



## Optimal Design of Storm Sewer Network Based on Risk Analysis by Combining Genetic Algorithm and SWMM Model

S. Sadeghi<sup>1</sup>, J. Mohammad Vali Samani<sup>\*1</sup>, H. Mohammad Vali Samani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

<sup>2</sup>Civil Engineering Department, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

**ABSTRACT:** The design of an urban storm sewer network is a costly task. Therefore, the design should be done so that the total cost becomes minimal. This requires modeling the problem in an optimization form. Floods are stochastic. Designing such a system is associated with risk. Thus, a project is optimal when both design costs and potential future risks are incorporated. This means that the selection of rainfall-runoff return period has to be based on risk analysis. SWMM software was used to handle hydraulic network simulation and the Network optimization was performed using a genetic algorithm in which the decision variables were the diameter and slope of the pipes. To calculate the cost of run-off damage, relationships for land uses, infrastructure and traffic were provided. The accuracy of the simulation-optimization model seeking the optimal design of the storm sewer network was approved by a benchmark network evaluation. The developed model was implemented in a region of Tehran city to determine the optimal design return period with a risk analysis approach. The results showed that the 10-year return period with is the optimal return period with an annual damage risk cost of 508.68 billion rials, an annual design cost of 943.78 billion rials and a total cost of 1452.45 billion rials. Therefore, the developed method in which the genetic algorithm and SWMM model are combined in addition to the risk-based design approach is an effective tool for the optimal design of storm sewer networks

### Review History:

Received: May, 03, 2021

Revised: Jul. 01, 2021

Accepted: Jul. 23, 2021

Available Online: Aug. 05, 2021

### Keywords:

Genetic Algorithm

SWMM Model

Risk Analysis

Runoff Damage

Optimization

### 1- Introduction

Population growth, urban development, agricultural and industrial activities, and the conversion of natural lands to residential areas result in a change in the natural hydrologic cycle of the region [1]. Also, the increase of impervious areas significantly has altered the pre-urban hydrology and increased the surface run-off in urban environments compared to the undeveloped natural environments. Implementation of storm sewer networks is one of the effective ways to manage water resources. The optimal design of storm sewer networks is one of the most important issues in water engineering since they are very costly. Any attempt to reduce the construction costs of these networks can lead to significant savings. The design of storm sewer networks is always associated with risk. In a proper design, there must be a balance between its cost and the risks that may occur in the future. Therefore, both optimization and risk analysis should be considered in the optimal design. The occurrence of urban floods and the resulted damages in Iran is increasing, and consequently, the required budget to control and reduce the damages also increases. On the other hand, due to financial constraints, the dedicated budget for flood control may not be enough. Therefore, it is necessary to find the best optimal alternative with the reasonable highest

efficiency in the design of storm sewer networks. Also, one of the objectives of this study is to develop proper relationships to evaluate the green area damage and the creation of traffic damage due to run-off. These relationships are used in the objective function to evaluate damage costs in the genetic algorithm optimization analysis. The decision variables are the diameters and slopes of the pipes. The optimization solver is linked to the simulation SWMM model to obtain the optimal design. The damage costs are required for the risk analysis. Relationships for the damage costs of the land use, infrastructure, and traffic, are provided for the mentioned case study. The genetic algorithm is utilized as an optimization tool to find the decision variables (pipe diameters and slopes) so that the summation of the design costs will be minimized. In this regard, the complicated method and both the rational methods (with and without) considering the flow travel time in the conduits are used and the results are compared

### 2- Methodology

Urban flood management is presented in this article in several main sections: 1) Preparation of simulation model of storm sewer network including data collection and determination of desired precipitation using SWMM

\*Corresponding author's email: samani\_j@modares.ac.ir



**Table 1. Optimization results for different return periods**

Return period	Frequency	Damage costs	Annual damage risk cost	Optimal Design cost	Annual optimal design cost
1	1	1287.89	9000	772.18	2060.07
2	0.5	989.56	10391	891.53	1881.08
5	0.2	723.64	10520	902.59	1626.24
10	0.1	508.68	11000	943.78	1452.45
20	0.05	311.84	16000	1372.77	1684.61
25	0.04	158.99	21000	1801.76	1960.75
50	0.02	0	30000	2573.94	2573.94

software. 2) Preparation of optimization model including determining goals and decision variables, selection of evolutionary optimization algorithm for storm sewer network. 3) Determining damage relationships for land uses and infrastructure and calculating run-off damage based on the relationships obtained. 4) Performance evaluation of the simulation-optimization model. The simulation model (SWMM software) is linked to the GA optimization model. The goal is to determine the storm return period with the optimal corresponding design alternative for which the total design cost plus the probable damage cost is minimum. In this regard, at the first stage, the optimal storm sewer network design for a certain selected rainfall return period is obtained. The required hydrologic data corresponding to the selected rainfall return period and hydraulic data are given to the developed model. The optimization data such as the list of the commercial pipes, the objective function, and constraints should be given to the program. Besides, the GA parameters including the initial population of chromosomes, and the mutation factor. The decision variables (pipe diameters and slopes) are initially selected by the GA. The simulation is then performed by the SWMM program. GA program calculates the objective based on the results of the simulation. The decision variables are changed by the optimization program until a minimum objective function in which all constraints are satisfied is achieved. The risk analysis is done to find the

optimal storm return period. This is performed by repeating the same procedure explained above for other storm return periods. The return period is sought in which the summation of the annual costs of the corresponding optimal design and the risk damage is minimum.

### 3- Results and Discussion

In this section, the results of the optimal design of the storm sewer network are presented. The total annual cost introduced in column (6) shows that the 10 year is the optimal return period in which the total annual design and damage costs are minimum

### 4- Conclusion

In this study, a simulation–optimization program for the storm sewer network optimal design has been developed. The simulation requires hydrologic and hydraulic calculations. The hydrologic calculations involve the rainfall-runoff relationships and determination of surface run-off in the sub-catchments. The hydraulic calculations deal with flow routing in the storm sewer network. In this research, the SWMM program is linked to an optimization program that uses the genetic algorithm to develop a program that can do the simulation-optimization for the design of storm sewer networks. The performance of the developed program in terms of speed and accuracy was checked by solving a

benchmark problem. The results indicated good and successful performance. The developed program was applied for a case study design problem in a district located in Tehran city. The results showed that the optimal return period in which the total design costs and damage risk costs are minimal (1452.45 billion rials per year), the return period is 10 years.

## References

- [1] L. Rossman, Storm Water Management Model User's Manual Revised, Version 5.0, EPA No. EPA/600/R-05/040, (2010) (295 p).

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Sadeghi, J. Mohammad Vali Samani, H. Mohammad Vali Samani, *Optimal Design of Storm Sewer Network Based on Risk Analysis by Combining Genetic Algorithm and SWMM Model*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(5) (2022) 379-382.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19990.7308](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19990.7308)







## طراحی بهینه شبکه دفع آب های سطحی بر پایه تحلیل ریسک با تلفیق الگوریتم ژنتیک و مدل SWMM

سونیا صادقی<sup>۱</sup>، جمال محمد ولی سامانی<sup>۱\*</sup>، حسین محمد ولی سامانی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

### کلمات کلیدی:

الگوریتم ژنتیک

مدل SWMM

تحلیل ریسک

خسارت رواناب

بهینه سازی

**خلاصه:** طراحی شبکه دفع آب های سطحی کاری پرهزینه است؛ بنابراین طراحی باید به نحوی انجام شود که هزینه آن حداقل گردد. این عمل نیازمند مدل سازی در قالب یک مسئله بهینه سازی است. طراحی سیستم مرتبط با سیلاب، با ریسک همراه است و لذا طراحی بهینه است که هر دو جنبه هزینه اجرا و خسارت احتمالی در آینده را مدنظر قرار دهد. انتخاب دوره بازگشت بارش-رواناب در این مقاله بر اساس تحلیل ریسک صورت گرفته است. در این روش دوره بازگشتی انتخاب می شود که در آن مجموع هزینه های طرح و ریسک خسارت حداقل است. نرم افزار SWMM برای شبیه سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی شبکه استفاده گردید. بهینه سازی شبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. متغیرهای تصمیم گیری شامل قطر و شیب لوله ها است. به منظور محاسبه هزینه خسارت ناشی از رواناب روابطی برای کاربری ها، زیرساخت ها، فضای سبز و ترافیک ارائه شد. صحت و دقت مدل شبیه سازی - بهینه سازی برای طراحی بهینه شبکه دفع آب های سطحی، با ارزیابی آن در شبکه محک تأیید گردید. اجرای مدل مذکور در یکی از نواحی شهر تهران برای تعیین دوره بازگشت بهینه طراحی با رویکرد تحلیل ریسک انجام شد. نتایج نشان داد که دوره بازگشت بهینه که در آن مجموع هزینه های طراحی و هزینه ریسک خسارت حداقل باشد، دوره بازگشت ۱۰ ساله با هزینه ریسک خسارت سالانه ۵۰/۶۸ میلیارد ریال، هزینه طراحی سالانه ۹۴۳/۷۸ میلیارد ریال و هزینه کل ۱۴۵۲/۴۵ میلیارد ریال است؛ بنابراین تلفیق الگوریتم ژنتیک و مدل SWMM و با در نظر گرفتن رویکرد طراحی مبتنی بر ریسک، مجموعه ای کارآمد است که قادر به طراحی بهینه شبکه دفع آب های سطحی است.

### ۱- مقدمه

سطحی به طور قابل ملاحظه ای مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیقی به شناسایی مناطق تحت تأثیر سیل و ارزیابی شبکه دفع سیلاب در منطقه ای در نیجریه پرداخته شد. در این تحقیق کل حوضه به ۱۳ زیر حوضه تقسیم شد و میزان دبی اوج هر زیر حوضه با استفاده از روش استدلالی محاسبه شد. سپس با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت و تنها ۳۵٪ عملکرد آن را موفق ارزیابی کردند. سپس طراحی شبکه دفع آب های سطحی برای منطقه مذکور انجام شد. در طول طراحی، تعدادی از مقاطع دوزنقه ای و مستطیلی با استفاده از دبی پیک تخلیه گاه و با به کارگیری روش استدلالی (CIA) طراحی شد. در آخر کل هزینه طراحی را به میزان ۳۴۰۰۰ دلار برآورد کردند که به کارگیری این روش، باعث افزایش راندمان عملکرد سیستم شد [۱]. در تحقیق دیگری برای برآورد رواناب در شهر جینان در چین از مدل SWMM استفاده شد. در این تحقیق محققان چهارده رخداد برای اعتبارسنجی و بررسی کارایی مدل مورد استفاده قرار

مسئله طراحی بهینه شبکه دفع آب های سطحی، از جمله مسائل مهم در مهندسی آب است که به دلیل گستردگی، وسعت آن و حجم بالای عملیات خاکی و سازه ای، بسیار پرهزینه است و هرگونه تلاش به منظور صرفه جویی در احداث این شبکه ها از طریق کاهش حجم عملیات مورد نیاز، می تواند منجر به صرفه جویی قابل توجهی گردد. طراحی شبکه دفع آب های سطحی، همواره با عدم قطعیت و به تبع آن با ریسک همراه هست. این واقعیت که در یک طراحی مناسب، باید تعادل خوبی بین هزینه اجرا و خطرات احتمالی در آینده برقرار باشد، به طور گسترده ای مورد اذعان قرار گرفته است. روش طراحی مبتنی بر ریسک، قادر است هر دو جنبه را پشتیبانی کند؛ بنابراین در طراحی شبکه دفع آب های سطحی باید هر دو موضوع را در نظر گرفت تا طراحی بهینه انجام شود. در سال های اخیر، طراحی بهینه شبکه دفع آب های

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: samani\_j@modares.ac.ir



دادند و در نهایت دریافتند که این مدل قابلیت استفاده در شهرهای بزرگ را دارد [۲]. در تحقیق دیگری مدل‌سازی شبکه دفع آب‌های سطحی یک شهرک مسکونی با نرم‌افزار SWMM انجام شده و با در نظر گرفتن بارش با دوره بازگشت‌های ۱ تا ۱۰۰ سال و معیارهای هیدرولوژیکی نظیر ضریب رواناب، حجم و زمان سیلاب، ریسک آب گرفتگی در چاهک‌های بازدید مورد بررسی قرار گرفت [۳]. در پژوهش دیگری، روشی جامع به منظور مدیریت ریسک شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی ارائه شد. مدل‌سازی منطقه مورد مطالعه با نرم‌افزار Autodesk SSA انجام شد. تهیه نقشه آب گرفتگی با نرم‌افزار GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره SAW و TOPSIS به صورت مکانی صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ریسک آب گرفتگی زیاد کانال‌های درجه ۳ و ۴ برای ۶ تا ۹ درصد طول کل کانال‌ها در منطقه ۱۱ تهران خیلی زیاد است [۴]. در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی خسارات ساختمانی و کشاورزی سیل، ابتدا توسط یک مدل هیدرولوژیک عمق آب در نقاط مختلف حوضه برآورد شد و سپس با ترکیب توابع عمق - خسارت و نقشه عمق سیل، خسارت را محاسبه کردند [۵]. در تحقیقی با در نظر گرفتن طبقه‌بندی انواع خسارت‌ها به ارزیابی و اندازه‌گیری انواع خسارات پرداخته شد، نتایج این تحقیق نشان داد که تخمین خسارت، مستلزم برآورد هیدرولوژیکی ترازهای سیلاب‌ها با دوره بازگشت مختلف و برآورد خسارات در هر کدام از این سیلاب‌ها است [۶]. در تحقیق دیگری خسارات ناشی از سیل در حوضه آبخیز قهرود و قمصر را با استفاده از مدل HEC-FIA مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از این است که تغییر کاربری اراضی و افزایش ساخت و سازهای بی‌رویه در امتداد و حریم رودخانه قهرود و قمصر باعث تغییر ضریب رواناب، ضریب زبری، نفوذپذیری و همچنین تنگ شدگی مقطع رودخانه گردیده است. در نتیجه دبی پیک سیلاب‌ها، سطح و عمق پهنه‌های سیل افزایش یافته است [۷]. اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۷ یک پایگاه اطلاعات جهانی از منحنی‌های عمق - خسارت را برای هر یک از قاره‌های اروپا، آمریکا، آسیا، آفریقا و اقیانوسیه توسعه داد. در این مطالعه منحنی‌های عمق - خسارت با توجه به حداکثر خسارت سیلاب، شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی - اجتماعی برای هر کدام از قاره‌ها توسعه پیدا کردند [۸]. در تحقیق دیگری به مدل‌سازی حساسیت خطر سیل در حوضه آبریز پنجکورا در پاکستان با استفاده از رویکردهای ژئومورفومتری و هیدرولوژی پرداختند. نتایج نشان داد که ۲۷ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر خیلی زیاد و ۳۶/۵ درصد از مساحت منطقه نیز در طبقه خطر زیاد از نظر حساسیت خطر سیل قرار دارد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که حساسیت

خطر سیل رابطه مستقیمی با رواناب سطحی دارد، به طوری که با افزایش رواناب سطحی، حساسیت خطر سیل نیز افزایش می‌یابد [۹]. در پژوهش دیگری خطر وقوع سیلاب در یکی از رودخانه‌های استان اردبیل با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. خروجی نقشه پراکنش فضایی سیلاب‌های شبیه‌سازی شده در منطقه نشان داد پلهایی که سازه بتنی ندارند در سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ ساله با احتمال تخریب روبرو خواهند شد. همچنین در سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ بسیاری از زمین‌های زراعی و روستاها در معرض خسارت قرار خواهند گرفت. تحلیل نتایج نشان می‌دهد در صورت وقوع سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ سال حدود ۱۷۴۳ هکتار از اراضی دشت سیلابی به زیرآب خواهد رفت و خسارات بسیاری را برای کشاورزان به بار می‌آورد [۱۰]. با توجه به مطالب مطرح شده در خصوص خسارت سیلاب، می‌توان روش‌های محاسبه خسارت را در سه گروه طبقه‌بندی کرد: گروه اول: منحنی‌های عمق - خسارت تخمینی. در این روش نمودار خسارت سیلاب‌های به وقوع پیوسته در مقابل ارتفاع ترسیم شده است. گروه دوم: فرمول‌های تجربی. گروه سوم: مدل‌های رایانه‌ای تخمین خسارت که شامل مدل‌های هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و اقتصادی هستند. از جمله مدل‌های اقتصادی خسارت سیلاب دو برنامه رایانه‌ای HEC-FDA و HEC-FIA است. این دو مدل جز مدل‌های یک بعدی هستند که برای محاسبه خسارت سیلاب تنها از عمق سیلاب استفاده می‌کنند. مدل‌های هیدرولوژیکی بر اساس فرآیند بارش - رواناب و روندیابی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر در این مدل، عمق رواناب بر اساس فرآیند بارش - رواناب محاسبه می‌شود و سپس خسارت بر اساس عمق رواناب محاسبه می‌شود؛ مانند نرم‌افزار HEC-HMS. مدل‌های هیدرولیکی خسارت سیلاب، صرفاً فرآیند جریان آب در آبراهه و سازه‌های آبی رودخانه‌ای را شبیه‌سازی می‌کنند و به دو گروه مدل‌های یک بعدی و دو بعدی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های یک بعدی مانند MIKE 11، RAS و MIKE21 و MIKE FLOOD در مناطقی که پدیده انتشار سیل رفتار یک بعدی ندارد مانند دشت‌های وسیع در حاشیه رودخانه که در صورت خارج شدن جریان سیلابی از رودخانه و ورود به سیلاب دشت‌های حاشیه، جریان با عمق و سرعت‌های مختلف ایجاد می‌شود، نمی‌توان از مدل‌های یک بعدی استفاده کرد و باید از مدل‌های دو بعدی نام برده استفاده کرد.

در مناطق شهری که رودخانه و پهنه سیلابی وجود ندارد و تنها کل منطقه

سطحی شهری قیودی در نظر گرفته شده است. قطر و شیب مجراها تا به عنوان متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد. هدف د تحلیل ریسک در این تحقیق به دست آوردن دوره بازگشت بهینه است؛ که در آن مجموع هزینه‌های سالیانه طرح و ریسک خسارت حداقل باشد. تاکنون این رویکرد برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی در ایران به کار گرفته نشده است. مدل تهیه شده برای این منظور بر روی یک مطالعه موردی بررسی شده و نتایج حاصل با سایر محققان مقایسه گردیده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

مدیریت سیلاب شهری در این مقاله در چند بخش اصلی ارائه می‌شود: (۱) تهیه مدل شبیه‌سازی شبکه جمع‌آوری آب سطحی شامل جمع‌آوری داده‌ها و تعیین بارش‌های مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار SWMM. (۲) تهیه مدل بهینه‌سازی شامل تعیین اهداف و متغیرهای تصمیم‌گیری، انتخاب الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی برای شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی. (۳) تعیین روابط خسارت برای کاربری‌ها و زیرساخت‌ها و محاسبه خسارت ناشی از رواناب بر پایه روابط به دست آمده. (۴) ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی.

### ۲-۱- مدل شبیه‌سازی SWMM

این مدل از دو بخش تشکیل می‌شود. در بخش اول رابطه بارش - رواناب مطرح می‌شود و حاصل آن رواناب هر کدام از زیر حوضه‌ها است. در بخش دوم محاسبات هیدرولیکی مجراهای جمع‌آوری آب‌های سطحی صورت می‌گیرد.

### ۲-۱-۱- مدل بارش رواناب

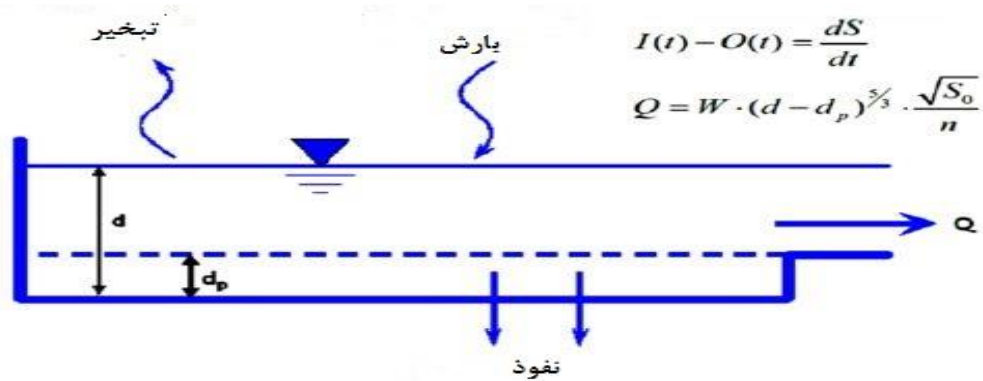
این مدل یک واقعه رگبار را بر اساس هایتوگراف بارندگی، داده‌های ورودی هواشناسی، سیستم حوضه و شبکه زهکشی جهت تولید هیدروگراف خروجی، شبیه‌سازی می‌کند [۱۱]. در این مدل هر حوضه آبریز به زیر حوضه‌های کوچک‌تر تقسیم شده و به عنوان مخزن غیرخطی شبیه‌سازی می‌شود. در این روش جریان‌های ورودی از بارش و یا زیر حوضه‌های بالادست ناشی می‌شود. خروجی‌ها عبارت‌اند از تبخیر، نفوذ و رواناب سطحی. ظرفیت این مخزن برابر حداکثر ذخیره چالابی است که شامل حداکثر ذخیره سطحی ایجاد شده توسط گودال‌ها، رطوبت سطحی و برگاب<sup>۱</sup> می‌باشد. هنگامی که عمق آب در مخزن از حداکثر ذخیره چالابی<sup>۲</sup> ( $d_p$ ) بیشتر شود،

به زیرحوضه مای کوچک تقسیم می‌شود، استفاده از مدل‌های یک بعدی برای تعیین خسارت کفایت می‌کند. در تحقیق حاضر از مدل هیدرولیکی - هیدرولوژیکی SWMM برای تعیین عمق رواناب زیرحوضه‌ها و از منحنی‌های عمق - خسارت تخمینی برای محاسبه خسارت استفاده شده است. در بخش‌های بعدی نحوه محاسبه ارائه شده است.

بررسی منابع نشان می‌دهد پژوهش‌های زیادی درباره طراحی بهینه شبکه دفع آب‌های سطحی انجام شده است، ولی توجه این پژوهش‌ها بیشتر به بررسی روش‌های بهینه‌سازی جدید و نوظهور، برای افزایش راندمان بهینه‌سازی بوده است و تنها چند تلاش محدود در ارتباط با توسعه رویکرد طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی صورت گرفته است. ضمن این که در مقایسه بین شبکه‌های فاضلاب و سیلاب توجه کمتری به شبکه‌های دفع سیلاب شده و پژوهش‌های اندکی در این زمینه انجام شده است. همچنین در مدل‌های بهینه‌سازی استفاده شده برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی، هر دو هدف کاهش هزینه‌های طراحی و ریسک خسارت سیلاب شهری به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار نگرفته است و اگر هم باشد تنها خسارت وارد به ساختمان‌های مسکونی در نظر گرفته شده و سایر زیرساخت‌ها در نظر گرفته نشده است. در حالی که رخداد سیلاب‌های شهری و میزان خسارات وارده ناشی از آن‌ها در کشور ایران دارای روندی افزایشی است و به تبع آن میزان بودجه لازم جهت کنترل و مقابله با آن جهت کاهش خسارات ناشی از آن نیز افزایش می‌یابد. از طرفی به دلیل محدودیت‌های مالی میزان بودجه اختصاصی به امر کنترل و مقابله با سیلاب ممکن است به اندازه کافی نباشد؛ بنابراین یافتن گزینه‌هایی که در کاهش خسارات سیلاب، بالاترین کارایی را داشته باشد، ضروری است. همچنین بررسی منابع در خصوص خسارت ناشی از سیلاب نشان می‌دهد، تاکنون خسارت وارد به کاربری‌های مختلف به طور هم‌زمان به کار گرفته نشده است. همچنین خسارت ناشی از ترافیک که جز خسارت‌های غیرمستقیم است، تاکنون روابطی برای محاسبه آن ارائه نشده است. لذا هدف از تحقیق حاضر طراحی بهینه شبکه دفع آب‌های سطحی با رویکرد مبتنی بر ریسک با هدف کاهش هزینه‌های طراحی و هزینه ریسک خسارت و تعیین ابعاد بهینه شبکه دفع آب‌های سطحی است. در رویکرد طراحی مبتنی بر ریسک تمام خسارات ناشی از جاری شدن سیل مربوط به کاربری‌های مختلف من جمله فضای سبز و همچنین خسارت ناشی از ترافیک نیز در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برنامه‌ای تهیه شده است که در آن بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی با مدل SWMM انجام می‌شود. برای کاهش هزینه طراحی شبکه دفع آب‌های

1 -Interception  
2 - Depression storage





شکل ۱. مدل مخزن غیرخطی و تبدیل بارش به رواناب در مدل SWMM

Fig. 1. Nonlinear reservoir and rainfall - runoff model in SWMM

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAH_L = 0 \quad (2)$$

در روابط فوق،  $x$  فاصله از ابتدای مجرا،  $A$  سطح مقطع جریان،  $Q$  دبی،  $t$  زمان شبیه‌سازی،  $H$  بار آبی در مجرا،  $S_f$  شیب اصطکاکی،  $H_L$  افت موضعی انرژی در واحد طول و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد. بایستی توجه داشت که برای یک سطح مقطع هندسی معلوم  $A$  به صورت تابع مشخصی از عمق  $y$  است که می‌توان آن را از بار آبی  $H$  به دست آورد. متغیرهای وابسته در این معادلات عبارت‌اند از دبی جریان  $Q$  و بار آبی  $H$  که تابعی از فاصله  $x$  و زمان  $t$  می‌باشند. حل معادلات سنت و نانت در یک مجرا به شرایط اولیه  $H$  و  $Q$  در زمان صفر و شرایط مرزی  $x=0$  و  $L=x$  برای تمام زمان‌ها نیاز دارد.

### ۲-۲-۱- دل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

طراحی بهینه ابعاد شبکه دفع آب‌های سطحی با جانمایی مشخص و ثابت، مستلزم به دست آوردن کمترین هزینه طراحی شبکه است و در عین حال کارایی و عملکرد سیستم تحت شرایط طراحی تأمین شود. در این پژوهش مدل بهینه‌سازی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط متلب تهیه شده است. الگوریتم ژنتیک به دسته روش‌هایی تعلق دارد که از فرآیند تکامل موجودات زنده برای جست‌وجوی جواب مسئله تقلید می‌کند. در زمینه

رواناب سطحی شکل می‌گیرد که جریان خروجی را تشکیل می‌دهد. این جریان به وسیله معادله مانینگ به دست می‌آید. عمق آب روی سطح زیر حوضه ( $d$ ) نسبت به زمان با حل عددی دیفرانسیلی معادله بیلان آب روی زیر حوضه به دست می‌آید (شکل ۱). در این شکل  $W$  و  $S_0$  به ترتیب عرض و شیب زیر حوضه،  $n$  ضریب زبری مانینگ است. به علت آن که نقش عواملی مثل تبخیر و تعرق و سایر موارد در تشکیل سیل محدود و قابل صرف‌نظر است، از اثر تبخیر در مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب صرف‌نظر شده است [۱۲]. در این مدل از روش هورتن<sup>۱</sup> برای نفوذ آب در خاک استفاده می‌شود. پارامترهای معادله نفوذ هورتن با استفاده از اطلاعات نفوذپذیری خاک منطقه و جداول مربوط از راهنمای نرم‌افزار SWMM به دست آمد.

### ۲-۲-۲ مدل هیدرولیکی جریان

در این نرم‌افزار روش‌های متعددی برای محاسبات هیدرولیکی در مجراها قابل انجام است. دقیق‌ترین روش مدل موج دینامیکی است که در آن معادلات یک بعدی سنت و نانت با استفاده از روش عددی تفاضل‌های محدود حل می‌گردد. معادلات سنت و نانت شامل معادله پیوستگی و مومنتوم در ذیل ارائه می‌شوند:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

1 - Horton



که در رابطه (۶)  $V_i$  سرعت در لوله  $i$  ام،  $V_{min}$  و  $V_{max}$  مقادیر حداقل و حداکثر سرعت جریان است. با توجه به مبانی و ضوابط طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی مقادیر حداقل و حداکثر سرعت به ترتیب  $0/9$  و  $4/5$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

۲- قید حداکثر عمق نسبی جریان: به منظور جلوگیری از انسداد و پس زدن آب به بالادست و ایجاد جریان تحت فشار، عمق جریان در لوله‌ها نباید از مقدار حداکثری تجاوز کند.

$$i = 1, \dots, NM \quad y_i \leq y_{max} \quad (7)$$

در رابطه (۷)  $y_i$  عمق نسبی جریان در لوله و  $y_{max}$  حداکثر عمق نسبی جریان در لوله که با توجه به مبانی و ضوابط مقدار آن  $0/9$  قطر لوله انتخاب شد.

۳- قید عمق مجاز گودبرداری: عمق کارگذاری لوله‌های باید در یک محدوده مجاز حداکثر و حداقل قرار بگیرد.

$$i = 1, \dots, NM \quad E_{min} \leq E_i \leq E_{max} \quad (8)$$

در رابطه (۸)  $E_i$  عمق کارگذاری لوله  $i$ ،  $E_{min}$  و  $E_{max}$  به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر عمق کارگذاری لوله  $i$  ام است. مقدار حداقل عمق کارگذاری لوله‌ها باید طوری تعیین شود که در هنگام عبور وسایل نقلیه سنگین مورد خرابی قرار نگیرد و حداکثر عمق کارگذاری آن‌ها بر اساس تراز سطح آب زیرزمینی و صعوبت کار در محیط خیس تعیین می‌شود. مقادیر حداقل و حداکثر اعماق ذکر شده با توجه به مبانی و ضوابط به ترتیب ۱ و ۶ متر در نظر گرفته شد.

۴- الگوی تلسکوپی انتخاب قطر لوله‌ها: اقطار انتخابی برای لوله‌ها باید به گونه‌ای باشد که قطر هر لوله بزرگ‌تر یا مساوی با قطر لوله بالادست خود باشد.

۵- محدودیت شیب: شیب لوله‌ها باید در یک محدوده مجاز حداقل و حداکثر قرار بگیرد. مقدار حداقل شیب لوله با توجه به ضوابط  $0/0005$  در نظر گرفته شد اما برای شیب حداکثر مقدار مشخصی توصیه نشده است. به عنوان راهنما می‌توان آن را با استفاده از حداکثر سرعت مجاز جریان، از رابطه مانینگ به دست آورد.

مهندسی آب و فاضلاب کاربرد آن اغلب در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب [۱۳-۱۶] پایش آب‌های زیرزمینی [۱۸ و ۱۷] به کار برده شده است. تابع هزینه به عنوان تابع هدف به صورت ذیل است:

$$Cost(D, S) = \sum_{i=1}^{NP} CP_i + \sum_{j=1}^{NM} CM_j \quad (3)$$

تابع هزینه فوق شامل هزینه‌های CP و CM به ترتیب هزینه طراحی مجاری شبکه و آدروها است. NP تعداد لوله‌های شبکه و NM تعداد آدروهای شبکه است.

برای برآورد هزینه‌های طراحی شبکه از فهرست‌بهای تجمیعی شبکه جمع‌آوری و هدایت رواناب سطحی سال ۱۳۹۹ استفاده شد؛ که در آن هزینه تهیه کلیه مصالح و اجرای مجرای زیرسطحی طبق قطر و عمق کارگذاری لوله‌ها تعیین شده است. قطر‌ها و عمق‌های خاک‌برداری برای تعیین هزینه مجاری شبکه و ارتفاع آدروها برای هزینه آن‌ها به کار برده شدند و با استفاده از برازش منحنی روابط ذیل به دست آمدند:

$$CP = 199.3D - 121E - 192.7D^2 + 161.2DE - 0.4781E^2 + 24.05 \quad (4)$$

$$CM = 55.872H_M^2 + 242.99H_M + 411.58 \quad (5)$$

در روابط فوق D قطر لوله (متر)، E عمق گودبرداری (متر) و  $H_M$  ارتفاع آدرو (متر) است.

به منظور بهره‌برداری مناسب از شبکه دفع آب‌های سطحی باید قیود و محدودیت‌های زیر را در هنگام طراحی شبکه مورد توجه قرار داد:

۱- قید سرعت: سرعت جریان در لوله‌ها باید در یک محدوده مجاز حداکثر به منظور جلوگیری از سایش آن‌ها و حداقل برای جلوگیری از ته‌نشینی مواد جامد و مسدود شدن آن‌ها در نظر گرفته می‌شود [۱۹].

$$i = 1, \dots, NM \quad V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (6)$$

،  $Y$  و  $E$  به ترتیب پارامترهای جریمه مربوط به سرعت، عمق نسبی جریان و عمق گودبرداری است. مقدار این پارامترها در یک فرآیند تکراری سعی و خطا به کمک اجراهای آزمایشی به گونه‌ای تخمین زده می‌شود که راندمان بهینه‌سازی افزایش یابد؛ بنابراین تابع هدف نهایی با اعمال توابع جریمه به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$Cost(D, S) = \sum_{i=1}^{NP} CP_i + \sum_{j=1}^{NM} CM_j + \sum_{i=1}^{NP} P_{v \max i} + \sum_{i=1}^{NP} P_{v \min i} + \sum_{i=1}^{NP} P_{e \max i} + \sum_{i=1}^{NP} P_{e \min i} + \sum_{i=1}^{NP} P_{y_i} \quad (14)$$

### ۲-۳- ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

به منظور طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی، ابتدا داده‌های مورد نیاز، شامل آرایش شبکه، بارش‌های طوفان طراحی، فهرست تجاری لوله‌ها و داده‌های مربوط به هزینه ساخت اجزای مختلف شبکه و جمعیت اولیه کروموزوم‌ها به صورت تصادفی تهیه شد. در ادامه، با کدبرداری از کروموزوم‌ها، مقادیر طراحی متغیرهای تصمیم‌گیری تعیین و برای پیکربندی شبکه، ترازهای نصب لوله‌ها محاسبه شد. با پیکربندی شبکه و تهیه فایل ورودی مدل شبیه‌ساز، امکان شبیه‌سازی هر کروموزوم در مدل SWMM فراهم می‌شود. به عبارتی دیگر مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی تهیه شده با نرم‌افزار SWMM، با مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک که در محیط متلب آماده شده، در قالب یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی ادغام شده با یکدیگر ارتباط برقرار می‌نمایند. پس از شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه‌های کاندید در مدل شبیه‌سازی SWMM، عملیات مرتب‌سازی، انتخاب والدین، تبادل ژنی و جهش ژنی برای تولید نسل جدید انجام می‌شود. این روند تا رسیدن به شرط همگرایی یا توقف، دنبال خواهد شد. در این پژوهش، شرط همگرایی، رسیدن به آخرین نسل است. شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای هر کدام از دوره بازگشت‌های انتخابی از کوچک تا بزرگ انجام می‌شود و در نتیجه برای هر دوره بازگشت، طرح بهینه تهیه می‌شود. سپس برای هر کدام از طرح‌ها، هزینه ریسک خسارت‌های ناشی از رواناب محاسبه و تحلیل ریسک انجام می‌شود. بر اساس اصول تحلیل ریسک، دوره بازگشتی بهینه نهایی خواهد بود که در آن مجموع هزینه‌های طرح و ریسک خسارت حداقل باشد. روند طراحی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۶- تراز تاج لوله خروجی از یک آدمرو از تراز هیچ یک از لوله‌های ورودی به آن آدمرو بالاتر نباید باشد.

۷- از بین قیود فوق، ۳ قید اول با روش تابع جریمه به تابع هدف اضافه می‌شود و ۳ قید بعدی با کدبرداری در برنامه‌ریزی کامپیوتری اعمال می‌شود. لذا قیود ۱ تا ۳ را می‌توان به شکل تابع جریمه زیر ارائه کرد و به تابع هدف اضافه نمود [۲۰]:

$$P_{v \max} = \lambda_v \max \left( \left( \frac{V_i}{V_{\max}} - 1 \right), 0 \right) \quad (9)$$

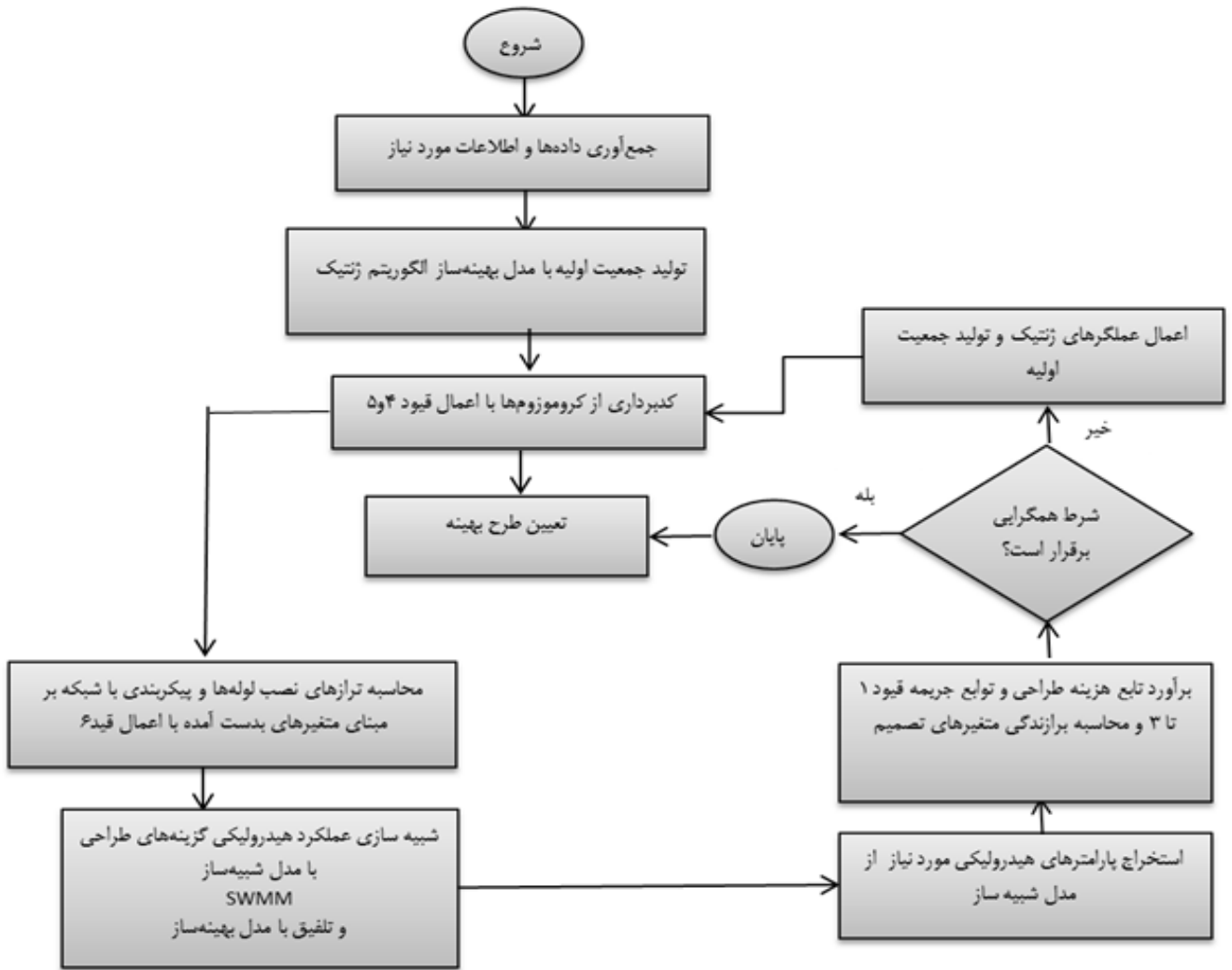
$$P_{v \min} = \lambda_v \max \left( \left( 1 - \frac{V_i}{V_{\min}} \right), 0 \right) \quad (10)$$

$$P_{e \max} = \lambda_e \max \left( \left( \frac{E_i}{E_{\max}} - 1 \right), 0 \right) \quad (11)$$

$$P_{e \min} = \lambda_e \max \left( \left( 1 - \frac{E_i}{E_{\min}} \right), 0 \right) \quad (12)$$

$$P_y = \lambda_y \max \left[ \left( 1 - \frac{y_i}{y_{\max}} \right)^2, 0 \right] \quad (13)$$

در روابط فوق  $P_{v \min}$ ،  $P_{v \max}$  به ترتیب قیود مربوط به حداکثر و حداقل سرعت،  $P_{e \min}$ ،  $P_{e \max}$  به ترتیب قیود مربوط به حداکثر و حداقل عمق مجاز گودبرداری،  $P_y$  تابع جریمه مربوط به تخطی از عمق نسبی جریان است.  $V_i$  سرعت در لوله  $i$  ام،  $V_{\min}$  و  $V_{\max}$  مقادیر حداقل و حداکثر سرعت جریان،  $y_i$  عمق نسبی جریان در لوله و  $y_{\max}$  حداکثر عمق نسبی جریان در لوله،  $E_i$  عمق کارگذاری لوله  $i$ ،  $E_{\min}$  و  $E_{\max}$  به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر عمق کارگذاری لوله  $i$  ام است. جریمه در صورت عدم تخطی مقادیر توابع جریمه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شوند.  $V$



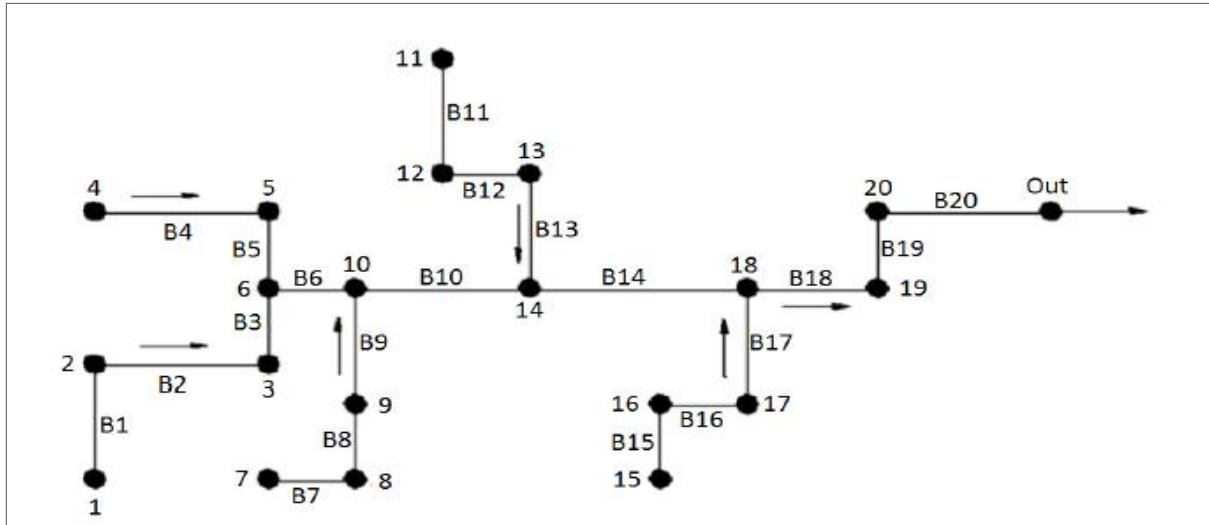
شکل ۲. روند ترکیب مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

Fig. 2. Simulation-optimization model combination process

هر چه دوره بازگشت انتخابی طرح بزرگ‌تر باشد، هزینه طرح نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش دوره بازگشت هزینه ریسک خسارت کاهش می‌یابد [۲۱]. لذا با توجه به موارد ذکر شده، برای طراحی دوره بازگشتی انتخاب می‌شود که هم هزینه طراحی و هم هزینه ریسک خسارت کاهش پیدا کند. دوره بازگشت بهینه، دوره بازگشتی است که در آن مجموع هزینه‌های طرح و ریسک خسارت حداقل باشد. برای تعیین خسارت، علاوه بر احتمال وقوع خسارت ناشی از یک سیل بزرگ‌تر از سیل طرح، خسارت ناشی از کلیه سیل‌های بزرگ‌تر از سیل طرح در نظر گرفته می‌شود. لذا پس از محاسبه هزینه‌های طراحی از طریق اجرای مدل بهینه‌سازی و محاسبه

#### ۲-۴- تحلیل ریسک

بارش باران و پیامد آن سیلاب، ماهیت تصادفی دارند و بنابراین سامانه‌های مرتبط با آن در معرض عدم قطعیت هستند. پیامد عدم قطعیت، خطر (ریسک) خواهد بود و نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری در مورد یک طرح در معرض عدم قطعیت به طور کلی با خطر (ریسک) همراه است. به طور کلی چنانچه در طول عمر مفید طرح مورد نظر، دبی سیلابی بزرگ‌تر از دبی طرح اتفاق بیفتد، طرح دچار خسارت می‌شود. وقوع سیلاب احتمالی است، بنابراین خسارت نیز احتمالی خواهد بود. احتمال وقوع حداقل یک مرتبه سیل بزرگ‌تر از سیل طرح در طول عمر طرح را ریسک می‌گویند.



شکل ۳. آرایش شبکه محک [۲۲]

Fig. 3. Benchmark network configuration [22]

عمق گودبرداری، اعمال نشد، ضریب زبری مانینگ همه لوله‌ها،  $0/13$  فرض شد و حداقل شیب مجاز لوله‌ها نیز صفر در نظر گرفته شد. اطلاعات و شرایط شبکه محک در تحقیقات [۲۵-۲۲] وجود دارد. صحت‌سنجی مدل با شبکه محک و با اعمال قیود طراحی اجرا و نتایج آن با محققین قبلی مقایسه شد تا نسبت به اعتبار مدل اطمینان حاصل شود.

#### ۲-۵-۱- نتایج ارزیابی صحت بهینه‌سازی مدل

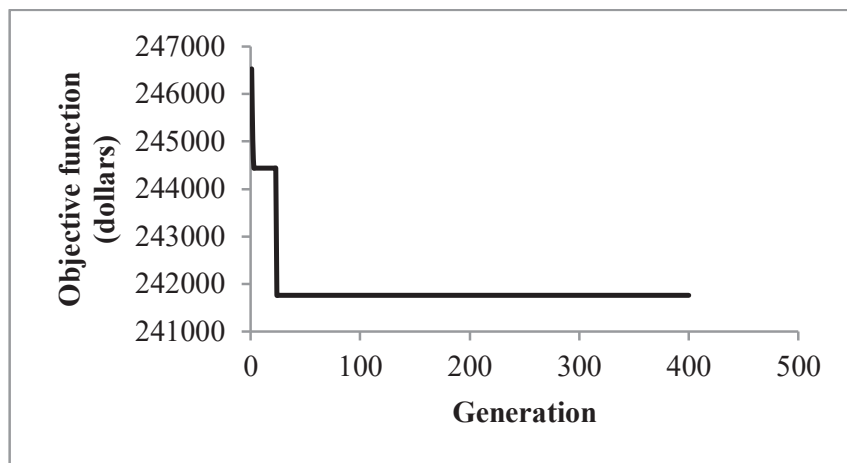
پس از تعیین پارامترهای بهینه‌سازی، ارزیابی اعتبار و کارایی مدل بهینه‌سازی، با اجرای آن در شبکه محک انجام شد که روند بهینه‌سازی آن تا آخرین نسل در شکل ۴ مشاهده می‌شود. مطابق شکل در ابتدای فرآیند بهینه‌سازی، مقدار تابع هدف با مقادیر بزرگ برآورد شد. در ادامه مقدار تابع هدف خیلی سریع کاهش یافت. به گونه‌ای که در نسل ۵۰ به مقدار  $241763$  دلار رسید و تا پایان عملیات بدون تغییر در جواب بهینه دنبال شد. با این عملکرد می‌توان سرعت بهینه‌سازی را بسیار خوب و الگوریتم توسعه داده شده را موفق ارزیابی کرد.

در جدول ۱ هزینه طراحی جواب بهینه پژوهش حاضر با هزینه طراحی سایر پژوهش‌ها مقایسه شده است. جواب بهینه پژوهش حاضر از جواب بهینه بیشتر پژوهش‌ها، هزینه طراحی کمتری دارد. تنها جواب بهینه افشار (کلونی مورچه‌ها) با هزینه ساخت  $241496$  دلار،  $0/11$  درصد هزینه ساخت کمتر نسبت به جواب بهینه پژوهش حاضر دارد. در نهایت با توجه به عملکرد

ریسک خسارت با توجه با مطالب ذکر شده، در هر کدام از دوره‌های بازگشت، این دو هزینه با هم جمع می‌شود، سپس دوره بازگشتی که در آن مجموع این دو هزینه حداقل باشد، به عنوان دوره بازگشت بهینه در نظر گرفته می‌شود.

#### ۲-۵- ارزیابی صحت مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

برای ارزیابی صحت مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در این پژوهش، از شبکه دفع آب‌های سطحی به نام شبکه محک استفاده شد که بارها توسط پژوهشگران مختلف بهینه‌سازی شد. شبکه محک مورد استفاده در این پژوهش که آرایش آن در شکل ۳ نشان داده شده اولین بار توسط مرجع [۲۲] طراحی و ارائه شد. در ادامه پژوهشگران دیگر اقدام به بهینه‌سازی این شبکه کردند. این شبکه از ۲۰ شاخه و ۲۰ گره (آدم‌رو) و یک خروجی تشکیل شده است. در ابتدا شبکه مذکور در مدل شبیه‌سازی SWMM شبیه‌سازی شد سپس مدل شبیه‌سازی با مدل بهینه‌سازی ایجاد شده در محیط متلب، ادغام شده و طراحی بهینه با تلفیق دو مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، انجام شد. در عملیات صحت‌سنجی مدل، تمامی شرایط حاکم بر مسئله محک، مشابه با شرایط پژوهش‌های قبلی در نظر گرفته شد. محدوده سرعت مجاز نیز، مشابه پژوهش‌های قبلی، بین حداقل  $0/61$  تا حداکثر  $3/66$  متر بر ثانیه، در نظر گرفته شد. جریان در لوله‌ها با سطح آزاد و حداکثر عمق نسبی جریان  $0/82$  در نظر گرفته شد. هماهنگ با مؤلف اصلی مسئله، برای حداقل ارتفاع پوشش خاک روی لوله‌ها، از مقدار  $2/4$  متر استفاده شد، محدودیتی برای حداکثر



شکل ۴. حداقل سازی تابع هزینه در نسل های مختلف الگوریتم ژنتیک

Fig. 4. Minimization of the cost function in different generations of genetic algorithms

جدول ۱. هزینه ساخت جواب بهینه مسئله محک در پژوهش های پیشین و مقایسه آن ها با جواب بهینه پژوهش حاضر

Table 1. Benchmark problem result comparison of the present study with those of others

مقایسه با پژوهش های قبلی	هزینه ساخت جواب بهینه پژوهش حاضر (دلار)	هزینه ساخت جواب بهینه (دلار)	روش بهینه سازی	پژوهشگر
-۲۴۰۱۲	۲۴۱۷۶۳	۲۴۵۷۷۵	برنامه ریز پویای گسسته دیفرانسیلی	[۲۲]
-۴۱۱۱	۲۴۱۷۶۳	۲۴۵۸۷۴	برنامه ریزی پویای گسسته دیفرانسیلی در صفحه گسترده	[۲۶]
-۲۹۸۴	۲۴۱۷۶۳	۲۴۴۷۴۷	الگوریتم ژنتیک	[۲۳]
۲۶۷	۲۴۱۷۶۳	۲۴۱۴۹۶	کلونی مورچه ها	[۲۵]
-۳۹۹	۲۴۱۷۶۳	۲۴۲۱۶۲	ازدحام ذرات	[۲۷]
-۵۶۴۹	۲۴۱۷۶۳	۲۴۷۴۱۲	ماشین سلولی	[۱۹]
-۱۹۳	۲۴۱۷۶۳	۲۴۱۹۵۶	الگوریتم ژنتیک	[۲۰]

مدل شبیه سازی- بهینه سازی پژوهش حاضر در مقایسه با سایر پژوهش ها و اختلاف کم در جواب بهینه، می توان نتیجه گرفت مدل مذکور از دقت، سرعت و کارایی مناسبی برخوردار است و می توان با اطمینان از آن در طراحی شبکه دفع آب های سطحی استفاده کرد. برای مقایسه بهتر، جواب بهینه این پژوهش به صورت قطر، شیب و تراز تاج ابتدا و انتهای لوله ها، در کنار جواب بهینه افشار [۲۳]، در جدول ۲ ارائه شده است. همان گونه که در جدول ۲ نشان داده شده، اندازه قطر لوله در سه شاخه B۴، B۸ و B۱۳ در جواب پژوهش حاضر به ترتیب ۴۵۰، ۵۲۵ و ۶۰۰ میلی متر و در جواب افشار (۲۰۰۶) با یک اندازه کوچک تر به ترتیب ۳۰۰، ۴۵۰ و ۵۲۵ میلی متر است. همچنین اندازه قطر لوله در دو شاخه B۷ و B۱۰ در جواب پژوهش حاضر به ترتیب ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی متر و در جواب افشار [۲۳] با یک اندازه بزرگ تر به ترتیب ۴۵۰ و ۷۵۰ میلی متر است. در حالی که اندازه قطر سایر شاخه ها در دو جواب یکسان است. اما شیب همه لوله ها در دو جواب متفاوت است. با وجود این ترکیب قطرها و شیب های متفاوت، هزینه ساخت این دو جواب تنها ۲۶۷ دلار (۰/۱۱ درصد) تفاوت دارد.

برای مقایسه بهتر، جواب بهینه این پژوهش به صورت قطر، شیب و تراز تاج ابتدا و انتهای لوله ها، در کنار جواب بهینه افشار [۲۳]، در جدول ۲ ارائه شده است. همان گونه که در جدول ۲ نشان داده شده، اندازه قطر لوله در سه شاخه

جدول ۲. جواب بهینه مسأله محک در پژوهش حاضر در مقایسه با جواب بهینه افشار

Table 2. The optimal answer of the benchmark problem in the present study in comparison with the optimal answer of Afshar

جواب افشار [۲۳]				جواب پژوهش حاضر				
تراز تاج انتها (m)	تراز تاج ابتدا (m)	شیب (%)	قطر (mm)	تراز تاج انتها (m)	تراز تاج ابتدا (m)	شیب (%)	قطر (mm)	شاخه
148.48	150	1.425	300	148.52	150.04	1.4248	300	B1
146.09	148.48	1.96	375	145.55	147.99	2.0013	375	B2
143.9	146.09	2.053	375	143.58	145.71	1.9966	375	B3
145.41	146.95	1.263	300	144.97	146.49	1.2467	450	B4
143.9	145.41	1.152	450	143.28	144.8	1.1597	450	B5
140.67	143.9	1.926	525	140.77	143.82	1.8194	525	B6
145.43	146.95	1.03	450	144.5	146.02	0.9974	300	B7
142.38	145.43	2.224	450	142.3	145.35	2.2237	525	B8
140.67	142.38	1.603	525	140.77	142.29	1.4248	525	B9
138.44	140.67	1.463	750	138.11	139.63	0.9974	600	B10
142.38	145.43	2.001	375	142.12	145.17	2.0013	375	B11
140.86	142.38	1.425	525	140.53	142.05	1.4248	525	B12
138.44	140.86	2.268	525	139.21	140.74	1.4342	600	B13
136.25	138.44	1.272	900	136.22	139.27	1.7711	900	B14
138.7	140.25	1.271	300	139.02	140.24	1.0007	300	B15
137.81	138.7	0.973	375	136.87	138.09	1.3342	375	B16
136.25	137.81	1.482	450	130.06	131.58	1.4455	450	B17
135.06	136.25	0.976	1050	134.44	135.66	1.0007	1050	B18
133.87	135.06	0.781	1050	133.1	134.01	0.5971	1050	B19
132.27	133.87	0.858	1050	132.37	133.28	0.4878	1050	B20

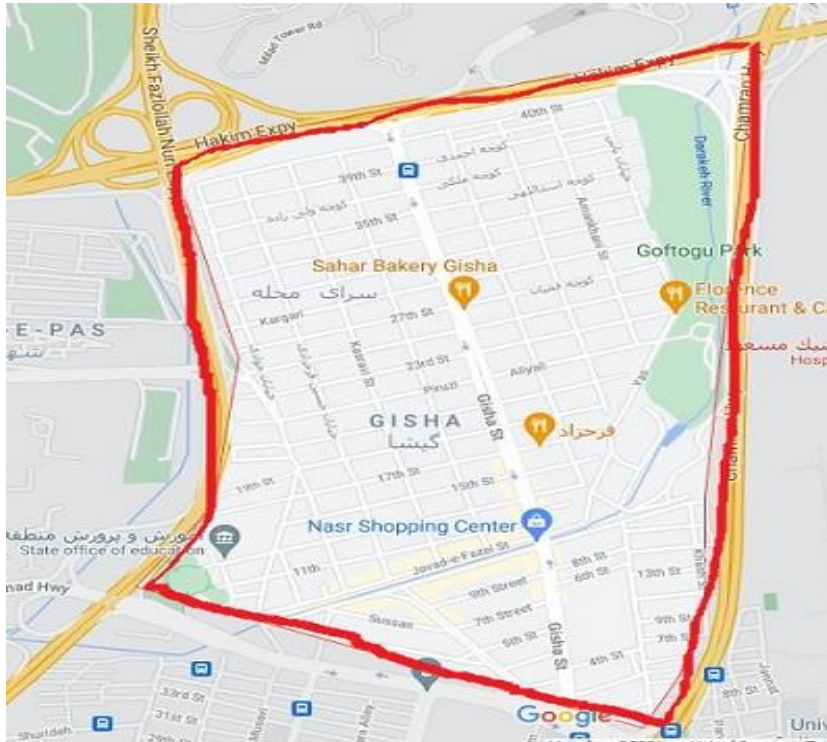
۲-۷- تنظیمات مدل شبیه‌سازی SWMM برای منطقه مطالعاتی

با استفاده از امکانات GIS و همچنین راهنمای نرم‌افزار SWMM مشخصات هر یک از زیر حوضه‌های منطقه مطالعاتی تعیین شد. این مشخصات شامل عرض معادل، مساحت، شیب، درصد نفوذناپذیری، ضریب زبری مانینگ روی سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر و ذخیره سطحی مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر است. سپس زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه به محیط نرم‌افزار SWMM منتقل گردید و فرآیندهای مربوطه شامل طراحی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شامل لوله‌ها و گره‌های آن صورت گرفت. از آنجا که برآورد رواناب در مدل SWMM جمع‌آوری و سایر رواناب شهری بر اساس مقادیر بارش است، بنابراین این اطلاعات از مهم‌ترین و اساسی‌ترین اطلاعات مورد استفاده مدل هستند مدل‌های در جریان مطالعات

۲-۶- مطالعه موردی

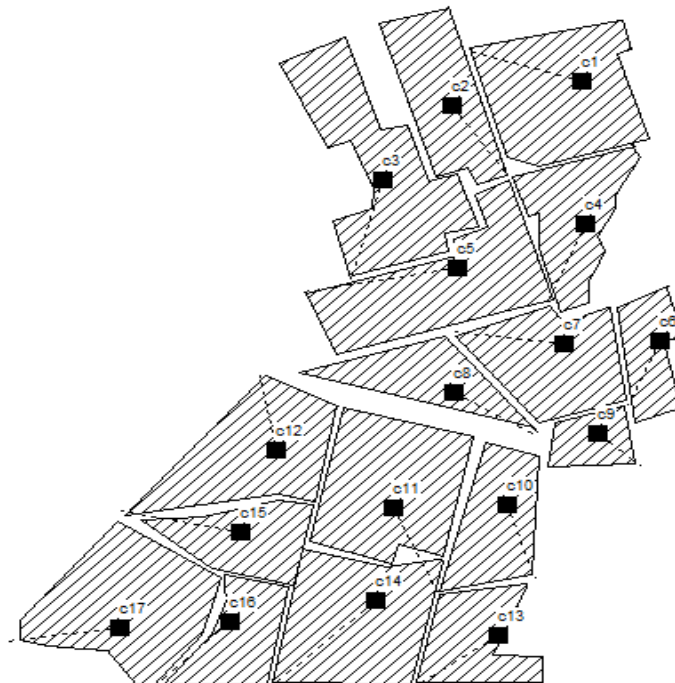
برای بررسی کارایی رویکرد پیشنهادی و اثبات قابلیت‌های آن و همچنین تحلیل ریسک برای تعیین دوره بازگشت بهینه، این رویکرد برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی در یکی از نواحی تهران مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به داشتن اطلاعات پایه مناسب بخشی از منطقه ۲ تهران شکل ۵، محدوده منطقه مورد مطالعه منطقه ۲ تهران با کاربری مسکونی، راه و بزرگراه و فضای سبز انتخاب گردید. ناحیه مذکور از شمال به بزرگراه شهید همت، از شرق به بزرگراه شهید چمران، از غرب به بزرگراه شیخ فضل‌الله نوری و از جنوب به خیابان ستارخان محصور است. در این مطالعه برای تعیین زیر حوضه‌ها از نقشه کاربری اراضی و شیب‌بندی خیابان‌ها و کوچه‌ها، مرز زیر حوضه‌ها تعیین گردید که به ۱۷ زیر حوضه تقسیم شد (شکل ۶).





شکل ۵. بخشی از ناحیه ۳ منطقه ۲

Fig. 5. Part of zone 3 of region 2



شکل ۶. محدوده مطالعاتی و زیر حوضه‌ها

Fig. 6. Study area and sub-catchment



که در آن  $[DU]$ ، بردار قطر لوله‌های متصل به ابتدای لوله  $i$  است. در ادامه هم‌زمان با کد برداری از مقادیر شیب نرمال لوله‌ها، قید ۵ اعمال می‌شود.

پس از تعیین مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری، ترازهای نصب لوله‌ها به گونه‌ای محاسبه می‌شود که قید ۶ ارضاء شوند. برای تعیین ترازهای نصب لوله‌ها، ابتدا لوله‌های موجود در سرشاخه‌های شبکه در نظر گرفته می‌شوند و با استفاده از مقدار حداقل پوشش خاک روی لوله‌ها،  $C_{min}$ ، تراز تاج ابتدای این لوله‌ها،  $EU_i$ ، از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$EU_i = GU_i - C_{min} \quad (۱۷)$$

در رابطه فوق،  $GU_i$  تراز سطح زمین در ابتدای لوله  $i$  است. تراز تاج انتهایی لوله،  $ED_i$  نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$ED_i = EU_i - L_i S_i \quad (۱۸)$$

که در آن  $L_i$  طول لوله  $i$  است. در صورتی که تراز تاج انتهایی این لوله‌ها قید حداقل پوشش خاک را ارضا نکند، هر دو تراز تاج ابتدا و انتها باید به ترتیب با روابط ۱۹ و ۲۰ اصلاح شوند:

$$ED_i = GD_i - C_{min} \quad (۱۹)$$

$$EU_i = ED_i + L_i S_i \quad (۲۰)$$

در صورتی که ترازهای نصب همه سرشاخه‌های شبکه تعیین شود، امکان محاسبه ترازهای نصب سایر شاخه‌ها البته با یک‌روند متوالی از بالادست به پایین دست امکان‌پذیر خواهد بود.

برای این منظور و برای اعمال قید ۶ ابتدا بردار تراز تاج انتهایی همه لوله‌های متصل به ابتدای هر لوله  $i$   $[EU_i]$  تهیه شده و سپس تراز تاج ابتدای لوله مذکور از رابطه زیر تعیین می‌شود:

طرح جامع آب‌های سطحی شهر تهران، یک رابطه عمومی برای شدت بارش‌ها به صورت رابطه (۱۵) ارائه شد [۲۸]. با توجه به ملاحظات شهری منطقه مورد مطالعه، شبیه‌سازی هیدرولیکی رواناب در مدل بر اساس بارش با دوره‌های بازگشت ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۵۰ سال و با توجه به رابطه (۱۵) انجام شد.

$$i = CD^{-0.645} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)،  $i$  شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت)،  $D$  تداوم بارندگی (دقیقه) و  $C$  ضریب معادله که بر اساس دوره بازگشت طراحی و ارتفاع متوسط حوضه تعیین می‌شود. با توجه به داده‌های در دسترس، برای تعیین الگوی توزیع زمانی مناسب بارش در محدوده مطالعاتی، از روش بلوک‌های متناوب، استفاده شده است، به این ترتیب که با استفاده از منحنی‌های مذکور، در یک بارش با تداوم ۶ ساعت، میزان بارندگی در تداوم‌های ۱۰ دقیقه تا ۶ ساعت تعیین و میزان بارش در هر گام زمانی منتخب با بلوک‌های بارش محاسبه می‌گردد. سپس بزرگ‌ترین بلوک بارندگی در ساعت ۳ (وسط تداوم بارش) قرار داده شده، بلوک‌های بعدی به ترتیب بزرگی ابتدا در سمت راست و سپس در سمت چپ بزرگ‌ترین بلوک قرار داده می‌شوند. بر اساس مطالعات انجام شده بر روی بارش‌های شهر تهران و نتایج به دست آمده، روشن شده است که برای بارش‌های سه ساعته و طولانی‌تر، شدیدترین بخش بارندگی در اواسط بارش رخ می‌دهد که این مطلب در ساخت الگوی بارش محلی برای شهر تهران رعایت شده است [۲۸].

## ۲-۸- تنظیمات مدل بهینه‌سازی

در الگوریتم توسعه داده شده، هر کروموزوم از دو بخش تشکیل شده است که این بخش‌ها به ترتیب قطر و شیب لوله‌ها است. این کروموزوم‌ها آزادانه تولید، تکثیر و جهش داده می‌شوند. سپس این کروموزوم‌ها به صورتی کدبرداری می‌شوند که قیود ۴ و ۵ ارضا شوند.

برای اعمال قید ۴، که نتیجه کاربرد آن، پیروی از الگوی تلسکوپیی انتخاب قطر لوله‌ها در امتداد شبکه است، باید مقدار  $D_i$  از رابطه زیر محاسبه شود:

$$D_i \geq [DU] \quad (۱۶)$$

جدول ۳. آنالیز حساسیت مدل بهینه‌سازی

Table 3. Sensitivity analysis of the optimization model

$\lambda_E$	$\lambda_y$	$\lambda_v$	نرخ جهش ژنی	اندازه جمعیت	پارامتر
5.0E+11	5.0E+10	1.0E+9	۰/۰۲	۴۰۰	مقدار

۲-۹- تعیین توابع خسارت

در ایران منحنی یا الگوهای قابل قبولی برای توابع عمق- خسارت ارائه نشده است. به علت فقدان آمار کافی و محاسبه نادقیق خسارت‌های سیل، آمار مطمئنی برای برآورد این منحنی‌ها با توجه به آمار خسارت وجود ندارد؛ بنابراین در تحقیق حاضر از روش‌های به کار گرفته شده در مطالعات قبلی در این زمینه با دید و قضاوت مهندسی استفاده شد. ابتدا چندین منحنی عمق- درصد خسارت در ایران و خارج از ایران در نظر گرفته شد و سپس با مقایسه آن‌ها منحنی مناسب در ایران انتخاب گردید؛ که در تحقیق حاضر از منحنی‌های تراز-درصد خسارت ساختمان‌های مسکونی و تجاری که توسط مرجع [۲۹] ارائه شده، استفاده شد (شکل ۷).

در به دست آوردن توابع تراز- خسارت، تراز کف ساختمان، برابر تراز سطح زمین در نقطه وقوع ساختمان فرض شده است. همچنین فرض شده که ساختمان‌ها دارای استحکام مناسبی می‌باشند و بر اثر آب گرفتگی، دچار ریزش کامل نمی‌شود. همچنین محاسبه میزان خسارت تا ارتفاع دو متری ساختمان‌ها، در نظر گرفته شده است. در برآورد خسارت ناشی از رواناب، در تحقیق حاضر، از شاخص عمق میانگین رواناب در سطح هر زیر حوضه استفاده شده است. با توجه به کوچک بودن زیر حوضه‌ها، فرض عمق میانگین جهت محاسبه خسارت منطقی است.

با توجه به نمودار تراز-درصد خسارت ارائه شده توسط مرجع [۲۹]، در نرم‌افزار اکسل با برازش دادن منحنی مناسب با آن معادله منحنی حاصل به دست می‌آید. روابط عمق-درصد خسارت برای مناطق مسکونی و تجاری به صورت زیر به دست آمد:

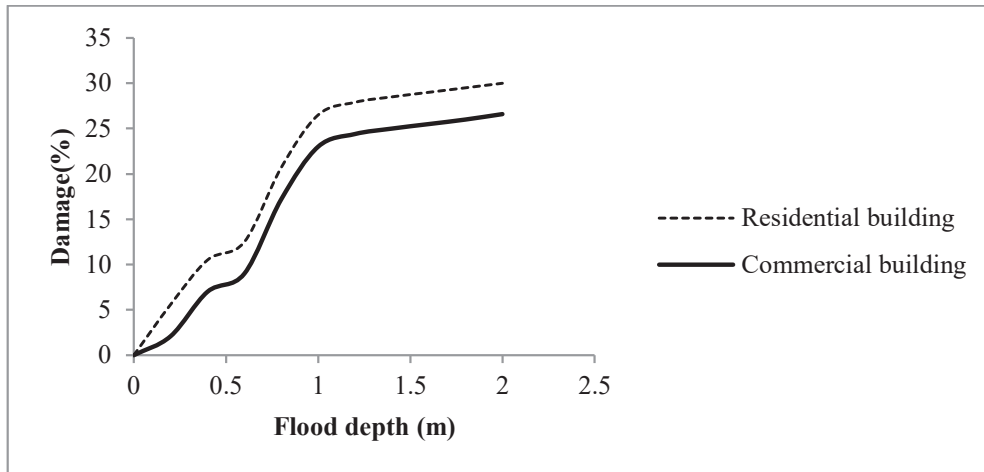
$$D_{Home} = 8.27y^4 - 35.9y^3 + 40.31y^2 + 11.49y + 0.651 \quad (22)$$

$$EU_i \leq \min [EU_i] \quad (21)$$

از آنجایی که قید حداقل پوشش خاک، پیش از این بر همه مؤلفه‌های بردار  $[EU_i]$  اعمال شده است، دیگر نیاز به کنترل دوباره آن نیست. این روند به طور متوالی از بالادست به پایین دست تا خروجی شبکه دنبال شده و ترازهای نصب همه لوله‌ها محاسبه می‌شود. قیود ۱ تا ۳ نیز همان‌طور که قبلاً گفته شد، به روش تابع جریمه اعمال می‌شوند.

پیش از اجرای عملیات اعتبارسنجی، تحلیل حساسیت برای تعیین پارامترهای الگوریتم ژنتیک و پارامترهای جریمه در مسئله محک، به کمک مجموعه اجراهای آزمایشی با مقادیر متفاوت پارامترها، انجام شد. در نهایت پارامترهای مختلف بهینه‌سازی برای مسئله محک، با مقادیر درج شده در جدول ۲ برای ادامه پژوهش، مورد استفاده قرار گرفت. تنظیمات الگوریتم ژنتیک با استفاده از چندین اجرای آزمایشی با نسل‌های اولیه تصادفی روی مدل پیشنهادی تعیین گردید. به گونه‌ای که سریع‌ترین همگرایی برای یافتن جواب‌های بهینه حاصل گردد. برای این منظور مدل بهینه‌سازی با مقادیر مختلف پارامترهای مورد نظر اجرا و پس از مقایسه نتایج، مناسب‌ترین مقدار برای هر یک از پارامترها انتخاب گردید که در آن به ازای مقادیر مختلف پارامترها، بهبود راندمان بهینه‌سازی مشاهده شود. مقادیر این پارامترها در جدول ۳ درج شده است.

همچنین پس از تعدادی اجرای مدل بهینه‌سازی مشخص گردید که اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با حداکثر نسل ۴۰۰ برای رسیدن به همگرایی کافی است.



شکل ۷. منحنی تراز- درصد خسارت ساختمان های مسکونی و تجاری [۲۹]

Fig.7. Depth-damage percent curve of residential and commercial buildings [29]

#### ۲-۹-۲- تعیین تابع خسارت وارد به فضای سبز

برای به دست آوردن رابطه‌ای برای خسارت وارد به فضای سبز به این صورت عمل شد که با توجه به اطلاعات سازمان پارک‌ها و فضای سبز شهر تهران، بارندگی‌های با شدت زیاد برای منطقه ۲ که حدود ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متر رواناب ایجاد می‌کند، حدود ۷ میلیارد ریال خسارت به فضای سبز وارد می‌کند. در این تحقیق برای به دست آوردن رابطه‌ای برای خسارت وارد به فضای سبز، با استفاده از رابطه‌ای بین خسارت وارده به راه‌ها که توسط مرجع [۳۰] به دست آمده، خسارت وارد به فضای سبز برازش داده شد. به این صورت که خسارت وارد به فضای سبز در عمق ۳۰ سانتی‌متر (۷ میلیارد ریال) بر خسارت وارد به راه‌ها در همین عمق تقسیم شد. سپس عدد به دست آمده به عنوان ضریبی برای خسارت سایر عمق‌ها در نظر گرفته شد. با ضرب نمودن عدد به دست آمده در خسارت وارد به راه‌ها در سایر عمق‌ها، خسارت وارد به فضای سبز در سایر عمق‌ها به دست آمد؛ و با برازش دادن منحنی مناسب با آن، رابطه عمق- درصد خسارت برای فضای سبز به دست آمد. این رابطه به شرح زیر است:

$$D_{green} = 0.09D_{road} + 0.00004 \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)  $D_{green}$  درصد خسارت وارد به فضای سبز است.

$$D_{Com} = 12.09y^4 - 53.74y^3 + 68.61y^2 - 5.85y + 0.36 \quad (23)$$

در روابط (۲۲) و (۲۳)،  $D_{Home}$  درصد خسارت وارد به ساختمان‌های مسکونی،  $D_{Com}$  درصد خسارت وارد به ساختمان‌های تجاری و  $y$  عمق آب بر حسب متر است. واحد خسارت در این تحقیق بین صفر تا صد است.

#### ۲-۹-۱- تعیین تابع خسارت وارد به راه‌ها

خسارت وارده به زیرساخت‌های شهری به دلیل پیچیدگی آن‌ها به طور مستقل مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد بلکه به صورت درصدی از خسارت وارده به کاربری‌های شهری ارزیابی می‌شوند. به عنوان مثال حکمتی فرد با توجه به آمار تاریخی و گذشته سیلاب ایران خسارت وارده به ساختمان‌های مسکونی را به دست آورد و با توجه به آن درصد خسارت وارده به راه‌ها را برازش داد که در تحقیق حاضر از همین رابطه استفاده شد. این رابطه به شرح زیر است:

$$D_{road} = 0.03024D_{Home} - 0.072 \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)  $D_{road}$  درصد خسارت وارده به راه‌ها است [۳۰].

## ۲-۹-۳- تعیین تابع خسارت ناشی از ترافیک

با توجه به آمار معاونت حمل و نقل شهرداری و آمار انجمن علمی اقتصاد شهری ایران در منطقه ۲ در یک روز ۰/۱۲ میلیون ساعت تأخیر در اثر ترافیک وجود دارد؛ که سالانه ۴/۳۷ میلیون ساعت تأخیر می‌شود؛ و این باعث ۲۵/۳۷ میلیارد تومان خسارت برای منطقه ۲ می‌شود. این خسارت شامل مجموع خسارت در اثر اتلاف منابع سوختی، اتلاف وقت و اتلاف منابع در اثر آلودگی است. همچنین با توجه به آمار آن‌ها در روزهای بارانی میزان تأخیر به میزان ۲۵ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. لذا با توجه به این آمار میزان خسارت ناشی از ترافیک در یک روز بارانی که حدود ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متر رواناب ایجاد می‌کند، برای منطقه ۲ ناحیه ۳، حدود ۱ میلیارد ریال است. در این تحقیق برای به دست آوردن رابطه‌ای برای خسارت ناشی از ترافیک، با استفاده از رابطه بین خسارت وارد به راه‌ها که توسط حکمتی فرد [۳۰] به دست آمده، خسارت ناشی از ترافیک برازش داده شد. به این صورت که خسارت ناشی از ترافیک در عمق ۳۰ سانتی‌متر (۱ میلیارد ریال) بر خسارت وارد به راه‌ها در همین عمق تقسیم شد. سپس عدد به دست آمده به عنوان ضریبی برای خسارت سایر عمق‌ها در نظر گرفته شد. با ضرب نمودن عدد به دست آمده در خسارت وارد به راه‌ها در سایر عمق‌ها، خسارت ناشی از ترافیک در سایر عمق‌ها به دست آمد؛ و با برازش دادن منحنی مناسب با آن، رابطه عمق- درصد خسارت برای فضای سبز به دست آمد. این رابطه به شرح زیر است:

$$D_{Traffic} = 0.0116D_{road} + 0.0005 \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)  $D_{Traffic}$  درصد خسارت ناشی از ترافیک است.

خسارت‌های سازه‌ای که به اماکن مسکونی و اداری وارد می‌شود صرفاً هزینه‌های ساخت و ساز را پوشش می‌دهد و بدین منظور قیمت زمین که بخش قابل توجهی از قیمت ساختمان را تشکیل می‌دهد در محاسبات خسارت از قیمت تمام شده بنا کسر شده است و سعی شده است صرفاً هزینه‌های ساخت مورد توجه قرار گیرد. برای محاسبه خسارت، ارزش اقتصادی ساختمان‌ها و درصد خسارت سیلاب باید مشخص گردد. لذا در این مرحله ارزش هر کاربری با توجه به نتایج طرح آمارگیری از فعالیت ساختمانی بخش خصوصی و همچنین مصاحبه با مشاورین املاک منطقه به دست آمده است. با ضرب نمودن درصد خسارت در ارزش هر کاربری خسارت به واحد

پولی تبدیل می‌شود و روابط آن به دست می‌آید.

## ۲-۹-۴- ارزیابی توابع تراز- خسارت محاسبه شده

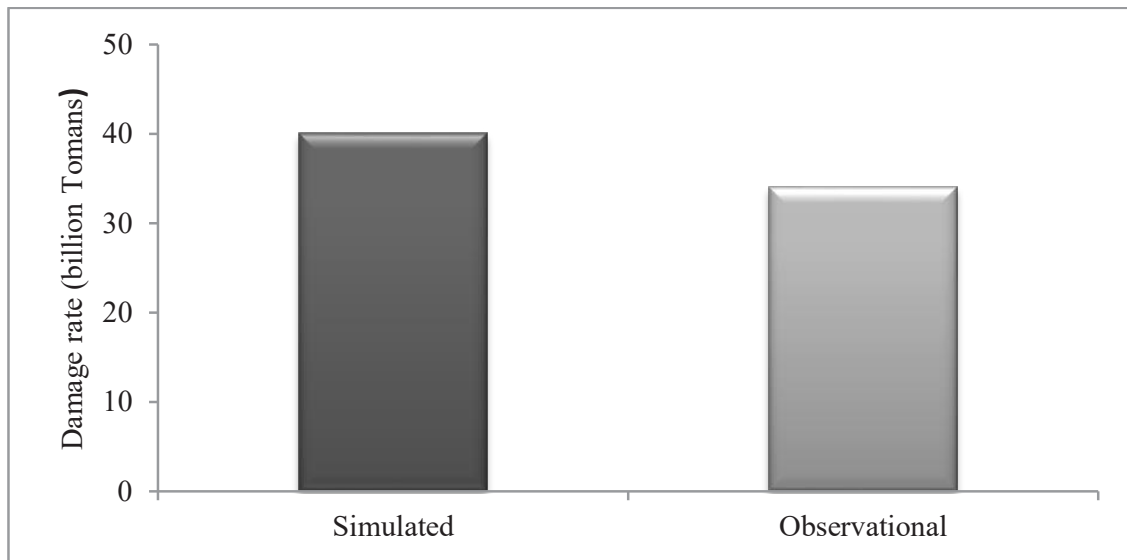
برای ارزیابی عملکرد روابط تراز- خسارت به دست آمده به مقایسه میزان شبیه‌سازی شده خسارت وارده به حوضه کن در سال ۱۳۹۴ و اطلاعات ارائه شده از میزان خسارت توسط استانداری تهران اقدام شد. علت انتخاب این حوضه، در دسترس بودن اطلاعات مربوط به حوضه و همچنین اطلاعات ثبت شده از خسارات وارده در اثر سیل سال ۱۳۹۴ توسط استانداری بود. سیلاب رخ داده در سال ۱۳۹۴ معادل سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ ساله بود که خسارتی معادل ۳۴ میلیارد تومان وارد کرد. حوضه کن در مدل SWMM شبیه‌سازی که به ۱۰ زیر حوضه تقسیم شد. برای اطلاعات بیشتر در مورد حوضه به [۳۱] مراجعه شود. پس از شبیه‌سازی حوضه مذکور در مدل SWMM، مدل برای بارش ۲۵ ساله در حوضه کن اجرا شد. سپس عمق رواناب حاصل از بارش مذکور برای کل حوضه، با توجه به نتایج خروجی مدل، به دست آمد. سپس از روابطی که بر اساس عمق-درصد خسارت برای هر کاربری به دست آمد و با توجه به عمق رواناب و ارزش هر کاربری در سال ۱۳۹۴ خسارت هر کاربری محاسبه شد.

## ۲-۹-۵- نتایج ارزیابی توابع تراز- خسارت محاسبه شده

در شکل ۸ مقایسه میان خسارت‌های تخمین زده شده توسط توابع تراز- خسارت به دست آمده و میزان خسارت مشاهداتی ارائه شده است. سیلاب مشاهده‌ای ۳۴ میلیارد تومان و شبیه‌سازی شده حدود ۴۰ میلیارد تومان خسارت ایجاد کرد که بر اساس اختلاف کم بین نتایج می‌توان نتیجه گرفت توابع به دست آمده برای محاسبه خسارت از عملکرد مناسبی برخوردار هستند.

## ۲-۱۰- تحلیل ریسک مطالعه موردی

در این مرحله با توجه به روابط عمق- درصد خسارت محاسبه شده، خسارت وارد به هر کاربری برای دوره‌های بازگشت مختلف به دست آمد. برای محاسبه خسارت، ابتدا عمق رواناب حاصل از بارش برای دوره‌های بازگشت مختلف با استفاده از خروجی نرم‌افزار SWMM محاسبه شد. در مرحله بعد با توجه به مطالب مطرح شده در خصوص تحلیل ریسک، برای محاسبه خسارت ناشی از سیل طراحی، خسارت ناشی از کلیه سیل‌های بزرگ‌تر از سیل مذکور نیز با توجه به عمق رواناب هر سیل در نظر گرفته



شکل ۸. مقایسه میان خسارت شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای حوضه کن در سال ۱۳۹۴

Fig. 8. Comparison between simulated and observations damage of the Kan basin in 2015

در رابطه (۲۷)  $A$  هزینه سالیانه طراحی،  $C_0$  هزینه طراحی،  $r$  نرخ تنزیل در هر دوره زمانی،  $T$  عمر طرح یا لوله‌ها،  $\alpha$  و  $\beta$  ضریبی که با توجه به جنس لوله تعیین می‌شود [۳۳].

در تحقیق حاضر نرخ تنزیل با توجه به ملاحظات اقتصادی و دید و قضاوت مهندسی برابر با  $0/08$  در نظر گرفته شد. سوامی و شارما (۲۰۰۸) ضریب  $\alpha$  را برای لوله‌های آزیست سیمانی، PVC و بتنی برابر با صفر و ضریب  $\beta$  را برای همین لوله‌ها  $0/005$  و  $T$  را هم ۶۰ سال در نظر گرفتند. با توجه به اینکه لوله‌های مورد استفاده برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی معمولاً یکی از همین سه نوع لوله است، بنابراین در تحقیق حاضر از همین مقادیر استفاده و هزینه سالیانه طرح محاسبه شد. هزینه طراحی نیز با اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به دست آمد.

لذا در این قسمت، هزینه طراحی سالانه با توجه به هزینه طراحی محاسباتی از اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی و رابطه (۲۷) به دست آمد. هزینه ریسک خسارت سالانه نیز با توجه به تفاوت عمق رواناب در دوره‌های بازگشت بالاتر از دوره بازگشت مورد نظر و همچنین روابط عمق- درصد خسارت به دست آمده، محاسبه شد؛ که مجموع این دو هزینه برای انجام تحلیل ریسک و تعیین دوره بازگشت بهینه نیاز است.

شد. قاعدتاً شبکه‌ای که برای یک دوره بازگشت طراحی می‌شود، جوابگوی همان دوره بازگشت به علاوه کلیه دوره‌های بازگشت کوچک‌تر خواهد بود. چنانچه سیلی با دوره بازگشت بزرگ‌تر از سیل طراحی اتفاق بیفتد، طبیعی است که شبکه جوابگو نخواهد بود و سیستم دچار خسارت خواهد شد. در چنین شرایطی قاعدتاً تفاوت عمق سیلاب ناشی از سیلاب بزرگ‌تر و عمق سیلاب طرح خسارت ایجاد خواهد کرد. بنابراین، عمق سیلاب مؤثر برای هر زیر حوضه جهت تعیین خسارت برابر خواهد بود با عمق میانگین رواناب سیل بزرگ‌تر منه‌ای عمق میانگین رواناب سیل طراحی. این عمل برای کلیه زیر حوضه‌ها انجام می‌شود و در نتیجه مجموع خسارت برای کلیه زیر حوضه‌ها خسارت کل منطقه برای آن دوره بازگشت خواهد بود. از روابط خسارت محاسبه شده در این تحقیق استفاده شده و خسارت ناشی از رواناب محاسبه شد. این رویکرد برای کلیه دوره‌های بازگشت انجام شد و میزان ریسک خسارت برای آن‌ها به دست آمد.

برای محاسبه هزینه سالیانه طراحی از روشی که سوامی و شارما [۳۲] برای هزینه سالیانه طراحی شبکه لوله‌های انتقال آب استفاده کردند، استفاده شد. آن‌ها با در نظر گرفتن هزینه‌های دوره‌ای و جاری رابطه‌ای به صورت رابطه زیر ارائه دادند:

$$A = C_0 \left( \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} + \frac{r(1-\alpha)}{(1+r)^T - 1} + \beta \right) \quad (27)$$

جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی برای دوره های بازگشت مختلف

Table 4. Optimization results for different return periods

دوره بازگشت	ریسک خسارت		هزینه طراحی (میلیارد ریال)	هزینه طراحی سالانه (میلیارد ریال)	هزینه کل (میلیارد ریال)
	احتمال وقوع	سالانه (میلیارد ریال)			
1	1	1287.89	9000	772.18	2060.07
2	0.5	989.56	10391	891.53	1881.08
5	0.2	723.64	10520	902.59	1626.24
10	0.1	508.68	11000	943.78	1452.45
20	0.05	311.84	16000	1372.77	1684.61
25	0.04	158.99	21000	1801.76	1960.75
50	0.02	0	30000	2573.94	2573.94

### ۳- بحث و نتایج

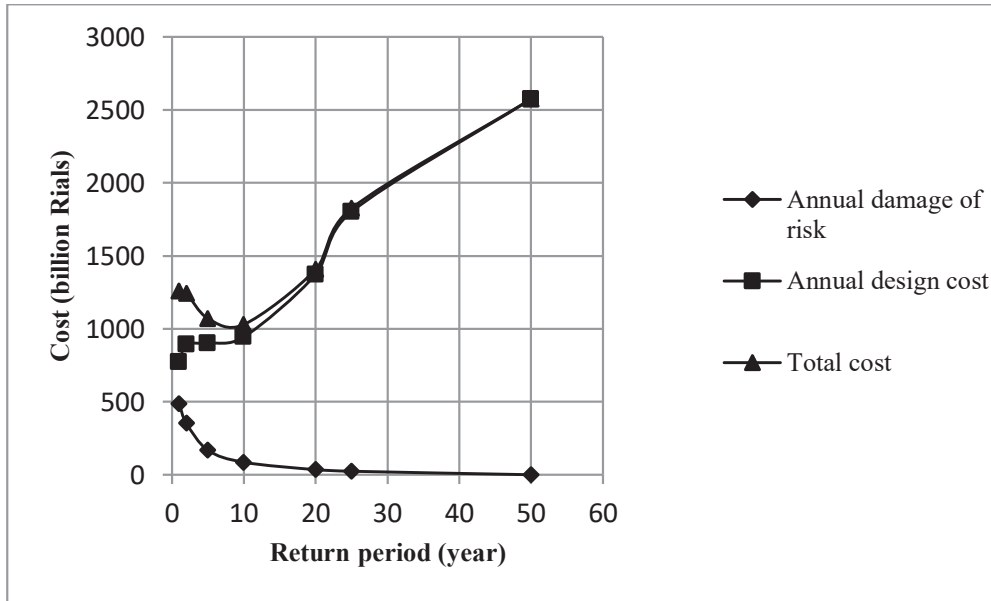
با تکمیل اطلاعات لازم، مدل برای دوره‌های بازگشت ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۵۰ ساله اجرا شد. مقادیر بهینه ابعاد مجراها و همچنین میزان خسارت و هزینه‌های طراحی برای هر کدام از دوره‌های بازگشت محاسبه شد. سپس با انجام تحلیل ریسک دوره بازگشت بهینه به دست آمد.

#### ۳-۱- نتایج طراحی بهینه شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی با تحلیل ریسک

با توجه به مطالب ذکر شده و با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در محیط متلب و تلفیق آن با مدل شبیه‌سازی SWMM و رعایت قیود مسئله، شبکه‌ای برای منطقه مورد مطالعه طراحی شد که با تعیین ابعاد بهینه مجراها، هزینه‌های طراحی و هزینه‌های خسارت در حالت حداقل و پارامترهای هیدرولیکی و عمق‌ها در محدوده مجاز باشد. جدول ۴ نتایج اجرای مدل با دوره‌های بازگشت مختلف، بر پایه تحلیل ریسک را نشان می‌دهد.

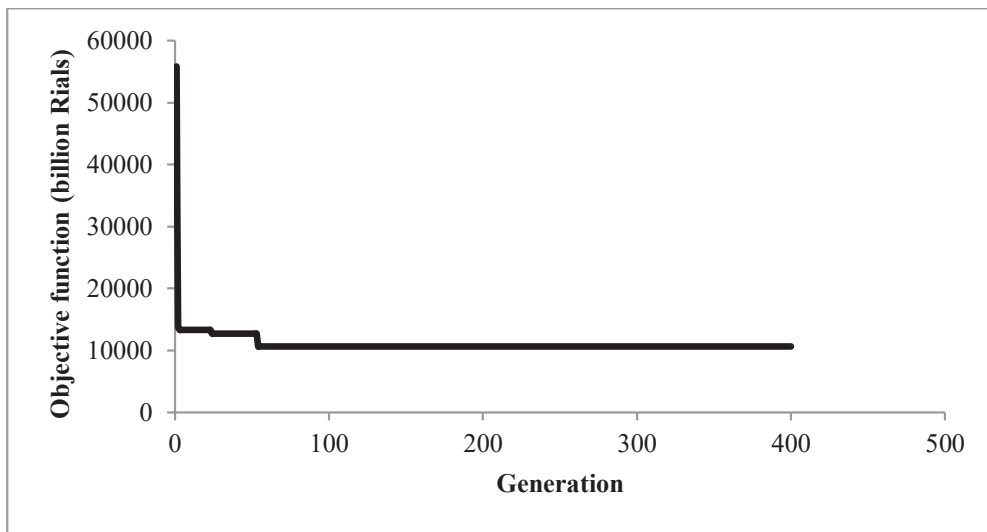
ریسک خسارت سالانه با توجه به مطالب مطرح شده، با استفاده از عمق رواناب در خروجی مدل SWMM و توابع خسارت تخمین زده شده به دست آمد که در ستون سوم نشان داده شده است؛ یعنی عمق رواناب

سیل‌های با دوره بازگشت بزرگ‌تر از سیل مورد نظر از عمق رواناب سیل مورد نظر کم شده و تفاوت بین این دو عمق، مبنای محاسبه خسارت سیل در نظر گرفته شد. هزینه طراحی نیز با اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به دست آمد. هزینه سالانه طراحی نیز با توجه به هزینه طراحی محاسباتی و رابطه (۲۷) به دست آمده است. با توجه به جدول ۳ هزینه خسارت با افزایش دوره بازگشت کاهش می‌یابد و برای دوره‌های بازگشت بالا به صفر می‌رسد. هزینه سالیانه طرح نیز با افزایش دوره بازگشت افزایش می‌یابد. مقدار ریسک خسارت سالیانه با هزینه سالیانه طرح جمع می‌شود و هزینه سالیانه کل به دست می‌آید که در ستون ۶ نشان داده شده است. با توجه به مطالب گفته شده، دوره بازگشت بهینه که در آن کل هزینه سالیانه حداقل است (۱۴۵۲/۴۵ میلیارد ریال در سال) ۱۰ سال است. با توجه به اینکه در طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی در تحقیق حاضر، هر دو جنبه هزینه‌های اجرایی و هزینه‌های خسارت در نظر گرفته شد و رویکردی مبتنی بر ریسک برای طراحی بهینه انجام شد، همچنین در این رویکرد تمام خسارات ناشی از جاری شدن رواناب مربوط به کاربری‌های موجود در منطقه مطالعاتی من جمله فضای سبز و خسارت ناشی از ترافیک نیز در نظر گرفته شد، لذا دوره بازگشت به دست آمده (۱۰ ساله) دوره بازگشت بهینه برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی می‌باشد؛ که هم هزینه‌های طراحی و هم هزینه‌های



شکل ۹. نتایج تحلیل ریسک

Fig. 9. Risk analysis results



شکل ۱۰. نمودار بهینه‌سازی برای دوره بازگشت بهینه ۱۰ ساله

Fig. 10. Optimization convergence performance for the 10-year optimal return period

با توجه به اینکه دوره بازگشت بهینه برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی در منطقه مطالعاتی ۱۰ ساله می‌باشد، جواب بهینه که شامل قطر و شیب لوله‌ها است به دست آمد. روند بهینه‌سازی نیز برای دوره بازگشت بهینه ۱۰ ساله در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

خسارت کاهش پیدا می‌کند. هزینه‌های خسارت سالیانه، طراحی سالیانه و کل طرح در شکل ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با توجه به شکل دوره بازگشت بهینه که در آن کل هزینه سالیانه حداقل است، ۱۰ سال می‌باشد.



تعیین دوره بازگشت بهینه، این رویکرد برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی در یکی از نواحی تهران مورد استفاده قرار گرفت. با اجرای مدل برای دوره‌های بازگشت مختلف، جواب بهینه برای هر کدام از دوره‌های بازگشت به دست آمد. هر چه دوره بازگشت بزرگ‌تر انتخاب شود هزینه طرح بزرگ‌تر خواهد بود و اطمینان آن در برابر ریسک خسارت بیشتر خواهد بود. برای تعیین دوره بازگشت بهینه طراحی از تحلیل ریسک استفاده شد. در تحلیل ریسک طرح بهینه با دوره بازگشتی به دست می‌آید که در آن مجموع هزینه‌های طراحی و ریسک خسارت کمترین است. در این راستا مطالعه موردی انجام شد و نتایج نشان داد که دوره بازگشت بهینه که در آن مجموع هزینه‌های طراحی و هزینه ریسک خسارت حداقل باشد (۱۴۵۲/۴۵ میلیارد ریال در سال)، دوره بازگشت ۱۰ ساله است. در حال حاضر در اکثر کشورها، دوره بازگشت بارندگی برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی را معمولاً ۵ ساله در نظر می‌گیرند. انتخاب دوره بازگشت ۵ ساله بدون انجام تحلیل ریسک انجام شده که بهینه نخواهد بود؛ زیرا همان‌طور که گفته شد در یک طراحی مناسب باید تعادل خوبی بین هزینه اجرا و خطراتی که در آینده ممکن است رخ دهد، برقرار باشد؛ و طراحی باید هر دو جنبه را پشتیبانی کند؛ که در تحقیق حاضر تلفیق الگوریتم ژنتیک به عنوان مدل بهینه‌سازی و مدل SWMM به عنوان مدل شبیه‌سازی و با در نظر گرفتن رویکرد طراحی مبتنی بر ریسک، مجموعه‌ای کارآمد ایجاد کرده است که ضمن بررسی دقیق رفتار هیدرولیکی سیستم، قادر به طراحی بهینه شبکه مورد نظر است.

## منابع

- [1] S. Lukman, A.S. Abdurrasheed, Improvement Design of Storm Sewer Network for Flood Control. *Frontiers in Environmental Engineering (FIEE)*, 2(3) (2013) 31-37.
- [2] H. Yu, G. Huang, C. Wu, Application of the stormwater management model to a piedmont city: a case study of Jinan City, China, *Water Sci Technol*, 70(5) (2014) 858-864.
- [3] Z. Zhu, Z. Chen, X. Chen, P. He, Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems, *Science of The Total Environment*, 553 (2016) 1-12.
- [4] R. Shariat, A. Roozbahani, A. Ebrahimian, Risk Assessment of the Urban Runoff Collection Networks Using Spatial Multi Criteria Decision-Making (Case Study: District 11 of Tehran), *Journal of Water and*

با توجه به شکل ۱۰ در ابتدای فرآیند بهینه‌سازی، مقادیر تابع هدف به دلیل جریمه سنگین ناشی از تخطی‌های بزرگ از قیود، با مقادیر بزرگ برآورده شد. در ادامه مقادیر تابع هدف خیلی سریع کاهش یافت. به طوری که تقریباً از نسل ۷۵ به بعد به مقدار ۱۰۶۵۱ میلیارد ریال رسید و ثابت ماند. با این عملکرد می‌توان سرعت بهینه‌سازی در چنین مسئله بزرگی با قیود سخت گیرانه را بسیار خوب و الگوریتم توسعه داده شده را موفق ارزیابی کرد.

## ۴- نتیجه‌گیری

طراحی یک زیرساخت شهری مانند شبکه دفع آب‌های سطحی، نیازمند تصمیم‌گیری در مورد معیارهای طراحی است. بارش باران و پیامد آن سیلاب ماهیتی تصادفی دارند و بنابراین سامانه‌های مرتبط با آن در معرض عدم قطعیت هستند. پیامد عدم قطعیت، ریسک خواهد بود. لذا تصمیم‌گیری در مورد یک طرح در معرض عدم قطعیت به طور کلی با ریسک همراه است. روش طراحی مبتنی بر ریسک قادر است تعادل خوبی بین هزینه اجرا و خطراتی که در آینده ممکن است رخ دهد، برقرار کند. لذا در مقاله حاضر از روش بهینه‌سازی - شبیه‌سازی برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی با رویکرد مبتنی بر ریسک استفاده شده است. اهداف بهینه‌سازی شامل کمینه‌سازی هزینه‌های طراحی و هزینه‌های خسارت با تعیین ابعاد بهینه مجراها و همچنین تعیین دوره بازگشت بهینه طرح که در آن ریسک خسارت سالیانه و هزینه طراحی سالیانه حداقل باشد، است. برای محاسبه خسارت توابعی بر اساس اطلاعات و آمار سیلاب و منحنی‌های تراز-خسارت محققین دیگر تخمین زده شد. توابع خسارت تخمین زده شده کلیه خسارت‌های وارد بر کاربری‌های موجود در منطقه مطالعاتی من جمله فضای سبز و همچنین خسارت ناشی از ترافیک را پوشش می‌دهد؛ بنابراین جواب‌های دقیق‌تری به دست می‌دهد. این پژوهش با استفاده از مدل بهینه‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک در محیط متلب و تلفیق آن با مدل شبیه‌سازی SWMM برای تحلیل هیدرولیکی گزینه‌های شبکه، اجرا شد. برای صحت‌سنجی الگوریتم توسعه داده شده از شبکه محک استفاده شد و نتایج آن با نتایج سایر مؤلفان و مؤلف اصلی شبکه محک مقایسه شد. نتایج صحت‌سنجی مدل نشان داد که با تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و مدل شبیه‌سازی SWMM، در پژوهش حاضر، جواب‌های مطلوب‌تر و با هزینه محاسباتی کمتری به دست آمده و در نتیجه روش پیشنهادی می‌تواند در حل مسائل بهینه‌سازی طراحی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به کار گرفته شود. برای بررسی کارایی رویکرد پیشنهادی و اثبات قابلیت‌های آن و همچنین تحلیل ریسک برای

- and fuzzy control to a combined sewer pumping station, *Water Science and Technology*, 39(9) (1999) 217-224.
- [15] A.R. Simpson, G.C. Dandy, L.J. Murphy, Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4) (1994) 423-443.
- [16] Z.Y. Wu, A.R. Simpson, Competent Genetic-Evolutionary Optimization of Water Distribution Systems, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(2) (2001) 89-101.
- [17] S.E. Cieniawski, J.W. Eheart, S. Ranjithan, Using Genetic Algorithms to Solve a Multiobjective Groundwater Monitoring Problem, *Water Resources Research*, 31(2) (1995) 399-409.
- [18] B.J. Ritzel, J.W. Eheart, S. Ranjithan, Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem, *Water Resources Research*, 30(5) (1994) 1589-1603.
- [19] M.H. Afshar, M. Rohani, Optimal design of sewer networks using cellular automata-based hybrid methods: Discrete and continuous approaches, *Engineering Optimization*, 44(1) (2012) 1-22.
- [20] A. Mousavi, Optimization of storm sewer networks in flat areas with heavy storms based on performance indices. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the Ph.D. degree (2016) (In Persian).
- [21] H. M.V. Samani, Design of hydraulic structures. Dez Ab Consulting Engineering Publications. 346P (2016) (In Persian).
- [22] L.W. Mays, J.C. Liebman, H.G. Wenzel, Model for Layout and Design of Sewer Systems, *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, 102(2) (1976) 385-405.
- [23] M.H. Afshar, Application of a Genetic Algorithm to Storm Sewer Network Optimization, *Scientia Iranica*, 13(3) (2006) 234-244.
- [24] J. P. Heaney, D. Sample L. Wright, C. Fan, Costs of urban storm water control, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Washington, Wastewater; Ab va Fazilab ( in persian ), 30(1) (2019) 1-17.
- [5] D. Dutta, S. Herath, K. Musiaka, A mathematical model for flood loss estimation, *Journal of Hydrology*, 277(1) (2003) 24-49.
- [6] A. Danandemehr, Measuring and evaluating the amount of damage caused by floods. 10th Civil Engineering Student Conference, Amir Kabir University of Technology (2010). (In Persian).
- [7] H. Daliran Firouz, F. Mokhtari, S. Soltani, S.A. Mousavi, Flood Damage Assessment in Ghamsar and Ghohrood Watershed Basins Using HEC-FIA, *Journal of Water and Soil Science*, 19(74) (2016) 63-76. (In Persian).
- [8] J. Huizinga, H. Moel, W. Szewczyk, Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines. EUR 28552 EN. (2017).
- [9] S. Mahmood, A.-u. Rahman, Flash flood susceptibility modeling using geo-morphometric and hydrological approaches in Panjkora Basin, Eastern Hindu Kush, Pakistan, *Environmental Earth Sciences*, 78(1) (2019) 43.
- [10] A. Mehrvarz, A. Madadi, F. Esfandiari, M. Rahimi, Simulation of floods in the Aort Valley using the HEC-RAS hydraulic model in GIS environment (study area: from Shuristan village to the confluence of Aras river). *Quantitative Geomorphology Research*, 8(4) (2020) 131-146. (In Persian).
- [11] J. Sin, C. Jun, J.H. Zhu, C. Yoo, Evaluation of Flood Runoff Reduction Effect of LID (Low Impact Development) based on the Decrease in CN: Case Studies from Gimcheon Pyeonghwa District, Korea, *Procedia Engineering*, 70 (2014) 1531-1538.
- [12] L. Rossman, Storm Water Management Model User's Manual Revised, Version 5.0, EPA No. EPA/600/R-05/040. (2010) (295 p).
- [13] G.C. Dandy, A.R. Simpson, L.J. Murphy, An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization, *Water Resources Research*, 32(2) (1996) 449-458.
- [14] S. Yagi, S. Shiba, Application of genetic algorithms

- (In Persian).
- [29] L.Jaf, Flood Damage Assessment Using HEC FDA Software in Khansar Watershed. M.Sc. Thesis Department of Natural Resources. Isfahan University of Technology (2015) (In Persian).
- [30] H.Hekmati Far, Optimal combination of engineering and flood management methods Case study: Qarasu River in Kermanshah. M.Sc. Thesis, Department of Natural Disaster Management, University of Tehran. (2006) (In Persian).
- [31] K.Amirmoradi, A.Shokohi, A.Azizian, Evaluating Risk of Economic Loss due to River Flood in Urban areas (Study Area: Kan Watershed). Iran J Soil Water Res.50 (9) (2019) 2239-2259(In Persian).
- [32] P.Swamee, A.Sharma, design of water supply pipe networks. Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey(2008).362P.
- DC, EPA/600/R-02/021 (NTIS PB2003-103299),(2002).
- [25] M.H. Afshar, A parameter free Continuous Ant Colony Optimization Algorithm for the optimal design of storm sewer networks: Constrained and unconstrained approach, Advances in Engineering Software, 41(2) (2010) 188-195.
- [26] S.W. Miles, J.P. Heaney, Better Than “Optimal” Method for Designing Drainage Systems, Journal of Water Resources Planning and Management, 114(5) (1988) 477-499.
- [27] M.H.A. Afshar, Rebirthing particle swarm optimization algorithm: application to storm water network design, Canadian Journal of Civil Engineering, 35(10) (2008) 1120-1127.
- [28] Technical and Civil Engineering Department of Tehran. Tehran Surface Water Management Comprehensive Plan, Summary of Studies Report,11 (2012) 269 pages.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*S. Sadeghi, J. Mohammad Vali Samani, H. Mohammad Vali Samani, Optimal Design of Storm Sewer Network Based on Risk Analysis by Combining Genetic Algorithm and SWMM Model, Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 1903-1924.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.19990.7308



