

مدیریت بروز آلودگی در شبکه‌های توزیع آب شهری: مطالعه موردی

پویا عباسی^۱، فرهاد خامچین مقدم^{۲*} و سید ناصر باشی ازغدی^۳

چکیده

در سال‌های اخیر توجه روز افزون به ایمن نگاه داشتن شبکه‌های آب شهری از خطرهای احتمالی طیف وسیعی از مطالعاتی را به دنبال داشته که مهم‌ترین هدف آن‌ها، کمینه کردن آثار مخرب این خطرها بر سلامت عموم بوده است. از مهم‌ترین خطرهای تهدیدکننده شبکه‌های آب شهری، حملات عمدی برای آلوده کردن آب شبکه با آلاینده‌های شیمیایی است. به دلیل اهمیت بروز آلودگی در شبکه آب شهری بر سلامت مردم و همچنین زمان بسیار مهم از هنگام تشخیص و تأیید آلودگی تا شروع فعالیت‌های واکنشی در کاهش آثار مخرب آلودگی بر سلامت مردم ضروری است اقدامات مناسبی در این خصوص اندیشیده شود. از جمله اقدامات انجام شده در این پژوهش، ایزوله کردن ناحیه آلوده شده توسط شیرهای موجود در شبکه برای جلوگیری از گسترش آلودگی و تخلیه آب آلوده از طریق شیرهای آتش‌نشانی است. این مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی شد. نتایج نشان داد که با انتخاب تعداد جمعیت ۳۰ و نسل ۱۵۰، نرخ تزویج ۰/۸۵ و جهش ۰/۱۵ کمترین آلودگی در شبکه مصرف شد. در این پژوهش آنالیز حساسیت روی زمان شروع مدیریت پیامد از ساعت ۱۱ الی ۱۶ انجام شد که نتایج نشان داد، کاهش زمان شروع مدیریت پیامد، در کاهش آلودگی نقش بسزایی دارد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، مدیریت پیامد.

ارجاع: عباسی پ. خامچین مقدم ف. و باشی ازغدی س. ن. ۱۳۹۹. مدیریت بروز آلودگی در شبکه‌های توزیع آب شهری: مطالعه موردی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۷: ۳۹-۲۲.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد.

۲- استادیار گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد.

۳- استادیار گروه عمران، مؤسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران.

* نویسنده مسئول: f.khamchin@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۷

مقدمه

شبکه‌های توزیع آب، از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری هستند. یک شبکه آب شهری، به دلیل پراکندگی و گستردگی بسیار زیاد آسیب‌پذیری بالایی دارد. از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین تهدیدهای این زیرساخت‌ها، حملات عمدی برای آلوده کردن آب شبکه با آلاینده‌های شیمیایی یا بیولوژیکی است که از نظر نوع آلاینده، مکان شروع آلودگی در شبکه، زمان شروع و پایان رخداد آلودگی و پیامدهای ناشی از آن، دارای عدم قطعیت است و می‌تواند منجر به بیماری و کشته شدن افراد بسیاری شود. پس از حمله به شبکه و تشخیص موفق آن توسط ایستگاه‌های پایش، مدیریت بحران ایجاد شده و اتخاذ بهترین تصمیم برای جلوگیری از گسترش آلودگی و حذف آن از شبکه است که می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای از کار انداختن کل شبکه باشد که بسیار محافظه‌کارانه است (احسانی، ۱۳۸۸). حملات عمدی را که به شبکه‌های آب شهری می‌تواند صورت بگیرد، می‌توان به سه دسته کلی حملات سایبری، فیزیکی و بیولوژیکی- شیمیایی تقسیم کرد. حملات سایبری، بخش کنترل و نظارت شبکه را مورد هدف قرار می‌دهد و معمولاً با اهداف ایجاد خسارت‌های مالی طراحی می‌شوند. در حملات فیزیکی همان‌گونه که از نامش بر می‌آید، زیرساخت‌های شبکه مانند تصفیه‌خانه، مخازن ذخیره آب، لوله‌های انتقال آب و ... به طور مستقیم مورد حمله فیزیکی قرار می‌گیرند (جنونگ و آبراهام، ۲۰۰۶). حملات شیمیایی و بیولوژیکی به علت این‌که سلامت مردم را به خطر می‌اندازد، خطرناک‌تر از بقیه بوده و به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در این نوع از حملات، یافتن راه‌حلی برای کمینه کردن آثار مخرب آن، مشکل‌تر است (ژو و همکاران، ۲۰۱۰).

پس از تشخیص موفق آلودگی در شبکه، توسط ایستگاه‌های پایش و تأیید آن، با توجه به اطلاعات دریافتی از ایستگاه‌های پایش در مورد غلظت آلودگی در گره‌ها در زمان‌های مختلف، منبع آلودگی مشخص و مدیریت پیامد برای حذف آلودگی از شبکه انجام خواهد شد. بسته پروتکل واکنشی اداره حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده توصیه‌هایی را برای کمینه کردن خطرهای ناشی از این تهدیدات ارائه داده است. توصیه‌های این پروتکل شامل اعلام خطر و اطلاع‌رسانی به عموم مردم، ایزوله کردن ناحیه آلوده شده در شبکه، تخلیه کردن

آلودگی از شبکه و ترکیبی از سه راهکار پیشنهادی قبل است (US EPA, 2003).

آلفونسو و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی یافتن مؤثرترین تصمیمات برای کمینه کردن اثر آلودگی بر مردم پرداختند. آنان این مسأله را به صورت تک هدفه توسط الگوریتم ژنتیک و دو هدفه با NSGA-II با جمعیت روش‌های بهینه‌سازی فراکوشی و نرم‌افزار EPANET بررسی کردند. آنان یک آستانه برای آلودگی تعریف کردند، به گونه‌ای که اگر غلظت آلودگی در گره‌ها از آن مقدار بیش‌تر باشد، آن گره آلوده محسوب می‌شود. همچنین ارزش همه گره‌ها نیز یکسان در نظر گرفته شده است. اهداف مورد بررسی در این مقاله شامل (۱) کمینه کردن گره‌های آلوده شده در بازه زمانی شبیه‌سازی و (۲) کمینه کردن هزینه‌های ناشی از عملیات مدیریت است. نجفی و افشار (۲۰۱۴) به بررسی مدیریت پیامدهای حملات شیمیایی به شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها پرداختند. باشی ازغدی و همکاران (۲۰۱۷)، به مدل‌سازی واکنش بهینه‌سازی چندمنظوره برای شبکه‌های توزیع آب آلوده تحت فشار و تقاضا پرداختند. آنان در این مطالعه سه تابع هدف را در نظر گرفتند.

در این پژوهش سعی شده است تا با تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی EPANET و بهینه‌سازی NSGA-II مدیریت پیامد در شبکه آب شهری با استفاده از شیرهای قطع و وصل و شیرهای آتش‌نشانی پس از بروز آلودگی ارزیابی شود. همچنین آنالیز حساسیت پارامتر زمان شروع مدیریت پیامد بر کارایی برنامه مدیریت پیامد بررسی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، حمله به شبکه با تزریق آلودگی در یک گره فرضی انجام و پس از آن شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب انجام شد. با در نظر گرفتن مدت زمان تأخیر که بیانگر مدت زمان لازم برای تشخیص محل تزریق آلودگی، اعزام نیروهای واکنشی برای بستن شیرها و باز کردن شیرهای آتش‌نشانی و همچنین اعلام خطر عمومی است، مدیریت پیامد آلودگی در شبکه آغاز خواهد شد. با توجه به تعداد شیرها و شیرهای آتش‌نشانی برای مدیریت پیامد آلودگی در شبکه که باید باز یا بسته شوند،

یک رشته جواب توسط الگوریتم ژنتیک NSGA-II تولید می‌شود. در ادامه، شبکه با در نظر گرفتن سناریو حمله و تغییرات ایجاد شده در مرحله قبل تحلیل خواهد شد و جواب‌های تولید شده با توجه به توابع هدف، ارزیابی می‌شوند. با تولید جواب‌های جدید و ارزیابی آن‌ها بر اساس توابع هدف، الگوریتم ژنتیک به سمت تولید جواب بهینه پیش خواهد رفت. جواب بهینه منحنی تعامل بین اهداف تعداد فعالیت‌های واکنشی (شامل باز کردن شیرهای آتش‌نشانی و بستن شیرها) و جرم آلودگی مصرف شده در شبکه خواهد بود.

معرفی نرم‌افزار EPANET

مدل‌های شبیه‌سازی شبکه آب شهری مدل‌هایی هستند که رفتار هیدرولیکی و کیفی آب شبکه‌های لوله تحت فشار را در گام‌های زمانی مختلف شبیه‌سازی می‌کنند. EPANET از مدل‌های مشهور شبیه‌سازی کمیت و کیفیت آب در شبکه‌های توزیع است. این نرم‌افزار را دپارتمان منابع آب و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا توسعه داد. ویرایش دوم EPANET در سال ۲۰۰۰ در دسترس عموم قرار گرفت. EPANET می‌تواند برای انواع مختلف کاربردها در آنالیز سیستم توزیع آب شهری استفاده شود. طراحی برنامه نمونه‌گیری، آنالیز کلر باقیمانده و محاسبه غلظت آلودگی مصرف شده مثال‌هایی از این کاربردها هستند. علاوه بر این، EPANET می‌تواند در ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی گوناگون برای بهبود کیفیت آب داخل یک سیستم توزیع راهگشا باشد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفیت شبکه از نسخه EPANET 2.0 این نرم‌افزار استفاده می‌شود. همچنین به علت نیاز به اجزای مکرر این مدل در تلفیق با مدل‌های بهینه‌سازی کیفی، از بسته جانبی Toolkit EPANET در تلفیق با زبان برنامه‌نویسی متلب استفاده شده است.

معرفی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین است و بر اساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی استوار است. الگوریتم ژنتیک، روش مناسبی برای کاربرد در حل مسائلی است که توأم با جست‌وجو و بهینه‌سازی هستند. الگوریتم ژنتیک از شبیه‌سازی مستقیم رفتار

معرفی توابع هدف

تابع هدف اول در این پژوهش، تعداد فعالیت‌های واکنشی در شبکه است. تعداد عملیات واکنشی شامل تعداد گروه‌های اعزامی به مناطق موردنظر برای باز کردن شیرهای آتش‌نشانی و بستن شیرها است. در این پژوهش تعداد فعالیت‌های واکنشی که از طریق معادله (۱) به دست می‌آید، به پانزده فعالیت محدود شده است.

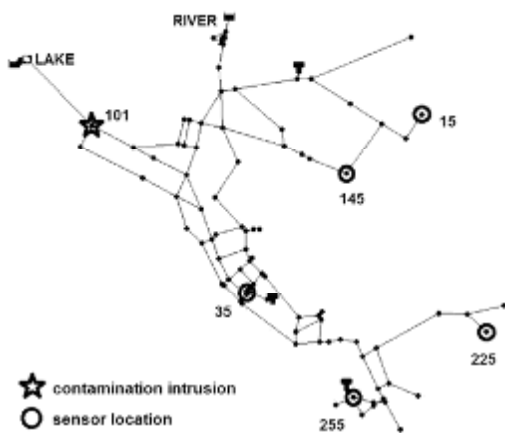
$$F_1 = \sum_{k=1}^{20} VA_k + \sum_{j=1}^{31} HY_j \quad (1)$$

که در این معادله، F_1 مجموع فعالیت‌های به کار گرفته شده در جواب تولید شده توسط بهینه‌ساز است. VA_k و HY_j به ترتیب نشانگر حالت شیر k ام و شیرآتش‌نشانی j ام بوده و مقدار آن‌ها صفر یا یک است. اگر در جواب

شبکه در معرض یک الگوی جریان تقاضای ۲۴ ساعته قرار گرفت.

در این شبکه فرض بر این است که آلودگی در ساعت هشت از گره ۱۰۱ تزریق و تا شش ساعت نیز ادامه می‌یابد. براساس روش پیشنهاد شده توسط آستفلد و سالومونز (۲۰۰۴)، پنج سنسور در گره‌های ۱۵، ۳۵، ۱۴۵، ۲۲۵، ۲۵۵ برای تشخیص آلودگی مبتنی بر حداکثر کردن درست‌نمایی تشخیص مکان‌یابی شده است. در این روش تعیین محل بهینه ایستگاه‌های پایش از دو گام اصلی ایجاد ماتریس آلودگی تولید شده تصادفی و تعیین ستون با حداکثر پوشش این ماتریس با استفاده از الگوریتم ژنتیک تشکیل 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 (ساعت ۲۴) ادامه خواهد داشت.



شکل ۱- شبکه مثال ۳ نرم‌افزار EPANET

نتایج و بحث

پارتوی بهینه حاصل از انتخاب نسل برتر حل مسأله با توجه به تعداد عملیات واکنشی نشان در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص می‌شود که با توجه به تعداد عملیات واکنشی چه مقدار از آلودگی ایجاد شده در شبکه کاهش پیدا می‌کند. مقدار جرم آلودگی ابتدا و بدون مدیریت پیامد برابر ۸۰/۳۸ کیلوگرم و پس از مدیریت پیامد آلودگی به مقدار ۵۸/۰۴ کیلوگرم کاهش پیدا کرده است.

تولیدشده شیر K ام بسته، شیرآتش‌نشانی لام باز باشد، V_{AK} و HY_j برابر یک و در غیر این صورت صفر، در نظر گرفته خواهند شد.

هدف دوم در این پژوهش، حداقل کردن جرم آلودگی مصرف شده در شبکه مطابق معادله (۲) است.

$$F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=t_d}^{EPS} C_i(t) \times V_i(t) \quad (2)$$

که در آن F_2 ، جرم آلاینده مصرف‌شده، i نشانگر گره، N تعداد کل گره‌های مصرف‌کننده، t نشانگر زمان و t_d مدت زمان سپری شده پس از زمان تشخیص آلودگی در شبکه است. EPS نیز کل مدت زمان شبیه‌سازی است. $C_i(t)$ غلظت آلاینده در گره i در زمان t و $V_i(t)$ حجم آب مصرف‌شده در گره i در زمان t است.

مشخصات شبکه

شبکه به کارگرفته شده در این پژوهش، مثال شماره ۳ نرم‌افزار EPANET است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. استفاده از این مثال به دلیل قابلیت دسترسی رایگان، تشابه بیشتر به شبکه واقعی در مقایسه با دو مثال دیگر، دارا بودن ترکیبی از تجهیزات مختلف شبکه شامل مخزن، تانک و پمپ و استفاده از آن در بسیاری از مطالعات پیشین است (نجفی و افشار، ۱۳۹۴؛ باشی ازغدی و همکاران، ۲۰۱۷؛ آستفلد و سالومونز، ۲۰۰۴؛ پریس و آستفلد، ۲۰۰۸). شبکه مورد بررسی دارای ۹۲ گره که ۵۹ گره از مجموع این ۹۲ گره، گره‌های مصرف‌کننده هستند. دو منبع تأمین آب با هد ثابت، ۱۱۷ لوله و ۳ تانک ذخیره در این شبکه وجود دارد. برای بررسی مدیریت پیامدها در ۳۱ نقطه از گره‌های این شبکه، شیرآتش‌نشانی و در ۲۰ لوله از مجموع لوله‌های شبکه، شیر تعبیه شد که امکان بستن لوله‌ها فراهم شود. شیرهای آتش‌نشانی در محل گره‌هایی وجود دارد که نیاز دبی آن‌ها صفر است. محل قرارگیری شیرهای آتش‌نشانی و محل قرارگیری شیرها در جدول ۱ آورده شده است. ابتدا تمامی شیرها باز و شیرهای آتش‌نشانی بسته هستند. دبی تخلیه از شیرهای آتش‌نشانی، ثابت و مطابق با شماره ۲۹۱ انجمن حفاظت از حریق امریکا^۲ و براساس رنگ قرمز شیر آتش‌نشانی ثابت و برابر با ۱۹۰۰ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد و

جدول ۱- محل قرارگیری شیرها و شیرهای آتش‌نشانی

| محل قرارگیری شیرها (شماره لاینک‌ها - Pipe) | محل قرارگیری شیرهای آتش‌نشانی (شماره گره‌ها - Node) |
|--|---|
| ۲۰۴، ۲۱۵، ۱۷۷، ۱۱۶، ۱۰۵، ۱۷۵، ۱۱۱ | ۱۷۹، ۱۷۳، ۱۶۹، ۱۶۴، ۱۲۹، ۱۲۰، ۶۱، ۶۰، ۱، ۶۰، ۵۰، ۴۰ |
| ۳۱۱، ۲۲۹، ۱۰۷، ۱۲۳، ۱۷۳، ۲۶۹، ۲۳۷ | ۲۴۹، ۲۴۱، ۲۰۸، ۲۰۶، ۲۰۴، ۱۹۵، ۱۸۷، ۱۸۴، ۱۸۳، ۱۸۱ |
| ۳۰۱، ۳۱۷، ۲۳۱، ۲۲۱، ۳۰۹، ۱۵۵ | ۲۷۵، ۲۷۳، ۲۷۱، ۲۶۹، ۲۶۷، ۲۶۵، ۲۶۳، ۲۶۱، ۲۵۹، ۲۵۷ |

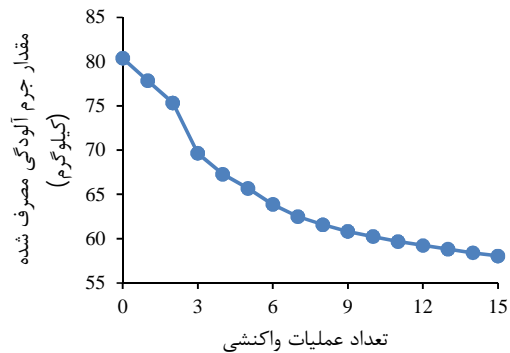
بدین‌منظور برای نرخ تزویج اعداد ۰/۸، ۰/۸۵، ۰/۹ و ۰/۹۵ و برای نرخ جهش اعداد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ در نظر گرفته شده است. با بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی این نتیجه به دست آمد که مدیریت پیامد آلودگی در شبکه با انتخاب نرخ تزویج ۰/۸۵ و جهش ۰/۱۵ میزان آلودگی مصرف شده در شبکه را به حداقل ممکن خود می‌رساند. با توجه به تعداد حالات ممکن برای نرخ تزویج و نرخ جهش، شانزده حالت ممکن وضعیت آلودگی در شبکه بررسی گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- انتخاب نرخ تزویج و جهش بهینه

| ردیف | تزویج | جهش | مقدار آلودگی مصرف شده (کیلوگرم) |
|------|-------|------|---------------------------------|
| ۱ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۵۹/۷۹ |
| ۲ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۵۹/۵۸ |
| ۳ | ۰/۰۸ | ۰/۱۵ | ۵۹/۴۸ |
| ۴ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۵۸/۱۹ |
| ۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۵۹/۳۲ |
| ۶ | ۰/۱۵ | ۰/۱ | ۶۰/۷۵ |
| ۷ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | ۵۸/۰۴ |
| ۸ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۶۱/۳۶ |
| ۹ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۵۹/۸۴ |
| ۱۰ | ۰/۹ | ۰/۱ | ۶۰/۴۱ |
| ۱۱ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | ۵۸/۱۰ |
| ۱۲ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۶۰/۸۶ |
| ۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۶۰/۸۵ |
| ۱۴ | ۰/۹۵ | ۰/۱ | ۶۱/۳۲ |
| ۱۵ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | ۶۰/۲۷ |
| ۱۶ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۶۰/۷۳ |

تحلیل حساسیت روی زمان شروع مدیریت پیامد

زمان مورد نیاز برای شروع مدیریت پیامد آلودگی، حداقل زمانی پس از تشخیص آلودگی آب در شبکه توسط سنسور و شروع عملیات واکنشی توسط نیروها برای بستن شیرها و بازکردن شیرهای آتش‌نشانی در شبکه است. این زمان از آن جهت قابل اهمیت است، که هرچه قدر این زمان کاهش یابد، مقدار آلودگی مصرف شده در شبکه کمتر است و در نتیجه جان انسان‌های کم‌تری به خطر



شکل ۲- پارتوی بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک برای کمینه کردن آلودگی در شبکه

انتخاب پارامترهای الگوریتم ژنتیک

جمعیت بهینه برای حل برنامه برابر ۳۰ و تعداد نسل برابر ۱۵۰ با استفاده از آنالیز حساسیت انتخاب شد. انتخاب این اعداد براساس بررسی حالت‌های مختلفی از جمعیت و نسل بوده که با بررسی کمترین مقدار آلودگی ایجاد شده در شبکه، انجام شده است. مقدار جرم آلودگی مصرف شده در شبکه، برای جمعیت و نسل‌های مختلف در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- جمعیت و نسل مورد بررسی در الگوریتم ژنتیک

| ردیف | تعداد جمعیت و نسل | مقدار جرم آلودگی مصرف شده (کیلوگرم) |
|------|-------------------|-------------------------------------|
| ۱ | ۳۰ جمعیت، ۵۰ نسل | ۶۳/۲۲ |
| ۲ | ۳۰ جمعیت، ۱۰۰ نسل | ۶۳/۳۳ |
| ۳ | ۳۰ جمعیت، ۱۵۰ نسل | ۵۸/۹۶ |
| ۴ | ۵۰ جمعیت، ۵۰ نسل | ۶۲/۲۶ |
| ۵ | ۵۰ جمعیت، ۱۰۰ نسل | ۵۹/۲۲ |
| ۶ | ۵۰ جمعیت، ۱۵۰ نسل | ۶۰/۰۹ |

تحلیل حساسیت روی پارامترهای تزویج و جهش

پس از انتخاب پارامترهای مورد نیاز حل مسأله در الگوریتم ژنتیک، باید به دنبال کمترین مقدار آلودگی ایجاد شده در شبکه بود. برای این منظور نرخ تزویج و جهش در الگوریتم ژنتیک را تغییر داده تا به حالت بهینه مسأله و کمترین مقدار آلودگی مصرف شده در شبکه دست یافت.

3. Afshar A. and Najafi E. 2014. Consequence management of chemical intrusion in water distribution networks under inexact scenarios. *Journal of Hydroinformatics* 16(1): 178-188.
4. Alfonso L. Jonoski A. and Solomatine D. 2010. Multiobjective optimization of operational responses or contaminant flushing in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 136(1): 48-58.
5. Bashi-Azghadi S. N. Afshar M. H. and 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.
6. Jeong H. S. and Abraham D. M. 2006. Operational response model for physically attacked water networks using NSGA-II. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 20(5): 328-338.
7. Ostfeld A. and Salomons E. 2004. Optimal layout of early warning detection stations for water distribution system security. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130(5): 377-385.
8. Preis A. and Ostfeld A. 2008. Multiobjective contaminant response modeling for water distribution systems security. *Journal of Hydroinformatics*. 10(4): 267-274.
9. US EPA 2003 Response Protocol Toolbox: Planning for and Responding to Drinking Water Contamination Threats and Incidents – Overview and Application. US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
10. Xu J. Johnson M. P. Fischbeck P. S. Small M. J. and VanBriesen J. M. 2010. Robust placement of sensors in dynamic water distribution systems. *European Journal of Operational Research*. 202(3): 707-716.

می‌افتد. بدین منظور زمان لازم برای اقدام عملیات واکنشی توسط گروه‌های اعزامی در این پژوهش از ساعت ۱۱ (یلافاصله پس از تشخیص آلودگی در شبکه) تا ساعت ۱۶ با فواصل یک ساعته برای کاهش آلودگی در شبکه ارزیابی شده است. نتایج مقدار آلودگی مصرف‌شده در شبکه به ازای شروع عملیات واکنشی در ساعت ۱۱ برابر ۵۲/۲۰ کیلوگرم، ساعت ۱۲ برابر ۵۹/۲۷ کیلوگرم، ساعت ۱۳ برابر ۶۱/۱۸ کیلوگرم، ساعت ۱۴ برابر ۶۲/۱۷ کیلوگرم، ساعت ۱۵ برابر ۶۷/۴۷ کیلوگرم، و در ساعت ۱۶ برابر ۷۰/۱۷ کیلوگرم است. مشاهده می‌شود که هرچه زمان واقعی برای مدیریت بروز آلودگی در شبکه سریع‌تر انجام شود، آلودگی مصرف‌شده در شبکه به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدیریت پیامدها با استفاده از الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه کردن جرم آلودگی مصرف شده در شبکه بررسی شد. بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی حاکی از آن است که مدیریت پیامد آلودگی در شبکه با انتخاب نرخ تزویج ۰/۸۵ و جهش ۰/۱۵ میزان آلودگی مصرف شده در شبکه را به حداقل ممکن خود می‌رساند. شیرها ناحیه آلوده شده در شبکه را ایزوله کرده و با استفاده از شیرهای آتش‌نشانی آلودگی از شبکه خارج می‌شود. تأثیر مثبت مدیریت پیامد با استفاده از شیرها و شیرهای آتش‌نشانی مقدار آلودگی مصرف شده در شبکه را کاهش داد و این امر باعث شد تا قسمت‌های کم‌تری از شبکه آلوده شود و در نتیجه سلامتی تعداد افراد کمتری نیز به خطر بیافتد.

منابع

۱. احسانی ن. ۱۳۸۸. مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های پایش در شبکه‌های توزیع آب شهری؛ رویکرد چند هدفه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. ۷۸ ص.
۲. نجفی ا. و افشار ع. ۱۳۹۴. مدیریت پیامدهای حملات شیمیایی به شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها. مجله آب و فاضلاب. ۲۶(۲): ۸۲-۹۴.