نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۸، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۵۹۳ تا ۳۶۰۴
DOI: 10.22060/ceej.2020.18055.6750

کاربرد الگوریتم ژنتیک بر مبنای آرشیو در مدیریت پیامد ورود بار آلودگی ناگهانی در شبکه‌های توزیع آب شهری

فریبرز معصومی[1*]، سید ناصر باشی ازغدی[2]، عباس افشار[3]

[1] دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
[2] دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، موسسه آموزش عالی خاوران، تهران، ایران.
[3] دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

خلاصه: در این تحقیق برای نخستین بار بهینه سازی فعالیت های مدیریت پیامد در شبکه توزیع آب شهری با رویکرد کاهش زمان بهینه‌سازی و مبتنی بر ظرفیت آرشیو مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق از روش تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای مدیریت پیامد و از مدل شبیه‌سازی EPANET و الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II بر مبنای آرشیو استفاده شده است. دو تابع هدف به ترتیب به منظور حداقل کردن تعداد فعالیت‌های واکنشی (کاهش هزینه‌ها) و حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده توسعه داده شده است. تعداد ۲۰ شیر قطع و وصل و ۳۱ شیر آتش‌نشانی به ترتیب برای ایزوله کردن شبکه و تخلیه آلودگی در نظر گرفته شده است. بدون انجام برنامه مدیریت پیامد، در صورت بروز آلودگی در شبکه مقدار کل جرم آلودگی مصرف شده ۸۱/۳ کیلوگرم خواهد بود. با استفاده از ۱۵ فعالیت واکنشی جرم آلودگی مصرف شده به ۶۰/۶ کیلوگرم رسیده است. برای استخراج فعالیت‌های بهینه بین این اهداف با NSGA-II رایج و حداکثر ۱۵ فعالیت در حدود ۷۳ دقیقه زمان نیاز است. به منظور کاهش این زمان و فراهم آوردن امکان انجام مدیریت پیامد در زمان واقعی از الگوریتم NSGA-II بر مبنای آرشیو نیز استفاده شده است. با استفاده از ظرفیت آرشیو، امکان عدم اجرای مدل شبیه‌سازی برای کروموزوم‌های مشابه فراهم می‌گردد. رویکرد پیشنهادی برای ظرفیت آرشیو با تعداد صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ نشان می دهد که به طور کلی با افزایش جمعیت آرشیو از صفر به ۵۰۰۰، زمان استخراج منحنی تعامل بین اهداف از ۷۳ به ۳۵ دقیقه کاهش می‌یابد که حاکی از کاهش بیش از ۵۰ درصدی است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت انتخاب مقدار کوچکی برای ظرفیت آرشیو، به عنوان مثال، تعداد ۵۰ یا ۱۰۰، زمان مورد نیاز برای استخراج فعالیت‌های بهینه اندکی نسبت به حالت مبنا افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که در صورت انتخاب مقدار کوچکی برای ظرفیت آرشیو، بخشی از زمان اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی صرف پیدا کردن کروموزوم‌های مشابه خواهد شد و با توجه به ظرفیت کم آرشیو، افزایش زمان مورد نیاز برای استخراج کروموزوم‌های مشابه بیشتر از تأثیر کاهش زمان استفاده از ظرفیت آرشیو است. بر این اساس، با استفاده از ظرفیت آرشیو، امکان کاهش زمان بهینه‌سازی و مدیریت پیامد در شبکه در زمان واقعی فراهم می‌گردد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:
مدیریت پیامد
شبکه آب شهری
شبیه‌سازی- بهینه‌سازی
ظرفیت آرشیو

۱- مقدمه

حفظ و بقای زیرساخت‌های[1] مهم کشور و فراهم آوردن امکان بهره‌برداری مناسب از آن‌ها در شرایط وقوع بحران، بسیار مهم و حائز اهمیت است. یکی از وجوه این اهمیت در مورد شبکه‌های آبرسانی شهری به شکل چشمگیری نمایان می‌گردد. امروزه آبرسانی مناسب و بی‌وقفه به دلیل وابستگی حیات در بخش‌های مختلف به آب یکی از مهم‌ترین اولویت‌های هر کشوری است. از طرف دیگر، کنترل کیفیت آب آشامیدنی و حفظ سلامت شهروندان نیز بسیار مهم بوده؛ به‌طوری‌که در دستور کار تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان این امر در سراسر جهان قرار گرفته است. بدیهی است که نگهداری و

1 Infrastructure

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f_masoumi@uma.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

حفظ امنیت این زیرساخت‌ها در برابر آسیب‌های عمدی یا تصادفی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه ایمن کردن شبکه‌های آب شهری پس از وقوع رخداد آلودگی صورت گرفته است که تعیین موقعیت بهینه ایستگاه‌های پایش شبکه توزیع، تعیین محل بروز آلودگی و نحوه مدیریت پیامد آن از مهم‌ترین جنبه‌های تحقیقاتی به شمار می‌آیند. مدیریت پیامد بحران ایجاد شده و اتخاذ بهترین تصمیم برای جلوگیری از گسترش آلودگی و تخلیه آن از شبکه، مسأله بسیار مهمی است که می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای از کار انداختن کل شبکه (به عنوان یک راه‌حل بسیار محافظه‌کارانه) باشد. اداره حفاظت از محیط زیست ایالات متحده[1] (۲۰۰۴) توصیه‌هایی را برای حداقل کردن خطرات ناشی از تهدیدات ناشی از بروز آلودگی در شبکه آب شهری را طی یک پروتکل ارائه داده است. توصیه‌های عمومی این پروتکل[2] بعد از تشخیص آلودگی و محل وقوع آن شامل (الف) اعلام خطر و اطلاع‌رسانی به عموم مردم، (ب) ایزوله کردن ناحیه آلوده شده در شبکه، (ج) تخلیه آلودگی از شبکه و (د) ترکیبی از سه مورد قبل است [۱]. در حقیقت تمامی مراحل مقابله با این پدیده شامل جانمایی بهینه ایستگاه‌های پایش و شناسایی مشخصات منبع آلاینده در نهایت بایستی منجر به یکسری راهکارهای اجرایی شوند تا در کوتاه‌ترین زمان ممکن و کمترین هزینه و همچنین کمترین افراد تحت تأثیر از آلودگی، شبکه بازیابی شده و امکان استفاده مجدد از آن فراهم آید. در این تحقیق فرض بر این است که تشخیص و تأیید وجود آلودگی به همراه شناسایی مشخصات منبع آلودگی در شبکه صورت گرفته است و حال بایستی اقدامات مورد نیاز برای مدیریت پیامدهای آلودگی شامل ایزوله[3] کردن آلودگی با استفاده از شیرهای[4] قطع و وصل و تخلیه آن با استفاده از شیرهای آتش‌نشانی[5] در شبکه در کمترین زمان مشخص و اجرا گردد. هدف از این تحقیق استخراج فعالیت‌های بهره‌برداری (مدیریت پیامد) بهینه در شبکه توزیع آب شهری با رویکرد کاهش زمان بهینه‌سازی است. بر این اساس استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه بر مبنای آرشیو[6] در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.

مدیریت پیامد به عنوان یک ابزار مؤثر جهت حفاظت از سلامت مردم، بازیابی خدمات اساسی دولتی و فراهم آوردن کمک‌های اضطراری به دولت‌ها، شرکت‌ها، موسسات و افراد پس از رخداد آلودگی مطرح است. در این تحقیق منظور از آلودگی هر گونه آلودگی شیمیایی، بیولوژیکی و رادیولوژیکی است که اثرات نامطلوبی بر سلامت عمومی و پیرامون آن داشته باشد. حادثه خرابکارانه نیز یک فعالیت نامطلوب یا خطرناک بر زندگی مردم و در نقض با قوانین جنایی هر کشور است که با اهداف سیاسی یا اجتماعی، دولت یا مردم غیرنظامی را ارعاب یا اعمال فشار می‌نماید [۱]. در راستای مطالب فوق، پیشینه انجام مطالعات در زمینه مدیریت پیامد در شبکه‌های توزیع آب شهری به حدود یک دهه قبل باز می‌گردد. از این رو، مطالعات انجام شده در این زمینه بسیار جدید و البته محدود است.

بارانوفسکی و لبوف [۲]، از سه روش بهینه‌سازی الف) روش اعتمادپذیری مرتبه اول غیرمقید[7]، ب) روش اعتمادپذیری مرتبه اول مقید[8] و ج) تخمین پارامتر[9] برای یافتن بهترین تقاضا[10] در گره‌ها به منظور کاهش غلظت آلودگی در شبکه استفاده کردند. در این تحقیق، کمترین مقدار تقاضا در گره‌ها بعد از تشخیص آلودگی توسط اولین سنسور در گام‌های زمانی ۵ دقیقه با استفاده از این سه روش بهینه‌سازی به منظور کمینه کردن گسترش آلودگی در شبکه محاسبه می‌شود. همچنین همین محققان در تحقیق دیگری [۳]، با استفاده از ابزار بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به بررسی مدیریت پیامد پس از تشخیص آلودگی با هدف کاهش غلظت آلودگی در شبکه، به نحوی که کمترین هزینه ناشی از تغییر نیاز نیز تأمین گردد، پرداختند. پریس و استفلد [۴] در تحقیقی به بررسی یافتن بهترین اقدامات واکنشی پس از تشخیص آلودگی در شبکه به نحوی که اهداف ناسازگار (الف) کمینه کردن جرم آلاینده مصرف شده پس از تشخیص آلودگی در شبکه و (ب) کمینه کردن تعداد اعزام تیم‌های واکنشی را برآورده کند، پرداختند. آن‌ها برای حل این مسأله بهینه‌سازی دو هدفه، از الگوریتم ژنتیک NSGA-II[11] استفاده کردند. آلفونسو و همکاران [۵] به بررسی یافتن مؤثرترین تصمیمات برای کمینه کردن اثر آلودگی بر مردم پرداختند. بر اساس این مطالعه،

1 United States Environmental Protection Agency (USEPA)
2 Protocol
3 Isolation
4 Valve
5 Hydrant
6 Archive Based

7 Unconstrained First-Order Reliability Method (FORM)
8 Constrained First-Order Reliability Method
9 Parameter Estimation (PEST)
10 Demand
11 Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm- II (NSGA-II)

مسأله واکنش به رخداد آلودگی در شبکه شامل دو گام اساسی (الف) شناسایی مشخصات منبع آلاینده و (ب) تعیین بهترین سیاست بهره‌برداری از شبکه در جهت کاهش انتشار آلودگی است. راسخ و برامبلو [۶] استفاده از یک مدل پشتیبان تصمیم‌گیری[1] دینامیک برای شبیه‌سازی اقدامات واکنشی و ارائه بهترین اقدام واکنشی را توسعه دادند. مکانیزم بازخورد بین شبکه آلوده شده، تصمیم‌گیران و مصرف‌کنندگان در یک مدل شبیه‌سازی دینامیک در این تحقیق تلفیق شده است. در تحقیقی دیگر راسخ و همکاران [۷] عملکرد یک فعالیت واکنشی جدید، تزریق رنگ خوراکی[2] در شبکه آب شرب، برای حداقل کردن خطرات آلودگی را بررسی کردند. تزریق رنگ به عنوان یک مکانیزم هشدار دهنده برای جلوگیری از مصرف عمومی آبی که احتمال آلوده شدن را دارد عمل می‌کند.

سالمونس و استفلد [۸] برنامه بهینه بهره‌برداری از سیستم گندزدایی لخته‌ای[3] را به منظور مدیریت پیامد بروز آلودگی در شبکه آب شهری با در نظر گرفتن محل، زمان و نرخ تزریق ارائه کردند. روش پیشنهادی در این مقاله از دو گام مبتنی بر استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی EPANET و بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک تشکیل شده است. تائورمینا و همکاران [۹] ایده مطرح شده در مقاله قبلی خود را توسعه داده و نشان دادند که پاسخ هیدرولیکی شبکه به حمله فیزیکی-سایبری نه تنها به مشخصات حمله، بلکه به شرایط اولیه و نیاز گره‌ها وابسته است. همچنین مشخص گردید که پاسخ‌های هیدرولیکی مشابهی می‌تواند با حملات کاملاً متفاوتی بدست آید. این موضوع یافته بسیار مهمی است که در تشخیص مکانیزم‌های حمله و شناسایی رفتار غیرمتشابه شبکه بایستی مورد توجه قرار گیرد.

باشی ازغدی و همکاران [۱۰] در مدیریت پیامد در شبکه آب شهری دو رویکرد مبتنی بر تامین نیاز[4] و مبتنی بر تامین فشار[5] را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که رویکرد مبتنی بر تامین فشار در هنگام استفاده از شیرهای قطع و وصل و شیرهای آتش نشانی به عنوان فعالیت‌های واکنشی به دلیل ایجاد فشار منفی در شبکه، ترسیم واقعی‌تری از وضعیت آن را در مقایسه با رویکرد مبتنی بر تامین نیاز در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد.

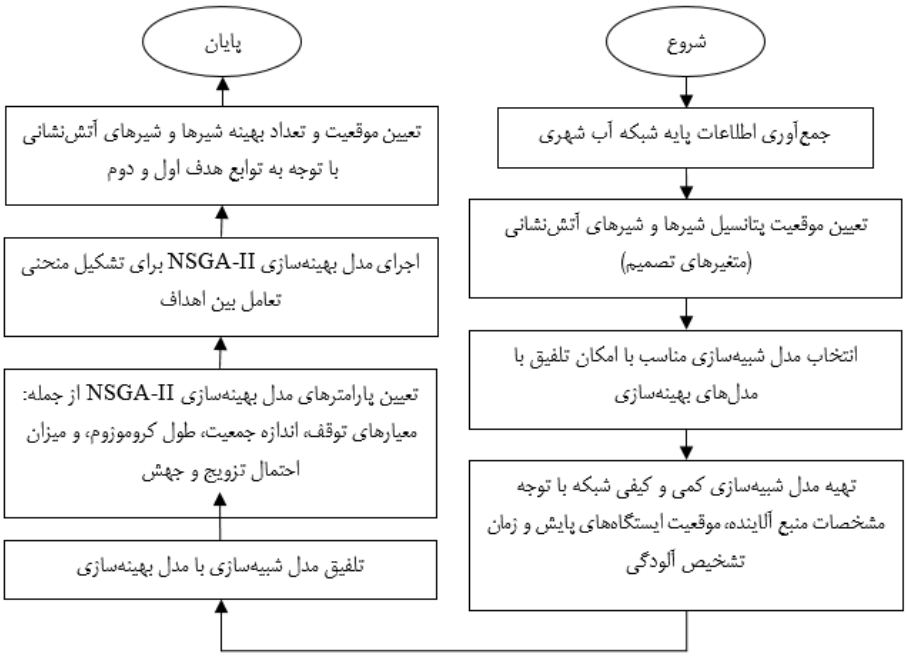
ظفری و همکاران [۱۱] به مطالعه ورود بار آلودگی به شبکه توزیع آب شهری در دو حالت مختلف پرداختند. در حالت اول، آلودگی غیرخطرناک و در حالت دوم، آلودگی خطرناک بکار گرفته شد. برای حالت اول، تابع هدف چندهدفه و برای حالت دوم، تابع هدف تک‌هدفه تعریف شد و شبکه با استفاده از رویکرد تحلیل فشار (PDA) شبیه سازی و با PSO بهینه سازی گردید.

خاکسار و همکاران [۱۲] به ارائه یک مدل پویای جدید برای خروج بار آلودگی از شبکه توزیع آب شهری پرداختند. در مدل ارائه شده، شیرهای آتش نشانی که برای خروج بار آلودگی مورد استفاده قرار می گیرند، به تناوب قابل باز و بسته شدن هستند. نتایج بهبود قابل ملاحظه ای را در وضعیت تابع هدف نشان داد.

استریکلینگ و همکاران [۱۳] در یک مطالعه جامع به مدیریت جامع پیامد ورود آلودگی در شبکه توزیع آب شهری پرداختند و استراتژی هایی را جهت لحاظ کردن اثرات هشدار به مصرف کنندگان تدوین و بکار گرفتند. در مطالعه آنها مدل هیدرولیکی شبکه توزیع، یک مدل عامل بنیان و یک سیستم هشدار اضطراری بی سیم بکار گرفته شد.

یکی از موضوعات مهم مورد توجه تصمیم‌گیران و ذی‌نفعان شبکه آب شهری، کاهش زمان پاسخ به رخداد آلودگی و به بیان دیگر مشخص کردن فعالیت‌های واکنشی بهینه در کمترین زمان ممکن است. موضوعی که در تحقیقات پیشین مرتبط با مدیریت پیامد آلودگی در شبکه‌های توزیع آب شهری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، در این تحقیق استفاده از الگوریتم ژنتیک بر مبنای آرشیو به منظور کاهش زمان مورد نیاز برای استخراج فعالیت‌های واکنشی بهینه مدنظر است. بررسی پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم ژنتیک بر مبنای آرشیو در سایر موضوعات مهندسی آب کاربرد فراوانی داشته است. به عنوان مثال، می‌توان به تحقیقات نوولس و کورن [۱۴, ۱۵] و فیلسند و همکاران [۱۶] اشاره داشت که بر مبنای آرشیو به بهبود عملکرد بهینه‌سازی پرداختند. ناولس و کورن [۱۵] از سه روش مختلف برای آرشیو جمعیت جبهه پرتو[6] و شش تابع هدف مختلف برای ارزیابی روش‌های پیشنهادی استفاده کردند. تیواری [۱۷] استفاده از جمعیت آرشیو در الگوریتم ژنتیک را برای مسائل چندهدفه بهینه‌سازی مطرح کرد. در تحقیقی

1 Decision support model
2 Food-grade dye
3 Slug disinfection
4 Demand Driven Analysis (DDA)
5 Pressure Driven Analysis (PDA)
6 Pareto Front



شکل ۱. ساختار رویکرد پیشنهادی در مدیریت پیامد

Fig. 1. The proposed approach structure in the management of the consequence

دیگر نیز تیواری و همکاران [۱۸] ایده مطرح شده را برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه مقید توسعه دادند. این روش مبتنی بر کاهش فضای جستجوی مطلوب استوار است و نتایج نشان از قابلیت مناسب این روش در بهبود جستجوی الگوریتم بهینه‌سازی دارد.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که مطالعات مختلفی در خصوص استخراج فعالیت‌های بهینه مدیریت پیامد در شبکه‌های توزیع آب شهری صورت گرفته است؛ ولی تاکنون کاهش زمان استخراج این فعالیت‌های بهینه با استفاده از ظرفیت آرشیو کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، استفاده از الگوریتم ژنتیک بر مبنای آرشیو به منظور کاهش زمان استخراج فعالیت‌های بهینه مدیریت پیامد نوآوری اصلی این تحقیق محسوب می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نرم‌افزار EPANET و فایل کتابخانه‌ای آن در برنامه متلب به عنوان مدل شبیه‌سازی کمی و کیفی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه بر مبنای آرشیو به عنوان مدل بهینه‌سازی و مثال شماره ۳ نرم‌افزار EPANET به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. هر یک از بخش‌های مورد استفاده در این تحقیق پس از ارائه روش حل مسأله به اجمال در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور بازیابی شبکه آب شهری پس از انجام عملیات خرابکارانه و رخداد آلودگی (مدیریت پیامد) لازم است اقدامات واکنشی مناسبی صورت گیرد تا امکان استفاده مجدد سیستم برای مصرف‌کنندگان فراهم آید. روش شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در انتخاب فعالیت‌های واکنشی بهینه یکی از پرکاربردترین رویکردها در مدیریت پیامد در شبکه‌های آب شهری است. در این تحقیق فعالیت‌های واکنشی بهینه از بین محل‌های پتانسیل[1] شیرهای قطع و وصل و شیرهای آتش‌نشانی به ترتیب به منظور ایزوله کردن آلودگی (جلوگیری از گسترش آن) و تخلیه آن از شبکه انتخاب می‌شود. ساختار الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، این رویکرد متشکل از تلفیق مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II با مدل شبیه‌سازی EPANET است. در این رویکرد مطابق با شکل ۱، ابتدا اطلاعات مورد نیاز شبکه شامل وضعیت توپولوژی[2] شبکه، الگوی مصرف و نقاط پتانسیل شیرهای قطع و وصل و شیرهای آتش‌نشانی شناسایی می‌گردد. پس از آن ویژگی‌های منبع آلاینده مشخص معرفی و وارد مدل شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه مدل شبیه‌سازی EPANET به منظور تحلیل هیدرولیکی شبکه در

1 Potential locations
2 Topology

هنگام مدیریت پیامد تهیه می‌گردد. حال پارامترهای مدل بهینه‌سازی NSGA-II مانند اندازه جمعیت، طول کروموزوم، تعداد تکرارها و میزان احتمال تزویج و جهش، مشخص و پس از اجرای مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی نتایج به صورت منحنی تعامل بین اهداف مختلف ارائه می‌گردد. متغیرهای تصمیم در این مسأله موقعیت بهینه شیرهای قطع و وصل به منظور ایزوله کردن آلودگی و جلوگیری از گسترش آن و همچنین موقعیت بهینه شیرهای آتش‌نشانی به منظور تخلیه آلودگی از شبکه است. با استفاده از منحنی تعامل بهینه بدست آمده بین اهداف مختلف می‌توان تعداد مناسب فعالیت‌های واکنشی را با توجه به مقادیر مطلوب تصمیم‌گیرندگان از منظر مقادیر جرم آلودگی مصرف شده پس از شروع مدیریت پیامد تعیین کرد.

۱-۲- توابع هدف

در این تحقیق، اهداف مورد استفاده شامل (الف) حداقل کردن تعداد فعالیت‌های واکنشی و (ب) حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است.

الف) حداقل کردن تعداد فعالیت‌های واکنشی ($Z1$)

تابع هدف اول، $Z1$، مطابق با رابطه (۱) تعداد کل فعالیت‌های واکنشی است که پس از آلوده شدن شبکه به منظور ایزوله کردن و تخلیه آب آلوده از سیستم صورت می‌گیرد. این عملیات‌ها شامل شیرها و شیرهای آتش نشانی موجود در شبکه هستند که به ترتیب بسته یا باز می‌شوند.

$$Z1 = \sum_{i=1}^{V} VA_i + \sum_{j=1}^{H} HY_j \qquad (۱)$$

که در آن، i شمارنده شیر قطع و وصل، VA_i، iامین شیر قطع و وصل، V تعداد کل شیرهای قطع و وصل، j شمارنده شیر آتش‌نشانی، HY_j، jامین شیر آتش‌نشانی، H تعداد کل شیرهای آتش‌نشانی در شبکه است. VA_i و HY_j متغیرهای تصمیم دودوئی[1] هستند که می‌توانند صفر یا یک باشند. اگر VA_i برابر یک باشد، این بدان معناست که حالت بهره‌برداری آن شیر قطع و وصل در طی دوره مدیریت پیامد به منظور ایزوله کردن بخشی از شبکه کمک می‌نماید؛ در غیراین‌صورت به همان حالت عادی (باز) می‌ماند. به همین ترتیب برای HY_j، اگر مقدار آن برابر با یک باشد، حالت بهره‌برداری آن شیر آتش‌نشانی در شبکه به منظور تخلیه آلودگی از شبکه اصلاح می‌شود؛ در غیراین‌صورت به همان حالت اولیه (بسته) باقی می‌ماند.

ب) حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده ($Z2$)

تابع هدف دوم، $Z2$، مطابق رابطه (۲) میزان جرم آلودگی مصرف شده توسط مصرف‌کنندگان را بعد از تشخیص آلودگی نشان می‌دهد.

$$Z2 = \sum_{k=1}^{N} \sum_{t=td}^{EPS} C_{kt} \times V_{kt} \qquad (۲)$$

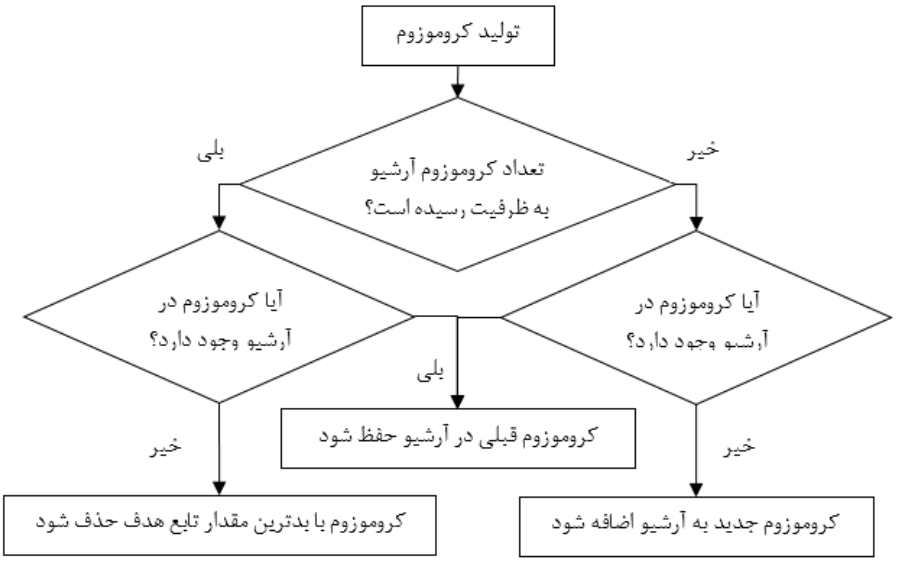
که در این رابطه، $Z2$ جرم آلاینده مصرف شده، k نشانگر گره، N تعداد کل گره‌های مصرف کننده[2]، t نشانگر زمان و td مدت زمان سپری شده پس از زمان تشخیص آلودگی در شبکه تا EPS، مدت کل زمان شبیه‌سازی است. C_{kt} غلظت آلاینده در گره k در زمان t و V_{kt} حجم آب آلوده مصرف شده در گره k در زمان t است.

۲-۲- نرم‌افزار EPANET

مدل های شبیه‌سازی شبکه آب شهری مدل هایی هستند که رفتار هیدرولیکی و کیفی آب در لوله‌های تحت فشار را در بازه‌های زمانی مختلف شبیه‌سازی می‌کنند. شکل کلی همه مدل های شبیه‌سازی رایج هیدرولیکی و کیفی آب عمدتاً یکسان بوده و همه آن ها دارای مجموعه‌ای از معادلاتی هستند که باید با توجه به شرایط اولیه، شرایط مرزی و شرایط هیدرولیکی در گام‌های زمانی مختلف حل شود. EPANET یکی از مدل‌های مشهور شبیه‌سازی کمی و کیفی آب در شبکه‌های توزیع آب شهری است. این نرم افزار توسط دپارتمان[3] منابع آب و آزمایشگاه تحقیقاتی مطالعات ریسک سازمان حفاظت محیط زیست امریکا توسعه داده شده است و بطور گسترده ای در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه از نسخه EPANET 2.0 این نرم‌افزار استفاده شده است. همچنین به علت نیاز به اجراهای مکرر این مدل در تلفیق با مدل بهینه‌سازی، از بسته جانبی آن تحت عنوان EPANET Toolkit در تلفیق با زبان برنامه‌نویسی متلب نسخه

1 Binary

2 Consumer Nodes
3 Department



شکل ۲. ساختار الگوریتم ژنتیک بر مبنای آرشیو

Fig. 2. Structure of Achieve-Based Genetic Algorithm

R2012b استفاده شده است.

در این تحقیق از روش مبتنی بر تأمین نیاز برای تحلیل هیدرولیکی شبکه استفاده شده است و بر همین اساس فرض شده است که نیاز در تمامی گره‌ها تأمین خواهد شد. روابط اُفت هد در شبکه تحت آنالیز هیزن- ویلیامز[1]، مدت شبیه‌سازی ۲۴ ساعت، گام زمانی هیدرولیکی ۱ ساعت و گام زمانی کیفی پنج دقیقه در نظر گرفته شده است. همچنین فرض گردیده است که ماده شیمیایی مورد استفاده پایستار بوده و با آب و جداره لوله واکنش نمی‌دهد. مقدار پیش‌فرض برای پارامترهای مختلف مانند Accuracy، CHECKFREQ، MAXCHECK و DAMPLIMIT به ترتیب برابر با ۰/۱۰۰، ۲، ۱۰ و صفر در نظر گرفته شده است [۱۹].

۳-۲- الگوریتم ژنتیک بر مبنای آرشیو

الگوریتم ژنیتک یک روش جذاب و مورد توجه در مسائل بهینه‌سازی مدیریت کیفی منابع آب است که البته در مسائل مدیریت پیامد در شبکه‌های توزیع آب شهری نیز بیشترین کاربرد را داشته است [۲۰]. ساختار الگوریتم ژنتیک چندهدفه بر مبنای آرشیو که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است، در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، ابتدا یک آرشیو با ظرفیتی مشخص برای ذخیره کروموزوم‌های[2] مختلف تهیه می‌شود. سپس با توجه به تولید هر کروموزوم جدید در الگوریتم ژنتیک چندهدفه در هر نسل[3] در صورتی که ظرفیت آرشیو به حداکثر مقدار خود نرسیده باشد و این کروموزوم جدید نیز قبلاً در آرشیو وجود نداشته باشد، به آرشیو اضافه خواهد شد و اگر در آرشیو وجود داشته باشد، کروموزوم قبلی در آرشیو حفظ خواهد شد. همچنین در صورتی که آرشیو به حداکثر ظرفیت خود رسیده باشد و کروموزوم جدید نیز در آرشیو وجود نداشته باشد، کروموزوم با بدترین مقدار تابع هدف حذف خواهد شد. راهکارهای در نظر گرفته فوق باعث می‌شود که آرشیو دارای کروموزوم‌های منحصر بفرد و مناسب از منظر تابع هدف باشد.

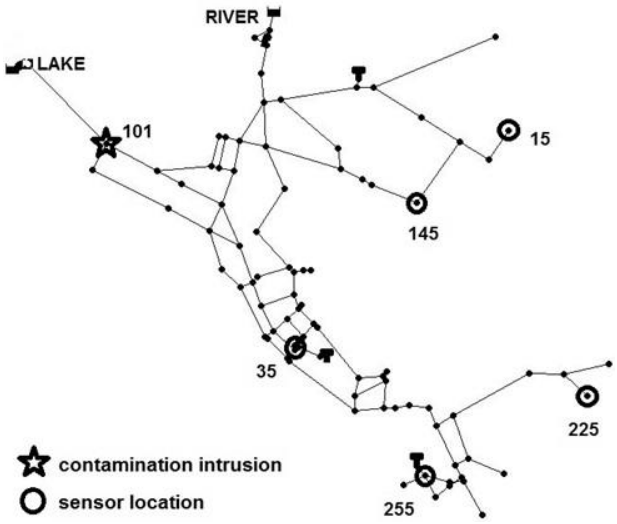
۴-۲- مطالعه موردی

مثال شماره ۳ نرم‌افزار EPANET در بسیاری از مطالعات انجام شده در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است. این شبکه دارای ۹۲ گره، ۱۱۷ لوله، سه تانک ذخیره، دو پمپ، و دو مخزن شامل یک دریاچه و یک رودخانه است (شکل ۳). در این شبکه فرض بر این است که آلودگی به صورت عمدی در ساعت هشت از گره ۱۰۱ تزریق و تا شش ساعت نیز ادامه می‌یابد.

بر اساس روش پیشنهاد شده توسط استفلد و سالومونز [۲۱]

1 Hazen-Williams

2 Chromosomes
3 Generation



شکل ۳. مطالعه موردی، مثال شماره ۳ نرم‌افزار EPANET

Fig. 3. Case Study, Example 3 EPANET Software

جدول ۱. موقعیت شیرهای قطع و وصل لوله ها و شیرهای پتانسیل آتش‌نشانی در مساله مدیریت پیامد

Table 1. Location of Potential Valves and Hydrants in Consequence Management Problem

موقعیت شیرهای قطع و وصل لوله‌ها	موقعیت شیرهای پتانسیل آتش‌نشانی
۱۰۵، ۱۰۷، ۱۱۱، ۱۱۶، ۱۲۳، ۱۵۵، ۱۷۳، ۱۷۵، ۱۷۷، ۲۰۴، ۲۱۵، ۲۲۱، ۲۲۹، ۲۳۱، ۲۳۷، ۲۶۹، ۳۰۱، ۳۰۹، ۳۱۱، ۳۱۷	۴۰، ۵۰، ۶۰، ۶۰۱، ۶۱، ۱۲۰، ۱۲۹، ۱۶۴، ۱۶۹، ۱۷۳، ۱۷۹، ۱۸۱، ۱۸۳، ۱۸۴، ۱۸۷، ۱۹۵، ۲۰۴، ۲۰۶، ۲۰۸، ۲۴۱، ۲۴۹، ۲۵۷، ۲۵۹، ۲۶۱، ۲۶۳، ۲۶۵، ۲۶۷، ۲۶۹، ۲۷۱، ۲۷۳، ۲۷۵

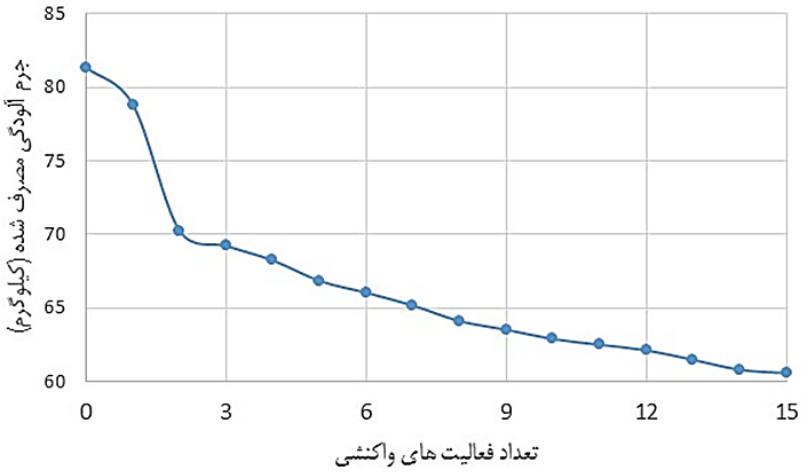
پنج سنسور در گره‌های ۱۵، ۳۵، ۱۴۵، ۲۲۵ و ۲۵۵ برای تشخیص آلودگی مبتنی بر حداکثر کردن درست‌نمایی[1] تشخیص مکانیابی شده است. با استفاده از این روش، سنسور مستقر در گره ۳۵ آلودگی را در ساعت ۱۰:۵۵ تشخیص می‌دهد. در این شبکه فرض بر این است که در حدود یک ساعت زمان برای تشخیص محل بروز آلودگی و شروع فعالیت‌های واکنشی نیاز است. بدین ترتیب اقدامات واکنشی از ساعت ۱۲ شروع و تا انتهای بازه شبیه‌سازی زمانی (ساعت ۲۴) ادامه خواهد داشت.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به منظور تعیین سیاست‌های بهینه مدیریت پیامد در شبکه‌های توزیع آب شهری پس از رخداد آلودگی استفاده شده است. از مدل شبیه‌سازی EPANET به منظور شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی جریان در شبکه توزیع آب شهری و از قابلیت الگوریتم چندهدفه NSGA-II بر مبنای آرشیو به عنوان ابزاری کارآمد در حل مسأله بهینه‌سازی استفاده شده است. پس از تشخیص آلودگی، یک ساعت زمان برای تعیین فعالیت‌های واکنشی بهینه و اعزام تیم‌های واکنشی در نظر گرفته شده است. بنابراین، فعالیت‌های واکنشی بهینه شامل بستن شیرهای قطع و وصل و باز کردن شیرهای آتش‌نشانی از ساعت ۱۲ شروع می‌شود. در این رویکرد فرض بر این است که فعالیت‌های واکنشی بهینه از ابتدا تا انتهای دوره مدیریت پیامد ثابت هستند و تغییر نمی‌کنند. تعداد ۲۰ شیر قطع و وصل و ۳۱ شیر آتش‌نشانی به ترتیب برای ایزوله کردن شبکه و تخلیه آلودگی در نظر گرفته شده است که موقعیت آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

از این رو مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II دارای متغیرهای تصمیم دودویی است و تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با تعداد کل شیرهای قطع و وصل و شیرهای آتش‌نشانی پتانسیل در شبکه است. با استفاده از منحنی تعامل بدست آمده بین اهداف می‌توان تعداد

1 Likelihood

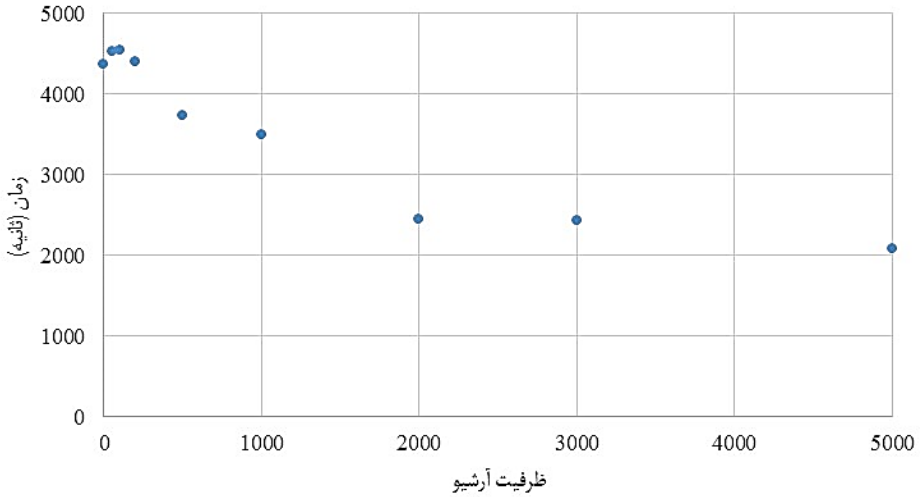


شکل ۴. منحنی تعامل بین اهداف مختلف مدیریت پیامد

Fig. 4. The Curve of Interaction between the Various Goals of Consequence Management

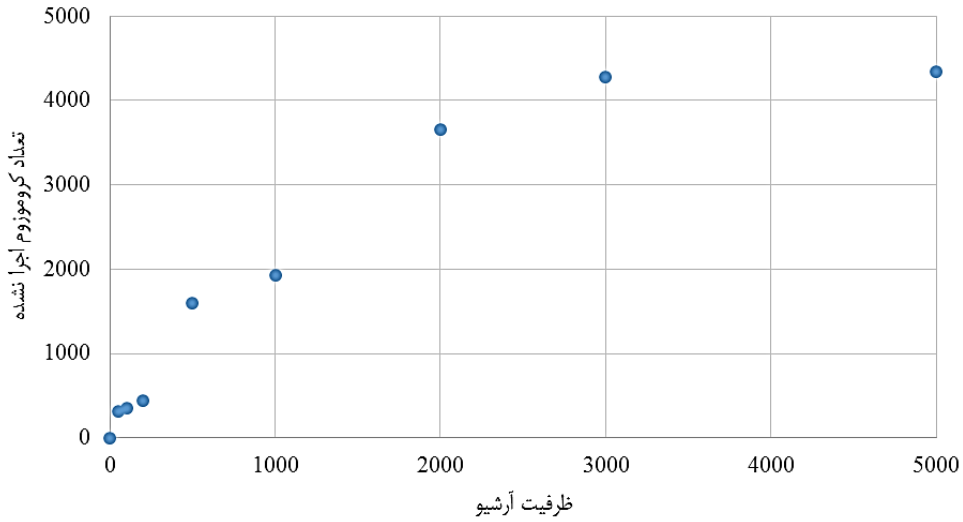
مناسبی از فعالیت‌های واکنشی (Z_1) را با توجه به مقدار مطلوب برای حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده (Z_2) بدست آورد. در این تحقیق حداکثر ۱۵ تیم واکنشی برای مدیریت پیامد در نظر گرفته شده است. تنظیم پارامترهای مدل بهینه‌سازی با استفاده از آنالیز حساسیت صورت گرفته است و بر اساس آن مقادیر بهینه بدست آمده است. جمعیت مدل NSGA-II شامل ۵۰ کروموزوم است و اجرای آن زمانی متوقف خواهد شد که به معیارهای توقف شامل حداکثر تعداد نسل و میزان بهبود در تابع هدف رسیده باشد. بر اساس نتایج بدست آمده مقدار مناسب برای پارامترهای احتمال تزویج و جهش به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۰/۱ بدست آمده است. شکل ۴ منحنی تعامل بهینه بین تعداد فعالیت‌های واکنشی و مقدار جرم آلودگی مصرف شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، مطابق با این شکل با افزایش تعداد فعالیت‌های واکنشی جرم آلودگی به شکل مشهودی کاهش پیدا خواهد کرد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، بدون انجام برنامه مدیریت پیامد، در صورت بروز آلودگی در شبکه مقدار کل جرم آلودگی مصرف شده ۸۱/۳ کیلوگرم خواهد بود. با استفاده از ۱۵ فعالیت واکنشی جرم آلودگی مصرف شده به ۶۰/۶ کیلوگرم رسیده است.

برای استخراج منحنی تعامل بین اهداف ارائه شده در شکل ۴ در حدود ۷۳ دقیقه زمان مورد نیاز است. با توجه به اهمیت تسریع در شروع اقدامات واکنشی و تأثیر آن بر جرم آلودگی مصرف شده توسط مردم، کاهش این زمان بدیهی به نظر می‌رسد. بدین منظور استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه بر مبنای آرشیو پیشنهاد می‌گردد. در این الگوریتم با تعریف یک آرشیو با ظرفیت (جمعیت) مشخصی از کروموزوم‌ها در فرآیند بهینه‌سازی این امکان فراهم می‌گردد تا از اجرای شبیه‌سازی برای کروموزم‌های یکسان (حالات مشابهی از وضعیت شیرهای قطع و وصل و شیرهای آتش نشانی) جلوگیری شود. بدین ترتیب در صورتی که کروموزوم‌های تولید شده در نسل جدید پیش از این در آرشیو ذخیره شده باشند، از اجرای مدل شبیه‌سازی برای آن‌ها ممانعت به عمل می‌آید. با استفاده از این روش و با توجه به ظرفیت اختصاص یافته به آرشیو انتظار می‌رود که زمان استخراج فعالیت‌های واکنشی بهینه کاهش یابد. شکل ۵ زمان مورد نیاز برای استخراج فعالیت‌های بهینه (منحنی تعامل بین اهداف مختلف) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ظرفیت آرشیو زمان مورد نیاز برای استخراج فعالیت‌های واکنشی بهینه نیز کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با افزایش ظرفیت آرشیو از صفر به ۵۰۰۰ زمان مورد نیاز از ۷۳ به حدود ۳۵ دقیقه کاهش می‌یابد که کاهش بیش از ۵۰ درصدی را نشان می‌دهد. این کاهش زمان و به تبع آن کاهش زمان شروع فعالیت‌های واکنشی اثر بسزایی در افزایش اثر فعالیت‌های واکنشی بهینه استخراج شده در کاهش جرم آلودگی مصرف شده خواهد داشت. نکته مهم دیگری که از این شکل قابل دریافت است، آن است که در صورت انتخاب مقدار کوچکی برای ظرفیت آرشیو، به عنوان مثال، ۵۰ یا ۱۰۰، زمان مورد نیاز برای استخراج فعالیت‌های بهینه اندکی نسبت به



شکل ۵. زمان استخراج منحنی تعامل بین اهداف به ازای ظرفیت‌های مختلف آرشیو

Fig. 5. Time to extract the curve of interaction between goals for different archive capacities



شکل ۶. تعداد کروموزوم اجرا نشده در فرآیند شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به ازای ظرفیت‌های مختلف آرشیو

Fig. 6. The number of chromosomes not implemented in the simulation-optimization process for different archive capacities

حالت مبنا افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که در صورت انتخاب مقدار کوچکی برای ظرفیت آرشیو، بخشی از زمان اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی صرف پیدا کردن کروموزوم‌های مشابه خواهد شد و با توجه به ظرفیت کم آرشیو، افزایش زمان مورد نیاز برای استخراج کروموزوم‌های مشابه بیشتر از تأثیر کاهش زمان استفاده از ظرفیت آرشیو است. بدین ترتیب ملاحظه می‌گردد که استفاده از ظرفیت‌های آرشیو کم نه‌تنها در کاهش زمان اجرا مؤثر نخواهد بود، بلکه می‌تواند منجر به افزایش زمان اجرا نیز گردد.

همچنین به منظور ارائه تصویر بهتری از نتایج بدست آمده، در شکل ۶، تعداد کروموزوم‌هایی که در فرایند شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با توجه به جمعیت موجود در آرشیو اجرا نشده‌اند، ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش ظرفیت آرشیو، تعداد کروموزوم‌هایی که به دلیل وجود آن‌ها در جمعیت آرشیو در فرایند شبیه‌سازی- بهینه‌سازی اجرا نشده است، افزایش می‌یابد. مشاهده می‌گردد که با افزایش ظرفیت آرشیو از ۳۰۰۰ به ۵۰۰۰، افزایش محسوسی در تعداد کروموزوم اجرا نشده رخ نخواهد داد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق برای نخستین بار مدیریت پیامد وقوع آلودگی ناگهانی در شبکه آب شهری با هدف استخراج فعالیت‌های بهره‌برداری بهینه با رویکرد کاهش زمان بهینه‌سازی با استفاده از ظرفیت آرشیو مورد بررسی و توجه قرار گرفته است. برای این منظور شیرهای قطع و وصل و شیرهای آتش‌نشانی به ترتیب برای ایزوله کردن آلودگی و تخلیه آن از شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. در رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تلفیقی ارائه شده در این تحقیق از مدل شبیه‌سازی EPANET و الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II بر مبنای آرشیو استفاده شده است. از مثال شماره ۳ نرم‌افزار EPANET به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. این مثال، در بسیاری از مطالعات پیشین مدیریت پیامد در شبکه‌های آب شهری مورد توجه قرار گرفته است. دو تابع هدف در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. توابع هدف اول و دوم در این تحقیق به ترتیب به منظور حداقل کردن تعداد فعالیت‌های واکنشی (کاهش هزینه‌ها) و حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده (در نظر گرفتن سلامت عمومی) انتخاب شده است. در بخش‌های اولیه مطالعه مشخص شد که برای استخراج فعالیت‌های بهینه بین این اهداف با NSGA-II رایج و حداکثر ۱۵ فعالیت، در حدود ۷۳ دقیقه زمان نیاز است که زمان زیادی در مدیریت پیامدهای این گونه وقایع به شمار می آید. یکی از نوآوری های این تحقیق، در جهت کاهش این زمان و فراهم آوردن امکان انجام مدیریت پیامد در زمان واقعی استفاده از الگوریتم NSGA-II بر مبنای آرشیو بوده است. در رویکرد پیشنهادی، با استفاده از ظرفیت آرشیو امکان عدم اجرای مدل شبیه‌سازی برای کروموزوم‌های مشابه فراهم شده است که منجر به کاهش قابل توجه در زمان اجرای مدل بدون کاهش در نتایج مدل می گردد. در رویکرد پیشنهادی ظرفیت آرشیو با تعداد صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ تعداد کروموزوم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج خوبی را نیز به همراه داشت. به عنوان مثال، به طور کلی با افزایش جمعیت آرشیو از صفر به ۵۰۰۰، زمان مورد نیاز برای استخراج منحنی تعامل بین اهداف از ۷۳ به ۳۵ دقیقه کاهش می‌یابد که حاکی از کاهش بیش از ۵۰ درصدی است و این کاهش در مدیریت پیامد بار آلودگی در شبکه آب شهری بسیار مغتنم و قابل‌توجه می باشد. بدین ترتیب تحقیق حاضر نشان داد که با استفاده از آرشیو، امکان کاهش زمان بهینه‌سازی و مدیریت پیامد در شبکه در زمان واقعی به مقدار قابل‌توجه و مفیدی فراهم می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در صورت انتخاب مقدار کوچکی برای ظرفیت آرشیو، به عنوان مثال، تعداد ۵۰ یا ۱۰۰، زمان مورد نیاز برای استخراج فعالیت‌های بهینه اندکی نسبت به حالت مبنا افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که در صورت انتخاب مقدار کوچکی برای ظرفیت آرشیو، بخشی از زمان اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی صرف پیدا کردن کروموزوم‌های مشابه خواهد شد و با توجه به ظرفیت کم آرشیو، افزایش زمان مورد نیاز برای استخراج کروموزوم‌های مشابه بیشتر از تأثیر کاهش زمان استفاده از ظرفیت آرشیو است. پیشنهاد می شود کارآیی رویکرد پیشنهادی در حل مسائل بزرگ مقیاس بهینه سازی شبکه های آب شهری و یا بهره برداری کمی-کیفی از سیستم‌های رودخانه-مخزن مورد آزمایش قرار گیرد.

مراجع

[1] USEP, Response protocol toolbox–Public health response guide, Module 5, in: http://www.epa.gov/watersecurity/pubs/ guide_response_module5.pdf (Ed.), 2004.

[2] T. M. Baranowski, E. J. LeBoeuf, Consequence Management Optimization for Contaminant Detection and Isolation, Journal of Water Resources Planning and Management, 132(4) (2006) 274–282.

[3] T.M. Baranowski, E.J. LeBoeuf, Consequence management utilizing optimization, Journal of Water Resources Planning and Management, 134(4) (2008) 386-394.

[4] A. Preis, A. Ostfeld, Multiobjective contaminant response modeling for water distribution systems security, Journal of Hydroinformatics, 10(4) (2008) 267-274.

[5] L. Alfonso, A. Jonoski, D. Solomatine, Multiobjective optimization of operational responses for contaminant flushing in water distribution networks, Journal of Water Resources Planning and Management, 136(1) (2009) 48-58.

[6] A. Rasekh, K. Brumbelow, Adaptive emergency response to water distribution system contamination events, in World Environmental and Water Resources Congress 2012, (2012) 2981–2986.

[7] Rasekh, K. Brumbelow, A dynamic simulation–optimization model for adaptive management of urban water distribution system contamination threats, Applied Soft Computing, 32 (2015) 59-71.

[8] E. Salomons, A. Ostfeld, Slug Feed Optimal Disinfection of Water Distribution Networks Following a Contamination Event, in: World Environmental and Water Resources Congress 2016, 516-522.

[9] R. Taormina, S. Galelli, N.O. Tippenhauer, E. Salomons, A. Ostfeld, Characterizing cyber-physical attacks on water distribution systems, Journal of Water Resources Planning and Management, 143(5) (2017) 04017009.

[10] S.N. Bashi-Azghadi, M.H. Afshar, A. Afshar, Multi-objective optimization response modeling to contaminated water distribution networks: Pressure driven versus demand driven analysis, KSCE Journal of Civil Engineering, 21(6) (2017) 2085-2096.

[11] M. Zafari, M. Tabesh, and S. Nazif, S. 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) (2017), p.04017072.

[12] M.A., Khaksar Fasaee, M.R. Nikoo, P. Hashempour Bakhtiari, S. Monghasemi, M. SAdegh, A novel dynamic hydrant flushing framework facilitated by categorizing contamination events Urban Water Journal, (2020), 1-13.

[13] H. Strickling, M. DiCarlo, M. Shafiee, E. Berglund, Simulation of containment and wireless emergency alerts within targeted pressure zones for water contamination management, Sustainable Cities and Society, 52(2020), 101820.

[14] J. Knowles, D. Corne, The pareto archived evolution strategy: A new baseline algorithm for pareto multiobjective optimization, in: Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406), IEEE, 1999, pp. 98-105.

[15] J.D. Knowles, D.W. Corne, Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy, Evolutionary computation, 8(2) (2000) 149-172.

[16] J.E. Fieldsend, R.M. Everson, S. Singh, Using unconstrained elite archives for multiobjective optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 7(3) (2003) 305-323.

[17] S. Tiwari, G. Fadel, K. Deb, AMGA2: improving the performance of the archive-based micro-genetic algorithm for multi-objective optimization, Engineering Optimization, 43(4) (2011) 377-401.

[18] S. Tiwari, P. Koch, G. Fadel, K. Deb, AMGA: an archive-based micro genetic algorithm for multi-objective optimization, in: Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation, 2008, pp. 729-736.

[19] M.A.H. Abdy Sayyed, R. Gupta, T.T. Tanyimboh, Noniterative Application of EPANET for Pressure Dependent Modelling of Water Distribution Systems, Water Resources Management, 29 (2015) 3227–3242.

[20] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2) (2002) 182-197.

[21] A. Ostfeld, E. Salomons, Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security, Journal of Water Resources Planning and Management, 130(5) (2004) 377-385.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Masoumi, S.N. Bashi Azghadi, A. Afshar, Application of Achieve-Based Genetic Algorithm for Consequence Management of Contaminant Entering in Water Distribution Networks, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3593-3604.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18055.6750

این صفحه عمداً خالی است