جانمایی بهینه حسگرها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها: چشم‌انداز کاربرد دوگانه

سید مهدی میری خمبی[1] عباس افشار[2]

(دریافت ۹۰/۹/۱۹ پذیرش ۹۱/۸/۲۰)

چکیده

ورود آلودگی به هر نحو (تصادفی یا عمدی) یا کاهش خود به‌خودی کیفیت آب در شبکه توزیع، می‌تواند به‌شدت روی سلامت جامعه تأثیر بگذارد. پایش کیفیت آب به‌صورت مؤثر و کارآمد یکی از مهم‌ترین ابزارها برای تضمین تأمین آب آشامیدنی قابل اطمینان بـه مصـرف کننده، در یک سیستم توزیع آب آشامیدنی است. با توجه به هزینه‌های بسیار زیاد خرید، نصب و نگهداری از حسگرها در شبکه‌های توزیع آب، طراحی چندین شبکه پایش مستقل در یک سیستم توزیع آب علاوه بر محدودیت شرایط فیزیکی، مقرون به‌صرفه هم نخواهد بود. لذا نیاز به ادغام اهداف گوناگون پایش شبکه و طراحی شبکه پایش به‌منظور برآورد همزمان این اهداف، احساس می‌شود. طراحـی بهینـه جانمایی حسگرها در شبکه‌های توزیع آب با امکان کاربرد دوگانه حسگرها، می‌تواند گامی مثبت در کاهش هزینه‌ها و محدودیتهای فیزیکی باشد. به‌عبارت دیگر نوع حسگرها و جانمایی آن‌ها در شبکه باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که نه تنها اهداف امنیتی بلکه سایر اهداف مورد نیاز در شبکه، مانند ارضای ملزومات معمول پایش (حفظ مقدار کلر باقی مانده، مدیریت نتایج جانبی ضد عفونی کردن، مقررات معمـول نمونه برداری) را برآورد نماید. در این مطالعه، مسئله جانمایی حسگرها در شبکه‌های آب شهری، با نگاهی به استفاده دوگانـه از شـبکه پایش، فرموله شد و توسط الگوریتم فراکاوشی کلونی مورچگان حل شد.

واژه‌های کلیدی: حسگرها، شبکه‌های توزیع آب شهری، بهینه‌سازی، الگوریتم مورچگان

Optimum Layout for Sensors in Water Distribution Networks through Ant Colony Algorithm: A Dual Use Vision

S. M. Miri Khambi[1] *A. Afshar[2]*

(Received Dec. 10, 2011 Accepted Nov. 10, 2012)

Abstract

The accidental or intentional entry of contaminants or self-deterioration of the water quality within the network itself can severely harm public health. Efficient water quality monitoring is one of the most important tools to guarantee a reliable potable water supply to consumers of drinking water distribution systems. Considering the high purchase, installation and maintenance cost of sensors in water distribution networks deploying two independent sensor networks within one distribution system is not only bounded by physical constraints but also is not a cost-effective approach. Therefore, need for combining different objectives and designing sensor network to simultaneity satisfying these objectives is felt. Sensors should comply with dual use benefits. Sensor locations and types should be integrated not only for achieving water security goals but also for accomplishing other water utility objectives, such as satisfying regulatory monitoring requirements or collecting information to solve water quality problems. In this study, a dual use vision for the sensor layout problem in the municipal water networks, is formulated and solved with the ant colony algorithm.

Keywords: Sensors, Urban Water Distribution Networks, Optimization, the Ant Colony Optimization Algorithm (ACO).

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (نویسنده مسئول)
S_mehdimiri@yahoo.com ۰۹۱۳۷۴۳۳۸۹۵
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

1. M.Sc. of Water Eng., Iran University of Sciences and Tech., Terhan
(Corresponding Author) 09137433895 S_mehdimiri@yahoo.com
2. Prof., Dept. of Civil Eng., Iran University of Sciences and Tech., Tehran

۱- مقدمه

سیستم‌های توزیع آب به‌خاطر جغرافیای گسترده و نقاط در دسترس فراوان در مقابل آلودگی‌های تصادفی یا عمدی، آسیب‌پذیراند. تعیین آلودگی در سیستم‌های توزیع آب آشامیدنی با چالشهای فراوانی روبرو است. علاوه بر مشکلات موجود در زمینه تشخیص آلاینده‌ها، دلایل دیگری مانند اضمحلال[1] یا رشد مولفه‌های غیر مانا که در طول پروسه انتقال اتفاق می‌افتد، برای کاهش کیفیت آب در شبکه‌های توزیع، وجود دارد. پایش کیفیت آب به‌صورت مؤثر و کارآمد یکی از مهم‌ترین ابزارها برای تضمین تأمین آب آشامیدنی قابل اطمینان به مصرف کننده، در یک سیستم توزیع آب آشامیدنی است.

قبل از حوادث تروریستی اخیر، تمرکز ادبیات موضوع بیشتر روی ارزیابی شبکه‌های پایش کیفی آب بر حسب هزینه و کارایی برای تأمین آب آشامیدنی قابل اعتماد برای عموم بود. اخیراً ادبیات موضوع بیشتر به سمت جانمایی حسگرهای تشخیص آلودگی با در نظر گرفتن حملات عمدی شیمیایی، بیولوژیکی و غیره جهت‌گیری کرده است.

به‌منظور انجام این تحقیق، مطالعات گذشته در دو دسته جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. یک گروه از تحقیقات به پایش‌های مستمر کیفی آب شبکه اختصاص دارد و به‌منظور کسب اطمینان از کیفیت آب مصرفی در شبکه، افزایش مطلوب پوشش کیفی شبکه و ایجاد امکان اعمال مدیریت مستمر در کنترل کیفی آب شبکه طراحی شده‌اند. در این زمینه به تحقیقات زیر می‌توان اشاره کرد:

لی و دینینگر در سال ۱۹۹۲ روشی را بر مبنای جریان ماندگار تحت یک یا چند الگوی تقاضا توسعه دادند [۱]. فرض منطقی در این روش این است که نمونه‌گیری در گره‌هایی که توسط گره‌های دیگر تغذیه می‌شود می‌تواند اطلاعاتی را در مورد گره‌های بالادستی فراهم کند. کومار و همکاران در سال ۱۹۹۷ الگوریتمی کاوشی برای حل مسئله پوشش تقاضا به‌کار بردند و نتایجی شبیه نتایج لی و دینینگر به‌دست آوردند [۲]. هارمانت و همکاران جانمایی حسگرها براساس پوشش تقاضا را با در نظر گرفتن زمان (غیر ماندگار) و غلظت آلودگی در تابع هدف اصلاح کردند [۳]. در روش استفاده شده توسط هارمانت و همکاران پوشش به سمت گره‌هایی با جریان بیشتر و آب مانده‌تر سوق داده می‌شد. برای اصلاح این جهت‌گیری وو و همکاران در سال ۲۰۰۱ تابع هدف برنامه‌ریزی صحیح را اصلاح کردند [۴]. آن‌ها برای هر عبارت، وزنی به‌کار بردند، به این ترتیب که غلظت‌ها را مطابق غلظت منبع آلودگی نرمال کردند تا پوشش بیشتر به سمت گره‌های با کیفیت آب کمتر متمایل شود (گره‌ها با کیفیت آب کمتر وزن بیشتری در تابع هدف خواهند داشت). الزهرانی و موید در سال ۲۰۰۱ از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بر مبنای پوشش تقاضا استفاده کردند [۵]. افشار و همکاران در سال ۲۰۰۶ روشی را بر مبنای الگوریتم جامعه مورچه‌ها پیشنهاد کردند. آنها به‌منظور تسهیل استفاده از مدل در شبکه‌های بزرگ، روشی ارائه کردند که در آن ماتریس وزن‌ها در داخل مدل بهینه‌ساز و همزمان با اجرای مدل محاسبه می‌شد [۶].

در دسته دوم تحقیقات، به طراحی شبکه پایش برای پایش آلودگی‌های تصادفی یا عمدی در شبکه پرداخته شده است. مطالعات مهم در این زمینه مربوط به کسلر و همکاران در سال ۱۹۹۸ است [۶]. این مطالعات در زمینه جانمایی حسگرها برای پوشش تقاضای گره‌ها، کمتر مبتنی بر مطالعات لی و دینینگر بود. حتی در برخی جهات مانند در نظر گرفتن طبیعت تصادفی رخداد آلودگی از طریق توسعه یک ماتریس نرمال شده آلودگی و تحمیل یک سطح حداقل حفاظت بر اساس سطح سرویس کاملاً ابتکاری بود. استفلد و سالامونز در سال ۲۰۰۴ مفهوم ماتریس تصادفی آلودگی و سطح سرویس که توسط کسلر و همکاران در سال ۱۹۹۸ توسعه داده شده بود را در روش مجموعه پوشش، به‌منظور تشخیص آلودگی‌های عمدی به‌کار بردند [۷]. واتسون و همکاران در سال ۲۰۰۴، کار استفلد و سالامونز را با بازنویسی فرمولاسیون توابع هدف مسئله بهینه‌سازی، به‌منظور برآوردن سایر اهداف گسترش دادند [۸]. مطالعات بری و همکاران در سال ۲۰۰۵ یکی از نخستین مطالعات پایش شبکه است که در آن احتمال حمله به برخی گره‌ها از سایر گره‌ها بیشتر در نظر گرفته شده است [۹]. کار و همکاران در سال ۲۰۰۶ مطالعات بری در سال ۲۰۰۵ را با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی[2] و کمّی کردن عدم قطعیتها به سه روش (بدون وزن، وزن دهی خطی، وزن دهی غیر خطی) ادامه دادند [۱۰]. پراپاتو در سال ۲۰۰۶ ، مسئله جانمایی حسگر را به‌عنوان یک برنامه چند جمله‌ای که به برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی تبدیل می‌شد، فرموله کرد [۱۱]. در آنجا هدف، ارائه مدلی بود که جریان‌های ماندگار و غیر ماندگار را پوشش دهد و اهداف مختلف طراحی را در یک فرمولاسیون جمع کند. ایزویچ و ون بریسن در سال ۲۰۰۸ با در نظر گرفتن گرایش‌های مکانی جانمایی برای اهداف مختلف و پارامترهای حمله، جوابهایی که کراس و همکاران در سال ۲۰۰۶ برای شبکه مثال شماره دو جنگ شبکه‌های حسگر آب[3] به‌دست آورده بودند را مورد آنالیز قرار دادند [۱۲، ۱۳ و ۱۴]. در سال ۲۰۱۰ آرال و همکاران برای طراحی بهینه مکان

[1] Decay

[2] Mixed Integer Programming

[3] The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms.

حسگرها، روشی را ارائه کردند که در آن با استفاده از روش وزن‌دهی، اهداف طراحی در یک فرمول ساده تجمیع می‌گردید. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک جواب بهینه مسئله را پیدا کردند [۱۵ و ۱۶].

هدف از این تحقیق تعیین مکان بهینه برای استقرار حسگرها در شبکه‌های توزیع آب شهری با نگاهی به استفاده چندمنظوره از شبکه حسگر، به‌کمک الگوریتم جامع مورچه‌ها بود. در ادامه ساختار مدل بهینه‌سازی مورد استفاده و نیز عملکرد سیستم جامع مورچه‌ها به طور مختصر تشریح شده است.

۲- الگوریتم جامعه مورچگان

الگوریتم بهینه‌سازی مورچه[1] یک روش احتمالاتی برای حل مسائلی است که قابلیت تبدیل شدن به یک مسئله مسیریابی بهینه با استفاده از یک گراف را دارا هستند. در دنیای واقعی، مورچه‌ها در ابتدا به شکل تصادفی به جستجوی غذا می‌پردازند و پس از پیدا کردن غذا در حالی که از خود فرومون[2] به‌جا می‌گذارند، به جامعه خود باز می‌گردند. اگر سایر مورچه‌ها چنین مسیری را پیدا کنند، به‌جای اینکه به شکل تصادفی به جستجو بپردازند، رد فرومون به‌جای مانده در مسیر منتهی به غذا را دنبال می‌کنند و اگر به غذا رسیدند، با برگشتن از آن مسیر و به‌جا گذاشتن فرومون اضافی، باعث تقویت آن مسیر می‌شوند.

هنگامی که یک مانع در طول مسیر حرکت مورچه‌ها ایجاد می‌گردد، مورچه‌ها در مقابل این مانع قرار گرفته و به‌دلیل عدم وجود فرومون در دو طرف آن، با احتمال مساوی ممکن است چپ یا راست را انتخاب نمایند. اختلاف زمانی طی مسیر در طول مسیر کوتاه‌تر، باعث می‌شود که مورچه‌هایی که تصادفی آن مسیر را انتخاب کرده‌اند، سریع‌تر فرومون‌گذاری کنند. بنابراین هنگامی که یک مورچه، مسیر کوتاهی به سمت منبع غذا پیدا کند، احتمال اینکه سایر مورچه‌ها همان مسیر را دنبال کنند، افزایش می‌یابد. بازخورد مثبت این مسئله سبب می‌گردد تا در نهایت تمام مورچه‌ها همان مسیر کوتاه را انتخاب کنند. بنابراین مشاهده می‌گردد که در رفتار جستجوی غذا در مورچه‌ها، لزوماً نیاز به حس بینایی و حافظه شخصی نیست [۱۷].

در مسئله کوتاه‌ترین مسیر، یک مقدار فرومون τ_{ij} به هر مسیر (i,j) داده می‌شود که شاخص چگونگی مطلوبیت عبور از آن مسیر است. احتمال این که یک یال از گراف توسط مورچه‌هایی که در گره i واقع شده‌اند، انتخاب شود از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\sum_{k\in S}\tau_{ij}} \qquad (۱)$$

که در آن

مقدار P_{ij} احتمال انتخاب گره j توسط مورچه‌ای است که به گره i رسیده است.

به‌منظور حل یک مسئله بهینه‌سازی به کمک الگوریتم جامعه مورچه‌ها، نخست لازم است که گرافی مشابه آنچه که در بخش ۴ توضیح داده می‌شود، تهیه شود. هنگامی که یک مورچه در گره i از گراف تصمیم واقع شده است، فایده حاصل از حرکت به گره j با η_{ij}، که هدایت کننده کاوشی نامیده می‌شود، نمایش داده می‌شود. با ترکیب مقادیر کاوشی یا منافع عبور از مسیر ij و فرومون، رابطه انتقال تصادفی نسبی را به شکل زیر تعریف می‌کنند:

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

که در آن

دو پارامتر α و β برای تنظیم وزن فرومون و اطلاعات کاوشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال در مسئله تعیین مکان حسگرها، پارامتر α کاربردی ندارد. زیرا برای مدل، مهم نیست که در چندمین انتخاب خود چه گره‌ای را برگزیده است.

دوریگو و گامباردلا با پیشنهاد اصلاحاتی در روش انتقال حالت تصادفی نسبی، امکان کنترل بیشتری بر تعادل بین اکتشاف[3] و بهره‌برداری[4] را فراهم کردند [۱۷]. این روش انتقال شبه تصادفی نسبی[5] به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

که در آن

در صورتی که یک مقدار تصادفی q کوچک‌تر از پارامتر $q_0 \in [0,1)$ باشد، بهترین ترکیب فرومون و مقدار کاوشی انتخاب می‌گردد. در غیر این صورت انتخاب بعدی معادل J است که بر اساس احتمال P_{ij} محاسبه می‌گردد. با استفاده از این روش، امکان واسنجی میزان اکتشاف فراهم می‌گردد.

فرومون مسیر در هر دوره در طی یک فرایند بهنگام‌سازی تغییر می‌کند. هدف از بهنگام‌سازی فرامان تمرکز بیشتر فرایند جستجوی مورچه‌ها بر یک منطقه مناسب از فضای جستجو است که امید آن می‌رود با جستجوی متمرکزتر در آن منطقه، جواب مطلوب‌تری به‌دست آید. به‌طور کلی شکل بهنگام سازی فرومون به‌صورت زیر است:

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\rho)*\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij} \qquad (۴)$$

[1] Ant Colony Optimization (ACO)
[2] Pheromone
[3] Exploration
[4] Exploitation
[5] Pseudo Random Proportional Rule

که در آن
ρ ضریب تبخیر فرومون است و از بازه [0,1] انتخاب می‌گردد. ضریب تبخیر فرومون با کم کردن مقدار فرومون در مسیرهایی که خوب نیستند، شانس انتخاب شدن مسیرهای خوب توسط مورچه‌ها در تکرار بعدی را بیشتر می‌کند. $\Delta\tau_{ij}$ یک مقدار بهنگام‌سازی است که در صورتی که مسیر ij توسط مورچه طی نشده باشد، برابر صفر است.

۳- روش انجام کار

با توجه به این مطلب که تنها در گره‌های خاصی از شبکه می‌توان حسگرها را مستقر کرد، لازم است که گره‌های مناسب برای نصب حسگر، به‌گونه‌ای انتخاب شوند که اهداف مورد نظر پایش در شبکه را برآورد نمایند. در این مطالعه، مسئله مکان‌یابی بهینه حسگرها در شبکه‌های توزیع آب شهری با توجه به رویکرد استفاده دوگانه از حسگرها، حل شد. به‌همین دلیل تابع هدف مدل پیشنهادی به‌گونه‌ای تعریف شد که برای تعدادی حسگر از پیش تعیین شده، از یک سو میزان پوشش در شبکه (ملزومات معمول پایش) را بیشینه نماید و از طرف دیگر، حجم آب آلوده مصرف شده (هدف امنیتی) را کمینه کند. از آنجا که مسئله مکان‌یابی بهینه حسگرها در شبکه‌های توزیع آب، قابلیت تبدیل شدن به یک مسئله مسیریابی بهینه با استفاده از یک گراف را داراست، بنابراین امکان حل آن با استفاده از الگوریتم فراکاوشی جامعه مورچه‌ها وجود دارد. علاوه بر این، گسترده بودن فضای تصمیم و وجود متغیرهای صفر و یک در مدل، استفاده از این الگوریتم را توجیه‌پذیر کرده است.

۳-۱- حداکثر کردن پوشش

عبارت "پوشش" یا "پوشش یافته" برای رساندن این مفهوم به‌کار می‌رود که با قرار دادن یک ایستگاه پایش در یک گره معین، کیفیت آب در گره‌های دیگر شبکه تا چه حد مشخص شده و به‌عبارتی دیگر، آیا گره‌های دیگر شبکه پوشش داده شده است یا خیر. تابع هدف در این مسئله به‌گونه‌ای انتخاب شد که درصد بیشتری از کل آب موجود در شبکه را پوشش دهد [۶]:

$$\text{maximize} \quad \sum_{\beta=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} d_{\beta i} y_{\beta i} \qquad (۵)$$

$$P_{\beta ji}=\frac{q_{\beta ji}}{s_{\beta i}} \qquad (۶)$$

$$w_{\beta kn} n,k\forall \quad ۱= \ n=k \qquad (۷)$$

$$w_{\beta kn}=\sum_{i=1}^{n} P_{\beta in} * w_{\beta ki} \quad \forall k,n \mid k\neq n \qquad (۸)$$

$$a_{\beta ij}=0 \quad \text{if} \ w_{\beta ij}<\lambda \qquad (۹)$$
$$a_{\beta ij}=1 \quad \text{if} \ w_{\beta ij}\geq\lambda$$

$$\sum \bar{a}_{\beta ij}.x_i - y_{\beta j}\geq 0 \quad \forall j \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \geq NS \qquad (۱۱)$$

که در این روابط
$d_{\beta i}$ میزان نیاز در گره i در الگوی مصرف β، $y_{\beta i}$ متغیر صفر و یک که نشان دهنده پوشش یافتن گره i و یا عدم پوشش آن در الگوی مصرف β است، $q_{\beta ji}$ آب عبوری از گره j به گره i در الگوی مصرف β و $S_{\beta i}$ مجموع آب وارده شده به گره i در الگوی مصرف β است. از رابطه ۶، درصد آب عبوری از گره j به گره i با پارامتر $P_{\beta ji}$ نشان داده شده است. این پارامتر فقط برای گره‌های بلافصل شبکه دارای مقدار است. $W_{kn\beta}$ وزن آب ورودی به گره n است که از گره k در الگوی مصرف β تأمین شده است. بنابراین از روابط ۷ و ۸، درصد آب عبوری از هر گره شبکه به گره دیگر شبکه محاسبه می‌شود. روشن است که درصد آب عبوری از هر گره به همان گره برابر یک است. چنانچه معیار پوشش برابر λ در نظر گرفته شود، رابطه ۹ مقادیر وزن‌های بین گره‌ها را اصلاح می‌کند. به این ترتیب که مقادیر کمتر از λ درصد را برابر صفر و مقادیر بزرگ‌تر و مساوی آن را برابر یک قرار می‌دهد. در رابطه ۱۰، $\bar{\alpha}_{\beta ij}$ ترانهاده ماتریسی است که درصد پوشش گره‌ای شبکه را نشان می‌دهد. در رابطه ۱۱، x_i متغیر صفر و یکی است که نشان دهنده حضور و یا عدم حضور ایستگاه پایش در گره‌ها است. NS مجموع کل ایستگاه‌هاست. همچنین این رابطه نشان می‌دهد که تعداد کل گره‌هایی که می‌توانند پذیرای ایستگاه پایش باشند، برابر و یا کمتر از مجموع کل ایستگاه‌هاست. در این مدل x_i متغیر تصمیم و هدف، بیشینه کردن پوشش شبکه با تعداد مشخص ایستگاه پایش است.

۳-۲- حداقل کردن حجم آب آلوده مصرف شده

در این حالت تنها جهت جریان در نظر گرفته شده و از سرعت آن صرف نظر شده است. برای به‌دست آوردن گره‌های آلوده، فقط لازم است تحلیل هیدرولیکی جریان صورت گیرد. تمام گره‌هایی که از گره آلوده به آن‌ها، مسیر مثبتی از جریان وجود دارد آلوده تلقی می‌شوند مگر اینکه حسگری از انتشار آلودگی جلوگیری کند. از این فرضیات در مدل ارائه شده استفاده شده است:
الف) هر حمله تنها در یک گره شبکه رخ می‌دهد؛

ب) با هر الگوی مصرف به‌طور مجزا برخورد می‌شود.

به‌طور مثال، با وجود یک حمله در گره i در طول الگوی مصرف β، گره j در صورتی آلوده خواهد بود که مسیری از گره i به گره j بدون اینکه شامل حسگری شود، وجود داشته باشد.

با این فرضیات، فرمولاسیون ریاضی مسئله که از فرمولاسیون بری در سال ۲۰۰۵ اقتباس شده است به شکل زیرخواهد بود:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^{n}\sum_{p=1}^{P}\sum_{j=1}^{n}\alpha_{ip}C_{ipj}\delta_{jp} \qquad (۱۲)$$

$$C_{ipi}=1 \qquad \forall\, i=1\ldots n, p=1\ldots P \qquad (۱۳)$$

$$C_{ipj}\le C_{ipk}-s_k \quad \forall\, k\in V \ \text{ s.t. } f_{kjp}=1 \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{i\in V} s_i \ge S_{max} \qquad (۱۵)$$

$$s_i\in\{0,1\} \quad \forall i\in V \qquad (۱۶)$$

که در روابط مذکور

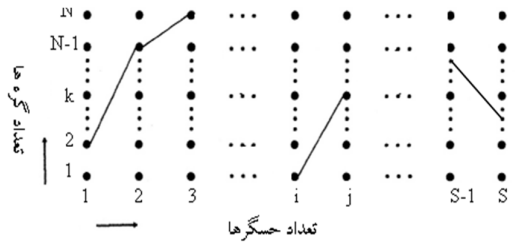
$V=\{v_1, \ldots. v_n\}$ نشان دهنده گره‌های شبکه و α_{ip} احتمال حمله به گره v_i در طول الگوی مصرف β است (با فرض تنهایک حمله در یک گره در طول یک الگوی مصرف معین). بنابراین اگر P تعداد الگوهای مصرف باشد، آنگاه $\sum_{v_i\in V, p\in 1\ldots P}\alpha_{ip}=1$. δ_{jp} آب مصرف شده در گره v_j در الگوی مصرف p است. پارامتر f_{ijp} الگوی مصرف p را توصیف می‌کند به این ترتیب که اگر در الگوی مصرف p، جریان از گره v_i به گره v_j وجود داشته باشد $f_{ijp}=1$ و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود. S_{max} حداکثر تعداد حسگری است که مجاز است نصب شود.

S_i متغیر صفر و یکی است که نشان دهنده حضور و یا عدم حضورحسگر در گره‌ها می‌باشد. متغیر $C_{ipj}=1$ اگر در الگوی مصرف p، گره j در اثر وقوع حمله در گره i آلوده شده باشد و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

۴- حل مدل توسط الگوریتم مورچه چندهدفه

در ابتدا، همان طور که قبلاً ذکر شد، برای حل مسئله توسط الگوریتم مورچه، مسئله باید به شکل گراف تعریف شود. برای این کار از روشی که توسط افشار و همکاران ارائه شده است، استفاده شد [۶].

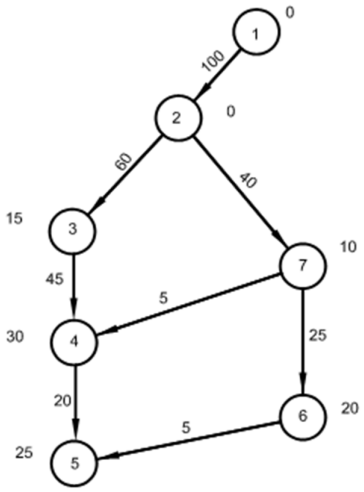
این مسئله را می‌توان به شکل یک گراف N*S تعریف کرد (شکل ۱). که در آن S تعداد حسگرهایی است که قرار است در شبکه آب استفاده شوند و N تعداد گره‌های شبکه است که می‌توان در آن حسگر نصب کرد. تنها قید موجود برای حل مسئله این است که در هر گره نمی‌توان بیش از یک حسگر نصب کرد. به این ترتیب طی یک مسیر توسط یک مورچه به معنای حرکت از یک گره به گره دیگر و ارزیابی امکان استقرار حسگر در آن گره است. یک مسیر فرضی برای حرکت مورچه‌ها در شکل یک نشان داده شده است.



شکل ۱- گراف نمونه

۵- آزمودن مدل

برای آزمون صحت مدل از یک مسئله کلاسیک که توسط لی و دینینگر ارائه گردیده، استفاده شد. این شبکه دارای هشت لوله و هفت گره می‌باشد که در پنج گره آن تقاضا وجود دارد. ساختار شبکه مورد استفاده در شکل ۲ مشاهده می‌شود. در ابتدا مسئله برای هر یک از اهداف طراحی به‌طور جداگانه تحلیل شده است.



شکل ۲- ساختار شبکه آب (مدل لی و دینینگر)

در رابطه با هدف اول، این مسئله در شرایط انتخاب دو ایستگاه پایش و درصد پوشش ۵۰ درصد حل شد. جدول ۱ ماتریس پوشش را برای این شبکه نشان می‌دهد. نتایج، با نتایج حل مدل توسط لی و

دینینگر یکسان است و نشان از صحت مدل پوشش دارد. در این حالت، گره‌های ۵ و۶ برای نصب ایستگاه انتخاب می‌شوند که پوشش ۱۰۰درصد را بر شبکه اعمال می‌کنند. با در نظر گرفتن هدف طراحی که همان کمینه کردن حجم آب آلوده مصرفی است، گره‌های ۴ و۶ برای نصب حسگر مناسب خواهند بود. با نصب حسگر در این گره‌ها، حجم آب آلوده مصرفی ۱۰۰ واحد خواهد بود. اگر هدف، اعمال هم‌زمان اهداف بالا باشد، منحنی بهینه تبادل بین اهداف حاصل از حل مسئله توسط الگوریتم مورچه در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

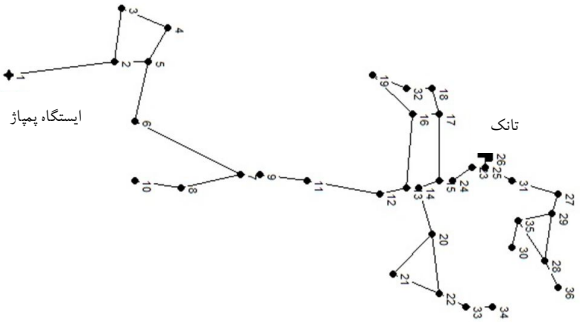
مدل پیشنهادی پس از ارزیابی صحت روی یک شبکه آزمایشی بزرگ‌تر پیاده‌سازی شد. شبکه که برای ارائه در این مطالعه در نظر گرفته شده شبکه مثال شماره ۲ برنامه اپنت 2.0 است که در شکل ۳ نشان داده شده است. این شبکه در مجموع دارای ۴۰ لوله، یک تانک و ۳۵ گره است که در این مثال امکان وقوع حمله در تمام گره‌ها وجود دارد. همچنین تمام این گره‌ها مکان احتمالی قرار گرفتن حسگر در شبکه می‌باشند. در شکل ۴ عملکرد الگوریتم جامعه مورچگان در حل مثال شماره ۲ برنامه اپنت 2.0 نشان داده شده است. این شکل منحنی بهینه تبادل بین اهداف پوشش در مقابل حجم آب آلوده مصرفی را نشان می‌دهد. انتخاب یک راه‌حل که هر دو هدف را به‌طور توافقی برآورد نماید یا راه‌حلی که در آن برحسب نیازهای شبکه، به یکی از اهداف طراحی اهمیت بیشتری داده شده باشد، بر عهده مسئولان امور خواهد بود.

جدول ۱- ماتریس پوشش برای شبکه لی و دینینگر

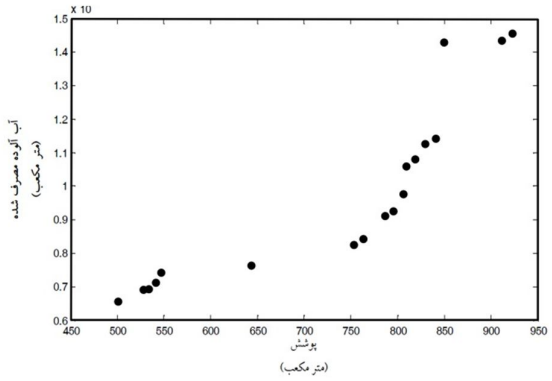
گره نمونه‌گیری	گره‌های پوشش یافته تحت معیار پوشش ۵۰٪						
	گره ۱	گره ۲	گره ۳	گره ۴	گره ۵	گره ۶	گره ۷
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
۴	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰
۵	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۶	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱
۷	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱

جدول ۲- نتایج الگوریتم مورچگان

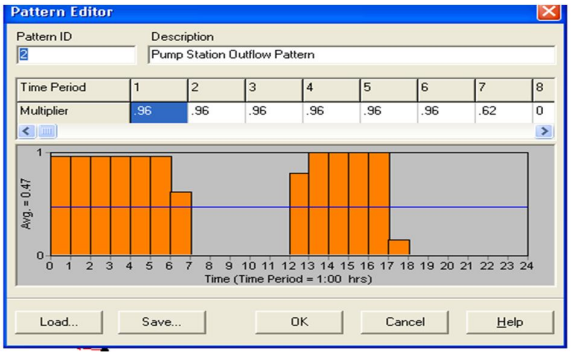
حجم آب آلوده مصرفی	پوشش	گره‌های انتخاب شده	الگوریتم مورچگان
۲۲۵	۱۰۰	۵و۶	جواب ۱
۱۸۵	۸۰	۵و۷	جواب ۲
۱۰۰	۷۵	۴و۶	جواب ۳



شکل ۳- شبکه مثال شماره ۲ برنامه EPANET 2.0



شکل ۴- منحنی بهینه تبادل بین اهداف حاصل از الگوریتم جامعه مورچگان برای جانمایی دو حسگر در شبکه

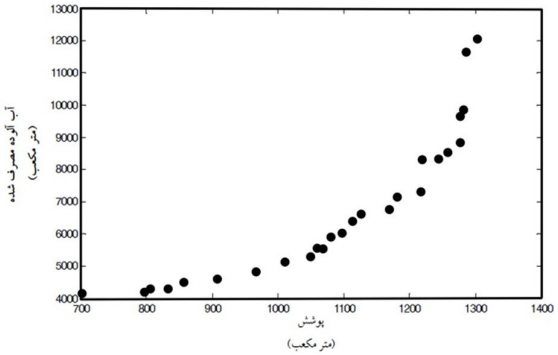


شکل ۵- الگوی پمپاژ

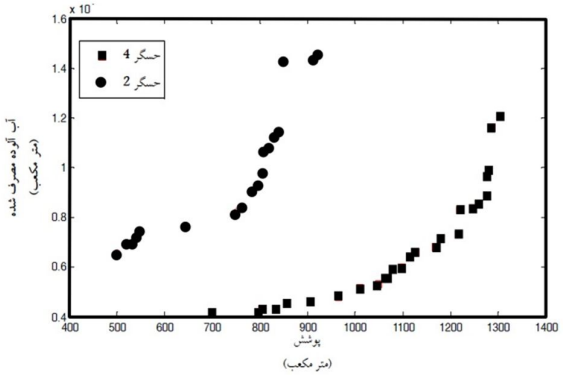
مقادیر عددی مربوط به نقاط روی نمودار در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول، مقادیر مربوط به نقاط ابتدا و انتهای نمودار (کمترین پوشش و کمترین آب آلوده مصرف شده، بیشترین پوشش و بیشترین حجم آب آلوده مصرف شده) مشخص شده‌اند. با توجه به این که شبکه مورد مطالعه تحت الگوی مصرف ساعتی تحلیل شده است. برای محاسبه پوشش اعمال شده توسط یک چیدمان خاص از حسگرها، باید ۲۴ ماتریس پوشش مورد بررسی قرار گیرد. اما با در نظر گرفتن الگوی پمپاژ، می‌توان دو حالت کلی برای جریان در نظر گرفت (شکل ۵). یکی جریان از ایستگاه پمپاژ به سایر گره‌ها و دیگری تغذیه شبکه از طریق تانک (زمان خاموش بودن پمپ). در اینجا به تحلیل و بررسی نقاط ابتدایی و انتهایی منحنی بهینه تبادل بین اهداف ارائه شده پرداخته شد. در چیدمان انتهایی یا به‌عبارت دیگر، راه حلی که از لحاظ پوشش در بهترین وضعیت و از نقطه نظر حجم آب آلوده مصرف شده در بدترین وضعیت قرار دارد، گره‌های ۳۱ و۴ به‌عنوان مکان حسگر انتخاب شده‌اند. برای این نقاط درحالت اول جریان، گره ۳۱، تعداد زیادی از گره‌های شبکه را پوشش می‌دهد، در حالی که گره ۴ تنها گره‌های ۱ و۲ و ۳ و ۴ را تحت پوشش دارد ولی با تغییر منبع تأمین آب شبکه، این گره ۴ است که پوشش گسترده‌ای را بر شبکه اعمال می‌کند. بنابراین ترکیبی از این دو گره، چیدمان مناسبی برای اعمال پوشش بیشینه بر شبکه خواهد بود. اما این چیدمان در برابر حملات عمدی به شبکه ضعیف عمل می‌کند. حسگر موجود در گره ۴ در حالتی که پمپ، آب شبکه را تأمین می‌کند، تنها قادر است شبکه را در مقابل حمله به گره‌های ۳ و ۴ محافظت کند و در حالت خاموش بودن پمپ هم از هیچ گره‌ای به‌جز خودش درحملات احتمالی محافظت نمی‌کند. این در حالی است که حسگر موجود در گره ۳۱ تنها می‌تواند گره ۱۸ را از حمله‌ای که در گره ۱۹ رخ داده است، حفظ کند. در چیدمان ابتدایی جبهه بهینه یا به‌عبارت دیگر راه حلی که از لحاظ پوشش در بدترین وضعیت و از نقطه نظر حجم آب آلوده مصرف شده در بهترین حالت قرار دارد، گره‌های ۱۱ و ۱۵ به‌عنوان مکان حسگر انتخاب شده‌اند. با توجه به اینکه این دو گره در یک مسیر واقع شده‌اند پس همواره گره‌های پوشش یافته توسط یک ایستگاه، زیر مجموعه گره‌های پوشش یافته توسط ایستگاه دیگر خواهد بود. در حمله‌های احتمالی به شبکه هم، گره‌های ۱۱ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ که بین دو حسگر قرار دارند و جزء گره‌های پرمصرف شبکه هستند در اکثر اوقات حفظ می‌شوند. با افزایش تعداد حسگرها، منحنی بهینه تبادل بین اهداف حاصل، کامل‌تر خواهد شد. شکل ۶ منحنی بهینه تبادل بین اهداف جانمایی چهار حسگر در شبکه را نشان می‌دهد. شکل ۷ این منحنی‌های تبادل بین اهداف را در یک دستگاه مختصات نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، با افزایش تعداد حسگرها، منحنی تبادل بین اهداف بهینه روی محور طول‌ها به سمت جلو یعنی افزایش مقدار پوشش و روی محور عرض‌ها به طرف پایین یعنی کاهش مقدار حجم آب آلوده مصرف شده حرکت می‌کند.

جدول ۳- منحنی بهینه تبادل بین اهداف حاصل از الگوریتم جامعه مورچگان برای جانمایی دو ایستگاه در شبکه

حجم آب آلوده مصرفی (m^3)	پوشش (m^3)	گره‌های انتخاب شده	الگوریتم مورچگان
۶۵۶۶/۲۲	۴۹۹/۷۶	۱۱-۱۵	جواب ۱
۷۰۶۶/۹۷	۱۱۳۱/۳۴	۱۳-۶	جواب ۲
۷۱۸۳/۹۳	۵۶۷/۱۸	۱۳-۵	جواب ۳
۷۶۵۳/۲۷	۶۴۳	۱۷-۱۱	جواب ۴
۸۲۲۸/۵۹	۷۵۲/۰۸	۱۱-۱۸	جواب ۵
۶۹۴۱/۶۹	۵۳۳/۰۸	۱۵-۹	جواب ۶
۸۴۰۶/۴۹	۷۶۳/۰۲	۱۱-۳۱	جواب ۷
۹۱۰۶/۷۱	۷۸۵/۴۳	۹-۱۸	جواب ۸
۹۲۸۴/۶۱	۷۹۶/۳۶	۳۱-۹	جواب ۹
۹۷۷۲/۸۷	۸۰۵/۱۵	۳۱-۷	جواب ۱۰
۱۰۶۰۵/۵۷	۸۰۷/۶۱	۶-۱۸	جواب ۱۱
۱۰۷۸۷/۲۵	۸۱۹/۹۱	۳۱-۶	جواب ۱۲
۱۱۲۶۴/۱۶	۸۲۹/۲۹	۱۸-۵	جواب ۱۳
۱۱۴۴۵/۸۴	۸۴۰/۲۳	۵-۳۱	جواب ۱۴
۱۴۲۸۰/۸۱	۸۵۰/۴۹	۱۸-۲	جواب ۱۶
۱۴۳۵۶/۵۱	۹۱۲/۰۳	۱۸-۴	جواب ۱۷
۱۴۵۴۱/۹۷	۹۲۲/۹۷	۳۱-۴	جواب ۱۸



شکل ۶- منحنی بهینه تبادل بین اهداف حاصل از الگوریتم جامعه مورچگان برای جانمایی چهار حسگر در شبکه



شکل ۷- منحنی بهینه تبادل بین اهداف برای جانمایی تعداد متفاوت حسگر در شبکه‌ی نمونه

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله جانمایی بهینه حسگرها در شبکه‌های توزیع آب با نگاهی به استفاده دوگانه توسط مدل الگوریتم جامعه مورچگان چند هدفه توسعه داده شد. با در نظر گرفتن تعداد مشخصی از حسگرها، مدل الگوریتم جامعه مورچه‌ها توانست به‌خوبی مکان‌های بهینه این حسگرها را به‌صورت مجموعه نقاط غیر پست (رویه‌های بهینه پاراتو) بین درصد پوشش شبکه در مقابل مقدار کل حجم آب آلوده مصرفی، شناسایی نماید. از آن‌جا که این الگوریتم در حل مدل دارای جوابهای متنوعی است، به‌راحتی می‌توان با در نظر گرفتن محدودیتهایی نظیر بودجه، شرایط فیزیکی گره‌ها و امکان یا عدم امکان استقرار حسگر در برخی گره‌ها، مکان‌های مناسبی را برای استقرار حسگرها انتخاب نمود. با وجود تحقیقات فراوان در زمینه نصب حسگرها در شبکه‌های آب هنوز چالش‌های زیادی در این زمینه وجود دارد. برای مثال هنوز اجماع کلی در رابطه با این که احتمال استفاده از کدام آلاینده‌ها، یا کدام غلظت‌ها و حجم‌ها، مدت زمان تزریق و کدام موقعیت‌های حمله بیشتر است، وجود ندارد. معمولاً به‌علت محدودیتهای محاسباتی، طراحی بر مبنای شبیه‌سازی کل رخدادهای آلودگی امکان‌پذیر نیست. لذا محاسبه فاصله‌های اطمینان در طراحی‌های صورت گرفته بر اساس پاره‌ای از تهدیدات، به استفاده کننده‌ها کمک خواهد کرد که روابط موجود را بهتر درک کنند. با این که تجربه نشان داده است، سطح جزئیات شبکه می‌تواند تأثیر چشم‌گیری روی نتایج حسگر گذاری داشته باشد، اما کارهای محدودی در زمینه بررسی تأثیر جزئیات شبکه در نتایج حسگر گذاری صورت گرفته است و در نهایت تا به حال‌کاری در زمینه مدل کردن پلت‌فرم‌های ناهمگون شامل حسگرهای متفاوت در موقعیت‌های گوناگون شبکه توزیع آب صورت نگرفته است. هر یک از موارد بالا می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیق بیشتر در آینده باشد، اما در ادامه کار حاضر پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی برای تعیین حسگرها علاوه بر کمیّت آب، کیفیت آن نیز به‌عنوان یک پارامتر اساسی مورد توجه قرار گیرد. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن زمان در مدل‌سازی آلودگی، طراحی واقع بینانه‌تری برای جانمایی حسگرها ارائه کرد.

۷- مراجع

1. Lee, B. H., and Deininger, R. A. (1992). “Optimal locations of monitoring stations in water distribution system.” *J. Environ. Eng*., 118(1), 4-16.
2. Kumar, A., Kansal, M. L., and Arora, G. (1997). “Identification of monitoring stations in water distribution system.” *J. Environ. Eng*., 123(8), 746-752.
3. Harmant, P., Nace, A., Kiene, L., and Fotoohi, F. (1999). “Optimal supervision of drinking water distribution network.” *Proc., 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference*, Reston, Va.
4. Woo, H. M., Yoon, J. H., and Choi, D. Y. (2001). “Optimal monitoring sites based on water quality and quantity in water distribution systems.” *Proc., in Bridging the Gap: Meeting the World’s Water and Environmental Resources Challenges, Proceedings of the ASCE Annual Conference on Water Resources Planning and Management*, ASCE, Reston, Va.

5. Al-Zahrani, M. A., and Moied, K. (2003). "Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms." *Arabian Journal for Science and Engineering*, 28(1B), 57-75.
6. Afshar, A., Maknoon, R., and Afshar, A. (2006). "Optimum layout for water quality monitoring stations through ant colony algorithm." *J. of Water and Wastewater*, 59, 2-11. (In Persian)
7. Kessler, A., Ostfeld, A., and Sinai, G. (1998). "Detecting accidental contaminations in municipal water networks." *J. Water Resour. Plann Manage.*, 124(4), 192-198.
8. 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.
9. Watson, J.-P., Greenberg, H. J., and Hart, W. E. (2004). "A multipleobjective analysis of sensor placement optimization in water networks." *Proc., World Water and Environmental Resources Congress*, ASCE, Reston, Va.
10. Berry, J., Fleischer, L., Hart, W. E., Phillips, C. A., and Watson, J.-P. (2005a). "Sensor placement in municipal water networks." *Water Resources Planing and Management*, 131(3), 237-243.
11. Carr, R., Greenberg, H.J., Hart, W.E., Konjevod, G., Lauer, E., Lin, H., Morrison, T., and Phillips, C.A. (2006). "Robust optimization of contaminant sensor placement for community water systems." *Math. Program. Ser. B*, 107, 337-356.
12. 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.
13. Isovitsch, S. L., and VanBriesen, J. M. (2008). "Sensor placement and optimization criteria dependencies in a water distribution system." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 134(2), 186-196.
14. Krause, A., Leskovec, J., Isovitsch, S., Xu, J., Guestrin, C., Vanbriesen, J., Small, M., and Fischbech, P. (2008). "Optimizing sensor placements in water distribution systems using submodular function maximization." *Proc., 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symp.*, ASCE, Reston, Va.
15. Ostfeld, A., et al. (2008). "The battle of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 134(6), 556-568.
16. Aral, M. M., Guan, J., and Maslia, M. L. (2010). "Optimal design of sensor placement in water distribution networks." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 136(1), 5-18.
17. Pasteels, J.M., Deneubourg, J.L., and Goss, S. (1987). "Self-organization mechanisms in ant societies (I): Trail recruitment to newly discovered food sources." *J. Experientia supplementum*, 54, 155-175
18. Dorigo, M. (1992). "Optimization, learning and natural algorithms." Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Italie.