

Optimum redesign of runoff harvesting channels to reduce vulnerability and increase reliability against climate change

Hossein Hosseinzade Kuhi ^{1*}, Mojtaba Ardestani ², Amin Sarang ³

¹ M.Sc. Student, Department of Water Resources, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, Department of Water Resources, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Water Resources, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

Urban flooding is caused by the lack of capacity of the harvesting channel network and occurs when the amount of precipitation exceeds the network's capacity. One of the two main factors contributing to the aggravation of damage caused by urban floods is population growth and the expansion of urbanization, and the second factor is heavy rainfall caused by climate change, which plays an essential role in intensifying and accelerating the hydrological cycle and may change the amount and frequency of precipitation. This factor affects the probability of flooding, runoff volume, and peak flow. It is more visible in arid and semi-arid areas where rainfall usually occurs briefly but with high intensity. Urban flooding is a growing threat to urban infrastructure and public health, posing significant challenges to urban resilience and sustainability. One of the urban infrastructures that is of great importance is the runoff collection network. The increase of impervious surfaces wear and tear on the network. changes in the rainfall pattern due to climate change have increased the occurrence of urban floods and raised the importance of network redesign to minimize the system vulnerability.

Materials and Methods

In this research, the runoff harvesting network of ten districts of Tehran Municipality was redesigned and optimized. This area, with a population of 327,000 people, is located in the relatively dense fabric of the Tehran metropolis, and its area is 807 ha. Simulating the runoff collection network and checking the performance of the network by two indicators of vulnerability and reliability requires an accurate model with great details. For this purpose, in this research, SWMM version 5.1 software was used to simulate the runoff collection network. The study area was divided into 285 sub-basins to simulate the sub-channels in better detail. Then, information such as slope, area, and percentage of impervious space was introduced through ArcMap software version 10.3.1 as information under the watersheds. The sub-watershed width parameter was calculated by dividing the sub-watershed area by its most significant length using Q-GIS software and applied to the sub-basins. The LARS-WG model has also been used for the exponential micro-scale output of climate models. To simulate the network in the current or present situation, the historical precipitation information of the Mehrabad synoptic station was used, and to affect the network in future conditions, the precipitation information of the climate models of the sixth climate change report was used. Among the predictions of climate models, the most incremental changes in threshold precipitation were selected as a pessimistic scenario, and a system redesign was done to reduce vulnerability under this scenario.

Results and Discussion

This study was conducted to assess the performance of Tehran municipality's runoff collection network under current and future conditions. The SWMM hydraulic model was employed to simulate the network under various rainfall scenarios. Current conditions revealed a total runoff volume of 45.9, 51.14, and 59.7 thousand m³ for return periods of 2, 5, and 10 years, respectively. This runoff volume resulted in a vulnerability increase from 10.4 to 12.2% and a reliability reduction from 97.5 to 95.8%. To evaluate the network's performance under future climate change scenarios, the SWMM model was used with data from the IPCC sixth assessment report. Among the top five climate models, the one with the highest precipitation was selected as the pessimistic scenario. Simulation results under future conditions indicated a significant runoff volume increase, reaching 64.04 and 72.18 thousand

m³ in 5- and 10-year return periods, respectively. This increase corresponded to vulnerability indices of 12.7 and 13.9% and reliability indices of 95.3 and 94.3% for the same return periods. To enhance the network's resilience, a genetic algorithm-based optimization approach was employed. Cost, reliability, and vulnerability index were considered optimization objectives with specific weighting functions. The algorithm converged to an optimal design solution in the 168th iteration, resulting in a 7.6% vulnerability reduction and a 98.1% reliability enhancement.

Conclusion

The vulnerability index in the return periods of 5 and 10 years is equal to 12.7 % and 13.9 %, respectively, and the reliability index is equal to 95.3 % and 94.3 %. After checking the network in its current state and future conditions, an optimal network redesign was done to improve system performance in both current and future conditions. For this purpose, the genetic algorithm was used for optimization, and the objective function consisting of cost, vulnerability index, and reliability index and the importance weights of each, were defined. Then, MATLAB software did the optimal network redesign by connecting the simulator and optimizer model. The results showed that in the 168th iteration, the algorithm reached its final answer of 0.3, which remained constant until the 300th iteration. Also, the optimal redesign has reduced network vulnerability by 7.6% and increased reliability by 98.1%. This research showed that with an optimal redesign and solving the current network problems, the system's ability to face future climate change threats could also be increased. Of course, spending the least money to achieve the best result was one of the main goals of this research. In future studies, it is recommended to use low-impact development tools along with optimal redesign to fix defects and improve the performance of the runoff collection network.

Keywords: Genetic algorithm, Optimization, Reliability indicator, Urban runoff, Vulnerability indicator

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Tehran for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Hossein Hosseinzade Kuhi: Writing - original draft preparation, Resources, Software, Manuscript editing, Formal analysis and investigation, Visualization, Supervision; **Mojtaba Ardestani:** Methodology; **Amin Sarang:** Conceptualization.

*Corresponding Author, E-mail: hosseinzade96@ut.ac.ir

Citation: Hosseinzade Kuhi, H., Ardestani, M., & Sarang, A. (2024). Optimum redesign of runoff harvesting channels to reduce vulnerability and increase reliability against climate change. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(1), 85-101. DOI: 10.22098/mmws.2023.12222.1213

Received: 26 January 2023, Received in revised form: 09 February 2023, Accepted: 09 February 2023, Published online: 09 February 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2014, Vol. 4, No. 1, pp 85-101

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بهینه‌سازی طراحی کانال‌های جمع‌آوری رواناب شهری برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی

حسین حسین‌زاده کوهی^{۱*}، مجتبی اردستانی^۲، امین سارنگ^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه منابع آب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه منابع آب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه منابع آب، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

یکی از زیرساخت‌های شهری که از اهمیت بالایی برخوردار است، شبکه جمع‌آوری رواناب است. افزایش سطوح نفوذناپذیر، فرسودگی شبکه و تغییر الگوی بارش ناشی از تغییرات اقلیمی موجب افزایش رخداد سیلاب شهری شده و اهمیت بازطراحی شبکه به‌منظور به حداقل رساندن آسیب‌پذیری سامانه را بالا برده است. در این پژوهش شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران مورد بازطراحی بهینه قرار گرفت. در همین راستا، شبکه جمع‌آوری در دو مرحله توسط مدل SWMM شبیه‌سازی شد. از الگوریتم ژنتیک نیز به‌عنوان ابزاری جهت بهینه‌کردن بازطراحی استفاده شده است. در بخش شبیه‌سازی، نخست شبکه جمع‌آوری در وضع موجود با استفاده از اطلاعات تاریخی بارش ایستگاه سینوپتیک مهرآباد طی دوره‌های بازگشت دو، پنج و ۱۰ سال شبیه‌سازی شد و در مرحله دوم مدل‌سازی شبکه جمع‌آوری در شرایط آبی با استفاده از اطلاعات بارشی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم تغییر اقلیم صورت گرفت. از میان پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی، بیش‌ترین تغییرات افزایشی بارش حدی به‌عنوان سناریوی بدبینانه انتخاب و بازطراحی سامانه برای کاهش آسیب‌پذیری تحت این سناریو انجام گرفت. سه پارامتر هزینه، شاخص اطمینان‌پذیری و شاخص آسیب‌پذیری به‌عنوان اهداف بهینه‌سازی با وزن‌دهی مشخص در قالب یک تابع معرفی شد. سپس با مرتبط ساختن مدل شبیه‌ساز با بهینه‌ساز توسط نرم‌افزار متلب بازطراحی بهینه انجام شد. نتایج شبیه‌سازی شبکه در وضع موجود نشان داد که با افزایش دوره بازگشت از دو تا ۱۰ سال، حجم رواناب خروجی از ۴۵/۹ تا ۵۹/۷ هزار مترمکعب افزایش یافت که موجب افزایش آسیب‌پذیری از ۱۰/۴ تا ۱۲/۲ درصد و کاهش اطمینان‌پذیری از ۹۷/۵ تا ۹۵/۸ درصد شده است. در شبیه‌سازی شبکه در شرایط آبی نیز شاخص آسیب‌پذیری در دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال، ۱۲/۷ و ۱۳/۹ درصد و شاخص اطمینان‌پذیری نیز ۹۵/۳ و ۹۴/۳ به‌دست آمد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در تکرار ۱۶۸، الگوریتم به پاسخ نهایی خود به مقدار ۰/۳ رسیده و این پاسخ تا تکرار ۳۰۰ ثابت باقی‌مانده است. همچنین، بازطراحی بهینه موجب کاهش آسیب‌پذیری شبکه تا ۷/۶ درصد و افزایش اطمینان‌پذیری تا ۹/۱ درصد شد. این پژوهش نشان داد که بازطراحی بهینه می‌تواند علاوه بر رفع مشکلات شبکه در وضع موجود، توانایی سامانه را نیز در برابر تهدیدات تغییر اقلیم آینده بالا برد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، رواناب شهری، شاخص آسیب‌پذیری، شاخص اطمینان‌پذیری

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hosseinzade96@ut.ac.ir

استناد: حسین‌زاده کوهی، حسین، اردستانی، مجتبی، و سارنگ، امین (۱۴۰۳). بهینه‌سازی طراحی کانال‌های جمع‌آوری رواناب شهری برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱۴(۱)، ۸۵-۱۰۱.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12222.1213

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۸۵ تا ۱۰۱

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

سیلاب شهری یک بلای طبیعی رایج و گسترده است که خسارت‌های مالی و جانی ناشی از آن به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته و هیچ نشانه‌ای از کاهش آن دیده نمی‌شود. خسارت‌های وارده به اموال، زیرساخت‌های عمومی و منابع طبیعی آن را به یک خطر مکرر و طولانی‌مدت طبیعی تبدیل می‌کند و تا زمانی که کاملاً مدیریت نشود، باقی می‌ماند (Chen et al., 2017). سیلاب شهری ناشی از کمبود ظرفیت شبکه کانال جمع‌آوری بوده و زمانی رخ می‌دهد که میزان بارش از ظرفیت شبکه بیش‌تر شود (Tasca et al., 2018). یکی از دو عامل اصلی تشدید آسیب ناشی از سیلاب شهری، رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی بوده که در آن فعالیت‌های انسانی در چرخه هیدرولوژیکی طبیعی، مانند تبدیل حوضه‌های طبیعی به سطوح غیرقابل نفوذ، حذف پوشش گیاهی، ساخت‌وساز در مناطق سیل‌خیز و مسیل‌های طبیعی فرآیند نفوذ را تضعیف کرده و منجر به افزایش حجم رواناب ناشی از بارش می‌شوند (Silva et al., 2014; Movahedinia et al., 2019). عامل دوم، بارندگی شدید ناشی از تغییرات اقلیمی است که نقش مهمی در تشدید و تسریع چرخه هیدرولوژیکی ایفا می‌کند و ممکن است میزان و فراوانی بارش را تغییر دهد (Dong et al., 2017). این عامل بر احتمال وقوع سیلاب، حجم رواناب و دبی اوج تأثیرگذار بوده و در مناطق خشک و نیمه‌خشک که در آن بارندگی معمولاً برای مدت کوتاه اما با شدت بالا رخ می‌دهد، بیش‌تر نمایان است (Al-Zahrani et al., 2017).

بررسی عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب نیازمند مدل‌سازی کامپیوتری است. مدل‌های زیادی به شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب شهری پرداخته است که یکی از کارآمدترین و بهترین این مدل‌ها SWMM^۱ است. پژوهش‌گران زیادی برای رسیدن به اهداف در پژوهش خود، از نرم‌افزار SWMM برای شبیه‌سازی و بررسی وضعیت شبکه جمع‌آوری رواناب استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، در پژوهشی (Movahedinia et al., 2019) استفاده از مدل شبیه‌سازی SWMM منطقه ۱۳ شهرداری تهران را شبیه‌سازی کردند و اثرات ابزارهای توسعه کم اثر (LID) بر سیلاب شهری در پنج سناریو را بررسی نمودند. این سناریوها شامل بشکه باران (RB) در دو اندازه، سلول نگهداری زیستی (BRC) و ترکیبی از دو بود. نتایج نشان داد که در شرایط موجود، به‌ویژه برای بارندگی با دوره بازگشت طولانی‌تر، نقاط سیلابی و حجم رواناب بیرون ریخته از شبکه افزایش

قابل‌توجهی در منطقه مورد مطالعه پیدا کرده است. هم‌چنین، BRC و ترکیبی از BRC و RBs، مؤثرترین گزینه‌ها در کاهش حجم سیلاب بودند. در پژوهش دیگری، Behzadi et al. (2019) به بررسی شاخص پایداری شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی منطقه ۱۱ شهرداری تهران پرداخته‌اند. در پژوهش ایشان، شبکه جمع‌آوری منطقه مورد مطالعه به‌وسیله مدل شبیه‌سازی SWMM و تحت دوره‌های بازگشت دو، پنج و ۱۰ سال شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی در شرایط فعلی و شرایط آتی با استفاده از داده‌های گزارش پنجم تغییرات اقلیمی صورت گرفت. نتایج نشان داد پایداری شبکه جمع‌آوری رواناب در شرایط فعلی ۷۷/۸۹ درصد و در شرایط آتی تحت سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به‌ترتیب ۷۷/۷۳ و ۷۷/۶۱ درصد است.

در سایر مطالعه‌ها، Noori Khaje Balagh and Mousavi (2021) به بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر رواناب شهری در حوضه‌ای در شهر کرج پرداختند. در این مطالعه از مدل هیدرولیکی SWMM جهت شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب استفاده شده است و به جهت شبیه‌سازی بارش در دوره آتی، مدل CanESM2 (از سری مدل‌های گزارش پنجم تغییرات اقلیمی) به‌کار گرفته شده است. نتایج نشان داد که میزان میانگین بارش ۲۴ ساعته در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) به‌ترتیب ۲۱ و ۱۱ درصد افزایش داشته و حداکثر بارش ۲۴ ساعته نیز به‌ترتیب ۱۷ و ۲۳ درصد با کاهش روبه‌رو شده است. نتایج مدل‌سازی کمی و کیفی رواناب نشان می‌دهد که در دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 دبی سیلاب به‌ترتیب ۵/۸ و ۷/۱ درصد و حجم آب‌گرفتگی در سطح حوضه نیز به‌ترتیب ۱۳ و ۱۵/۲۸ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. در مطالعه‌ای که توسط Zahedi Khameneh and Khodashenas (2021) انجام شد، سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی مناطق ۱۰ و ۱۱ شهر مشهد با استفاده از مدل SWMM بررسی شد. این مطالعه نشان داد که سیستم جمع‌آوری موجود توان عبور حدود ۸۰ درصد رواناب سطحی دارد و به‌ترتیب ۳۸/۲ و ۲۹/۱ درصد از کانال در مدل‌سازی با دوره بازگشت ۵۰ و پنج ساله دچار پس‌زدگی و آب‌گرفتگی می‌شوند. نتایج حاکی از آن بود که به‌ترتیب درصد مناطق نفوذناپذیر، عرض معادل و ضریب زبری در اراضی نفوذناپذیر و نفوذناپذیر بیش‌ترین تأثیر را بر دبی خروجی دارد. بررسی‌ها نشان داد که تغییر کاربری، افزایش اراضی نفوذناپذیر، کاهش ضریب زبری و طراحی نامناسب و قدیمی کانال‌های موجود از دلایل اصلی کاهش عملکرد سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی محدوده مورد مطالعه است.

¹ Storm water management model

انتخاب و برونداد آن‌ها تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 ریزمقیاس‌نمایی شد. تغییرات رواناب تحت دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه با مدل SWMM ارزیابی شد. نتایج اجرای مدل تحت سناریوی بدبینانه نشان داد که با افزایش $31/4$ و $26/8$ درصدی بارش در دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال نسبت به دوره پایه، حجم رواناب به ترتیب $25/2$ و $20/7$ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین، در این سناریوی حجم آب‌گرفتنی در حوضه تا $42/12$ درصد افزایش می‌یابد. در سناریوی خوش‌بینانه نیز با کاهش بارش‌های حدی، در دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال، حجم رواناب به ترتیب $2/2$ و $8/3$ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد.

در پژوهش دیگری، Barkhordari et al. (2022) به بررسی تأثیر بازطراحی سامانه جمع‌آوری رواناب موجود در شرق تهران برای افزایش ظرفیت هیدرولیکی در نقاط بحرانی و سیلابی پرداخته‌اند. ابتدا، شرایط هیدرولیکی در سامانه جمع‌آوری رواناب با استفاده از مدل SWMM در شرایط پایه و پس از بازطراحی شبیه‌سازی شد. سه نقطه بحرانی در امتداد کانال اصلی به‌عنوان آسیب‌پذیرترین نقاط شناخته شدند. در نهایت، مدل SWMM دوباره برای ارزیابی عملکرد عملیاتی کلی سامانه پس از بازسازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که اجرای دو جایگزین تعمیق و تعریض برای تأمین ظرفیت عبور مناسب رواناب در طول بارش با دوره‌های بازگشت مختلف ضروری است. همچنین، Sadeghi et al. (2022) در مطالعه‌ای، از تحلیل ریسک جهت تعیین دوره بازگشت استفاده کردند تا در آن هزینه طراحی و هزینه ریسک خسارت به حداقل برسد. به‌همین منظور از مدل مدیریت رواناب (SWMM) برای شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب به‌کار گرفته شد. این مدل در تحلیل ریسک یک منطقه در تهران برای به‌دست آوردن طراحی دوره بازگشت بهینه استفاده شد. نتایج نشان داد که دوره بازگشت بهینه ۱۰ سال است. روش منطقی نیز برای همان منطقه و دوره بازگشت مشابه اعمال شد، اما هزینه کل طراحی روش منطقی پنج درصد بیش‌تر بود. در مطالعه‌ای، Nahid et al. (2022) با استفاده از مدل SWMM به شبیه‌سازی سیلاب ناشی از بارندگی برای منطقه چهار تهران تحت دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰ سال پرداخته است. سپس دو طرح از بهترین راه‌کارهای مدیریتی (BMP) تحت سناریوی جوی باغچه و بام سبز و ترکیب هر دو سناریو، جهت کنترل حداکثر رواناب از نظر کمی انجام گرفته است و در نهایت میزان کارایی آن‌ها در کاهش حجم کل رواناب خروجی از حوضه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از (BMP) در کاهش حجم دبی خروجی مؤثر است. در پژوهشی دیگر، Latifi et al. (2023)

در همین راستا، Lord et al. (2021) در مطالعات خود اقدام به شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی شرق تهران با استفاده از مدل SWMM نمودند. پس از شبیه‌سازی و تعیین نقاط بحرانی، مدل هیدرولیکی توسط نرم‌افزار HEC-RAS جهت شبیه‌سازی دقیق جریان در هر گره بحرانی توسعه داده شد. سپس، پارامترهای بهینه برای عرض عمق کانال با استفاده از ACO به‌دست آمد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با نتایج مدل غیرخطی LINGO مقایسه شد. در نهایت، عملکرد عملیاتی سامانه بازطراحی شده با استفاده از پارامترهای انتخابی بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در طراحی مجدد کانال‌های مورد مطالعه، دو گزینه تعریض و تعمیق برای به‌دست آوردن دبی با ظرفیت جریان کافی در دوره‌های بازگشت مختلف مورد نیاز است. در ادامه، Yarahmadi et al. (2022) به جهت ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب و گره‌های سیل‌گیر در دوره پایه و تحت شرایط تغییر اقلیم برای دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰ ساله در غرب منطقه شش تهران از مدل SWMM و LARS-WG استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره پایه و تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان داد که تعداد گره‌های سیلابی در دوره پایه (۲۰۲۰-۱۹۸۰) و تحت تأثیر تغییر اقلیم سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 (۲۰۲۱-۲۰۵۰) برای دوره بازگشت ۲۵ سال به ترتیب هفت، ۱۰ و ۱۲ است. همچنین، تعداد گره‌های سیلابی در دوره پایه (۲۰۲۰-۱۹۸۰) و تحت شرایط تغییر اقلیم سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 (۲۰۵۱-۲۱۰۰) برای دوره بازگشت ۵۰ سال به ترتیب ۱۴ و ۱۷ است که حدود ۴۰ درصد افزایش داشته است.

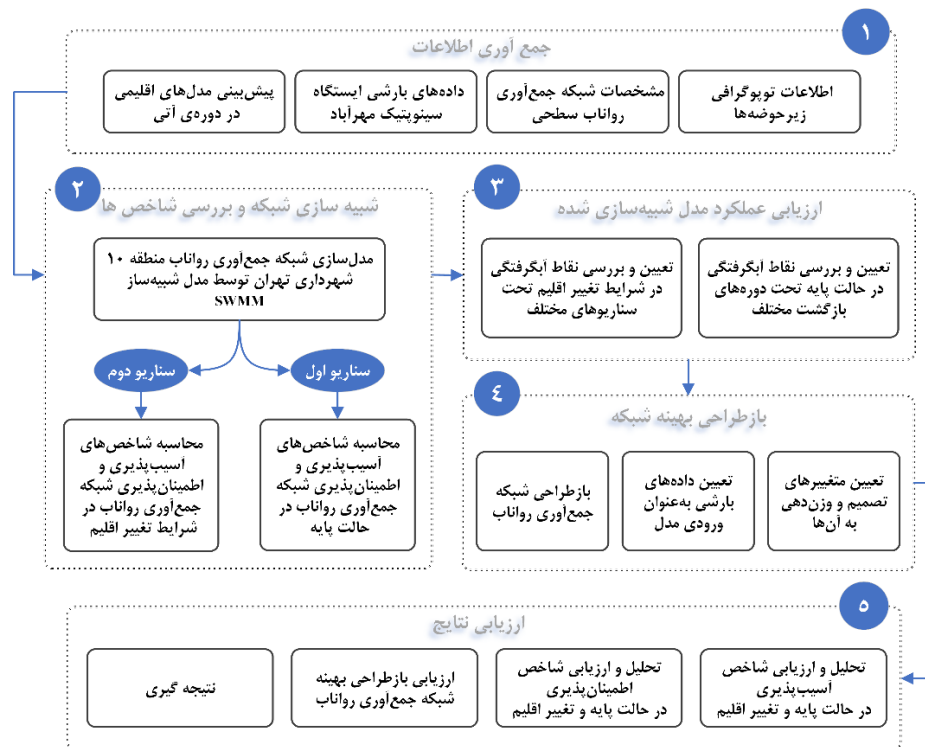
در هند نیز Kumar et al. (2022) شبکه جمع‌آوری رواناب دو حوزه آبخیز را به‌وسیله مدل SWMM شبیه‌سازی کردند. در این شبیه‌سازی داده‌های بارش تاریخی از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۶ به‌عنوان حالت پایه و سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP 4.5 (گزارش پنجم تغییرات اقلیمی) به‌عنوان شرایط آبی در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که گره‌های سیلابی به ترتیب بین دو تا شش و ۱۲ تا ۴۳ در محدوده مطالعاتی قدسیه نالته و جهانگیرپوری در شرایط فعلی تغییر می‌کنند، اما برای شرایط اقلیمی آینده به ترتیب از ۱۱ به ۵۱ و ۴۲ به ۹۱ افزایش می‌یابند. نتایج حاکی از آن است که خطر وقوع سیل، مدت زمان و فراوانی در دو منطقه مورد مطالعه در آینده در مقایسه با شرایط فعلی افزایش خواهد یافت. در پژوهش Hassani et al. (2022) تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب شهری منطقه ۱۰ شهرداری تهران مورد بررسی قرار گرفت. با ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی بارش دوره مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۸۱)، پنج مدل با بهترین عملکرد جهت پیش‌بینی بارش دوره آبی (۲۰۵۰-۲۰۲۱)

موفقیت یا شکست یک حوزه آبخیز و میزان بهبودی آن از حالت‌های نامطلوب می‌پردازند. ارزیابی شاخص‌های مذکور درک عمیقی در مورد عملکرد حوزه آبخیز در شرایط متغیر آب و هوایی را ایجاد می‌کند. در این پژوهش با به‌کارگیری داده‌های بارشی گزارش ششم تغییرات اقلیمی، آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب در شرایط آبی محاسبه شده و نسبت به وضع موجود مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی رواناب شهری و تحلیل هیدرولیکی سیلاب توسط مدل SWMM انجام شده است که با استفاده از اطلاعات جغرافیایی زیرآبخیزهای شهری، داده‌های هواشناسی، توپوگرافی و شیب زیرحوضه‌ها، اطلاعات کانال‌های زهکشی، معادلات نفوذ و روندیابی جریان، میزان دبی خروجی و حجم سیلاب شهری را مدل‌سازی می‌کند (Jiang et al., 2015). سپس با تعیین نقاط آب‌گرفتنی اقدام به بازطراحی بهینه شبکه شده تا عملکرد شبکه در شرایط فعلی بهبود یابد و توانایی پاسخ‌گویی به شرایط آبی را با توجه به شرایط تغییر اقلیم داشته باشد. به جهت شبیه‌سازی شبکه تحت داده‌های تغییر اقلیم از مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در شکل ۱ مراحل اجرای پژوهش نشان داده شده است.

اثرات تغییر اقلیم و عدم قطعیت مدل بر روی ابزارهای توسعه‌کم اثر (LID) را با اجرای مکرر مدل بارش-رواناب مورد تحلیل قرار دادند. در این پژوهش ابزارهای توسعه‌کم اثر در محدوده مطالعاتی ولنجک در شمال شهر تهران با استفاده از مدل SWMM شبیه‌سازی شد و در محیط نرم‌افزار متلب توسعه یافت. نتایج نشان داد دو پارامتر کیفی رواناب یعنی TSS و BOD در بهترین سناریو نسبت به سناریوی پایه کاهش یافت. هزینه بازطراحی مجدد شبکه‌های جمع‌آوری رواناب همواره به‌عنوان مانع جدی مطرح می‌شود. در این پژوهش بازطراحی بهینه جهت بهبود عملکرد شبکه با حداقل هزینه ممکن به‌عنوان نوآوری پژوهش مطرح شده است. همچنین، مطالعات در خصوص آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری سیلاب شهری عمدتاً حول جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و غیره بوده، اما این پژوهش مشخصاً عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب را به‌وسیله این دو شاخص از نگاه فنی و هیدرولوژیکی بررسی کرده است. چارچوب آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری در ابتدا توسط Hashimoto et al. (1982) برای توصیف عملکرد یک سامانه مخزن چندمنظوره ارائه شد. در این روش قابلیت اطمینان تکرار یا احتمال وجود حوزه آبخیز در حالت رضایت‌بخش در کل دوره ارزیابی را اندازه‌گیری می‌کند. آسیب‌پذیری میزان نامطلوب بودن وضعیت و یا عوامل ایجادکننده را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این دو شاخص با رویکردی جامع به تحلیل احتمال



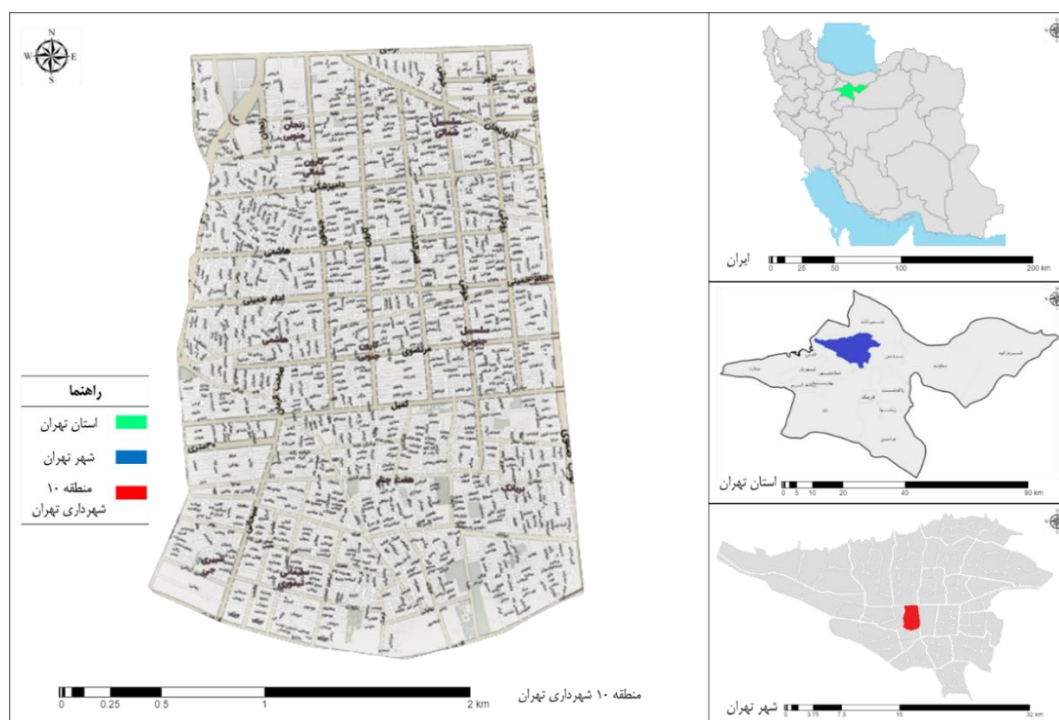
شکل ۱- مراحل انجام پژوهش حاضر

Figure 1- The steps of the current research

جمع‌آوری آب سطحی را که بر اساس داده‌های بارشی گذشته طراحی شده، دچار چالش کرده است. بررسی‌های میدانی حاکی از آن است که بسیاری از نقاط این منطقه با بارش‌های نه‌چندان شدید نیز دچار آب‌گرفتگی می‌شود که با توجه به شیب حدود دو درصد و شبکه زهکشی قدیمی امری منطقی به نظر می‌رسد. رواناب حاصل از بارش در حوضه‌های بالادست منطقه ۱۰ شهرداری تهران نیز با وجود خیابان آزادی در شمال و خیابان نواب در شرق محدوده مورد مطالعه، از طریق کانال‌های این دو خیابان عبور داده شده و وارد منطقه نمی‌شود. هم‌چنین، دو مسیر زیرسطحی کمیل و فیروزآبادی اصلی‌ترین کانال‌های عبور رواناب به‌شمار می‌رود. با این تفاسیر، هم‌چنان در منطقه نقاط آب‌گرفته در کانال‌های اصلی و فرعی وجود دارد. از این‌رو، منطقه ۱۰ شهر تهران می‌تواند گزینه خوبی جهت بررسی شاخص‌های آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری هم در وضع موجود و هم در شرایط آبی و بازطراحی بهینه شبکه جهت بهبود عملکرد سامانه باشد. در شکل ۲ موقعیت کشوری و استانی منطقه ۱۰ شهرداری تهران ارائه شده است.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

با توجه به تمرکز پژوهش حاضر بر شاخص آسیب‌پذیری، اطمینان‌پذیری و بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر این دو، منطقه ۱۰ شهرداری تهران به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. این منطقه با جمعیت ۳۳۷۰۰۰ نفر در بافت نسبتاً متراکم کلان‌شهر تهران قرار گرفته است که مساحتی معادل ۸۰۷ هکتار را داراست و از این میزان ۵۷ درصد مناطق مسکونی (۴۶۰ هکتار)، ۲۵ درصد معابر (۲۰۲ هکتار) و ۱۸ درصد به سایر کاربری‌ها اعم از فضای سبز و غیره (۱۴۵ هکتار) اختصاص دارد. ایستگاه سینوپتیک مهرآباد به‌عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه، در دو کیلومتری غرب منطقه مورد مطالعه واقع شده است. این ایستگاه در طول جغرافیایی ۳۵/۴۱ و عرض جغرافیایی ۵۱/۱۹ قرار دارد. ارتفاع این ایستگاه از سطح دریا ۱۱۹/۰۸ بوده و متوسط بارش سالانه در آن ۲۳۲/۷ میلی‌متر گزارش شده است (Janbehsarayi et al., 2023; Hassani et al., 2023). تراکم جمعیتی منطقه ۱۰ و نیز کمبود فضای سبز و نفوذپذیر در این منطقه، خطرات ناشی از وقوع سیل‌های احتمالی را دوچندان کرده است. از طرفی، وقوع رخداد تغییر اقلیم نیز عملکرد شبکه



شکل ۲- موقعیت استانی و کشوری منطقه مورد مطالعه

Figure 2- National and provincial location of the studied area

حال حاضر بروزترین آن‌هاست که امکان شبیه‌سازی دوره آبی را با دقت بسیار بالا فراهم می‌کنند (Eyring et al., 2016; Stouffer et al., 2017).

۲-۲- تغییرات اقلیمی

مدل‌های گزارش ششم یا به‌عبارتی سری مدل‌های CMIP6 2 جدیدترین نسخه از مدل‌های اقلیمی است که پس از مدل‌های گزارش چهارم CMIP4 3 و پنجم CMIP5 4 معرفی شده و در

۲-۱- سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم

گزارش ششم تغییرات اقلیمی با کمک ترکیبی از سناریوهای RCPs و SSPs روند تغییرات اقلیمی را مورد بررسی قرار می‌دهد. به عبارتی دیگر سناریوهای آینده می‌بایست علاوه بر توصیف اقلیم‌های مختلف آینده، پیشرفت‌های اقتصادی و اجتماعی مختلف ممکن را نیز در برگیرند (Riahi et al., 2017). خطوط سیر اقتصادی اجتماعی (SSPs) به همراه خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCPs) با تمرکز بر واداشت تابشی جهت تحلیل بازخوردهای بین تغییر اقلیم و عوامل اقتصادی و اجتماعی مثل رشد جمعیت جهان، توسعه اقتصادی و پیشرفت فناوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این دو سناریو در کنار هم، موقعیت‌هایی را شرح می‌دهند که در آن‌ها می‌توان تسکین، سازگاری و آسیب‌های اقلیمی باقی‌مانده را ارزیابی کرد (Riahi et al., 2017). در سناریوهای SSPs همواره بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی چگونگی تغییر شرایط اجتماعی اقتصادی مانند رشد اقتصادی، آموزش، جمعیت، شهرنشینی، میزان توسعه و تکنولوژی تأکید شده است. این سناریوها عبارت‌اند از: SSP1 (جهان متمرکز بر پایداری)، SSP2 (جهانی که به‌طور گسترده روند الگوهای تاریخی خود را دنبال می‌کند)، SSP3 (جهانی پراکنده از توسعه ناهمگن منطقه‌ای)، SSP4 (جهان نابرابری در حال افزایش)، SSP5 (جهان رشد سریع و بدون محدودیت درآمد اقتصادی و مصرف انرژی) (Hassani et al., 2022).

۲-۲-۲- مدل‌های اقلیمی

انتخاب مدل‌های اقلیمی به جهت پیش‌بینی بارش در دوره آتی و افزایش دقت مدل شبیه‌ساز از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین منظور در این پژوهش از نتایج مطالعه Hassani et al. (2022) که به‌طور تخصصی به بررسی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم و انتخاب بهترین مدل با توجه به محدوده مطالعاتی یکسان با این پژوهش استفاده شده است. در این مطالعه عملکرد ۲۳ مدل اقلیمی از سری مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم در پیش‌بینی میانگین بلندمدت بارش در دوره پایه مورد ارزیابی قرار گرفت و مدل‌های MPI-، MPI-ESM1-2-HR، KACE-1-0-G، ESM1-2-LR و HADGEM3-GC31-LL و CMCC-ESM2 با توجه به عملکرد بهتری در برآورد بارش دوره پایه در ایستگاه مهرآباد انتخاب شد که از نتایج پیش‌بینی این مدل‌ها در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) جهت پایش تغییرات بارش در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.

۲-۳- شبیه‌سازی

۲-۳-۱- مدل SWMM

بررسی عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی و تعیین میزان آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری سامانه نیازمند مدل‌سازی کامپیوتری است. مدل‌های زیادی به بحث شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب شهری پرداخته‌اند که یکی از بهترین و کارآمدترین این مدل‌ها SWMM است. در این پژوهش نیز شبیه‌سازی و بررسی رواناب‌های شهری و تحلیل هیدرولیکی سیلاب توسط مدل SWMM انجام شده است که با استفاده از اطلاعات جغرافیایی زیرحوضه‌های شهری، داده‌های هواشناسی، توپوگرافی و شیب زیر حوضه‌ها، اطلاعات کانال‌های زهکشی، معادلات نفوذ و روندیابی جریان، میزان دبی خروجی از هر زیرحوضه و حجم سیلاب شهری را مدل‌سازی می‌کند (Jiang et al., 2015). مدل SWMM ابتدا در سال ۱۹۷۱ توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا^۱ (EPA) شروع به کار کرد ولی طی سال‌های بعد به‌روزرسانی‌های گسترده‌ای بر روی این مدل صورت گرفته است. امروزه این مدل در اغلب نقاط دنیا برای طراحی، تحلیل، بهینه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب و فاضلاب و یا شبکه‌ای مرکب از هر دو استفاده می‌شود. نسخه مورد استفاده در این پژوهش نسخه SWMM5.1 بوده که در سال ۲۰۱۵ به‌صورت رایگان در وبسایت EPA در دسترس قرار گرفته است. مدل هیدرولیکی SWMM شامل مدل‌های بارش_رواناب، شبکه جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه آب است. در عین حال، برای تحلیل‌های مختلف هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و کیفی آب نیز از این مدل استفاده می‌شود.

۲-۳-۲- شبیه‌سازی منطقه مورد مطالعه

شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران و بررسی عملکرد شبکه توسط دو شاخص آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری، نیازمند مدلی دقیق با جزئیات بالا است. به همین منظور منطقه مورد مطالعه به ۲۸۵ زیرحوضه تقسیم شد تا کانال‌های فرعی نیز با جزئیات بهتری شبیه‌سازی شوند. سپس اطلاعات توپوگرافی مربوط به زیرحوضه‌ها شامل شیب، مساحت و درصد فضای نفوذناپذیر از طریق ArcMap 10.3.1 و لایه‌های اطلاعاتی موجود برای منطقه مورد مطالعه استخراج و به زیرحوضه‌ها اختصاص داده شد. پارامتر عرض زیرحوضه با تقسیم مساحت زیرحوضه به بزرگ‌ترین طول آن با استفاده از نرم‌افزار Q-GIS محاسبه و به زیرحوضه‌ها اطلاق شد.

^۱ Environmental Protection Agency

در پژوهش صورت گرفته توسط (Behzadi et al., 2018) شاخص آسیب‌پذیری برابر ارتفاع رواناب ایجاد شده در هر کانال به بیش‌ترین عمق آب‌گرفتگی، در نظر گرفته شده است. بیشینه عمق آب‌گرفتگی بر اساس مطالعه‌ای که توسط Mugume et al. (2014) صورت گرفته، سه متر لحاظ شده است. در پژوهش حاضر نیز از این شاخص طبق رابطه (۱) استفاده شده است.

$$\text{Vulnerability Index} = \frac{H_x}{H_{\max}} \quad (1)$$

$$0\% \leq \text{Rel Index} \leq 100\%$$

در رابطه بالا، H_x بیشینه عمق آب‌گرفتگی و H_{\max} ارتفاع رواناب تولید شده است. شاخص کل آسیب‌پذیری شبکه برابر با میانگین شاخص آسیب‌پذیری همه کانال‌ها است (Behzadi et al., 2018).

۲-۳-۴- شاخص اطمینان‌پذیری

شاخص اطمینان‌پذیری با این مفهوم بیان شود که شبکه چه مقدار در حالت مطمئن و عدم شکست کار خواهد کرد. برای به‌دست آوردن این شاخص باید طول کانال‌های دارای توانایی را بر طول کل کانال‌های شبکه تقسیم نمود که از طریق رابطه (۲) به‌دست می‌آید (Behzadi et al., 2019).

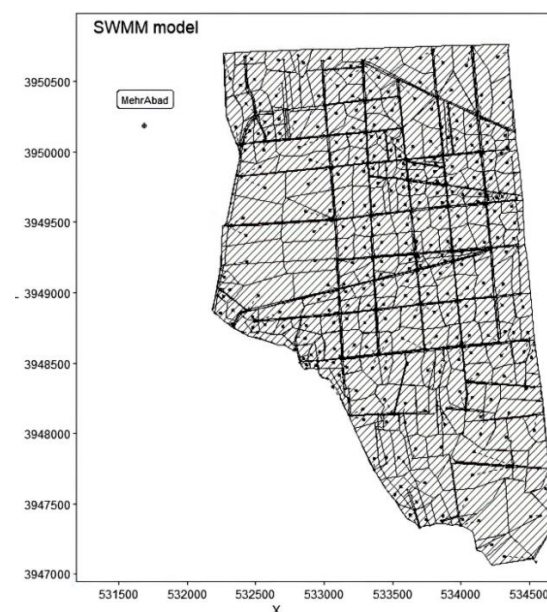
$$\text{Rel Index} = \frac{L_f}{L} * 100 \% \quad (2)$$

در رابطه مذکور، L_f بیان‌گر طول کانال‌هایی است که توانایی عبور رواناب ایجاد شده را دارند و L برابر کل کانال‌های شبکه است. از آنجایی که در بیش‌تر منابع ۱۵ الی ۲۰ درصد فضای کانال به‌عنوان عمق آزاد در نظر گرفته می‌شود در این پژوهش نیز کانال‌هایی با درصد پرشدگی بیش از ۸۰ درصد، به‌عنوان کانال‌های دارای کمبود ظرفیت به‌شمار می‌روند. شاخص اطمینان‌پذیری، بازه‌ای بین صفر تا ۱۰۰ درصد را شامل می‌شود. بدیهی است هرچه مقدار این شاخص به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد عملکرد شبکه بالاتر بوده و کاهش این شاخص بیان‌گر افزایش تعداد شکست‌ها و عدم اطمینان شبکه جمع‌آوری رواناب شهری به‌شمار می‌رود (Behzadi et al., 2019).

۲-۳-۴- بازطراحی بهینه شبکه جمع‌آوری رواناب

برای انجام فرآیند بهینه‌سازی، در پژوهش حاضر از الگوریتم ژنتیک تک هدفه استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از اولین الگوریتم‌های تصادفی مبتنی بر جمعیت است. مشابه دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، عملگرهای اصلی فرآیند الگوریتم ژنتیک انتخاب، تقطیع و جهش است (Mirjalili, 2019). در الگوریتم ژنتیک هر پاسخ مربوط به یک کروموزوم است و هر پارامتر بیان‌گر یک ژن است. به‌منظور بهبود

در این پژوهش از مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی استفاده شده است. این مدل یکی از روش‌های کاربردی ریزمقیاس‌نمایی مطالعات تغییر اقلیم به‌شمار رفته که می‌توان از آن برای تولید پارامترهای اقلیمی مانند بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه به‌صورت روزانه تحت شرایط اقلیم فعلی و آبی استفاده نمود. مبنای انتخاب دوره‌های بازگشت طراحی بر اساس ضوابط و معیارهای موجود در این زمینه است و در سطوح مختلف از جمله محلی، استانی و ملی لازم است اجرا شود (Mahab Quds Consulting Engineering Company, 2011). بررسی این ضوابط در برخی از کشورهای صنعتی نشان می‌دهد که معمولاً جهت طراحی شبکه‌های فرعی دوره بازگشت دو تا ۱۰ سال و برای شبکه‌های اصلی دوره بازگشت ۵۰ تا ۲۰۰ سال به‌عنوان مینا در نظر گرفته می‌شود (Debo and Reese., 2002). از آنجایی که در این پژوهش کانال‌های فرعی نیز در شبیه‌سازی هیدرولیکی لحاظ شده‌اند دوره‌های بازگشت دو تا ۱۰ سال انتخاب شده است. نمایی از شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری در نرم‌افزار SWMM در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- نمایی از شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب سطحی با استفاده از نرم‌افزار SWMM
Figure 3- View of the surface water collection network simulation by using SWMM software

۲-۳-۴- شاخص آسیب‌پذیری

آسیب‌پذیری بیان‌گر شکست‌های یک سامانه است که به‌صورت میانگین شکست‌ها و یا میانگین بیشینه کمبودها در یک دوره متوالی شکست در شبکه و احتمال بالا رفتن کمبود در یک یا چند دوره از حد معین تعریف می‌شود (Behzadi et al., 2018).

تغییرات اقلیم، برای شرایط آبی استفاده شد. ابتدا مدل شبیه‌ساز SWMM در شرایط فعلی تحت بارش با دوره بازگشت‌های مختلف اجرا شد و نتایج حاکی از آن بود که حجم رواناب کل در نقطه خروجی حوضه در دوره‌های بازگشت دو، پنج و ۱۰ سال به ترتیب برابر $10^3 \times 45/9$ ، $10^3 \times 51/14$ و $10^3 \times 59/7$ مترمکعب است. حجم رواناب با افزایش دوره بازگشت، افزایش پیدا کرده است. به طوری که بارش با دوره بازگشت ۱۰ سال، روانابی با حجم حدود ۳۰ درصد بیش‌تر از دوره بازگشت دو ساله ایجاد کرده است.

۳-۱-۱- اثر تغییر اقلیم بر بارش

شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی در شرایط آبی و تغییر اقلیم نیازمند بررسی و انتخاب بهترین مدل‌های اقلیمی بوده که به همین منظور پنج مدلی که عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر مدل‌های اقلیمی را دارا بودند، انتخاب شدند و تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 توسط مدل LARS-WG مورد ریزمقیاس‌نمایی قرار گرفتند. با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن خروجی مدل لارس، از روش ارائه شده توسط (Roozbahani et al. (2020) برای گسسته‌سازی بارش و برآورد بارش شش ساعته استفاده شده است. در این روش برای به‌دست آوردن بارش‌های شش ساعته دوره آبی، برازش توزیع احتمالاتی مناسب داده‌های شش و ۲۴ ساعته دوره پایه و بارش‌هایی با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال محاسبه شد و نسبت آن به‌دست آمد. لازم به ذکر است که جهت برازش توزیع احتمالاتی به داده‌ها از نرم‌افزار HyfranPlus 2.2^۱ استفاده شده است. سپس با ضرب این نسبت‌ها در بارش‌های پنج و ۱۰ ساله حاصل از برازش توزیع احتمالاتی به داده‌های روزانه خروجی مدل LARS، بارش شش ساعته برای دوره آبی به‌دست آمد و ضرایب گسسته‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر بارش دوره پایه در ایستگاه مهرآباد

Table 2- Precipitation values of the base period in Mehrabad station

دوره بازگشت (سال)	مقدار بارش ۶ ساعته (میلی‌متر)	مقدار بارش ۲۴ ساعته (میلی‌متر)	ضریب گسسته‌سازی
50	18	35.9	0.57
10	21.6	41.9	0.57

در ادامه با برازش توزیع GEV^۲ به داده‌های حداکثر بارش روزانه خروجی مدل LARS بارش‌های روزانه در شرایط آبی با

پاسخ‌های ضعیف ارائه شده در هر نسل، بهترین پاسخ‌ها به‌طور تصادفی با مکانیسم انتخاب، انتخاب می‌شوند (Holland, 1975). متغیرهای تصمیم در این مسأله تیپ‌های معمول برای طراحی شبکه جمع‌آوری رواناب است (جدول ۱). در این راستا، ابتدا مدل تحت شرایط تغییر اقلیم اجرا شده و کانال‌های آسیب‌پذیر (سیلابی) شناسایی می‌شود. در ادامه با مرتبط ساختن مدل بهینه‌ساز و شبیه‌ساز، در هر مرحله از بهینه‌سازی کانال‌های سیلابی با تیپ‌های تعیین‌شده در قالب متغیرهای تصمیم جایگزین خواهد شد. از آنجایی که هدف پژوهش حاضر کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری سامانه است، تابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی شاخص آسیب‌پذیری و میزان هزینه و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری در رابطه (۳) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Minimize } H(x) = w_1 \times \frac{\text{Cost}_i}{\text{Cost}_{\max}} + w_2 \times \frac{\text{Vul}_i}{\text{Vul}_{\max}} - w_3 \times \frac{\text{Rel}_i}{\text{Rel}_{\max}} \quad (3)$$

در این رابطه Cost_i معرف میزان هزینه اجرا در هر سناریو و Cost_{\max} بیش‌ترین هزینه ممکن برای کاهش آسیب‌پذیری تا مقدار صفر است. همچنین، Vul و Rel به ترتیب بیان‌گر آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب است. اوزان اهمیت هر یک از اهداف نیز در قالب ضرایب w_1 ، w_2 و w_3 تعریف شده‌اند. تیپ کانال‌های جمع‌آوری رواناب در جدول ۱ ارائه شده است. هزینه اجرای هر یک از تیپ‌های کانال‌ها از فهرست‌بهای تجمعی شبکه فرعی جمع‌آوری و هدایت رواناب سطحی سال ۱۴۰۱ استخراج شده است.

جدول ۱- کانال‌های جمع‌آوری رواناب

Table 1- Type of runoff collection channels

تیپ کانال‌ها (میلی‌متر)	هزینه اجرا (میلیون ریال)
Kanivo	4.9
40*40	9.85
40*70	14
50*100	31
100*100	41

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی شبکه موجود

شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران در شرایط فعلی و آبی با به‌کارگیری مدل هیدرولیکی SWMM شبیه‌سازی شد. به همین منظور مشخصات کانال‌های جمع‌آوری رواناب منطقه، توپوگرافی محدوده، مساحت زیرحوضه، عرض زیرحوضه، اطلاعات بارشی و غیره به‌عنوان ورودی به مدل معرفی شد. در خصوص اطلاعات بارشی نیز از داده‌های تاریخی بارش ایستگاه سینوپتیک مهرآباد، برای شرایط پایه یا وضع فعلی و از داده‌های بارشی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم

¹ Hydrological frequency analysis

² Generalize extreme value

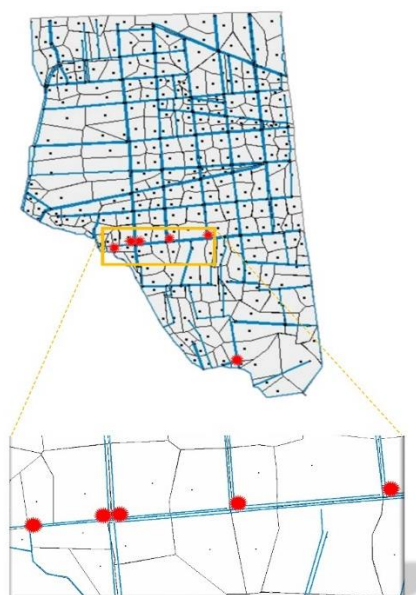
دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال محاسبه شد و با اعمال ضریب گسسته‌سازی، بارش‌های شش ساعته برای پنج مدل اقلیمی انتخاب شده تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به‌دست آمد که در جدول ۲ به نمایش درآمده است. با بررسی نتایج جدول ۳ می‌توان دریافت که مدل HADGEM3-GC31-LL تحت سناریوی SSP5-8.5 بیش‌ترین بارش و مدل CMCC-ESM2 تحت سناریوی SSP1-2.6 کم‌ترین بارش را

به خود اختصاص داده‌اند و به‌ترتیب به‌عنوان سناریوی بدبینانه و خوش‌بینانه انتخاب شدند. طراحی شبکه جمع‌آوری رواناب باید به‌گونه‌ای باشد که توانایی عبور بیش‌ترین حجم رواناب پیش‌بینی شده را دارا باشد و از آن‌جایی‌که بازطراحی بهینه جزء اهداف اصلی پژوهش حاضر است، صرفاً سناریوی بدبینانه به‌عنوان اطلاعات بارشی آتی مدنظر قرار گرفت.

جدول ۳- مقادیر بارش‌های شش و ۲۴ ساعته ایستگاه مهرآباد تحت سناریوهای SSP5-8.5 و SSP1-2.6 (Hassani et al., 2022)

Table 3- The 6 and 24-hour rainfall values of MehrAbad station under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios (Hassani et al., 2022)

بارش ۶ ساعته (میلی‌متر)		بارش ۲۴ ساعته (میلی‌متر)		مدل اقلیمی	ردیف
SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6		
10	5	10	5	CMCC-ESM2	1
19.43	17.55	22.34	20.46	MPI-ESM1-2-LR	2
21.60	19.20	22.97	20.86	MPI-ESM1-2-HR	3
22.34	20.57	23.08	21.71	KACE-1-0-G	4
24.39	20.57	23.19	20.06	HADGEM3-GC31-LL	5
27.45	23.66	26.25	23.06		



شکل ۴- نمایی از گره‌های سیلابی در سناریوی بدبینانه
Figure 4- view of flood nodes in the pessimistic scenario

۲-۲-۳- شاخص آسیب‌پذیری

پس از اجرای مدل شبیه‌ساز SWMM هم در شرایط فعلی و هم در شرایط تغییر اقلیم، شاخص آسیب‌پذیری در هر یک به‌طور جداگانه محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب در شرایط فعلی با استفاده از داده‌های بارشی ایستگاه سینوپتیک مهرآباد طی دوره‌های بازگشت مختلف، نشان داد که حجم رواناب کل در نقطه خروجی حوضه در دوره‌های بازگشت دو، پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب برابر $۱۰^۳ \times ۴۵/۹$ ، $۱۰^۳ \times ۵۱/۱۴$ و $۱۰^۳ \times ۵۹/۷$ مترمکعب بوده و شاخص آسیب‌پذیری نیز طی دوره‌های بازگشت مختلف نیز به‌دست آمد که در جدول ۳ نشان

۲-۳- ارزیابی عملکرد شبکه موجود

۲-۳-۱- نقاط سیلابی

پس از اجرای شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب در شرایط موجود و شرایط آتی، نقاط آب‌گرفتگی مشخص شد. در شبیه‌سازی حالت پایه یا وضع موجود در دوره بازگشت دو سال، چهار گره سیلابی و در دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال پنج گره در شبکه جمع‌آوری رواناب دچار آب‌گرفتگی شده است. هم‌چنین، نتایج شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب در شرایط آتی تحت سناریوی بدبینانه نشان داد که در دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال، شش گره از شبکه، دچار آب‌گرفتگی شده‌اند که در شکل ۴ نشان داده شده است. این افزایش گره‌های سیلابی ناشی از افزایش حجم رواناب و دبی اوج منتج از افزایش دوره بازگشت طراحی بوده است. اغلب نقاط آب‌گرفتگی در مدخل‌های ورودی به کانال زیرسطحی کمیل قرار داشته و یکی از گره‌های سیلابی نیز در پایین‌دست منطقه و در نزدیکی ورودی به کانال فیروزآبادی قرار دارد. از آن‌جایی‌که نقاط آب‌گرفتگی در شبیه‌سازی شبکه در سناریوی بدبینانه، دربردارنده همه نقاط در سناریوهای دیگر است، می‌بایست این سناریو مبنای بازطراحی بهینه قرار گیرد.

۳-۲-۳- شاخص اطمینان‌پذیری

نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته در وضع موجود نشان داد که در دوره بازگشت دو سال، طولی معادل ۱۷۹۹ متر از کانال‌های جمع‌آوری رواناب دچار آب‌گرفتگی شده که طبق رابطه (۲) شاخص اطمینان‌پذیری سامانه را به ۹۷/۵ درصد کاهش داده است. همچنین، طول کانال‌های آب‌گرفته در دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال معادل ۲۴۱۱ و ۳۰۶۹ متر به‌دست آمد که منجر به کاهش اطمینان‌پذیری شبکه تا ۹۶/۷ و ۹۵/۸ درصد شده است. این نتایج در جدول ۶ به نمایش در آمده است.

جدول ۶- شاخص اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب در

شرایط فعلی

Table 6- Reliability index of runoff collection network in current conditions

اطمینان‌پذیری (درصد)	طول کانال‌های سیلابی (کیلومتر)	طول کل کانال‌ها (کیلومتر)	دوره بازگشت (سال)
97.5	1.799		2
96.7	2.411	73.06	5
95.8	3.069		10

پس از تعیین شاخص اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب در وضع فعلی، از نتایج مدل شبیه‌سازی شده در شرایط آتی جهت محاسبه شاخص اطمینان‌پذیری در این شرایط استفاده شد. اطمینان‌پذیری شبکه در شرایط آتی تحت دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال معادل ۹۵/۳ و ۹۴/۳ درصد به‌دست آمد که در جدول ۷ نشان داده شده است. این کاهش شاخص اطمینان‌پذیری نتیجه افزایش حجم رواناب در سناریوی بدبینانه مدل منتخب تغییر اقلیم در شرایط آتی است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری سامانه با افزایش دوره بازگشت، به‌ترتیب کاهش و افزایش خواهد یافت. روند تغییرات این دو شاخص در شکل ۵ به نمایش در آمده است.

جدول ۷- شاخص اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب در

شرایط آتی

Table 7- Reliability index of runoff collection network in future conditions

اطمینان‌پذیری (درصد)	طول کانال‌های سیلابی (کیلومتر)	طول کل کانال‌ها (کیلومتر)	دوره بازگشت (سال)
95.3	3.412		5
94.3	4.095	73.06	10

داده شده است. شاخص آسیب‌پذیری در وضع فعلی طی دوره‌های بازگشت دو، پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب برابر ۱۰/۴، ۱۱/۱ و ۱۲/۲ درصد است. همان‌طور که در جدول ۴ نمایان است، با افزایش حجم رواناب خروجی، آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب نیز بیش‌تر شده است.

جدول ۴- شاخص آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب در

شرایط فعلی

Table 4- Vulnerability index of runoff collection network in current conditions

دوره بازگشت (سال)	حجم رواناب کل (هزار مترمکعب)	آسیب‌پذیری (درصد)
2	45.9	10.4
5	51.14	11.1
10	59.7	12.2

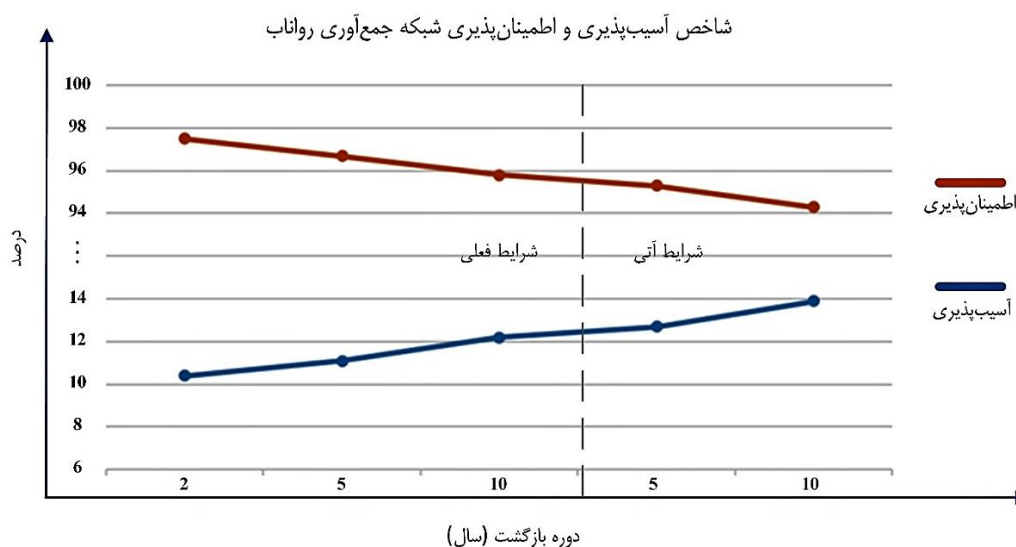
با توجه به جدول ۴ می‌توان دریافت که شاخص آسیب‌پذیری در شرایط فعلی یا وضع موجود تحت دوره بازگشت ۱۰ ساله، افزایش ۱۷ درصدی نسبت به شاخص آسیب‌پذیری در دوره بازگشت دو ساله پیدا کرده است. افزایش شاخص آسیب‌پذیری با توجه به افزایش حجم رواناب و ثابت ماندن ظرفیت عبوردهی رواناب امری منطقی به نظر است. شاخص آسیب‌پذیری در شرایط آتی نیز پس از شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب با استفاده از داده‌های بارشی مدل HADGEM3-GC31-LL در سناریوی SSP5-8.5 محاسبه شد که در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد حجم رواناب خروجی طی دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب برابر $۱۰^۳ \times ۶۴/۰۴$ و $۱۰^۳ \times ۷۲/۱۸$ مترمکعب خواهد بود. این افزایش حجم رواناب نسبت به وضع موجود موجب شده تا شاخص آسیب‌پذیری شرایط آتی طی دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب تا ۱۲/۷ و ۱۳/۹ درصد افزایش یابد.

جدول ۵- شاخص آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب در

شرایط آتی

Table 5- Vulnerability index of runoff collection network in future conditions

دوره بازگشت (سال)	حجم رواناب کل (هزار مترمکعب)	آسیب‌پذیری (درصد)
5	64.04	12.7
10	72.18	13.9

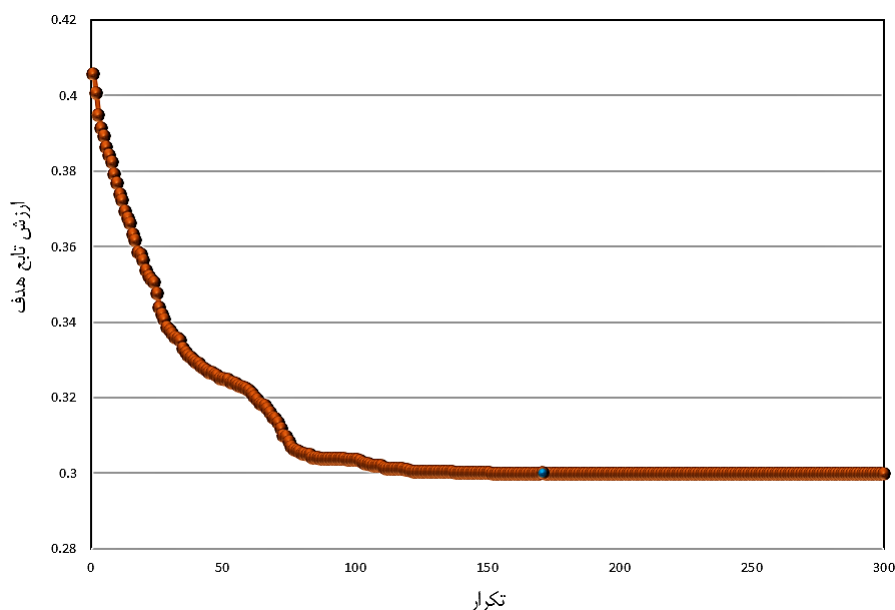


شکل ۵- روند تغییرات شاخص‌های آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران
Figure 5- Changes in the indicators of vulnerability and reliability of the runoff collection network of Ten District of Tehran Municipality

پاسخ نهایی خود به مقدار ۰/۳ رسیده و این پاسخ تا تکرار ۳۰۰ ثابت باقی‌مانده است.

۳-۳- بازطراحی بهینه شبکه

شکل ۶ همگرایی تابع هدف در طول عمل بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در تکرار ۱۶۸ الگوریتم به



شکل ۶- همگرایی تابع هدف بهینه‌سازی طراحی شبکه جمع‌آوری
Figure 6- Convergence of the objective function to optimize the design of the collection network

پس از بازطراحی به حالت نرمال بازگشته و توانایی عبور ایمن رواناب در این نقاط فراهم شده است. همچنین، با اجرای پاسخ بهینه در مرحله بازطراحی، آسیب‌پذیری سامانه از ۱۳/۹ درصد به ۷/۶ درصد کاهش پیدا کرده است. اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب نیز پس از بازطراحی بهینه از ۹۴/۳ درصد در سناریوی بدبینانه به ۹۸/۱ درصد رسیده است که در جدول ۸ نیز نشان داده شده است.

۳-۴- بررسی شبکه بازطراحی شده

شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران پس از شبیه‌سازی هم در وضع موجود و هم در شرایط آبی، مورد بازطراحی بهینه قرار گرفت. هدف از بازطراحی بهینه شبکه، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری نسبت به بدبینانه‌ترین سناریو بوده است. نتایج بازطراحی بهینه نشان داد که از شش نقطه سیلابی در سناریو بدبینانه، سه نقطه سیلابی

جدول ۸- شاخص آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب قبل و بعد از بازطراحی

Table 8- Vulnerability and reliability index of runoff collection network before and after redesign

ردیف	شاخص	شبیه‌سازی وضع موجود			شبیه‌سازی شرایط آتی		بازطراحی بهینه
		2	5	10	5	10	
1	آسیب‌پذیری (درصد)	10.4	11.1	12.2	12.7	13.9	7.6
2	اطمینان‌پذیری (درصد)	97.5	96.7	95.8	95.3	94.3	98.1

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران به جهت کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی مورد بازطراحی بهینه قرار گرفت. به همین منظور شبکه جمع‌آوری رواناب در وضع فعلی و آتی مورد شبیه‌سازی هیدرولیکی قرار گرفت. جهت شبیه‌سازی از مدل هیدرولیکی SWMM استفاده شد. در مرحله نخست مدل‌سازی شبکه در وضع موجود تحت داده‌های تاریخی بارش ایستگاه سینوپتیک مهرآباد و در دوره‌های بازگشت دو، پنج و ۱۰ سال انجام شد. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که افزایش دوره بازگشت شبیه‌سازی موجب افزایش حجم رواناب خروجی شده و همین امر باعث شده تا آسیب‌پذیری شبکه از ۱۰/۴ به ۱۲/۲ درصد برسد. همچنین، شاخص اطمینان‌پذیری سامانه از ۹۷/۵ به ۹۵/۸ درصد کاهش یافت. در مرحله بعد شبکه جمع‌آوری رواناب در شرایط آتی با استفاده از داده‌های بارشی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم تغییر اقلیم در دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال شبیه‌سازی شد. جهت انتخاب بهترین مدل اقلیمی با استفاده از نتایج پژوهش (Hassani et al. (2022)، پنج مدل اقلیمی برتر شناسایی و بهترین مدل با بیش‌ترین بارش به‌عنوان سناریوی بدبینانه انتخاب شد. سپس شبیه‌سازی شبکه در شرایط آتی با اطلاعات بارشی این سناریو صورت گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه در شرایط آتی نشان داد که حجم رواناب حاصل از بارش در دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب برابر ۶۴/۰۴ و ۷۲/۱۸ بوده که نسبت به حجم رواناب در شرایط فعلی افزایش قابل‌توجهی پیدا کرده است. این افزایش موجب افزایش آسیب‌پذیری و کاهش اطمینان‌پذیری شبکه شد به‌طوری‌که شاخص آسیب‌پذیری در دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب برابر ۱۲/۷ و ۱۳/۹ درصد و شاخص اطمینان‌پذیری برابر ۹۵/۳ و ۹۴/۳ درصد شده است. این افزایش آسیب‌پذیری و کاهش اطمینان‌پذیری در پژوهش حاضر با نتایج مطالعه Behzadi et al. (2019) هم‌خوانی داشته و دارای روندی مشابه است. دلیل این هم‌خوانی، افزایش بارش در دوره آتی تحت شرایط تغییر اقلیم در هر دو پژوهش است. در ادامه پس از بررسی شبکه در وضع موجود و شرایط آتی، بازطراحی بهینه شبکه جهت بهبود عملکرد سامانه هم در شرایط فعلی و هم شرایط آتی صورت گرفت. به همین منظور از الگوریتم ژنتیک

برای بهینه‌سازی استفاده شد و تابع اهداف متشکل از هزینه، شاخص آسیب‌پذیری و شاخص اطمینان‌پذیری و نیز اوزان اهمیت هر یک تعریف شد. سپس با اتصال مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز به‌وسیله نرم‌افزار متلب بازطراحی بهینه شبکه صورت گرفت. نتایج نشان داد که در تکرار ۱۶۸ام، الگوریتم به پاسخ نهایی خود به مقدار ۰/۳ رسیده و این پاسخ تا تکرار ۳۰۰ ثابت باقی‌مانده است. همچنین، بازطراحی بهینه موجب کاهش آسیب‌پذیری شبکه تا ۷/۶ درصد و افزایش اطمینان‌پذیری تا ۹۸/۱ درصد شده است. این پژوهش نشان داد که با بازطراحی بهینه می‌توان علاوه بر رفع مشکلات شبکه در وضع موجود، توانایی سامانه در برابر تهدیدات تغییر اقلیم آینده را نیز بالا برد. البته صرف کم‌ترین هزینه برای رسیدن به مطلوب‌ترین نتیجه نیز جز اهداف اصلی این پژوهش بوده است. از آنجایی‌که در مطالعه Hassani et al. (2023) با به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر، کمیت و کیفیت رواناب خروجی بهبود یافت. توصیه می‌شود در مطالعات آتی ابزارهای توسعه کم اثر در کنار بازطراحی بهینه برای رفع ایرادات و بهبود عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب استفاده شود.

سپاسگزاری

از همکاری و حمایت معنوی دانشگاه تهران برای انجام پژوهش حاضر سپاس‌گزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

حسین حسین‌زاده کوهی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله، بازبینی متن مقاله،

زاهدی خامنه، حامد، و خدانشناس، سعیدرضا (۱۴۰۰). بررسی عملکرد سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی و تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر آن (مطالعه مناطق ۱۰ و ۱۱ مشهد). *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۵(۵)، ۱۰۶۷-۱۰۸۰. doi: 20.1001.1.20087942.1400.15.5.7.5

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس (۱۳۹۱). طرح جامع مدیریت آب های سطحی تهران. جلد ۲، بخش ۱، ۶۳.

ناهید، مصطفی، زند مقدم، محمدرضا، و کرکه آبادی، زینب (۱۴۰۰). سنجش و ارزیابی میزان تاب‌آوری مناطق شهری در برابر سیلاب‌های شهری (مطالعه‌ی موردی: منطقه ۴ تهران). *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۴(۵)، ۱۲۵-۱۴۵. doi: 10.22034/jest.2021.56185.5194

نوری خواجه بلاغ، حامد، و موسوی، سید فرهاد (۱۴۰۰). اثرات تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت رواناب شهری قسمتی از حوضه آبریز کرج بر اساس سناریوهای RCP. *علوم آب و خاک*، ۲۵(۳)، ۷۸-۵۹. doi: 10.47176/jwss.25.3.1013

یاراحمدی، یزدان، قضاوی، رضا، و قاسمی، هدی (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی شبکه و گره‌های زهکشی سطحی به‌منظور مهار رواناب شهری با استفاده از مدل SWMM در غرب منطقه شش تهران. *پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۶(۲)، ۱۰۴-۱۲۰. doi: 10.22092/wmrj.2022.359788.1489

References

- Al-Zahrani, M., Al-Areeq, A., & Sharif, H.O. (2017). Estimating urban flooding potential near the outlet of an arid catchment in Saudi Arabia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 672-688. doi:10.1080/19475705.2016.1255668
- Barkhordari, S., Hamze Ghasabsarai, M., Garshasbi, M., Movahedinia, M., & Hashemy Shahdany, S.M. (2022). A practical method for rehabilitation of stormwater collecting system by node flooding detection and regional hydraulic redesign: a case study of eastern Tehran metropolis. *Water Science & Technology*, 86(7), 1759-1773. doi:10.2166/wst.2022.312
- Behzadi P., Roozbahani A., & Massah Bavani A. (2019). Analysis of sustainability index in stormwater drainage systems under the climate change impacts (case study: district 11 of Tehran). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(3), 631-649. doi: 10.22059/ije.2019.274672.1035. [In Persian]
- Behzadi, P., Roozbahani, A., & Masah Bavani, A. (2018). Assessment of climate change impacts on the reliability of surface water data (case study: district 11 of Tehran Municipality). Sixth Integrated Management and Flood Engineering Conference, Tehran, Iran <https://civilica.com/doc/815894>. [In Persian]
- تحلیل‌های آماری، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ مجتبی اردستانی: راهنمایی، مشاوره؛ امین سارنگ: مفهوم‌سازی.
- بهزادی، پریچهر، روزبهانی، عباس، و مساح بوانی، علیرضا (۱۳۹۸). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر قابلیت اطمینان شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی (مطالعه موردی: منطقه ۱۱ شهرداری تهران). ششمین کنفرانس جامع مدیریت و مهندسی سیلاب، دانشگاه تهران. <https://civilica.com/doc/815894>
- بهزادی، پریچهر، روزبهانی، عباس، و مساح بوانی، علیرضا (۱۳۹۸). تحلیل شاخص پایداری سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: منطقه ۱۱ شهرداری تهران). *اكوهیدرولوژی*، ۶(۳)، ۶۳۱-۶۴۹. doi:10.22059/ije.2019.274672.1035
- حسینی، محمدرضا، نیک سخن، محمدحسین، اردستانی، مجید، و موسوی جنبه سرایی، سیدفرید (۱۴۰۱). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب شهری بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری تهران). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. doi: 10.22098/mmws.2022.11849.1176
- Chen, W., Huang, G., & Zhang, H. (2017). Urban stormwater inundation simulation based on SWMM and diffusive overland-flow model. *Water Science and Technology*, 76(12), 3392-3403. doi: 10.2166/wst.2017.504.
- Debo, T.N., & Reese, A. (2002). *Municipal Stormwater Management*. 2nd Edition: CRC Press, 1172 Pages. doi:10.1201/9781420032260
- Dong, X., Guo, H., & Zeng, S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. *Water Research*, 124, 280-289. doi:10.1016/j.watres.2017.07.038
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., & Taylor, K.E. (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., & Loucks, D.P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 14-20. doi:10.1029/WR018i001p00014
- Hassani, M.R., Niksokhan, M.H., Ardestani, M., & Mousavi Janbehsarayi, S.F. (2022). Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (case study: district 10

- of Tehran municipality). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 269-285 doi:10.22098/mmws.2022.11849.1176. [In Persian]
- Hassani, M.R., Niksokhan, M.H., Janbehsarayi, S.F.M., & Nikoo, M.R. (2023). Multi-objective robust decision-making for LIDs implementation under climatic change. *Journal of Hydrology*, 617, 128954. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.128954
- Holland, J.H. (1975). An efficient genetic algorithm for the traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 145, 606-617.
- Hussain, S.N., Zwain, H.M., & Nile, B.K. (2022). Modeling the effects of land-use and climate change on the performance of stormwater sewer system using SWMM simulation: case study. *Journal of Water and Climate Change*, 13(1), 125-138. doi:10.2166/wcc.2021.180
- Janbehsarayi, S.F.M., Niksokhan, M.H., Hassani, M.R., & Ardestani, M. (2023). Multi-objective decision-making based on theories of cooperative game and social choice to incentivize implementation of low-impact development practices. *Journal of Environmental Management*, 330, 117243. doi:10.1016/j.jenvman.2023.117243
- Jiang, L.E.I., Chen, Y.A.N.G.B.O., & Wang, H.U. A.N.Y.U. (2015). Urban flood simulation based on the SWMM model. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 368, 186-191. doi: 10.5194/piahs-368-186-2015
- Kumar, S., Agarwal, A., Ganapathy, A., Villuri, V. G.K., Pasupuleti, S., Kumar, D., Kaushal, D. R., Gosain, A.K., & Sivakumar, B. (2022). Impact of climate change on stormwater drainage in urban areas. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(1), 77-96. doi:10.1007/s00477-021-02105-x
- Latifi, M., Rakhshandehroo, G., Nikoo, M.R., & Mooselu, M.G. (2023). Multi-stakeholder stochastic optimization of urban low impact developments for climate consistency under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135259. doi:10.1016/j.jclepro.2022.135259
- Lord, S.A., Ghasabsaraei, M.H., Movahedinia, M., Shahdany, S.M.H., & Roozbahani, A. (2021). Redesign of stormwater collection canal based on flood exceedance probability using the ant colony optimization: study area of eastern Tehran metropolis. *Water Science and Technology*, 84(4), 820-839. doi:10.2166/wst.2021.273
- Mahab Quds Consulting Engineering Company (2011). Comprehensive plan of Tehran surface water management. Volume 2, Part 1, 63. [In Persian]
- Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. In *Studies in Computational Intelligence* (pp. 43-55). Springer Verlag.
- Movahedinia, M., Samani, J.M.V., Barakhasi, F., Taghvaeian, S., & Stepanian, R. (2019). Simulating the effects of low impact development approaches on urban flooding: a case study from Tehran, Iran. *Water Science and Technology*, 80(8), 1591-1600. doi:10.2166/wst.2019.412
- Mugume, S., Gomez, D.E., & Butler, D. (2014). Quantifying the resilience of urban drainage systems using a hydraulic performance assessment approach. 13th International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia. doi: 10.13140/2.1.3291.1047
- Nahid, M., Zandmoghadam, M.R., & Karkehabadi, Z. (2022). Measuring and evaluating the resilience of urban areas against urban flooding (Case study: Tehran zone 4). *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(5), 125-145. doi: 10.22034/jest.2021.56185.5194. [In Persian]
- Noori Khaje Balagh, H., & Mousavi, F. (2021). Effects of climate change on quantity and quality of urban runoff in a part of Karaj Watershed based on RCP scenarios. *Journal of Water and Soil Science*, 25(3), 59-78 doi: 10.47176/jwss.25.3.1013. [In Persian]
- Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, Sh., Emmerling, J., Ebi, K., & Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Roozbahani, A., Behzadi, P., & Bavani, A.M. (2020). Analysis of performance criteria and sustainability index in urban stormwater systems under the impacts of climate change. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122727. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122727
- Sadeghi, S., Samani, J.M.V., & Samani, H.M.V. (2022). Risk and damage based optimal design of storm sewer networks using rational and fully dynamic methods, a case study (Tehran region 2). *Water Science and Technology*, 85(12), 3419-3435. doi:10.2166/wst.2022.180
- Silva, F.V., Bonuma, N.B., & Uda, P.K. (2014). Flood mapping in urban area using HEC-RAS model supported by GIS. In *International Conference on Flood Management*, 9pp. <https://eventos.abrh.org.br/icfm6/proceedings/papers/PAP014412.pdf>
- Stouffer, R.J., Eyring, V., Meehl, G.A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., & Taylor, K.E. (2017).

- CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 95-105. doi:10.1175/BAMS-D-15-00013.1
- Tasca, F.A., Assunção, L.B., & Finotti, A.R. (2018). International experiences in stormwater fee. *Water Science and Technology*, 2018(1), 287-299. doi:10.2166/wst.2018.112
- Yarahmadi, Y., ghazavi, R., & ghasemiyeh, H. (2022). Evaluating the efficiency of the surface drainage network and nodes in order to contain urban runoff using the SWMM model in west of Tehran's sixth district. *Watershed Management Research*, 36(2), 104-120 doi: 10.22092/wmrj.2022.359788.1489. [In Persian]
- Zahedi Khameneh, H., & Khodashenas, S.R. (2021). Performance evaluation of stormwater collection system and sensitivity analysis of parameters affecting it (Study of districts 10 and 11 of Mashhad). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(5), 1067-1080 dor: 20.1001.1.20087942.1400.15.5.7.5. [In Persian]