

Research Paper

Optimizing Low Impact Development (LID) Methods in Urban Runoff Quantitative and Qualitative Control with Considering the Effects of Climate Change Using Multi-Objective Optimization Algorithms

Hamed Noori Khaje Balagh¹,Sayed-Farhad Mousavi ^{2*}

¹ PhD Candidate, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran. Email: hamednoori@semnan.ac.ir, Cell phone: 09122649678

² Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran. Email: fmousavi@semnan.ac.ir, Cell phone: 09123319586



10.22125/IWE.2021.271235.1480.

Received:
January.31.2021
Accepted:
June21.2021
Available online:
October.05.2022

Keywords:
NSGA-II, MOPSO,
Urban runoff
management, SWMM.

Abstract

Quantitative and qualitative management of urban runoff in part of Karaj city has been investigated using optimization of Low Impact Development (LID) methods under base period and climate change conditions. CanESM2 was employed with the base period (1985-2005) and future period (2020-2040) under the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios to investigate climate change impacts. Hydraulic and hydrological modeling was performed by Storm Water Management Model (SWMM) and was combined with Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm (MOPSO) and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II). Thirty-seven sub-catchments and five types of LIDS are introduced to the algorithms. Eight scenarios were defined to compare and evaluate the algorithms. Under the base period conditions, by applying NSGA-II and MOPSO algorithms, the flood volume in the catchment will decrease by 21.2% and 20.3%, total suspended solids (TSS) will increase by 59.1% and 58.4%, total nitrogen (TN) will increase by 16.6% and 12.7%, and lead (Pb) concentration will increase by 29.7% and 28.7%, respectively. Solution of the algorithms under climate change conditions gave similar flood values as the base conditions. In RCP2.6 scenario, TSS will decrease by 59.5% and 55.2%, respectively, and in RCP8.5 scenario, TSS will decrease by 59.6% and 55.8%, respectively. In RCP2.6 scenario, TN will decrease by 17.4% and 13.4%, respectively, and in RCP8.5 scenario, TN will decrease by 17.6% and 13.5%, respectively. Pb in RCP2.6 scenario will decrease by 30.1% and 29.7%, respectively, and in RCP8.5 scenario, Pb will decrease by 30.9% and 30.4%, respectively.

* **Corresponding Author:** Sayed-Farhad Mousavi

Address: Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran

Email: mousavi@semnan.ac.ir
Tel: 09123319586

1. Introduction

In the last two decades, the concept of low impact development (LID) has been promoted in order to control the quality and quantity of urban stormwater runoff. Estimation of stormwater runoff and associated pollutants is an important component of urban planning and development (Zahmatkesh et al., 2015). Several researchers have assessed the ability of LID practices. Oraei Zare et al. (2012) applied the NSGA-II optimization technique to optimize the objective functions in quality and quantity control of urban runoff. Three objective functions were considered: 1) minimization of total flood damages, 2) reduction of total suspended solids (TSS) and biochemical oxygen demand (BOD5) concentration, and 3) minimizing total runoff volume. Results showed that the rain barrel and permeable pavement had similar performance in reducing the runoff quantity and quality. Alamdari et al. (2017) assessed climate change impacts on urban catchments. A methodology was developed to calibrate SWMM in Fairfax, Virginia, for 2041-2068. Results showed that annual runoff volume would increase by 6.5%, while TSS, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) would increase by 7.6%, 7.1%, and 8.1%, respectively. Alamdari and Sample (2019) enhanced an existing external control program for SWMM by adding automated calibration and the NSGA-II multi-objective cost-optimization feature. They concluded that RSWMM-Cost can assist decision makers identify catchment management strategies for runoff quality. The purpose of this study is to evaluate the LIDs performance in minimizing total runoff volume, implementation cost of combined LIDs, and concentration of TSS and TN pollutants in the base period (1985-2005) and under climate change conditions (2020-2040) in Karaj watershed. To optimize LIDs, the NSGA-II and MOPSO algorithms have been applied. Simulation has been done in hydraulic, hydrology and stormwater quality by Stormwater Management Model (SWMM) model.

2. Materials and Methods

Urban runoff simulation has been performed in a watershed of Karaj city, Iran, by applying the SWMM. For simulation of the pollutants, the buildup model for pollutant accumulation and wash-off model for pollutant transportation are used. Four different rainfall events were used for SWMM calibration and validation. CanESM2 climate change model under RCP2.6, RCP8.5 scenarios were employed to investigate the effects of climate change. For more accuracy, the catchment was split into 37 sub-catchments based on the urban stream network. To simulate rainfall-runoff, the intensity-duration-frequency (IDF) curve has been obtained from Karaj municipality. Precipitation data was obtained from meteorological synoptic station of Karaj. For climate change impacts, the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios were considered. LID types consisted of bio-retention (BR), rain garden (RG), infiltration trench (IT), permeable pavement (PP) and vegetation swale (VS). In this research, at first, 100 initial populations were considered in each run to optimize the solutions. After writing the necessary codes for NSGS-II and MOPSO algorithms in MATLAB R2015a, they were executed. It was observed that after the 150th run, the difference between two successive solutions was negligible. Nevertheless, executions were continued until the 200th run and the final solutions were recorded and analyzed. Then, eight scenarios were defined to evaluate and compare the performance of optimal solutions obtained by the algorithms.

3. Results

Calibration and validation of SWMM were evaluated using R2, NSE, RMSE, NRMSE, MAE and MBE statistical indices. The R2 values at the calibration stage between the observed and simulated outlet discharge, TSS and TN concentrations were 0.791, 0.616 and 0.531, respectively, and at the validation stage were 0.837, 0.639 and 0.633, respectively. According to the prediction of precipitation changes in the future period, the average of 24-hour precipitation values in RCP2.6 and RCP8.5 scenarios will increase by 21% and 11%, respectively, and maximum 24-hour precipitation values will decrease by 17% and 23%, respectively, compared to the observed values in the base period. This indicates a decrease in the volume of floods in low-duration precipitations. Employing optimization algorithms revealed that increasing the LIDs cost will reduce the total flood volume and much of the pollutants' concentration in the catchment outlet.

4. Discussion and Conclusion

Results generally indicate that the solutions obtained from optimization algorithms, despite having less area (17% occupancy) than other 8 scenarios (20% occupancy), but have more satisfying objective functions and controlling the quantity and quality of the flood.

According to the results, by applying NSGA-II and MOPSO algorithms for the base period, the flood volume will decrease by 21.2% and 20.3%, TSS will increase by 59.1% and 58.4%, TN will increase by 16.6% and 12.7%, and total lead (Pb) will increase by 29.7% and 28.7%, respectively. Also, by applying solution of the algorithms under climate change conditions, quantitative flood control values have the same performance as the base period. In RCP2.6 scenario, TSS will increase by 59.5% and 55.2%, respectively, and in RCP8.5 scenario, TSS will increase by 59.6% and 55.8%, respectively. In the same way, TN in RCP2.6 scenario will increase by 17.4% and 13.4%, and in RCP8.5 scenario, it will increase by 17.6% and 13.5%, respectively. Also, Pb in RCP2.6 scenario will increase by 30.1% and 29.7%, and in RCP8.5 scenario, it will increase by 30.9% and 30.4%, respectively. By comparing optimization algorithms, it was found that the NSGA-II algorithm performed better than the MOPSO algorithm

5. Six important references

1. Alamdari, N., Sample, D.J., Steinberg, P., Ross, A.C., and Easton, Z.M. 2017. Assessing the effects of climate change on water quantity and quality in an urban watershed using a calibrated storm-water model. *Journal of Water* 9(7): 463-478. Doi: 10.3390/w9070464.
2. Alamdari, N., Sample, D.J., Ross, A.C., and Easton, Z.M. 2019. Evaluating the impact of climate change on water quality and quantity in an urban watershed using an ensemble approach. *Journal of Estuaries and Coasts*, 43: 56-72. Doi: 10.1007/s12237-019-00649-4.
3. Hua, P., Yang, W., Qi, X., Jiang, S., Xie, J., Gu, X., Li, H., Zhang, J., and Krebs, P., 2020. Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118515.
4. Liu, Y., Cibin, R., Bralts, V., Chaubey, I., Bowling, L., and Engel, B. 2016. Optimal selection and placement of BMPs and LID practices with a rainfall-runoff model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131: 441-448.
5. Oraei Zare, S., Saghafian, B. and Shamsai, A. 2012. Multi-objective optimization for combined quality–quantity urban runoff control. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 4531-4542.
6. Zahmatkesh, Z., Burian, E., Karamouz, M., Tavakol-Davani, H. and Goharian, E. 2015. Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: Case study of New York City. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000770.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

بهینه سازی روش های توسعه کم اثر (LID) در کنترل کمی و کیفی سیلاب های شهری با لحاظ اثرات تغییر اقلیم با استفاده از الگوریتم های بهینه ساز چندهدفه

حامد نوری خواجه بلاغ^۱ و سید فرهاد موسوی^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

مقاله پژوهشی

چکیده

مدیریت کمی و کیفی رواناب قسمتی از شهر کرج با کاربرد بهینه سازی روش های توسعه کم اثر (LID) در شرایط پایه و تغییر اقلیم بررسی شده است. جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، مدل CanESM2 با دوره ی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) و دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۰) تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 استفاده شده است. مدل سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک توسط نرم افزار SWMM انجام پذیرفته و با الگوریتم های چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) و ژنتیک چندهدفه با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) تلفیق شده است. تعداد ۳۷ زیرحوضه و پنج نوع LID به الگوریتم ها معرفی شده است. جهت مقایسه و ارزیابی الگوریتم ها، هشت سناریو تعریف شد. در شرایط پایه، با اعمال الگوریتم های NSGA-II و MOPSO به ترتیب ۲۱/۲ و ۲۰/۳ درصد کاهش حجم آب گرفتگی در داخل حوضه، ۵۹/۱ و ۵۸/۴ درصد کاهش غلظت مواد جامد معلق (TSS)، ۱۶/۶ و ۱۲/۷ درصد کاهش غلظت آلاینده نیتروژن کل (TN) و ۲۹/۷ و ۲۸/۷ درصد کاهش غلظت آلاینده سرب (Pb) در خروجی حوضه صورت پذیرفته است. راه حل ارئه شده توسط الگوریتم ها در شرایط تغییر اقلیم، از نظر کمیت سیلاب مشابه شرایط پایه است. غلظت TSS و با شرایط سناریوی RCP2.6، به ترتیب کاهشی برابر با ۵۹/۵ و ۵۵/۲ درصد و در شرایط سناریوی RCP8.5، به ترتیب ۵۹/۶ و ۵۵/۸ درصد به دست آمد. برای TN، در شرایط سناریوی RCP2.6، این مقادیر به ترتیب ۱۷/۴ و ۱۳/۴ درصد و در سناریوی RCP8.5، به ترتیب ۱۷/۶ و ۱۳/۵ درصد کاهش داشته اند. Pb در شرایط سناریوی RCP2.6، به ترتیب با ۳۰/۱ و ۲۹/۷ درصد و در سناریوی RCP8.5، با ۳۰/۹ و ۳۰/۴ درصد کاهش داشته است.

واژه های کلیدی: NSGA-II؛ MOPSO؛ مدیریت رواناب شهری؛ SWMM

۱ - دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۰۹۱۲۲۶۴۹۶۷۸، hamednoori@semnan.ac.ir

۲ - استاد، گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۰۹۱۲۳۳۱۹۵۸۶، fmousavi@semnan.ac.ir



مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و توسعه شهرها، با توجه به افزایش روزافزون جمعیت، امری اجتناب‌ناپذیر است. توسعه شهرها و به دنبال آن تبدیل زمین‌های طبیعی به مناطق مسکونی باعث تغییر در چرخه هیدرولوژیک آن‌ها می‌شود (۷). تغییر اقلیم نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر چرخه هیدرولوژیک بوده و امروزه به‌عنوان مهم‌ترین تهدید برای توسعه پایدار مطرح است (۱۷). این پدیده، علاوه بر تأثیر مستقیم بر عوامل اقلیمی، به‌صورت غیرمستقیم بر اقتصاد، اجتماع و کشاورزی تأثیرگذار می‌باشد و پیامدهایی چون سیل، خشک‌سالی، مهاجرت و فقر را به همراه دارد (۱۳). سیلاب، علاوه بر خسارات مالی و جانی، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها همچون انواع زباله، مواد نفتی و روغنی، فلزات سنگین و مواد سمی را حمل نموده و در نهایت به تخلیه‌گاه انتقال می‌دهد (۲). در عصر حاضر، در بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان، جهت مدیریت سیلاب و کاهش اثرات توسعه شهرنشینی بر کیفیت و کمیت رواناب، از سیستم‌های نوین کنترل کمی و کیفی سیلاب همانند بهترین اقدامات مدیریتی (BMPs) و روش‌های توسعه کم اثر (LIDs) استفاده می‌شود (۱۶). این روش‌ها در واقع کنترل‌کننده‌های هیدرولوژیک هستند که به‌طور عمده مبتنی بر نفوذ و ذخیره‌سازی توزیعی در مقیاس کوچک می‌باشند تا بتوانند حجم کلی رواناب حاصل از حوضه آبریز را کاهش دهند و کیفیت رواناب را نیز کنترل نمایند (۱۸). از سازه‌هایی که روش‌های نوین جهت کنترل و مهار سیلاب شهری از آن‌ها استفاده می‌کنند می‌توان به مواردی مانند بام‌های سبز، شبکه‌های کوچک ذخیره آب، باغچه‌های باران‌زاد، چاه‌های جذبی، سازه‌های ذخیره آب باران، ترانشه‌های نفوذ، روکش‌های نفوذپذیر، استخرهای نگهداشت رواناب و جوی‌باغچه‌ها اشاره نمود.

جهت رسیدن به یک برنامه‌ریزی مناسب، نیاز است که اهداف مشخص شوند و سپس راهکارهای بهینه ارائه گردند. در این راستا، در دهه‌های اخیر، با روند تکامل دانش بشری، الگوریتم‌های فراتکاملی مختلفی برای بهینه‌سازی مسائل مختلف تولید شده و توسعه پیدا کرده‌اند. از جمله می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، مورچگان، زنبور

عسل، اتوماتای سلولی و رقابت استعماری اشاره نمود (۱۱). تمامی این مدل‌ها با در نظر گرفتن یک یا چند هدف مشخص، به دنبال بهترین و بهینه‌ترین جواب در فضای جواب‌ها هستند. در برخی موارد نیاز به رسیدن هم‌زمان به چند هدف مطرح است. الگوریتم‌های تکاملی، نظیر ژنتیک، بهینه‌سازی مورچگان، شبیه‌سازی تبرید، زنبور عسل، کلیه و ازدحام ذرات نمونه‌هایی از این روش‌ها می‌باشند (۱۴).

استفاده از سیستم‌های نوین کنترل سیلاب در حوضه‌های شهری، بدون برنامه‌ریزی و اهداف از پیش تعیین‌شده، نه تنها نمی‌تواند کمک و کارایی مناسبی داشته باشد بلکه ممکن است هزینه‌های هنگفتی را نیز به همراه داشته باشد. لذا، داشتن راهکاری برای انتخاب نوع روش و تعیین سازه مناسب در حوضه با توجه به اهداف تعریف شده ضرورت دارد. در ادامه، برخی از تحقیقاتی که در زمینه بهینه‌سازی LID و BMP جهت کنترل کمی و کیفی سیلاب و همچنین تغییر اقلیم و اثرات آن بر کمیت و کیفیت رواناب انجام شده است، بررسی شده‌اند.

(Li et al. (2015) عملکرد مخازن تعدیل را در شهر سای در کشور چین، با معرفی دو تابع هدف بررسی کردند. ایشان جهت عملکرد بهتر مخازن، در کنار این سیستم، از LID های مختلف نیز استفاده نمودند. در این پژوهش، از چهار سیستم: جوی‌باغچه، مخزن نفوذپذیر، سطح نفوذپذیر و بام سبز استفاده شد. مشخصات هر کدام از LID های فوق از جمله ضخامت لایه‌های مختلف خاک، جنس مصالح و نرخ نفوذ نیز با توجه به شرایط محل تعیین شده است. با توجه به نتایج، مشخص گردید که هزینه سرمایه‌گذاری و خطر پهنه‌بندی سیلاب به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. مخازن تعدیل به همراه هر کدام از LID ها به مقدار زیادی دبی اوج را کاهش می‌دهند. به طور کلی این نتیجه حاصل شد که در جاهایی که به دلیل شرایط فیزیکی و اجتماعی، امکان اجرای مخزن تعدیل نیست، استفاده از روش‌های نوین LID می‌تواند گزینه مناسبی باشد. ضمناً، بهتر است که محل اجرای LID ها در سرشاخه‌ها و زیرحوضه‌های بالادست در نظر گرفته شود. در مقابل، اجرای مخازن تعدیل در مجاری اصلی رواناب بهتر و اقتصادی‌تر است.

RCP4.5 و RCP8.5 جهت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی بارش استفاده شد و برای مدل‌سازی بارش-رواناب، نرم‌افزار SWMM به‌کار گرفته شد. نتایج نشان از کاهش ۳/۱، ۲/۵ و ۹/۹ درصد مقادیر TSS، TN و TP در سناریوی RCP4.5 و ۳/۸، ۳/۱ و ۱۰/۴ درصد در سناریوی RCP 8.5 داشت. Hua et al. (2020)، مطالعه‌ای مبتنی بر مدل‌سازی برای تجزیه و تحلیل عملکرد LID ها در کاهش سیلاب شهری انجام دادند. نتایج نشان داد که LID ها تا حد مناسبی قابلیت کنترل و کاهش رواناب، به‌ویژه در شرایط بارش رگباری، را دارند. همچنین، خطر سیلاب شهری می‌تواند با ترکیب LID ها، مانند حوضچه‌های نگهداشت آب، ترانشه‌های نفوذ و بشکته‌های باران، به میزان کافی کاهش یابد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه بایستی بیان کرد که عملکرد سازه‌های نوین کنترل کمیت و کیفیت سیلاب در حوضه‌های آبریز، اغلب به‌صورت مجزا و بدون استفاده ترکیبی از این سازه‌ها و در شرایط پایه بررسی شده است. در حالی که ترکیب انواع سازه‌ها در کنار هم می‌تواند راه‌حل‌های مناسب‌تری را به همراه داشته باشد. همچنین، بررسی اثرات تغییر اقلیم و نحوه‌ی عملکرد روش‌های نوین به کمک بهینه‌سازی‌های چندهدفه در مقابل این پدیده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد روش‌های نوین کنترل کمی و کیفی سیلاب در شرایط فعلی و آتی (تغییر اقلیم) بوده که در این راستا جهت رسیدن به مناسب‌ترین ترکیب LID ها، از الگوریتم-های NSGA-II و MOPSO استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این منطقه، واقع در شرق شهر کرج در استان البرز می‌باشد (شکل ۱). طول جغرافیایی منطقه بین ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی منطقه بین ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی می‌باشد. مساحت حوضه آبریز در حدود ۱۴۰ هکتار است. متوسط بارش سالانه در منطقه‌ی مورد مطالعه ۲۵۱ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴ درجه سلسیوس است

(Karami et al. (2016)، مدیریت خطرپذیری سیلاب شهری با هدف کاهش آب‌گرفتگی و تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده را با به‌کارگیری سازه‌های نوین (LID-BMP) و متداول (کانال‌ها) کنترل سیلاب در شهرک گلستان واقع در جنوب تهران مورد بررسی قرار دادند. با معرفی چهار LID-BMP جهت بهینه‌سازی، برای هر زیرحوضه توسط الگوریتم NSGA-II یک سازه از بین سازه‌های معرفی شده انتخاب شد. نتایج نشان داد که به‌کارگیری ترکیب بهینه هر دو رویکرد متداول و نوین، منجر به کاهش قابل ملاحظه و مؤثر خطرپذیری آب‌گرفتگی و تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده می‌گردد. همچنین، نتایج رویه‌ی بهینه نشان داد که کنترل بهینه خطرپذیری آب‌گرفتگی رابطه معکوس با میزان کنترل بهینه تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده دارد.

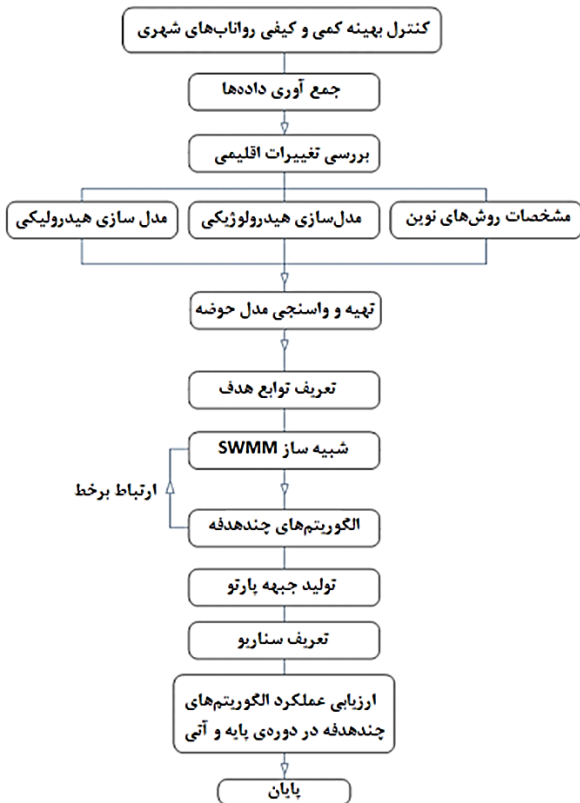
(Dudula et al. (2016)، تأثیر تغییرات آب و هوایی در فرایندهای هیدرولوژیک و ارزیابی اثربخشی BMP ها در این شرایط را بررسی کردند. منطقه مورد مطالعه واقع در ماساچوست آمریکا می‌باشد. در این تحقیق، از دو سازه حوضچه ماند بیولوژیک و باغچه باران‌زاد استفاده شده است. نتایج نشان داد که تغییرات آب و هوایی تأثیر قابل توجهی بر رواناب حوضه داشته و سازه‌های کنترل سیلاب (BMPs) همراه با طراحی و بهره‌برداری مناسب در مقیاس حوضه آبریز می‌توانند تأثیر به‌سزایی در کاهش مشکلات مربوط به رواناب داشته باشند.

(Alamdari et al. (2017)، اثرات تغییرات اقلیمی طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۸ را بر مقادیر کمی و کیفی سیلاب، با استفاده از یک مدل واسنجی شده رواناب شهری، در حوضه آبریز فایرفاکس در ایالت ویرجینیای آمریکا مورد بررسی قرار دادند. مدل رواناب شهری توسط شبیه‌ساز SWMM تهیه و واسنجی گردید. نتایج نشان داد که حجم سیلاب سالانه در اثر تغییرات اقلیمی طی دوره‌ی آتی با افزایش ۶/۵ درصد و آلاینده‌های TSS، TN و TP به ترتیب با افزایش ۷/۶، ۷/۱ و ۸/۱ درصد روبرو شده‌اند.

(Alamdari et al. (2019)، اثر تغییر اقلیم بر مقادیر کمی و کیفی سیلاب‌های شهری با استفاده از رویکرد گروهی را ارزیابی کردند. در این تحقیق، از سناریوهای



چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) جهت بهینه‌سازی در ترکیب نوع و مساحت LID ها استفاده شده است. شکل ۲ ساختار کلی مراحل انجام این پژوهش را نشان می‌دهد.

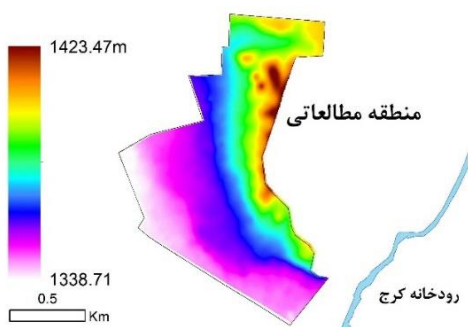


شکل (۲): مراحل اجرای پژوهش

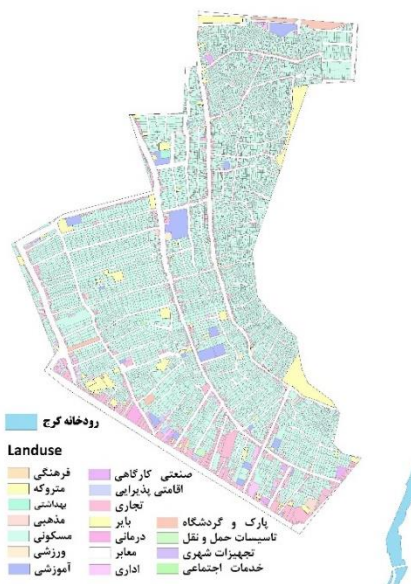
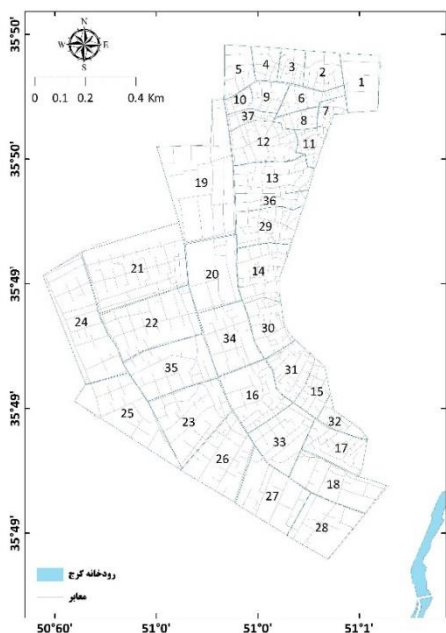
در شکل ۳، حوضه مطالعاتی به همراه زیرحوضه‌ها و کاربری اراضی نشان داده شده است. حوضه مورد مطالعه بر اساس توپوگرافی منطقه و شبکه زهکشی اصلی و فرعی به ۳۷ زیرحوضه تقسیم شده است.

و بر اساس طبقه‌بندی روش دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک می‌باشد. همچنین، تبخیر سالانه از تشت کلاس A بالغ بر ۲۱۸۴ میلی‌متر است. دی‌ماه با متوسط ۲۶ میلی‌متر و تیرماه با ۳۷۵ میلی‌متر به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار تبخیر ماهانه را دارند. حداکثر و حداقل تراز ارتفاعی حوضه نسبت به سطح دریای آزاد به ترتیب برابر با ۱۴۰۸ و ۱۳۴۶ متر است. اغلب بافت این منطقه مسکونی، تجاری، کارگاهی و صنعتی است و جزو بافت‌های توسعه‌یافته شهری به حساب می‌آید. نواحی شمالی حوضه دارای بافت شهری با تراکم کمتر نسبت به نواحی جنوبی حوضه می‌باشد (۱).

در این پژوهش، پس از تهیه داده‌های مورد نیاز، در ابتدا داده‌های بارش ارزیابی و تحلیل شده و سپس تغییرات اقلیمی در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) بر اساس مدل CanESM2 و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 بررسی شده است. در قسمت بارش، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (IDF) بر پایه بارش روزانه در دوره‌ی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) و دوره‌ی آتی تهیه شده است. جهت مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی از مدل SWMM استفاده شده است. مکان‌های مناسب جهت اجرای LID ها در منطقه، با توجه به نوع کاربری در سطح حوضه، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مورد بررسی و شناسایی قرار گرفت و حتی‌الامکان از سازه‌هایی که فضای مورد نیاز آنها در اختیار و تملک شهرداری کرج بوده استفاده شد. نهایتاً، با توجه به محدودیت‌های بیان شده، پنج نوع LID در حوضه مطالعاتی شامل حوضچه‌های نگهداشت آب، باغچه‌های باران‌زاد، ترانشه‌های نفوذ، روکش‌های نفوذپذیر و جوی‌باغچه‌ها انتخاب شد. در ادامه، پس از تعریف توابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری، از الگوریتم‌های فراتکاملی بهینه‌ساز ژنتیک



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه



(ب)

(الف)

شکل ۳. کاربری اراضی (الف) و زیرحوضه‌ها (ب) در حوضه مطالعات



جمع‌آوری داده‌ها

برای بررسی پارامترهای اقلیمی دما و بارندگی، از داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج طی دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۵-۱۹۸۵) استفاده شد. این ایستگاه در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۰۰ متر قرار دارد (شکل ۲).

داده‌های بارش اخذشده از سازمان هواشناسی در دوره‌ی پایه و داده‌های پیش‌بینی‌شده برای آینده (توسط مدل‌های تغییر اقلیم)، برای استفاده در برآورد سیلاب‌های شهری، نیاز به به‌کارگیری روش‌های آماری و روابط تجربی برای تهیه تحلیل فراوانی شدت بارندگی‌ها دارند. به همین منظور، جهت اعمال داده‌های بارش به مدل، منحنی‌های IDF ناشی از این داده‌ها (پایه و آتی) با تداوم‌های بارش ۱۵ تا ۳۶۰ دقیقه و دوره‌های بازگشت ۱ تا ۱۰۰ سال تهیه شده است. داده‌های تهیه شده مربوط به مشخصات حوضه شهری شامل داده‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیک است. در بحث مربوط به مشخصات توپوگرافی حوضه، شیب منطقه با توجه به مدل رقومی ارتفاع DEM آن تهیه شده است. همچنین، کاربری اراضی حوضه از نقشه‌های سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری کرج (۱) تهیه شده است. داده‌های هیدرولیکی که شامل شبکه فرعی و اصلی کانال‌ها با ابعاد آن‌ها است، توسط بازدیدهای میدانی اندازه‌گیری شده و با جزئیات دقیق به صورت پایگاه داده‌ای در نرم‌افزار ArcGIS ثبت گردیده است. داده‌های هیدرولوژیک منحنی شدت-مدت-فراوانی بارش نیز با توجه به داده‌های بارش طی دوره‌های آماری موجود، در دوره پایه و دوره آتی تهیه و در شبیه‌سازی استفاده شده است.

تغییرات اقلیمی

داده‌های بارش روزانه تهیه شده از ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کرج جهت بررسی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استفاده شده است. اکثر مطالعات در کشور ایران در حوزه مدل‌سازی تغییر اقلیم، بر اساس داده‌های سری CMIP3 و CMIP4 انجام شده است. قدرت تفکیک مکانی داده‌های سری CMIP5 نسبت به دو سری قبلی افزایش یافته و از

حدود $2/5 \times 2/5$ درجه جغرافیایی به حدود $0/5 \times 0/5$ درجه جغرافیایی ارتقا یافته است. سناریوهای جدید این گزارش، موسوم به RCPs، در سال ۲۰۱۰ با هدف مهیا نمودن مجموعه‌ای از اطلاعات که از نتایج آن‌ها بتوان عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را ردیابی و در مدل‌های اقلیمی اعمال کرد، معرفی شدند. مدل‌های اقلیمی از نتایج این سناریوها برای نشان دادن غلظت و انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان آلودگی‌ها و تغییرات کاربری اراضی استفاده می‌کنند. سناریوی خانواده RCP شامل چهار سناریوی مختلف RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 است که بر اساس مشخصات متفاوت سطح تکنولوژی، وضعیت اجتماعی و اقتصادی، و خط‌مشی‌ها در آینده است که در هر شرایط می‌تواند منجر به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی گردد. سناریوهای RCP6، RCP4.5 و RCP8.5 تقریباً با سناریوهای B1، A1B و A2 گزارش چهارم IPCC مطابقت دارند (۱۸).

بر همین اساس، در منطقه مطالعاتی، مدل CanESM2 از سری مدل‌های گزارش CMPI5، تحت سناریوهای RCP2.6 (حالت خوش‌بینانه) و RCP8.5 (حالت بدبینانه)، با دوره‌ی پایه ۱۹۸۵-۲۰۰۵، جهت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور ارزیابی مدل CanESM2، داده‌های تولید شده از مدل توسط روش SDSM ریزمقیاس‌نمایی شده و با داده‌های مشاهداتی به صورت ماهانه مقایسه شده‌اند.

مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک

جهت مدل‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک از شبیه‌ساز مدیریت، تحلیل و طراحی مرتبط با رواناب‌های سطحی در حوضه‌های شهری، به نام SWMM، محصول اداره حفاظت محیط‌زیست آمریکا (۴) استفاده شده است. همچنین، به منظور تعیین مقادیر نفوذ، با توجه به داده‌های تهیه شده از سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری کرج (۱) و همخوانی این داده‌ها با روش هورتون، از این روش استفاده شده است. در بحث روندیابی سیل نیز روش موج دینامیک به کار گرفته شده است. در شبیه‌ساز

جدول (۱) هزینه ساخت LIDs بر اساس فهرست بهای سال ۱۳۹۸

نوع سازه	هزینه ساخت (ریال بر واحد سطح) تا عمق یک متری
حوضچه نگهداشت	۷۴۴۰۰۰
باغچه باران زاد	۶۷۵۵۰۰
ترانشه نفوذ	۶۳۳۰۰۰
روکش نفوذپذیر	۸۰۸۰۰۰
جوی باغچه	۲۴۲۰۰۰

۲- کمینه‌سازی حجم آب‌گرفتگی در سطح حوضه برحسب متر مکعب:

$$\text{Minimize Flood Volume} = Z_2 = \min \sum_{i=1}^{67} (\nabla_i) \quad (2)$$

که در آن:

$$\nabla_i = \sum_k^{nf} \sum_j^s \nabla_k (f \{ SWMM(A_j) \}_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, 37 \quad (3)$$

۳- کمینه‌سازی بار آلاینده‌ها در نقطه خروجی (ورود به رودخانه کرج) برحسب کیلوگرم:

$$\text{Minimize Pollutant Load} = Z_3 = \min \sum_{i=1}^{37} (PLTS_i) \quad (4)$$

که در آن:

$$PLTS_i = \sum_j^s PLTS (f \{ SWMM(A_j) \}_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, 37 \quad (5)$$

متغیرهای تصمیم‌گیری جهت بهینه‌سازی نیز نوع و مساحت هر یک از سازه‌های LID معرفی شده‌اند. قید لحاظ شده در انتخاب مساحت سازه‌های نوین عبارت است از:

$$0 \leq \left(\sum_{j=1}^s A_j \right)_i \leq 0.2 \times A_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 37 \quad (6)$$

در روابط (۱) تا (۶)، Z_1 کمینه‌سازی هزینه ساخت، اجرا و بهره‌برداری سازه‌های نوین (ریال)، Z_2 کمینه‌سازی حجم آب‌گرفتگی در سطح حوضه (ریال)، Z_3 کمینه‌سازی بار آلاینده (کیلوگرم)، i شماره زیرحوضه، j نوع سازه‌های نوین (در این مطالعه، حداکثر پنج نوع)، k تعداد گره‌های دچار آب‌گرفتگی در هر زیرحوضه، BC_{ij} هزینه سرمایه‌گذاری سازه‌های نوین نوع j ام در زیرحوضه i ام (ریال)، BE_{ij} هزینه بهره‌برداری از سازه‌های نوین نوع j ام در زیرحوضه i ام (ریال)، ∇_i حجم سیلاب در زیرحوضه i

SWMM، جهت مدل‌سازی انتقال آلودگی، دو مدل که مکمل یکدیگرند پیشنهاد شده است (۱۲). مدل اول، که Buildup نام دارد، متشکل از تعدادی توابع به‌منظور محاسبه مقدار آلودگی تولیدی تجمعی در سطح حوضه در روزهای غیربارانی است. مدل دوم، با عنوان Washoff، متشکل از چندین تابع است که طی روزهای بارندگی، میزان انتقال آلودگی تولید شده رواناب جاری شده در سطح حوضه را مدل‌سازی می‌نماید.

معرفی توابع هدف

توابع هدف در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارت‌اند از:

۱- کمینه‌سازی هزینه ساخت و اجرا (سرمایه‌گذاری) و بهره‌برداری از روش‌های نوین (به‌طور اختصار هزینه کلی ساخت):

$$\text{Minimize LID Cost} = Z_1 = \min \left(\sum_{i=1}^{67} \left(\sum_{j=1}^s (BC_{ij} + BE_{ij}) \right) \right) \quad (1)$$

روابط مربوط به هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری از LIDs در مراجع و مقالات معتبر ارائه شده است (۱۵). با توجه به این که این مقادیر عمدتاً برای مناطق اروپا و آمریکا محاسبه و در نظر گرفته شده‌اند، لذا جهت استفاده در ایران معیار مناسبی نبوده و مقادیر صحیحی را ارائه نمی‌کنند. در همین راستا، در این تحقیق، برآورد هزینه ساخت و بهره‌برداری سازه‌های نوین منتخب، بومی‌سازی شده و بر اساس فهرست بهای سال ۱۳۹۸ سازمان برنامه و بودجه ایران تهیه و تنظیم شده است (جدول ۱). هزینه بهره‌برداری بر اساس مراجع مختلف، ۵ درصد هزینه ساخت در نظر گرفته شده است (۱۵).



انتخاب بهترین جواب کلی و بهترین خاطره برای هر ذره، گام مهم و اساسی در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات است (۸).

در تحقیق حاضر، جهت اجرای الگوریتم NSGA-II و MOPSO، از ۱۰۰ جمعیت اولیه (والد) همراه با ۲۰۰ نسل (تکرار) با نرخ جهش ۰/۰۵ استفاده شده است. جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌ساز معرفی شده، ۸ سناریو معرفی می‌گردد. سناریوی اول مقادیر کمی و کیفی سیلاب در حالت بدون اجرای LID است. همچنین، با توجه به استفاده از پنج نوع LID در حوضه مطالعاتی، عملکرد هر یک از این سازه‌ها به‌طور جداگانه و مستقل و در ۲۰ درصد سطح حوضه بررسی می‌شود که شامل سناریوهای ۲ تا ۶ است. دو سناریوی آخر راه‌حل (سناریوهای ۷ و ۸) منتخبی از دو الگوریتم بهینه‌ساز جهت مقایسه کمی و کیفی سیلاب با دیگر سناریوها می‌باشد:

۱. حالت بدون اجرای LID
۲. اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۳۷ زیرحوضه به اجرای حوضچه‌های نگهداشت (BR)
۳. اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۳۷ زیرحوضه به اجرای باغچه‌های باران زاد (RG)
۴. اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۳۷ زیرحوضه به اجرای ترانشه‌های نفوذ (IT)
۵. اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۳۷ زیرحوضه به اجرای روکش‌های نفوذپذیر (PP)
۶. اختصاص ۲۰ درصد مساحت هر یک از ۳۷ زیرحوضه به اجرای جوی باغچه‌ها (SW)
۷. انتخاب یک جواب از جبهه پارتو الگوریتم بهینه‌ساز چندهدفه ژنتیک (NSGA-II).
۸. انتخاب یک جواب از جبهه پارتو الگوریتم بهینه‌ساز چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO).

در واقع، سناریوهای هفتم و هشتم برای سنجش راه‌حل‌های ارائه شده توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO که مربوط به عملکرد ترکیب پنج نوع LID در کنار هم در سطح حوضه است، تعریف شده‌اند. فاکتورهای مقایسه شده شامل توابع هزینه سرمایه‌گذاری، حجم سیلاب در سطح حوضه، مجموع غلظت آلاینده‌ها در خروجی حوضه و نهایتاً

ام (متر مکعب)، $PLTS_i$ مجموع مواد آلاینده در زیرحوضه i ام (کیلوگرم)، A_j مساحت سازه نوین نوع زام (متر مربع)، V_j حجم سازه نوین نوع زام (متر مکعب)، A_i مساحت زیرحوضه i ام (متر مربع)، \forall_k حجم آب‌گرفتگی در گره k ام (متر مکعب) و $f\{SWMM(A_j)\}_i$ نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مدل SWMM بر اساس مساحت انتخاب شده برای سازه نوین زام در زیرحوضه i ام می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب

اساس این روش همانند الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک ساده است؛ ولی در نحوه مرتب‌سازی و انتخاب والدین بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب عمل می‌کند. بدین‌صورت که پاسخ‌های نامغلوب را از پاسخ‌های مغلوب در مجموعه‌های مجزا از هم جدا می‌کند که به جبهه پارتو معروف است. بدین‌صورت، رتبه و کیفیت هر پاسخ نسبت به پاسخ دیگر مشخص می‌شود. همچنین، عامل ثانویه دیگر دخیل در انتخاب اعضا نسبت به اعضای دیگر فاصله ازدحامی است که نمایانگر سطح پوشش پاسخ عضو می‌باشد. هر چه فاصله ازدحامی بیشتر باشد، احتمال انتخاب شدن عضو بیشتر است (۱۴).

الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه

در سال ۱۹۹۵ ابره‌ارت و کندی (۸) برای اولین بار، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) را به‌عنوان یک روش جستجوی غیرقطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح نمودند. در این الگوریتم، با الگوگیری و شبیه‌سازی رفتار پرواز دسته‌جمعی (گروهی) پرندگان یا ماهی‌ها الهام گرفته شده است. هر عضو در این گروه توسط بردار سرعت و بردار موقعیت در فضای جستجو تعریف می‌گردد. همانند الگوریتم ژنتیک، در الگوریتم PSO نیز با تغییرات در ساختار آن، الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) توسط کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید (۸). در واقع، این الگوریتم تعمیم الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است که برای حل مسائل چندهدفه به کار می‌رود. در الگوریتم MOPSO، مفهومی به نام آرشیو یا مخزن نسبت به الگوریتم PSO اضافه شده است که به تالار مشاهیر نیز معروف است.

درصد مساحت LID ها است.

۴۰ دقیقه نیز نمونه کیفی رواناب برداشت شده است. به منظور واسنجی مدل بارش- رواناب شبیه‌سازی شده، از داده‌های رخدادهای ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ و ۲۴ فروردین ۱۳۹۸ جهت اعتبارسنجی از داده‌های رخدادهای ۲۱ بهمن ۱۳۹۷ و ۱۷ فروردین ۱۳۹۸ استفاده شده است. همچنین، در مقایسه و کنترل داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی، فاکتورهای دبی جریان، TSS و TN به کار گرفته شده است. جهت ثبت داده‌های بارش متناسب با رخدادهای بارندگی، دو ایستگاه ثبت بارش در نزدیکی و در قسمت‌های بالایی و پایینی حوضه در نظر گرفته شده است. مشخصات بارش این رخدادهای در جدول ۲ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

برای اطمینان از صحت عملکرد مدل، لازم است تا مدل ایجاد شده واسنجی و صحت‌سنجی شود. در این تحقیق، جهت تهیه مدل کمی و کیفی سیلاب، چهار رخداد بارندگی در تاریخ‌های ۲۰ بهمن ۱۳۹۷، ۲۶ اسفند ۱۳۹۷، ۲۴ فروردین ۱۳۹۸ و ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۸، مورد اندازه‌گیری و نمونه‌برداری قرار گرفتند. طریقه انجام عملیات اندازه‌گیری و نمونه‌برداری به این صورت بود که در هر ۲۰ دقیقه، اندازه‌گیری عمق رواناب و سرعت آب صورت گرفت و در هر

جدول (۲): مشخصات بارش‌های ثبت شده

رخداد بارش	مقدار بارش (میلی‌متر)	تداوم (ساعت)	متوسط شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت)	فاصله از آخرین بارش یا تعداد روزهای خشک (روز)
۱۳۹۷/۱۱/۲۰	۹/۱۰	۵/۲	۱/۷۵	۱۶
۱۳۹۷/۱۲/۲۶	۷/۱۵	۳/۱۶	۲/۲۶	۲۶
۱۳۹۸/۰۱/۲۴	۱۲/۵	۵	۲/۵	۹
۱۳۹۸/۰۲/۱۷	۳/۴	۲	۱/۷۰	۷

یا کمتر از مقدار واقعی است. لازم به ذکر است که معیار NRMSE کمتر از ۱۰ درصد نشان دهنده دقیق بودن مدل، ۱۰-۲۰ درصد مناسب بودن مدل، ۲۰-۳۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است. مقادیر معیارهای ارزیابی برای قسمت واسنجی در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول (۳): معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل در حالت واسنجی مربوط به رخداد ۲۶ اسفند ۱۳۹۷

معیارهای آماری	دبی رواناب خروجی	TSS	TN
R^2	۰/۷۹۱	۰/۶۱۶	۰/۵۳۱
RMSE	۰/۰۶۲	۰/۱۸۰	۰/۴۴۰
NSE	۰/۶۷۰	۰/۴۸۷	۰/۳۱۲
MAE	۰/۰۴۷	۰/۱۹۱	۰/۲۱۴
MBE	-۰/۰۲۵	۰/۱۳۲	۰/۱۵۵
NRMSE (%)	۴/۲۱۷	۳۲/۷۲۷	۵/۵۰۸

به منظور ارزیابی کارایی مدل شبیه‌سازی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های نش- ساتکلیف (NSE)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و همچنین ضریب تبیین (R^2) که از رایج‌ترین معیارها در غالب مطالعات هیدرولیکی و هیدرولوژی می‌باشند، استفاده شده است. همچنین معیارهای MAE، MBE و NRMSE نیز محاسبه شده‌اند. معیار R^2 ، ارتباط بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد ارتباط قوی‌تر و نتایج شبیه‌سازی قابل قبول‌تر است.

ضریب NSE معیاری برای ارزیابی هیدرولوژیک مدل بوده و دامنه‌ای بین یک و منفی بی‌نهایت دارد، بهترین حالت زمانی است که برابر یک باشد. معیارهای RMSE، MAE، MBE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری است و در حالت ایده‌آل باید برابر با صفر باشند. مقادیر مثبت یا منفی چشمگیر آنها به ترتیب نشان‌دهنده برآورد بیشتر



مقایسه با مقادیر مشاهداتی، از معیارهای آماری R^2 ، RMSE، MAE، ضریب NSE، MBE و NRMSE استفاده شده است (جدول ۶).

معیار R^2 برای میانگین و حداکثر بارش به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۵ محاسبه شده است. مقادیر RMSE و MAE برای میانگین بارش به ترتیب برابر با ۰/۱۷ و ۰/۱۰ و برای حداکثر بارش به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۶۷ هستند. همچنین مقادیر شاخص NSE برای میانگین و حداکثر بارش به ترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۰/۸۹ است. همچنین مقادیر MBE و NRMSE در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی، مدل تغییر اقلیم CanESM2 عملکرد قابل قبولی را در پیش‌بینی مقادیر بارش از خود نشان داده است.

در گام بعدی، شبیه‌سازی بارش بر اساس مدل واسنجی شده در دوره‌ی آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) انجام گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به این که در این پژوهش، هدف، بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه شهری بوده، لذا، جهت برآورد سیلاب، از حداکثر بارش ۲۴ ساعته استفاده شده است. در این راستا، برای شبیه‌سازی متغیر بارش حوضه مطالعاتی در دوره‌ی آتی، از سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 استفاده شده است.

جدول (۶): معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل پیش‌بینی تغییر اقلیم CanESM2 برای بارش (دوره‌ی آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۵)

مقدار (میانگین)	مقدار (حداکثر)	معیارهای آماری
۰/۹۹	۰/۹۵	R^2
۰/۱۷	۰/۷۴	RMSE
۰/۱۰	۰/۶۷	MAE
۰/۹۷	۰/۸۹	NSE
۰/۰۸	۰/۳۳	MBE
۱۳/۲۲	۵/۲۰	NRMSE (%)

دلیل انتخاب این دو سناریو، لحاظ شرایط خوش‌بینانه و بدبینانه در ویژگی آن‌ها است. شکل ۴، مقایسه بین مقادیر میانگین و حداکثر بارش روزانه در دوره‌ی پایه و سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-الف مشخص است، میانگین بارش‌ها در دوره‌ی آتی

جهت اعتبارسنجی مدل، مشخصات مدل شبیه‌سازی شده نهایی گشته و آماده برای اجرای مدل در رخدادهای مورخ ۲۰ بهمن ۱۳۹۷ و ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۸ شد. نتایج معیارهای ارزیابی در اعتبارسنجی مدل در جدول ۴ آمده است

جدول (۴): معیارهای آماری ارزیابی کارایی مدل در حالت اعتبارسنجی مربوط به رخداد ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۸

معیارهای آماری	دبی رواناب خروجی	TSS	TN
R^2	۰/۸۳۷	۰/۶۳۹	۰/۶۳۳
RMSE	۰/۰۳۷	۰/۱۶۰	۰/۳۸۰
NSE	۰/۷۷۷	۰/۵۶۲	۰/۳۶۹
MAE	۰/۰۳۲	۰/۱۸۵	۰/۱۹۳
MBE	-۰/۰۲۰	۰/۱۲۸	۰/۱۴۱
NRMSE (%)	۲/۴۶	۲۸/۵۷۱	۴/۴۷۲

شبیه‌سازی تغییر اقلیم

در استفاده از مدل تغییر اقلیم CanESM2 ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی توسط مدل SDSM صورت پذیرفته است. متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی بارش با بیشترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی در منطقه مطالعاتی توسط مدل SDSM محاسبه شده است. به همین منظور، از بین ۲۶ پارامتر بزرگ‌مقیاس و توابع مختلف آن‌ها، چهار پارامتر انتخاب شد (جدول ۵).

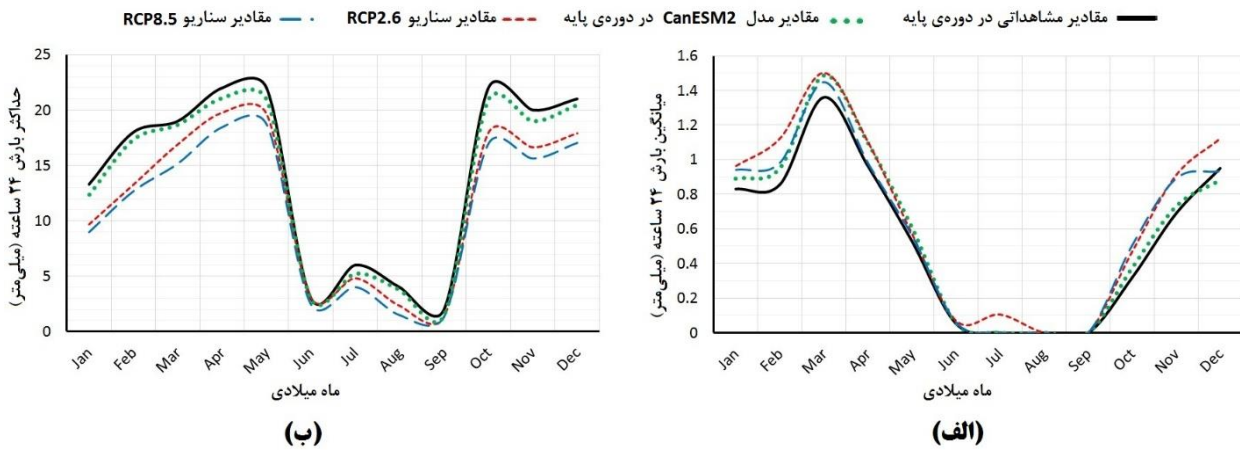
جدول (۵): پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب در مدل SDSM جهت ریزمقیاس‌نمایی بارش

پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب	همبستگی جزئی
سرعت نصف‌النهاری سطحی	۰/۰۳۳
سرعت مداری سطحی	۰/۰۴۵
ارتفاع ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال	۰/۵۲۳
میانگین دما در ارتفاع ۲ متری	۰/۲۲۴

بایستی توجه داشت که بارش متغیری است گسسته و می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی در حوضه تغییر یابد. همچنین، حساسیت و تغییرات بیشتری نسبت به متغیر پیوسته‌ای مانند دما نسبت به زمان دارد. برای ارزیابی توانایی مدل CanESM2 در پیش‌بینی مقادیر بارش و

درصد کاسته شده و بر همین اساس احتمال کاهش حجم سیلاب در بارش‌های حدی در حوضه مطالعاتی نیز دور از انتظار نیست.

در دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 (۲۰۲۰-۲۰۴۰) نه‌تنها کاهش نداشته، بلکه به ترتیب ۲۱ و ۱۱ درصد نیز افزایش داشته است. همچنین، از میزان حداکثر بارش ۲۴ ساعته در دو سناریوی مذکور در آینده به ترتیب ۱۷ و ۲۳



شکل (۴): مقایسه میانگین بارش روزانه مشاهده‌ای (الف) و حداکثر بارش روزانه مشاهده‌ای (ب) با مدل، در دوره‌های پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) و آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰)، سناریوهای RCP8.5 و RCP2.6

شدت-مدت- فراوانی (IDF) طبق روش قهرمان و آبخضر (۳) در تداوم ۶ تا ۳۶۰ دقیقه و دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال تهیه شده است. بعد از ورود اطلاعات هیدرولیکی و هیدرولوژیک حوضه، مدل با استفاده از شبیه‌ساز بارش و رواناب SWMM مورد تحلیل کمی و کیفی قرار گرفت.

الگوریتم‌های فراتکاملی

پس از تعریف توابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری، از الگوریتم‌های فراتکاملی بهینه‌ساز ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) جهت بهینه‌سازی در ترکیب نوع و مساحت LID ها استفاده شده است. سه تابع هدف با متغیرهای نوع سازه و مساحت اشغال شده توسط LID ها در سطح حوضه، به الگوریتم‌های چندهدفه معرفی شد. شکل ۵، جبهه‌ی پارتو خروجی از الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO را بعد از همگرا شدن به تصویر کشیده است. در این شکل، جبهه پارتو در هر دو الگوریتم از ۱۰۰ جواب بهینه با توجه به نوع هدف در ۲۰۰ تکرار و زمان نزدیک به ۱۸ ساعت در NSGA-II و ۱۵ ساعت در MOPSO، تولید شده است.

شبیه‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیک حوضه

جهت تعیین میزان ورودی بارش به مدل، از بارش زمان تداوم دو برابر زمان تمرکز حوضه استفاده شده است. با توجه به میزان زمان تمرکز محاسباتی از روش‌های SCS و کریچ، این مقدار در حوضه مطالعاتی حاضر بین ۴۶ تا ۶۸ دقیقه محاسبه گردید. لذا مشخصات بارش با تداوم ۲ ساعته با دوره بازگشت ۱۰ ساله در نظر گرفته شده است تا دورترین نقاط حوضه نیز بتوانند در شکل‌گیری هیدروگراف سیلاب خروجی از حوضه مشارکت داشته باشند. جهت استخراج مقادیر بارندگی با گام زمانی ۵ دقیقه و تعیین رگبار طرح، ابتدا مقدار شدت بارش ۲ ساعته با دوره

بازگشت ۱۰ ساله از منحنی شدت-مدت-فراوانی تهیه شده برای منطقه در دوره‌ی پایه و دوره‌ی آتی، قرائت و سپس با استفاده از الگوی توزیع بارش به روش مثلثی، الگوی بارش ۲ ساعته منطقه تهیه شد. به‌منظور تهیه منحنی شدت-مدت-فراوانی در دوره‌های پایه و آتی، پس از شبیه‌سازی بارش در دوره‌ی زمانی آینده، مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته در هر دو دوره‌ی پایه و آتی و برای هر دو سناریو در دوره‌ی آتی استخراج شده و مقادیر منحنی

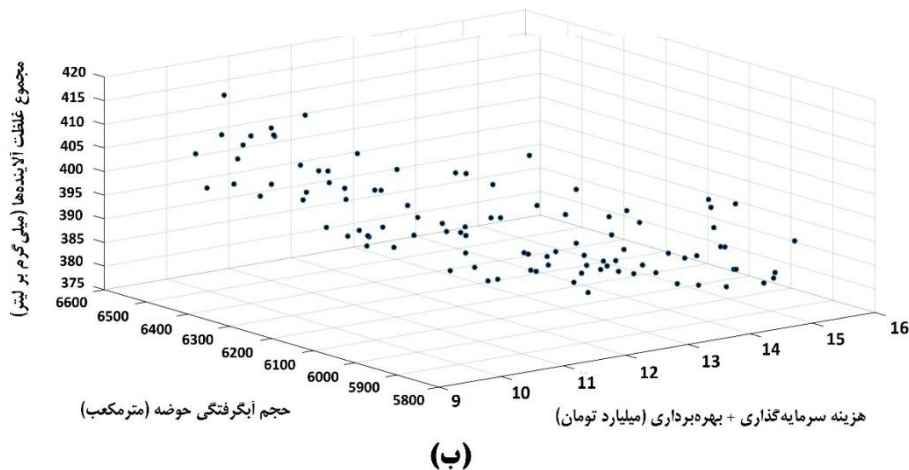
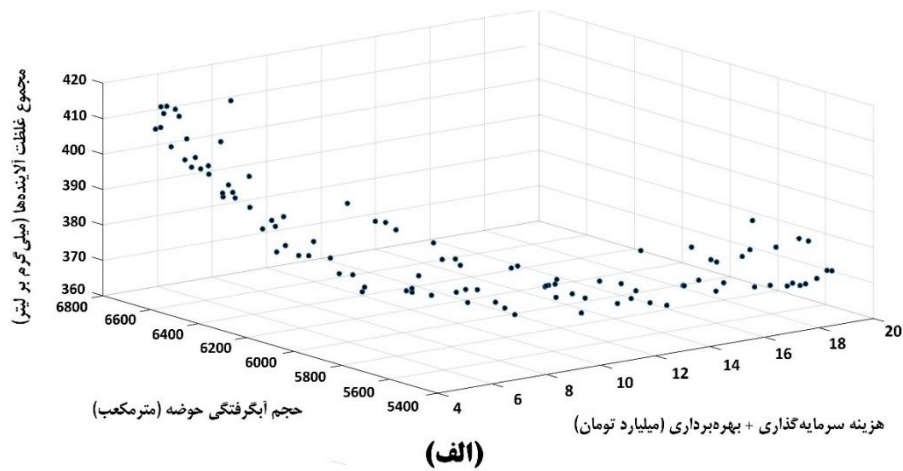


ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه

پس از تولید راه‌حل‌ها توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO، نیاز به ارزیابی آن‌ها است. بدین منظور، یکی از جواب‌های جبهه پارتو تولید شده از الگوریتم‌ها، انتخاب شده و با تعریف سناریوهای (یا در واقع راهکارهای) مربوط به حالت بدون LID و اجرای LID، عملکرد الگوریتم‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که به علت عدم امکان اندازه‌گیری آلاینده سرب (Pb) در نمونه‌ها توسط آزمایشگاه، این آلاینده مورد واسنجی قرار نگرفت. لذا در این تحقیق، مقادیر سرب بر اساس خروجی مدل واسنجی شده می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۷، میزان کمی و کیفی سیلاب و هزینه کلی ساخت را برای هفت سناریو و حالت بدون اجرای LID نشان می‌دهد. در ردیف اول که بدون اجرای LID در سطح حوضه است، کمیت و کیفیت سیلاب در بیشترین مقدار خود قرار دارند. در بین سناریوها، با توجه به درصد مساحت LID اجرا شده در حوضه، مقادیر فاکتورهای مقایسه در جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های چندهدفه (سناریوهای ۷ و ۸)، نسبت به دیگر سناریوها از نظر کلی تأمین و ارضاء هم‌زمان توابع هدف، عملکرد بهتری داشته‌اند. همچنین، در بین سناریوهای ۷ و ۸، الگوریتم NSGA-II (سناریوی ۷) نسبت به الگوریتم MOPSO مقادیر بهینه‌تری را ارائه نموده است. به عبارت دیگر، در اجرای سازه‌های کنترل و مهار سیلاب به‌صورت ترکیبی با مساحت اشغال‌شده ۱۷ درصد از سطح حوضه در مقابل اجرای ۲۰ درصد از یک سازه مستقل در سطح حوضه (سناریوهای ۲ تا ۶)، مقادیر فاکتورهای مقایسه مربوط به سناریوهای هفتم و هشتم نسبت به دیگر سناریوها در مجموع مناسب‌تر و بهتر است.

انتخاب ۲۰۰ تکرار در جهت رسیدن به رویه پارتو، بر مبنای همگرایی و عدم تغییر محسوس در مقادیر راه‌حل‌های بهینه می‌باشد؛ که همراستا با مطالعات اورایی زارع و همکاران (۱۴) و همچنین زحمتکش و همکاران (۱۶) است.

هر یک از راه‌حل‌های موجود در رویه پارتو، به‌عنوان جواب‌هایی نامغلوب محسوب می‌شوند که توسط هیچ جواب دیگری مغلوب نمی‌شوند و در تأمین اهداف موردنظر مناسب‌ترین راه‌حل در نوع خود می‌باشند. همچنین، دامنه تغییرات مقادیر توابع هدف که از الگوریتم چندهدفه ژنتیک به‌دست‌آمده نسبت به الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات وسیع‌تر بوده (به عبارتی، دامنه تغییرات NSGA-II دامنه تغییرات الگوریتم MOPSO را پوشش می‌دهد) و در مورد استخراج راه‌حل‌ها و تأمین سه تابع هدف توانسته عملکرد بهتری داشته باشد. به‌طوری که در مورد تابع هزینه در الگوریتم چندهدفه ژنتیک حد پایین هزینه تقریباً نصف حد پایین هزینه در الگوریتم چندهدفه ذرات بوده و توانسته در فضای بیشتری از مقادیر، جستجو و بهینه‌سازی انجام دهد و در این پژوهش برتری خود را از نظر تولید راه‌حل‌ها در مقابل الگوریتم MOPSO نشان دهد. از طرف دیگر، الگوریتم MOPSO از نظر زمان اجرای برنامه برتری ۱۵ درصدی نسبت به NSGA-II داشته و CPU-Time مناسب‌تری دارد.



شکل (۵): رویه‌ی پارتو در دوره‌ی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) حاصل از الگوریتم‌های NSGA-II (الف) و MOPSO (ب)

الگوریتم MOPSO (سناریوی هشتم) با سناریوی پنجم، با صرفه‌جویی حدوداً ۴۰ درصد در هزینه سرمایه‌گذاری، ۷/۵ درصد کاهش عملکرد در کنترل کمیت سیلاب در مقابل تقریباً ۳/۵ درصد بهبود عملکرد در کنترل غلظت هر یک از آلاینده‌های TSS و Pb و ۴/۷ درصد افزایش آلاینده TN داشته است؛ که با وجود کاهش هزینه ۴۰ درصدی و سطح اشغال ۳ درصد کمتر در حوضه نیز این الگوریتم عملکرد قابل قبولی دارد. همچنین، با اجرای راهکار هفتم نسبت به حالت بدون اجرای LID، مقادیر حجم آب‌گرفتنی و غلظت آلاینده‌های TSS، TN و Pb به ترتیب به میزان ۲۱/۲، ۵۹/۱، ۱۶/۶ و ۲۹/۷ درصد کاهش می‌یابند. برای راهکار هشتم نیز این مقادیر به ترتیب ۲۰/۳ و ۵۸/۴، ۱۲/۷ و ۲۸/۷ درصد کاهش داشتند.

به‌طور مثال، در مقایسه سناریوی هفتم (الگوریتم NSGA-II) با راهکار پنجم می‌توان گفت که راهکار هفتم با صرف هزینه تقریباً ۴۲ درصد کمتر از راهکار پنجم (استفاده تنها از روکش نفوذپذیر) و با ۳ درصد سطح اشغال شده کمتر توسط LID ها در حوضه، ۶/۳ درصد از عملکرد آن صرفاً در بحث کمیت سیلاب کاسته شده و از طرفی نیز ۵ درصد در کاهش غلظت TSS، بدون تغییر در TN و ۴/۸ درصد در غلظت Pb نیز بهبود داشته است. این تغییرات در عملکرد، نسبت به صرفه‌جویی و کاهش هزینه ۴۲ درصدی و کاهش سطح اشغال شده ۳ درصد (کاهش هزینه خرید زمین) در کل حوضه می‌تواند بسیار مناسب باشد. در مقایسه



جدول (۷): نتایج فاکتورهای مقایسه شده در بین هفت راهکار تعریف شده

ردیف	راهکار	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری (BT)	حجم آب‌گرفتنی در حوضه (m^3)	غلظت TSS (mg/L)	غلظت TN (mg/L)	غلظت Pb (mg/L)	سطح اشغال شده توسط LID (%)
۱	بدون اجرای LID	۰	۷۲۷۵	۵۳۲/۴۲	۸/۳۷	۱۴۹/۳۶	۰
۲	حوضچه نگهداشت	۲۱/۴۴۱	۵۵۴۵	۲۲۵/۹۷	۶/۹۶	۱۰۸/۹۰	۲۰
۳	باغچه باران زاد	۱۴/۷۹۵	۵۸۴۷	۲۲۸/۱۷	۷/۱۵	۱۰۹/۵۶	۲۰
۴	ترانشه نفوذ	۱۸/۲۴۲	۶۳۰۵	۲۱۴/۲۹	۶/۸۸	۱۰۳/۲۹	۲۰
۵	روکش نفوذپذیر	۲۳/۲۸۵	۵۳۹۴	۲۲۹/۰۵	۶/۹۸	۱۱۰/۳۷	۲۰
۶	جوی باغچه	۶/۹۷	۶۶۳۴	۲۰۶/۱۸	۷/۰۵	۹۹/۴۲۳	۲۰
۷	NSGA-II	۱۳/۴۴۷	۵۷۳۳	۲۱۷/۶۶	۶/۹۸	۱۰۴/۹۹	۱۷
۸	MOPSO	۱۳/۹۲۹	۵۸۰۱	۲۲۱/۵۷	۷/۳۱	۱۰۶/۴۲	۱۷

BT = میلیارد تومان، TSS = کل مواد جامد معلق، TN = نیتروژن کل، Pb = سرب

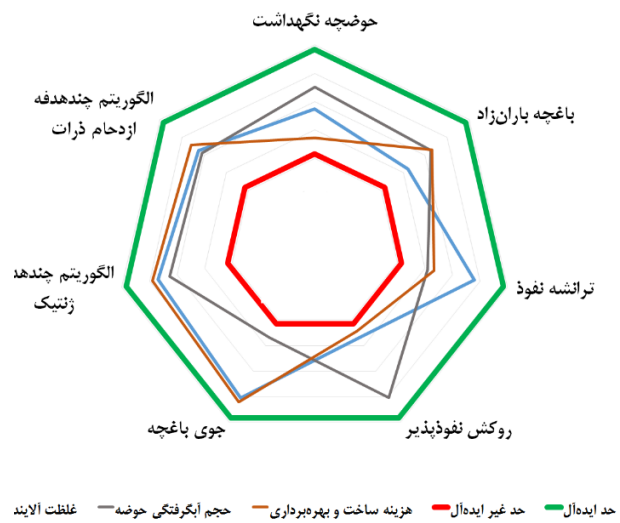
غیرایده‌آل قرار دارند. مشخص است که در راهکارهای الگوریتم‌ها، هر سه تابع هدف به‌طور هم‌زمان در سطوح متعادل و بالایی قرار دارند

ارزیابی الگوریتم‌های فراتکاملی در شرایط تغییر اقلیم

جدول ۸، جمع‌بندی مقادیر کمی و کیفی سیلاب در حالات مختلف بوده و مقایسه‌ای بین دوره‌ی پایه و آتی همراه با نتایج اجرای LID ها با سطح اشغال ۱۷ درصد در حوضه، که بهینه شده توسط الگوریتم‌های فراتکاملی بوده، را نشان می‌دهد. دو ستون آخر این جدول نیز مقادیر درصد اختلاف بین دوره‌ی پایه در حالت بدون اجرای LID ها و حالت بهینه اجرای LID ها توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO را نشان می‌دهند. نتایج بیانگر این نکته است که در منطقه مطالعاتی، اجرای LID ها تأثیر بیشتری در کاهش غلظت آلاینده‌ها در خروجی حوضه (کیفیت سیلاب) نسبت به کمیت سیلاب دارد.

شکل ۷، عملکرد الگوریتم‌های فراتکاملی در دوره‌ی پایه را نشان می‌دهد. همچنین، هیدروگراف‌های رواناب سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، جهت نمایش شرایط تغییر اقلیم گنجانده شده است. با توجه به این شکل، مقادیر دبی در حالت RCP2.6 از حالت RCP8.5 در قسمت‌های بالایی بازوهای بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف‌ها بیشتر است. با توجه به شکل ۷ و جدول ۸، نتایج نشان از کاهش ۶ و ۷ درصد مقادیر دبی به ترتیب در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، نسبت به دوره‌ی پایه دارد.

شکل ۶، مقایسه راهکارهای ارائه شده در ارتباط با توابع هدف هزینه، حجم آب‌گرفتنی و غلظت آلاینده‌ها را نشان می‌دهد. این شکل به شناسایی و مقایسه عملکرد هر یک از توابع هدف در راهکارهای مختلف کمک می‌کند.



شکل (۶): مقایسه راهکارهای ارائه شده نسبت به توابع هدف هزینه، حجم آب‌گرفتنی و غلظت آلاینده‌ها

حلقه بیرونی این هفت‌ضلعی، حد ایده‌آل بوده و حلقه درونی، حد غیرایده‌آل و رأس‌های آن، هر یک از هفت راهکار، به‌استثنای راهکار اول (بدون اجرای LID) را نشان می‌دهد. راهکارها با عملکرد مناسب در سطوح بالاتر قرار

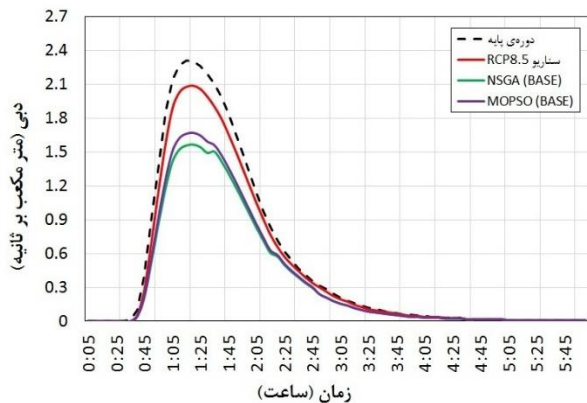
دارند و به حالت ایده‌آل نزدیک‌ترند. راهکارهای با عملکرد کمتر به مرکز شکل نزدیک‌تر هستند و در وضعیت

آبگرفتنگی سیلاب در حوضه و افزایش غلظت آلاینده‌های TSS، TN و Pb در حوضه داشته که تأییدی بر نتایج این تحقیق است.

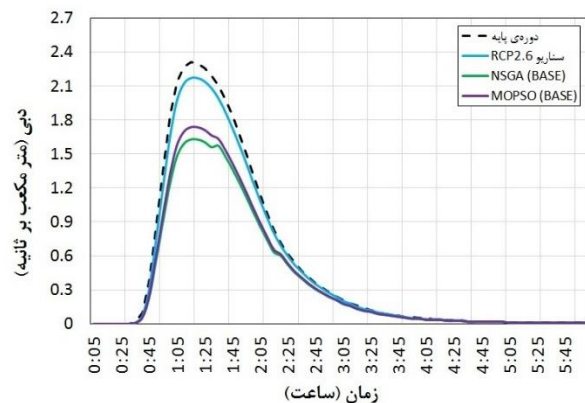
مطالعه ژو و همکاران (۱۷) در مورد اثرگذاری تغییر اقلیم و توسعه شهری بر میزان رواناب، و همچنین پژوهش علمداری و همکاران (۲)، با موضوع تأثیر تغییر اقلیم بر مقادیر کمی و کیفی سیلاب نیز نشان از کاهش حجم

جدول (۸): خلاصه و مقایسه نتایج کمی و کیفی سیلاب حوضه

وضعیت پایه	وضعیت آتی (RCP2.6)	وضعیت آتی (RCP8.5)	راهکار NSGA-II در دوره‌ی پایه (۴)	راهکار MOPSO در دوره‌ی پایه (۵)	درصد کاهش بین (۱) و (۴)	درصد کاهش بین (۱) و (۵)	کمیت و کیفیت سیلاب
۰	۰	۰	۱۳/۴۴۷	۱۳/۹۲۹	-	-	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری (BT)
۷۲۷۵	۶۳۳۰	۶۱۶۳	۵۷۳۳	۵۸۰۱	۲۱/۲	۲۰/۳	حجم آب‌گرفتنگی داخل حوضه (m ³)
۱۱۱۴۹	۱۰۴۵۹	۱۰۳۱۹	۹۷۵۶	۹۹۱۴	۱۲/۵	۱۱/۱	حجم سیلاب خروجی (m ³)
۱/۲۵۵	۱/۱۸۲	۱/۱۶۶	۱/۱۲	۱/۱۳	۱۱/۶	۱۰/۰	میانگین دبی خروجی (m ³ /s)
۵۳۲/۴۲	۵۷۲/۲۶	۵۸۱/۰۰	۲۱۷/۶۶	۲۲۱/۵۷	۵۹/۱	۵۸/۴	مقدار میانگین خروجی TSS (mg/L)
۸/۳۷	۸/۹۵	۹/۰۸	۶/۹۸	۷/۳۱	۱۶/۶	۱۲/۷	مقدار میانگین خروجی TN (mg/L)
۱۴۹/۳۶	۱۶۰/۲۹	۱۶۲/۶۸	۱۰۴/۹۹	۱۰۶/۴۲	۲۹/۷	۲۸/۷	مقدار میانگین خروجی Pb (mg/L)



(ب)



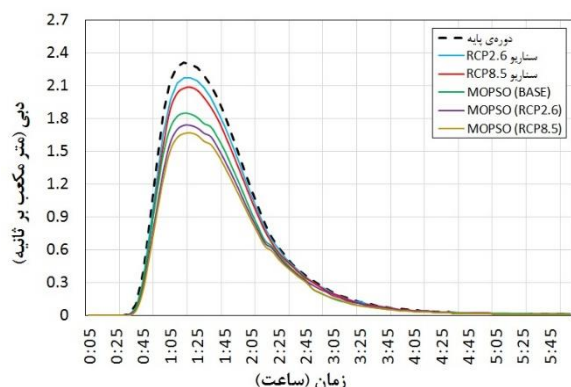
(الف)

شکل (۷): مقایسه هیدروگراف رواناب در دوره‌ی آتی و در شرایط اجرای LID ها با دوره‌های پایه و آتی در حالت بدون اجرای LID:

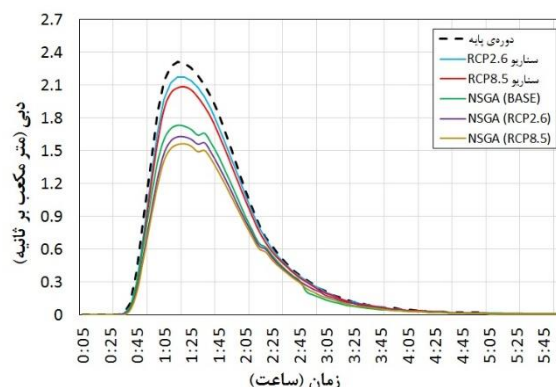
(الف) سناریوی RCP2.6 و (ب) سناریوی RCP8.5

(شکل ۸) دیده می‌شود. از طرفی، با مقایسه دو تصویر الف و ب این شکل و نتایج جدول ۸، می‌توان دریافت که الگوریتم NSGA-II در مقایسه با الگوریتم MOPSO در کنترل کمیت سیلاب عملکرد بهتری داشته است.

در شکل ۸، عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌ساز چندهدفه ژنتیک و ازدحام ذرات در شرایط پایه و تغییر اقلیم نشان داده شده است. با توجه به اختلاف هیدروگراف‌ها در دو حالت پایه و آتی و در شرایط بدون اجرای LID ها (شکل ۷) به تناسب نیز همین اختلاف در شرایط اجرای LID ها

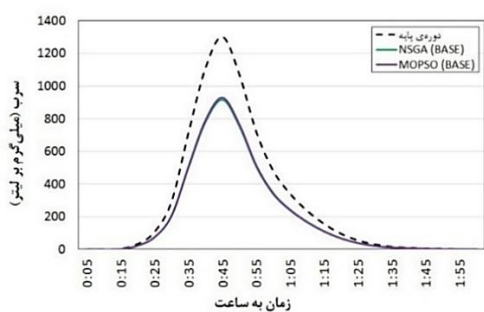


(ب)

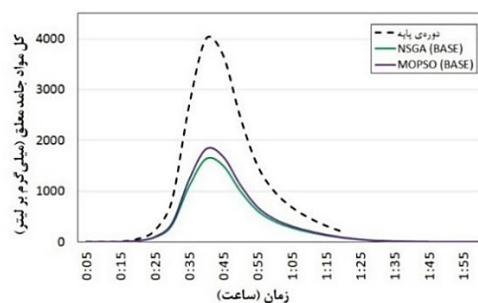


(الف)

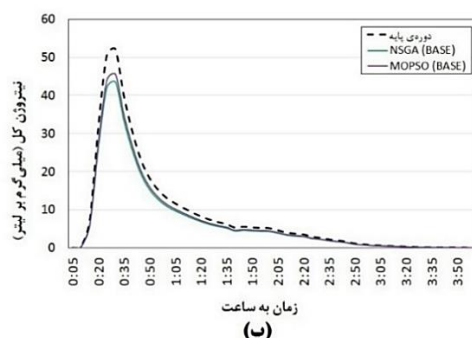
شکل (۸): مقایسه هیدروگراف رواناب در دوره‌ی پایه و آبی در شرایط اجرای LID ها با دوره‌های پایه و آبی در حالت بدون اجرای LID ها: الف) الگوریتم NSGA-II و ب) الگوریتم MOPSO



(ب)



(الف)



(ب)

شکل (۹): مقایسه غلظت آلاینده‌های خروجی در دوره‌ی پایه در شرایط اجرای LID ها در دوره‌های پایه و آبی در حالت بدون اجرای LID

الف) آلاینده TSS، ب) آلاینده Pb و پ) آلاینده TN

و اعمال راهکارهای حاصل از الگوریتم‌های فراتکاملی (سناریوهای ۷ و ۸) در دوره‌ی پایه، تغییرات در آلاینده‌های TSS، TN و Pb در الگوریتم چندهدفه ژنتیک به ترتیب ۵۹/۱، ۱۶/۶ و ۲۹/۷ درصد کاهش و در الگوریتم چندهدفه

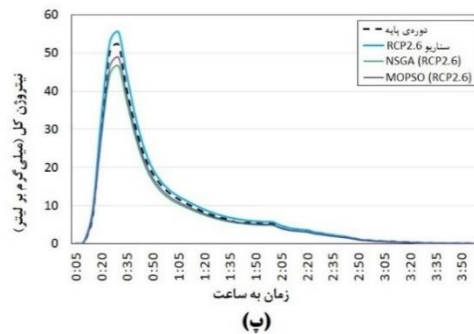
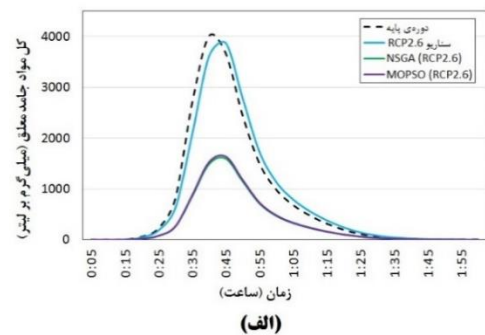
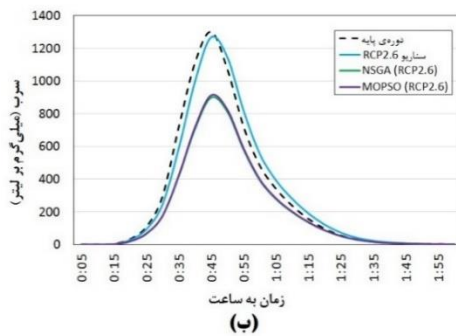
نتایج غلظت خروجی کیفیت سیلاب مربوط به سه آلاینده TSS، Pb و TN در دوره‌ی پایه در شکل ۹ نشان داده شده و عملکرد مناسب الگوریتم‌های تکاملی در زمینه کنترل کیفی سیلاب نیز به تصویر کشیده شده است. با اجرا

جهت تولید ترکیب LID ها منجر به کاهش قابل ملاحظه آب‌گرفتگی و تخلیه آلاینده‌ها در آب‌های پذیرنده گردید که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.

شکل ۱۰، عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO در مواجهه با شرایط تغییر اقلیم (دورهی آتی) تحت سناریوی RCP2.6 را نشان می‌دهد. با اجرا و اعمال راهکارهای حاصل از الگوریتم‌های فراتکاملی، تغییرات در آلاینده‌های TSS، TN و Pb نسبت به دورهی پایه در الگوریتم چندهدفه ژنتیک به ترتیب برابر با ۵۹/۵، ۱۷/۴ و ۳۰/۱ درصد کاهش و در الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات نیز به ترتیب ۵۵/۲، ۱۳/۴ و ۲۹/۷ درصد کاهش است، که نسبت به عملکرد الگوریتم‌های فراتکاملی در دورهی پایه و در بحث کیفیت سیلاب تا حدودی نیز با افزایش کارایی همراه بوده است. در بحث کمیت سیلاب، حجم آب‌گرفتگی و حجم سیلاب خروجی نیز عملکردی مشابه با الگوریتم‌های فراتکاملی در دورهی پایه داشته است (جدول ۹).

ازدحام ذرات نیز به ترتیب ۵۴/۵۲، ۱۲/۷ و ۲۸/۷ درصد کاهش است و در بحث کمیت سیلاب، حجم آب‌گرفتگی و حجم سیلاب خروجی نیز در الگوریتم NSGA-II به ترتیب ۲۱/۲ و ۱۲/۵ درصد کاهش و در الگوریتم MOPSO نیز به ترتیب ۲۰/۳ و ۱۱/۱ درصد کاهش برآورد شده است (جدول ۸) که نشان از برتری NSGA-II نسبت به MOPSO دارد. همچنین، بر اساس جدول ۸، تغییرات آلاینده‌ها در دورهی آتی نسبت به حالت پایه به میزان قابل ملاحظه‌ای نبوده، به طوری که در شرایط تغییر اقلیم، غلظت آلاینده‌ها به ترتیب به طور متوسط ۷ تا ۹ درصد افزایش داشته است.

پژوهش جیا و همکاران (۱۱) در مورد استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در جهت کنترل کمی سیلاب و ارائه نتایج مناسب ناشی از بکارگیری الگوریتم ژنتیک همسو با نتایج این پژوهش می‌باشد. همچنین، در تحقیق کرمی و همکاران (۴)، ارائه راه‌حل توسط الگوریتم NSGA-II در

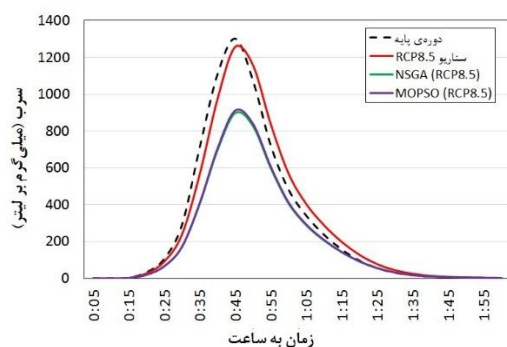


شکل (۱۰) مقایسه غلظت آلاینده‌های خروجی در دورهی آتی (RCP2.6) و شرایط اجرای LID ها در دوره‌های پایه و آتی در حالت بدون اجرای LID ها: الف) آلاینده TSS، ب) آلاینده Pb و پ) آلاینده TN

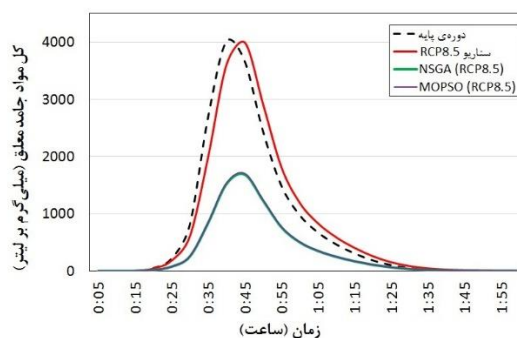
تحت سناریوی RCP8.5 را نشان می‌دهد. با اجرا و اعمال راهکارهای حاصل از الگوریتم‌های چندهدفه ژنتیک و

شکل ۱۱، عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO در مواجهه با شرایط تغییر اقلیم (دورهی آتی)

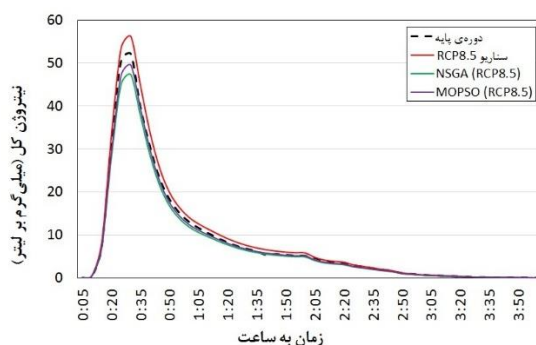
کمیت سیلاب، حجم آب‌گرفتگی و حجم سیلاب خروجی نیز عملکردی مشابه با الگوریتم‌های فراتکاملی در دوره‌ی پایه داشته است. به عبارت دیگر، LID های اجرا شده در حالت پایه علاوه بر اینکه قادر به کنترل کمی سیلاب متناسب با دوره‌ی پایه بوده، بلکه توانایی کنترل کیفی سیلاب با عملکرد حداقل برابر یا بهتر از دوره‌ی پایه را دارا می‌باشند.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل (۱۱): مقایسه غلظت آلاینده‌های خروجی در دوره‌ی آتی (RCP8.5) و شرایط اجرای LID ها در دوره‌های پایه و آتی در حالت بدون اجرای LID ها: (الف) آلاینده TSS، (ب) آلاینده Pb و (پ) آلاینده TN

می‌شود. لذا با افزایش غلظت ۷ تا ۹ درصدی آلاینده‌ها در حوضه، عملکرد LID ها نیز به‌طور متوسط ۱ تا ۶ درصد در دوره‌ی آتی و در بحث کیفیت سیلاب افزایش داشته است. خلاصه نتایج جداول ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که در دوره‌ی آتی، با کاهش بارش‌های حدی، غلظت آلاینده‌ها نیز افزایش خواهد داشت. این افزایش غلظت در دوره‌ی آتی به‌گونه‌ای است که می‌توان انتظار داشت با اجرای LID ها در شرایط پایه و در صورت بهره‌برداری و نگهداری مناسب، عملکرد آن‌ها در دوره‌ی آتی (شرایط تغییر اقلیم) نیز مناسب باشد و در کنترل و کاهش کمی و کیفی سیلاب نسبت به دوره‌ی

ازدحام ذرات تغییرات در آلاینده‌های TN، TSS و Pb نسبت به دوره‌ی پایه در الگوریتم چندهدفه ژنتیک به ترتیب ۵۹/۶، ۱۷/۶ و ۳۰/۹ درصد کاهش و در الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات نیز به ترتیب ۵۵/۸، ۱۳/۵ و ۳۰/۴ درصد کاهش است، که نسبت به عملکرد الگوریتم‌های فراتکاملی در دوره‌ی پایه و همچنین سناریوی RCP2.6 و در بحث کیفیت سیلاب با افزایش کارایی همراه بوده است. در بحث

در جداول ۹ و ۱۰، عملکرد راه‌حل‌های ارائه شده جهت اجرای LID ها توسط الگوریتم‌های فراتکاملی در شرایط پایه و آتی آورده شده است. نتایج در بحث کمیت سیلاب نشان از این دارد که با کاهش رواناب، عملکرد LID ها تغییری نکرده است و در دو حالت پایه و تغییر اقلیم کارایی یکسانی دارند. همچنین، در بحث کیفیت سیلاب، با توجه به این که کاهش رواناب در دوره‌ی آتی در سطح حوضه رخ داده است در نتیجه، بر اساس نتایج، در بخش تغییر اقلیم، افزایش غلظت به‌طور متوسط ۷ تا ۹ درصد پیش‌بینی

پایه بتوانند عملکرد حداقل یکسان و بلکه بهتری داشته باشند.

جدول (۹): عملکرد راه‌حل ارائه‌شده توسط الگوریتم NSGA-II در شرایط پایه و تغییر اقلیم نسبت به حالت بدون اجرای LID ها

درصد کاهش متغیرهای کمی و کیفی سیلاب در الگوریتم NSGA-II			دوره‌ی پایه	متغیر
سناریوی RCP8.5 دوره‌ی ۲۰۲۰-۲۰۴۰	سناریوی RCP2.6 دوره‌ی ۲۰۲۰-۲۰۴۰	سناریوی RCP8.5 دوره‌ی ۲۰۲۰-۲۰۴۰	۲۰۰۵-۱۹۸۵	
۲۱/۲	۲۱/۲	۲۱/۲	۲۱/۲	حجم آب‌گرفتگی در حوضه (m^3)
۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	حجم کل سیلاب خروجی (m^3)
۵۹/۶	۵۹/۵	۵۹/۱	۵۹/۱	میانگین غلظت TSS خروجی (mg/L)
۱۷/۶	۱۷/۴	۱۶/۶	۱۶/۶	میانگین غلظت TN خروجی (mg/L)
۳۰/۹	۳۰/۱	۲۹/۷	۲۹/۷	میانگین غلظت Pb خروجی (mg/L)

جدول (۱۰): عملکرد راه‌حل ارائه‌شده توسط الگوریتم MOPSO در شرایط پایه و تغییر اقلیم نسبت به حالت بدون اجرای LID ها

درصد کاهش متغیرهای کمی و کیفی سیلاب در الگوریتم MOPSO			دوره‌ی پایه	متغیر
سناریوی RCP8.5 دوره‌ی ۲۰۲۰-۲۰۴۰	سناریوی RCP2.6 دوره‌ی ۲۰۲۰-۲۰۴۰	سناریوی RCP8.5 دوره‌ی ۲۰۲۰-۲۰۴۰	۱۹۸۵-۲۰۰۵	
۲۰/۳	۲۰/۳	۲۰/۳	۲۰/۳	حجم آب‌گرفتگی در حوضه (m^3)
۱۱/۱	۱۱/۱	۱۱/۱	۱۱/۱	حجم کل سیلاب خروجی (m^3)
۵۵/۸	۵۵/۲	۵۴/۵	۵۴/۵	میانگین غلظت TSS خروجی (mg/L)
۱۳/۵	۱۳/۴	۱۲/۷	۱۲/۷	میانگین غلظت TN خروجی (mg/L)
۳۰/۴	۲۹/۷	۲۸/۷	۲۸/۷	میانگین غلظت Pb خروجی (mg/L)

از مدل‌سازی کمی و کیفی رواناب در حوضه مطالعاتی مؤید این مطلب است.

با توجه به هیدروگراف سیلاب خروجی در دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5، میزان حجم آب‌گرفتگی در حوضه، میانگین دبی خروجی و حجم سیلاب خروجی از حوضه نسبت به دوره‌ی پایه کاهش داشته‌اند. در بحث کیفیت سیلاب، میانگین مقادیر غلظت آلاینده‌های خروجی مورد بررسی شامل TSS، TN و Pb افزایش داشته است.

بر اساس نتایج حاصل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به-کارگرفته شده در این پژوهش، الگوریتم NSGA-II در تولید راه‌حل‌های بهینه دارای همگرایی بیشتری نسبت به الگوریتم MOPSO است. از طرفی، الگوریتم MOPSO زمان اجرای کمتری نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد. جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌ساز، هشت سناریو که شامل حالات بدون اجرای LID و اجرای پنج LID

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، عملکرد روش‌های نوین کنترل کمی و کیفی رواناب‌های شهری در وضعیت موجود و در مواجهه با تغییرات اقلیمی را مورد بررسی قرار داده است. مقادیر معیارهای ارزیابی در حالت واسنجی و اعتبارسنجی بین داده‌های مشاهداتی تهیه شده از چهار رخداد بارندگی و همچنین مقادیر شبیه‌سازی در مدل بارش- رواناب حوضه، نشان از عملکرد مناسب مدل دارد.

در بحث تغییر اقلیم، با توجه به پیش‌بینی تغییرات بارش در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰)، میزان میانگین بارش ۲۴ ساعته در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره‌ی پایه افزایش داشته است. در حالی که مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته در سناریوهای مذکور با کاهش روبرو شده است. این نشان از کاهش حجم سیلاب در حوضه در بارش‌های حدی دارد، که نتایج حاصل

کاهش حجم آب‌گرفتگی در داخل حوضه و کاهش در غلظت آلاینده‌های خروجی حوضه صورت پذیرفته است. جهت ارزیابی کارایی راهکار ارائه شده توسط الگوریتم‌های فراتکاملی بهینه شده با شرایط دوره‌ی پایه، در مواجهه با شرایط تغییر اقلیم در دوره‌ی آتی تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5، با اجرای LID های حاصل از الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO، در بحث کمیت سیلاب، عملکردی برابر با راهکارها در شرایط پایه دارد. در بحث کیفیت سیلاب نیز با اجرای الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO، غلظت آلاینده‌ها در دوره‌ی آتی نسبت به دوره‌ی پایه با افزایش رو به رو شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با اجرای LID های بهینه شده در دوره پایه، در صورت نگهداری و بهره‌برداری مناسب از این سازه‌ها، می‌توان انتظار عملکردی حداقل یکسان و بلکه بهتر در دوران آتی و در مواجهه با شرایط تغییر اقلیم از این سازه‌ها داشت.

مستقل با سطح اشغال ۲۰ درصد در حوضه و همچنین سناریوهای حاصل از راه‌حل‌های ارائه شده توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO، معرفی گردید. نتایج به‌صورت کلی حاکی از آن است که راهکارهای ارائه شده توسط الگوریتم‌های بهینه‌ساز، علیرغم اینکه دارای سطح اشغال کمتری در حوضه‌اند، ولی دارای مقادیر مناسب‌تری در تأمین توابع هدف و کنترل کمی و کیفی سیلاب‌اند. به طوری که توانسته‌اند با صرف هزینه‌ای به‌مراتب کمتر در ساخت و بهره‌برداری، مقادیر متعادل‌تری از توابع هدف نسبت به دیگر سناریوها ارائه نمایند. همچنین، مشخص گردید که در بین سناریوهای بهینه‌ساز، الگوریتم NSGA-II نسبت به الگوریتم MOPSO در جستجو و تولید راه‌حل‌های بهینه کارایی نسبتاً بهتری را از خود به نمایش گذاشته است. برای مقایسه الگوریتم‌ها در حالت شرایط مشابه از هر یک از آن‌ها راه‌حلی انتخاب شد. نتایج به نحوی بود که با صرف هزینه‌ای تقریباً یکسان در این الگوریتم‌ها،

منابع

- سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری کرج (فاوا) (۱۳۹۵).
- طاهری بهبهانی، م. ط.، بزرگ زاده، م. ۱۳۷۵. سیلاب‌های شهری. انتشارات مرکز مطالعات و تحقیقات شهری و معماری ایران، چاپ اول شرکت انتشارات علمی و فرهنگی.
- قهرمان، ب.، آبخضر، ح. ۱۳۸۳. اصلاح روابط شدت-مدت-فراوانی بارندگی در ایران. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، (۲): ۱۳-۱.
- کریمی، م.، اردشیر، ع. و بهزادیان، ک. (۱۳۹۴). مدیریت خطرپذیری آب‌گرفتگی و آلودگی ناشی از سیلاب شهری با استفاده از راهکارهای بهینه متداول و نوین. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۱(۳): ۱۰۰-۱۱۲.
- Alamdari, N., Sample, D.J., Steinberg, P., Ross, A.C., and Easton, Z.M. 2017. Assessing the effects of climate change on water quantity and quality in an urban watershed using a calibrated storm-water model. *Journal of Water* 9(7): 463-478. Doi: 10.3390/w9070464.
- Alamdari, N., Sample, D.J., Ross, A.C., and Easton, Z.M. 2019. Evaluating the impact of climate change on water quality and quantity in an urban watershed using an ensemble approach. *Journal of Estuaries and Coasts*, 43: 56-72. Doi: 10.1007/s12237-019-00649-4.
- Chen, P. Y., Tung, C. P. and Li, Y. H. 2017. Low impact development planning and adaptation decision-making under climate change for a community against pluvial flooding. *Water* 9: 756. Doi: 10.3390.9100756.
- Coello, A.C., Pulido, G.T. and Lechuga, M.S. 2004. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. In *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3): 256-279.
- Dudula, J., and Randhir, T. O. 2016. Modeling the influence of climate change on watershed systems: Adaptation through targeted practices. *Journal of Hydrology*, 541, 703-713. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.07.020.



- Hua, P., Yang, W., Qi, X., Jiang, S., Xie, J., Gu, X., Li, H., Zhang, J., and Krebs, P., 2020. Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118515.
- Jia, H. F, Yao, H. R., Tang, Y., Yu, S. L., Field, R. and Tafuri, A. N. 2015. LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China. *Journal of Environmental Management*, 149: 65-76.
- Li, F., Feng Duan, H., Yan, H. and Tao, T. 2015. Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: Framework development and case study. *Journal of Water Resources Management*, 29(7): 2125-2137.
- Liu, Y., Cibin, R., Bralts, V., Chaubey, I., Bowling, L., and Engel, B. 2016. Optimal selection and placement of BMPs and LID practices with a rainfall-runoff model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131: 441-448.
- Oraei Zare, S., Saghafian, B. and Shamsai, A. 2012. Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 4531-4542.
- Strecker, E., Sheffield, A., Cristina, C. and Leisenring, M. 2010. Stormwater BMP guidance tool. New Orleans.
- Zahmatkesh, Z., Burian, E., Karamouz, M., Tavakol-Davani, H. and Goharian, E. 2015. Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: Case study of New York City. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141. Doi: 10.1061/ (ASCE) IR.1943-4774.0000770.
- Zhou, Q., Leng, G., Su, J. and 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.
- Vo, D. P., Bhuiyan, M. A. and Vo, N. D. 2020. Climate change impact on urban flooding in Quynhon City, Vietnam. *Innovation for Sustainable Infrastructure, Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 54. Doi:10.1007/978-981-15-0802-8_164.



Optimizing Low Impact Development (LID) Methods in Urban Runoff Quantitative and Qualitative Control with Considering the Effects of Climate Change Using Multi-Objective Optimization Algorithms

Hamed Noori Khaje Balagh¹ and Sayed-Farhad Mousavi^{2*}

Abstract

Quantitative and qualitative management of urban runoff in part of Karaj city has been investigated using optimization of Low Impact Development (LID) methods under base period and climate change conditions. CanESM2 was employed with the base period (1985-2005) and future period (2020-2040) under the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios to investigate climate change impacts. Hydraulic and hydrological modeling was performed by Storm Water Management Model (SWMM) and was combined with Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm (MOPSO) and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II). Thirty-seven sub-catchments and five types of LIDS are introduced to the algorithms. Eight scenarios were defined to compare and evaluate the algorithms. Under the base period conditions, by applying NSGA-II and MOPSO algorithms, the flood volume in the catchment will decrease by 21.2% and 20.3%, total suspended solids (TSS) will increase by 59.1% and 58.4%, total nitrogen (TN) will increase by 16.6% and 12.7%, and lead (Pb) concentration will increase by 29.7% and 28.7%, respectively. Solution of the algorithms under climate change conditions gave similar flood values as the base conditions. In RCP2.6 scenario, TSS will decrease by 59.5% and 55.2%, respectively, and in RCP8.5 scenario, TSS will decrease by 59.6% and 55.8%, respectively. In RCP2.6 scenario, TN will decrease by 17.4% and 13.4%, respectively, and in RCP8.5 scenario, TN will decrease by 17.6% and 13.5%, respectively. Pb in RCP2.6 scenario will decrease by 30.1% and 29.7%, respectively, and in RCP8.5 scenario, Pb will decrease by 30.9% and 30.4%, respectively.

Keywords: NSGA-II; MOPSO; Urban runoff management; SWMM

¹ - PhD Candidate, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran. Email: hamednoori@semnan.ac.ir, Cell phone: 09122649678

² - Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran. Email: fmousavi@semnan.ac.ir, Cell phone: 09123319586