مکانیابی بهینه ایستگاههای پایش در شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها

امین افشار [۱] رضا مکنون [۲] عباس افشار [۳]

(دریافت ۸۵/۳/۵ پذیرش ۸۵/۷/۹)

چکیده

محدودیت بودجه و هزینه‌های ابزار پایش از یک طرف و اهمیت کنترل کیفی آب شبکه به لحاظ آلودگیها و به خصوص رویدادهای خاص از طرف دیگر، سبب شده است تا استقرار بهینه ایستگاههای پایش در شبکه‌های آب شهری مورد توجه قرار گیرد. برای انتخاب مکان بهینه استقرار ایستگاههای نمونه‌برداری لازم است تا یک مدل بهینه‌سازی تهیه شود. در این تحقیق، این مدل به وسیله الگوریتم جامعه مورچه‌ها تهیه شده و برای یک مسئله کلاسیک که در تحقیقات قبلی از آن استفاده شده است مورد بررسی قرار گرفته است.گسسته بودن فضای تصمیم از یک طرف و تعداد کثیری از متغیرهای صفر و یک در سیستم مدل‌سازی از طرف دیگر، استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها را بسیار توجیه‌پذیر کرده است. ضمن آنکه تنوع جوابهای ایجاد شده به کمک این الگوریتم، امکان تصمیم‌گیری با توجه به محدودیتهای مختلف اقتصادی، فیزیکی و ... را فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: *ایستگاه پایش، شبکه توزیع آب شهری،کیفیت آب، الگوریتم جامعه مورچه‌ها ، بهینه سازی.*

Optimum Layout for Water Quality Monitoring Stations through Ant Colony Algorithm

Amin Afshar [1] Reza Maknoon [2] Abbas Afshar [3]

(Received May 26, 2006 Accepted Oct. 1, 2006)

Abstract

Due to the high cost of monitoring systems, budget limitations, and high priority given to water quality control in municipal networks, especially for unexpected events, optimum location of monitoring stations has received considerable attention during the last decade. An optimization model needs to be developed for the desirable location of monitoring stations. This research attempts to develop such a model using Ant Colony Optimization (ACO) algorithm and tires to verify it through a bench-mark classical example used in previous researches. Selection of ACO as optimizer was fully justified due to discrete decision space and extensive number of binary variables in modeling system. Diversity of the policies derived from ACO may facilitate the process of decision making considering the social, physical, and economical conditions.

Keywords: *Monitoring Station, Water Distribution Network, Water Quality, Ant Colony Algorithm, Optimization.*

۱- کارشناس ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،
a_afshar@iust.ac.ir

1- M.Sc. of Water Resources Management, Amirkabir University of Technology
2- Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology
3- Professor, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, a_afshar@iust.ac.ir

۱- استاد بیوتکنولوژی گروه زیست‌شناسی دانشگاه اصفهان
۲- کارشناس ارشد میکروبیولوژی
۳- دانشیار بیوشیمی گروه زیست‌شناسی دانشگاه شهرکرد

در دو دهه گذشته توجه مسئولان امر تأمین و توزیع آب شرب در شبکه‌های توزیع آب شهری به پایش کیفیت آب در سیستم‌های توزیع به منظور تحویل آب سالم و ایمن به مصرف کنندگان ابعاد تازه‌ای به خود گرفته است. محدودیت بودجه و هزینه‌های ابزار پایش از یک طرف و اهمیت کنترل کیفی آب شبکه به لحاظ آلودگیها و به خصوص رویدادهای خاص از طرف دیگر، سبب شده است تا استقرار بهینه ایستگاههای پایش با کمترین هزینه و بالاترین کارآیی در شبکه‌های آب شهری مورد توجه قرار گیرد.

برای انتخاب ایستگاههای پایش از یک راه منطقی و معقول، مفاهیم جریان در شبکه توزیع باید کاملاً مد نظر قرار گیرد. برای یک الگوی مصرف معین، جریان در شبکه توزیع باید معلوم و شناخته شده باشد. مدل‌های هیدرولیکی زیادی وجود دارند که سیستم را تحلیل و مشخصات مورد نیاز هیدرولیکی آن را محاسبه و تعیین می‌نمایند.

برای تعیین مکان بهینه ایستگاههای پایش در شبکه‌های آبرسانی از مدل‌های بهینه‌سازی مختلفی می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق به کمک الگوریتم جامعه مورچه‌ها مکان بهینه جهت استقرار ایستگاه پایش در شبکه آبرسانی تعیین شده است. در واقع گسسته بودن فضای تصمیم از یک طرف و وجود متغیرهای صفر و یک در سیستم مدل‌سازی از طرف دیگر، کاربرد الگوریتم جامعه مورچه‌ها را در این امر بسیار مؤثر و کارا کرده است.

به منظور انجام این تحقیق، دو زمینه برگزیده شد که از قبل بر روی آنها کارهای تحقیقاتی صورت گرفته است. نخست، تحقیقاتی که در زمینه تعیین مکان بهینه ایستگاه پایش در شبکه‌های آبرسانی وجود داشته است مورد مطالعه قرار گرفت که خود به دو دسته تقسیم می‌شوند. یک گروه از تحقیقات به پایشهای مستمر کیفی آب شبکه اختصاص دارد و به منظور کسب اطمینان از کیفیت آب مصرفی در شبکه و 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:

در سال ۱۹۹۲ ، لی و دینینگر[1] برای تعیین مکان بهینه ایستگاههای پایش در یک شبکه آبرسانی یک مدل بهینه سازی ارائه کردند که به گمان ما نخستین تحقیقات سامان یافته و جدید در این زمینه می‌باشد [۱]. در سال ۱۹۹۷ ،کومار[2] و همکاران، برای حل این مسائل بر پایه ساختار مدل لی و دینینگر، مدل دیگری را معرفی کردند که از پیچیدگیهای کمتری نسبت به آن مدل برخوردار بود و برای شبکه‌های بزرگ‌تر، قابل استفاده‌تر بود [۲]. همچنین

[1] Lee and Deininger
[2] Kumar

الزهرانی[3] و همکاران در سال ۲۰۰۳ ، از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسائل استفاده کردند [۳].

در دسته دوم تحقیقات، به طراحی شبکه پایش برای پایش آلودگیهای تصادفی در شبکه پرداخته شده است که می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد:

وو[4] و همکاران در سال ۲۰۰۱ با اصلاح وزنها بر اساس نرمال‌سازی غلظتها، تابع هدف جدیدی معرفی کردند [۴]. کسلر و اُستفلد[5] در سال ۱۹۹۸، و استفلد و کسلردر سال ۲۰۰۱ متدولوژی طراحی را برای نمایش ورود آلودگی تصادفی در شبکه آب شهری ارائه کردند [۵ و ۶]. در سالهای ۲۰۰۱ و ۲۰۰۳، بهادر و همکاران مدلی را توسعه دادند که توسط آن جا به جایی و سرنوشت آلاینده‌هایی که به طور بالقوه در سیستم توزیع آب وجود دارند شبیه‌سازی می‌شد [۷ و ۸].

همچنین در زمینه ساختار الگوریتم جامعه مورچه‌ها[6] مطالعاتی برای پیشبرد اهداف این تحقیق انجام شده است که خلاصه‌ای از آنها به شرح زیر ارائه می‌گردد:

ACO[7] به عنوان یک روش فراکاوشی در سال ۱۹۹۲ توسط دوریگو[8] پیشنهاد شد . یکی از اولین کاربردهای ACO ، حل مسئله فروشنده دوره گرد (TSP)[9] بود[۹]. از آنجایی که الگوریتم‌های ACO بستگی به نوع استفاده وشباهت حرکت مورچه‌ها بر روی گراف تصمیم‌گیری دارند، استفاده از مسئله TSP برای تشریح اصول اساسی الگوریتم‌های مورچه بسیار منطقی بوده و در اصل به عنوان یک مثال نمونه برای معرفی این الگوریتم مورد استناد بوده است. بونابو و همکاران[10] نسخه‌ای از ACO که در سال ۲۰۰۰ توسط دوریگو و گامباردلا[11] ارائه شد را به عنوان یک الگوریتم مناسب در حل مسائل SOP معرفی کردند [۱۰ و ۱۱]. در سال ۲۰۰۵، جلالی و افشار از الگوریتم جامعه مورچه‌ها برای طراحی و بهره‌برداری بهینه هیدروسیستم‌ها استفاده کردند که مرجع اصلی تحقیق حاضر در زمینه استفاده از این الگوریتم بوده است [۱۲]. در حوزه مدیریت ساخت نیز، قرایی و افشار در سال ۲۰۰۵ از این الگوریتم در حل مدل چیدمان بهینه کارگاهها استفاده نمودند[۱۳].

هدف از این تحقیق تعیین مکانهای بهینه جهت استقرار ایستگاههای پایش کیفی در شبکه‌های توزیع آب شهری به کمک

[3] Al-Zahrani
[4] Woo
[5] Kessler and Ostfeld
[6] Ant Colony System
[7] Ant Colony Optimization
[8] Dorigo
[9] Traveling Salesman Problem (TSP)
[10] Bonabeau et al.
[11] Gambardella

الگوریتم جامعه مورچه‌ها می‌باشد. در ادامه، ساختار مدل بهینه‌سازی مورد استفاده و نیز عملکرد الگوریتم جامعه مورچه‌ها به طور مختصر تشریح شده است.

۲- معرفی الگوریتم جامعه مورچه‌ها

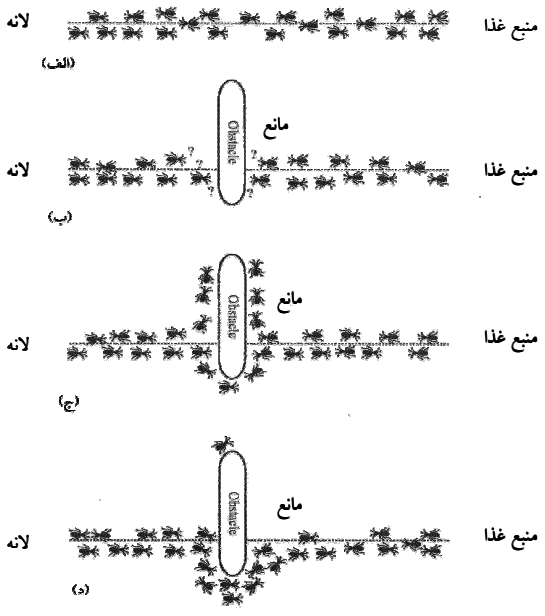
در یک مجموعه از حشرات برای همکاری درباره حل یک مسئله، شکلی از ارتباط مورد نیاز است. این ارتباط می‌تواند مستقیم و یا غیر مستقیم باشد. ارتباط غیر مستقیم بین افراد یک جامعه، زیرکانه‌تر بوده و نیاز به آن دارد که یکی از افراد با اصلاح و تغییر محیط، راهی برای هشدار به سایر افراد جهت عبور از این محیط اصلاح شده در مرحله بعد ایجاد نماید. یکی از این نمونه‌ها جایگذاری فرامان[1] توسط نوع به خصوصی از مورچه‌هاست. وقتی مورچه‌ای به دنبال غذا می‌گردد، در طول مسیر حرکت خود، ماده بوداری به نام فرامان از خود به جا می‌گذارد که سایر مورچه‌هایی که در جستجوی غذا هستند را تشویق (نه اجبار) به عبور از آن مسیر می‌نماید. این فرآیند اصلاح محیط جهت تشویق تغییر در رفتار برای ایجاد ارتباط، استیگمرجی[2] نامیده شده که اولین بار توسط گرس[3] معرفی گردید[۱۴].

جهت فهم بهتر مکانیسم فرآیند یافتن کوتاه‌ترین فاصله بین لانه تا منبع غذایی توسط یک جامعه مورچه، آزمایشهای زیادی توسط گاس[4] و همکارانش در سال ۱۹۸۹ و دیننبرگ[5] و همکارانش در سال ۱۹۹۰، صورت گرفت [۱۵ و ۱۶]. در یکی از آزمایشها از یک مسیر پل مزدوج[6] بین لانه و محل غذا که هر دو مسیر دارای یک طول بودند استفاده شد.

برای شروع کار، مورچه ها جهت یافتن غذا رها شدند. درصد مورچه هایی که هر کدام از دو مسیر را انتخاب نمودند در طول زمان اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که پس از مقداری نوسان در ابتدای کار، مورچه ها به سمت یکی از مسیرها (با یک احتمال مساوی در تکرارهای مختلف) همگرا شدند. در ابتدای آزمایش، هیچ فرامانی بر روی مسیرها موجود نبوده و انتخاب هر یک از مسیرها با احتمال مساوی صورت می گیرد. ویژگی تصادفی انتخاب مسیر، پس از مرحله ابتدایی باعث شد که مورچه های بیشتری یکی از مسیرها را انتخاب نمایند. در طول عبور مورچه ها، میزان فرامان جایگذاری شده افزایش یافته و نهایتاً مقدار فرامان در یک مسیر بسیار بیشتر از مسیر دیگر می شود. این عمل باعث عبور بیشتر مورچه ها از آن مسیر می گردد.

در حالتی که این دو مسیر طولهای متفاوت داشته باشند، به دلیل زمان کمتر عبور برخی از مورچه ها از مسیر کوتاه‌تر، تعداد مورچه‌های عبوری از این مسیر افزایش یافته و نهایتاً مدت زمان انتقال مورچه‌ها به مسیر کوتاه‌تر بسیار کمتر از حالت قبل خواهد بود.(شکل ۱).

[1] Feraman
[2] Stigmergy
[3] Grasse
[4] Goss
[5] Denenburg
[6] Double Bridge



شکل ۱ - حرکت مورچه‌ها در مسیر برای یافتن غذا

هنگامی که یک مانع در طول مسیر ایجاد می گردد، مورچه‌ها در مقابل این مانع قرار گرفته و به دلیل عدم وجود فرامان در دو طرف آن، با احتمال مساوی ممکن است چپ یا راست را انتخاب نمایند. (شکل ۱ ب و ج). این وضعیت در مورد مورچه‌های آن طرف مانع نیز وجود دارد. اختلاف زمانی طی مسیر در طول مسیر کوتاه‌تر، باعث می‌شود که مورچه‌هایی که تصادفی آن مسیر را انتخاب کرده‌اند، سریع‌تر فرامان گذاری کنند. این میزان فرامان در مسیر کوتاه‌تر به سرعت قوی‌تر از مسیر طولانی‌تر می‌شود (به دلیل عبور تعداد بیشتر مورچه‌ها). به این ترتیب پس از اندک زمانی، کلیه مورچه‌ها مسیر کوتاه‌تر را جهت عبور انتخاب می‌نمایند. (شکل ۱ د). به این ترتیب مشاهده می‌گردد که در رفتار جستجوی غذا در مورچه‌ها لزوماً نیاز به حس بینایی و حافظه شخصی نمی‌باشد [۱۷].

جهت یافتن یک جواب مناسب و نیز حفظ شباهت با فرآیند جستجوی غذا در مورچه‌های واقعی، در این الگوریتم از فرامان مصنوعی استفاده می شود. فرامان مصنوعی، یک عدد حقیقی $\tau \in IR$ است که به گزینه‌های قابل انتخاب توسط مورچه مصنوعی در ساخت جواب، تخصیص داده می شود. برای مثال، در مسئله کوتاه‌ترین مسیر، یک مقدار فرامان τ_{ij} به هر مسیر (i,j) داده می‌شود که شاخص چگونگی مطلوبیت عبور از این مسیر می‌باشد. یک مورچه که در گره i واقع شده است، گره بعدی خود را بر اساس رابطه انتقال تصادفی نسبی زیر انتخاب می‌نماید

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

که در آن:

مقدار P_{ij}، احتمال انتخاب گره j توسط مورچه‌ای است که به گره i رسیده است. همان‌گونه که در رابطه ۱ مشاهده می‌گردد، مقادیر بزرگ فرامان مسیر ij باعث افزایش احتمال انتخاب آن مسیر می‌گردد که مشابه عملکرد مورچه‌های حقیقی است.

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی به گونه‌ای هستند که علاوه برفرامان، اجازه استفاده از یک هدایت کننده کاوشی [1] را جهت ساخت جوابهای مختلف به مورچه می‌دهند. در واقع هدایت کننده کاوشی همانند یک چشم (دید) مصنوعی، مورچه‌ها را در انتخاب مسیر مناسب کمک می‌کند.

به منظور حل یک مسئله بهینه‌سازی به کمک الگوریتم جامعه مورچه‌ها نخست لازم است که گرافی مشابه آنچه که در بخش ۴-۱ 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 را با η_{ij}، که همان هدایت کننده کاوشی است، نمایش می‌دهیم. با ترکیب مقادیر کاوشی یا منافع عبور از مسیر ij و فرامان، رابطه انتقال تصادفی نسبی را به شکل زیر تعریف می کنند

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

همان‌گونه که برای فرامان نیز توضیح داده شد، مقادیر کاوشی بزرگ‌تر، سبب افزایش احتمال انتخاب یک مسیر مشخص می‌گردد. دو پارامتر α و β در رابطه۲ جهت تنظیم وزن فرامان و اطلاعات کاوشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال در مسئله تعیین ایستگاه پایش، این پارامتر کاربردی ندارد. زیرا برای مدل، مهم نیست که در چندمین انتخاب خود چه ایستگاهی را برگزیده است .

دوریگو و گامباردلا در سال ۱۹۹۷ با پیشنهاد اصلاحاتی در روش انتقال حالت تصادفی نسبی، امکان کنترل بیشتری بر تعادل بین اکتشاف [2] و بهره‌برداری [3] را فراهم کردند. این روش انتقال شبه تصادفی نسبی [4] به صورت زیر تعریف می گردد

$$j = \begin{cases} \arg \max_{h \in S} \tau_{ih}^{\alpha} . \eta_{ih}^{\beta} & \text{if } q \le q_0 \\ J & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۳)$$

که در آن ، در صورتی که یک مقدار تصادفی q کوچکتر از پارامتر $q_0 \in [0,1)$ باشد ، بهترین ترکیب فرامان و مقدار کاوشی انتخاب می گردد. در غیر این صورت انتخاب بعدی معادل J است که بر اساس احتمال P_{ij} (رابطه ۳) محاسبه می‌گردد. با استفاده از این روش، امکان واسنجی میزان اکتشاف فراهم می‌گردد.

فرامان مسیر در هر دوره در طی یک فرآیند بهنگام‌سازی تغییر می‌کند. هدف از بهنگام‌سازی فرامان، تمرکز بیشتر فرآیند جستجوی مورچه‌ها بر یک منطقه مناسب از فضای جستجو است که امید آن می‌رود با جستجوی متمرکزتر در آن منطقه جواب مطلوب‌تری به دست آید. راهکار اصلی برای این فرآیند، ابتدا تبخیر فرامان است که باعث کاهش میزان فرامان با یک شدت نسبی تعریف شده در هر زمان می‌گردد. پس از آن، تقویت فرامان است که با افزودن عبارت بهنگام کننده به فرامان‌های انتخابی صورت می‌گیرد. به طور کلی شکل بهنگام سازی فرامان به صورت زیر است

$$\tau_{ij} \to (1-\rho).\tau_{ij} + \Delta_{ij} \qquad \forall i,j \in [1,n] \qquad (۴)$$

که در آن :

$\rho \in [0,1)$پارامتری است که میزان از دست دادن فرامان را در هر دوره تبخیر نشان می‌دهد و Δ_{ij}، یک مقدار بهنگام‌سازی است

[1] Heuristic Guidance

[2] Exploration

[3] Exploitation

[4] Pseudo Random Proportional Rule

که در صورتی که مسیر (i,j) توسط مورچه طی نشده باشد برابر صفر است.

۳- ساختار مدل بهینه سازی مکان ایستگاههای پایش در شبکه توزیع آب

در یک شبکه آبرسانی به دلایل مختلفی نظیر کمبود بودجه و شرایط فیزیکی محل، امکان نصب ایستگاه پایش در همه گرهها وجود ندارد. لذا تنها در گرههای خاصی از شبکه می‌توان ایستگاههای پایش را مستقر کرد. به این منظور لازم است که گرههای مناسب برای نصب ایستگاه به گونه‌ای انتخاب شوند که بیشترین پوشش بر روی شبکه اعمال شود. به همین دلیل تابع هدف مدل پیشنهادی به گونه‌ای تعریف شده است که برای تعدادی ایستگاه از قبل تعیین شده، میزان پایش در کل شبکه را بیشینه نماید. به این منظور لازم است که درصد آب عبوری از هر گره شبکه به گره دیگر در مدل مشخص باشد.

برای تعیین وزن آب عبوری از هر گره به گره دیگر ابتدا لازم است، مجموع آب ورودی به هر گره شبکه محاسبه گردد. به این ترتیب چنانچه گره n دارای سه گره بلافصل k,l,m در بالادست خود باشد و نیاز در گره n، توسط آبی که از این سه گره به آن می‌رسد تأمین شود، می‌توان سهم آب عبوری از هر یک از این سه گره به گره n را به ترتیب با P_{kn}, P_{ln}, P_{mn} نشان داد

$$P_{kn} = \frac{Q_{kn}}{Q_{kn} + Q_{ln} + Q_{mn}} \qquad (۵)$$

$$P_{ln} = \frac{Q_{ln}}{Q_{kn} + Q_{ln} + Q_{mn}} \qquad (۶)$$

$$P_{mn} = \frac{Q_{mn}}{Q_{kn} + Q_{ln} + Q_{mn}} \qquad (۷)$$

که در آن: P_{ln}، درصد آب ورودی به گره n است که از گره l تأمین شده است. این در حالی است که هر یک از گره‌های k,l,m خود توسط گرههای بالادستشان تغذیه می‌شوند. در این حالت وزن آب عبوری از هر یک از گرههای بالا دست به این گرهها نیز باید طبق رابطه ۸ محاسبه گردد [۱۲]

$$W_n = (w_{1n}, w_{2n}, \ldots, w_{kn}, w_{ln}, w_{mn}, \ldots, w_{x-l,n}, w_{xn}) \qquad (۸)$$

w_n می‌تواند از رابطه زیر به دست آید

$$W_n = [(P_{kn} \times W_k + P_{ln} \times W_l + P_{mn} \times W_m), w_{xn}] \qquad (۹)$$

از بسط رابطه ۹، رابطه ۱۰ به شکل زیر حاصل می‌شود

$$\begin{aligned} W_n = [&(P_{kn} \times (w_{1k}, w_{2k}, \ldots, w_{xk}) \\ &+ P_{ln} \times (w_{1l}, w_{2l}, \ldots, w_{xl}) \\ &+ P_{mn} \times (w_{1m}, w_{2m}, \ldots, w_{xm}), 1] \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

از ترکیب روابط ۸ و ۱۰ داریم

$$\begin{aligned} w_{1n} &= (P_{kn} \times w_{1k} + P_{ln} \times w_{1l} + P_{mn} \times w_{1m}) \\ w_{2n} &= (P_{kn} \times w_{2k} + P_{ln} \times w_{2l} + P_{mn} \times w_{2m}) \\ w_{3n} &= (P_{kn} \times w_{3k} + P_{ln} \times w_{3l} + P_{mn} \times w_{3m}) \\ &\vdots \\ w_{x,n} &= (P_{kn} \times w_{x,k} + P_{ln} \times w_{x,l} + P_{mn} \times w_{x,m}) \\ w_{nn} &= 1 \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

در روابط فوق w_{in}، وزن آب ورودی به گره n است که از گره i تأمین شده است. همچنین مجموعه روابط ۱۱ عملاً ماتریس پوشش شبکه را در اختیار قرار می‌دهد.

در ساختار اولیه مسئله که توسط لی و دینینگر حل شده بود، ماتریس وزنها به صورت جداگانه و خارج از سیستم بهینه‌ساز، محاسبه و به صورت داده ورودی در مدل لحاظ می شد. در حالی که در این تحقیق از رابطه ۱۲ وزن آب انتقالی از هر گره شبکه به گره دیگر در داخل مدل بهینه ساز و همزمان با اجرای مدل محاسبه می‌شود. استفاده از این رابطه خصوصاً در شرایطی که مدل بزرگ می‌شود و امکان محاسبه این وزنها بدون استفاده از این روابط ریاضی امکان پذیر نخواهد بود بسیار مناسب می‌باشد

$$w_{kn} = \sum_{i=1}^{n} (p_{in} \times w_{ki}) \qquad \forall k, n, k \neq n \qquad (۱۲)$$

۳-۱- مدل سازی در حالت **m** الگوی مصرف و در صد پوشش λ

چنانچه در شبکه توزیع آب در طول ساعات شبانه روز m الگوی مصرف مختلف در گرههای شبکه وجود داشته باشد و متناسب با آن، میزان نیاز در گرهها و همچنین دبی آب عبوری از لوله‌ها در این دو الگو متفاوت باشد، می‌توان به کمک ساختار زیر مدل بهینه سازی را حل نمود

$$\text{Maximize} \quad \sum_{\beta=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} d_{\beta i} \cdot y_{\beta i} \qquad (۱۳)$$

$$P_{\beta ji} = \frac{q_{\beta ji}}{S_{\beta i}} \qquad (۱۴)$$

$$w_{\beta kn} = 1 \qquad \forall k, n, k = n \qquad (۱۵)$$

$$w_{\beta kn} = \sum_{i=1}^{n} p_{\beta in} \cdot w_{\beta ki} \qquad \forall k, n, k \neq n \qquad (۱۶)$$

$$a_{\beta ij} = 0 \quad \text{if} \quad w_{\beta ij} \pi\lambda, a_{\beta ij} = 1 \quad \text{if} \quad w_{\beta ij} \geq \lambda \qquad (۱۷)$$

$$\sum \bar{a}_{\beta,i,j} \cdot x_i - y_{\beta,j} \geq 0 \qquad \forall j \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \leq Ns \qquad (۱۹)$$

در روابط مذکور، $d_{\beta i}$ 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 و $q_{\beta ij}$ آب عبوری از گره i به گره j در الگوی مصرف β می‌باشد. از رابطه ۱۴ درصد آب عبوری از گره j به گره i با پارامتر $P_{\beta ji}$ نشان داده می‌شود. این پارامتر فقط برای گرههای بلافصل شبکه دارای مقدار می‌باشد. سپس از روابط ۱۵ و ۱۶، در صد 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 ۱ می‌باشد. چنانچه درصد پوشش برابر λ در نظر گرفته شده باشد، رابطه ۱۷ مقادیر وزنهای بین گره‌ها را اصلاح می‌کند. به این ترتیب که مقادیر کمتر از λ درصد را برابر صفر و مقادیر بیشتر از آن را برابر یک قرار می‌دهد. در رابطه ۱۸، $\bar{a}_{i.j}$ ترانهاده ماتریسی است که درصد پوشش گره‌ای شبکه را نشان می‌دهد. در رابطه ۱۹، x_i متغیر صفر و یکی است که نشان دهنده حضور و یا عدم حضور ایستگاه پایش در گرهها می‌باشد. همچنین این رابطه نشان می‌دهد که تعداد کل گرههایی که می‌توانند پذیرای ایستگاه پایش باشند برابر و یا کمتر از مجموع کل ایستگاههاست. در مدل پیشنهادی، x_i متغیر تصمیم و هدف، بیشینه کردن پوشش شبکه با تعداد مشخص ایستگاه پایش است.

۴- حل مدل بهینه سازی تعیین ایستگاه پایش در شبکه آبرسانی به کمک الگوریتم جامعه مورچه‌ها

برای حل یک مسئله به کمک ACO مراحل زیر باید طی شود:

۴-۱ - طراحی گراف

در این مسئله می‌توان یک ماتریس $m \times n$ مشابه شکل ۱ تعریف کرد به گونه‌ای که m نشان دهنده تعداد ایستگاههای پایشی است که می‌توان در شبکه منظور کرد و n برابر تعداد تصمیماتی است که برای هر ایستگاه پایش می‌توان در نظر گرفت. با این تعریف در هر ستون ماتریس تنها یک‌بار باید عدد یک وجود داشته باشد، زیرا هر گره تنها یک ایستگاه می‌تواند داشته باشد. همچنین در هر ردیف ماتریس نیز تنها یک بار باید عدد یک وجود داشته باشد، زیرا هر ایستگاه تنها در یک گره می‌تواند مستقر شود. بنابراین عدد ۱ در سطر اول ماتریس نشان می‌دهد که اولین ایستگاه در گره شماره۳ مستقر شده است و اعداد صفر در سطر اول نشان می‌دهند که ایستگاه اول در هیچ گره دیگری نمی‌باشد. در ماتریس فرضی شکل۲ ، پنج ایستگاه در شبکه در نظرگرفته شده است که در گرههای ۲ ،۳، ۴،n-1 و n مستقر شده‌اند.

با توجه به نیاز ACO به تعریف گراف ، این ماتریس در شکل۳ به گراف تبدیل شده است. در این گراف محور افقی نشان دهنده تعداد ایستگاهها یا به عبارتی تعداد تصمیمات برای انتخاب گرههای بهینه برای استقرار ایستگاه پایش و محور قائم نماینده تعداد گرههای شبکه یا به عبارتی تعداد مکانهای موجود جهت انتخاب برای استقرار ایستگاهها می‌باشد. مطابق این گراف، هر یک از مورچه‌ها باید ازیک گره به گره دیگر بروند و در هر گره امکان و مطلوبیت استقرار ایستگاه پایش را ارزیابی کنند. در هر مسیر مورچه‌ها با این محدودیت مواجه هستند که نباید گرههایی را که قبلاً انتخاب کرده اند، مجدداً انتخاب کنند.

۴-۲- تعیین پارامتر کاوشی

چنانچه پیش از این گفته شد برای این مسئله، پارامتر کاوشی نقشی ایفا نمی کند.

۴-۳-تابع برازش

تابع برازش، شاخصی است که نشان‌دهنده ارزش ایستگاههای انتخاب شده است. از این رو ، تعریف تابع برازش در این مسئله با تعریف تابع هدف مترادف است. طبق این تعریف ایستگاههای انتخاب شده‌ای که مقدار تابع هدف بیشتری داشته باشند، یعنی پوشش کل[1] در شبکه توسط این ایستگاهها بیشتر باشد، از ارزش بیشتری برخوردارند. پس تابع برازش به شکل زیر خواهد بود

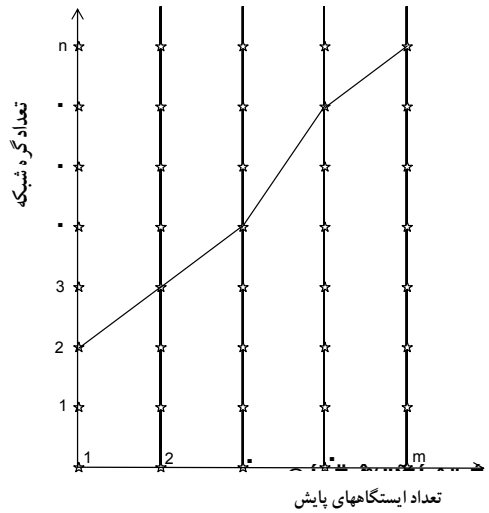
$$TC = d_{\beta i} \times W_{\beta ik} \qquad (۲۰)$$

در رابطه فوق، β، معرف الگوی مصرف ، $d_{\beta i}$ معرف نیاز در نقطه i در الگوی مصرف β و $W_{\beta ik}$ نشان دهنده وزن آب عبوری از گره i به گره k می‌باشد.

[1] Total Coverage

ایستگاهها	گرهها						
	1	2	3	4	.....	n-1	n
1	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0
.	0	1	0	0	0	0	0
.	0	0	0	1	0	0	0
m	0	0	0	0	0	0	1

شکل ۲- ماتریس جایگشت تعیین ایستگاه پایش



شکل ۳ -گراف تعیین مکان بهینه ایستگاههای پایش

۴-۴- تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم

مورچه‌ها در انتخابهای خود برای شکل دادن مسیر و یا انتخاب گرهها از فرمولی احتمالاتی تبعیت می کنند که تابعی از پارامترهای کاوشی و فرامان موجود در مسیر است. اینکه کدام یک از این دو پارامتر اثر بیشتری در انتخابهای مورچه‌ها داشته باشد وابسته به دو پارامتر α و β است (رابطه ۲). چون در این مسئله پارامتر کاوشی کاربردی ندارد و β برابر صفر منظور شده است لذا نیازی به تحلیل حساسیت برای نسبت β/α نمی باشد.

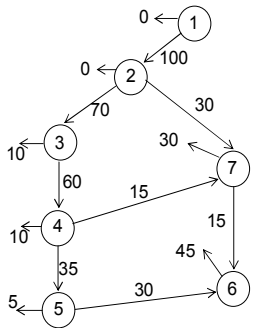
یکی دیگر از پارامترهای اثرگذار بر فضای جستجوی الگوریتم ، پارامتر q_0 است (رابطه ۳). این پارامتر مشخص می کند که آیا حتماً مسیری که دارای تابع احتمال بیشتری است انتخاب می‌شود و یا اینکه تابع احتمال، صرفاً مشخص کننده احتمال انتخاب بوده و ممکن است مسیری با احتمال انتخاب کمتر نیز با توجه به حرکت تصادفی مورچه‌ها انتخاب شود. انتخاب مناسب این پارامتر در حل مسائل نیاز به تحلیل حساسیت دارد. همچنین انتخاب مناسب تعداد مورچه‌هایی که در مسیرهای مورد نظرحرکت کرده و یا به عبارت دیگر فضای جستجو را پوشش می‌دهند نیاز به تحلیل حساسیت دارد.

۵- آزمون مدل

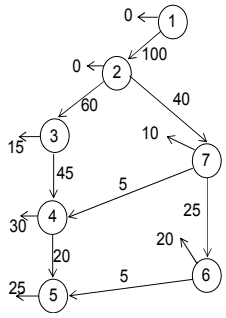
جهت آزمون مدل از یک مسئله کلاسیک که توسط لی و دینینگر ارائه گردیده، استفاده شده است [۱۳].

ساختار مدل مورد استفاده در این مسئله در حالت دو الگوی مصرف در شکلهای۴ و ۵ مشاهده می‌شود .در این شرایط، جدولهای ۱و۲ به ترتیب وزن گره‌ها و میزان پوشش آنها برای هر دو الگوی مصرف در مدل را نشان می‌دهند. جهت حل مدل ابتدا لازم است تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای N_{ant} ، q_0 و ρ صورت گیرد. جدول ۳ و شکل ۶ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامتر ρ را نشان می‌دهند. همان‌طور که درشکل ۶ مشاهده می‌شود مدل برای ρ=۰/۷۵ بهترین پوشش را بر روی شبکه انجام داده است.

همچنین با توجه به شکلهای ۷ و ۸، q_o برابر صفر و N_{ant} =۱۵ برای حل مدل مناسب به نظر می‌رسد.



شکل۴- ساختار شبکه توزیع آب الگوی مصرف اول



شکل۵- ساختار شبکه توزیع آب الگوی مصرف دوم

جدول ۱- ماتریس وزن گره برای الگوی مصرف اول و دوم (مدل لی و دینینگر [۱۳])

گره نمونه‌گیری	ماتریس وزنها برای الگوی مصرف اول						
	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	۰/۹	۱	۰	۰	۰/۱
۵	۱	۱	۰/۷۲	۰/۸	۱	۰/۲	۰/۲۸
۶	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱
۷	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱

گره نمونه‌گیری	ماتریس وزنها برای الگوی مصرف دوم						
	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	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۶۷	۱	۰/۳۳
۷	۱	۱	۰/۳۳	۰/۳۳	۰	۰	۱

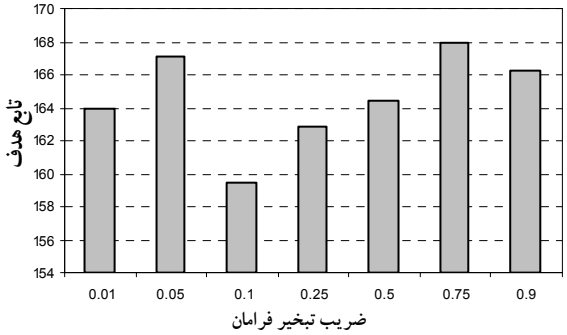
جدول ۲- ماتریس درصد پوشش برای الگوی مصرف اول و دوم (مدل لی و دینینگر [۱۳])

گره نمونه‌گیری	ماتریس پوشش برای الگوی مصرف اول						
	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

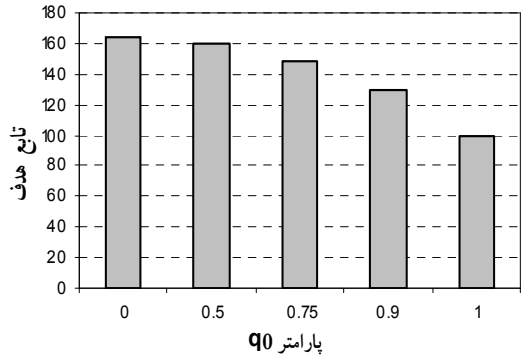
گره نمونه‌گیری	ماتریس پوشش برای الگوی مصرف دوم						
	گره ۱	گره ۲	گره ۳	گره ۴	گره ۵	گره ۶	گره ۷
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
۴	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰
۵	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۷	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱

جدول ۳- تحلیل حساسیت ضریب تبخیر فرامان

پارامتر	ρ						
	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۹
متوسط	۱۶۳/۹۵	۱۶۷/۱	۱۵۹/۴۵	۱۶۲/۹	۱۶۴/۴۵	۱۶۸	۱۶۶/۳
بدترین جواب	۱۱۵	۱۳۰	۱۰۰	۱۰۵	۱۱۵	۱۴۵	۱۳۰
بهترین جواب	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰

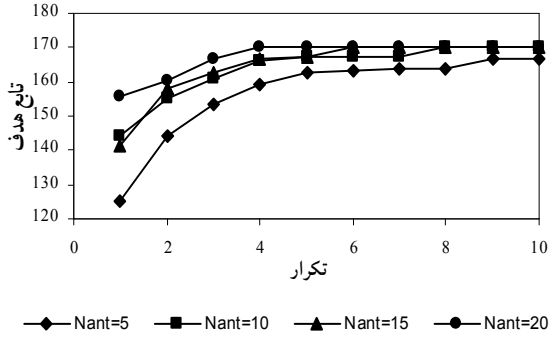


شکل ۶- تحلیل حساسیت ضریب تبخیر فرامان



شکل ۷- تحلیل حساسیت پارامتر q_0

این مسئله در شرایط انتخاب دو ایستگاه پایش و درصد پوشش ۵۰٪ حل شده است. مدل ارائه شده به کمک الگوریتم جامعه مورچه‌ها در زمان ۰/۴۶ ثانیه اجرا شده و در هر ۱۰ اجرای مختلف، مدل به جواب بهینه جامع به مقدار تابع هدف ۱۷۰ واحد رسیده است. این مقدار با نتیجه حل مدل توسط لی و دینینگر یکسان است و نشان از صحت عملکرد مدل دارد. در شکل ۸، همگرایی جوابها برای این ۱۰ اجرای مختلف مشاهده می‌شود.



شکل ۸- نحوه همگرایی مقادیر تابع هدف بر حسب تعداد مورچه ها(میانگین ۱۰ اجرای مختلف)

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها، نشان داده شده است که استفاده از این نوع الگوریتم‌های فراکاوشی در حل این مسائل مفید بوده و به راحتی و بدون هیچ مشکلی قادر به حل مدل می‌باشد. از مزایای این روش در حل شبکه‌های آبرسانی می‌توان به تعیین گستره‌ای از جوابهای مناسب در حل مدل اشاره کرد. از آنجا که این الگوریتم در حل مدل دارای جوابهای متنوعی است به راحتی می‌توان با در نظر گرفتن محدودیتهایی نظیر بودجه، شرایط فیزیکی محل گرهها و امکان یا عدم امکان استقرار ایستگاه پایش در برخی گرهها مکانهای مناسبی را برای استقرار ایستگاهها انتخاب نمود. خصوصاً در شبکه‌های بزرگ‌تر مزیت این نوع الگوریتم‌ها به خوبی مشخص می‌شود. همچنین در صورت استفاده از دیگر ماجول‌های بهینه سازی نظیر لینگو[1] این احتمال وجود دارد که در اثر افزایش تعداد گرههای شبکه و یا ایستگاههای پایش، مدل مزبور به علت وجود تعداد زیاد متغیرهای غیر خطی و متغیرهای صفر و یک با مشکل مواجه شود. این در حالی است که استفاده از این الگوریتم حتی در این شرایط نیز اگرچه به تعیین بهینه‌ترین مکانها منجر نمی‌گردد، اما قادر است گرههای مناسب برای استقرار ایستگاهها را تعیین کند. الگوریتم‌های دیگری مشابه این نوع الگوریتم (نظیر الگوریتم ژنتیک) برای تعیین مکان بهینه ایستگاه پایش در شبکه توزیع آب در تحقیقات قبلی مورد استفاده قرار گرفته است[۳]. اما بررسی کارهای گذشته نشان می‌دهد که هنوز از این الگوریتم در حل این مدل‌ها استفاده نشده است.

[1] Lingo

۷- مراجع

1- Lee, B.H., and Deininger, R.A. (1992). "Optimal locations of monitoring stations in water distribution system." *J. Envir. Engrg.,* 118(1), 4-16.

2- Kumar, A., Kansal, M.L., and Arora, G. (1997). "Identification of monitoring stations in water distribution system." *J. Envir. Engrg.*, 123(8), 748-752.

3- Al-Zahrani, M.A., and Moied, K.h. (2003). "Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms." *The Arabian Journal for science and Engineering,* 28 (1B), 57-75.

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., Bridging the gap: Meeting the world's water and environmetal resources challenges,State of the Practice*, World Water and Environmental Resources Congress,CD-ROM,ASCE,Reston,Va.

5- Kessler, A., and Ostfeld, A. (1998). "Detecting accidental contaminations in municipal water networks: Application." *Proc*., *Water Resources and the Urban Environment,* 25th Annual Conf. on Water Resources Planning and Management, ASCE, New York, 272-278.

6- Ostfeld, A., and Kessler, A. (2001). "Protecting urban water distribution systems against accidental hazards intrusions." *Proc., IWA*, 2nd Conf., CD-ROM, IWA.

7- Bahadur, R., Pickus, J., Amstutz, D., and Samuels, W. (2001). "A GIS based water distribution model for Salt Lake City,UT." *Proc., 21st Annual ESRI Users Conf.,* (CD-ROM),Environmental Systems Research Institute, Redlands, Calif.

8- Bahadur, R., Samuels, W.B., Grayman,W., Amstutz, D., and Pickus, J.(2003). "Pipeline net: A model for monitoring introduced contaminants in a distribution system." *Proc., World Water & Environmental Resources Congress 2003 and Related Symposia*, CD-ROM, ASCE, Reston, Va.

9- Dorigo, M. (1992). "Optimization, learning and natural algorithms." Ph.D. thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy.

10- Bonabeau, E., Dorigo, M., and Theraulaz, G. (1999). *From natural to artificial swarm intelligence*, Oxford University Press.

11- Dorigo, M., Di Caro, G., and Gambardella, L.M. (1999). "Ant algorithms for discrete optimization." *Artificial Life*, 5(2),137-172.

12- Jalali, M.R., and Afshar, A. (2006). "Reservoir operation by ant colony optimization algorithms." *Iranian Journal of Science and Technology Transaction*, 30 (B1), 107-117.

13- Gharaie, E., Afshar, A., Jalali, M.R. (2006). "Static site layout optimization with ACO algorithm." *WSEAS Transaction on Systems,* 4(5), 685-690.

14- Grasse, P.P. (1959). "La reconstruction dun id et les coordinations interindividuelles chez." *bellicosttermes natalensts et cubitermes* sp. La theorie de la stigmergie: essai d'interpretation du comportement des termites constructeurs, Insects Sociaux 6,41-81.

15- Goss, S., Aron, S., Deneubourg, J.L., and Pasteels, J.M. (1989). "Self-organized shortcuts in the Argentine ant." *Naturwissenschaften*, 76, 579-581.

16- Deneubourg, J.L., Aron, S., and Goss, S. (1990). "The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant." *J. Insect Behaviour,* 3,159-168.

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.