

Development of Multi-Period Response Management Model to Suddenly Contaminated Urban Water Distribution Networks

N. Zafari¹, F. Masoumi², M. R. Nikoo³

1. Former Graduate Student, Civil Engineering, Water Resource Management and Engineering Field, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(Corresponding Author) f_masoumi@uma.ac.ir
3. Assoc. Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

(Received Dec. 31, 2019 Accepted May 23, 2020)

To cite this article:

Zafari, N., Masoumi, F., Nikoo, M. 2020. "Development of multi-period response management model to suddenly contaminated urban water distribution networks" Journal of Water and Wastewater, 31(5), 24-40.
Doi: 10.22093/wwj.2020.214030.2972. (In Persian)

Abstract

In this study, a simulation-optimization model is used for multi-period consequence management of sudden contamination in urban water distribution network. The tools used in the management of consequences in this study are to discharge contaminated water by hydrants, to cut or plug the pipes to control the flow path in the network or to isolate the different areas, as well as to switch the pumps on or off to regulate the water flows pressure into the network. EPANET software is used for simulation and single-objective genetic algorithm is used for optimization. In this study, the three objective functions are to minimize system return time to normal situation, minimize the mass of contamination consumed, and minimize the number of infected nodes. Each of the objective functions mentioned is executed for two different management scenarios. In the first scenario, the status of the hydrants, valves and pumps is constant from the beginning to the end of the management period. In the latter scenario, the status of the hydrants, valves and pumps can be changed periodically from the beginning to the end of the management period. The number of decision variables in this study was 54, which included determining whether the hydrants were open or closed, whether the pipes were closed or connected, and whether the pumps were on or off. The contamination loading is injected

from the three candidate nodes into the network. The results show that alternating situations of hydrants, valves and pumps, compared to the situation where the hydrants, valves and pumps are in constant condition, decreases the return time to a normal state between 13 and 26.5 percent, the amount of contaminated water consumed between 12 and 20 percent and the number of infected nodes between 6 and 21 percent. It should be noted that in all scenarios, the minimum water pressure at the nodes of the network is controlled from the minimum permissible value and the increase in the number of management responses actions is controlled from the maximum permissible value. The alternation of the opening and closing of the hydrants and valves, as well as the switching of the pumps on or off, helps to improve the target functions to an acceptable extent.

Keywords: Consequence Management, Genetic Algorithm, EPANET, Urban Water Distribution Network, Contaminant Injection.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۵، صفحه: ۴۰-۲۵

تدوین مدل مدیریت چندمرحله‌ای پیامد ورود بار آلودگی ناگهانی در شبکه‌های توزیع آب شهری

نگین ظفری^۱، فریبرز معصومی^۲، محمدرضا نیکو^۳

۱- کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

f_masoumi@uma.ac.ir (نویسنده مسئول)

۳- دانشیار، بخش مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(دریافت ۹۸/۱۰/۱۰ پذیرش ۹۹/۳/۳)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

ظفری، ن.، معصومی، ف.، نیکو، م.، ۱۳۹۹. "تدوین مدل مدیریت چندمرحله‌ای پیامد ورود بار آلودگی ناگهانی در شبکه‌های توزیع آب شهری"

مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۵)، ۴۰-۲۵. Doi: 10.22093/wwj.2020.214030.2972

چکیده

در این پژوهش از یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای مدیریت چندمرحله‌ای پیامد ورود بار آلودگی ناگهانی در شبکه‌های توزیع آب شهری استفاده شد. ابزارهای استفاده شده در مدیریت پیامد در این پژوهش، تخلیه آب آلوده توسط شیرهای آتش‌نشانی، باز یا بسته کردن لوله‌ها برای کنترل مسیر جریان در شبکه یا ایزوله کردن نواحی مختلف و نیز خاموش یا روشن کردن پمپ‌ها برای تنظیم فشار جریان آب در شبکه هستند. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار EPANET و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه استفاده شد. توابع هدف مسأله مدیریت پیامد در این پژوهش عبارت‌اند از: حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی، حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده توسط کاربران و نیز حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده شده. هرکدام از توابع هدف اشاره شده برای دو سناریوی مختلف مدیریتی اجرا شد. در سناریوی اول، وضعیت شیرهای تخلیه آتش‌نشانی و نیز شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها از نظر باز یا بسته بودن و نیز وضعیت پمپ‌ها از نظر روشن یا خاموش بودن از ابتدا تا انتهای دوره شبیه‌سازی ثابت و در سناریوی دوم وضعیت‌های اشاره شده به تناوب طبق الگوهای موجود قابل تغییر بود. تعداد متغیرهای تصمیم در این پژوهش ۵۴ عدد، شامل تعیین باز یا بسته بودن شیرهای آتش‌نشانی، باز یا بسته بودن لوله‌ها و نیز روشن یا خاموش بودن پمپ‌ها بود. تزریق بار آلودگی از سه گره کاندیدا در شبکه انجام شد. نتایج نشان داد که در حالت تغییر متناوب ابزارهای مدیریتی، تابع هدف حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی بین ۱۳ تا ۲۶/۵ درصد، تابع هدف حداقل کردن جرم آلاینده مصرفی بین ۱۲ تا ۲۰ درصد و تابع هدف حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده بین ۶ تا ۲۱ درصد بهبود یافت. لازم به ذکر است که در همه سناریوها، عدم افت فشار آب در گره‌های مختلف شبکه از حداقل مقدار مجاز تعیین شده و نیز عدم افزایش تعداد فعالیت‌های واکنش‌های مدیریتی از حداکثر مقدار تعیین شده کنترل شد. تناوب در باز و بسته شدن لوله‌ها و شیرهای تخلیه آتش‌نشانی و نیز در روشن یا خاموش بودن پمپ‌ها به بهبود توابع هدف تا حد قابل‌قبولی کمک کرد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت پیامد، الگوریتم ژنتیک، EPANET، شبکه توزیع آب شهری، تزریق آلودگی

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع آب شهری یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین زیرساخت‌های حیاتی یک جامعه محسوب می‌شوند و اگر آسیبی به این شبکه‌ها وارد شود جمعیت زیادی را متأثر می‌سازد. از جمله آسیب‌هایی که تهدیدی جدی برای شبکه آب شهری به حساب می‌آید، ورود بار آلاینده شیمیایی به شبکه چه به صورت عمدی و چه به صورت غیرعمدی است. موارد متعددی از ورود بار آلاینده شیمیایی به شبکه آب شهری در دهه‌های اخیر مشاهده شده است. در سال ۲۰۰۰ در Walkerton کانادا گسترش آلودگی در شبکه ۷ نفر را کشته و هزاران نفر را بیمار کرد. همچنین در ماه ژانویه ۲۰۱۴ به دلیل آلودگی شیمیایی که از رودخانه ELK در غرب ویرجینیا وارد شبکه شده بود، به مدت ۵ روز حدود سیصد هزار نفر، بدون آب شرب بودند (Salomons and Ostfeld, 2016).

مدیریت پیامد آلودگی در سیستم‌های توزیع آب آشامیدنی با چالش‌های فراوانی روبه‌رو است. از دلایل این امر می‌توان: (۱) گستردگی سیستم‌های توزیع آب آشامیدنی مخصوصاً در شهرها (۲) متغیر بودن الگوی جریان در شبکه در زمان‌های مختلف (۳) حلقه‌ای بودن سیستم توزیع که باعث اختلاط آلودگی می‌شود را نام برد (Mirri and Afshar, 2014). به‌منظور مدیریت پیامد آلودگی شبکه‌های توزیع آب، اداره حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا^۱ جعبه ابزار پروتکل پاسخ^۲ را در سال ۲۰۰۳ ارائه داده است.

پولین و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش نوینی که مبتنی بر تعدادی از دستورالعمل‌های از پیش مشخص بود و با فرض مشخص بودن محل تزریق، به حل مسأله مدیریت پیامد ورود بار آلاینده شیمیایی در شبکه آب شهری پرداختند (Poulin et al., 2008). رویکرد استفاده شده در این پژوهش انتخاب بهترین مکان‌ها برای ایزوله کردن شبکه آب بود، به نحوی که بیشترین آلودگی از شبکه خارج و بخش کمتری از شبکه درگیر آلودگی شود. در این پژوهش با باز کردن و بستن لوله‌ها و شیرهای آتش‌نشانی از ورود مواد آلاینده به نقاط مختلف جلوگیری کردند.

بارانوسکی و همکاران به‌منظور مدیریت پیامد و با هدف به حداقل رساندن غلظت آلودگی و با در نظر گرفتن تغییر تقاضا از

روش برنامه‌ریزی غیرخطی صحیح مختلط^۳ در کنار الگوریتم ژنتیک^۴ استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها مؤثر بودن و مشابه بودن نتایج استفاده از هر دو الگوریتم را نشان داد (Baranowski and LeBoeuf, 2008).

آفونسو و همکاران در سال ۲۰۰۹ از دو هدف اصلی حداقل کردن جمعیت متأثر از آلودگی و حداقل کردن هزینه‌های تخلیه آلودگی برای مدیریت پیامد بعد از تشخیص آلودگی استفاده کردند. در این پژوهش نیز با فرض مشخص بودن محل و زمان تزریق، با حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده، منطقه آلوده و بالطبع آن جمعیت تحت تأثیر را حداقل کردند. همچنین برای حداقل کردن هزینه‌های تخلیه آلودگی، تعداد مداخلات عملیاتی را به حداقل رساندند (Alfonso et al., 2010).

زچمن در پژوهش خود چارچوبی بر مبنای مدل‌های عامل بنیان و پویایی سیستم‌ها تعریف کرد. در این پژوهش رفتار مصرف‌کنندگان که شامل نحوه مصرف و گسترش اخبار آلودگی بود نیز بررسی شد (Zechman, 2011).

شفیعی و برگلوند در سال ۲۰۱۵ با استفاده از توزیع احتمالی مونت کارلو لیستی از حوادث آلودگی را شبیه‌سازی کردند و از روش درخت تصمیم‌گیری با ریسک‌پذیری‌های مختلف استفاده کردند تا بتوانند بهترین شیرهای آتش‌نشانی را برای تخلیه آلودگی انتخاب کنند (Shafiee and Berglund, 2015).

دوئرلین و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای به حداقل رساندن فعالیت‌های عملیاتی اپراتورها از روش شستشوی یک‌طرفه استفاده کردند. این روش یک روش بهینه برای تعیین مسیر شستشوی لوله‌ها است. از این روش هم برای تمیز کردن لوله‌ها از رسوب و هم برای تخلیه آلودگی می‌توان استفاده کرد (Deuerlein et al., 2014). راسخ و برامبلو در سال ۲۰۱۵ یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی پویا تعریف کردند که به‌طور انطباقی در شرایط اضطراری، راه‌حل‌های مختلفی را برای تعیین بهترین عملیات واکنشی در زمان واقعی تعیین می‌کند (Rasekh and Brumblow, 2015).

نتایج مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه در شهر مجازی نشان داد که این مدل می‌تواند از ابزارهای تصمیم‌گیری مفید برای کاهش

³ Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)⁴ Genetic Algorithm (GA)¹ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)² Reply Protocol Tools Box (RPTB)

انجام شد.

در این پژوهش تأثیر تناوب در وضعیت استفاده از ابزارهای موجود در مدیریت پیامد ورود بار آلاینده ناگهانی در شبکه آب شهری با رعایت قید حداکثر تعداد عملیات واکنشی مجاز بررسی شد. در حقیقت برای ارتقای مطالعات گذشته سه تابع هدف حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی، حداقل کردن جرم آلاینده مصرف شده و حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده در دو حالت مختلف بررسی شد. در حالت اول، وضعیت شیرها و پمپ‌ها از ابتدا تا پایان دوره شبیه‌سازی ثابت و فقط یک بار باز و بسته شد. در حالت دوم، وضعیت شیرها و پمپ‌ها از ابتدا تا پایان دوره شبیه‌سازی قابل تغییر بود. در نهایت هر دو حالت با هم مقایسه و نتایج به دست آمده بررسی و ارزیابی شد. در همه حالت‌ها رعایت قیود حداقل فشار هیدرولیکی در گره‌های شبکه و نیز حداکثر تعداد عملیات واکنشی مجاز کنترل شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش کار

همان طور که گفته شد در این پژوهش برای حل مسأله مدیریت پیامد ورود بار آلودگی ناگهانی، از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استفاده شد. شبیه‌ساز استفاده شده در این پژوهش، نرم‌افزار EPANET بود که نرم‌افزاری رایگان، با کدهای آزاد است. این نرم‌افزار قادر است با مدل‌های بهینه‌سازی تدوین شده در محیط‌های برنامه‌نویسی مختلف مانند نرم‌افزار MATLAB مرتبط شود. برای بهینه‌سازی نیز از GA استفاده شده که یکی از الگوریتم‌های فراکاوشی پرکاربرد در حل مسائل بهینه پیچیده و غیرخطی در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی است.

این الگوریتم از علم ژنتیک و نظریه تکاملی داروین الهام می‌گیرد. گام اول در پیاده‌سازی این الگوریتم، تبدیل پاسخ مسأله به فرم یک کروموزوم است. هر کروموزوم نیز از تعدادی ژن تشکیل شده است. پس از تشکیل ساختار کروموزوم، یک تعداد کروموزوم‌های اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌شود که به آن نسل اولیه گفته می‌شود. تعداد کروموزوم‌های اولیه را اندازه جمعیت می‌نامند. در ابتدا با استفاده از عملگر انتخاب تعدادی از کروموزوم‌های فعلی به عنوان والد انتخاب می‌شوند و با استفاده از عملگر ترکیب و از طریق تقاطع والدین، کروموزوم‌های جدید که

اثرات آلودگی آب بر بهداشت عمومی باشد. نجفی و افشار در سال ۲۰۱۳ با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان برای بهینه‌سازی تک و دوهدفه و با در نظر گرفتن دو هدف اصلی حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده و حداقل کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی به مدیریت پیامد آلودگی در شبکه آب شهری پرداختند (Najafi and Afshar, 2013). در این پژوهش علاوه بر شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها و نیز شیرهای آتش‌نشانی به عنوان متغیر تصمیم، خاموش یا روشن بودن پمپ‌ها را نیز به عنوان متغیر تصمیم فرض کردند که نتایج حاکی از نقش اساسی پمپ‌ها در مدیریت پیامد آلودگی بود. باشی ازغدی و همکاران در سال ۲۰۱۷ وضعیت شیرها و پمپ‌ها را با هدف حداقل کردن زمان پاسخ در هر گام زمانی و تا پایان دوره شبیه‌سازی تغییر دادند (Bashi-Azghadi et al., 2017). در این پژوهش برای بهینه‌سازی از برنامه‌ریزی پویا^۱ و GA استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم روش DP برتری خود را از دست می‌دهد ولی با تعداد متغیرهای تصمیم کمتر، روش DP از لحاظ دقت و زمان اجرا از GA بهتر عمل می‌کند.

شفیعی و برگلوند در سال ۲۰۱۷ برای بررسی اثرات آلودگی بر سلامت جامعه مدل ABM رفتارهای اجتماعی و تکنولوژی را به صورت ترکیبی در نظر گرفتند (Shafiee and Berglund, 2017). در این پژوهش حالت‌های مختلف آلودگی با استفاده از مونت کارلو شبیه‌سازی شد و سناریوهای آلودگی از اطلاعات حاصل از سنسورها طبقه‌بندی شد تا اعمال تغییر مصرف بر اثر انتشار خبر آلودگی در شبکه را بررسی کنند.

ظفری و همکاران در سال ۲۰۱۷ برای مدیریت پیامد ورود بار آلاینده به شبکه توزیع آب دو حالت مختلف را در نظر گرفتند (Zafari et al., 2017). بار آلاینده ورودی در حالت اول، آلودگی غیرخطرناک و در حالت دوم، آلودگی خطرناک است. برای حالت اول، تابع چندهدفه و برای حالت دوم، تابع هدف را تک‌هدفه در نظر گرفتند. توابع هدف در حالت اول حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده و حداقل کردن هزینه اعمال مدیریتی و در حالت دوم حداقل کردن زمان رفع آلودگی از کل سیستم بودند. در این پژوهش، تحلیل هیدرولیکی شبکه با استفاده از رویکرد تحلیل مبتنی بر فشار^۲

¹ Dynamic Programming (DP)

² Pressure Dependent Analysis (PDA)

مدیریت پیامد در این پژوهش دو حالت یا دو سناریو مطرح و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شد. در سناریوی اول متغیرهای تصمیم تصادفی تولید شده توسط بهینه‌ساز به صورت صفر و یکی است، یعنی هر شیر باز و بسته کردن لوله‌ها از ابتدای دوره عملیات واکنشی (ساعت ۱۳:۰۰) تا انتهای آن (ساعت ۲۲:۰۰) یا باز است یا بسته. هر شیر آتش‌نشانی نیز از ابتدای دوره واکنشی یا انتهای آن وضعیت ثابت دارد (یا باز یا بسته). این امر در مورد پمپ‌های تقویت فشار آب نیز صادق است. یعنی هر پمپ از ابتدای دوره واکنشی تا انتهای آن یا در حالت روشن قرار دارد و یا در حالت خاموش. در سناریوی دوم، متغیرهای تصمیم تولید شده توسط بهینه‌ساز می‌تواند ۸ عدد صحیح از صفر تا ۷ را اختیار کند. این اعداد نشان‌دهنده شماره الگوی نحوه باز یا بسته بودن شیرها یا روشن یا خاموش بودن پمپ‌ها است. بنابراین وضعیت هر شیر (چه آتش‌نشانی و چه قطع و وصل لوله‌ها) و هر پمپ می‌تواند طبق الگوی زمانی مربوط به خود تغییر کند. این الگوها در جدول ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این جدول، خانه‌های مشکی نشان‌دهنده باز بودن شیرهای تخلیه آتش‌نشانی، بسته بودن شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها و نیز وضعیت روشن پمپ‌ها است و خانه‌های سفید نشان‌دهنده بسته بودن شیرهای آتش‌نشانی، باز

همان راه‌حل‌های جدید هستند تولید می‌شوند. با این کار امکان تولید جواب‌های بهتر به وجود می‌آید. با استفاده از عملگر جهش نیز برخی از ژن‌ها به صورت تصادفی انتخاب و تغییر می‌یابند. این امر به جلوگیری از افتادن راه‌حل‌ها در نقطه بهینه موضعی کمک می‌کند. این اعمال تا همگرایی تمامی کروموزوم‌ها به سمت جواب بهینه ادامه پیدا می‌کند. شیوه ارتباط بین دو مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی به صورت ارتباط مستقیم است و به این صورت است که در ابتدا متغیرهای تصمیم به عنوان مجهولات مسأله توسط مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود. سپس توسط یک کد واسط، متغیرهای تصمیم تولید شده به مدل شبیه‌سازی داده می‌شود و مدل شبیه‌سازی با توجه به متغیرهای تصمیم تولید شده و با توجه به توپولوژی مسأله و دیگر اطلاعات ورودی اولیه اجرا می‌شود. سپس نتایج استفاده از مدل شبیه‌سازی اجرا شده، به مدل بهینه‌سازی داده شده و تابع هدف مدل بهینه‌سازی با توجه به داده‌های اخذ شده، محاسبه و ارزیابی می‌شود. این فرایند تا زمانی که یکی از شرایط توقف الگوریتم بهینه‌سازی فراهم شود ادامه می‌یابد. در شکل ۱ فلوچارت رویکرد شبیه‌سازی-فرایند بهینه‌سازی استفاده شده برای حل مسأله تعریف شده در این پژوهش آمده است.

همان طور که در قسمت‌های پیشین مطرح شد برای حل مسئله

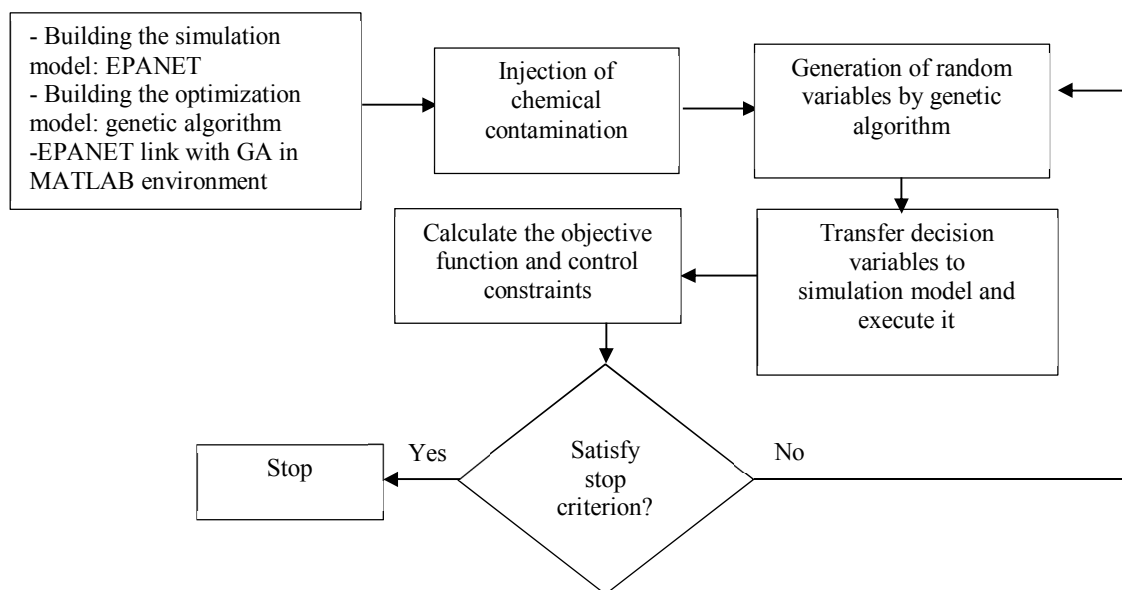


Fig. 1. Flowchart of the proposed simulation-optimization approach in consequence management problem

شکل ۱- فلوچارت رویکرد پیشنهادی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در حل مسأله مدیریت پیامد

جدول ۱- الگوی زمانی تعریف شده برای وضعیت متناوب شیرهای آتش‌نشانی، شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها و پمپ‌ها

Table 1. Defined time pattern status for hydrants, valves and pumps

Pattern	Time												
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0													
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													

۹۲ گره، ۱۱۷ لوله، ۳ تانک ذخیره، ۲ پمپ و ۲ مخزن سطحی است. از بین ۹۲ گره این شبکه، ۵۹ گره دارای نیاز مصرفی از قبل تعیین شده و ۳۳ گره نیز دارای مصرف صفر هستند. در این پژوهش با تغییراتی در کد برنامه، گره‌های دارای مصرف صفر به عنوان گره‌های دارای شیر آتش‌نشانی تعریف شدند. همچنین بر روی ۲۰ لوله شبکه نیز شیرهای باز و بسته کردن تعریف شد. یک آلودگی عمدی در ساعت ۰۹:۰۰ صبح با نرخ تزریق ۰/۰۰۶ کیلوگرم بر ثانیه به مدت ۷ ساعت به شبکه تزریق شد. با فرض اینکه آستانه آلودگی ۰/۰۱ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است، ۴ ساعت بعد از تزریق آلودگی در ساعت ۱۳ مدیریت سیستم از وجود آلودگی مطلع شد و با یک ساعت تأخیر و در ساعت ۱۴:۰۰ مدیریت پیامد برای تخلیه آلودگی را شروع کرد و تا ساعت ۲۳:۰۰ فرایند مدیریت ادامه یافت. لازم به ذکر است که طول دوره شبیه‌سازی مدل نیز ۲۴ ساعت بود که از ساعت ۰۰:۰۰ شروع و تا ساعت ۲۴:۰۰ ادامه یافت. با شروع عملیات شبیه‌سازی شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها، شیرهای آتش‌نشانی و نیز پمپ‌ها توسط الگوریتم بهینه‌سازی بسته یا باز و نیز روشن یا خاموش شد. این فرایند به صورت مجزا برای گره‌های شماره ۱۲۰، ۱۰۱ و ۱۶۹ انجام شد.

۲-۳-۲- فرمولاسیون

۲-۳-۱- متغیرهای تصمیم

همان طور که گفته شد باز یا بسته بودن شیرهای تخلیه آتش‌نشانی، باز یا بسته کردن لوله‌ها و روشن یا خاموش بودن پمپ‌ها به عنوان

بودن شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها و نیز خاموش بودن پمپ‌ها است. به عنوان مثال الگوی صفر اگر به یک شیر آتش‌نشانی اختصاص یابد، نشان‌دهنده بسته بودن آن شیر، اگر به شیر باز و بسته کردن لوله‌ها اطلاق شود، نشانه باز بودن آن لوله و اگر به یک پمپ تقویت فشار هیدرولیکی اختصاص یابد، نشان‌دهنده خاموش بودن آن پمپ در طول کل دوره شبیه‌سازی است. در الگوهای معرفی شده در سناریوی شماره ۲، گام‌های تغییر وضعیت سیستم سه ساعته تعیین شد. با انجام تحلیل حساسیت بر روی گام زمانی مختلف مشخص شد که گام‌های زمانی بزرگتر از سه ساعت که تعداد الگوهای کمتری نسبت به گام سه ساعته به دست می‌دهد تأثیر چندان مثبتی بر روی توابع هدف ندارد. گام‌های زمانی کوچکتر نیز از نظر رعایت قید حداکثر تعداد فعالیت‌های واکنشی به مشکل بر می‌خورد و به نظر می‌رسد که از نظر اجرایی نیز چندان مناسب و منطقی نباشد.

۲-۲- معرفی شبکه

مثال شماره ۳ نرم‌افزار EPANET که در پژوهش‌های متعددی به عنوان مطالعه موردی برای مسائل مدیریت پیامد حملات شیمیایی به شبکه آب شهری مطرح بوده، در این پژوهش نیز به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد (Bashi-Azghadi et al., 2017, Bashi-Azghadi et al., 2018, Najafi and Afshar, 2013, Preis and ostfeld 2008).

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است این شبکه شامل

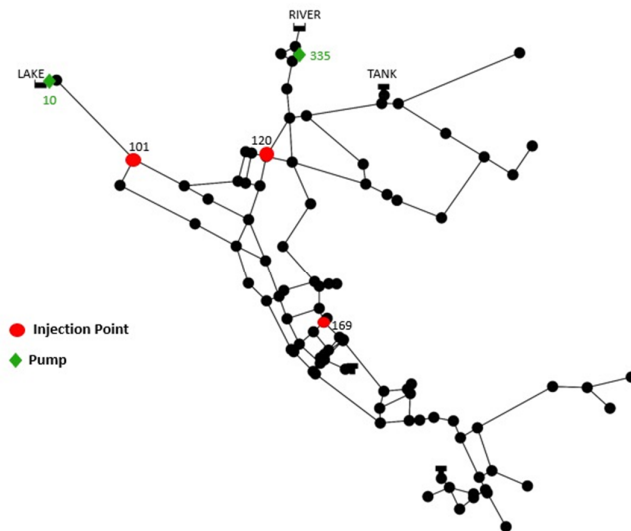


Fig. 2. The locations of pumps and contamination entering nodes in example 3 EPANET
 شکل ۲- موقعیت پمپ‌ها و گره‌های تزریق آلودگی در مثال ۳ نرم‌افزار EPANET

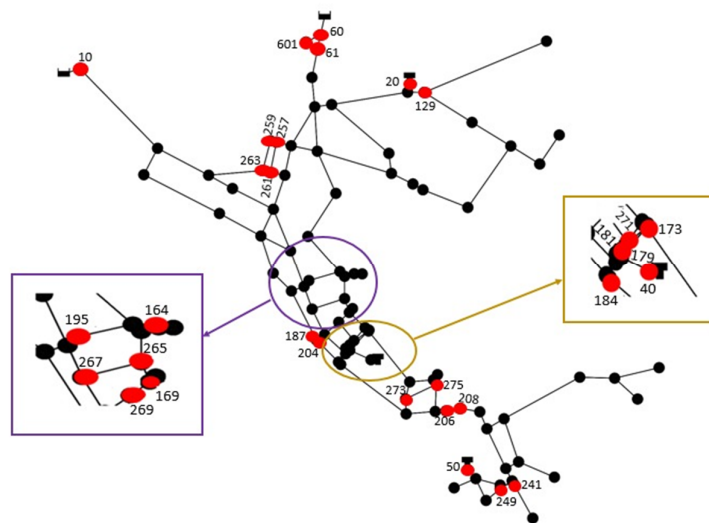


Fig. 3. The numbers of hydrants nodes in example 3 EPANET
 شکل ۳- شماره گره‌های دارای شیر آتش‌نشانی در مثال ۳ نرم‌افزار EPANET

است. از این‌رو در این شبکه ۳۲ شیر آتش‌نشانی وجود دارد. همچنین برای ۲۰ لوله نیز شیر باز و بسته کردن تعریف شده و در ۲ نقطه نیز پمپ تقویت فشار قرار دارد. بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم برابر با ۵۴ می‌شود. در شکل ۳، شماره گره‌های آتش‌نشانی تعریف شده در شبکه و در شکل ۴ موقعیت شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها مشاهده می‌شود.

متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. همچنین بیان شد که در شبکه توزیع آب مثال شماره ۳ نرم‌افزار EPANET تعداد ۳۳ گره با نیاز مصرفی صفر وجود دارد. بنابراین یکی از این گره‌ها به‌عنوان گره تزریق آلودگی در نظر گرفته می‌شود و در بقیه شیر آتش‌نشانی در نظر گرفته می‌شود. خروجی از شیرهای آتش‌نشانی در زمان باز بودن به‌صورت یک نیاز ثابت با دبی $3/473$ لیتر بر ثانیه لحاظ شده

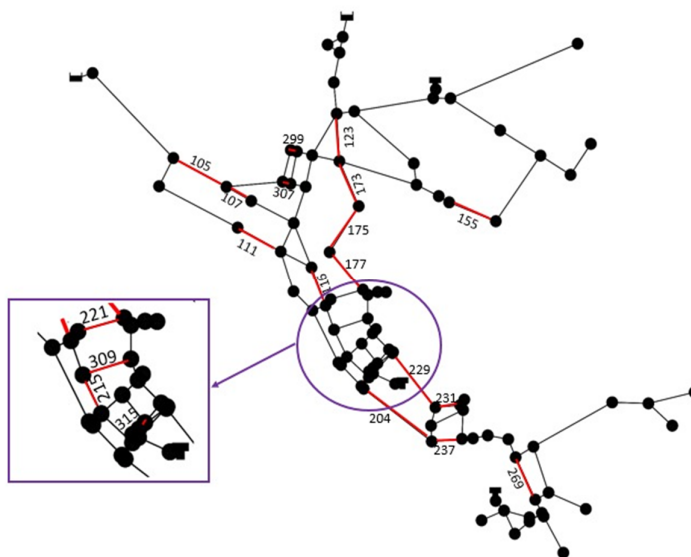


Fig. 4. The numbers of valves in example 3 EPANET
 شکل ۴- شماره شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها در مثال ۳ نرم‌افزار EPANET

در معرض آلودگی قرار می‌گیرند کاهش می‌یابد و در نتیجه سلامت و بهداشت جمعیت بسیار زیادی از یک جامعه تضمین می‌شود. فرم ریاضی تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{t_{in}}^{t_{end}} [Q(i,t) \times D(i,t) \times Pat(i,t)] \quad (2)$$

که در آن Z_2 تابع هدف دوم (جرم آلودگی مصرفی)، i شمارنده گره، n تعداد گره‌ها، t_{in} زمان شروع مدیریت پیامد، t_{end} پایان دوره مدیریت پیامد، $Q(i,t)$ غلظت آلاینده در گره i در زمان t ، $D(i,t)$ نیاز مصرفی (تقاضا) گره i در زمان t و $Pat(i,t)$ الگوی مصرفی گره i در زمان t است.

پ- حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده

با حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده، مناطق درگیر آلودگی کم شده و در نتیجه افراد کمتری دچار آلودگی می‌شوند. فرم ریاضی این تابع هدف نیز به صورت زیر است

$$\text{Min } Z_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{t_{in}}^{t_{end}} N(i,t) \quad (3)$$

که در آن Z_3 تابع هدف سوم (تعداد گره‌های آلوده)، i شمارنده گره، n تعداد

۲-۳-۲- توابع هدف

اهداف این پژوهش، سه تابع حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی، حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده و نیز حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده شده بود.

الف- حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی

منظور از بازگشت شبکه به حالت عادی این است که با انجام اقدامات و عملیات واکنشی بتوان در زمان کوتاه و سریع، آلودگی را از شبکه تخلیه کرد و غلظت همه گره‌ها از غلظت آستانه مجاز کمتر باشد. فرم ریاضی این تابع هدف به صورت زیر است

$$\text{Min } Z_1 = T | (\sum_{i=1}^n N(i,T) = 0) \quad (1)$$

که در آن

Z_1 تابع هدف اول (حداقل کردن زمان برگشت سیستم به حالت عادی)، T مدت زمان برگشت کل شبکه به حالت طبیعی، i شمارنده گره، n تعداد گره‌ها و $N(i,t)$ مقدار تخطی از حداکثر غلظت مجاز در گره i ام در ماه t ام است.

ب- حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده

با استفاده از حداقل کردن جرم آب آلوده مصرفی، تعداد افرادی که

$P(i, t)$ فشار در گره i در زمان t ، $P_{\min}(i, t)$ حداقل فشار لازم در گره i در زمان t و P_{\max} حداکثر مقدار فشار مجاز در گره‌ها برای آسیب ندیدن لوله‌ها و تجهیزات شبکه است. از آنجایی که مقدار نیاز آبی در هر گره ممکن است طبق الگوی مصرف در زمان‌های مختلف متفاوت باشد، از این رو مقدار P_{\min} در هر گره در زمان‌های مختلف متفاوت است و از روی معادله فشار-دبی $Q = k\sqrt{P}$ به دست می‌آید. مانند پژوهش (Afshar and Najafi, 2014) مقدار k برابر با $11/s/m^{0.5}$ انتخاب شد. همچنین به طور کلی کنترل شد که مقدار حداقل فشار از 0.5 بار کمتر نشود. مقدار 0.5 بار برابر با حداقل مقدار فشاری است که در نشریه ۳-۱۱۷ سازمان برنامه و بودجه با عنوان "ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی" برای گره‌های اطراف شیرهای آتش‌نشانی در زمان استفاده از این شیرها تعیین شده است. همچنین مطابق با ضوابط مندرج در همین نشریه، مقدار حداکثر فشار برابر با 6 بار انتخاب می‌شود. دلیل کنترل فشار حداکثر نیز این است که تعدادی از لوله‌ها در طول دوره مدیریت پیامد بسته می‌شوند، بنابراین ممکن است در برخی از گره‌های اطراف این لوله‌ها فشار هیدرولیکی از حد مجاز بیشتر شود و باعث آسیب به تأسیسات شبکه شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی

در انجام محاسبات مربوط به سناریوهای حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی، تعداد کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک برابر 50 ، تعداد نسل‌ها برای سناریوی اول (ثابت بودن وضعیت شیرها و لوله‌ها و پمپ‌ها) برابر 150 و برای سناریوی دوم (متغیر بودن وضعیت شیرها و لوله‌ها و پمپ‌ها) برابر 200 ، نرخ تزیوج برابر 0.8 و نرخ جهش برابر 0.05 انتخاب شد. در زمانی که تزریق آلودگی از گره شماره 120 انجام می‌شود، مقدار تابع هدف در سناریوی ۱، برابر با 236 واحد به دست می‌آید. یعنی آلودگی در ساعت $19:40$ همان روز، به طور کامل خارج و سیستم به حالت اولیه بر می‌گردد. همان طور که گفته شد هر واحد در این تابع هدف برابر با 5 دقیقه است. در حالی که در سناریوی ۲، مقدار تابع هدف 218 واحد است. یعنی آلودگی از شبکه در ساعت $18:10$ همان روز، خارج می‌شود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن وضعیت متناوب شیرها و پمپ‌ها، آلودگی ۴

گره‌ها، t_{in} زمان شروع مدیریت پیامد و t_{end} پایان دوره مدیریت پیامد و $N(i, t)$ مقدار تخطی از حداکثر غلظت مجاز در گره i ام در ماه t است.

۳-۳-۲- قیدهای مسئله

برای حل مسئله مدیریت پیامد ورود بار آلودگی ناگهانی به شبکه آب شهری، دو قید عمده در این پژوهش تعریف شد. یکی از این قیدها، قید حداکثر تعداد عملیات واکنشی است که در این بررسی برابر 30 واکنش در نظر گرفته شد. قید دیگر، تأمین حداقل و حداکثر فشار هیدرولیکی در گره‌ها بود. به طور کلی نحوه کنترل رعایت قیودات به این صورت است که تخطی از آنها به صورت یک تابع جریمه به تابع هدف اصلی اضافه می‌شود

$$\text{Min } f = Z + C_1 \times \text{Reaction Penalty} + C_2 \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \text{Pressure Penalty}(i, t) \quad (4)$$

که در آن ضرایب C_1 و C_2 اعدادی هستند که طی آزمون و خطا تعیین می‌شود و مقدار Z برابر با تابع هدف اصلی است که در قسمت قبلی توضیح داده شد. Reaction Penalty، تابع جریمه مربوط به تعداد عملیات واکنشی است و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\text{Reaction Penalty} = \begin{cases} \left(\frac{\text{Reactions}}{30} - 1\right)^2 & \text{if Reactions} > 30 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

که در آن Reactions از تعداد عملیات واکنشی انجام شده است. همچنین مقدار فاکتور مربوط به جریمه عدم برآورده شدن قیودات حداقل و حداکثر فشار هیدرولیکی گره‌ها از معادله زیر حساب می‌شود

$$\text{Pressure Penalty}(i, t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{P(i, t)}{P_{\min}(i, t)}\right)^2 & \text{if } P(i, t) < P_{\min}(i, t) \\ 0 & \text{if } P_{\min}(i, t) \leq P(i, t) \leq P_{\max} \\ \left(\frac{P(i, t)}{P_{\max}} - 1\right)^2 & \text{if } P(i, t) > P_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن

عملیات تزریق بار آلودگی از گره شماره ۱۰۱، مقدار تابع هدف در سناریوی ۱ برابر با ۲۳۵ دقیقه و در سناریوی ۲، برابر با ۲۰۵ دقیقه است. یعنی مقدار تابع هدف در سناریوی ۲، نسبت به سناریوی ۱ به مقدار ۱۳ درصد بهبود می‌یابد. در تزریق بار آلودگی از گره شماره ۱۶۹ نیز مقدار تابع هدف در سناریوی ۱ برابر با ۲۸۰ دقیقه و در سناریوی ۲، برابر با ۲۳۰ دقیقه است. این بدان معنی است که مقدار بهینه تابع هدف در سناریوی ۲، به مقدار ۱۸ درصد نسبت به سناریوی ۱ بهبود می‌یابد. در شکل ۵، مقدار بهینه تابع هدف حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی به‌ازای سناریوهای مختلف برای گره‌های مختلف تزریق آلودگی نشان داده شده است.

با بررسی سه نقطه تزریق مختلف با دو سناریوی مطرح شده مشاهده شد که برای تابع هدف حداقل کردن زمان بازگشت سیستم به حالت عادی، سناریوی ۲ نسبت به سناریوی ۱، بین ۱۳ تا ۲۶/۵ درصد جواب‌های بهتری را به‌دست آورد. این در حالی است که در همه سناریوها و حالت‌ها، کنترل لازم برای عدم تخطی از قید حداقل فشار در گره‌ها و نیز قید حداکثر تعداد عملیات واکنشی مجاز انجام شده است. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که در حالتی که وضعیت شیرها و

ساعت و ۱۰ دقیقه بعد از شروع عملیات از شبکه خارج می‌شود. این در حالی است که با در نظر گرفتن وضعیت ثابت شیرها و پمپ‌ها آلودگی ۵ ساعت و ۴۰ دقیقه بعد از شروع عملیات از شبکه خارج می‌شود. در صورتی که تابع هدف از زمان شروع عملیات واکنشی یعنی ساعت ۱۴ محاسبه شود، در سناریوی ۱ تابع هدف برابر با ۳۴۰ دقیقه و در سناریوی ۲ تابع هدف برابر با ۲۵۰ دقیقه می‌شود. به‌این ترتیب می‌توان گفت که در سناریوی ۲ مقدار تابع هدف به مقدار ۲۶/۵ درصد بهتر از سناریوی ۱ است.

در جدول ۲ وضعیت شیرهای آتش‌نشانی و در جدول ۳ وضعیت شیرهای قطع و وصل لوله‌ها و نیز وضعیت پمپ‌ها در دو سناریوی مطرح شده برای وضعیت تزریق از گره شماره ۱۲۰ نشان داده شده است. تعداد عملیات‌های انجام شده در این حالت برای سناریوی ۱ برابر با ۳۰ و برای سناریوی ۲ برابر با ۲۹ واکنش بود که همگی در محدوده تعداد مجاز قرار دارند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در سناریوی ۱ تعداد شیرهای آتش‌نشانی بیشتری نسبت به سناریوی ۲ باز می‌شود ولی در سناریوی ۲، تعداد لوله‌های بیشتری نسبت به سناریوی ۱ بسته می‌شود. همچنین در سناریوی ۲، روشن بودن پمپ‌ها به تخلیه آلودگی کمک می‌کند این در حالی است که در سناریوی ۱ پمپ‌ها در تخلیه آلودگی نقشی ندارند. در

جدول ۲- متغیرهای تصمیم‌نهایی برای وضعیت شیرهای آتش‌نشانی برای تابع هدف اول در دو سناریوی مطرح شده (گره تزریق ۱۲۰)

Table 2. The final decision variables of hydrants situation for the first objective function in two defined scenarios (injection node 120)

ID	10	20	40	50	60	601	61	129	164	169	173
Scenario 1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
Scenario 2	1	6	5	3	2	0	0	7	0	4	7
ID	179	181	183	184	187	195	204	206	208	241	249
Hydrants Scenario 1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Scenario 2	0	5	0	0	0	6	0	0	0	0	0
ID	257	259	261	263	265	267	269	271	273	275	
Scenario 1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	
Scenario 2	0	7	0	0	7	1	0	0	4	5	

جدول ۳- متغیرهای تصمیم نهایی وضعیت شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها و وضعیت پمپ‌ها برای تابع هدف اول در دو سناریوی مطرح شده (گره تزریق ۱۲۰)

Table 3. The final decision variables of situations of valves and pumps for the first objective function in two defined scenarios (injection node 120)

		ID	105	107	111	116	123	155	173	175	177	204
Valves	Scenario 1		1	0	1	1	0	1	0	1	1	1
	Scenario 2		1	7	0	0	0	0	7	6	0	3
		ID	215	221	229	231	237	269	299	307	309	315
	Scenario 1		1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	Scenario 2		2	0	0	0	0	0	0	4	4	1
Pumps		ID	10	335								
	Scenario 1		0	0								
	Scenario 2		2	1								

نرخ تزویج ۰/۸ و نرخ جهش ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. زمانی که تزریق آلودگی از گره ۱۲۰ انجام می‌شود، در سناریوی ۱ به اندازه ۱۰۶/۸ کیلوگرم جرم آلاینده توسط مصرف‌کننده در شبکه مصرف می‌شود. این در حالی است که وقتی شیرها و پمپ‌ها به صورت متناوب بسته، باز و روشن می‌شوند در سناریوی ۲ به اندازه ۹۵/۴ کیلوگرم جرم از آلاینده در کل شبکه مصرف می‌شود. نکته قابل توجه این است که در هر دو سناریو حدود ۴۹/۷ کیلوگرم آلودگی قبل از آغاز عملیات واکنشی مصرف می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که در زمان مؤثر واکنشی (بعد از ساعت ۱۴) مقدار تابع هدف سناریوی ۱ برابر ۵۷/۱ کیلوگرم و در سناریوی ۲ ۴۵/۷ کیلوگرم است. یعنی سناریوی ۲ مقدار تابع هدف را به مقدار ۲۰ درصد بهبود می‌بخشد. متغیرهای تصمیم محاسبه شده از این الگوریتم نیز در جداول ۴ و ۵ آمده است.

تعداد عملیات واکنشی برای سناریوی ۱ برابر ۲۷ و برای سناریوی ۲ برابر ۳۰ واکنش است. در اینجا نیز مشاهده می‌شود که در سناریوی ۲، تعداد بیشتری شیر آتش‌نشانی برای تخلیه آلودگی نسبت به سناریوی ۱ باز می‌شود. همچنین در سناریوی ۱، لوله‌های کمتری نسبت به سناریوی ۲ بسته شده و فقط یک پمپ در

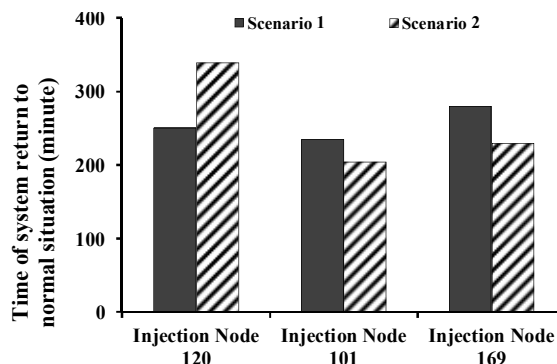


Fig. 5. Results of the objective function to minimize system return time to normal situation

شکل ۵- نتایج تابع هدف برای حداقل کردن زمان برگشت سیستم به حالت عادی

پمپ‌ها از ابتدای شروع عملیات تا پایان دوره شبیه‌سازی قابل تغییر باشد، آلودگی می‌تواند سریع‌تر و در مدت زمان کوتاه‌تری نسبت به وضعیت ثابت شیرها و پمپ‌ها تخلیه شود.

۳-۲- حداقل کردن جرم آلاینده مصرفی

در این تابع هدف، تعداد کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک برابر ۵۰، تعداد نسل‌ها برای سناریوی اول ۱۰۰ و برای سناریوی دوم ۱۵۰،

تابع هدف سناریوی ۱ در زمان مؤثر برابر با ۵۳/۱ کیلوگرم و در سناریوی ۲، برابر با ۴۵/۷ کیلوگرم است که به معنی بهبود ۱۴ درصدی تابع هدف در سناریوی ۲ است. در شکل ۶، مقدار بهینه تابع هدف حداقل کردن جرم آلاینده مصرفی به ازای سناریوهای مختلف برای نقاط تزریق آلودگی مختلف نشان داده شده است.

سناریوی ۲ روشن می‌شود و در سناریوی ۱ نیز هیچ‌کدام از پمپ‌ها روشن نمی‌شوند. زمانی که تزریق از گره شماره ۱۰۱ انجام می‌گیرد در سناریوی ۱ مقدار تابع هدف در زمان مؤثر برابر با ۴۱/۸ کیلوگرم و در سناریوی ۲، برابر با ۳۶/۹ کیلوگرم است. این به معنی بهبود ۱۲ درصدی تابع هدف است. در تزریق آلودگی از گره شماره ۱۶۹ نیز

جدول ۴- متغیرهای تصمیم نهایی وضعیت شیرهای آتش‌نشانی برای تابع هدف دوم در دو سناریوی مطرح شده (گره تزریق ۱۲۰)

Table 4. The final decision variables of the situations of hydrants for the second objective function in the two defined scenarios (injection node 120)

	ID	10	20	40	50	60	601	61	129	164	169	173
	Scenario 1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
	Scenario 2	3	5	0	7	7	0	0	0	0	7	7
	ID	179	181	183	184	187	195	204	206	208	241	249
Hydrants	Scenario 1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
	Scenario 2	1	5	5	0	7	7	3	0	3	6	5
	ID	257	259	261	263	265	267	269	271	273	275	
	Scenario 1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
	Scenario 2	0	5	3	0	3	7	0	0	0	2	

جدول ۵- متغیرهای تصمیم نهایی وضعیت شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها و وضعیت پمپ‌ها برای تابع هدف دوم در دو سناریوی مشخص شده (گره تزریق ۱۲۰)

Table 5. The final decision variables of the valves and pumps for the second objective function in the two defined scenarios (injection node 120)

	ID	105	107	111	116	123	155	173	175	177	204	
Valves	Scenario 1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	
	Scenario 2	4	0	0	0	0	2	0	1	0	0	
	ID	215	221	229	231	237	269	299	307	309	315	
	Scenario 1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	
	Scenario 2	0	0	0	7	7	3	3	0	3	0	
	ID	10	335									
Pumps	Scenario 1	0	0									
	Scenario 2	0	1									

آلودگی قرار گرفته‌اند (صرف نظر از تعداد و طول زمان آلوده شدن)، یکسان و برابر ۸ عدد آمده است. در صورتی که تعداد زمان‌هایی که گره‌ها آلوده شده‌اند نیز لحاظ شود، در زمان مؤثر (بعد از ساعت ۱۴) تابع هدف در سناریوی ۱ برابر با ۳۸۴ و سناریوی ۲ برابر با ۳۰۵ می‌شود. در اینجا بهبود تابع هدف در سناریوی ۲ به مقدار ۲۱ درصد است. تعداد عملیات واکنشی برای سناریوی ۱ برابر ۲۷ و برای سناریوی ۲ برابر ۲۶ واکنش است. در این بخش، در سناریوی ۱، شیر آتش‌نشانی بیشتری برای تخلیه آلودگی نسبت به سناریوی ۲ باز می‌شود. همچنین تعداد لوله‌هایی که در سناریوی ۲ بسته می‌شوند نسبت به سناریوی ۱ بیشتر است. در مورد وضعیت پمپ‌ها، در سناریوی ۲ روشن بودن پمپ‌ها به تخلیه آلودگی کمک می‌کند، این در حالی است که در سناریوی ۱ پمپ‌ها در تخلیه آلودگی نقشی ندارند. متغیرهای تصمیم محاسبه شده برای این تابع هدف در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است.

زمانی که تزریق از گره ۱۰۱ باشد مقدار تابع هدف در زمان مؤثر برای سناریوی ۱ برابر با ۲۸۳ و برای سناریوی ۲ برابر با ۲۶۹ می‌شود. این به معنی بهبود ۵ درصدی تابع هدف در سناریوی ۲ است. برای تزریق از گره شماره ۱۶۹ نیز در سناریوی ۱ تابع هدف در زمان مؤثر برابر با ۴۰۲ و در سناریوی ۲ برابر ۳۷۸ است. در شکل ۷، مقدار بهینه تابع هدف حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده به ازای گره‌های مختلف تزریق آلودگی برای سناریوهای گوناگون آمده است.

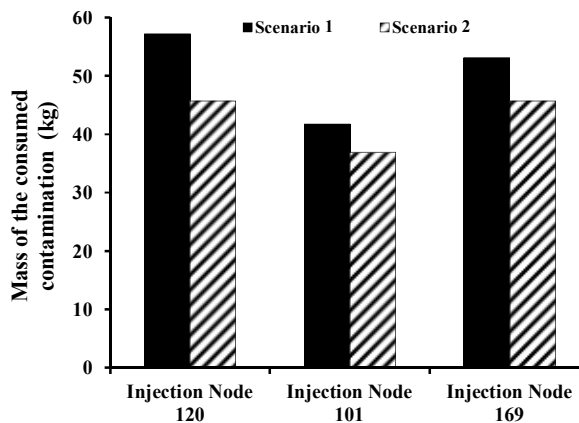


Fig. 6. Results of the objective function to minimize the mass of consumed contamination

شکل ۶- نتایج تابع هدف برای حداقل کردن جرم آلاینده مصرفی

به طور کلی می‌توان گفت در سناریوی ۲ جرم آلودگی مصرفی نسبت به سناریوی ۱ کمتر است و جمعیت کمتری از آب آلوده مصرف می‌کنند.

۳-۳- حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده

در این تابع هدف، تعداد کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک ۵۰، تعداد نسل‌های جمعیت ۱۵۰، نرخ تزویج ۰/۸ و نرخ جهش برابر ۰/۰۵ برای هر دو سناریو در نظر گرفته شد.

در تزریق از گره شماره ۱۲۰، به طور کلی می‌توان گفت که در هر دو سناریو تعداد کل گره‌های آلوده که حداقل یک بار در معرض

جدول ۶- متغیرهای تصمیم نهایی وضعیت شیرهای آتش‌نشانی برای تابع هدف سوم در دو سناریوی مطرح شده (گره تزریق ۱۲۰)

Table 6. The final decision variables of hydrants for the third objective function in two defined scenarios (injection node 120)

	ID	10	20	40	50	60	601	61	129	164	169	173
	Scenario 1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
	Scenario 2	7	0	7	7	0	0	0	4	0	2	4
	ID	179	181	183	184	187	195	204	206	208	241	249
Hydrants	Scenario 1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1
	Scenario 2	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	2
	ID	257	259	261	263	265	267	269	271	273	275	
	Scenario 1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
	Scenario 2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	

جدول ۷- متغیرهای تصمیم نهایی وضعیت شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها و وضعیت پمپ‌ها برای تابع هدف سوم در دو سناریو (گره تزریق ۱۲۰)

Table 7. The final decision variables of valves and pumps for the third objective function in two defined scenarios (injection node 120)

	ID	105	107	111	116	123	155	173	175	177	204
Valves	Scenario 1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1
	Scenario 2	6	7	6	0	7	0	4	0	2	2
	ID	215	221	229	231	237	269	299	307	309	315
	Scenario 1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1
	Scenario 2	1	0	6	0	0	0	3	0	0	0
Pumps	ID	10	335								
	Scenario 1	0	0								
	Scenario 2	7	7								

در طول دوره مدیریت باز یابی شبکه قابل تغییر باشد، مقدار بهینه تابع هدف زمان بازگشت سیستم به حالت عادی بین ۱۳ تا ۲۶/۵ درصد، مقدار بهینه تابع هدف جرم آلاینده مصرفی به مقدار ۱۲ تا ۲۰ درصد و مقدار بهینه تابع هدف حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده، بین ۶ تا ۲۱ درصد نسبت به حالتی که وضعیت شیرهای آتش‌نشانی، شیرهای قطع و وصل و پمپ‌ها ثابت است بهبود می‌یابند. بدیهی است که در سناریوهای مختلف، علاوه بر اینکه تعداد شیرهای باز و بسته با هم متفاوت است، شماره شیرها و زمان باز و بسته شدن آن نیز متفاوت است. هرچند در همه گزینه‌ها و سناریوها قید حداکثر تعداد واکنش‌های مجاز و نیز قید حداقل فشار مجاز گره‌های شبکه کنترل و رعایت شده است. بنابراین این پژوهش نشان داد که وجود تناوب در باز و بسته شدن لوله‌ها و شیرهای آتش‌نشانی و نیز در روشن یا خاموش بودن پمپ‌ها به بهبود توابع هدف تا حد قابل قبولی کمک می‌کند. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی، اثرات ناشی از وجود در شبکه در محاسبات توابع هدف لحاظ شود و از رویکرد تحلیل شبکه مبتنی بر فشار و استفاده از شبکه‌های آب‌رسانی واقعی در مقیاس بزرگ در بحث مدیریت پیامد استفاده شود.

۵- قدرتدانی

از آقای دکتر ناصر باشی‌ازغدی، آقای دکتر احسان نجفی و آقای مهندس محمدصادق خورشیدی، از بابت مساعدت در انجام این پژوهش قدرتدانی می‌شود.

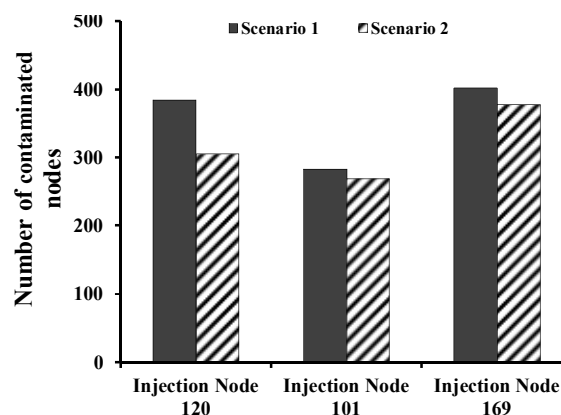


Fig. 7. Results of the objective function to minimize the polluted nodes

شکل ۷- نتایج تابع هدف برای حداقل کردن تعداد گره‌های آلوده

در اینجا مشاهده می‌شود که بهبود تابع هدف در سناریوی ۲، برابر ۶ درصد است. در اینجا هم سناریوی ۲ عملکرد بهتری نسبت به سناریوی ۱ داشته و تابع هدف را بین ۶ الی ۲۱ درصد بهبود می‌بخشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار تأثیر تناوب در باز و بسته کردن شیرهای تخلیه، شیرهای باز و بسته کردن لوله‌ها و نیز خاموش یا روشن بودن پمپ‌ها در توابع هدف مختلف برای حل مسئله مدیریت پیامد آلودگی شیمیایی در شبکه‌های آب شهری بررسی شد. نتایج نشان داد وقتی وضعیت باز و بسته شدن شیرها و پمپ‌ها

References

- Afshar, A., & Najafi, E. 2014. Consequence management of chemical intrusion in water distribution networks under inexact scenarios. *Journal of Hydroinformatics*, 16(1), 178-188.
- Alfonso, L., Jonoski, A. & Solomatine, D. 2010. Multiobjective optimization of operational responses for contaminant flushing in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 48-58.
- Baranowski, T. M. & LeBoeuf, E. J. 2008. Consequence management utilizing optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4), 386-394.
- Bashi-Azghadi, S. N., Afshar, M. H. & Afshar A. 2017. Multi-objective optimization response modeling to contaminated water distribution networks: pressure driven versus demand driven analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 21(6), 2085-2096.
- Bashi-Azghadi, S. N., Afshar, A. & Afshar, M. H. 2018. Multi-period response management to contaminated water distribution networks: dynamic programming versus genetic algorithms. *Engineering Optimization*, 50(3), 415-429.
- Deuerlein, J., Simpson, A. R. & Korth, A. 2014. Flushing planner: a tool for planning and optimization of unidirectional flushing. *Procedia Engineering*, 70, 497-506.
- Islamic Republic of Iran Voice Presidency for Strategic Planning and Supervision (IRIVSPSPS). 2013. *Guidelines for design of urban and rural water supply and distribution systems, Report No. 117-3 (First- Revision)*, Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision Press. (In Persian)
- Miri, S. M & Afshar, A. 2014. Optimum layout for sensors in water distribution networks through ant colony algorithm: a dual use vision. *Journal of Water and Wastewater*, 25(3), 67-75 (In Persian).
- Najafi, E., & Afshar, A. 2013. Consequences management of chemical intrusions in urban water distribution networks using the ant colony optimization algorithm. *Journal of Water and Wastewater*, 26(2), 82-94 (In Persian).
- Poulin, A., Mailhot, A., Grondin, P., Delorme, L., Periche, N. & Villeneuve, J. P. 2008. Heuristic approach for operational response to drinking water contamination. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(5), 457-465.
- Preis, A. & Ostfeld, A. 2008. Multiobjective contaminant response modeling for water distribution systems security. *Journal of Hydroinformatics*, 10(4), 267-274.
- Rasekh, A., & Brumbelow, K. 2015. A dynamic simulation–optimization model for adaptive management of urban water distribution system contamination threats. *Applied Soft Computing*, 32, 59-71.
- Salomons, E. & Ostfeld, A. 2016. Slug feed optimal disinfection of water distribution networks following a contamination event. *In World Environmental and Water Resources Congress*, 516-522.
- Shafiee, M. E. & Berglund, E. Z. 2015. Real-time guidance for hydrant flushing using sensor-hydrant decision trees. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(6), 04014079.
- Shafiee, M. E. & Berglund, E. Z. 2017. Complex adaptive systems framework to simulate the performance of hydrant flushing rules and broadcasts during a water distribution system contamination event. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(4), 04017001.
- USEPA, 2004, Response protocol toolbox–public health response guide, Module 5. http://www.epa.gov/watersecurity/pubs/guide_response_module5.pdf.
- Zafari, M., Tabesh, M. & Nazif, S. 2017. Minimizing the adverse effects of contaminant propagation in water distribution networks considering the pressure-driven analysis method. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(12), 04017072.
- Zechman, E. M. 2011. Agent-based modeling to simulate contamination events and evaluate threat management strategies in water distribution systems. *Risk Analysis: An International Journal*, 31(5), 758-772.