخص یادشده به صورت رابطه ۶ ارائه شد:

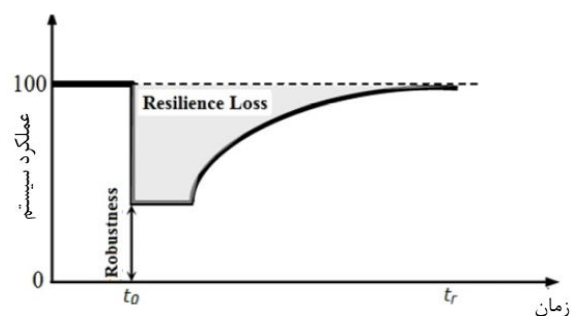
$$\text{Sus Index} = \{\text{Res} \times \text{Rel} \times (1 - \text{Vul})\}^{1/3} \quad (6)$$

این شاخص که معیاری برای تعیین میزان ریسک خطر است مقداری بین صفر تا یک دارد و هرچه میزان آن بیشتر باشد، خطر کمتری سیستم را تهدید می‌کند. همان‌طور که در روابط یادشده مشاهده می‌شود، اجزای اصلی تخمین شاخص پایداری همان معیارهای عملکرد سیستم هستند و علاوه بر اینکه هر یک مفهوم خاص خود را بر سیاست‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ارائه می‌کنند، در تعیین میزان کمی شاخص پایداری نیز نقش

مفهوم برگشت‌پذیری را می‌توان با توجه به شکل ۵ این‌گونه توضیح داد که ایجاد اختلال در یک سیستم بر اثر یک واقعه حداکثر در زمان t_0 ، سبب کاهشی در عملکرد سیستم به میزان (۱۰۰ منهای مقدار صلابت سیستم) می‌شود [۳۰]. با شروع بازتوانی سیستم، عملکرد آن به تدریج بازیابی می‌شود تا در زمان t_n به سطح عملکرد نرمال خود برگردد. ناحیه فوقانی منحنی تشکیل شده در این فرایند، میزان بازگشت‌پذیر نبودن سیستم را نشان می‌دهد [۳۱]. هرچه مساحت این ناحیه کوچک‌تر باشد، بازگشت‌پذیری سیستم بیشتر است. به همین ترتیب، ناحیه زیر منحنی عملکرد سیستم، نشان‌دهنده میزان بازگشت‌پذیری آن است. بنابراین، پس از برآورد تابع عملکرد سیستم زهکشی در هر گام زمانی به ازای اعماق مختلف سیل (x_t) ، بازگشت‌پذیری سیستم (Res) را می‌توان از معادله ۴ کمی‌سازی کرد [۲۷]:

$$\text{Res} = \frac{1}{t_n} \int_{t_0}^{t_n} u(x) \cdot dx \quad (4)$$

در معادله یادشده t_0 زمان شروع شبیه‌سازی و t_n کل زمان سپری شده در انتهای شبیه‌سازی است. $u(x)$ نیز مقدار تابع عملکرد زیرساخت زهکشی شهری در گام‌های زمانی یک‌ساعته است. شایان یادآوری است این رابطه صرفاً برای محاسبه شاخص بازگشت‌پذیری در یک کانال که دچار آب‌گرفتگی شده، ارائه شده است. بنابراین، برای برآورد این شاخص در کل سیستم، باید تمام کانال‌های سیلابی شبکه تحلیل و بررسی شوند و از مقادیر برگشت‌پذیری همه کانال‌ها به ازای هر دوره بازگشت، میانگین گرفته شود.



شکل ۵. شکل شماتیک از مفهوم بازگشت‌پذیری

تعیین شد. در نهایت نیز شاخص‌های کارایی شبکه در شرایط فعلی و تحت سناریوی میانه بررسی شد. نتایج به دست آمده به تفکیک ارائه می‌شود:

نتایج به دست آمده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های AOGCMs

در جدول ۲ نتایج داده‌های حداکثر بارش ریزمقیاس‌نمایی شده و خروجی ۱۰ مدل AOGCM تحت دو سناریوی RCP8.5 و RCP2.6 آورده شده است. در پژوهش حاضر عملکرد سیستم زهکشی منطقه در شرایط کنونی و سپس طبق سناریوی میانه خروجی تمام مدل‌های اقلیمی به عنوان تجمیعی از کل مدل‌های یادشده در جدول ۱ برای شرایط آبی به ازای مقادیر حدی بارش تحت دوره بازگشت‌های پنج و ۱۰ سال با نرم‌افزار SWMM ارزیابی شده است.

جدول ۲. مقادیر حداکثر بارش روزانه ریزمقیاس‌نمایی شده خروجی مدل‌های AOGCMs بر حسب میلی‌متر

RCP 8.5		RCP 2.6		مدل اقلیمی
T=10	T=5	T=10	T=5	
۳۶	۳۳	۳۷	۳۲	MIROC-ESM
۳۱	۲۷	۳۱	۲۹	GISS-E2-R
۳۹	۳۵	۲۹	۲۵	CESM1-WACCM
۳۶	۳۳	۴۰	۳۶	CSIRO-Mk3-6-0
۳۸	۳۵	۳۴	۳۲	MPI-ESM-LR
۳۷	۳۴	۳۷	۳۴	GISS-E2-H
۳۹	۳۴	۴۲	۳۸	CanESM2
۳۶	۳۳	۳۹	۳۶	HadGEM2-es
۳۷	۳۴	۳۸	۳۳	CNRM-CM5
۳۳	۳۱	۳۴	۳۱	GFDL-CM3
۳۵	۳۳	۳۴	۳۲	MEDIAN

محاسبه بارش‌های شش‌ساعته دوره آبی به ازای دوره بازگشت‌های ۵ و ۱۰ سال، ۰/۵۷ به دست آمد. سپس، یک تابع توزیع احتمال به سری داده‌های حداکثر بارش سالانه ۲۴ ساعته دوره آبی نیز برآزش داده و در نهایت با ضرب این مقادیر در ضریب یادشده، بارش‌های شش‌ساعته دوره آبی به ازای دوره بازگشت‌های مختلف به دست آمده است. در جدول ۳ مقادیر حداکثر بارش شش‌ساعته دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۴۹) به ازای هر ۱۰ مدل اقلیمی استفاده شده در پژوهش تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 آمده است:

نتایج مقایسه مقادیر حداکثر بارش روزانه حالت میانه تمام خروجی‌های ۱۰ مدل AOGCM تحت سناریوهای

اساسی دارند. بنابراین، عدم محاسبه صحیح این معیارها، به تحلیل و تصمیم‌گیری‌های اشتباه و نادرستی منجر می‌شود که گاه می‌تواند جبران‌ناپذیر باشد.

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر پس از بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی ناحیه یک منطقه ۱۱ شهر تهران در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۹. مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی منطقه در شرایط کنونی و شرایط آبی طبق سناریوی میانه مستخرج از نتایج خروجی ۱۰ مدل AOGCM تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 با استفاده از نرم‌افزار SWMM انجام شده و احتمال وقوع آب‌گرفتگی کانال‌ها به صورت تابعی از دوره بازگشت بارش

مقادیر حداکثر بارش مشاهداتی ۲۴ ساعته ایستگاه مهرآباد در دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰) به ازای دوره بازگشت‌های پنج و ۱۰ سال به ترتیب ۳۱/۸۹ و ۳۷/۹۹ میلی‌متر و حداکثر بارش مشاهداتی شش‌ساعته دوره پایه نیز به ازای دوره بازگشت‌های ۵ و ۱۰ سال به ترتیب ۱۸ و ۲۱/۶۴ میلی‌متر است. در تحقیق حاضر برای ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی ناحیه یادشده در شرایط فعلی از این مقادیر استفاده شده است.

در پژوهش حاضر مقدار ضریب حاصل از برآزش تابع توزیع احتمال GEV به حداکثر بارش‌های سالانه ۶ و ۲۴ ساعته دوره پایه و تعیین ارتباط بین این دو مقدار، برای

مشاهداتی بررسی شد. برای نمونه، در شکل ۷ نتایج به دست آمده از حالت میانه کل سناریوها آورده شده است. با توجه به این نمودار، مدل LARS-WG پارامتر بارش را با دقت نسبتاً خوبی برای دوره آبی برآورد کرده است.

برای بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی مقادیر بیشینه بارندگی روزانه نیز، ماکزیمم مقادیر مربوط به هر ماه از داده‌های مشاهداتی را با داده‌های مدل‌سازی شده توسط LARS-WG در دوره پایه مدل، مقایسه کرده‌ایم. با توجه شکل ۸، مقدار بیشینه بارش روزانه مشاهداتی و بارش مدل‌سازی شده به جز ماه‌های مارس، اکتبر و می، تفاوت چندانی با هم ندارند و این میزان اختلاف قابل قبول است.

غیراقلیمی RCP2.6 و RCP8.5، با مقادیر حداکثر بارش روزانه دوره مشاهداتی (۱۹۸۱-۲۰۱۰) در دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال در شکل ۶ آمده است. این نمودار نشان می‌دهد در حالت میانه نتایج خروجی مدل‌های اقلیمی AOGCMs، تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به ازای دوره بازگشت پنج سال، مقادیر بارش حداکثر روزانه نسبت به دوره مشاهداتی بیشتر و به ازای دوره بازگشت ۱۰ سال کمتر از دوره مشاهداتی برآورد شده‌اند.

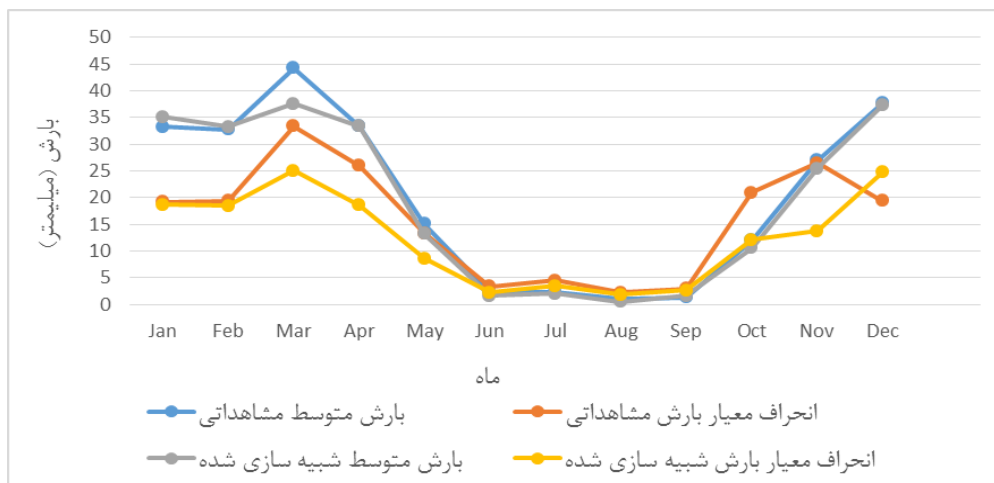
بررسی تغییرات متغیرهای تولیدشده نسبت به دوره پایه برای تعیین رفتار متغیر بارش پیش‌بینی شده در شرایط تغییر اقلیم، تغییرات این پارامتر در دوره‌های مختلف نسبت به دوره

جدول ۳. مقادیر حداکثر بارش شش ساعته دوره آبی برحسب میلی‌متر

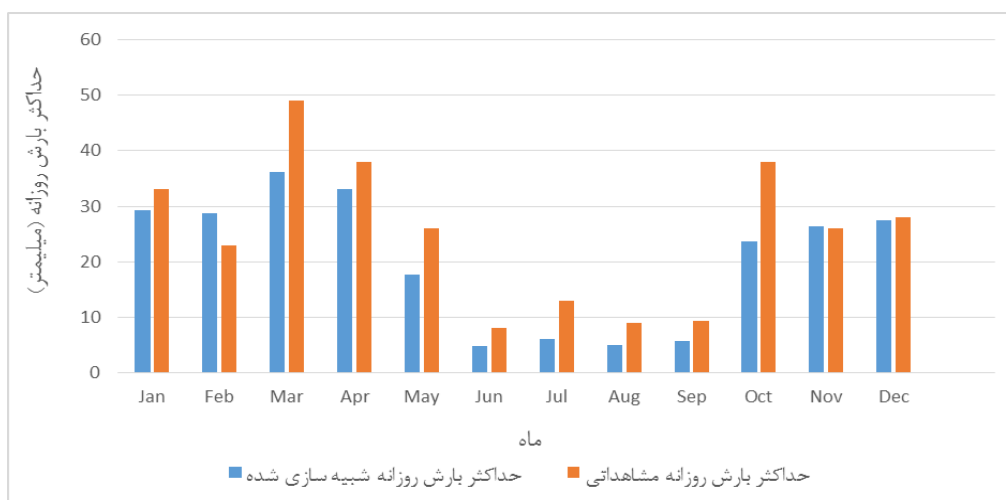
RCP 8.5			RCP 2.6		مدل اقلیمی
T=10	T=5	T= 10	T=5		
۵۲/۲۰	۸۱/۱۸	۰۹/۲۱	۲۴/۱۸		MIROC-ESM
۱۷/۶۷	۳۹/۱۵	۶۷/۱۷	۵۳/۱۶		GISS-E2- R
۲۳/۲۲	۹۵/۱۹	۵۳/۱۶	۲۵/۱۴		CESM1-WACCM
۵۲/۲۰	۸۱/۱۸	۸/۲۲	۵۲/۲۰		CSIRO-Mk3-6-0
۶۶/۳۱	۹۵/۱۹	۳۸/۱۹	۲۴/۱۸		MPI-ESM-LR
۰۹/۲۱	۳۸/۱۹	۰۹/۲۱	۳۸/۱۹		GISS-E2-H
۲۳/۲۳	۳۸/۱۹	۹۴/۲۳	۶۶/۲۱		CanESM2
۵۲/۲۰	۸۱/۱۸	۲۳/۲۲	۵۲/۲۰		HadGEM2- es
۰۹/۲۱	۳۸/۱۹	۶۶/۲۱	۸۱/۱۸		CNRM-CM5
۸۱/۱۸	۶۷/۱۷	۳۸/۱۹	۶۷/۱۷		GFDL-CM3
۹۵/۱۹	۸۱/۱۸	۳۸/۱۹	۲۴/۱۸		MEDIAN



شکل ۶. مقایسه مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته حالت میانه تحت سناریوهای Rcp.6 و Rcp.5 و ۸ دوره مشاهداتی



شکل ۷. ارزیابی مدل LARS-WG در مدل سازی متغیر بارش منطقه مطالعاتی نسبت به دوره پایه



شکل ۸. مقایسه ماکزیمم مقادیر بارش روزانه دوره مشاهداتی و دوره پایه مدل LARS-WG تحت سناریوی میانه

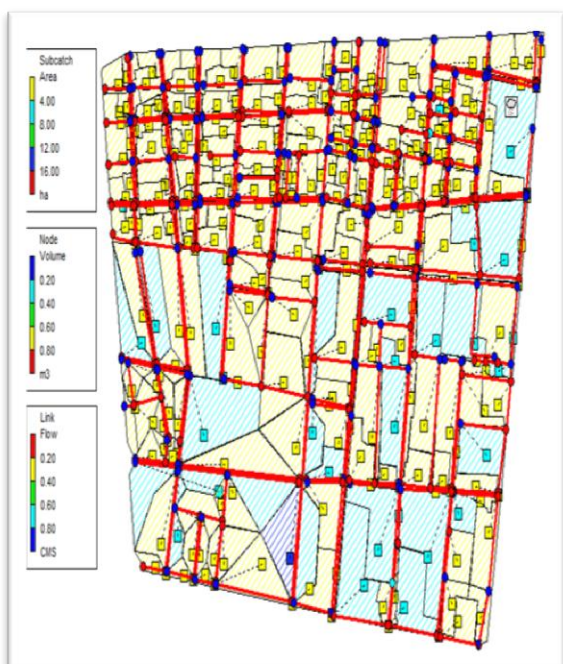
پژوهش، طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 نشان می‌دهد. حداکثر بارش شش ساعته با دوره بازگشت ۵ و ۱۰ سال در این دوره طبق سناریوی RCP2.6 به ترتیب ۱۸/۲۴ و ۱۹/۳۸ میلی‌متر و طبق سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۱۸/۸۱ و ۱۹/۹۵ میلی‌متر است. نتایج مدل سازی در دوره آتی نشان‌دهنده عملکرد نامناسب ۲۲/۰۶ و ۲۳/۰۲ درصد از طول کانال‌های ناحیه (معادل ۱۰/۶ و ۱۱/۰۶ کیلومتر) به ترتیب به ازای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 است. با توجه به افزایش اندک بارش‌های دوره آتی نسبت به شرایط فعلی، طبق نتایج افزایش چشمگیری در میزان کانال‌هایی که در آینده دچار کمبود ظرفیت خواهند شد، نسبت به شرایط کنونی ایجاد نخواهد شد.

نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی هیدرولیکی و

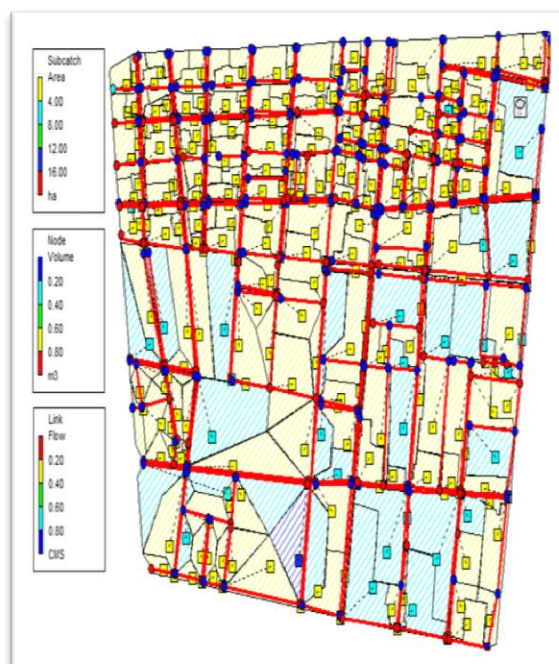
هیدرولوژیکی منطقه مطالعاتی با نرم‌افزار SWMM

شکل ۹ نشان‌دهنده وضعیت کانال‌های ناحیه تحت اثر بارش‌های فعلی در دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۰ است. در این بازه زمانی حداکثر بارش شش ساعته با دوره بازگشت پنج سال، ۱۸ میلی‌متر و به ازای دوره بازگشت ۱۰ سال، ۲۱/۶۳ میلی‌متر است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، در شرایط فعلی با وقوع بارشی با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال، در مجموع ۲۳/۲۵ درصد از طول کل کانال‌های ناحیه (معادل ۱۱/۱۷ کیلومتر)، دچار آب‌گرفتگی شده‌اند.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ وضعیت کانال‌های ناحیه را تحت تأثیر بارش‌های دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۹) در حالت میانه خروجی تمام ۱۰ مدل AOGCM استفاده‌شده در

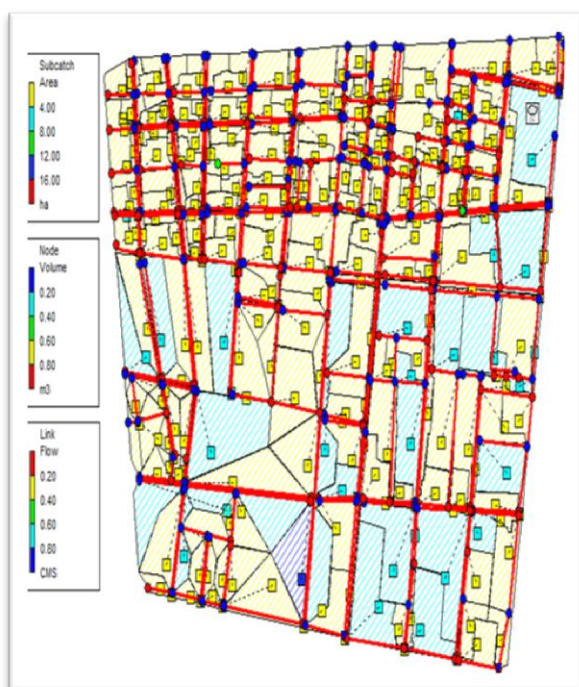


(ب)

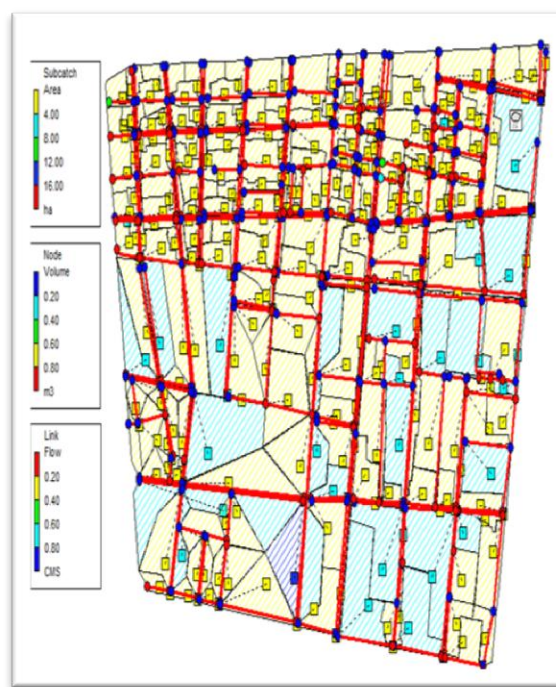


(الف)

شکل ۹. وضعیت کانال‌های ناحیه در شرایط فعلی تحت بارش با دوره بازگشت الف) ۵ سال؛ ب) ۱۰ سال



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. وضعیت کانال‌های ناحیه به ازای بارش حالت میانه خروجی مدل‌های AOGCMs، تحت سناریوی Rcp2.6 با دوره بازگشت الف) ۵ سال؛ ب) ۱۰ سال



(ب)

(الف)

شکل ۱۱. وضعیت ناحیه به ازای بارش حالت میانه خروجی مدل‌های AOGCMs، تحت سناریوی Rep8.5 با دوره بازگشت الف) ۵ سال؛ ب) ۱۰ سال

جدول ۴. شاخص‌های کارایی شبکه زهکشی بررسی شده تحت سناریوها و دوره بازگشت‌های مختلف

وضعیت اقلیمی	سناریوی اقلیمی (حالت میانه)	تعداد کل کانال‌ها	تعداد کانال‌های سیلابی	طول کل کانال‌های منطقه (KM)	طول کانال‌های سیلابی (KM)	اطمینان‌پذیری (درصد)	برگشت‌پذیری (درصد)	آسیب‌پذیری (درصد)	پایداری (درصد)
پایه	---	۳۲۱	۱۱۲	۴۸/۰۲۹	۱۱/۱۷	۷۶/۷۵	۹۱/۱۵	۳۱/۵۵	۷۷/۸۹
آبی	RCP2.6	۳۲۱	۱۱۳	۴۸/۰۲۹	۱۰/۶۰	۷۷/۹۴	۸۵/۴	۲۸/۵	۷۷/۷۳
آبی	RCP8.5	۳۲۱	۱۱۳	۴۸/۰۲۹	۱۱/۰۶	۷۶/۹۸	۸۷/۹	۳۰/۱۰	۷۷/۶۱

طبق نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان شبکه زهکشی ناحیه در شرایط فعلی ۷۶/۷۵ درصد و در دوره آبی تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۷۷/۹۴ و ۷۶/۹۸ درصد است. در واقع، در شرایط فعلی با وقوع بارشی با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال، در مجموع ۲۳/۲۵ درصد و در شرایط آبی به ازای هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 حدود ۲۲ درصد از طول کانال‌های ناحیه، دچار آب‌گرفتگی خواهند شد. ناتوانی کانال‌هایی که با دوره بازگشت پنج سال طراحی شده‌اند، در انتقال سیلاب ۱۰ ساله، نشان‌دهنده ناتوانی سیستم نیست. بنابراین، پس از حذف کانال‌هایی که دوره بازگشت طراحی پنج‌ساله داشتند، صرفاً به اعلام درصد کانال‌هایی پرداخته شده است که به‌رغم داشتن دوره بازگشت طراحی ۱۰

نتایج به دست آمده از بررسی عملکرد شبکه فرعی زهکشی منطقه مطالعاتی با استفاده از شاخص‌های کارایی در تحقیق حاضر پس از بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی ناحیه یک منطقه ۱۱ شهر تهران در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ و مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی منطقه در شرایط کنونی و شرایط آبی با استفاده از نرم‌افزار SWMM، احتمال وقوع آب‌گرفتگی کانال‌ها به صورت تابعی از دوره بازگشت بارش تعیین شد. در نهایت نیز عملکرد شبکه با استفاده از شاخص‌های کارایی شبکه شامل اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری تحت سناریوهای مختلف ارزیابی شد. نتایج به دست آمده از محاسبه این شاخص‌ها در جدول ۴ به تفکیک ارائه شده است.

توجه به اهمیت بحث آب‌گرفتگی در سطح خیابان‌ها و معابر عمومی و خسارت‌های ناشی از آن به‌خصوص تحت تأثیر تغییر اقلیم، در پژوهش حاضر ناحیه ۱ منطقه ۱۱ شهر تهران به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده و با کمک نرم‌افزار SWMM وضعیت شبکه زهکشی این ناحیه در سطح کانال‌های درجه ۳ و ۴ در شرایط فعلی و شرایط تغییر اقلیم براساس سناریوهای مختلف در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ بررسی شد. در نهایت نیز عملکرد شبکه با محاسبه شاخص‌های کارایی نظیر اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری در شرایط کنونی و شرایط آتی برای نخستین‌بار در این سیستم‌ها بررسی شد. مدل‌سازی شرایط پس از وقوع تغییر اقلیم، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به ایجاد یک دید کلی نسبت به وضعیت آتی در منطقه منجر خواهد شد که می‌تواند تصمیم‌های مدیریتی و راهبردهای تطبیقی را به منظور سازگاری با پیامدهای ناشی از آن ارائه دهد. نتایج شبیه‌سازی سیلاب نشان داد پایداری سیستم زهکشی منطقه در شرایط فعلی ۷۷/۸۹ درصد و در شرایط آتی تحت سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۷۷/۷۳ و ۷۷/۶۱ درصد است. به‌طور کلی، مشخص شد در دوره آتی تحت تأثیر هر دو سناریوی تغییر اقلیم حجم سیلاب و تعداد نقاط آب‌گرفتگی شبکه در مقایسه با شرایط کنونی افزایش چشمگیری نخواهد داشت. طبق نتایج پژوهش حاضر، اصلاح سیستم زهکشی منطقه ضروری به نظر می‌رسد، زیرا حتی در شرایط فعلی هم با وقوع بارش‌هایی با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال، در مجموع ۲۳/۲۵ درصد از طول کانال‌های منطقه، دچار آب‌گرفتگی خواهند شد. نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی منطقه نشان می‌دهد بخش عمده کانال‌هایی که در ناحیه دچار کمبود ظرفیت هستند، دوره بازگشت پنج سال دارند. بنابراین، بررسی اهمیت و شرایط محیطی مکان‌هایی که در مجاورت این کانال‌ها قرار دارند، در کنار بررسی سایر شرایط فیزیکی و هیدرولیکی آنها، به اولویت‌بندی بهتر برای اصلاح منجر خواهد شد. هرچند بهسازی سیستم باید به گونه‌ای باشد که قابلیت انطباق با بدترین شرایط ممکن را داشته باشد، اما این کار اقدامی پرهزینه است و الزاماً منافع مورد انتظار را به همراه نخواهد داشت. بنابراین، اولویت‌بندی و اصلاح شبکه، با بررسی تمام جوانب اقتصادی و محیطی برای سازگاری بیشتر با پیامدهای

ساله، با وقوع این سیلاب دچار کمبود ظرفیت شده‌اند. میزان بازگشت‌پذیری سیستم نیز در شرایط فعلی ۹۱/۱۵ درصد و در شرایط آتی طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۸۵/۴ و ۸۷/۹ درصد است. انجام اقداماتی نظیر بهسازی و اصلاح کانال‌ها و نیز اضافه کردن جوی‌باغچه به سیستم، در کاهش حجم سیلاب و آب‌گرفتگی شبکه مؤثر بوده و در نتیجه با افزایش میزان بازگشت‌پذیری، در واقع سیستم به لحاظ عملکرد هیدرولیکی در مدت زمان کمتری، به وضعیت اولیه خود باز می‌گردد. شاخص آسیب‌پذیری شبکه نیز که در پژوهش حاضر به صورت نسبت ارتفاع رواناب ایجادشده در هر کانال، به عمق بیشینه آب‌گرفتگی تعریف شده در شرایط کنونی ۳۱/۵ درصد و در دوره آتی براساس سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب معادل ۲۸/۵ و ۳۰/۰ درصد است. در نهایت، شاخص پایداری شبکه زهکشی تحت تأثیر بارش‌های حدی شش‌ساعته در منطقه، بررسی و مشخص شد پایداری سیستم در شرایط فعلی ۷۷/۸۹ درصد و در شرایط آتی تحت سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۷۷/۷۳ و ۷۷/۶۱ درصد است. به‌طور کلی، مشخص شد در دوره آتی به علت افزایش اندک در میزان بارش‌های حدی شش‌ساعته، تحت تأثیر هر دو سناریوی تغییر اقلیم حجم سیلاب و تعداد نقاط آب‌گرفتگی شبکه در مقایسه با شرایط کنونی افزایش چشمگیری نخواهد داشت. آنچه از نتایج برآورد می‌شود، وضعیت نابسامان موجود در منطقه است، زیرا حتی در شرایط فعلی هم با وقوع بارش‌هایی با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال، در مجموع حدود ۲۳ درصد از طول کانال‌های ناحیه، عملکرد مناسبی ندارند و متحمل اضافه‌بار خواهند بود. در ضمن در آینده نیز تحت شرایطی مانند فرسودگی کانال‌ها و انباشت زباله به مرور این مقدار افزایش خواهد داشت و به بروز خسارت‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی فراوان منجر خواهد شد.

نتیجه‌گیری

از آنجا که سیستم‌های جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی از زیرساخت‌های مهم برنامه‌ریزی و عمران شهری محسوب می‌شود و هرگونه سهل‌انگاری در طراحی و اجرای صحیح آنها می‌تواند مشکل‌ساز شود و همچنین با

- Procedia Social and Behavioral Sciences. 2010; 2(6): 7739-7740.
- [10]. Zaghoul NA, Al-Mutairi BL. Water Harvesting of Urban Runoff in Kuwait. *Transaction A Civil Engineering, Sharif University of Technology*. 2010; 17(3), pp. 236-243.
- [11]. Willems P, Arnbjerg K, Olsson J, Nguyen VTV. Climate Change Impact Assessment on Urban Rainfall Extremes and Urban Drainage: Methods & Shortcomings. *Atmospheric Research*. 2012; 103, 106-118.
- [12]. Yazdandust F, Pourshushtari M, Tahmasebi Birangani Y. Investigating the Effect of Climate Change on Urban Flooding and the Function of Drainage System, National Conference on Flood Management, Tehran. 2013.
- [13]. Darren W, Bruce C. Adaptation of Storm Drainage System to Accommodate Increased Rainfall Resulting from Climate Change, *Journal of Environmental Planning and Management*. 2014; 46-50.
- [14]. Birgani Y, Yazdandoost F. Resilience in urban drainage risk management systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Water Management*. Thomas Telford Ltd. 2015; 3-16.
- [15]. Willuweit L, O'Sullivan J, Shahumyan H. Simulating the effects of climate change, economic & urban planning scenarios on urban runoff patterns of a metropolitan region. *Urban Water Journal*. 2015; 1-16.
- [16]. Ahmed S, Tsanis I. Climate Change Impact on Design Storm and Performance of Urban Storm-Water Management System (A Case Study on West Central Mountain Drainage Area in Canada). *Hydrol Current Res*. 2016; 7:229.
- [17]. Binesh N, Niksokhan MH, Sarang A, Rauch W. Improving Resilience of Urban Drainage System in Adaptation to Climate Change (Case study: Northern Tehran, Iran). 2018. International Conference on Building Tomorrow's Society, 16th International Environmental Specialty, At: Canada, June 13-16 (2018).
- [18]. Zistab Consulting Engineers. Basic studies report (A study on operationalizing comprehensive surface waters plan and preparing river streams and canals improvement schemes for the District 11 of the city of Tehran, Tehran, Iran. 2015. (Persian)
- [19]. Shariat R, Roozbahani A, Ebrahimian A. 2019. Risk analysis of urban stormwater infrastructure systems using fuzzy spatial multi-criteria decision making. *The Science of the total environment*. 647:1468-1477.
- ناشی از وقوع پدیده تغییر اقلیم، اقدامی هوشمندانه خواهد بود. در نهایت نیز پیشنهاد می شود در پژوهش‌هایی دیگر، نتایج به دست آمده از شاخص‌های کارایی و رویکرد ارائه شده در تحقیق حاضر، برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی دیگر مناطق کشور استفاده شده و برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر تمام سناریوهای اقلیمی و حالت‌های خوش‌بینانه و بدبینانه نیز بررسی شود.
- ### منابع
- [1]. Chocat B, Ashley R, Marsalek J, Matos MR, Rauch W, Schilling W, Urbonas B. Toward the sustainable management of urban storm-water. *Indoor Built Environ*. 2007; 16(3): 273-285.
- [2]. Zhou Q. A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. 2014; 6(4): 976-992.
- [3]. Nazif S. Developing an algorithm for the assessment of climate change impact on urban water cycle. Ph.D thesis, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. 2010. (Persian)
- [4]. Prodanovic P. Response of Water Resources Systems to Climate Change. Ph.D. dissertations, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada. 2008; p 356.
- [5]. Willems P, Olsson J, Arnbjerg-Nielsen K, Beecham S, Pathirana A, Gregersen IB, Madsen H, Nguyen VTV. Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage. IWA Publishing: London, UK. 2012; p252.
- [6]. Mailhot A, Duchesne S. Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *Water Resour. Plan. Manag. Asce*, 2010; 136(2): 201-208.
- [7]. Boysen F. An overview and evaluation of composite indices of development. *Journal of Social Indicators Research*. 2002; 59(2):115-151.
- [8]. Zevenbergen C, Cashman A, Evelpidou N, Pasche E, Garvin S, Ashley R. Urban Flood Management. International Standard Book Number-13: 978-1-4398-9433-0. by Taylor & Francis Group, LLC. Balkema. 2005.
- [9]. Sharifan RA, Roshan A, Aflatoni M, Jahedi A, Zolghadr M. Uncertainty and sensitivity analysis of SWMM model in computation of manhole water depth and subcatchment peak flood.

- [20]. Gironas J, Roesner LA, Rossman LA, Davis J. A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM). Environmental Modelling and Software. 2010; 25(6): 813-814.
- [21]. Rossman LA. Storm water management model, User's Manual version 5.0. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. 2009; 259p.
- [22]. Carter TR, Hulme M, Lal M. IPCC-TGCI. Guidelines on use of scenario data for climate impact & adaptation assessment.. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment. 1999; Version 1, 69p.
- [23]. 23-Jafarpour S, Cannoni A. Climate change scenarios in the fifth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change and its comparison with the previous report. 2016. Second National Conference on Environmental and Natural Resources Conservation. At: Ardebil, Mohaghegh Ardabil University, Iran. March 3-4 (2016). (Persian)
- [24]. Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, et al. 2011. The representative concentration pathways: an overview Climatic Change, 109: 5-31.
- [25]. Maleki Nejad H, Soleimani Motlagh M, Jaideri A, Shater Abshuri S. Comparison of partial and maximum frequency series for maximum daily precipitation to determine the best probabilistic distribution (Case Study: Tehran and Alborz provinces). Journal of Meteorological Organization (Nivar). 2015; 39(90):3-14. (Persian)
- [26]. Todini E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. Urban Water. 2000; 2(2):115-122.
- [27]. Tajrishi M, Malekmohammadi B. Suitable method to accomplish flood insurance program for crisis management in flood condition of urban areas, 2nd International Conference on Integrated National Disaster Management, Tehran, Iran. 2009; 1-18.
- [28]. Mugume S, Gomez D, Butler D. Quantifying the resilience of urban drainage systems using a hydraulic performance assessment approach. 13th International Conference on Urban Drainage, Malaysia. 2014.
- [29]. Gharaibeh NG, Asce M, Chiu Y, Gurian PL. Decision methodology for allocating funds across transportation infrastructure assets, Journal of Infrastructure Systems. 2006; 12(1):1-9.
- [30]. Valizadeh N, Zorn CR, Shamseldin AY. Evaluating the technical resilience of stormwater systems to flooding. Stormwater Conferenc, Australia. 2016.
- [31]. Bocchini P, Frangopol DM, Ummenhofer T, Zinke T. Resilience and sustainability of civil infrastructure, Toward a unified approach. Journal of Infrastructure Systems. 2013; 20(2): 1-16.
- [32]. Loucks DP, Van Beek E. Water Resources systems planning and management. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Paris, France. 2005.
- [33]. Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP. Reliability, Resiliency and Vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. Water Resources Research. 1982; 10(1):14-20.
- [34]. Menzoda VM, Villanuave EE, Adem J. Vulnerability of basin and watershed in Mexico to global climate change. Climate Research Journal. 1997; 9:139-145.
- [35]. Lane BA, Sandoval-Solis S, Porce EC. Environmental flows in human-dominated system. Integrated water management strategies for the Rio Grand / Bravo basin. River Research and Applications. 2014.
- [36]. Sandoval-Solis S, McKinney Dc, Loucks DP. Sustainability index for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management. 2011; 137(5):381-390.