مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۲ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱
صفحه‌های ۴۲۴-۴۰۵
DOI: 10.22059/jwim.2022.335811.951

مقاله پژوهشی:

ارزیابی روش پیچیده و استدلالی طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی با استفاده از شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

سونیا صادقی[۱]، جمال محمد ولی سامانی[۲*]، حسین محمد ولی سامانی[۳]
۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.
۲. استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.
۳. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۱

چکیده
طراحی سیستم مرتبط با سیلاب، با ریسک همراه است و لذا طرحی بهینه است که هر دو جنبه هزینه اجرا و خسارت احتمالی در آینده را مدنظر قرار دهد. انتخاب دوره بازگشت بارش-رواناب در این پژوهش براساس تحلیل ریسک صورت گرفته است. در این روش دوره بازگشتی انتخاب می‌شود که در آن مجموع هزینه‌های طرح و ریسک خسارت حداقل است. نرم‌افزار SWMM برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی- هیدرولیکی شبکه استفاده شد. بهینه سازی شبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. در مدل SWMM برای تبدیل بارش به رواناب از مدل مخزن غیرخطی و برای روندیابی آن از مدل موج دینامیک به‌عنوان دقیق‌ترین روش شبیه‌سازی استفاده شد. مدل تهیه‌شده در محله‌ای از تهران به‌کار برده شد و طرح بهینه با دوره بازگشت ۱۰ سال به‌دست آمد. هم‌چنین برای حل همین مسأله روش استدلالی همین نرم‌افزار به‌عنوان ساده‌ترین روش محاسبه بارش-رواناب به‌کاربرده شد و محاسبات هیدرولیکی بدون درنظرگرفتن زمان انتقال در مجاری و استفاده از معادله مانینگ انجام شد. نتایج روش اخیر نشان داد که دوره بازگشت طراحی با روش اول یکسان بوده و جمع هزینه‌های طراحی ۱۶درصد بیش‌تر است. سپس از روش کلاسیک استدلالی برای طراحی استفاده شد. با به‌کاربردن روش کلاسیک استدلالی که در آن زمان انتقال در مجاری در نظر گرفته می‌شود، دبی‌های پیک برای هر لوله کاهش یافت و در نهایت هزینه‌های طراحی با مقایسه با دقیق‌ترین روش ۵ درصد بالاتر بوده است؛ بنابراین از این روش بسیار ساده می‌توان برای طراحی استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، روش استدلالی، روش پیچیده، روش SWMM.

Evaluation of the complicated and rational method of storm sewer networks design using simulation-optimization approach

Sonia Sadeghi[1], Jamal Mohammad Vali Samani[2*], Hossein Mohammad Vali Samani[3]
1. Ph.D. Student of Water Structure of Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. Professor, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
Received: December 18, 2021 Accepted: June 11, 2022

Abstract
In this study, optimal designs with minimum costs are obtained for various storm return periods. Then the risk analysis is used to determine the return period in which the design cost plus the damage risk cost is minimum. SWMM software was used to handle the simulation and the Network optimization was performed by using the genetic algorithm. The non-linear reservoir model to convert the rainfall into runoff and the dynamic wave model to perform the network hydraulic simulation in this software are utilized as a complicated simulation model. The results showed that the 10-year return-period storm in which the summation of the design and the damage risk costs are minimum is the one that should be selected. Also, the rational method of the software was applied as the simplest method of rainfall-runoff and the hydraulic calculations were performed using a Manning equation without considering the flow travel time. The results show that the return period of the risk analysis is the same as the first one whereas the total design costs are greater by 16 percent. Afterward, the classical rational method in which the flow travel time is considered was used to design the same network. The peak flows of the pipes were remarkably reduced, causing the design costs to be only 5 percent greater than the complicated precise method. It can be concluded that the simple classic rational method considering the flow travel time may be used in the design of storm sewer networks due to its acceptable accuracy and costs.

Keywords: Complicated Method, Genetic Algorithm, Rational Method, SWMM Model.

* نویسنده مسئول
Email: samani_j@modares.ac.ir

مقدمه

طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی، همواره با عدم قطعیت و در نتیجه آن با ریسک همراه است. این واقعیت که در یک طراحی مناسب، باید تعادل خوبی بین هزینه اجرا و خطرات احتمالی در آینده برقرار باشد، به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. روش طراحی مبتنی بر ریسک، قادر است هر دو جنبه را پشتیبانی کند، بنابراین در طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی باید هر دو موضوع را در نظر گرفت تا طراحی بهینه انجام شود. در سال‌های اخیر، طراحی بهینه شبکه دفع آب‌های سطحی به‌طور قابل ملاحظه‌ای موردتوجه قرار گرفته است. در پژوهشی به شناسایی مناطق تحت تأثیر سیل و ارزیابی شبکه دفع سیلاب در منطقه‌ای در نیجریه پرداخته شد. در این پژوهش کل حوضه به ۱۳ زیرحوضه تقسیم شد و میزان دبی اوج هر زیرحوضه با استفاده از روش استدلالی محاسبه شد. سپس با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم موردارزیابی قرار گرفت و تنها ۳۵ درصد عملکرد آن را موفق ارزیابی کردند. سپس طراحی شبکه دفع آب های سطحی برای منطقه مذکور انجام شد. در طول طراحی، تعدادی از مقاطع ذوزنقه‌ای و مستطیلی با استفاده از دبی پیک تخلیه‌گاه و با به‌کارگیری روش استدلالی (CIA) طراحی شد. در آخر، کل هزینه طراحی را به میزان ۳٤۰۰۰ دلار برآورد کردند که به‌کارگیری این روش، باعث افزایش راندمان عملکرد سیستم شد (Lukman & Abdurrasheed, 2013). در پژوهش دیگری برای برآورد رواناب در شهر جینان در چین از مدل SWMM استفاده شد. در این تحقیق پژوهش‌گران چهارده رخداد برای اعتبارسنجی و بررسی کارایی مدل مورداستفاده قرار دادند و در نهایت دریافتند که این مدل قابلیت استفاده در شهرهای بزرگ را دارد (Yu *et al*., 2014). در پژوهش دیگری مدل‌سازی شبکه دفع آب‌های سطحی یک شهرک مسکونی با نرم‌افزار SWMM انجام شده و با درنظرگرفتن بارش با دوره بازگشت‌های یک تا ۱۰۰ سال و معیارهای هیدرولوژیکی نظیر ضریب رواناب، حجم و زمان سیلاب، ریسک آب‌گرفتگی در چاهک‌های بازدید موردبررسی قرار گرفت (Zhu *et al*., 2016). 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 اقتصادی- اجتماعی برای هرکدام از قاره‌ها توسعه پیدا کردند (Huizinga *et al*., 2017). طی پژوهشی به مدل‌سازی ارزیابی خسارت در یکی از مناطق تهران با استفاده از مدل FIA-HEC پرداختند. نتایج شبیه سازی برای دوره‌های بازگشت مختلف نشان داد که پارامتر میزان عمق آب‌گرفتگی و ارزش اقتصادی کاربری اراضی می‌تواند در ارزیابی خسارت تغییرات قابل‌توجهی ایجاد کنند (Yavari *et al*., 2019). در بیش‌تر پژوهش‌های قبلی مسأله طراحی شبکه‌های دفع سیلاب شهری به‌صورت کمینه‌سازی هزینه‌های طراحی برای دبی طراحی با دوره بازگشت مشخص مطرح شد. این روش دارای این ایراد اساسی است که خسارت محتمل که در آینده اتفاق می‌افتد، در نظر گرفته نشده است. در واقع یکی از مسائل مهم در طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی انتخاب دوره بازگشت مناسب است. دوره بازگشت مناسب برای طراحی، دوره بازگشتی است که در آن مجموع هزینه‌های طراحی و خسارت‌های محتمل حداقل باشد، که برای تعیین دوره بازگشت مناسب با اهداف مذکور، آنالیز ریسک انجام می‌شود. معمولاً انتخاب دوره بازگشت طراحی برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی براساس تجربه صورت می‌گیرد، انتخاب دوره بازگشت تجربی بدون انجام تحلیل ریسک انجام شده که بهینه نخواهد بود،

زیرا 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. لذا هدف از پژوهش حاضر طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی با استفاده از روش شبیه‌سازی- بهینه‌سازی است که در آن هزینه‌های طراحی حداقل باشد. در این پژوهش طرح بهینه با حداقل هزینه‌ها برای دوره‌های بازگشت مختلف تعیین می‌شود. سپس آنالیز ریسک به‌منظور تعیین دوره بازگشت بهینه که در آن مجموع هزینه‌های طراحی و خسارت محتمل حداقل باشد، صورت می‌گیرد. در رویکرد طراحی مبتنی بر ریسک تمام خسارت‌های ناشی از جاری‌شدن سیل مربوط به کاربری‌های مختلف در نظر گرفته شده است. نوآوری دیگر پژوهش حاضر در برآورد دبی طراحی با روش‌های مختلف شبیه‌سازی شامل روش‌های ساده مانند استدلالی و روش هیدرولیکی پیچیده با حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی و روندیابی با حل معادله سنت ونانت با روش موج دینامیک است تا میزان تفاوت این روش‌ها مشخص شود. آن‌چه مسلم است استفاده از روش‌های پیچیده، نیاز به اطلاعات زیادی درخصوص مشخصات حوضه و مجاری دارد. روشن است که این روش‌ها نتایج دقیق‌تری نسبت به روش استدلالی و فرمول مانینگ می‌دهد، اما به‌ازای صرف هزینه‌های محاسباتی و کوشش و زمان بیش‌تر برای تهیه اطلاعات و انجام محاسبات، نتایج طراحی چه میزان تفاوت می‌کند. چنین پژوهشی تاکنون صورت نگرفته است. در مطالعه حاضر، این پژوهش صورت گرفته و مقایسه‌ای به‌عمل آمده است. برای کاهش هزینه طراحی شبکه دفع آب های سطحی شهری قیودی در نظر گرفته شده است. قطر و شیب مجراها به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد. مدل تهیه‌شده برای این منظور بر روی یک مطالعه موردی بررسی‌شده و نتایج حاصل با سایر پژوهش‌گران مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

مدل شبیه‌سازی SWMM

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

مدل بارش رواناب

این مدل یک واقعه رگبار را براساس هایتوگراف بارندگی، داده‌های ورودی هواشناسی، سیستم حوضه و شبکه زهکشی جهت تولید هیدروگراف خروجی، شبیه‌سازی می‌کند (Sin *et al.*, 2014). در این مدل هر حوضه آبریز به زیرحوضه‌های کوچک‌تر تقسیم شده و به‌عنوان مخزن غیرخطی شبیه‌سازی می‌شود. در این روش جریان‌های ورودی از بارش و یا زیرحوضه‌های بالادست ناشی می‌شود. خروجی‌ها عبارتند از تبخیر، نفوذ و رواناب سطحی. ظرفیت این مخزن برابر حداکثر ذخیره چالابی است که شامل حداکثر ذخیره سطحی ایجادشده توسط گودال‌ها، رطوبت سطحی و برگاب[1] می‌باشد. هنگامی‌که عمق آب در مخزن از حداکثر ذخیره چالابی[2] (d_p) بیش‌تر شود، رواناب سطحی شکل می‌گیرد که جریان خروجی را تشکیل می‌دهد. این جریان به‌وسیله معادله مانینگ به‌دست می‌آید. عمق آب روی سطح زیرحوضه (d) نسبت به زمان با حل عددی دیفرانسیلی معادله بیلان آب روی زیرحوضه به‌دست می‌آید. به‌علت آن‌که نقش عواملی مثل تبخیر و تعرق و سایر موارد در تشکیل سیل محدود و قابل صرف‌نظر است، از اثر تبخیر در مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب صرف‌نظر شده است. در این مدل از روش هورتن برای نفوذ آب در خاک استفاده می‌شود. پارامترهای معادله نفوذ هورتن با استفاده از اطلاعات نفوذپذیری خاک منطقه و جداول مربوط از راهنمای نرم

افزار SWMM به‌دست آمد. در مدل SWMM روش‌های دیگری نیز علاوه بر روش مخزن غیرخطی برای محاسبات رواناب ناشی از بارش با تغییراتی در پارامترهای موجود در آن وجود دارد که برحسب نیاز کاربر می‌توان از آن‌ها استفاده نمود. یکی از این روش‌ها، روش استدلالی (CIA) می‌باشد. لازم به ذکر است که در این روش در مدل SWMM زمان انتقال آب در مجاری در نظر گرفته نمی‌شود.

مدل هیدرولیکی جریان

در این نرم‌افزار روش‌های متعددی برای محاسبات هیدرولیکی در مجراها قابل انجام است. برای انجام محاسبات هیدرولیکی جریان در مجاری اعم از کانال‌ها و لوله‌ها، SWMM از سه روش شامل جریان ماندگار (حل معادله مانینگ)، تحلیل جریان غیرماندگار با استفاده از روندیابی موج دینامیک و روندیابی موج کینماتیک استفاده می‌کند. دقیق‌ترین روش مدل موج دینامیکی است که در آن معادلات یک‌بعدی سنت ونانت با استفاده از روش عددی تفاضل‌های محدود حل می‌شود. جریان ماندگار، با فرض این‌که در هر گام محاسباتی، جریان ماندگار و یکنواخت می‌باشد از معادله مانینگ استفاده می‌کند. بنابراین به‌سادگی هیدروگراف‌های جریان ورودی در انتهای بالادست مجرا را بدون تأخیر و تغییر در شکل به هیدروگراف جریان در انتهای پایین‌دست تبدیل می‌کند.

روش کلاسیک استدلالی

در روش کلاسیک استدلالی، در محاسبه دبی اوج، علاوه بر زمان تمرکز، زمان انتقال جریان در مجاری نیز در نظر گرفته می‌شود. این امر منجر به زمان تمرکز بیش‌تر و در نتیجه شدت اوج جریان کم‌تر در مقایسه با روش استدلالی مورداستفاده در نرم‌افزار SWMM می‌شود. تفاوت اصلی بین روش استدلالی موجود در مدل SWMM و روش کلاسیک آن، درنظرگرفتن زمان انتقال در روش کلاسیک است که در مدل SWMM این زمان در نظر گرفته نمی‌شود.

مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

طراحی بهینه ابعاد شبکه دفع آب‌های سطحی با جانمایی مشخص و ثابت، مستلزم به‌دست‌آوردن کم‌ترین هزینه طراحی شبکه است و درعین‌حال 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 فرایند تکامل موجودات زنده برای جست وجوی جواب مسأله تقلید می‌کند.

تابع هزینه به‌عنوان تابع هدف به‌صورت ذیل است:

$$\mathrm{Cost(D,S)} = \sum_{i=1}^{NP} \mathrm{CP_i} + \sum_{j=1}^{NM} \mathrm{CM_j} + \sum_{i=1}^{NP} \mathrm{CE_i} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

تابع هزینه معادله (۱) شامل هزینه‌های CP، CM و CE به‌ترتیب هزینه ساخت مجاری شبکه، آدم‌رو و بسترسازی می‌باشد. NP تعداد مجاری شبکه و NM تعداد آدم‌روهای 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 آدم‌روها برای هزینه آن‌ها به‌کار برده شدند و با استفاده از برازش منحنی روابط ذیل به‌دست آمدند:

$$\mathrm{CP} = 199.3\mathrm{D} - 121\mathrm{E} - 192.7\mathrm{D}^2 + 161.2\mathrm{DE} - 0.4781\mathrm{E}^2 + 24.05 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$CM = 55.872H_M{}^2 + 242.99H_M + 411.58$$ (رابطه ۳)

$$CE = 31.033D^{1.2}$$ (رابطه ٤)

لازم به ذکر است که هزینه‌های طراحی محاسبه‌شده در این پژوهش، براساس قیمت‌های سال ۱۳۹۹ می‌باشد و روابط به‌دست‌آمده نیز براساس برازش منحنی براساس قیمت‌های همان سال است. برای زمان‌های دیگر و در سال‌های دیگر لازم است با توجه به تغییرات قیمت، منحنی مناسب براساس همان سال برازش داده شود و روابط همبستگی مناسب همان سال محاسبه شود.

به‌منظور بهره‌برداری مناسب از شبکه دفع آب‌های سطحی باید قیود و محدودیت‌های زیر را در هنگام طراحی شبکه موردتوجه قرار داد:

۱- قید سرعت: سرعت جریان در لوله‌ها باید در یک محدوده مجاز حداکثر به‌منظور جلوگیری از سایش آن‌ها و حداقل برای جلوگیری از ته‌نشینی مواد جامد و مسدود شدن آن‌ها در نظر گرفته می‌شود (Afshar & Rohani, 2012).

$$V_{min} \le V_i \le V_{max} \quad i = 1, \dots NM$$ (رابطه ۵)

که در رابطه (٦)، 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 به‌ترتیب ۰/۹ و ٤/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

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

$$y_i \le y_{max} \quad i = 1, \dots NM$$ (رابطه ٦)

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 ۰/۹ قطر لوله انتخاب شد.

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

$$E_{min} \le E_i \le E_{max}$$ (رابطه ۷)

در رابطه (۷) E_i عمق کارگذاری لوله i، E_{min} و E_{max} به‌ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر عمق کارگذاری لوله iام 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 براساس تراز سطح آب زیرزمینی و صعوبت کار در محیط خیس تعیین می‌شود. مقادیر حداقل و حداکثر اعماق ذکرشده با توجه به مبانی و ضوابط به‌ترتیب یک و شش متر در نظر گرفته شد.

٤- الگوی تلسکوپی انتخاب قطر لوله‌ها: اقطار انتخابی برای لوله‌ها باید به‌گونه‌ای 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 ۰/۰۰۰۵ در نظر گرفته شد، اما برای شیب حداکثر مقدار مشخصی توصیه نشده است. به‌عنوان راهنما می‌توان آن را با استفاده از حداکثر سرعت مجاز جریان، از رابطه مانینگ به‌دست آورد.

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

از بین قیود فوق، سه قید اول با روش تابع جریمه به تابع هدف اضافه می‌شود و سه قید بعدی با کدبرداری در برنامه‌ریزی کامپیوتری اعمال می‌شود. لذا قیود یک تا سه را می‌توان به شکل تابع جریمه زیر ارائه کرد و به تابع هدف اضافه نمود (Mousavi, 2016):

$$P_{vmax} = \lambda_v \max\left(\left(\frac{V_i}{V_{max}} - 1\right), 0\right)$$ (رابطه ۸)

$$P_{vmin} = \lambda_v max(\left(۱ - \frac{V_i}{V_{min}}\right), ۰) \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$P_{emax} = \lambda_e max(\left(\frac{E_i}{E_{max}} - 1\right), ۰) \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$P_{emin} = \lambda_e max(\left(۱ - \frac{E_i}{E_{min}}\right), ۰) \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$P_y = \lambda_y max\left[(۱ - \frac{y_i}{y_{max}})^2, 0\right] \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

در روابط فوق، P_{vmin}، P_{vmax}، به‌ترتیب قیود مربوط به حداکثر و حداقل سرعت، P_{emin}، P_{emax} به‌ترتیب 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 م، 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 iام، E_{min} و E_{max} به‌ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر عمق کارگذاری لوله iام است. جریمه در صورت عدم تخطی مقادیر توابع جریمه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شوند. λ_V، λ_y و λ_E به‌ترتیب پارامترهای جریمه مربوط به سرعت، عمق نسبی جریان و عمق گودبرداری است. مقدار این پارامترها در یک فرایند تکراری سعی و خطا به کمک اجراهای آزمایشی به‌گونه‌ای تخمین زده می‌شود که راندمان بهینه‌سازی افزایش یابد. بنابراین تابع هدف نهایی با اعمال توابع جریمه به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$Cost(D,S) = \sum_{i=1}^{NP} CP_i + \sum_{j=1}^{NM} CM_j + \sum_{i=1}^{NP} CE_i + \sum_{i=1}^{NP} P_{vmax_i} + \sum_{i=1}^{NP} P_{vmin_i} + \sum_{i=1}^{NP} P_{emax_i} + \sum_{i=1}^{NP} P_{emax_i} + \sum_{i=1}^{NP} Py_i \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

به‌منظور طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی، ابتدا داده‌های موردنیاز، شامل آرایش شبکه، بارش‌های طوفان طراحی، فهرست تجاری لوله‌ها و داده‌های مربوط به هزینه ساخت اجزای مختلف شبکه و جمعیت اولیه کروموزوم‌ها به‌صورت 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 شبیه سازی، امکان شبیه‌سازی هر کروموزوم در مدل SWMM فراهم می‌شود. به‌عبارتی دیگر، مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی تهیه‌شده با نرم‌افزار SWMM با مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک که در محیط متلب آماده شده، در قالب یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ادغام‌شده 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 به‌شرط همگرایی یا توقف، دنبال خواهد شد. در این پژوهش، شرط همگرایی، رسیدن به آخرین نسل است. شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای هرکدام از دوره بازگشت‌های انتخابی از کوچک تا بزرگ انجام می‌شود و در نتیجه برای هر دوره بازگشت، طرح بهینه تهیه می‌شود. سپس برای هرکدام از طرح‌ها، ریسک خسارت‌های ناشی از رواناب محاسبه و تحلیل ریسک انجام می‌شود. براساس اصول تحلیل ریسک، دوره بازگشتی بهینه نهایی خواهد بود که در آن مجموع هزینه‌های طرح و ریسک خسارت حداقل باشد. روند طراحی در شکل (۱) نشان داده شده است.

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، ریسک (خطر) خواهد بود و نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری در مورد یک طرح در معرض عدم قطعیت به‌طورکلی با ریسک همراه است.

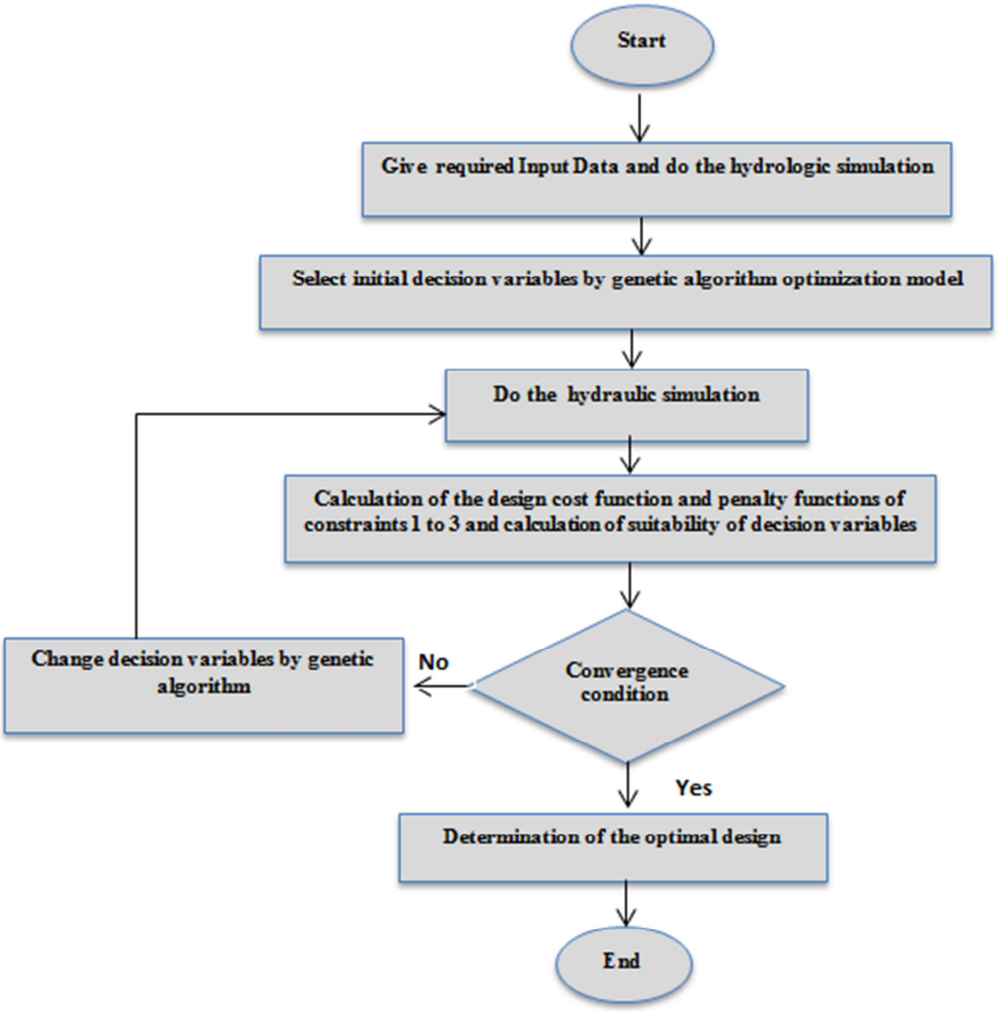

Figure 1. Simulation-optimization model combination process

به‌طورکلی چنان‌چه در طول عمر مفید طرح موردنظر، 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. هرچه دوره بازگشت انتخابی طرح بزرگ‌تر باشد، هزینه طرح نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش دوره بازگشت ریسک خسارت کاهش می یابد (Samani, 2016). 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 ریسک خسارت با توجه با مطالب ذکرشده، در هرکدام از دوره‌های بازگشت، این دو هزینه باهم جمع می‌شود، سپس دوره بازگشتی که در آن مجموع این دو هزینه حداقل باشد، به‌عنوان دوره بازگشت بهینه در نظر گرفته می‌شود.

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 مورداستفاده در این پژوهش که آرایش آن در شکل (۲) نشان داده شده، اولین بار توسط Mays & Wenzel (1976) طراحی و ارائه شد. در ادامه، پژوهش‌گران دیگر اقدام به بهینه سازی این شبکه کردند. این شبکه از ۲۰ شاخه و ۲۰ گره و یک خروجی تشکیل شده است. در ابتدا شبکه مذکور در مدل شبیه‌سازی SWMM شبیه‌سازی شد سپس مدل شبیه‌سازی با مدل بهینه‌سازی ایجادشده در محیط متلب، ادغام شده و طراحی بهینه با تلفیق دو مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، انجام شد. در عملیات صحت‌سنجی مدل، تمامی شرایط حاکم بر مسأله محک، مشابه با شرایط پژوهش‌های قبلی در نظر گرفته شد. محدوده سرعت مجاز نیز، مشابه پژوهش‌های قبلی، بین حداقل ۰/٦۱ تا حداکثر ۳/٦٦ متر بر ثانیه، در نظر گرفته شد. جریان در لوله‌ها با سطح آزاد و حداکثر عمق نسبی جریان ۰/۸۲ در نظر گرفته شد. هماهنگ با مؤلفه اصلی مسأله، برای حداقل ارتفاع پوشش خاک روی لوله‌ها، از مقدار ۲/٤ متر استفاده شد، محدودیتی برای حداکثر عمق گودبرداری، اعمال نشد، ضریب زبری مانینگ همه لوله‌ها، ۰/۰۱۳ فرض شد و حداقل شیب مجاز لوله‌ها نیز صفر در نظر گرفته شد. صحت‌سنجی مدل با شبکه محک و با اعمال قیود طراحی اجرا و نتایج آن با پژوهش‌گران قبلی مقایسه شد تا نسبت به اعتبار مدل اطمینان حاصل شود.

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 (۳) مشاهده می‌شود. مطابق شکل در ابتدای فرایند بهینه سازی، مقدار تابع هدف با مقادیر بزرگ برآورد شد. در ادامه مقدار تابع هدف خیلی سریع کاهش یافت. به‌گونه‌ای که در نسل ۵۰ به مقدار ۲٤۱۷٦۳ 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 داده‌شده را موفق ارزیابی کرد.

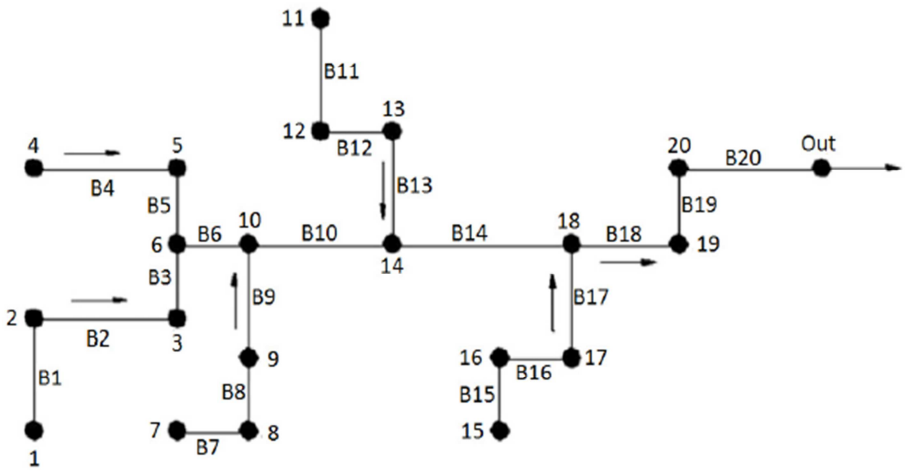

Figure 2. Benchmark storm sewer network (Mays & Wenzel, 1976)

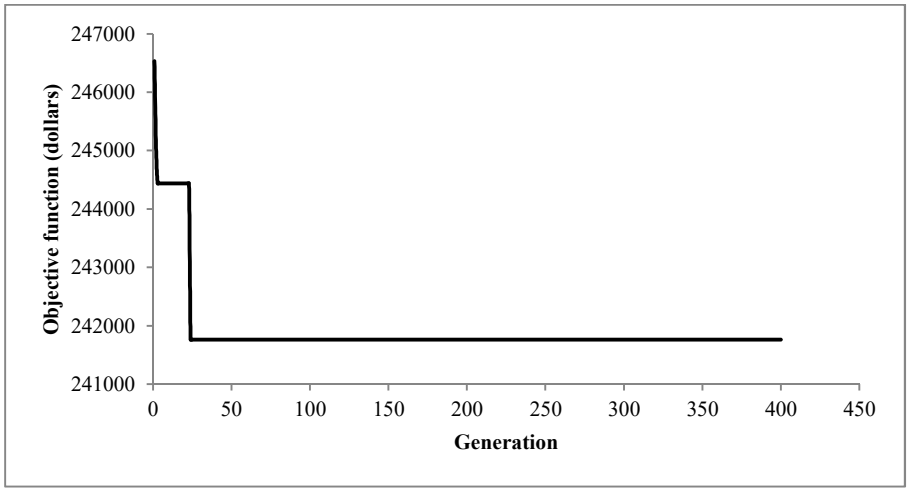

Figure 3. Diagram of benchmark network optimization achievement

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 ۲٤۱٤۹٦ دلار، ۰/۱۱ درصد هزینه ساخت کم‌تر نسبت به جواب بهینه پژوهش حاضر دارد. در نهایت با توجه به عملکرد مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی پژوهش حاضر در مقایسه با سایر پژوهش‌ها و اختلاف کم در جواب بهینه، می‌توان نتیجه گرفت مدل مذکور از دقت، سرعت و کارایی مناسبی برخوردار است و می‌توان با اطمینان از آن در طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی استفاده کرد.

همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده، اندازه قطر لوله در سه شاخه ٤B، ۸B و ۱۳B در جواب پژوهش حاضر به‌ترتیب ٤٥۰، ٥۲٥ و ٦۰۰ میلی‌متر و در جواب افشار (۲۰۰٦) با یک اندازه کوچک‌تر به‌ترتیب ۳۰۰، ٤٥۰ و ٥۲٥ میلی‌متر است. هم‌چنین اندازه قطر لوله در دو شاخه ۷B و ۱۰B در جواب پژوهش حاضر به‌ترتیب ۳۰۰ و ٦۰۰ میلی‌متر و در جواب افشار با یک اندازه بزرگ‌تر به‌ترتیب ٤٥۰ و ۷٥۰ میلی‌متر است. درحالی‌که اندازه قطر سایر شاخه‌ها در دو جواب یکسان است، اما شیب همه لوله‌ها در دو جواب متفاوت است. با وجود این ترکیب قطرها و شیب‌های متفاوت، هزینه ساخت این دو جواب تنها ۲٦۷ دلار (۰/۱۱ درصد) تفاوت دارد.

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 مورداستفاده قرار گرفت.

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

Researcher	Optimization method	Optimal cost (dollars)	The optimal cost of the present study (dollars)	Comparison with previous research
Mays & Wenzel (1976)	Differential discrete programming	265775	241763	-24012
Miles & Heaney (1988)	Differential discrete programming	245874	241763	-4111
Afshar *et al*. (2006)	genetic algorithm	244747	241763	-2984
Afshar (2010)	Ant colony	241496	241763	267
Afshar (2008)	PSO	242162	241763	-399
Afshar & Rouhani (2012)	Cellular machine	247412	241763	-5649
Mousavi (2016)	genetic algorithm	241956	241763	-193

با توجه به داشتن اطلاعات پایه مناسب بخشی از منطقه دو تهران، محدوده منطقه موردمطالعه منطقه دو تهران با کاربری مسکونی، راه و بزرگراه و فضای سبز انتخاب شد. 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 (شکل ٤). در این مطالعه برای تعیین زیرحوضه‌ها از نقشه کاربری اراضی و شیب‌بندی خیابان‌ها و کوچه‌ها، مرز زیرحوضه‌ها تعیین شد که به ۱۷ زیرحوضه تقسیم شد و آرایش شبکه دفع آب‌های سطحی برای آن طراحی شد که در شکل (۵) نشان داده شده است.

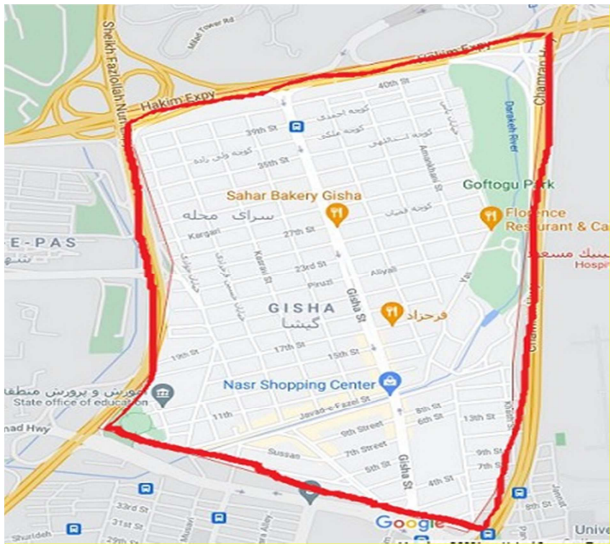

Figure 4. Part of Zone 3 of Region 2

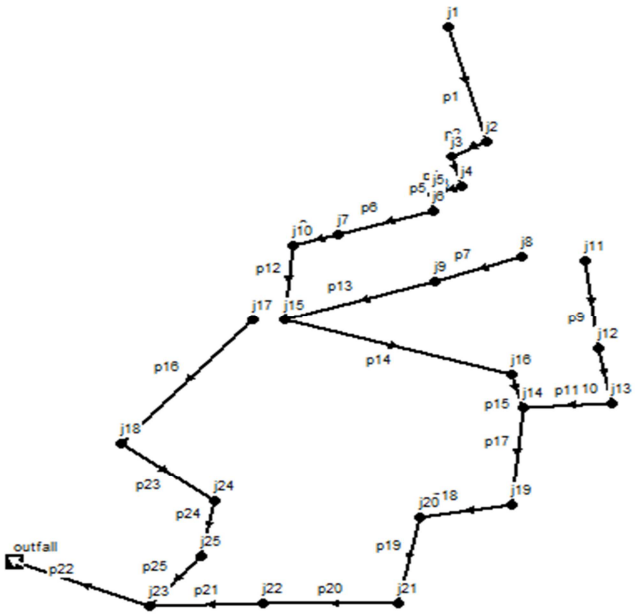

Figure 5. The Layout of the storm sewer network of region 2 in Tehran city

تنظیمات مدل شبیه‌سازی SWMM برای منطقه مطالعاتی

با استفاده از امکانات GIS و هم‌چنین راهنمای نرم‌افزار SWMM مشخصات هر یک از زیرحوضه‌های 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 زیرحوضه‌های منطقه موردمطالعه به محیط نرم‌افزار SWMM منتقل شد و فرایندهای مربوطه شامل طراحی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شامل لوله‌ها و گره‌های آن صورت گرفت. ازآنجاکه برآورد رواناب در مدل SWMM و سایر مدل‌های جمع آوری رواناب شهری براساس مقادیر بارش است، بنابراین این اطلاعات از مهم‌ترین و اساسی‌ترین اطلاعات مورداستفاده مدل هستند. برای تهیه هیدروگراف‌های سیلاب طراحی از منحنی‌های شدت- مدت- دوره بازگشت نزدیک ترین ایستگاه مجاور منطقه موردمطالعه، استفاده شد. 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 شش ساعت، میزان بارندگی در تداوم‌های ۱۰ دقیقه تا شش ساعت تعیین و میزان بارش در هر گام زمانی منتخب با بلوک‌های بارش محاسبه می‌شود. سپس بزرگ‌ترین بلوک بارندگی در ساعت سه (وسط تداوم بارش) قرار داده شده، بلوک‌های بعدی به‌ترتیب بزرگی ابتدا در سمت راست و سپس در سمت چپ بزرگ‌ترین بلوک قرار داده می‌شوند. براساس مطالعات انجام‌شده بر روی بارش‌های شهر تهران و نتایج به‌دست‌آمده، روشن شده است که برای بارش‌های سه‌ساعته و طولانی‌تر، شدیدترین بخش بارندگی در اواسط بارش رخ می‌دهد که این مطلب در ساخت الگوی بارش محلی برای شهر تهران رعایت شده است.

تعیین توابع خسارت

در ایران منحنی یا الگوهای قابل‌قبولی برای توابع عمق- خسارت ارائه نشده است. به‌علت فقدان آمار کافی و محاسبه نادقیق خسارت‌های سیل، آمار مطمئنی برای برآورد این منحنی‌ها با توجه به آمار خسارت وجود ندارد. بنابراین در پژوهش حاضر از روش‌های به‌کارگرفته‌شده 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 شد که در پژوهش حاضر از منحنی های تراز-درصد خسارت ساختمان‌های مسکونی و تجاری که توسط Jaf(2015) ارائه‌شده، استفاده شد (شکل٦).

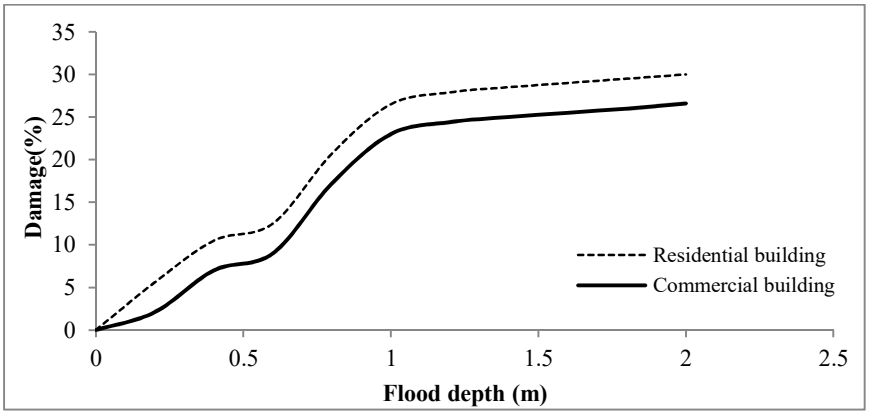

Figure 6. Depth-damage percent curve of residential and commercial buildings provided by Jaf, 2015

با توجه به نمودار تراز- درصد خسارت ارائه‌شده توسط Jaf (2015) در نرم‌افزار اکسل با برازش‌دادن منحنی مناسب با آن معادله منحنی حاصل به‌دست می‌آید. روابط عمق-درصد خسارت برای مناطق مسکونی و تجاری به‌صورت زیر به‌دست آمد:

(رابطه ٤) $D_{Home} = 8.27y^4 - 35.9y^3 + 40.31y^2 + 11.49y + 0.651$

(رابطه ٥) $D_{Com} = 12.09y^4 - 53.74y^3 + 68.61y^2 - 5.85y + 0.36$

در روابط (١٤) و (١٥)، D_{Home} درصد خسارت وارد به ساختمان‌های مسکونی، D_{Com} درصد خسارت وارد به ساختمان‌های تجاری و y عمق آب برحسب متر است. واحد خسارت در این پژوهش بین صفر تا صد است.

تعیین تابع خسارت وارد به راه‌ها

خسارت وارده به زیرساخت‌های شهری به‌دلیل پیچیدگی آن ها به‌طور مستقل موردارزیابی قرار نمی‌گیرد، بلکه به‌صورت درصدی از خسارت وارده به کاربری‌های شهری ارزیابی می‌شوند. به‌عنوان مثال Hekmati Far (2006) با توجه به آمار تاریخی و گذشته سیلاب ایران خسارت وارده به ساختمان‌های مسکونی را به‌دست آورد و با توجه به آن درصد خسارت وارد به راه‌ها را برازش داد که در پژوهش حاضر از همین رابطه استفاده شد. با توجه به پژوهشی Hekmati Far (2006) که خسارت وارد به راه‌ها را حدود ۰/۰۳ خسارت وارد به ساختمان‌های مسکونی فرض کرد، این رابطه با توجه به عمق سیلاب محاسبه شد. به این‌صورت که خسارت وارد به ساختمان‌های مسکونی در عمق‌های مختلف در عدد ۰/۰۳ ضرب شده و خسارت وارد به راه‌ها در عمق‌های مذکور محاسبه شد.

این رابطه به شرح زیر است:

(رابطه ٦) $D_{Road} = 0.22y^4 - 0.97y^3 + 1.04y^2 + 0.46y$

در رابطه (١٦) D_{Road} درصد خسارت وارده به راه‌ها است.

تعیین تابع خسارت وارد به فضای سبز

برای به‌دست‌آوردن 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 دو که حدود ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متر رواناب ایجاد می‌شود، حدود هفت میلیارد ریال خسارت به فضای سبز وارد می‌کند. در این تحقیق برای به دست‌آوردن رابطه‌ای برای خسارت وارد به فضای سبز، با استفاده از رابطه‌ای بین خسارت وارد به راه‌ها، خسارت وارد به فضای سبز برازش داده شد. به این‌صورت که خسارت وارد به فضای سبز در عمق ۳۰ سانتی‌متر (هفت میلیارد ریال) بر خسارت وارد به راه‌ها در همین عمق تقسیم شد. سپس عدد به‌دست‌آمده به‌عنوان ضریبی برای خسارت سایر عمق‌ها در نظر گرفته شد. به‌دلیل عدم دسترسی به میزان خسارت وارد به فضای سبز در سایر عمق‌ها از روش مذکور استفاده شد که به‌صورت درصدی از خسارت وارد به راه‌ها در نظر گرفته شد. با ضرب‌نمودن عدد به‌دست‌آمده در خسارت وارد به راه‌ها در سایر عمق‌ها، خسارت وارد به فضای سبز در سایر عمق‌ها به‌دست آمد و با برازش‌دادن منحنی مناسب با آن، رابطه عمق- درصد خسارت برای فضای سبز به‌دست آمد. این رابطه به شرح زیر است:

(رابطه ١٧) $D_{Green} = 0.02y^4 - 0.087y^3 + 0.093y^2 + 0.041y$

در رابطه (١٧) D_{Green} درصد سارت وارد به فضای سبز است.

تعیین تابع خسارت ناشی از ترافیک

با توجه به آمار معاونت حمل‌ونقل شهرداری و آمار انجمن علمی اقتصاد شهری ایران در منطقه دو در یک روز ۰/۰۱۲ میلیون ساعت تأخیر در اثر ترافیک وجود دارد، که سالانه ٤/۳۷ میلیون ساعت تأخیر می‌شود و این باعث ۲۵/۳۷ میلیارد تومان خسارت برای منطقه دو می‌شود. این خسارت شامل مجموع خسارت در اثر اتلاف منابع سوختی، اتلاف وقت و اتلاف منابع در اثر آلودگی می‌باشد. 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 دو ناحیه سه، حدود یک میلیارد ریال است. در این پژوهش برای به دست‌آوردن رابطه‌ای برای خسارت ناشی از ترافیک، با استفاده از رابطه بین خسارت وارد به راه‌ها، خسارت ناشی از ترافیک برازش داده شد. به این‌صورت که خسارت ناشی از ترافیک در عمق ۳۰ سانتی‌متر (یک میلیارد ریال) بر خسارت وارد به راه‌ها در همین عمق تقسیم شد. به‌دلیل عدم دسترسی به میزان خسارت ناشی از ترافیک در سایر عمق‌ها از روش مذکور استفاده شد که به‌صورت درصدی از خسارت وارد به راه‌ها در نظر گرفته شد. سپس عدد به‌دست‌آمده به‌عنوان ضریبی برای خسارت سایر عمق‌ها در نظر گرفته شد. با ضرب‌نمودن عدد به‌دست‌آمده در خسارت وارد به راه‌ها در سایر عمق‌ها، خسارت ناشی از ترافیک در سایر عمق‌ها به‌دست آمد و با برازش‌دادن منحنی مناسب با آن، رابطه عمق- درصد خسارت ناشی از ترافیک به‌دست آمد. این رابطه به شرح زیر است:

$$D_{Traff} = 0.0026y^4 - 0.0112y^3 + 0.012y^2 + 0.053y \quad \text{(رابطه ۱۸)}$$

در رابطه (۱۸)، D_{Traff} درصد خسارت ناشی از ترافیک است.

تحلیل ریسک مطالعه موردی

در این مرحله با توجه به روابط عمق- درصد خسارت محاسبه‌شده، خسارت وارد به هر کاربری برای دوره‌های بازگشت مختلف به‌دست 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 مطرح‌شده درخصوص 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 شد. قاعدتاً شبکه‌ای که برای یک دوره بازگشت طراحی می‌شود، جوابگوی همان دوره بازگشت به‌علاوه 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 زیرحوضه جهت تعیین خسارت برابر خواهد بود با عمق میانگین رواناب سیل بزرگ‌تر منهای عمق میانگین رواناب سیل طراحی. این عمل برای کلیه زیرحوضه‌ها انجام می‌شود و در نتیجه مجموع خسارت برای کلیه زیرحوضه‌ها خسارت کل منطقه برای آن دوره بازگشت خواهد بود. از روابط خسارت محاسبه‌شده در این پژوهش استفاده شده و خسارت ناشی از رواناب محاسبه شد. این رویکرد برای کلیه دوره‌های بازگشت انجام شد و میزان ریسک خسارت برای آن‌ها به‌دست آمد.

برای محاسبه هزینه سالیانه طراحی از روشی که Swamee & Sharma (2008) برای هزینه سالیانه طراحی شبکه لوله‌های انتقال آب استفاده کردند، استفاده شد. آن‌ها

با درنظرگرفتن هزینه‌های دوره‌ای و جاری رابطه‌ای به‌صورت رابطه زیر ارائه دادند:

$$A = C_0\left(\frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T-1} + \frac{r}{(1+r)^T-1} + \beta\right) \quad \text{(رابطه ۱۹)}$$

در رابطه (۱۹)، A هزینه سالیانه طراحی، C_0 هزینه طراحی، r نرخ تنزیل در هر دوره زمانی، T عمر طرح یا لوله‌ها، $\propto$ و β ضریبی که با توجه به جنس لوله تعیین می‌شود (Swamee & Sharma, 2008).

در پژوهش حاضر نرخ تنزیل با توجه به ملاحظات اقتصادی و دید و قضاوت مهندسی برابر با ۰/۰۸ در نظر گرفته شد. Swamee & Sharma (2008) ضریب $\propto$ را برای لوله‌های آزبست سیمانی، PVC و بتنی برابر با صفر و ضریب β را برای همین لوله‌ها ۰/۰۰۵ و T را هم ٦۰ سال در نظر گرفتند. با توجه به این‌که لوله‌های مورداستفاده برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی معمولاً یکی از همین سه نوع لوله است، بنابراین در پژوهش حاضر از همین مقادیر استفاده و هزینه سالیانه طرح محاسبه شد. هزینه طراحی نیز با اجرای مدل شبیه سازی- بهینه‌سازی به‌دست آمد.

لذا در این قسمت، هزینه طراحی سالانه با توجه به هزینه طراحی محاسباتی از اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه سازی و رابطه (۱۹) به‌دست آمد. ریسک خسارت سالانه نیز با توجه به تفاوت عمق رواناب در دوره‌های بازگشت بالاتر از دوره بازگشت موردنظر و هم‌چنین روابط عمق- درصد خسارت به‌دست‌آمده محاسبه شد، که مجموع این دو هزینه برای انجام تحلیل ریسک و تعیین دوره بازگشت بهینه نیاز است.

بحث و نتایج

با تکمیل اطلاعات لازم، مدل برای دوره‌های بازگشت یک، دو، پنج، ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۵۰ ساله اجرا شد. مقادیر بهینه ابعاد مجراها و هم‌چنین میزان خسارت و هزینه‌های طراحی برای هرکدام از دوره‌های بازگشت محاسبه شد. سپس با انجام تحلیل ریسک دوره بازگشت بهینه به‌دست آمد.

نتایج طراحی بهینه با استفاده از روش پیچیده موجود در مدل SWMM

در روش پیچیده، مدل مخزن غیرخطی موجود در نرم‌افزار شبیه‌سازی SWMM برای تبدیل بارش به رواناب و برای روندیابی جریان نیز از روش موج دینامیک به‌عنوان دقیق ترین روش استفاده شد. با توجه به مطالب ذکرشده و با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در محیط متلب و تلفیق آن با مدل شبیه‌سازی SWMM و رعایت قیود مسأله، شبکه‌ای برای منطقه موردمطالعه 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 (۲) نتایج اجرای مدل با دوره‌های بازگشت مختلف، بر پایه تحلیل ریسک در روش پیچیده را نشان می‌دهد.

Table 2. Optimal design results using the complicated method

Return period (1)	Frequency (2)	Damage costs (MRial) (3)	Annual damage risk cost (MRial) (4)	Optimal Design cost (MRial) (5)	Annual optimal design cost (MRial) (6)	Total annual cost (MRial) (7)
1	1	24993	40056	90000	7722	47778
2	0.5	37801	24358	103910	8915	33273
5	0.2	50534	11107	105200	9025	20132
10	0.1	60318	5565	110000	9437	15002
20	0.05	70516	2294	160000	13727	16021
25	0.04	73686	1573	210000	18017	19590
50	0.02	83633	0	300000	25739	25739

خسارت با توجه به مطالب مطرح‌شده، با استفاده از عمق رواناب در خروجی مدل SWMM و توابع خسارت تخمین‌زده‌شده به‌دست آمد که در ستون سوم نشان داده شده است و ریسک خسارت سالانه نیز براساس خسارت و سطح زیر نمودار احتمال وقوع- خسارت محاسبه‌شده که در ستون چهارم نشان داده شده است، یعنی عمق رواناب سیل‌های با دوره بازگشت بزرگ‌تر از سیل موردنظر از عمق رواناب سیل موردنظر کم شده و تفاوت بین این دو عمق، مبنای محاسبه خسارت سیل در نظر گرفته شد. هزینه طراحی نیز با اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به‌دست آمد. هزینه سالانه طراحی نیز با توجه به هزینه طراحی محاسباتی و رابطه (۱۹) به‌دست آمده است. با توجه به جدول (۲) ریسک خسارت سالانه با افزایش دوره بازگشت کاهش می‌یابد و برای دوره‌های بازگشت بالا به صفر می‌رسد. هزینه سالانه طرح نیز با افزایش دوره بازگشت افزایش می‌یابد. مقدار ریسک خسارت سالانه با هزینه سالانه طرح جمع می‌شود و هزینه سالانه کل به‌دست می‌آید که در ستون هفت نشان داده شده است. با توجه به مطالب گفته‌شده، دوره بازگشت بهینه که در آن کل هزینه سالانه حداقل است (۱۵۰۰۲ میلیارد ریال در سال) ۱۰ سال می‌باشد. با توجه به این‌که در طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی در پژوهش حاضر، هر دو جنبه هزینه‌های طراحی و خسارت محتمل در نظر گرفته شد و رویکردی مبتنی بر ریسک برای طراحی بهینه انجام شد، هم‌چنین در این رویکرد تمام خسارت‌های ناشی از جاری‌شدن رواناب مربوط به کاربری‌های موجود در منطقه مطالعاتی من‌جمله فضای سبز و خسارت ناشی از ترافیک نیز در نظر گرفته شد، لذا دوره بازگشت به‌دست‌آمده (۱۰ ساله) دوره بازگشت بهینه برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی می‌باشد، که مجموع هزینه‌های طراحی سالانه و ریسک خسارت سالانه در این دوره بازگشت در کم‌ترین مقدار خود قرار دارد.

نتایج طراحی بهینه با استفاده از روش ساده موجود در مدل SWMM

همان‌طورکه اشاره شد، در مدل SWMM با تنظیم گزینه هایی می‌توان برای تبدیل بارش به رواناب از روش ساده استدلالی استفاده کرد. لذا در این قسمت در نرم‌افزار شبیه سازی SWMM از روش ساده برای تبدیل بارش به رواناب و در بخش هیدرولیک مجاری از حل معادله مانینگ استفاده شد. استفاده از این روش تحت عنوان روش ساده نام‌گذاری شد. لازم به ذکر است که روش ساده موجود در مدل SWMM زمان انتقال در مجاری را در نظر نمی‌گیرد و هیدروگراف هر زیرحوضه بدون تغییر شکل و کاهش در دبی پیک عیناً به زیرحوضه‌های پایین‌دست منتقل می‌شود. کلیه مراحل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی و هم‌چنین تحلیل ریسک و تعیین دوره بازگشت بهینه مشابه روش قبلی است. جدول (۳) نتایج طراحی بهینه شبکه دفع آب‌های سطحی برای منطقه موردمطالعه با استفاده از روش ساده را نشان می‌دهد.

Table 3. Optimal design results using the rational method available in the SWMM model

Return period (1)	Frequency (2)	Damage costs (MRial) (3)	Annual damage risk cost (MRial) (4)	Optimal Design cost (MRial) (5)	Annual optimal design cost (MRial) (6)	Total annual cost (MRial) (7)
1	1	39989	64090	107100	9189	73279
2	0.5	60481	238973	123650	10608	49581
5	0.2	80375	17844	125190	10741	28585
10	0.1	80509	9800	130900	11231	21031
20	0.05	112826	4966	190400	16335	21302
25	0.04	117897	3813	249900	21440	25254
50	0.02	133813	0	357000	30629	30629

در این قسمت نیز، ریسک خسارت سالانه و هزینه سالانه طراحی مشابه روش قبلی محاسبه شد. مقدار ریسک خسارت سالانه با هزینه سالانه طرح جمع می‌شود و هزینه سالانه کل به‌دست می‌آید که در ستون هفت نشان داده شده است. با توجه به مطالب گفته‌شده، دوره بازگشت بهینه که در آن کل هزینه سالانه حداقل است (۲۱۰۳۱ میلیارد ریال در سال) ۱۰ سال می‌باشد. لذا همان طورکه در جدول (۳) نشان داده شده، دوره بازگشت بهینه با روش ساده نیز ۱۰ ساله به‌دست آمد.

مقایسه طراحی بهینه با روش پیچیده و روش ساده در مدل SWMM

در این بخش به مقایسه روش پیچیده و روش ساده موجود در مدل SWMM برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی پرداخته خواهد شد. برای مقایسه بهتر دو روش در شکل (۷) مقایسه هزینه کل در دو روش در نمودار ستونی نشان داده شده است.

همان‌طورکه در شکل (۷) نشان داده شده، هزینه طراحی در روش استدلالی در همه دوره‌های بازگشت بیش‌تر از روش پیچیده می‌باشد، که این میزان به‌طور متوسط حدود ۱۶درصد بیش‌تر از روش پیچیده است و این اختلاف ناشی از اختلاف در برآورد رواناب در دو روش می‌باشد. زیرا در روش ساده موجود در مدل SWMM زمان انتقال در مجاری در نظر گرفته نمی‌شود. لذا شدت بارش افزایش می‌یابد و همین امر سبب افزایش دبی پیک رواناب خروجی و در نتیجه آن افزایش قطر لوله‌ها و هزینه‌ها می‌شود. در روش استدلالی زمان تمرکز با زمان انتقال جمع می‌شود و با توجه به فرمول شدت- مدت با افزایش زمان تمرکز شدت بارش کاهش می‌یابد، اما در روش استدلالی موجود در مدل SWMM زمان انتقال در نظر گرفته نمی‌شود و هیدروگراف هر زیرحوضه بدون تغییر شکل و کاهش در دبی پیک عیناً به زیرحوضه‌های پایین‌دست منتقل می‌شود. به همین دلیل دبی خروجی در مقایسه با روش دقیق، افزایش می‌یابد و همین افزایش دبی، موجب افزایش سایز لوله‌ها و سایر هزینه‌های طراحی می‌شود. لذا با توجه به هزینه‌های کم‌تر در روش پیچیده نسبت به روش ساده می‌توان نتیجه گرفت، روش پیچیده عملکرد بهتری نسبت به روش ساده موجود در مدل SWMM دارد.

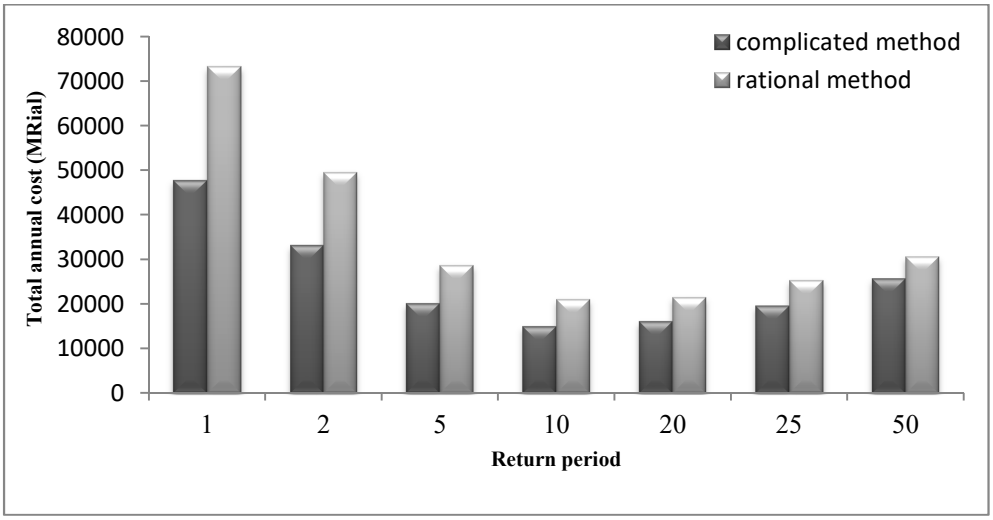

Figure 7. Graph of total cost comparison in complex method and simple method

تحلیل نتایج طراحی بهینه با استفاده از روش کلاسیک استدلالی

پس از به‌دست‌آوردن دوره بازگشت بهینه با روش پیچیده و روندیابی با موج دینامیک و روش استدلالی و حل معادله مانینگ در مدل SWMM و تلفیق آن با الگوریتم ژنتیک، طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی برای دوره بازگشت بهینه ۱۰ ساله با روش کلاسیک استدلالی، نیز انجام شد. منظور از روش کلاسیک استدلالی، روش مرسوم طراحی با این روش می‌باشد. تفاوت اصلی بین روش استدلالی موجود در مدل SWMM و روش کلاسیک آن، درنظرگرفتن زمان انتقال در روش کلاسیک است که در مدل SWMM این زمان در نظر گرفته نمی‌شود. لذا یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار اکسل تهیه شد. بدین‌صورت که با استفاده از دوره بازگشت و شیب بهینه به‌دست‌آمده از روش روندیابی موج دینامیک، طراحی براساس روش استدلالی و با سعی و خطا در نرم‌افزار اکسل به‌گونه‌ای انجام شده که کلیه قیود طراحی مسأله ارضا و قطرهای طراحی نیز محاسبه شود.

جزییات محاسبات در جدول (٤) نشان داده شده است.

با توجه به جدول (٤) نتایج طراحی با روش کلاسیک استدلالی نشان می‌دهد که در مقایسه با روش پیچیده که روش دقیقی نیز می‌باشد، بعضی از اقطار لوله‌ها افزایش یافته و هزینه طراحی در مقایسه با روش پیچیده و دقیق تنها پنج درصد افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در روش کلاسیک استدلالی، زمان تمرکز برای هر مجرا برابر با زمان ورودی به‌علاوه زمان انتقال هر لوله در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با انتقال جریان به پایین دست، زمان تمرکز افزایش می‌یابد و در نتیجه آن شدت بارش با توجه به رابطه شدت- مدت و فراوانی بارش‌ها، کاهش می‌یابد. همین امر موجب می‌شود که دبی رواناب در مقایسه با دبی رواناب در روش استدلالی موجود در مدل SWMM که زمان انتقال را در نظر نمی‌گیرد، به‌صورت قابل توجهی کاهش یابد و لذا باعث طراحی اقتصادی‌تر خواهد شد. به همین دلیل هزینه‌های طراحی در روش کلاسیک استدلالی نسبت به روش پیچیده و دقیق تنها حدود پنج درصد افزایش داشته است.

Table 4. Results of the design by the classical rational method

Pipe	Length(m)	Increment (ha)	Cumulative area(ha)	T_c (min)	T_f(min) (2÷9)	Cumulative flow(m3/s)	Pipe dam (mm)	Velocity (m/s)	Design cost (MRial)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p1	200	8.35	8.35	20	2.19	0.5	450	1.52	
p2	95	3.07	11.42	22.19	1.04	0.59	450	1.52	
p3	100	4.5	15.92	23.23	0.74	0.76	450	2.26	
p4	95	6.05	21.97	23.97	0.9	1.01	525	1.75	
p5	80	7.05	29.02	24.88	0.79	1.05	600	1.68	
p6	122	6.22	35.24	25.67	1.08	1.29	600	1.89	
p8	96	4.08	39.32	26.75	0.76	1.46	600	2.1	
p12	97	5.03	44.35	27.51	0.89	1.58	675	1.82	
p7	100	4.08	4.08	20	1.19	0.12	300	1.4	
p13	90	5.8	50.15	21.19	0.97	2.09	450	1.55	
p14	150	20.88	115.38	50.55	0.77	2.62	750	3.24	
p15	86	21	136.38	51.33	0.51	2.96	750	2.83	
p9	110	5.7	5.7	20	1.8	0.22	450	1.02	115879
p10	85	4.5	10.2	21.8	1.42	0.47	450	1	
p11	56	4	14.2	23.21	0.83	0.61	525	1.13	
p17	87	10.5	166.48	75.87	0.57	2.89	900	2.54	
p18	99	5.78	172.26	76.44	0.66	3.02	900	2.5	
p19	100	4.91	177.17	77.1	0.6	3.15	1050	2.78	
p20	102	5.54	182.71	77.7	0.61	3.3	1050	2.77	
p21	95	2.41	185.12	78.32	0.74	3.37	1200	2.14	
p16	86	3.77	3.77	20	1.59	0.23	450	0.9	
p23	52	5	8.77	21.59	0.96	0.5	450	0.9	
p24	46	2.06	10.83	22.56	0.68	0.55	450	1.12	
p25	52	2.05	12.88	23.24	0.96	0.6	450	0.9	
p22	63	6.51	227.88	103.26	0.33	3.67	1050	3.2	

به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت روش استدلالی اگر به‌صورت اصولی و دقیق به‌کار برده شود و تمام پارامترهای موجود در آن به‌صورت درست به‌کار رود، اختلاف زیادی با روش‌های پیچیده و دقیق مانند روش مدل موج دینامیک و روش‌های معادلات غیرخطی تعیین دبی رواناب ندارد. با وجود افزایش هزینه به میزان پنج درصد در روش کلاسیک استدلالی نسبت به روش پیچیده، به‌دلیل درنظرگرفتن قطرهای بیش‌تر، ضریب اطمینان بالاتری در این روش وجود دارد. لذا می‌توان اظهار نمود که روش کلاسیک استدلالی هم روش خوبی است و اگر طرحی براساس این روش صورت بگیرد، می‌توان طرح را پذیرفت.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک که با مدل شبیه‌سازی SWMM تلفیق می‌شود، روشی برای کاهش هزینه‌های طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی با درنظرگرفتن قیود تحمیلی و تعیین دوره بازگشت بهینه که در آن مجموع هزینه‌های طراحی سالانه و ریسک خسارت سالانه حداقل است، ارائه شده است. در مدل SWMM، برای تبدیل بارش به رواناب از مدل مخزن غیرخطی و روندیابی هیدرولیکی آن از مدل موج دینامیک به‌عنوان دقیق‌ترین روش و هم‌چنین از روش استدلالی برای تبدیل بارش به رواناب و در قسمت محاسبات هیدرولیکی مجرا معادله مانینگ به‌کارگرفته‌شده در این مدل، به‌عنوان روش ساده استفاده شد. در روش اخیر زمان انتقال آب در مجاری در نظر گرفته نمی‌شود. سپس از روش کلاسیک استدلالی نیز برای طراحی استفاده شد. در این روش یک برنامه کامپیوتری در نرم‌افزار اکسل تهیه شد که از روش استدلالی و با درنظرگرفتن زمان انتقال طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی انجام شد. سپس به منظور کاهش هزینه‌های طراحی، ابعاد بهینه مجاری سیلاب‌رو با تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تعیین شد. در مدل مذکور تابع هدف حداقل‌نمودن هزینه طراحی می‌باشد. سپس به‌منظور انجام آنالیز ریسک در تعیین دوره بازگشت بهینه، خسارت ناشی از رواناب محاسبه شد. شیب و قطر سیلابروها به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. برای هرکدام از روش‌ها به‌طور جداگانه آنالیز ریسک انجام شد و نتیجه آن به‌دست‌آوردن دوره بازگشت بهینه طراحی است که در آن مجموع هزینه‌های طراحی و ریسک خسارت حداقل شود. برای صحت سنجی 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، روش پژوهش حاضر جواب‌های مطلوب‌تر و با هزینه محاسباتی کم‌تر حاصل شده و در نتیجه روش پیشنهادی می‌تواند در حل مسائل بهینه‌سازی طراحی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌کار گرفته شود. 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 منطقه دو ناحیه سه تهران مورداستفاده قرار گرفت.

مقایسه روش پیچیده و روش استدلالی بدون درنظرگرفتن زمان انتقال جریان نشان می‌دهد که دوره بازگشت طراحی برای هر دو روش یکسان و برابر ۱۰ سال می‌باشد، اما هزینه طراحی بهینه با استفاده از روش استدلالی در مدل SWMM حدود ۱۶ درصد بیش‌تر است. با این تفاسیر می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از روش استدلالی بدون درنظرگرفتن زمان انتقال یک رویکرد اقتصادی برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی نیست. استفاده از روش کلاسیک استدلالی با درنظرگرفتن

زمان انتقال، هزینه‌های طراحی را تنها حدود پنج درصد نسبت به روش پیچیده افزایش داد، بنابراین استفاده از روش کلاسیک استدلالی، طراحی‌های اقتصادی قابل‌قبولی را ارائه می‌دهد که می‌توان از آن استفاده نمود.

در حال حاضر در اکثر کشورها، دوره بازگشت بارندگی برای طراحی شبکه دفع آب‌های سطحی را معمولاً پنج‌ساله در نظر می‌گیرند. انتخاب دوره بازگشت پنج‌ساله بدون انجام تحلیل ریسک انجام شده که بهینه نخواهد بود، زیرا همان‌طورکه 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 پژوهش حاضر تلفیق الگوریتم ژنتیک به‌عنوان مدل بهینه‌سازی و مدل SWMM به‌عنوان مدل شبیه‌سازی و با درنظرگرفتن رویکرد طراحی مبتنی بر ریسک، مجموعه‌ای کارآمد ایجاد کرده است که ضمن بررسی دقیق رفتار هیدرولیکی سیستم، قادر به طراحی بهینه شبکه موردنظر است.

باید توجه داشت که روش پیچیده و دقیق، اگرچه نتایج منطقی‌تری نسبت به روش استدلالی ارائه می‌دهد، لیکن تعدد پارامترهای موردنیاز در این روش احتمال خطاهای ناشی از غیرواقعی‌بودن اطلاعات ورودی یا عدم دسترسی به اطلاعات موردنیاز را افزایش می‌دهد. به عبارت‌دیگر، افزایش پارامترهای ورودی نیازمند دقت در استخراج صحیح اطلاعات لازم اعم از داده‌های هواشناسی و فیزیکی حوضه‌های آبریز می‌باشد. لذا در چنین شرایطی می‌توان از روش کلاسیک استدلالی استفاده نمود، زیرا با توجه به نتایج پژوهش حاضر، استفاده از این روش اختلاف کمی با نتایج روش پیچیده و دقیق دارد.

پی‌نوشت‌ها

1. Interception
2. Depression storage

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Afshar, M. (2008). Rebirthing particle swarm optimization algorithm: application to storm water network design. Canadian Journal of Civil Engineering, 35, 1120-1127.
2. Afshar, M. H., & Rohani, M. (2012). Optimal design of sewer networks using cellular automata-based hybrid methods: Discrete and continuous approaches. Engineering Optimization, 44, 1-22.
3. Afshar, M. (2006). Application of a genetic algorithm to storm sewer network optimization. Scientia Iranica, 13, 234-244.
4. Hekmati Far, H. (2006). 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. (In Persian).
5. Huizinga, J., Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines. EUR 28552 EN.
6. Jaf, L. (2015). Flood Damage Assessment Using HEC FDA Software in Khansar Watershed. M.Sc. Thesis Department of Natural Resources. Isfahan University of Technology (In Persian).
7. Lukman, S., & Abdurrasheed, A.S. (2013). Improvement Design of Storm Sewer Network for Flood Control. Frontiers in Environmental Engineering (FIEE), 2(3), 31-37.
8. Mousavi, A. (2016). 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 (In Persian).
9. Samani, M.V.H. (2016). Design of hydraulic structures. Dez Ab Consulting Engineering Publications. 346P (In Persian).
10. Mays, L., Liebman, J., & Wenzel, H. (1976). Model for layout and design of sewer systems. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, 102, 385-405.
11. Miles, S., & Heaney, J. (1988). Better than "Optimal" Method for Designing Drainage Systems. Journal of Water Resources Planning and Management, 114, 477-499.

12. Sin, J., Jun, C., Zhu, J. H., & Yoo, C. (2014). 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, 1531-1538.
13. Swamee, P., & Sharma, A. (2008). Design of Water Supply Pipe Networks. Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 362P.
14. Yavari, F., SalehiNeyshabouri, A., & Yazdi, J. (2019). Estimation of economic flood damage using HEC-FIA model in the reverse flood basin of west Tehran. Seventh Comprehensive Conference on Flood Management and Engineering (In Persian).
15. Yu, H., Huang, G., & Wu, C. (2014). Application of the stormwater management model to a piedmont city: a case study of Jinan City, China. Water Science & Technology, 70(5), 858-864.
16. Zhu, Z., Chen, Z., Chen, X., & He, P. (2016). Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. Journal of Science of Total Environment, 553, 1-12.