

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

عباس افشار<sup>۲</sup>

احسان نجفی<sup>۱</sup>

پذیرش ۹۲/۴/۱۲

دریافت ۹۱/۴/۶

## چکیده

یکی از مهم‌ترین خطرات تهدید کننده شبکه‌های آب شهری، حملات عمدی به منظور 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 به منظور 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 به صورت 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<sup>1</sup>

A. Afshar<sup>2</sup>

(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.

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

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

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 به منظور 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<sup>۳</sup> استفاده کردند و اثر فشار منفی به وجود آمده به دلیل 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<sup>۴</sup> 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 به منظور 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 ایپانت<sup>۵</sup> بررسی نمودند [۱۳]. هاکستون و اویر در سال ۲۰۱۰ عدم قطعیت در محل حمله به شبکه در مسئله مدیریت پیامدهای این دسته از حملات را با در نظر

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 به دلیل 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup>، توصیه‌هایی را برای کمینه کردن خطرات ناشی از این تهدیدات ارائه داده است. توصیه‌های این پروتکل 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،

<sup>3</sup> Nondominated Sorted Genetic Algorithm

<sup>4</sup> Demand

<sup>5</sup> EPANET

<sup>1</sup> Mixed-integer Approach

<sup>2</sup> U.S. Environmental Protection Agency Response Protocol Toolbox

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].

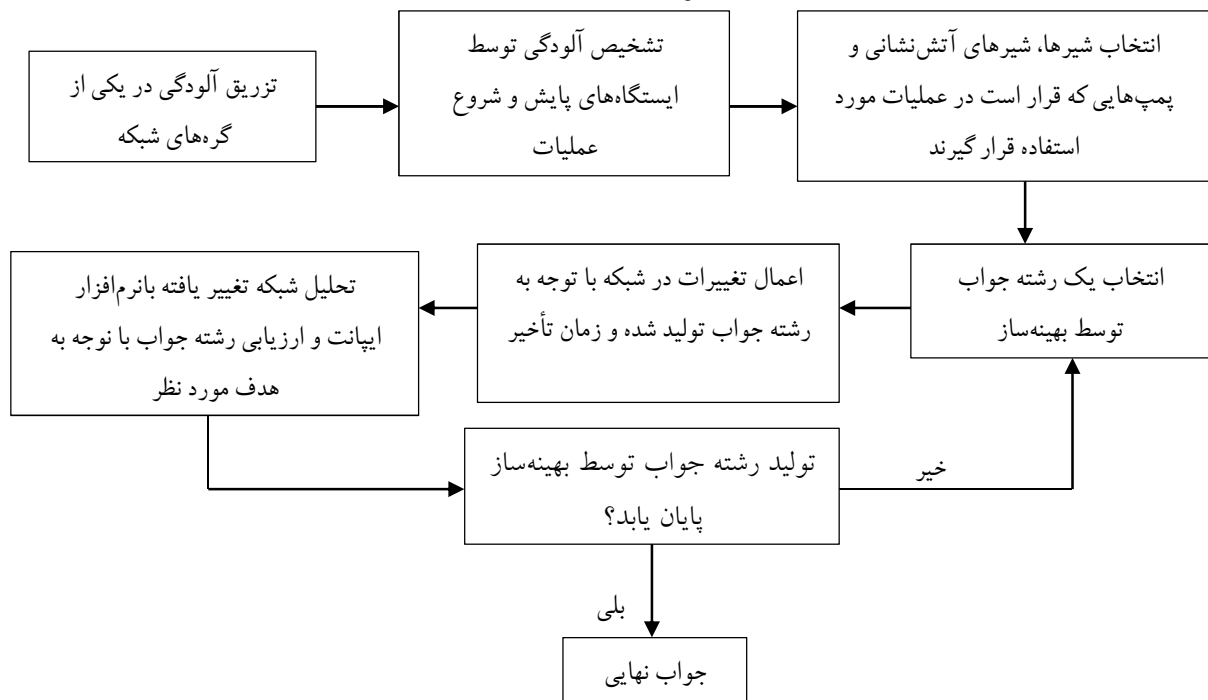
در برخی از مطالعات گذشته از فرضیات غیر واقع‌بینانه‌ای استفاده شده است. امکان تخلیه آب آلوده از تمامی گره‌ها، قابلیت بسته شدن تمامی لوله‌ها و در نظر نگرفتن فشار منفی در شبکه در اثر اعمال تغییرات در شبکه، از جمله آنها هستند و در این مقالات اشاره‌ای به غیرمناسب بودن این فرضیات نشده است. در این پژوهش ابتدا مسئله با هدف کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده در کنار هدف متعارض کمینه کردن تعداد عملیات واکنشی<sup>۱</sup> 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 مورچه‌گان 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 مصرف‌کننده، 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.

<sup>۱</sup> Response Activities



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

### 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 فرمون 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، فرمون با توجه به بهترین مورچه موجود در این کولونی به‌روز می‌شود. به‌روز کردن فرمون بر اساس رابطه ۱ صورت می‌پذیرد

$$\tau_{ij} \rightarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta_{ij} \quad (1)$$

که در این رابطه

$\rho \in [0, 1]$  پارامتری است که میزان از دست دادن فرمون را در هر دوره تبخیر نشان می‌دهد و  $\Delta_{ij}$  یک مقدار بهنگام‌سازی است و برابر با  $\frac{Q}{f}$  است.  $Q$  مقداری ثابت بوده که با توجه به شرایط مسئله تعریف می‌شود و مقدار فرمونی 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

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{k \in S} \tau_{ik}^{\alpha} \cdot \eta_{ik}^{\beta}} \quad (2)$$

که در این رابطه

$\tau_{ij}$  مقدار فرمون 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  $\eta_{ij}$ ، که همان هدایت‌کننده کاوشی است، نمایش داده می‌شود.  $\alpha$  و  $\beta$  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]

(۳)

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

که در این رابطه

$q$  یک متغیر تصادفی است که با استفاده از یک توزیع نرمال از بازه  $[0, 1]$  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 فرمون بر اساس مجموعه جواب‌های موجود در آرشیو به‌روز 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  $3/473$  لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد و شبکه در معرض یک الگوی جریان تقاضای  $24$  ساعته قرار گرفت.

برای شبیه‌سازی کیفی تزریق آلاینده، در قسمت گزینه‌های کیفی<sup>۲</sup> نرم‌افزار از شاخص شیمیایی استفاده شد. همچنین فرض شد که پخش مولکولی<sup>۳</sup> آلاینده  $0/0112$  فوت بر روز به توان دو است، پس پخش نسبی<sup>۴</sup> آلاینده برابر با یک در نظر گرفته شد. مقدار پیش فرض  $0/01$  نیز به‌عنوان رواداری کیفی<sup>۵</sup> 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<sup>۶</sup> مثال ۳ این نرم‌افزار با این فرض سازگار است.

<sup>1</sup> Demand Flow Pattern

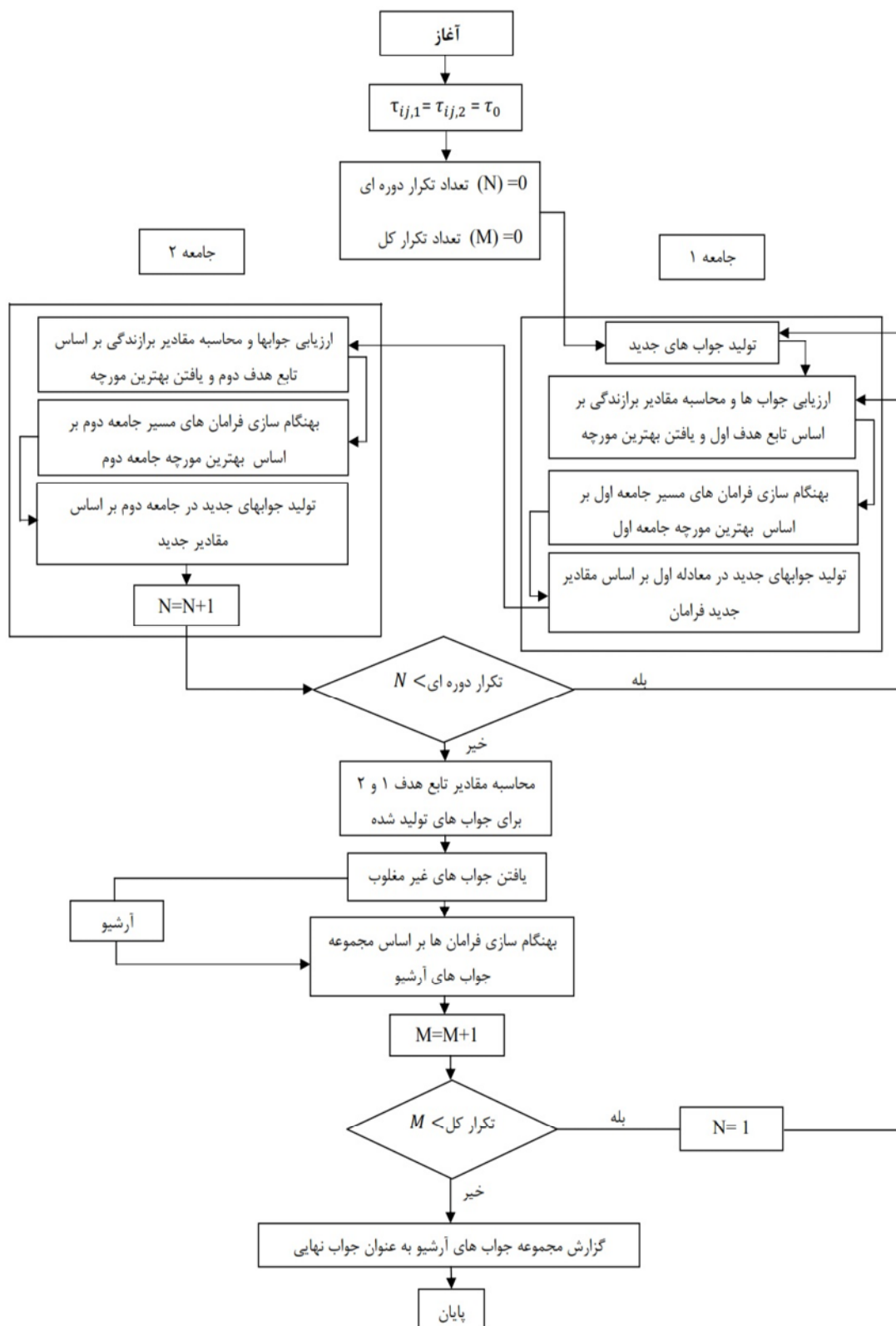
<sup>2</sup> Quality Options

<sup>3</sup> Molecular diffusivity

<sup>4</sup> Relative diffusivity

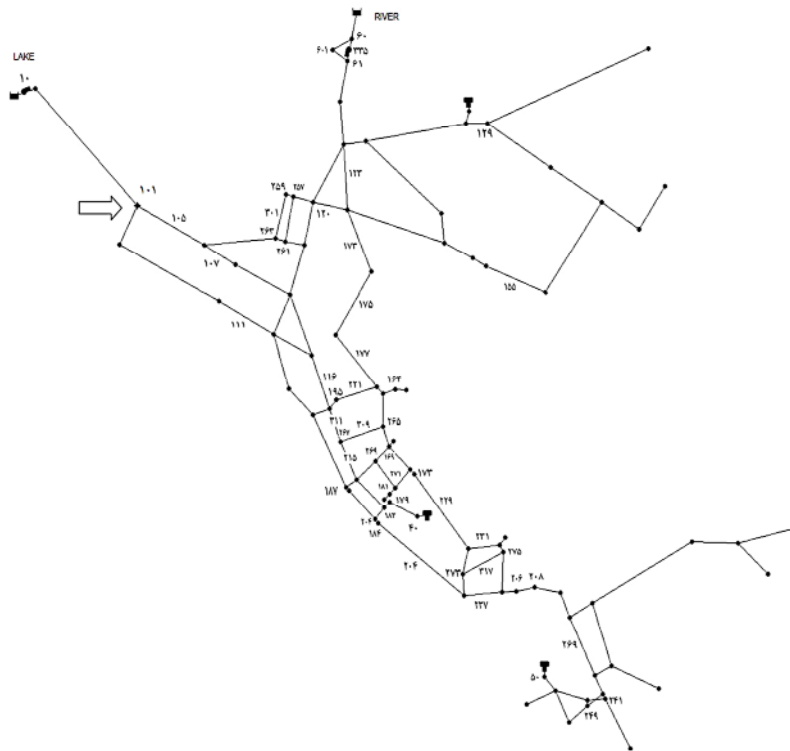
<sup>5</sup> Quality Tolerance

<sup>6</sup> Reactions Options



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی الگوریتم جامعه مورچگان غیر مسلط<sup>۱</sup>

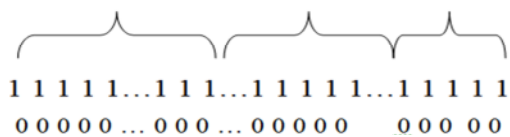
<sup>۱</sup>Non-dominated Ant Colony Optimization (NA-ACO) algorithm



شکل ۳- شبکه مثال ۳ نرم افزار ایپانت

به یک ماتریس  $2 \times 53$  می شود. تمامی اعداد سطر اول ماتریس برابر با یک و تمامی اعداد سطر دوم برابر با صفر می باشند. در این ماتریس هر ستون مربوط به یکی از شیرها، شیرهای آتش نشانی و پمپها است. عدد صفر نشان دهنده عدم تغییر در حالت قبلی شیر (باز)، شیر آتش نشانی (بسته) و پمپ (خاموش) و عدد ۱ نشان دهنده تغییر حالت شیر به حالت بسته، شیر آتش نشانی به حالت باز و روشن شدن پمپ است (شکل ۴). با توجه به عدد انتخاب شده توسط مورچه، شیر، شیر آتش نشانی و یا پمپ مورد نظر بسته، باز و یا روشن می شود. در این تحقیق مانند مطالعات پریس و آستفیلد و همچنین پولین و همکاران در سال ۲۰۰۸ تا پایان زمان شبیه سازی شیرها، شیرهای آتش نشانی و پمپها در حالت تغییر داده شده باقی خواهند ماند [۹ و ۱۰]. با توجه به نیاز الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها به تعریف گراف، این ماتریس در شکل ۵ به گراف تبدیل شده است. در شکل ۵،  $m$  تعداد متغیرهای تصمیم است.

۲ پمپ      ۳۱ شیر آتش نشانی      ۲۰ شیر



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

قبل از انجام مدیریت پیامدها تمامی شیرها در حالت باز و تمامی شیرهای آتش نشانی بسته بودند. همچنین فرض بر این بود که به منظور 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 لوله های مجهز به شیر، گره های مجهز به شیر آتش نشانی و پمپها در شکل ۳ نمایش داده شده است.

## ۵- حل مسئله مدیریت پیامدها به روش الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها

در این تحقیق با تجمیع نرم افزار ایپانت و بهینه ساز، هدف یافتن بهترین ترکیب از شیرها و شیرهای آتش نشانی و پمپها به منظور ایزولاسیون ناحیه آلوده شده و جلوگیری از گسترش آلودگی و تخلیه بود. حل این مسئله به کمک الگوریتم جامعه مورچه ها، مطابق مراحل زیر انجام شد.

### ۵-۱- طراحی گراف

در این مسئله می توان یک ماتریس  $2 \times 51$  تعریف نمود؛ در قسمت هایی که از پمپها نیز استفاده شده است، این ماتریس تبدیل

### ۵-۲-۱- کمیته کردن تعداد گره‌های آلوده

کمیته کردن مجموع گره‌های آلوده شده در طول بازه شبیه‌سازی از زمان شروع مدیریت پیامد دو نتیجه مهم را به صورت 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

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{t=t_{CM}}^{EPS} N(i, t) \quad (5)$$

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  $0.1$  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 کمیته کردن تعداد عملیات واکنشی به صورت دو هدف بررسی شد.

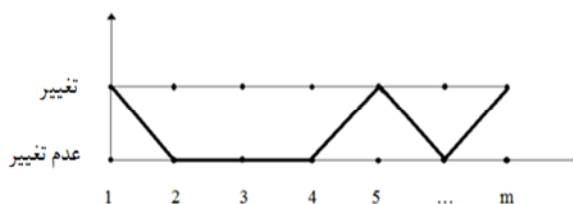
### ۵-۲-۲- کمیته کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی

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 به صورت زیر است

$$F_3 = T \mid \sum_{i=1}^n N(i, T) = 0 \quad (6)$$

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، به طوری که اگر غلظت گره مصرف کننده  $i$  در زمان  $t$ ، برابر و یا بیشتر از مقدار آستانه باشد،  $N$  برابر با ۱ و در



شکل ۵- گراف تعیین شیرها، شیرهای آتش‌نشانی و پمپ‌هایی که

باید بسته، باز و یا روشن شوند

### ۵-۲-۲- توابع برازش

در این تحقیق دو هدف اصلی کمیته کردن تعداد گره‌های آلوده و کمیته کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی به صورت تک هدفه و دو هدفه در کنار کمیته کردن تعداد عملیات واکنشی بررسی شدند. در مواردی که مدیریت پیامدها به صورت دو هدفه بررسی شده است، یکی از اهداف، کمیته 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 به طور 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 آتش‌نشانی باز شده و پمپ‌های روشن شده، تعداد ادوات به کار گرفته شده در مدیریت پیامدها به دست می‌آید

$$F_1 = \sum_{k=1}^{20} VA_k + \sum_{j=1}^{31} HY_j + \left( \sum_{i=1}^2 PU_i \right) \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $F_1$  مجموع ادوات به کار گرفته شده در جواب تولید شده توسط یک مورچه در مدیریت پیامدها است، به طوری که  $VA_k$ ،  $HY_j$  و  $PU_i$  به ترتیب نشانگر حالات شیر  $k$ ، شیر آتش‌نشانی  $j$  و پمپ  $i$  بوده و مقدار آنها صفر و یا یک است. اگر در جواب تولید شده توسط یک مورچه، شیر  $k$  ام بسته، شیر آتش‌نشانی  $j$  ام باز و پمپ  $i$  ام روشن شده باشد،  $VA_k$ ،  $HY_j$  و  $PU_i$  برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر در نظر گرفته خواهند شد. به عنوان 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. به علت آنکه در برخی قسمت‌ها از پمپ‌ها استفاده نشده است، قسمت سوم رابطه ۴ در داخل پرانتز قرار داده شده است.

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 به صورت 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، به دست 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 پیامد است روشن شده و تا پایان زمان مدیریت پیامد (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 به صورت دوهدفه بررسی شد. متغیرهای تصمیم در این قسمت، شیرها و شیرهای آتش‌نشانی بودند.

(ب) در این حالت مدیریت پیامد به صورت تک‌هدفه بررسی شد و از شیرها و شیرهای آتش‌نشانی استفاده شد و به دلیل 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 به صورت مستقیم استفاده شد. به طوری 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 به صورت 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 به صورت تک‌هدفه بررسی شده است، با تغییر مقدار پارامترها و مقایسه مقادیر به دست آمده برای تابع هدف، آنالیز حساسیت صورت پذیرفت. به عنوان 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 ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۹ برای ضریب تبخیر بهترین مقدار برای آن ۰/۰۵ به دست آمد. در مرحله بعد با آنالیز



## 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 به صورت دوهدفه بررسی شده در نظر گرفته شده است. علت این امر به دست آوردن دامنه بیشتری از جواب‌ها توسط بهینه‌ساز بود. فشار به وجود آمده در گره‌های مصرف کننده در هر ۱۵ دقیقه از شبیه‌سازی به منظور 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 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 به صورت تک‌هدفه بررسی شد، قید عدم تجاوز تعداد عملیات واکنشی از ۲۰ نیز اعمال شد. تعداد عملیات واکنشی شامل تعداد گره‌های 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

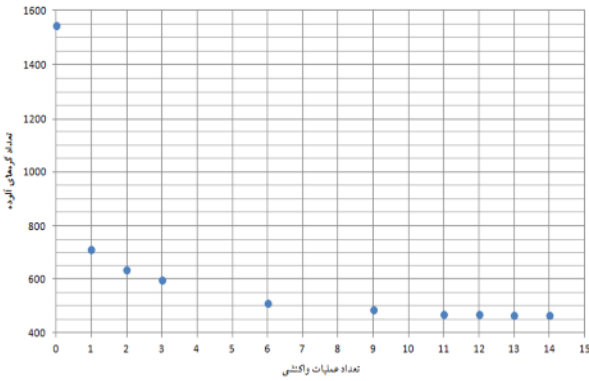
حمله به شبکه در ساعت ۹:۰۰ از شبیه‌سازی در گره شماره ۱۰۱ و با نرخ تزریق ۰/۰۰۶ کیلوگرم بر ثانیه به مدت ۷ ساعت رخ می‌دهد. این نرخ و مدت زمان تزریق مشابه مقداری است که پریس و آستفیلد در مطالعه خود در سال ۲۰۰۸ بر روی همین شبکه انجام دادند [۹]. محل حمله به شبکه در شکل ۳ با یک پیکان نمایش داده شده است. با فرض 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 به منظور بستن شیرها و باز کردن شیرهای آتش‌نشانی و روشن کردن پمپ‌ها و همچنین اعلام خطر عمومی است، زمان

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 به صورت دوهدفه بررسی شد، مراحل تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم مشابه حالت تک‌هدفه 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 به دست آمد.

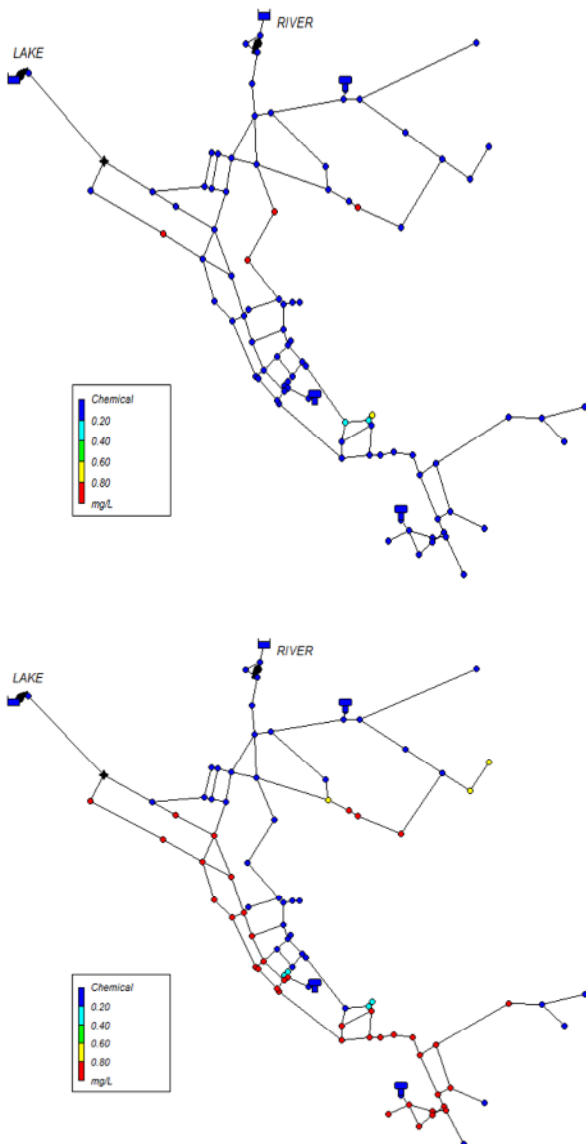
در مواردی که مسئله مدیریت پیامدها به صورت تک‌هدفه بررسی شد، تعداد سیکل‌های داخلی و خارجی برابر با ۱۰ و در مواردی که مدیریت پیامدها به صورت دو هدفه بررسی شد، تعداد سیکل‌های داخلی برابر با ۱۰ و تعداد سیکل‌های خارجی برابر با ۱۵ حاصل شد. در حل این مسئله هدایت کننده کاوشی کاربردی ندارد، زیرا برای مدل مهم نیست که در چندمین انتخاب خود کدام شیر، شیر آتش‌نشانی و یا پمپ را برگزیده است. بنابراین مقدار  $\beta$  برابر با صفر منظور می‌شود. به همین دلیل و از آنجا که  $\alpha$  اهمیت اثر مقدار فرمون را نسبت به اثر مقدار کاوشی مشخص می‌کند، مقدار  $\alpha$  برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. همچنین به منظور جلوگیری از حذف شدن جواب‌های خوبی که ممکن است در نظر گرفته نشده باشند، مقدار حداقل فرمون برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. مقدار سایر پارامترهای به دست 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	۲-۲-۵	۲-۲-۵	۲-۲-۵	۱-۲-۵
پارامترها	(رویکرد سوم)	(دوم)	(اول)	
تعداد مورچه‌های کولونی	۹۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰۰
$Q_1$	۶۰۰	۷۰۰	۵۰۰	۱۸۰
$Q_2$	-	-	۳	۳



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)

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 به دست می‌آید، اما هزینه‌های محاسباتی و عملیاتی نیز بیشتر خواهند شد.

## ۸- نتایج

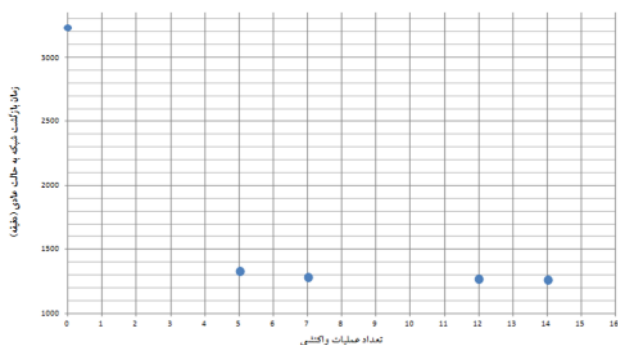
### ۸-۱- کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده

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. به طوری 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	۲۷۱ ۱۸۴ ۲۷۵

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 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

عملیات واکنشی، از شیرهای آتش‌نشانی، در مدیریت پیامد استفاده نشده است. جبهه پارتوی حاصل از کمینه‌سازی 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 به دست آمده از حل مسئله مدیریت پیامدها را نشان می‌دهد. این اهداف ناسازگار در مقاله آفونسو 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].

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

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

جبهه پارتوی به دست آمده از حل مسئله در این قسمت، در شکل ۸ و مقادیر آنها به طور 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 بازگردد، اما با انجام مدیریت پیامدها این زمان تا ۱۲۶۰ دقیقه کاهش می‌یابد. جواب‌هایی که شامل بیش از پنج عملیات واکنشی می‌باشند موجب

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	۳۱۱ ۲۳۱ ۱۲۳ ۱۰۷	۵۰
۷	۱۲۸۰	۳۱۱ ۳۰۱ ۲۲۹ ۲۲۱ ۱۲۳ ۱۰۷ ۱۰۵	-
۱۲	۱۲۷۰	۳۰۱ ۲۶۹ ۲۲۹ ۲۲۱ ۱۲۳ ۱۰۷ ۱۰۵	۲۷۱ ۲۶۹ ۱۸۳ ۱۷۳
۱۴	۱۲۶۰	۳۱۱ ۳۰۱ ۲۶۹ ۲۲۹ ۲۲۱ ۱۲۳ ۱۰۷ ۱۰۵	۲۷۵ ۲۰۶ ۱۸۷ ۱۸۱ ۱۷۳ ۵۰
		۳۱۱	

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	۷	۰/۱۰۱	۰/۱۰۸	۰/۱۱۴	۰/۱۱۷	۰/۰۸۶	۰/۰۳۱	۰/۰۵۴	۰/۰۵۱	۰/۰۵۲	۰/۰۴۸	۰/۰۴۲	۰/۰۵۴
تولید شده با	۱۲	۰/۱۲۲	۰/۱۲۹	۰/۱۳۵	۰/۱۳۷	۰/۱۰۶	۰/۰۵۰	۰/۰۷۳	۰/۰۷۱	۰/۰۷	۰/۰۶۷	۰/۰۶۱	۰/۰۷۳
توجه به تعداد عملیات (مکابال)	۱۴	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	-	-	-	-	-	-	-

## 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 به صورت واقع بینانه در نظر گرفته شدند. نتایج به دست 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 به دست 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.

۸-۲-۲- بررسی مدیریت پیامد به صورت 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 آتش‌نشانی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۶۰۱، ۶۱، ۱۷۳، ۱۸۱، ۱۸۴، ۱۸۷، ۲۰۴، ۲۴۱، ۲۵۷ و ۲۶۵ جواب‌های به دست 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 به دست 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 به دست آمده، نقش اساسی استفاده از پمپ‌ها در مدیریت پیامدها روشن می‌شود که در مطالعات قبلی به آن توجهی نشده است.

## ۱۰- مراجع

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- US EPA. (2003). *Response protocol toolbox: Planning for and responding to drinking water contamination threats and incidents - overview and application*, US Environmental Protection Agency.
- 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.
- Preis, A., and Ostfeld, A. (2008). "Multiobjective contaminant response modelling for water distributions systems security." *J. Hydroinform.*, 10(4), 267-274.

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](http://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.