



Investigating the effect of climate change on urban flooding and reducing vulnerability using low-impact development (LID) practices

Hossein Hosseinzade Kuhi*

M.Sc. Graduated, Department of Water resources, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author: hosseinzade96@ut.ac.ir

(Received: 12 May 2023

Revised: 07 June 2023

Accepted: 22 June 2023)

Extended Abstract

Introduction: Today, climate change and the subsequent alteration in precipitation patterns have caused floods, which have overshadowed urban management. The financial and human losses caused by urban floods have significantly increased, and there are no signs of their reduction. Urban flooding occurs when the amount of precipitation exceeds the capacity of the drainage channel network, which lacks sufficient capacity. Two main factors contribute to the exacerbation of damage caused by urban floods. The first factor is population growth and the expansion of urbanization. The second factor is heavy rainfall caused by climate change, which plays an essential role in intensifying and accelerating the hydrological cycle, potentially altering the amount and frequency of precipitation. This factor impacts the probability of flooding, runoff volume, and peak flow. It is particularly pronounced in arid and semi-arid areas where rainfall is typically brief but intense. One critical urban infrastructure is the runoff collection network, which is subject to increased wear and tear due to the growth of impervious surfaces. Changes in rainfall patterns resulting from climate change have amplified the occurrence of urban floods, which makes essential the use of new approaches such as low-impact developments (LIDs).

Materials and methods: In this research, the runoff collection network of district 10 of Tehran Municipality was simulated, and its performance was evaluated under current and future conditions. This district is located in the relatively dense fabric of Tehran metropolis, has a population of 327,000 people, and covers an area of 807 hectares. The simulation and evaluation of the runoff collection network's performance, using the vulnerability and reliability indices, necessitate a precise model with detailed information. To accomplish this, SWMM version 5.1 software was used for simulating the runoff collection network. The study area was divided into 285 sub-catchments to allow for more detailed simulation of the sub-channels. Information such as slope, area, and the percentage of impervious space was incorporated into the catchment data using ArcMap software version 10.3.1. The sub-catchment width parameter was calculated by dividing the sub-catchment area by its greatest length, employing Q-GIS software, and then applied to the sub-catchments. The LARS-WG model was also employed to generate the micro-scale output of climate models exponentially. To simulate the network under current conditions, historical precipitation data from Mehrabad synoptic station was used. For simulating future conditions, precipitation data from the climate models presented in the sixth climate change report were employed. Among the climate model predictions, the scenario with the highest projected rainfall was chosen as the pessimistic scenario. Subsequently, low-impact development tools (LIDs) were employed to enhance the network's performance against climate change. Specifically, swale and permeable pavement, which are recognized as two of the most common and efficient LIDs, were selected and implemented under three different scenarios.

Results and Discussion: The runoff collection network of district 10 in Tehran municipality was simulated under current and future conditions using the SWMM hydraulic model. Initially, the SWMM simulation model was applied to the current rainfall conditions, considering various return periods. The results indicated that the total runoff volume for the 2, 5, and 10-year return periods was 45.9, 51.14, and 59.7 thousand cubic meters, respectively. This increase in runoff volume led to an increase in vulnerability from 10.4 to 12.2 percent and a decrease in reliability from 97.5 to 95.8 percent. In the second stage, the runoff collection network was simulated under future conditions using climate change data from the SWMM model. Previous studies' findings were used to determine the most suitable climate model for the sixth climate change report. The top 5 climate models were identified, and the model with the highest precipitation was selected as the



pessimistic scenario. The simulation results for the network under future conditions revealed an increase in runoff volume, reaching 64.04 and 72.18 thousand cubic meters for the 5 and 10-year return periods, respectively. Consequently, the vulnerability index increased to 12.7 and 13.9 percent for the 5 and 10-year return periods, respectively. Meanwhile, the reliability index stood at 95.3 and 94.3 percent during the same return periods. Then, two low-impact development tools of swale and permeable pavement were selected to improve the network performance and were introduced to the pseudo-model under three scenarios. The results showed that after the use of LIDs, the total runoff volume decreased by an average of 10.5% in the first scenario, an average of 17% in the second scenario, and an average of 21% in the third scenario. This reduction in water flow volume caused the vulnerability index to decrease by 8.3% and the reliability index to increase by 98.9%.

Conclusion: In this research, the stormwater collection network of district 10 of Tehran Municipality was simulated using the SWMM software under current and future conditions. The network simulation under current conditions was based on the precipitation data from Mehrabad synoptic station, while the simulation under future conditions used precipitation data from climate model outputs of the sixth climate change report. After simulating both scenarios, the performance of the network was evaluated. The simulation results indicated that as the return period increased, the vulnerability index increased, while the reliability index decreased. The impact of LIDs on the network was further investigated through a re-simulation with LIDs incorporated under three scenarios. The results showed that the implementation of LIDs improved the network's performance, leading to a reduction in vulnerability and an increase in reliability. Furthermore, the results demonstrated that LIDs had better efficiency in improving the performance of the stormwater collection network under lower return periods. It is recommended that future studies use optimization methods to better implement these LID tools, aiming to reduce costs and enhance their effectiveness.

Keywords: CMIP6, Drainage system, LID, Reliability index, urban flood

Citation: Hosseinzade Kuhi, H. (2023). Investigating the effect of climate change on urban flooding and reducing vulnerability using low-impact development (LID) practices. *Integrated Watershed Management*, 3(2), 30- 46. doi: 10.22034/iwm.2023.2002072.1077

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



بررسی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب شهری و کاهش آسیب‌پذیری با بهره‌گیری از ابزارهای توسعه کم اثر

حسین حسین‌زاده کوهی*

دانش‌آموخته گروه منابع آب، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: hosseinzade96@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

چکیده

امروزه تغییرات اقلیمی با تغییر الگوی بارشی، افزایش رخداد سیلاب شهری را به دنبال داشته است. شبکه جمع‌آوری رواناب شهری به‌عنوان زیرساخت اصلی کنترل و دفع سیلاب نیازمند پایش مستمر وضع موجود و پیش‌بینی شرایط آتی است. ابزارهای توسعه کم اثر (LIDs) به‌عنوان راهکاری نوین به همین منظور شناخته می‌شود. در این پژوهش شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران با استفاده از نرم‌افزار SWMM در شرایط موجود و آتی شبیه‌سازی شد. از داده‌های بارشی ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تحت دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ سال جهت اطلاعات بارشی وضع موجود استفاده شده است. ۵ مدل از مدل‌های اقلیمی گزارش ششم که بیش‌ترین قرابت را با داده‌های تاریخی مهرآباد داشتند، بسط داده شدند و بدینانه‌ترین سناریو به‌عنوان اطلاعات بارشی شرایط آتی استفاده شد. سپس عملکرد شبکه با استفاده از شاخص‌های آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی در وضع موجود نشان داد که با افزایش دوره بازگشت از ۲ تا ۱۰ سال، آسیب‌پذیری از ۱۰/۴ تا ۱۲/۲ درصد افزایش یافته و اطمینان‌پذیری از ۹۷/۵ تا ۹۵/۸ درصد کاهش یافته است. در شبیه‌سازی شرایط آتی نیز شاخص آسیب‌پذیری در دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال، ۱۲/۷ و ۱۳/۹ درصد و شاخص اطمینان‌پذیری نیز ۹۵/۳ و ۹۴/۳ به دست آمد. سپس دو ابزار توسعه کم اثر جوی باغچه و روسازی نفوذپذیر جهت بهبود عملکرد شبکه انتخاب و تحت سه سناریو به مدل شبه ساز معرفی شد. نتایج نشان داد که پس از به‌کارگیری LIDs حجم رواناب کل کاهش یافته به‌طوری‌که در سناریو اول میانگین ۱۰/۵ درصد، در سناریو دوم میانگین ۱۷ درصد و در سناریو سوم میانگین ۲۱ درصد از حجم رواناب کل کاسته شده است. این کاهش حجم رواناب موجب کاهش آسیب‌پذیری تا ۸/۳ درصد و افزایش اطمینان‌پذیری تا ۹۸/۹ درصد شده است. این پژوهش نشان داد که ابزارهای توسعه کم اثر، راهکاری مؤثر جهت رفع مخاطرات ناشی از تغییرات اقلیم است.

واژه‌های کلیدی: ابزارهای توسعه کم اثر (LID)، سیلاب شهری، شاخص اطمینان‌پذیری، شبکه جمع‌آوری رواناب، گزارش ششم تغییرات اقلیمی

استناد: حسین‌زاده کوهی، ح. (۱۴۰۲). بررسی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب شهری و کاهش آسیب‌پذیری با بهره‌گیری از ابزارهای توسعه کم اثر. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز (۳(۲)، ۳۰-۴۶.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

جوامع بشری از گذشته تا به امروز همواره به منظور جمع‌آوری و دفع رواناب به خارج از محل سکونت، تأسیساتی را به کار گرفته‌اند (Chocat *et al.*, 2007). در سال‌های اخیر، سیلاب‌ها در شهرها به شدت رایج و ویرانگرتر شده‌اند. شهرنشینی سریع و بدون برنامه‌ریزی، تغییرات آب‌وهوایی، رشد جمعیت و عدم وجود سامانه‌های زهکشی مناسب ممکن است دلیل شایع شدن سیلاب‌ها باشند (Neupane *et al.*, 2021). با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته، دغدغه طراحی یک سیستم جمع‌آوری آب سطحی کارآمد و مطمئن با در نظر گرفتن پیامدهای ناشی از تغییرات اقلیمی همچنان وجود دارد، زیرا این پدیده می‌تواند موجب افزایش فراوانی وقوع و شدت سیلاب‌های شهری شود (Zhou *et al.*, 2019). با توجه به توسعه شهری و کاهش سطوح نفوذپذیر، حجم بالایی از بارش به رواناب تبدیل شده که به همراه تغییر مقدار و شدت بارش ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند عملکرد شبکه جمع‌آوری آب سطحی را تحت الشعاع قرار دهد (Binesh *et al.*, 2020; Ghodsi *et al.*, 2019). سیلاب شهری از کمبود ظرفیت شبکه جمع‌آوری رواناب نشئت گرفته و زمانی رخ می‌دهد که میزان بارش از توانایی یا ظرفیت شبکه بیش‌تر شود (Tasca *et al.*, 2018). دو عامل اصلی در تشدید آسیب ناشی از سیلاب شهری وجود دارد، اول رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی که با توجه به فعالیت‌های انسانی در چرخه هیدرولوژیکی، فرآیند نفوذ را تضعیف کرده و حجم رواناب ناشی از بارش را افزایش می‌دهد (Silva *et al.*, 2014; Movahedinia *et al.*, 2019). دومین عامل، بارندگی شدید ناشی از تغییرات اقلیمی است که در تشدید و تسریع چرخه هیدرولوژیکی نقش مهمی دارد و می‌تواند میزان فراوانی بارش را تغییر دهد (Dong *et al.*, 2017). این

عامل بیش‌تر در مناطق خشک و نیمه‌خشک، جایی که بارندگی معمولاً برای مدت کوتاه اما با شدت بالا رخ می‌دهد، تأثیرگذار است و بر احتمال وقوع سیلاب، حجم رواناب و دبی اوج تأثیر می‌گذارد (Al-Zahrani *et al.*, 2017). تغییرات اقلیمی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر الگوی بارش‌ها و به‌طور مستقیم بر روی وقوع سیلاب شهری داشته باشد. به‌عنوان مثال، تحقیقات نشان می‌دهد در مناطقی که بارندگی معمولاً برای مدت کوتاه و با شدت بالا رخ می‌دهد، تأثیر تغییرات اقلیمی بر روی الگوی بارشی و وقوع سیلاب شهری بیش‌تر مشهود است (Al-Zahrani *et al.*, 2017)؛ بنابراین، بررسی و مدیریت بهینه سیلاب شهری به‌طور کلی، به‌عنوان یک استراتژی پیشگیری در برابر تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر الگوی بارشی، ضروری است (Santiago *et al.*, 2021). ابزارهای توسعه کم اثر یا LID، به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی برای کاهش خطرات سیلاب شهری شناخته می‌شوند. این ابزارها شامل سیستم‌های جمع‌آوری و استفاده مجدد آب باران، سیستم‌های غربالگری و نفوذ آب، باغچه‌های بارانی، سقف‌های سبز و سطوح نفوذپذیر می‌شوند. این ابزارها با افزایش نفوذپذیری سطح شهر و جمع‌آوری آب باران، میزان رواناب واردشده به شبکه آب شهری را کاهش داده و در نتیجه خطر سیلاب شهری را کاهش می‌دهند.

مزایای اقتصادی و محیط زیستی، تغذیه منابع آب زیرزمینی، کاهش حجم رواناب سطحی، کاهش سرعت جریان رواناب، کاهش خطر سیلاب و زیباسازی شهری از جمله مزایای به‌کارگیری LID ها به شمار می‌روند.

در ادامه به چند پژوهش مرتبط با شبیه‌سازی SWMM، عملکرد شبکه و به‌کارگیری LID اشاره می‌شود. Khalighi Sigarodi و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی کارآمدی مدل SWMM در شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب را تحت سه رویداد بارش مورد

حجم رواناب، دبی اوج و بار آلودگی‌های غیر نقطه‌ای را به ترتیب به میزان ۸۰-۴۵ درصد، ۳۹-۶۰ درصد و ۸۲-۳۱ درصد در دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال کاهش دهد. ایشان هم‌چنین با تحلیل سناریو نشان دادند که عملکرد کمی LID ها تحت هر سه سناریو (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) با افزایش دوره بازگشت روند کاهشی داشته است درحالی‌که عملکرد کیفی این ابزارها دارای نوسان بوده و روند مشخصی ندارد. Lee و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تأثیر استفاده از LID در کنترل رواناب تحت شرایط تغییرات اقلیمی پرداختند. در این پژوهش با استفاده از مدل‌های اقلیمی گزارش پنجم تغییر اقلیم و هم‌چنین مدل SWMM جهت شبیه‌سازی رواناب در دو حالت با و بدون استفاده از LID بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که استفاده از ابزارهای توسعه کم اثر در شرایط تغییر اقلیم می‌تواند ۳۰ درصد حجم رواناب را نسبت به حالت عدم استفاده از آن‌ها کاهش دهد. در مطالعه دیگری Jazaeri و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی تأثیر روش‌های توسعه کم اثر (LIDs) بر کاهش حجم رواناب پرداختند. در این مطالعه شبکه جمع‌آوری رواناب به کمک مدل SWMM شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد دبی اوج سیلاب در دوره بازگشت ۱۰ سال، در روش شبکه باران (سناریوی اول) ۲۲ درصد، در روش شبکه باران (سناریوی دوم) ۳۱ درصد، در روش ترانسه نفوذ ۲۹ درصد و در روش ترکیبی ۵۰ درصد کاهش داشته است. هم‌چنین ترانسه نفوذ به‌عنوان اقتصادی‌ترین روش مورد مطالعه در منطقه شناسایی شد.

در این پژوهش اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های آتی منطقه مورد مطالعه و عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب تحت این شرایط بررسی و با وضع فعلی شبکه مقایسه شده است. هدف از این تحقیق، بررسی کاهش آسیب‌پذیری شبکه با به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر به‌عنوان یکی از راهکارهای نوین و کارآمد است. جهت پیش‌بینی

ارزیابی قراردادند. در این مطالعه رواناب مشاهداتی در خروجی حوضه‌ای در شهر مشهد با رواناب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، مقایسه گردیده و ضرایب NS^۱ مربوط به سه رویداد بررسی‌شده به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۸۵ و ۰/۵۲ به‌دست‌آمده است که نشان از توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی رواناب در منطقه مورد مطالعه دارد. در مطالعه Ivanović و همکاران (۲۰۱۸) از مدل SWMM برای تحلیل شبیه‌سازی سیلاب استفاده شده و با بررسی الگوی بارشی شهر تورنتو در کانادا، نشان داده شده است که استفاده از LID می‌تواند باعث کاهش حدود ۳۰ درصدی حجم رواناب و کاهش شدید خطر سیلاب شهری شود. در پژوهشی Abdi و همکاران (۲۰۱۹) آسیب‌پذیری، تاب‌آوری و ریسک فضایی شهر ساری در مقیاس بلوک شهری در برابر سیلاب را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه نخست شاخص‌های آسیب‌پذیری و تاب‌آوری محاسبه شد؛ سپس با استفاده از مدل‌سازی سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره توزیع فضایی آن‌ها به‌دست‌آمده است. نتایج نشان داد که بلوک‌های شهری در جنوب شهر ساری بیش‌ترین ریسک‌پذیری نسبت به سیلاب را دارند. در مطالعه‌ای که توسط Taqizadeh و همکاران (۲۰۲۰) صورت گرفته است، اثر به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر بر بهبود کمیت رواناب سطحی منطقه ۲۲ شهر تهران بررسی شده است. شبکه جمع‌آوری رواناب این منطقه با استفاده از نرم‌افزار SWMM و تحت ۴ سناریو به‌کارگیری LIDs شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مخازن نگهداشت زیستی نسبت به ترانسه‌های نفوذ و روسازی‌های نفوذ‌پذیر، توانایی بیش‌تری در کاهش دبی پیک دارد. هم‌چنین با افزایش دوره بازگشت از تأثیر به‌کارگیری LIDs کاسته می‌شود. Yang و همکاران (۲۰۲۲) LID را به‌عنوان یکی از راهکارهای کاهش اثرات سوء تغییرات اقلیمی بررسی کردند. نتایج نشان داد که جانمایی LID ها در منطقه مورد مطالعه می‌تواند

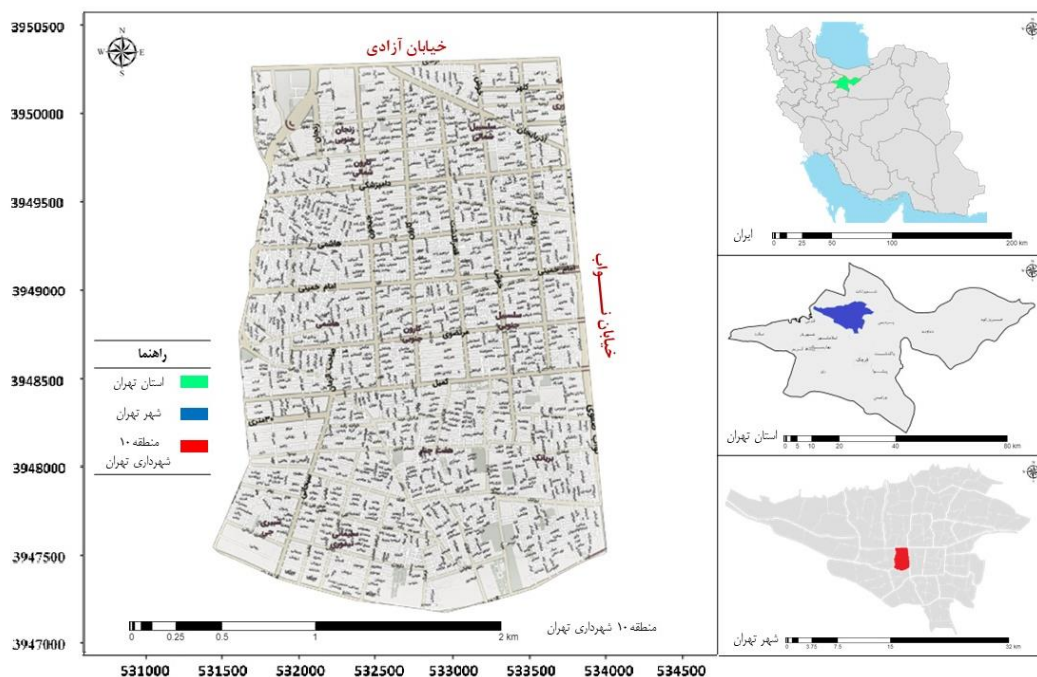
(Mousavi Janbehsarayi *et al.*, 2023). تراکم جمعیت و کمبود فضای سبز در منطقه ۱۰، خطر سیلاب را دوچندان کرده است و به‌علاوه، تغییرات اقلیمی نیز با تغییر الگوی بارشی موجب اختلال در عملکرد سامانه جمع‌آوری آب سطحی شده است. دو مسیل سرپوشیده فیروزآبادی و کمیل، اصلی‌ترین کانال‌های دفع رواناب در منطقه مورد مطالعه هستند. منطقه ۱۰ از سمت شرق به خیابان نواب و از سمت شمال به خیابان آزادی محدود شده و وجود کانال‌های اصلی در این دو خیابان باعث شده تا رواناب حاصل از بارش در حوضه‌های بالادست، وارد منطقه نشود ولی همچنان در برخی کانال‌های فرعی و اصلی طی بارش‌های نه‌چندان قوی، آب‌گرفتگی مشاهده می‌شود. از این‌رو منطقه ۱۰ شهر تهران می‌تواند گزینه خوبی جهت بررسی عملکرد شبکه و به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر به جهت بهبود عملکرد سامانه باشد. موقعیت استانی و کشوری منطقه ده شهرداری تهران در شکل ۱ ارائه شده است.

بارش آبی نیز از جدیدترین گزارش اقلیمی یعنی گزارش ششم تغییر اقلیم استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش منطقه ۱۰ شهرداری تهران به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. این منطقه با جمعیتی حدود ۳۲۷ هزار نفر در محدوده مرکزی شهر تهران قرار دارد و مساحت آن ۸۰۷ هکتار است. بیش‌ترین بخش از این منطقه (۵۷ درصد) به مناطق مسکونی اختصاص داده شده و بخشی کوچک‌تر (۲۵ درصد) به معابر اختصاص دارد و ۱۸ درصد باقیمانده نیز از فضاهای سبز و دیگر کاربری‌ها تشکیل شده است. ایستگاه سینوپتیک مهرآباد نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه است و در فاصله ۲ کیلومتری غرب این منطقه قرار دارد. مختصات جغرافیایی این ایستگاه ۳۵/۴۱ درجه عرض شمالی و ۵۱/۱۹ درجه طول شرقی است. ارتفاع این ایستگاه از سطح دریا ۱۱۹/۰۸ متر و میانگین بارش سالانه ۲۳۲/۷ میلی‌متر است.



شکل ۱- موقعیت کشوری و استانی منطقه مورد مطالعه

Figure 1- National and provincial location of the study area

مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی

گزارش ششم تغییرات اقلیمی (CMIP6)^۱ یک همکاری جهانی بین دانشمندان اقلیمی در راستای ارتقا درک درست از تغییرات اقلیمی است. این پروژه شامل توسعه و مقایسه مدل‌های کامپیوتری پیشرفته است که شرایط آینده‌ی اقلیم را شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها عواملی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، جریانات اقیانوسی و سایر عوامل تأثیرگذار را در بر گرفته و پیش‌بینی می‌کنند که چگونه تغییر اقلیم اتفاق می‌افتد. CMIP6 در واقع تکمیل‌کننده گزارش‌های پیشین تغییر اقلیم بوده و هدف از آن افزایش دقت مدل‌های اقلیمی به واسطه بهبود فرآیندهای کلیدی و کاهش ابهامات است. همچنین، این گزارش سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای را ارزیابی کرده و اثربخشی استراتژی‌های کاهش و سازگاری را بررسی می‌کند (Eyring et al., 2016; Stouffer et al., 2017). ششمین گزارش تغییر اقلیم با استفاده از ترکیب سناریوهای RCP و SSP، روال تغییرات اقلیمی را بررسی می‌کند. به‌طور دقیق‌تر، در این گزارش، سعی شده است که علاوه بر توصیف و پیش‌بینی اقلیم‌های مختلف آینده، توسعه اقتصادی و اجتماعی مختلف نیز در نظر گرفته شود (Riahi et al., 2017).

در پژوهش‌هایی که به پیش‌بینی بارش در دوره آتی و بهبود دقت مدل‌های شبیه‌سازی اقلیمی می‌پردازند، انتخاب مدل‌های مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، از نتایج پژوهش Hassani و همکاران (۲۰۲۲) که به بررسی ۲۳ مدل اقلیمی از سری مدل‌های گزارش ششم به‌منظور تعیین بهترین مدل برای پیش‌بینی میانگین بلندمدت بارش در دوره پایه پرداخته است، استفاده شده است. در این پژوهش، پس از ارزیابی عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی بارش در دوره پایه، ۵ مدل اقلیمی که به داده‌های بارشی مهرآباد نزدیک‌تر بودند، انتخاب شدند و از نتایج پیش‌بینی این مدل‌ها در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) جهت پایش

تغییرات بارش در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.

مدل شبیه‌سازی SWMM

امروزه مدل‌های کامپیوتری بسیاری در خصوص شبیه‌سازی شبکه زهکشی وجود دارد که یکی از مدل‌های کارآمد به همین منظور، مدل هیدرولیکی SWMM بوده که در پژوهش حاضر نیز از نسخه ۵/۱ این نرم‌افزار استفاده شده است. مدل SWMM یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی جاری شبکه‌های جمع‌آوری آب سطحی است. این مدل در ابتدا در سال ۱۹۷۱ توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA)^۲ توسعه یافته و از آن پس به‌طور گسترده‌ای در تحقیقات مربوط به مدیریت آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است (Rossman, 2010). این مدل با استفاده از ترکیبی از معادلات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، به شبیه‌سازی فرآیندهای پدید آمده در شبکه‌های جمع‌آوری آب سطحی، از جمله جریان آب، تغییر حجم و غلظت آب، فرسایش خاک و... می‌پردازد (McCuen, 2005; Wang et al., 2019). همچنین، این مدل به‌صورت آزاد در دسترس است و به‌عنوان یک ابزار کاربردی برای بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی و بهبود مدیریت آب در حوضه‌های آبریز و سیستم‌های جمع‌آوری آب سطحی در سطح شهری و محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Puyravaud et al., 2010).

شبیه‌سازی منطقه مورد مطالعه

در راستای افزایش دقت مدل و بررسی دقیق‌تر عملکرد شبکه، منطقه مورد مطالعه به ۲۸۵ زیرحوضه تقسیم شد تا مدل شبیه‌سازی از جزئیات بالاتری در خصوص کانال‌های درجه ۲ و ۳ برخوردار باشد. در ادامه اطلاعات توپوگرافی این ۲۸۵ زیرحوضه شامل مساحت، تراز ارتفاعی، شیب، درصد فضای نفوذناپذیر و سایر داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcMap به‌عنوان یک لایه‌ی اطلاعاتی به هر زیرحوضه معرفی شد. به کمک نرم‌افزار

1. Climate Model Intercomparison Project

2. U.S. Environmental Protection Agency

جهت ریزمقیاس نمایی داده‌های خروجی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم از مدل LARS-WG در این مطالعه استفاده شده است. در پژوهش‌های تغییرات اقلیمی، LARS-WG مدلی کارآمد شناخته می‌شود که می‌توان از آن جهت تولید پارامترهای اقلیمی مثل بارش به صورت روزانه در وضع موجود و شرایط آتی متأثر از تغییرات اقلیمی استفاده نمود.

شاخص آسیب‌پذیری^۱

آسیب‌پذیری به مجموعه‌ای از شکست‌های یک سیستم اشاره دارد که در دوره‌ای مشخص، معمولاً به صورت متوسط شکست‌ها و یا بیش‌ترین نقصان‌ها رخ می‌دهد و احتمال افزایش نقصان در یک یا چندین دوره آتی را نمایان می‌کند (Behzadi et al., 2018). در مطالعه Behzadi و همکاران (۲۰۱۸)، شاخص آسیب‌پذیری بر اساس ارتفاع رواناب موجود در کانال جمع‌آوری نسبت به بیش‌ترین عمق سیلاب در نظر گرفته شده است. بیش‌ترین عمق آب‌گرفتگی بر اساس پژوهشی که توسط Mugume و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده، حدود سه متر تعیین شده است. در این مطالعه نیز از شاخص مذکور به عنوان رابطه (۱) استفاده شده است.

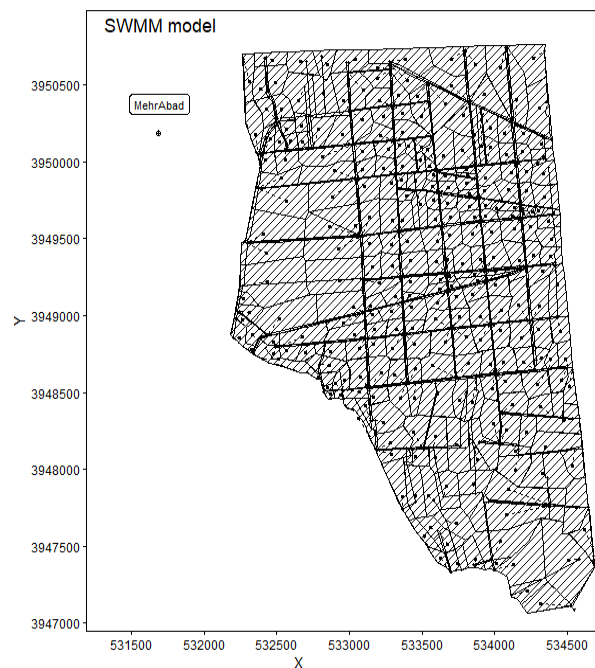
$$Vulnerability\ Index = \frac{H_x}{H_{max}} \quad (1)$$

در این رابطه، H_x ارتفاع رواناب ایجاد شده و H_{max} بیش‌ترین عمق آب‌گرفتگی است. میانه شاخص آسیب‌پذیری کانال‌ها معادل شاخص آسیب‌پذیری کل شبکه جمع‌آوری است (Behzadi et al., 2018).

شاخص اطمینان‌پذیری^۲

شاخص اطمینان‌پذیری یکی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم شناخته می‌شود. شاخص اطمینان‌پذیری به این معناست که سیستم تا چه حد در حالت ایمن و مطمئن و بدون شکست به کار خود ادامه خواهد داد. این شاخص با تقسیم مجموع طول کانال‌هایی که ظرفیت کافی جهت عبور رواناب را دارند،

Q-GIS نیز متغیر عرض زیرحوضه که حاصل تقسیم مساحت به بزرگ‌ترین طول در هر زیرحوضه است، محاسبه شد. دوره‌های بازگشتی که در شبیه‌سازی‌ها صورت می‌گیرد همواره بر مبنای ضوابط و آیین‌نامه‌های موجود در این زمینه است (Mahab Quds., 2011). دوره بازگشت به عوامل مختلفی از جمله الگوی بارشی منطقه، شیب، حوضه بالادست، نوع کانال و سایر پارامترها بستگی دارد. در مطالعات مربوط به این حوزه معمولاً جهت طراحی شبکه‌های اصلی دوره بازگشت ۵۰ تا ۲۰۰ سال و برای شبکه‌های فرعی دوره بازگشت ۲ تا ۱۰ مورد استفاده قرار می‌گیرد (Debo & Reese., 2002). در این مطالعه نیز با توجه به مدل‌سازی هیدرولیکی کانال‌های فرعی، از دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰ سال استفاده شده است.



شکل ۲- نمایی از شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب

سطحی با استفاده از نرم‌افزار SWMM

Figure 2- View of the surface water collection network simulation using SWMM software

در شکل ۲ نمایی از شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری در محیط نرم‌افزار SWMM ارائه شده است. در ادامه به

است. با توجه به خصوصیات منطقه مورد مطالعه و نیز رواج این دو ابزار توسعه کم اثر، اجرای آن‌ها در منطقه مورد مطالعه از امکان بالاتری برخوردار است.

روسازی نفوذپذیر^۱

روسازی نفوذپذیر نوع خاصی از روسازی است که شباهت زیادی به روسازی معمول داشته با این تفاوت که منافذی جهت عبور رواناب در آن تعبیه شده است. با استفاده از این منافذ، رواناب حاصل از بارش جمع‌آوری شده و انتقال می‌یابد (Hassani, 2023).

جوی باغچه^۲

جوی باغچه‌ها، کانال‌هایی عریض و خاکی هستند که برای جلوگیری از فرسایش خاک و مقابله با سیل، در کف و دیواره‌هایشان علف کاری شده‌اند. شیب کم این تأسیسات باعث افزایش نفوذپذیری آن‌ها می‌شود و بخش زیادی از آلودگی‌های رواناب در این تأسیسات زوده می‌شود (Dayarian, 2015). هدف اصلی، کاهش حجم رواناب از طریق نفوذپذیری بالای آن‌ها، کاهش سرعت جریان با استفاده از ضریب زبری بالا به دلیل وجود پوشش گیاهی و افزایش کیفیت رواناب است. به علاوه، اجرای این تأسیسات بهبود زیبایی مناطق شهری را نیز به همراه دارد (Hassani, 2023).

سناریوهای به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر

به جهت ارزیابی دقیق اثرات به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر، ۳ سناریو تعریف شد. به ترتیب در این سناریوها ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد مساحت زیرحوضه‌ها به ابزارهای توسعه کم اثر اختصاص یافت. در این پژوهش از روسازی نفوذپذیر و جوی باغچه با نسبت یکسان استفاده شده است. هر دو مدل شبیه‌ساز در وضع موجود و شرایط آبی تحت این سناریوهای اجرا خواهد شد و نتایج حاصل از آن با شرایط بدون جانمایی ابزارهای توسعه کم اثر مقایسه می‌شود.

بر مجموع طول تمام کانال‌های شبکه جمع‌آوری به دست می‌آید (Behzadi et al., 2019) که در رابطه (۲) به نشان داده شده است.

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

$$0\% \leq Rel\ Index \leq 100\%$$

طول کانال‌هایی که قادر به عبور رواناب هستند با L_f و مجموع طول تمام کانال‌های شبکه جمع‌آوری با L نشان داده شده است.

همواره قسمتی از فضای کانال به‌عنوان عمق آزاد در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن بستگی به مواردی چون نوع سیال، جنس کانال، شیب کانال، سرعت و سایر اهداف تحقیق ممکن است تغییر کند (Yoshino et al., 1990). در پژوهش حاضر نیز عمق آزاد ۲۰ درصد مشخص شد و کانال‌هایی که درصد پرشدگی آن‌ها بیش از ۸۰ درصد باشد، به‌عنوان کانال‌های دارای کمبود ظرفیت در نظر گرفته شده است. مقدار شاخص اطمینان‌پذیری بین صفر تا صد درصد را شامل می‌شود. هرچه شاخص به صد درصد نزدیک‌تر باشد شبکه جمع‌آوری از عملکرد بالاتری برخوردار بوده و در مقابل نیز کاهش این شاخص نشانگر پایین آمدن میزان اطمینان و افزایش احتمال شکست در سیستم است (Behzadi et al., 2019).

ابزارهای توسعه کم اثر (LID)

امروزه در طراحی و مدیریت شبکه‌های جمع‌آوری رواناب به‌طور فزاینده‌ای از ابزارهای توسعه کم اثر (LID) استفاده می‌شود. ابزارهای توسعه کم اثر یکی از روش‌های مدیریت رواناب شهری برای حفظ یا بازگرداندن شرایط هیدرولوژیکی طبیعی یک حوضه آبریز به حالت پیش از توسعه‌یافتگی است (Kobarfard et al., 2018). در این پژوهش در راستای بهبود عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب از دو ابزار رایج توسعه کم اثر یعنی روسازی نفوذپذیر و جوی باغچه استفاده شده

نتایج

مدل‌های اقلیمی

با توجه به شرایط آبی و تغییر اقلیم، شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب سطحی نیازمند بررسی و انتخاب بهترین مدل‌های اقلیمی است. برای این منظور، پس از بررسی ۵ مدل اقلیمی CMCC-ESM2، MPI-ESM1-2-LR، MPI-ESM1-2-HR، KACE-1-0-G و HADGEM3-GC31-LL که بیش‌ترین قرابت را با داده‌های بارشی دوره پایه داشتند، از مدل LARS-WG جهت تحلیل ریزمقیاس نمایی استفاده شده است. از آنجایی که خروجی‌های مدل LARS-WG بزرگ‌مقیاس به حساب می‌آید، از روش Roozbahani و همکاران (۲۰۲۰) برای کوچک‌مقیاس‌سازی داده‌های

بارشی و تبدیل بارش ۲۴ ساعته به بارش ۶ ساعته استفاده گردید. در این روش، ضریب گسسته‌سازی با نسبت بین داده‌های بارشی ۲۴ و ۶ ساعته در دوره پایه به دست آمد که در این منطقه مورد مطالعه ضریب گسسته‌سازی برابر ۰/۵۷ به دست آمد. لازم به ذکر است که برای برازش توزیع احتمالاتی به داده‌ها، از نرم‌افزار HyfranPlus 2.2 استفاده شده است. با ضرب ضریب گسسته‌سازی در داده‌های بارشی ۲۴ ساعته ۵ مدل اقلیمی منتخب، داده‌های کوچک‌مقیاس ۶ ساعته تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به دست آمد که در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مقادیر بارش‌های ۶ و ۲۴ ساعته ایستگاه مهرآباد تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 (Hassani et al., 2022)

Table 1- 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) 24 hours of rain (mm)		بارش ۲۴ ساعته (میلی‌متر) 6 hours of rain (mm)						مدل اقلیمی Climate model
SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	
10	5	10	5	10	5	10	5	
19.43	17.55	22.34	20.46	34.1	30.8	39.2	35.8	CMCC-ESM2
21.60	19.20	22.97	20.86	37.9	33.7	40.3	36.6	MPI-ESM1-2-LR
22.34	20.57	23.08	21.71	39.2	36.1	40.5	38.1	MPI-ESM1-2-HR
24.39	20.57	23.19	20.06	42.8	36.1	40.7	35.2	KACE-1-0-G
27.45	23.66	26.25	23.06	48.16	41.51	46.07	40.47	HADGEM3-GC31-LL

می‌بایست به‌گونه‌ای باشد که توانایی عبور بیش‌ترین حجم رواناب پیش‌بینی شده را دارا باشد و از آنجایی که بررسی اثرات به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر جزو اهداف اصلی این پژوهش به شمار می‌آید، صرفاً سناریوی بدبینانه به‌عنوان اطلاعات بارشی آبی استفاده شده است.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مدل CMCC-ESM2 تحت سناریو SSP1-2.6 کمترین بارش و مدل HADGEM3-GC31-LL تحت سناریو SSP5-8.5 بیش‌ترین بارش را به خود اختصاص داده‌اند و به ترتیب به‌عنوان سناریو خوش‌بینانه و سناریو بدبینانه انتخاب شدند. شبکه جمع‌آوری رواناب

شبیه‌سازی شبکه قبل از به‌کارگیری LIDs

پس از آماده‌سازی اطلاعات ورودی به مدل شبیه‌ساز SWMM، شبکه زهکشی منطقه ده تهران قبل از به‌کارگیری LIDs در دو مرحله شبیه‌سازی شد. نخست شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب در وضع موجود با استفاده از داده‌های تاریخی بارش ایستگاه سینوپتیک مهرآباد و دوم شبیه‌سازی شبکه در شرایط آبی با استفاده از داده‌های بارشی بدبینانه‌ترین سناریو از بهترین مدل اقلیمی گزارش ششم که بیشترین قرابت را با داده‌های بارشی دوره پایه داشت، صورت گرفت. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان داد که حجم رواناب کل در وضع موجود در دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر با $۴۵/۹ \times 10^3$ ، $۵۱/۱۴ \times 10^3$ و $۵۹/۷ \times 10^3$ مترمکعب و حجم رواناب کل در شرایط آبی متأثر از تغییرات اقلیمی، طی دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال برابر با $۶۴/۰۴ \times 10^3$ و $۷۲/۱۸ \times 10^3$ مترمکعب است. این روند افزایش حجم رواناب کل منجر به افزایش آسیب‌پذیری و کاهش اطمینان‌پذیری شبکه

جمع‌آوری شده است به‌طوری‌که شاخص آسیب‌پذیری در وضع موجود طی دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب برابر ۱۰/۴، ۱۱/۱ و ۱۲/۲ درصد بوده و در شرایط آبی با دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال تا ۱۲/۷ و ۱۳/۹ درصد افزایش یافته است. شاخص اطمینان‌پذیری شبکه نیز به دلیل افزایش حجم رواناب کل، روند نزولی به خود گرفت به‌طوری‌که در وضع موجود و در دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ سال معادل ۹۷/۵، ۹۶/۷ و ۹۵/۸ درصد شده است. در شرایط آبی نیز شاخص اطمینان‌پذیری طی دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال تا ۹۵/۳ و ۹۴/۳ درصد کاهش یافت. در جدول ۲ شاخص‌های ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب قبل از به‌کارگیری LIDs به نمایش درآمده است. با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت که افزایش حجم رواناب باعث شده تا شاخص آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب از ۱۰/۴ درصد تا ۱۲/۷ درصد افزایش یابد. همچنین شاخص اطمینان‌پذیری نیز طی این روند از ۹۷/۵ تا ۹۴/۳ درصد کاهش یافت.

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب قبل از به‌کارگیری LIDs

Table 2- Performance evaluation indicators of runoff collection network before applying LIDs

اطمینان‌پذیری (%) Reliability (%)	آسیب‌پذیری (%) Vulnerability (%)	طول کانال‌های سیلابی (کیلومتر) Length of flood channels (km)	حجم رواناب کل (هزار مترمکعب) Total runoff volume (10^3 m^3)	دوره بازگشت (سال) Return period (year)	
97.5	10.4	1.799	45.9	2	شرایط فعلی
96.7	11.1	2.411	51.14	5	Current conditions
95.8	12.2	3.069	59.7	10	
95.3	12.7	3.412	64.04	5	شرایط آبی
94.3	13.9	4.095	72.18	10	Future conditions

شبیه‌سازی شبکه پس از به‌کارگیری LIDs

پس از اجرا و شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری رواناب در دو وضع فعلی و شرایط آبی و نیز بررسی عملکرد شبکه در هر شبیه‌سازی با استفاده از شاخص‌های

آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری، ابزارهای توسعه کم اثر در سه سناریوی مختلف به کار گرفته شد. در سناریوهای اول تا سوم به ترتیب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد مساحت زیرحوضه‌ها به جانمایی ابزارهای توسعه کم اثر

مساحت زیرحوضه‌ها به ابزارهای توسعه کم اثر، حجم رواناب کل حدود ۱۷ درصد نسبت به قبل از به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر کاهش پیدا کرد و در سناریوی سوم با اختصاص ۱۵ درصد مساحت زیرحوضه‌ها به ابزارهای توسعه کم اثر، کاهش میانگین ۲۱ درصدی در حجم رواناب کل مشاهده شد. نتایج شبیه‌سازی شبکه تحت سناریوهای به‌کارگیری LIDs نشان داد که شاخص آسیب‌پذیری شبکه به دنبال کاهش حجم رواناب کل، روندی نزولی پیدا کرده است که در جدول ۳ نشان داده شده است. شاخص اطمینان‌پذیری شبکه نیز پس از استفاده از ابزارهای توسعه کم اثر، افزایش یافت که در جدول ۴ نمایان شده است. روند تغییرات شاخص‌های آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری شبکه قبل و بعد از استفاده از LIDs نیز در شکل ۳ به نمایش درآمده است.

اختصاص یافت؛ سپس هر دو مدل شبیه‌ساز تحت این سناریوها اجرا شد. نتایج نشان داد که با افزایش مساحت اختصاص داده شده به ابزارهای توسعه کم اثر، حجم رواناب ناشی از بارش در منطقه کاهش یافته است و به‌موجب آن شاخص آسیب‌پذیری و شاخص اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب به ترتیب دچار کاهش و افزایش شدند که همین موضوع بیانگر بهبود عملکرد شبکه در مواجهه با سیلاب شهری پس از به‌کارگیری ابزارهای توسعه شهری است. در سناریوی اول با اختصاص ۵ درصد مساحت زیرحوضه‌ها به ابزارهای توسعه کم اثر، میانگین ۱۰/۵ درصد از حجم رواناب خروجی منطقه مورد مطالعه کاسته شد. با افزایش مساحت اختصاص داده شده به ابزارهای توسعه کم اثر، کاهش حجم رواناب خروجی بیش‌تر شد به‌طوری‌که در سناریوی دوم با اختصاص ۱۰ درصد

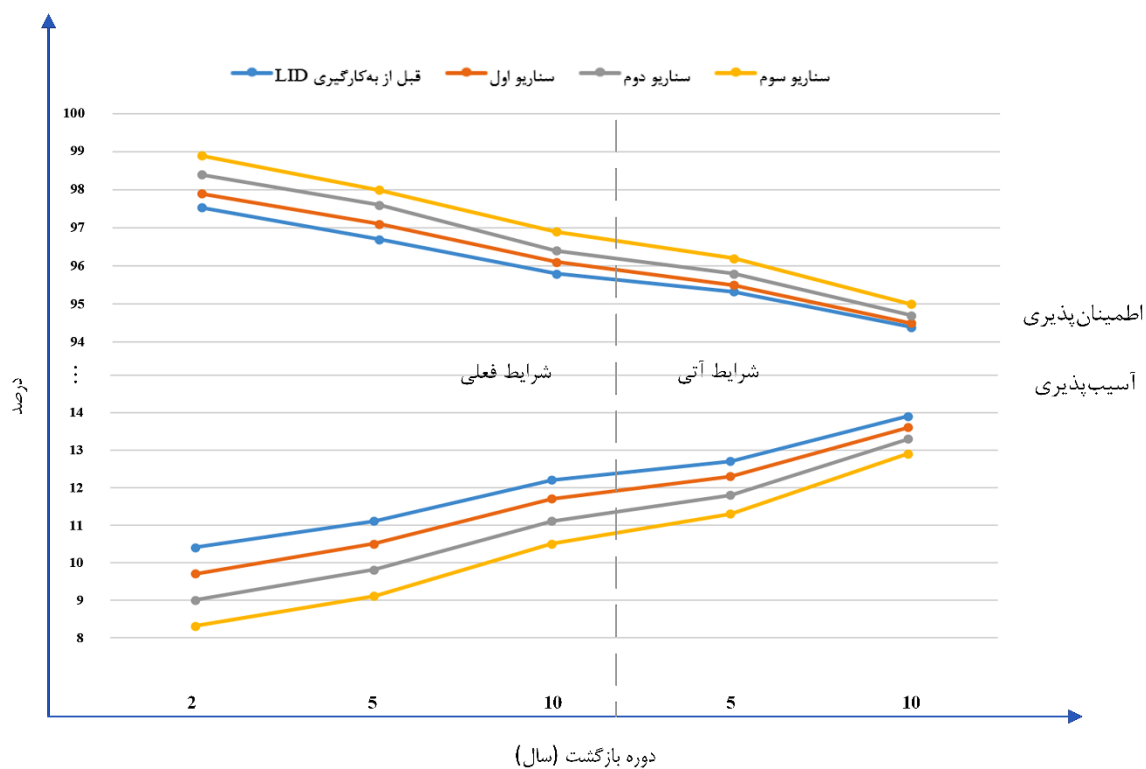
جدول ۳- شاخص آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب تحت سناریوهای به‌کارگیری LIDs

Table 3- Vulnerability index of the runoff collection network under the scenarios of using LIDs

آسیب‌پذیری بعد از به‌کارگیری LIDs (%) Vulnerability after using LIDs (%)			آسیب‌پذیری قبل از به‌کارگیری LIDs (%) Vulnerability before using LIDs (%)	حجم رواناب کل (هزار مترمکعب) Total runoff volume (10 ³ m ³)	دوره بازگشت (سال) Return period (year)	
سناریو سوم The third scenario	سناریو دوم The second scenario	سناریو اول The first scenario				
8.3	9.0	9.7	10.4	45.9	2	شرایط فعلی Current conditions
9.1	9.8	10.5	11.1	51.14	5	
10.5	11.1	11.7	12.2	59.7	10	
11.3	11.8	12.3	12.7	64.04	5	شرایط آتی Future conditions
12.9	13.3	13.6	13.9	72.18	10	

جدول ۴- شاخص اطمینان پذیری شبکه جمع آوری رواناب تحت سناریوهای به کارگیری LIDs
Table 4- Reliability index of the runoff collection network under the scenarios of using LIDs

اطمینان پذیری بعد از به کارگیری LIDs (%) Reliability after using LIDs (%)			اطمینان پذیری قبل از به کارگیری LIDs (%) Reliability before using LIDs (%)	طول کانال های سیلابی (کیلومتر) Length of flood channels (km)	دوره بازگشت (سال) Return period (year)	
سناریو سوم The third scenario	سناریو دوم The second scenario	سناریو اول The first scenario				
98.9	98.4	97.9	97.5	1.799	2	شرایط فعلی Current conditions
98.0	97.6	97.1	96.7	2.411	5	
96.9	96.4	96.1	95.8	3.069	10	
96.2	95.8	95.5	95.3	3.412	5	شرایط آتی Future conditions
95.0	94.7	94.5	94.3	4.095	10	



شکل ۳- روند تغییرات شاخص های آسیب پذیری و اطمینان پذیری شبکه قبل و بعد از به کارگیری LIDs
Figure 3- Changes in network vulnerability and reliability indicators before and after applying LIDs

سینوپتیک مهرآباد تحت دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ سال شبیه‌سازی شد. خروجی مدل شبیه‌سازی در مرحله نخست نشان داد که حجم رواناب کل با افزایش دوره بازگشت، افزایش یافته و همین موضوع موجب افزایش آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری از ۱۰/۴ به ۱۲/۲ درصد شد. شاخص اطمینان‌پذیری نیز طی روندی نزولی از ۹۷/۵ به ۹۵/۸ درصد رسید. در مرحله دوم، از اطلاعات بارشی مدل‌های اقلیمی ششمین گزارش تغییرات اقلیمی و طی دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال جهت شبیه‌سازی شرایط آبی استفاده شد. از نتایج مطالعه Hassani *et al.*, (2022) به همین منظور استفاده شد. ۵ مدلی که بیشترین قرابت را با داده‌های بارشی دوره پایه داشتند، انتخاب شده و مدل اقلیمی با بیشترین بارش به‌عنوان سناریوی بدبینانه در نظر گرفته شد. خروجی مدل شبیه‌سازی در شرایط آبی نشان داد که حجم رواناب کل تا ۷۲/۱۸ هزار مترمکعب افزایش یافته و همین امر موجب شد تا شاخص آسیب‌پذیری شبکه جمع‌آوری در شرایط آبی طی دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال به ۱۲/۷ و ۱۳/۹ درصد برسد. شاخص اطمینان‌پذیری نیز طی همین دوره‌های بازگشت برابر ۹۵/۳ و ۹۴/۳ درصد شد. این افزایش در شاخص آسیب‌پذیری و کاهش شاخص اطمینان‌پذیری شبکه در این مطالعه با نتایج مطالعه Behzadi *et al.* (2019) به دلیل افزایش بارش در دوره آبی تحت شرایط تغییر اقلیم در هر دو پژوهش هم‌خوانی داشته و دارای روندی مشابه است. پس از شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب در وضع موجود و شرایط آبی، به بررسی تأثیرات به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر در راستای بهبود عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب پرداخته شد. به همین منظور جوی باغچه و روسازی نفوذپذیر که از جمله رایج‌ترین و پرکاربردترین ابزارهای توسعه کم اثر به شمار می‌روند را انتخاب و تحت سه سناریو ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد مساحت زیرحوضه به کار گرفته شد. سپس مدل‌های شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری تحت

همان‌طور که در شکل ۳ مشهود است پس از به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر، عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب در هر سه سناریوی به‌کارگیری LIDs، بهبود یافته به‌طوری‌که در همه سناریوهای به‌کارگیری LIDs، شاخص‌های اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری شبکه نسبت به حالت پایه به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. نکته دیگری که از شکل ۳ می‌توان دریافت این است که تأثیر به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر در کاهش حجم رواناب و به دنبال آن بهبود عملکرد شبکه در دوره‌های بازگشت کمتر، بیش‌تر نمایان است به‌طور مثال در شبیه‌سازی شبکه در شرایط فعلی با دوره بازگشت ۲ سال، شاخص اطمینان‌پذیری پس از به‌کارگیری ابزارهای توسعه کم اثر از ۹۷/۵ درصد تا ۹۸/۹ افزایش پیدا کرد ولی در مدل شبیه‌سازی شرایط فعلی با دوره بازگشت ۱۰ سال، شاخص اطمینان‌پذیری پس از به‌کارگیری LIDs از ۹۴/۳ به ۹۵ درصد رسید. در شاخص آسیب‌پذیری نیز به‌طور مشابه همین امر صدق می‌کند. در واقع می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که ابزارهای توسعه کم اثر در دوره‌های بازگشت پایین‌تر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، دامنه تغییرات دو شاخص آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری با افزایش دوره بازگشت کاهش می‌یابد که بیانگر همین موضوع است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییر اقلیم بر سیلاب شهری و نیز بهره‌گیری از ابزارهای توسعه کم اثر (LIDs) جهت کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری شبکه جمع‌آوری رواناب منطقه ۱۰ شهرداری تهران مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور شبکه جمع‌آوری در دو مرحله با استفاده از مدل هیدرولیکی SWMM شبیه‌سازی شد. نخست شرایط فعلی شبکه جمع‌آوری با استفاده از اطلاعات تاریخی بارش ایستگاه

نتیجه حاصل شده بود. وجه تمایز این پژوهش با مطالعه Hosseinzade و همکاران (۲۰۲۳) که با استفاده از بازطراحی شبکه و تعریض کانال اقدام به بهبود عملکرد شبکه در برابر تغییرات اقلیمی نمودند؛ این است که در این پژوهش با به‌کارگیری LIDs این بهبود عملکرد در شبکه حاصل شد. امروزه LIDs رویکردی نوین، کارآمد و پایدار در مواجهه با پیامدهای تغییر اقلیم بشمار می‌آید که در این پژوهش با استفاده از آن، نتایج مطلوبی به دست آمد. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داد که از ابزارهای توسعه کم اثر می‌توان به‌عنوان راهکاری مؤثر در جهت رفع مخاطرات ناشی از تغییرات اقلیم از جمله سیلاب شهری استفاده نمود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی جهت کاهش هزینه و افزایش اثرات ابزارهای توسعه کم اثر، از روش‌های بهینه‌سازی برای جانمایی هرچه بهتر این ابزارها استفاده شود. هم‌چنین در ادامه این روند نیز می‌توان عدم قطعیت را در بهینه‌سازی و انتخاب بهترین ترکیب لحاظ کرد.

این سناریوهای به‌کارگیری LIDs پردازش شد. نتایج حاکی از آن بود که در سناریو اول میانگین ۱۰/۵ درصد، در سناریو دوم میانگین ۱۷ درصد و در سناریو سوم میانگین ۲۱ درصد از حجم رواناب کل کاسته شده است. این کاهش حجم رواناب موجب شد تا شاخص‌های آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری به ترتیب کاهش و افزایش یابند و یا به‌عبارت‌دیگر عملکرد شبکه جمع‌آوری رواناب بهبود یابد. به‌طور مثال با به‌کارگیری LIDs، آسیب‌پذیری شبکه در وضع موجود و دوره بازگشت ۲ سال از ۱۰/۴ تا ۸/۳ درصد کاهش یافت. اطمینان‌پذیری شبکه نیز در وضع موجود و دوره بازگشت ۲ سال از ۹۷/۵ تا ۹۸/۹ درصد افزایش پیدا کرد. هم‌چنین این پژوهش نشان داد که ابزارهای توسعه کم اثر در همه سناریوهای بارشی و دوره‌های بازگشت موجب بهبود عملکرد شبکه می‌شود ولی میزان این بهبود در دوره‌های بازگشت کمتر، نمایان‌تر است همان‌طور که در پژوهش Taqizadeh و همکاران (۲۰۲۰) و نیز پژوهش Yang و همکاران (۲۰۲۲) این

References

- Abdi, K., Kamyabi, S. & Zand Moghaddam, M. R. (2019). Integrated Assessment of Vulnerability, Resiliency and Spatial Risk against Flooding in Sari City. *Physical Geography Research Quarterly*, 51(3), 431-445 (In Persian).
- Al-Zahrani, M.A., Aburizaiza, O.S. & Khedr, A.M. (2017). Urban flash flood response and management: A review. *Journal of environmental management*, 196, 29-42.
- 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. (In Persian).
- 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).
- Binesh, N., Niksokhan, M.H., Sarang, A. & Rauch, W. (2019). Improving sustainability of urban drainage systems for climate change adaptation using best management practices: a case study of Tehran, Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 64(4): 381-404.
- Chocat, B., Ashley, R., Marsalek, J., Matos, M.R., Rauch, W., Schilling, W. & Urbonas, B. (2007). Toward the sustainable management of urban stormwater. *Indoor and built environment*. 16(3): 273-285.
- Dayarian, M. (2015). *Development of a simulation-optimization framework for urban runoff quality and quantity management with Low impact development practices (LIDs) and economical consideration*. Master thesis of Water resources, Faculty of

- Environment, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Debo, T.N. & Reese, A. (2002). *Municipal stormwater management*. CRC Press
- Dong, X., Guo, H. & Zeng, S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. *Water Research*, 124, 280-289.
- 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.
- Ghodsi, S.H., Zahmatkesh, Z., Goharian, E., Kerachian, R. & Zhu, Z. (2020). Optimal design of low impact development practices in response to climate change. *Journal of Hydrology*, 580, p.124266.
- 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*, 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.
- Hassani, M.R. (2023). *Optimal Application of Low-Impact Development Practices for Stormwater Management under Climate Change*. Master thesis of Water resources, Faculty of Environment, University of Tehran, Iran (in Persian).
- Hosseinzade Kuhi, H. (2023). *Optimum Redesign of Runoff Collection System to Reduce Vulnerability and Increase Reliability against Climate Change*. Master thesis of Water resources, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Hosseinzade Kuhi, H., Ardestani, M. & Sarang, A. (2023). Optimum redesign of runoff harvesting channels to reduce vulnerability and increase reliability against climate change. *Water and Soil Management and Modelling*, doi: 10.22098/mmws.2023.12222.1213 (in Persian).
- Ivanovic, I., Milenkovic, D. & Savic, S. (2018). A review of low-impact development measures for mitigating the effects of urbanization on floods. *Water*, 10(11), 1625.
- 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.
- Jazaeri, P., Fazloulou, R., Masoudian, M. & Javaheri, N. (2023). Investigation the Effect of Low-Impact Development Methods of Rainwater Storage Barrels and Infiltration Trenches on Reducing the Peak Discharges of Urban Floods. *Irrigation and Water Engineering*, 13(3), 437-462. (In Persian).
- Khalighi Sigarodi, S., Rostami Khalaj, M., Mahdavi, M. & Salajegheh, A. (2015). "Calibration and validation SWMM model in order to simulate urban runoff (Case Study: Imam Ali Town in Mashhad)." *Journal of Range and Watershed Management*, 68(3), 487-498. (In Persian).
- Kobarfard, M., Fazloulou, R., Zarghami, M. & Akbarpour, A. (2018). Efficient Assessment LID and Determining the BMP Quantitative of Urban Flooding Using at the Time Events. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(1), 40-52 (In Persian).
- Lee, S., Kim, D., Maeng, S., Azam, M. & Lee, B. (2022). "Runoff Reduction Effects at Installation of LID Facilities under Different Climate Change Scenarios." *Water*, 14(8), 1301.

- Mahab Quds Consulting Engineering Company (2011). *Comprehensive plan of Tehran surface water management*. Volume 2, Section 1, 63 (In Persian).
- McCuen, R.H. (2005). *Hydrologic analysis and design*. Prentice Hall.
- 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.
- Mugume, S., Gomez, D.E. & Butler, D. (2014). Quantifying the resilience of urban drainage systems using a hydraulic performance assessment approach.
- Neupane, B., Vu, T. M. & Mishra, A. K. (2021). Evaluation of land-use, climate change, and low-impact development practices on urban flooding. *Hydrological Sciences Journal*, 66(12), 1729-1742.
- Puyravaud, J.P., Davidar, P. & Laurance, W.F. (2010). Cryptic loss of India's native forests. *Science*, 329(5987), 32-33.
- 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. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- 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.
- Rossman, L.A. (2010). Stormwater management model user's manual. US Environmental Protection Agency, *National Risk Management Research Laboratory*.
- Santiago, L.S., Gallo, M.A., Treidel, H. & Grismer, M.E. (2021). Impacts of climate change on urban flash floods. *Current climate change reports*, 7(1), 22-36.
- 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.
- 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.
- Taqizadeh, S. & Rajaei, T. (2020). Investigating the Performance and Optimization of New Management Methods (LID-BMP) to Improve Surface Runoff in Tehran-A Case Study of District 22. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 12(4) (In Persian).
- Tasca, F.A., Assunção, L.B. & Finotti, A.R. (2018). International experiences in stormwater fee. *Water Science and Technology*, 2017(1), 287-299.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1971). Storm Water Management Model (SWMM). EPA, Washington, DC.
- Wang, X., Chen, Y.D. & Hu, M.J. (2019). Application of the SWMM Model for Urban Stormwater Drainage Planning in a Small Watershed. *Water*, 11(7), 1489.
- Yang, W., Zhang, J. & Krebs, P. (2022). Low impact development practices mitigate urban flooding and non-point pollution under climate change. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131320.
- Yoshino, H., Kim, S.J., Naka, T. & Itakura, J. (1990). Enhancement of buffer function in irrigation canal systems. 1. Necessity of enhancement of buffer function. *JARQ, Japan Agricultural Research Quarterly*, 24(2), 100-104.
- Zhou, Q., Leng, G., Su, J. & Ren, Y. (2019). Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. *Science of the Total Environment*, 658, 24-33.