مدیریت پیامدهای حملات شیمیایی به شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها

احسان نجفی[1] عباس افشار[2]

(دریافت ۹۱/٤/٦ پذیرش ۹۲/٤/۱۲)

چکیده

یکی از مهم‌ترین خطرات تهدید کننده شبکه‌های آب شهری، حملات عمدی به‌منظور آلوده کردن آب شبکه با آلاینده‌های شیمیایی است. تصمیمات و اقداماتی که بعد از تشخیص آلودگی در شبکه‌های توزیع آب شهری انجام می‌پذیرد، معمولاً تحت شرایط پیچیده‌ای است و باید سعی شود که بهترین تدابیر برای حفظ سلامت عموم صورت پذیرد. این راهکارها می‌تواند شامل اعلام خطر عمومی، ایزوله کردن ناحیه آلوده شده توسط شیرهای موجود در شبکه به‌منظور جلوگیری از گسترش آن، تخلیه آب از شیرهای آتش‌نشانی موجود در شبکه و همچنین استفاده از پمپ‌ها باشد. در این تحقیق، مدیریت پیامدهای ناشی از حملات شیمیایی، با بهره‌گیری از راهکارهای ذکر شده و با در نظر گرفتن دو هدف اصلی کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده و یک هدف جدید با عنوان کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی" در کنار کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی بررسی شد. این مسئله با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها برای اولین بار به‌صورت تک هدفه و دو هدفه مورد مطالعه قرار گرفت. یکی از نتایج مهم این تحقیق، نقش اساسی استفاده از پمپ‌ها در مدیریت پیامدهای ناشی از این گونه حملات است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، شبکه توزیع آب شهری، مدیریت پیامدها، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها

Consequences Management of Chemical Intrusions in Urban Water Distribution Networks Using the Ant Colony Optimization Algorithm

E. Najafi [1] *A. Afshar[2]*

(Received June 26, 2012 Accepted July 3, 2013)

Abstract

Deliberate chemical contaminant injection is one of the most important dangers which threatens urban water distribution networks. Decisions made following the detection of such contaminant attacks are affected by complicated conditions. A variety of optimal operational measures and strategies must be adopted to safeguard the public health which may include isolation of the contaminated area through valve operations for pollution containment, public alarms, and flushing of the polluted water out of the system through hydrants or pumps. In this study, consequence management of chemical intrusions using the above strategies is investigated with two main objectives: minimizing the number of polluted nodes and minimizing the operational activities while minimizing "the recovery time of the network to normal conditions" is also considered as a novel objective. The problem is treated as both a single- and a multi-objective optimization problem in which the Ant Colony Optimization Algorithm is used for the first time. One of the most important achievements of this study is the substantial role of pumps in consequence management of such attacks.

Keywords: Contamination, Urban Water Distribution Network, Consequences Management, Ant Colony Optimization Algorithm.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران، کالج شهر نیویورک، دانشگاه شهر نیویورک (نویسنده مسئول) ehs.najafi@gmail.com
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

1. MSc Graduat, Dept. of Civil Eng., Iran University of Sciences and Tech., Tehran, PhD Student, Civil Eng. Dept., the City College of New York, the City University of New York (Corresponding Author) ehs.najafi@gmail.com
2. Prof., Dept. of Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

حملات عمدی به شبکه‌های آب شهری به سه دسته کلی حملات سایبری، حملات فیزیکی و حملات بیولوژیکی و شیمیایی تقسیم می‌شود. حملات بیولوژیکی و شیمیایی به‌علت آنکه سلامت مردم را به خطر می‌اندازند، خطرناک‌تر از بقیه موارد بوده و به‌دلیل عدم قطعیت‌های موجود در این نوع از حملات، یافتن راه حلی برای کمینه کردن اثرات مخرب آن مشکل‌تر است. معمولاً یک رخداد آلودگی به وسیله مجموع احتمالات متغیرهای تصادفی آن شامل: زمان شروع، مکان ورود آلودگی به شبکه، شدت آلودگی و مدت زمان رخداد آلاینده توضیح داده می‌شود. تشخیص ورود آلودگی به شبکه توسط ایستگاه‌های پایش صورت می‌گیرد. اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه در طی دهه گذشته به مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های پایش اختصاص داده شده است. تحقیقات آستفیلد و سالومونز در سال ۲۰۱۰، بری و همکاران و همچنین پروپاتو در سال ۲۰۰۶ از آن جمله هستند [۱ و ۲ و ۳].

یکی از مراحل مهم و اساسی پس از تشخیص موفق آلودگی در شبکه، تعیین منبع آلودگی است. روش‌هایی که به بررسی تعیین منبع آلودگی می‌پردازند، در نهایت منجر به چندین مکان محتمل تزریق آلودگی می‌شوند. لیرد و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش عدد صحیح مختلط[1] در طی دو مرحله، به یافتن منبع آلودگی پرداختند [۴]. پریس و آستفیلد در سال ۲۰۰۶ با استفاده از یک روش مختلط برنامه‌ریزی خطی و مدل درخت به بررسی این موضوع پرداختند [۵]. دی سانکتیز و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از تحلیل مسیر جریان، تعیین مکان‌ها و زمان‌های محتمل تزریق را مورد بررسی قرار دادند [۶].

بعد از تشخیص ورود آلودگی به شبکه، باید بهترین تدابیر برای از بین بردن خطرات ناشی از ورود آلاینده به شبکه برای حفظ سلامت عموم انجام گیرد. بسته پروتکل واکنشی اداره حفاظت از محیط زیست ایالات متحده[2]، توصیه‌هایی را برای کمینه کردن خطرات ناشی از این تهدیدات ارائه داده است. توصیه‌های این پروتوکل شامل: ۱- ایزوله کردن ناحیه آلوده شده در شبکه، ۲- اعلام خطر و اطلاع‌رسانی به عموم مردم و ۳- تخلیه آلودگی از شبکه است [۷].

بارانوسکی و لی بوف در سال ۲۰۰۶ با استفاده از سه روش بهینه‌سازی به یافتن بهترین دبی‌های خروجی از گره‌ها به‌منظور خارج کردن آلودگی از سیستم برای کاهش غلظت آلودگی در شبکه پرداختند. در این مطالعه بعد از تشخیص آلودگی توسط اولین ایستگاه پایش، کمترین مقدار دبی خروجی لازم از گره‌های شبکه، در گام‌های زمانی ۵ دقیقه برای کمینه کردن گسترش آلودگی در شبکه محاسبه شده است [۸]. پریس و آستفیلد در سال ۲۰۰۸ این موضوع را با در نظر گرفتن اهداف ناسازگار ۱- کمینه کردن جرم آلاینده مصرف شده پس از تشخیص آلودگی در شبکه و ۲- کمینه کردن تعداد عملیات انجام شده، مورد بررسی قرار دادند. این عملیات شامل تعداد گروه‌های اعزامی به‌منظور بستن، باز کردن و یا روشن کردن شیرها، شیرهای آتش نشانی و پمپ‌های موجود در شبکه بود. آنها برای حل این مسئله، از الگوریتم ژنتیک مرتب شده غیر مسلط[3] استفاده کردند و اثر فشار منفی به وجود آمده به‌دلیل اعمال تغییر در شرایط شبکه را در نظر نگرفتند [۹].

بارانوسکی و لی بوف در سال ۲۰۰۸ در ادامه تحقیقات خود به بررسی مدیریت پیامدهای این دسته از حملات که کمترین هزینه و بیشترین سود را در پی داشته باشد، پرداختند. آنها برای رسیدن به این هدف به یافتن بهترین گره‌ها برای ایجاد تغییر تقاضا[4] و یافتن بهترین لوله‌هایی که باید بسته شوند، پرداختند. هدف از بستن لوله‌ها و تغییر مقدار تقاضا در گره‌ها، کمینه کردن مجموع غلظت آلاینده در تمامی گره‌ها برای تمامی بازه‌های زمانی شبیه‌سازی، پس از تشخیص آلودگی به شبکه بود [۱۰]. پولین و همکاران در سال ۲۰۰۸ روندی مبتنی بر یک سری دستورالعمل طراحی کردند. هدف آنها مکان‌یابی مناسب‌ترین محدوده برای ایزوله کردن منطقه بود و این کار را از طریق بستن شیرهای مناسب، که اکثر و یا به‌طور ایده‌آل همه آب آلوده را آماده تخلیه شدن نماید، انجام دادند. روش آنها با توجه به طرح، توپولوژی و شرایط جریان در شبکه، منجر به استراتژی‌های مختلفی برای تعیین محدوده ایزوله کردن و تعداد شیرهای مورد نیاز که باید بسته شوند، بود. روش فراکاوشی طراحی شده توسط آنها شامل: ۱- بستن شیرهای مناسب به‌منظور جلوگیری از پخش آلودگی و ۲- باز کردن یک شیر به نحوی که آب تمیز وارد قسمت ایزوله شود، بود [۱۱]. پولین و همکاران در سال ۲۰۱۰ در ادامه تحقیقات خود با ارائه روشی کاربردی به بررسی اقدامات لازم برای تخلیه آلودگی غیرچسبنده از محدوده ایزوله شده شبکه که با توجه به روش مبتنی بر مطالعه قبلی خود به‌دست آمده است، پرداختند [۱۲].

آلفونسو و همکاران در سال ۲۰۱۰ اهداف ناسازگار کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده و کمینه کردن هزینه‌ها را با تجمیع الگوریتم ژنتیک و نرم افزار اپانت[5] بررسی نمودند [۱۳]. هاکستون و اوبر در سال ۲۰۱۰ عدم قطعیت در محل حمله به شبکه در مسئله مدیریت پیامدهای این دسته از حملات را با در نظر

[1] Mixed-integer Approach
[2] U.S. Environmental Protection Agency Response Protocol Toolbox

[3] Nondominated Sorted Genetic Algorithm
[4] Demand
[5] EPANET

www.SID.ir
Archive of SID

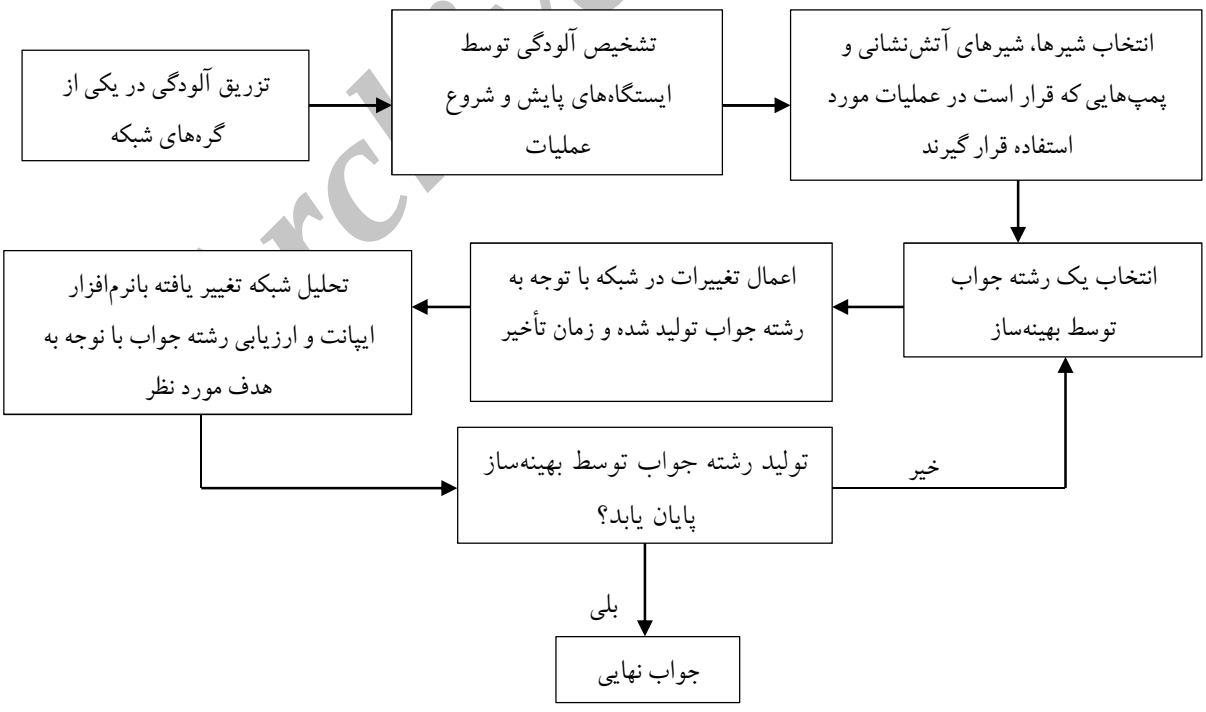
گرفتن سه روش تعیین منبع آلودگی بررسی نمودند. آنها گره‌های منتخب برای تخلیه آب آلوده از شبکه را به نحوی تعیین کردند که برای هر روش، میانگین گستردگی آلودگی در شبکه با توجه به مکان‌های محتمل حمله، کمینه شود. نتایج آنها نشان داد که گستردگی آلودگی در شبکه در حالتی که مکان تزریق آلودگی به‌طور دقیق مشخص باشد، به‌طور قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها کاهش می‌یابد [۱۴].

در برخی از مطالعات گذشته از فرضیات غیر واقع‌بینانه‌ای استفاده شده است. امکان تخلیه آب آلوده از تمامی گره‌ها، قابلیت بسته شدن تمامی لوله‌ها و در نظر نگرفتن فشار منفی در شبکه در اثر اعمال تغییرات در شبکه، از جمله آنها هستند و در این مقالات اشاره‌ای به غیرمناسب بودن این فرضیات نشده است. در این پژوهش ابتدا مسئله با هدف کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده در کنار هدف متعارض کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی[1] به‌صورت دو هدفه بررسی شد. سپس مسئله با تعریف یک هدف جدید با عنوان کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی به‌صورت تک هدفه و همچنین دو هدفه، در کنار کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی این موارد، برای اولین بار از الگوریتم جامعه مورچه‌ها برای بهینه‌سازی استفاده شد. همچنین نقش پمپ‌ها که در مطالعات قبلی استفاده شده بود، بررسی شد. در ادامه به جای استفاده از عبارت" مدیریت پیامدهای حملات شیمیایی" به اختصار از "مدیریت پیامدها" استفاده خواهد شد.

۲- روش کار

در این پژوهش بعد از شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با نرم‌افزار ایپانت، با تزریق آلودگی در گره مورد نظر، حمله به شبکه مدل‌سازی شد. مدیریت پیامد بعد از مدت زمان t که زمان تأخیر نام دارد، آغاز شد. زمان تأخیر مدت زمان لازم برای تشخیص محل تزریق آلودگی، اعزام نیروها به‌منظور بستن شیرها، باز کردن شیرهای آتش‌نشانی و روشن کردن پمپ‌ها و همچنین اعلام خطر عمومی است. در ادامه شیرها، شیرهای آتش‌نشانی و پمپ‌هایی که قرار است در مدیریت پیامد برای دستیابی به هدف مورد نظر مورد استفاده قرار بگیرند، مشخص شد و یک رشته جواب متشکل از این ادوات توسط الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان تولید شد. با توجه به رشته جواب تولید شده، تغییراتی در شبکه اعمال شد، به این صورت که ترتیبی اتخاذ شد تا شیرها، شیرهای آتش‌نشانی و پمپ‌های منتخب، همگی در زمان t به‌ترتیب بسته، باز و روشن شوند. شبکه با در نظر گرفتن سناریوی حمله و تغییرات ایجاد شده در مرحله قبل تحلیل شد و غلظت آلودگی در گره‌های مصرف کننده، در بازه‌های زمانی مشخص به‌دست آمد و جواب تولید شده با توجه به تابع هدف مورد نظر ارزیابی شد. با تولید جواب‌های جدید و ارزیابی آن‌ها، بهینه‌ساز به سمت تولید جواب بهینه با توجه به تابع هدف مورد نظر پیش می‌رود. مراحل توضیح داده شده، در شکل ۱ نشان داده شده است.

[1] Response Activities



شکل ۱- مراحل انجام مدیریت پیامدهای ناشی از حمله به شبکه

www.SID.ir

۳- معرفی الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها

الگوریتم بهینه‌سازی مورچه یک روش احتمالاتی برای حل مسائلی است که قابلیت تبدیل شدن به یک مسئله مسیریابی بهینه با استفاده از یک گراف را دارا می‌باشند. این روش در ابتدا در رساله دکترای مارکو دوریگو در سال ۱۹۹۲ معرفی شد [۱۵].

الگوریتمی که در این تحقیق برای حل مسئله در حالت دو هدفه مورد استفاده قرار گرفت، برگرفته از کار افشار و همکاران در سال ۲۰۰۸ است که برای حل مسئله بهره‌برداری از مخزن ارائه شده است [۱۶].

در این الگوریتم ابتدا مقدار اولیه فرومون برای تمامی مسیرها مساوی در نظر گرفته می‌شود. سپس مورچه‌های موجود در کولونی اول، تعدادی جواب تولید می‌کنند و بعد از انتخاب بهترین مورچه بر اساس مقدار تابع هدف اول، فرومون با توجه به بهترین مورچه موجود در این کولونی به‌روز می‌شود. به‌روز کردن فرومون بر اساس رابطه ۱ صورت می‌پذیرد

$$\tau_{ij} \rightarrow (1-\rho).\tau_{ij} + \Delta_{ij} \qquad (۱)$$

که در این رابطه

$\rho \in [0,1)$ پارامتری است که میزان از دست دادن فرومون را در هر دوره تبخیر نشان می‌دهد و Δ_{ij} یک مقدار بهنگام سازی است و برابر با $\frac{Q}{f}$ است. Q مقداری ثابت بوده که با توجه به شرایط مسئله تعریف می‌شود و مقدار فرومونی که توسط بهترین مورچه بر بهترین مسیر اضافه می‌شود را مشخص می‌کند. f تابع هدف به‌دست آمده برای بهترین مسیر است. در مرحله بعد جواب‌های جدید تولید می‌شوند. احتمال این که یک یال از گراف توسط مورچه‌های کولونی انتخاب شود از رابطه ۲ به‌دست می‌آید

$$p_{ij} = \frac{{\tau_{ij}}^{\alpha}.{\eta_{ij}}^{\beta}}{\sum_{k\in S}{\tau_{ik}}^{\alpha}.{\eta_{ik}}^{\beta}} \qquad (۲)$$

که در این رابطه

τ_{ij} مقدار فرومون موجود در یال ij گراف، P_{ij} احتمال انتخاب گره j توسط مورچه‌ای که به گره i رسیده و S مجموعه گره‌هایی است که مورچه وقتی در گره i واقع شده است می‌تواند آن‌ها را انتخاب کند. هنگامی که یک مورچه در گراف i از گراف تصمیم واقع شده است، فایده حاصل از حرکت به گره j با η_{ij}، که همان هدایت کننده کاوشی است، نمایش داده می‌شود. α و β در رابطه ۱ برای تنظیم وزن فرامان و اطلاعات کاوشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دوریگو و گامباردلا در سال ۱۹۹۷ رابطه ۳ را پیشنهاد کردند [۱۷]

$$j = \begin{cases} \arg\max_{h\in s} \max\{[\tau_{ih}(t)]^{\alpha}[\eta_{ih}(t)]^{\beta}\} & q \le q_0 \\ J & q > q_0 \end{cases} \qquad (۳)$$

که در این رابطه

q یک متغیر تصادفی است که با استفاده از یک توزیع نرمال از بازه [۰،۱] انتخاب می‌شود و q_0 یک پارامتر قابل تنظیم است. J نیز یک متغیر تصادفی است که مقدار آن با توجه به توزیع احتمالاتی P_{ij} انتخاب می‌شود. در مرحله آخر تمام مراحل انجام شده در کولونی ۱ برای کولونی ۲ تا پایان سیکل داخلی تکرار می‌شود. سپس مقدار توابع هدف برای بهترین مورچه‌ها تا پایان سیکل داخلی در هر سیکل، مقایسه شده و جواب‌های غیرمغلوب در بایگانی ذخیره می‌شوند و مقدار فرومون بر اساس مجموعه جواب‌های موجود در آرشیو به روز می‌شود. تمامی مراحل ذکر شده برای هر دو جامعه تا پایان سیکل خارجی تکرار می‌شوند. نمای کلی روش توضیح داده شده در شکل ۲ نمایش داده شده است.

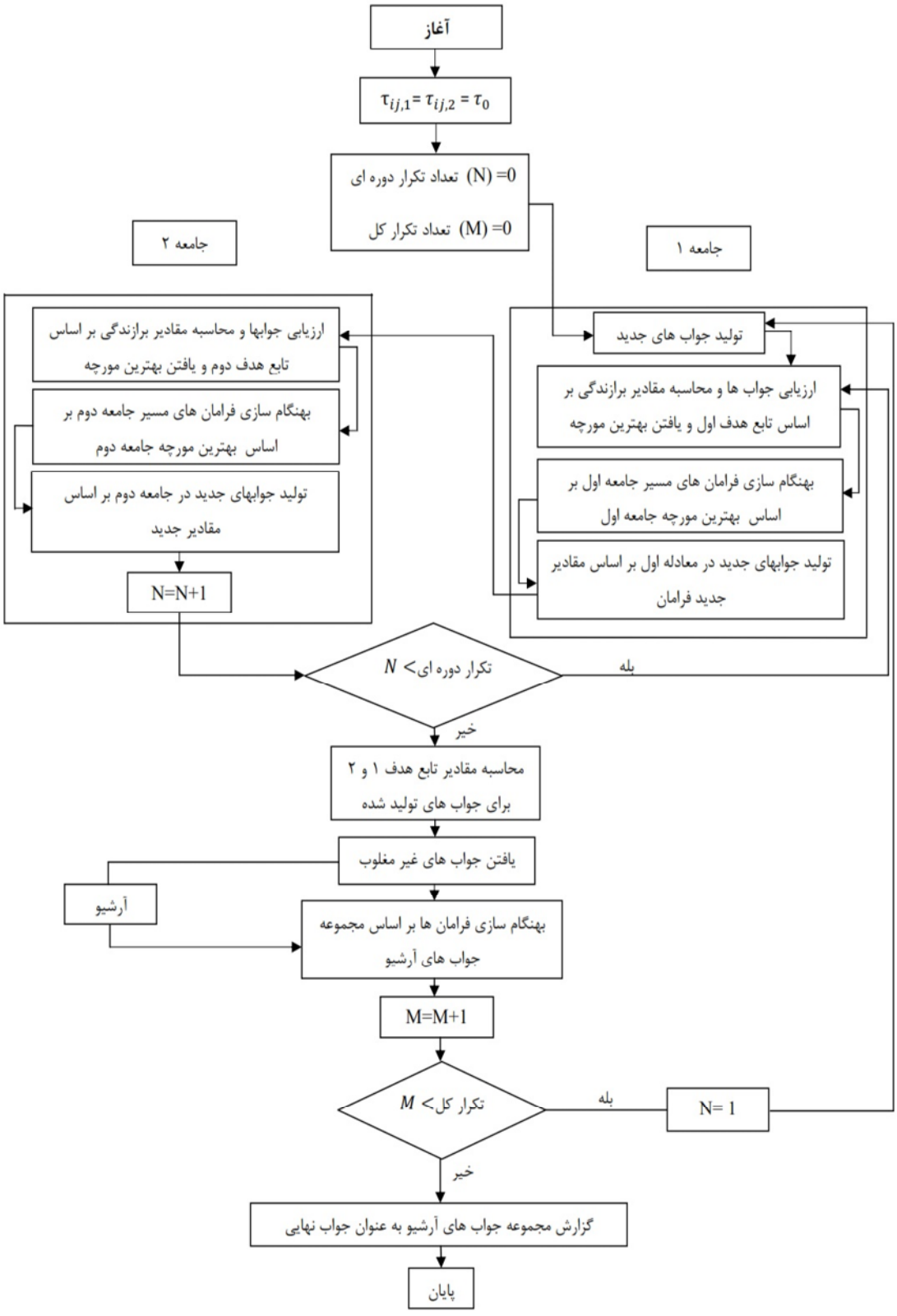
۴- مشخصات شبکه

شبکه به‌کار گرفته شده در این تحقیق، مثال ۳ نرم‌افزار ایپانت است که یک شبکه مدل‌سازی شده و آماده بوده و با نصب نرم‌افزار قابل دسترسی است. 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. دبی تخلیه از شیرهای آتش‌نشانی، ثابت و برابر با ۳/۴۷۳ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد و شبکه در معرض یک الگوی جریان تقاضای[1] ۲۴ ساعته قرار گرفت.

برای شبیه‌سازی کیفی تزریق آلاینده، در قسمت گزینه‌های کیفی[2] نرم‌افزار از شاخص شیمیایی استفاده شد. همچنین فرض شد که پخش مولکولی[3] آلاینده ۰/۰۰۱۱۲ فوت بر روز به توان دو است، پس پخش نسبی[4] آلاینده برابر با یک در نظر گرفته شد. مقدار پیش فرض ۰/۰۱ نیز به‌عنوان رواداری کیفی[5] مناسب در نظر گرفته شد. استفاده از مقدار بزرگ رواداری کیفی بر روی دقت جواب‌ها تأثیر می‌گذارد و مقدار کوچک آن، بار محاسباتی را زیاد می‌کند. همچنین فرض شد ماده شیمیایی تزریقی در این مطالعه یک ماده خطرناک و پایستار است که پس از تزریق به شبکه با آب واکنش نمی‌دهد. ضرایب موجود در قسمت گزینه‌های واکنشی[6] مثال ۳ این نرم‌افزار با این فرض سازگار است.

[1] Demand Flow Pattern
[2] Quality Options
[3] Molecular diffusivity
[4] Relative diffusivity
[5] Quality Tolerance
[6] Reactions Options

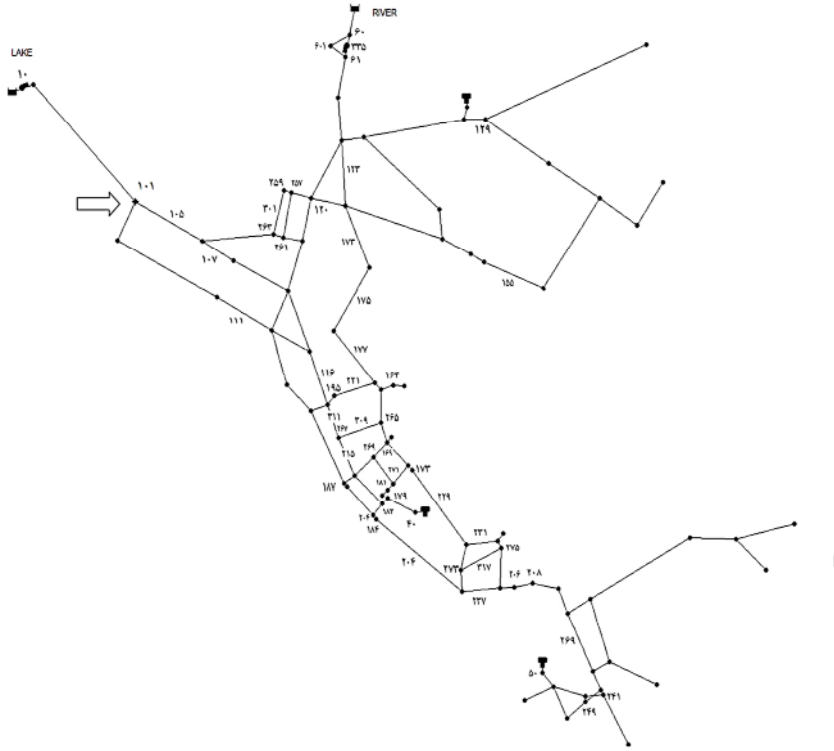
www.SID.ir
Archive of SID



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی الگوریتم جامعه مورچگان غیر مسلط [1]

[1]Non-dominated Ant Colony Optimization (NA-ACO) algorithm

www.SID.ir



شکل ۳- شبکه مثال ۳ نرم‌افزار ایپانت

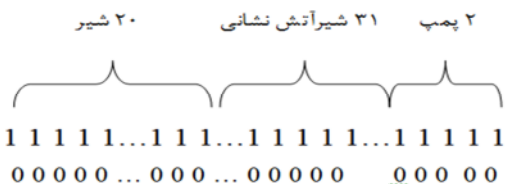
قبل از انجام مدیریت پیامدها تمامی شیرها در حالت باز و تمامی شیرهای آتش‌نشانی بسته بودند. همچنین فرض بر این بود که به‌منظور تشخیص ورود آلودگی، شبکه مجهز به چند ایستگاه پایش است و در این مطالعه تعداد و مکان مشخصی برای آنها در نظر گرفته نشد و تنها فرض بر این بود که با تجهیز شبکه به ایستگاه‌های پایش، امکان اعلام خطر و شروع مدیریت پیامد وجود دارد. نمایی از این شبکه با شماره لوله‌های مجهز به شیر، گره‌های مجهز به شیر آتش‌نشانی و پمپ‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است.

۵- حل مسئله مدیریت پیامدها به روش الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها

در این تحقیق با تجمیع نرم‌افزار ایپانت و بهینه‌ساز، هدف یافتن بهترین ترکیب از شیرها و شیرهای آتش‌نشانی و پمپ‌ها به‌منظور ایزولاسیون ناحیه آلوده شده و جلوگیری از گسترش آلودگی و تخلیه بود. حل این مسئله به کمک الگوریتم جامعه مورچه‌ها، مطابق مراحل زیر انجام شد.

۵-۱- طراحی گراف

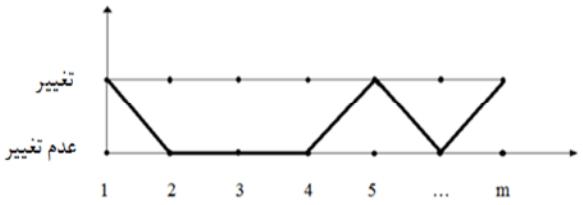
در این مسئله می‌توان یک ماتریس ۵۱×۲ تعریف نمود؛ در قسمت‌هایی که از پمپ‌ها نیز استفاده شده است، این ماتریس تبدیل به یک ماتریس ۵۳×۲ می‌شود. تمامی اعداد سطر اول ماتریس برابر با یک و تمامی اعداد سطر دوم برابر با صفر می‌باشند. در این ماتریس هر ستون مربوط به یکی از شیرها، شیرهای آتش‌نشانی و پمپ‌ها است. عدد صفر نشان دهنده عدم تغییر در حالت قبلی شیر (باز)، شیر آتش‌نشانی (بسته) و پمپ (خاموش) و عدد ۱ نشان دهنده تغییر حالت شیر به حالت بسته، شیر آتش‌نشانی به حالت باز و روشن شدن پمپ است (شکل ۴). با توجه به عدد انتخاب شده توسط مورچه، شیر، شیر آتش‌نشانی و یا پمپ مورد نظر بسته، باز و یا روشن می‌شود. در این تحقیق مانند مطالعات پریس و آستفیلد و همچنین پولین و همکاران در سال ۲۰۰۸ تا پایان زمان شبیه‌سازی شیرها، شیرهای آتش‌نشانی و پمپ‌ها در حالت تغییر داده شده باقی خواهند ماند [۹ و ۱۰]. با توجه به نیاز الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها به تعریف گراف، این ماتریس در شکل ۵ به گراف تبدیل شده است. در شکل ۵، m تعداد متغیرهای تصمیم است.



شکل ۴- ماتریس تعیین شیرها، شیرهای آتش‌نشانی و پمپ‌ها برای مدیریت پیامد

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵- گراف تعیین شیرها، شیرهای آتش‌نشانی و پمپ‌هایی که باید بسته، باز و یا روشن شوند

۵-۲- توابع برازش

در این تحقیق دو هدف اصلی کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده و کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی به‌صورت تک هدفه و دوهدفه در کنار کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی بررسی شدند. در مواردی که مدیریت پیامدها به‌صورت دو هدفه بررسی شده است، یکی از اهداف، کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی توسط گروه‌های اعزامی به منطقه است که مسئول عملیاتی کردن نتایج مدل‌سازی هستند. زیرا هر چه تعداد این ادوات که باید به‌طور همزمان در شبکه باز، بسته و یا روشن شوند بیشتر باشد، هزینه عملیاتی و مشکلات مدیریتی افزایش خواهد یافت. زیرا اولاً نیروی انسانی بیشتری مورد نیاز است که باید به محل‌های مربوطه اعزام شوند و ممکن است تعداد این ادوات از تعداد گروه‌های اعزامی بیشتر شود و این امر موجب اختلال در امر مدیریت پیامد می‌شود، ثانیاً با افزایش شیرهای آتش‌نشانی که باید باز شوند، میزان آب هدر رفته از شبکه بیشتر می‌شود. با جمع کردن تعداد شیرهای بسته شده، شیرهای آتش نشانی باز شده و پمپ‌های روشن شده، تعداد ادوات به‌کار گرفته شده در مدیریت پیامدها به دست می‌آید

$$F_1 = \sum_{k=1}^{20} VA_k + \sum_{j=1}^{31} HY_j + (\sum_{i=1}^{2} PU_i) \qquad (۴)$$

در رابطه ۴، F_1 مجموع ادوات به کار گرفته شده در جواب تولید شده توسط یک مورچه در مدیریت پیامدها است، به‌طوری که VA_K، HY_j و PU_i به‌ترتیب نشانگر حالات شیر kاُم، شیر آتش‌نشانی jاُم و پمپ iاُم بوده و مقدار آنها صفر و یا یک است. اگر در جواب تولید شده توسط یک مورچه، شیر kام بسته، شیر آتش‌نشانی jام باز و پمپ iام روشن شده باشد، VA_K، HY_j و PU_i برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر در نظر گرفته خواهند شد. به‌عنوان مثال اگر در یک رشته جواب تولید شده توسط بهینه ساز، پنج شیر بسته، هفت شیر آتش‌نشانی باز و یک پمپ روشن شده باشد، F_1 برابر با ۱۳ خواهد شد. به‌علت آنکه در برخی قسمت‌ها از پمپ‌ها استفاده نشده است، قسمت سوم رابطه ۴ در داخل پرانتز قرار داده شده است.

۵-۲-۱- کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده

کمینه کردن مجموع گره‌های آلوده شده در طول بازه شبیه‌سازی از زمان شروع مدیریت پیامد دو نتیجه مهم را به‌صورت غیر مستقیم در پی دارد:

۱- کاهش وسعت آلودگی در شبکه

۲- کاهش مدت زمانی که گره‌ها در بالای آستانه آلودگی هستند.

تعریف ریاضی تابع هدف بالا به صورت رابطه ۵ است

$$F_2 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{CM}}^{EPS} N(i,t) \qquad (۵)$$

که در این رابطه

F_2 نشانگر مجموع تعداد گره‌های آلوده، i نشانگر گره مصرف کننده، n تعداد کل گره‌های مصرف کننده، t_{CM} زمان شروع مدیریت پیامد و EPS کل مدت زمان شبیه‌سازی است. هرگاه غلظت گره i در زمان t کمتر از ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر باشد، $N(i,t)$ برابر با صفر و هرگاه مساوی و یا بیش از این مقدار باشد، $N(i,t)$ برابر با ۱ منظور می‌شود.

تعداد گره‌های آلوده از مجموع تمامی گره‌های مصرف کننده از زمان شروع مدیریت پیامد تا انتهای بازه شبیه‌سازی، در هر ۱۵ دقیقه شمارش شده و با هم جمع می‌شوند. این هدف در کنار هدف ناسازگار کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی به‌صورت دو هدفه بررسی شد.

۵-۲-۲- کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی

این هدف برای اولین بار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. هر چه شبکه زودتر به حالت عادی برگردد، تنش‌های ناشی از حمله به شبکه زودتر از بین رفته و افراد کمتری در معرض استفاده از آب آلوده قرار گرفته و بار روانی آن کاهش می‌یابد. تعریف ریاضی این تابع هدف به‌صورت زیر است

$$F_3 = T \mid \sum_{i=1}^{n} N(i,T) = 0 \qquad (۶)$$

که در آن

T زمانی است که شبکه به حالت عادی بازگشته است. حالت عادی در شبکه زمانی است که در آن زمان، غلظت آلودگی در تمام گره‌های مصرف کننده از یک حد آستانه‌ای کمتر شده و تا پایان شبیه‌سازی در همین وضعیت باقی بماند. $\sum_{i=1}^{n} N(i,T) = 0$ بیان ریاضی این وضعیت است، به‌طوری که اگر غلظت گره مصرف کننده i در زمان t، برابر و یا بیشتر از مقدار آستانه باشد، N برابر با ۱ و در

Archive of SID

www.SID.ir

غیر این صورت برابر صفر خواهد شد. تعداد گره‌های آلوده از مجموع تمامی گره‌های مصرف کننده از زمان شروع مدیریت پیامد تا انتهای بازه شبیه‌سازی، در هر ۱۰ دقیقه شمارش شده و با هم جمع می‌شوند. EPS نیز کل مدت زمان شبیه‌سازی است. زمان بازگشت شبکه به حالت عادی برای جواب‌هایی که در آنها تا پایان شبیه‌سازی، غلظت آلودگی در تمامی گره‌های مصرف کننده، در هیچ بازه زمانی از حد آستانه‌ای کمتر نمی‌شود، برابر با ۱۴۴۰ دقیقه (ساعت ۲۴)، یعنی زمان پایان شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. این هدف با سه رویکرد مختلف بررسی شده است. قبل از بررسی این سه رویکرد لازم است نکاتی درباره نحوه عملکرد پمپ‌ها در شبکه بیان شود. در نرم افزار ایپانت، چهار کنترل برای پمپ‌ها در نظر گرفته شده است که این کنترل‌ها به‌صورت زیر است:

1- Link 10 OPEN AT TIME 1
2- Link 10 CLOSED AT TIME 15
3- Link 335 OPEN IF Node 1 BELOW 17.1
4- Link 335 CLOSED IF Node 1 ABOVE 19.1

لینک‌های ۱۰ و ۳۳۵ دو پمپ موجود در شبکه و گره ۱ یکی از تانک‌های شبکه است. معانی کنترل‌های ۱ و ۳ به ترتیب به این صورت است: پمپ ۱۰ در ساعت ۰۱:۰۰ شبیه‌سازی روشن شود و اگر فشار گره ۱ زیر ۱۷/۱ پوند بر اینچ مربع شد، پمپ شماره ۳۳۵ روشن شود (معنی دو کنترل دیگر مشابه کنترل‌های ۱ و ۳ است). اگر این کنترل‌ها در شبکه اعمال شوند، به‌دست گرفتن کامل کنترل پمپ‌های شبکه در این حالت میسر نبوده و بررسی اثر دقیق آنها در مدیریت پیامد ممکن نخواهد بود، زیرا با توجه به این که مدیریت پیامد در ساعت ۱۳ شروع می‌شود، یکی از پمپ‌ها در ساعت ۱ شبیه‌سازی روشن شده ("کنترل" شماره ۱) و پمپ دیگر، ممکن است در حین انجام مدیریت پیامد، در صورت صدق "کنترل"های ذکر شده در بالا (۳ و ۴)، چندین بار خاموش و یا روشن شود. به بیان دیگر برای بررسی اثر پمپ‌ها، باید آن‌ها در ساعت ۱۳ که زمان شروع مدیریت پیامدها است روشن شده و تا پایان زمان مدیریت پیامدها (ساعت ۲۴) در این حالات باقی بمانند، تغییر حالت پمپ‌ها در طول این زمان بررسی اثر آن‌ها غیرممکن می‌سازد. در این تحقیق برای بررسی اثر پمپ‌ها در قسمتی که از آن‌ها استفاده شده است، این کنترل‌ها از شبکه حذف شده‌اند. رویکردهای بررسی شده به شرح زیر است:

الف) در این حالت کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی با حفظ کنترل‌های ذکر شده، در کنار هدف ناسازگار کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی به‌صورت دوهدفه بررسی شد. متغیرهای تصمیم در این قسمت، شیرها و شیرهای آتش‌نشانی بودند.

ب) در این حالت مدیریت پیامد به‌صورت تک‌هدفه بررسی شد و از شیرها و شیرهای آتش‌نشانی استفاده شد و به‌دلیل عدم استفاده از پمپ‌ها، کنترل‌ها حذف نشدند.

ج) در این حالت کنترل‌های مربوط به پمپ‌ها از شبکه حذف شدند و از دو پمپ موجود در شبکه، در مدیریت پیامد به‌صورت مستقیم استفاده شد. به‌طوری که پمپ‌ها در ساعت ۱۳ با شروع مدیریت پیامد، می‌توانند در کنار شیرها و شیرهای آتش‌نشانی مورد استفاده قرار بگیرند و در این ساعت روشن شوند و تا پایان زمان شبیه‌سازی در وضعیت روشن باشند. این قسمت به‌صورت تک‌هدفه بررسی شد.

۵-۳- انتخاب پارامترهای الگوریتم

برای حل مسئله مدیریت پیامدها لازم است که آنالیز حساسیت برای پارامترهای الگوریتم صورت گیرد. همچنین با توجه به این که این مسئله برای اولین بار با الگوریتم جامعه مورچه‌ها مطالعه می‌شود، منبعی برای تخمین اولیه پارامترها وجود ندارد. در قسمت‌هایی که مسئله به‌صورت تک هدفه بررسی شده است، با تغییر مقدار پارامترها و مقایسه مقادیر به‌دست آمده برای تابع هدف، آنالیز حساسیت صورت پذیرفت. به‌عنوان نمونه تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم برای کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی بدون استفاده از پمپ‌ها به این صورت است که در ابتدا چون هیچ کدام از پارامترها در دسترس نیستند، یک مقدار پیش فرض برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. تعداد سیکل‌های داخلی و خارجی برابر با ۵، تعداد مورچه‌ها در هر سیکل داخلی برابر با ۵۰۰، q_0 برابر با ۰/۵ و ضریب تبخیر برابر با ۰/۱ در نظر گرفته می‌شوند. برای تعیین مقدار Q_1 در ابتدا چون هیچ مقداری برای تابع هدف وجود ندارد، مقداری اختیاری (در این مسئله عدد ۱۰) به آن اختصاص داده شد و سپس مدل تحلیل شد. با توجه به این که قبل از شروع بهینه‌سازی فرومون، تمامی مسیرها برابر یک در نظر گرفته شدند، مقادیر بالای Q_1 ممکن است موجب همگرایی سریع جواب‌ها شود. پس مقدار آن به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که افزایش ناگهانی فرومون یک مسیر خاص، شانس انتخاب مسیرهای خوب احتمالی دیگر را کاهش ندهد. در این قسمت مقدار Q_1 از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ با نرخ افزایش ۱۰۰ واحد در هر مرحله بررسی شد و عدد ۷۰۰ منجر به تولید بهترین جواب شد و مشاهده شد که با افزایش Q_1 از ۷۰۰ مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد. سپس با در نظر گرفتن این مقدار برای Q_1، آنالیز حساسیت برای ضریب تبخیر، انجام شد. با در نظر گرفتن مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۹ برای ضریب تبخیر بهترین مقدار برای آن ۰/۰۵ به‌دست آمد. در مرحله بعد با آنالیز

www.SID.ir
Archive of SID

حساسیت برای تعداد ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ مورچه با نرخ افزایش ۱۰۰ مورچه، مشاهده شد که با افزایش تعداد مورچه‌ها از ۹۰۰، مقدار تابع هدف تغییر نکرده و این افزایش تنها بار محاسباتی را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش تعداد سیکل‌های داخلی و سپس سیکل‌های خارجی از عدد ۱۰ مشاهده شد که جواب‌های بهتری حاصل نمی‌شوند. با در نظر گرفتن مقادیر صفر تا ۰/۹ با نرخ افزایش ۰/۱ برای q_0، عدد ۰/۴ منجر به تولید بهترین جواب شد.

در قسمت‌هایی که مسئله به‌صورت دوهدفه بررسی شد، مراحل تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم مشابه حالت تک هدفه بود، با این تفاوت که جبهه پارتوی برتر ملاک انتخاب بهترین عدد برای یک پارامتر در نظر گرفته شد. همچنین در این حالت پس از تعیین مقدار Q_1 مقدار Q_2 نیز تعیین می‌شود. در تمامی حالات، ضریب تبخیر برابر با ۰/۰۵ و q_0 برابر ۰/۴ به‌دست آمد.

در مواردی که مسئله مدیریت پیامدها به‌صورت تک هدفه بررسی شد، تعداد سیکل‌های داخلی و خارجی برابر با ۱۰ و در مواردی که مدیریت پیامدها به‌صورت دو هدفه بررسی شد، تعداد سیکل‌های داخلی برابر با ۱۰ و تعداد سیکل‌های خارجی برابر با ۱۵ حاصل شد. در حل این مسئله هدایت کننده کاوشی کاربردی ندارد، زیرا برای مدل مهم نیست که در چندمین انتخاب خود کدام شیر، شیر آتش‌نشانی و یا پمپ را برگزیده است. بنابراین مقدار β برابر با صفر منظور می‌شود. به‌همین دلیل و از آنجا که α اهمیت اثر مقدار فرومون را نسبت به اثر مقدار کاوشی مشخص می‌کند، مقدار α برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. همچنین به‌منظور جلوگیری از حذف شدن جواب‌های خوبی که ممکن است در نظر گرفته نشده باشند، مقدار حداقل فرومون برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. مقدار سایر پارامترهای به‌دست آمده برای اهداف مختلف پس از انجام آنالیز حساسیت، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. در این جدول Q_2 مربوط به هدف کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی و Q_1 مربوط به هدف دیگر بخش مربوطه است.

جدول ۱- پارامترهای به دست آمده در حل مسئله مدیریت پیامدها برای اهداف بررسی شده

بخش مورد بررسی / پارامترها	۵-۲-۱	۵-۲-۲ (رویکرد اول)	۵-۲-۲ (رویکرد دوم)	۵-۲-۲ (رویکرد سوم)
تعداد مورچه‌های کولونی	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۹۰۰	۹۰۰
Q_1	۱۸۰	۵۰۰	۷۰۰	۶۰۰
Q_2	۳	۳	-	-

۶- قیدها

یکی از قیدهای در نظر گرفته شده در بررسی مدیریت پیامدها قید عدم ایجاد فشار منفی در گره‌های مصرف کننده است که در تمامی موارد به جز حالتی که کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی به‌صورت دوهدفه بررسی شده در نظر گرفته شده است. علت این امر به‌دست آوردن دامنه بیشتری از جواب‌ها توسط بهینه‌ساز بود. فشار به‌وجود آمده در گره‌های مصرف کننده در هر ۱۵ دقیقه از شبیه‌سازی به‌منظور اطمینان از عدم وجود فشار منفی، از زمان شروع مدیریت پیامد تا انتهای بازه شبیه‌سازی شمارش می‌شوند و اگر یک رشته جواب، منجر به ایجاد فشار منفی در گره‌ای از گره‌های مصرف کننده شود، از آن جواب صرف نظر خواهد شد. البته در این قید از یک فرض ساده کننده استفاده شد. زیرا از آنجا که دبی‌های خروجی متأثر از فشار هستند، واقع بینانه‌تر آن است که قید فشار بزرگ‌تر از حداقل فشار استاندارد اعمال شود که توصیه می‌شود در مطالعات بعدی مورد توجه قرار گیرد.

در این مقاله در مواردی که مدیریت پیامدها به‌صورت تک‌هدفه بررسی شد، قید عدم تجاوز تعداد عملیات واکنشی از ۲۰ نیز اعمال شد. تعداد عملیات واکنشی شامل تعداد گروه‌های اعزامی به مناطق مورد نظر می‌باشند که مسئول عملیاتی کردن نتایج مدل‌سازی هستند. این نتایج شامل باز و یا بستن شیرها و شیرهای آتش‌نشانی و یا روشن کردن پمپ‌ها هستند که از حل مسئله توسط بهینه‌ساز حاصل شده‌اند. زیرا هر چه تعداد این ادوات که باید به‌طور همزمان در شبکه باز، بسته و یا روشن شوند بیشتر باشد، هزینه عملیاتی و مشکلات مدیریتی افزایش خواهد یافت. قید توقف برنامه نیز تکمیل شدن سیکل‌های خارجی در نظر گرفته شده است.

۷- مشخصات سناریوی حمله به شبکه

حمله به شبکه در ساعت ۹:۰۰ از شبیه‌سازی در گره شماره ۱۰۱ و با نرخ تزریق ۰/۰۰۶ کیلوگرم بر ثانیه به مدت ۷ ساعت رخ می‌دهد. این نرخ و مدت زمان تزریق مشابه مقداری است که پریس و آستفیلد در مطالعه خود در سال ۲۰۰۸ بر روی همین شبکه انجام دادند [۹]. محل حمله به شبکه در شکل ۳ با یک پیکان نمایش داده شده است. با فرض ۴ ساعت زمان تأخیر، مدیریت پیامدها در ساعت ۱۳ شروع می‌شود و تا پایان شبیه‌سازی ادامه پیدا خواهد کرد. با توجه به مطالعات مشابه قبلی مانند مقالات پریس و آستفیلد در سال ۲۰۰۸ و همچنین هاکستون و اوبر در سال ۲۰۱۰، این زمان که مدت زمان لازم برای تشخیص محل تزریق آلودگی، اعزام نیروها به‌منظور بستن شیرها و باز کردن شیرهای آتش‌نشانی و روشن کردن پمپ‌ها و همچنین اعلام خطر عمومی است، زمان

Archive of SID
www.SID.ir

مناسبی می‌باشد [۹ و ۱۴]. همچنین باید توجه کرد که هر چه زمان بیشتری به مدیریت پیامدها و تخلیه آلودگی اختصاص داده شود، نتایج مطلوب‌تری به‌دست می‌آید، اما هزینه‌های محاسباتی و عملیاتی نیز بیشتر خواهند شد.

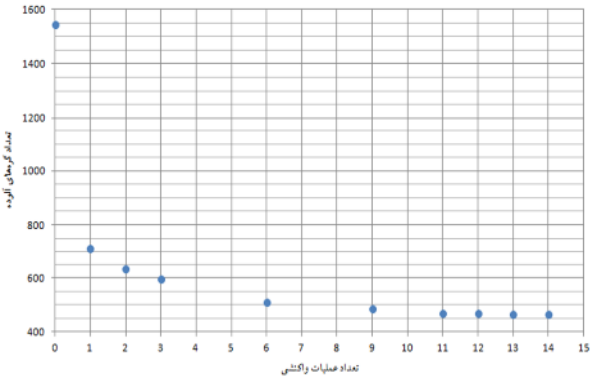
۸- نتایج

۸-۱- کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده

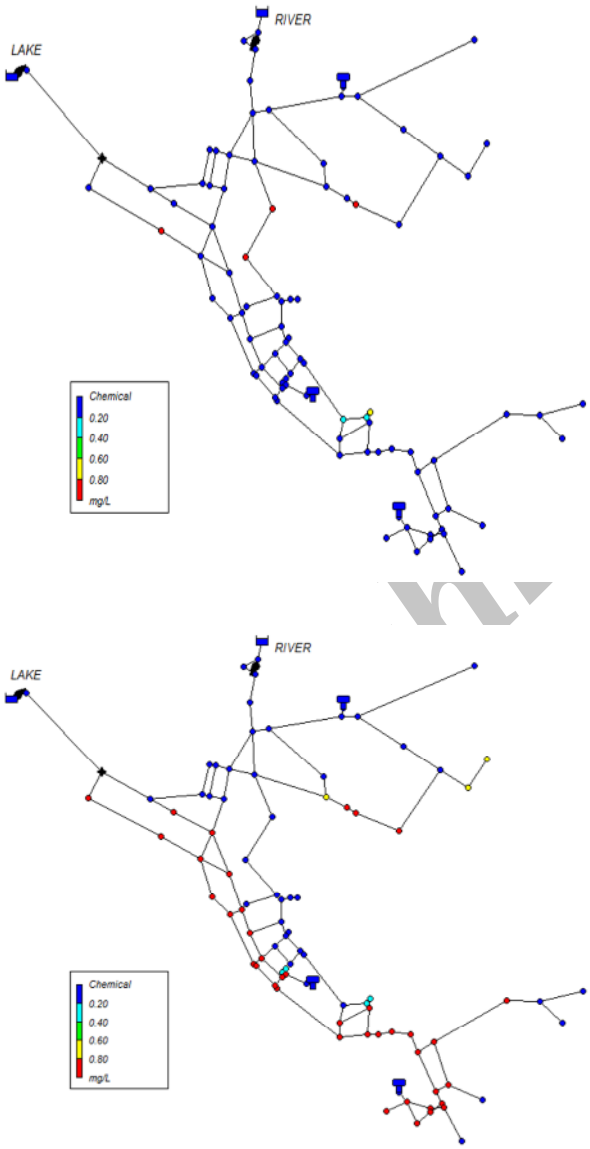
با توجه به جدول ۲، اگر مدیریت پیامد صورت نگیرد، ۱۵۴۵ گره در بازه زمانی ۲۴ ساعته شبیه‌سازی، آلوده می‌شوند، اما تنها با انجام یک عملیات واکنشی، که بستن لوله ۱۷۷ است، تعداد گره‌های آلوده، ۵۴ درصد نسبت به حالتی که هیچ عملیات واکنشی انجام نشود، کاهش می‌یابد و این امر، تأثیر مثبت مدیریت پیامد را در کاهش گره‌های آلوده نشان می‌دهد. این لوله به علت قرار گرفتن در مرکز شبکه، از موقعیت بسیار مناسبی برای جلوگیری از گسترش آلودگی به بخش‌های مرکزی و جنوبی شبکه، که تمرکز اکثر گره‌ها در آن منطقه است، را دارا است. همچنین شیرها در بررسی این حالت، نقش پررنگ‌تری را نسبت به شیرهای آتش‌نشانی دارند. به‌طوری که تا شش

جدول ۲- نتایج حاصل از کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده با توجه به تعداد عملیات واکنشی

تعداد عملیات	تعداد گره‌های آلوده	شیرها	شیرهای آتش‌نشانی
۰	۱۵۴۵	-	-
۱	۷۱۳	۱۷۷	-
۲	۶۳۳	۱۷۳ ۱۱۱	-
۳	۵۹۶	۲۶۹ ۱۷۵ ۱۱۱	-
۶	۵۱۰	۱۷۷ ۱۵۵ ۱۱۱ ۱۰۷ ۳۱۷ ۲۶۹	-
۹	۴۸۵	۱۷۵ ۱۵۵ ۱۱۱ ۱۰۷ ۳۱۷ ۳۰۱ ۲۶۹ ۲۱۵	۲۰۶
۱۱	۴۶۸	۱۷۷ ۱۵۵ ۱۱۱ ۱۰۷ ۳۰۱ ۲۶۹ ۲۳۷ ۲۱۵ ۳۰۹	۱۸۳ ۱۷۹
۱۲	۴۶۷	۱۷۷ ۱۵۵ ۱۱۱ ۱۰۷ ۳۰۱ ۲۶۹ ۲۳۷ ۲۱۵ ۳۱۷ ۳۱۱	۱۸۳ ۱۷۹
۱۳	۴۶۵	۱۷۷ ۱۵۵ ۱۱۱ ۱۰۷ ۳۰۱ ۲۶۹ ۲۳۷ ۲۱۵	۱۷۹ ۱۶۹ ۵۰ ۲۰۶ ۱۸۳
۱۴	۴۶۴	۱۷۷ ۱۵۵ ۱۱۱ ۱۰۷ ۳۰۱ ۲۶۹ ۲۳۷ ۲۱۵ ۳۱۷	۱۸۳ ۱۷۹ ۲۷۱ ۱۸۴ ۲۷۵



شکل ۶- پارتوی بهینه حاصل از الگوریتم مورچه به منظور کاهش تعداد گره‌های آلوده



شکل ۷- نمایی از گره‌های آلوده در ساعت ۱۸ از شبیه‌سازی بدون انجام مدیریت پیامد (شکل پایین) و با انجام شش عملیات واکنشی (شکل بالا)

Archive of SID

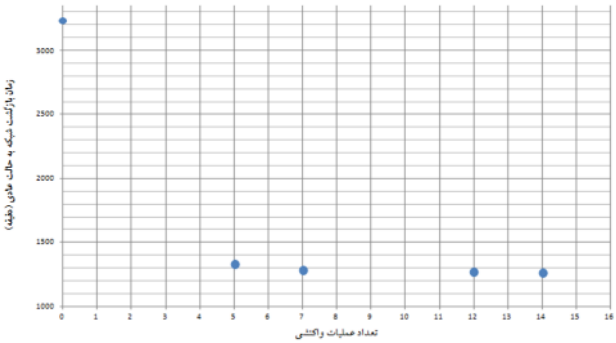
www.SID.ir

عملیات واکنشی، از شیرهای آتش‌نشانی، در مدیریت پیامد استفاده نشده است. جبهه پارتوی حاصل از کمینه سازی تعداد گره‌های آلوده در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۷، نمایی از گره‌های آلوده در ساعت ۱۸ شبیه‌سازی در دو حالت با و بدون انجام مدیریت پیامدها نمایش داده شده است. تفاوت محسوس در تعداد گره‌های آلوده، موفقیت نتیجه به‌دست آمده از حل مسئله مدیریت پیامدها را نشان می‌دهد. این اهداف ناسازگار در مقاله آلفونسو و همکاران در سال ۲۰۱۰ برای یک شبکه دیگر بررسی شده است که مقایسه جواب‌ها، کاهش چشمگیرتر تعداد گره‌های آلوده با توجه به تعداد عملیات واکنشی در این تحقیق را نشان می‌دهد [۱۳].

۸-۲- کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی

۸-۲-۱- بررسی مدیریت پیامد به صورت دو هدفه

جبهه پارتوی به‌دست آمده از حل مسئله در این قسمت، در شکل ۸ و مقادیر آنها به‌طور دقیق‌تر در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بدون انجام مدیریت پیامدها، ۳۲۳۰ دقیقه زمان لازم است تا شبکه به حالت عادی باز گردد، اما با انجام مدیریت پیامدها این زمان تا ۱۲۶۰ دقیقه کاهش می‌یابد. جواب‌هایی که شامل بیش از پنج عملیات واکنشی می‌باشند موجب ایجاد فشار منفی در برخی گره‌ها و در برخی از ساعات شبیه‌سازی می‌شوند که در جدول ۴ مقادیر این فشارهای منفی برای جواب‌های شامل ۱۲ و ۱۴ عملیات واکنشی در ساعت ۱۸ و برای جواب شامل هفت عملیات در ساعت ۲۲ نمایش داده شده‌اند. همچنین برای برای جواب‌های شامل ۱۲ و ۱۴ عملیات واکنشی، فشار منفی در گره‌های ذکر شده در جدول ۴، از ساعت ۱۳ یعنی زمان شروع مدیریت پیامد، و برای جواب با هفت عملیات واکنشی از ساعت ۲۲ تا پایان زمان شبیه‌سازی پدیدار می‌شوند.



شکل ۸- پارتوی بهینه حاصل از الگوریتم مورچه به منظور کاهش زمان برگشت شبکه به حالت عادی با در نظر گرفتن تعداد عملیات واکنشی

جدول ۳- نتایج حاصل از کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی با توجه به تعداد عملیات واکنشی

تعداد عملیات واکنشی	زمان بازگشت (دقیقه)	شیرها	شیرهای آتش‌نشانی
۰	۱۴۴۰	-	-
۵	۱۳۳۰	۱۰۷ ۱۲۳ ۲۳۱ ۳۱۱	۵۰
۷	۱۲۸۰	۱۰۵ ۱۰۷ ۱۲۳ ۲۲۱ ۲۲۹ ۳۰۱ ۳۱۱	-
۱۲	۱۲۷۰	۱۰۵ ۱۰۷ ۱۲۳ ۲۲۱ ۲۲۹ ۲۶۹ ۳۰۱ ۳۱۱	۱۷۳ ۱۸۳ ۲۶۹ ۲۷۱
۱۴	۱۲۶۰	۱۰۵ ۱۰۷ ۱۲۳ ۲۲۱ ۲۲۹ ۲۶۹ ۳۰۱ ۳۱۱	۵۰ ۱۷۳ ۱۸۱ ۱۸۷ ۲۰۶ ۲۷۵

جدول ۴- فشارهای منفی ایجاد شده در برخی از گره‌های مصرف کننده در اثر اجرای مدیریت پیامدها

تعداد عملیات / شماره گره	۱۹۹	۲۰۱	۲۰۳	۲۰۵	۲۰۷	۲۰۹	۲۱۱	۲۱۳	۲۱۵	۲۱۷	۲۱۹	۲۲۵
فشار منفی تولید شده با توجه به تعداد عملیات(مگاپاسکال)	۰/۱۰۱	۰/۱۰۸	۰/۱۱۴	۰/۱۱۷	۰/۰۸۶	۰/۰۳۱	۰/۰۵۴	۰/۰۵۱	۰/۰۵۲	۰/۰۴۸	۰/۰۴۲	۰/۰۵۴
۷	۰/۱۲۲	۰/۱۲۹	۰/۱۳۵	۰/۱۳۷	۰/۱۰۶	۰/۰۵۰	۰/۰۷۳	۰/۰۷۱	۰/۰۷	۰/۰۶۷	۰/۰۶۱	۰/۰۷۳
۱۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	-	-	-	-	-	-	-
۱۴												

Archive of SID
www.SID.ir

۸-۲-۲- بررسی مدیریت پیامد به‌صورت تک هدفه با قید عدم ایجاد فشار منفی بدون استفاده از پمپ‌ها

جواب برتر در این حالت ۱۳۳۰ دقیقه است. شیرهای ۱۰۷، ۱۲۳، ۲۱۵، ۲۲۱، ۲۳۱ و ۳۰۹ و شیرهای آتش نشانی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۶۰۱، ۶۱، ۱۷۳، ۱۸۱، ۱۸۴، ۱۸۷، ۲۰۴، ۲۴۱، ۲۵۷و ۲۶۵ جواب‌های به‌دست آمده با بهینه‌ساز هستند. در مقایسه تعداد عملیات واکنشی این جواب با جواب مشابه قسمت قبل، مشخص می‌شود که بازگرداندن شبکه به حالت عادی با قید عدم ایجاد فشار منفی، مستلزم هزینه بیشتری است.

۸-۲-۳- بررسی مدیریت پیامد به صورت تک هدفه با قید عدم ایجاد فشار منفی با استفاده از پمپ‌ها

زمان بازگشت در این قسمت با به کارگیری پمپ‌ها به ۹۷۰ دقیقه کاهش یافت که این عدد از تمامی جواب‌های به‌دست آمده در کمینه کردن زمان بازگشت برتر است. شیرهای شماره ۱۰۵، ۱۲۳، ۱۵۵، ۲۰۴، ۲۱۵، ۲۳۷، ۳۰۱ و شیرهای آتش‌نشانی شماره ۵۰، ۱۲۰، ۱۷۹، ۱۸۷، ۲۰۴، ۲۰۶، ۲۴۹، ۲۵۷، ۲۶۵، ۲۶۹، ۲۷۵ و پمپ شماره ۳۳۵ جواب‌های این قسمت می‌باشند. با توجه به نتیجه به‌دست آمده، نقش اساسی استفاده از پمپ‌ها در مدیریت پیامدها روشن می‌شود که در مطالعات قبلی به آن توجهی نشده است.

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدیریت پیامدها با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌های تک هدفه و چند هدفه و با اهداف مختلف بررسی شد و نتایج حاصل شده، تأثیر مثبت مدیریت پیامدها و استفاده از شیرها، شیرهای آتش‌نشانی و به‌خصوص پمپ‌ها بر کاهش اثرات مخرب آلودگی بر سلامت عموم را نشان دادند. در این مطالعه، فرضیات به کار گرفته شده برخلاف فرضیات استفاده شده در برخی از مطالعات قبلی به‌صورت واقع بینانه در نظر گرفته شدند. نتایج به‌دست آمده از حل مدل توسط الگوریتم جامعه مورچه‌ها کارآمدی استفاده از این نوع الگوریتم‌های فراکاوشی در حل این‌گونه مسائل را نشان داد. همچنین در این تحقیق با تعریف یک هدف جدید-کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی مدیریت پیامدها مورد بررسی قرار گرفت و برای اولین بار نقش پمپ‌ها در این مسئله ارزیابی شد. یکی از مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، مشخص شدن نقش اساسی پمپ‌ها در بهبود کیفیت جواب‌ها نسبت به حالت عدم استفاده از پمپ بود. الگوریتم‌های دیگری مشابه این الگوریتم نظیر الگوریتم ژنتیک در مطالعه مدیریت پیامدها مورد استفاده قرار گرفتند، اما بررسی کارهای گذشته نشان می‌دهد که هنوز از این الگوریتم در حل این‌گونه مسائل استفاده نشده است.

۱۰- مراجع

1. Ostfeld, A., and Salomons, E. (2004). "Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security." *J. Water Resour. Plann. Manage*., 130(5), 377-385.
2. Berry, J., Hart, W.E., Phillips, C. A., Uber, J. G., and Watson, J. P. (2006). "Sensor placement in municipal water networks with temporal integer programming models." *J. Water Resour. Plann. Manage*., 132(4), 218-224.
3. Propato, M. (2006). "Contamination warning in water networks: General mixed-integer linear models for sensor location design." *J. Water Resour. Plann. Manage*., 132(4), 225-233.
4. Laird, C.D., Biegler, L.T., and Waanders, B. (2006). "Mixed-integer approach for obtaining unique solutions in source inversion of water networks. " *J. Water Resour. Plann. Manage*., 132(4), 242-251.
5. Preis, A., and Ostfeld, A. (2006). "Contamination source identification in water systems: A hybrid model trees linear programming scheme." *J.Water Resour. Plann. Manage*., 132(4), 263-273.
6. De Sanctis, A., Shang, F., and Uber, J. (2006). "Determining possible contaminant sources through flow path analysis." *Proceedings of the 8th Water Distribution System Analysis Symposium*, Cincinnati, OH.
7. US EPA. (2003). *Response protocol toolbox: Planning for and responding to drinking water contamination threats and incidents - overview and application*, US Environmental Protection Agency.
8. Baranowski, T. M., and LeBoeuf, E. J. (2006). "Consequences management optimization for contaminant detection and isolation." *J. Water Resour. Plann. Manage*., 132(4), 274-282.
9. Preis, A., and Ostfeld, A. (2008). "Multiobjective contaminant response modelling for water distributions systems security." *J. Hydroinform*.,10(4), 267-274.

Archive of SID
www.SID.ir

10. Baranowski, T.M., and LeBoeuf, E.J. (2008). "Consequences management utilizing optimization. " *J. Water Resour. Plann. Manage*., 134(4), 386-394.
11. Poulin, A., Mailhot, A., Grondin, P., Delorme, L., Periche, N., and Villeneuve, J.P. (2008). "A heuristic approach for operational response to drinking water contamination." *J. Water Resour. Plann. Manage*., 134(5), 457-465.
12. Poulin, A., Mailhot, A., Periche, N., Delorme, L., and Villeineuve, J.-P. (2010). "Planning unidirectional flushing operations as a response to drinking water distribution system contamination." *J. Water Resour. Plann. Manage*. 136(6), 647-657.
13. Alfonso, L., Jonoski., A., and Solomatine, D. (2010). "Multiobjective optimization of operational responses for contaminant flushing in water distribution networks." *Water Resour. Plann. Manage*., 136(1), 48-58.
14. Haxton, T., and Uber, J.G. (2010). "Flushing under source uncertainties." < oaspub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p(download)id=496511> (July. 11, 2011).
15- Dorigo, M. (1992). "Optimization, learning and natural algorithms. " PhD Thesis, Politecnico di Milano, Italy.
16. Afshar, A., Sharifi, F., and Jalali, M.R.(2009). "Non-dominated archiving multi-colony ant algorithm for multi-objective optimization: Application to multi-purpose reservoir operation." *Engineering Optimization*, 41(4), 313-325.
17. Dorigo, M., and Gambardella, L.M. (1997). "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 53-66.

Archive of SID

www.SID.ir