

مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای مدیریت مناسب امنیت شبکه‌های توزیع آب شهری

محمدرضا بازرگان لاری^{۱*}، فراز مدیری^۲ و محمدرضا نیکو^۳

چکیده

امنیت آب از مسائل مهمی است که می‌تواند در پی تزریق یک آلاینده سمی در آب شرب یک شهر به‌عنوان نمونه در پی یک حمله تروریستی به خطر افتد. در صورتی که شبکه فاقد یک مدیریت مناسب امنیت باشد، آسیب‌دیدگان چنین حادثه‌ای می‌تواند تمام جمعیت یک شهر باشند. در مطالعات پدافند غیرعامل، اولین گام در هر سامانه هشدار و کنترل آلودگی تشخیص سریع منبع آلودگی است. در این راستا، از مشاهده‌های پایش برای تشخیص منبع آلودگی استفاده می‌شود. تعیین تعداد بهینه نقطه‌های پایش لازم و بهترین چیدمان آن‌ها از مسائل پیچیده‌ای است که به نقطه‌های پتانسیل تزریق آلودگی عمدی، مقدار و خصوصیات آلاینده تزریقی وابسته است. بهترین سامانه پایش، سامانه‌ای است که در آن اول نقطه‌ها لازم برای پایش شبکه، دوم جمعیت تحت تأثیر در لحظه تشخیص و سوم تعداد حالت‌های عدم تشخیص، به طور همزمان کمینه شوند. در این پژوهش برای تعیین منحنی تبادل بین هدف‌ها متضاد مذکور، الگوریتم تکاملی چند هدفه سریع NSGA-II با مدل شبیه‌سازی EPANET تلفیق شده و از تحلیل مونت کارلو در لحاظ عدم قطعیت‌ها در تزریق آلودگی استفاده شده است. همچنین در تعیین نقطه تعادل منحنی تبادل به دست آمده، از مدل رفع اختلاف نش به کار گرفته شده است. برای نشان‌دادن کارایی و توانایی روش پیشنهادی، شبکه آب شهر لامرد شبیه‌سازی شده و بهترین نقطه‌های پایش برای این شهر تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: پدافند غیرعامل، سامانه اعلام خطر، شبکه توزیع آب، EPANET، NSGA-II.

ارجاع: بازرگان لاری م. ر. مدیری ف. و نیکو م. ر. ۱۳۹۳. مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای مدیریت مناسب امنیت شبکه‌های توزیع آب شهری. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۱۲۷-۱۳۵.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

۳- استادیار بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، شیراز.

* نویسنده مسئول: bazargan@iauet.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۱۸

مقدمه

با توجه به ارتباط مستقیم برخی از زیرساخت‌های مهم کشور مانند سامانه‌های آبرسانی شهری، با نیازهای اولیه آحاد مردم، ضروری است به حفاظت این تأسیسات در مقابله با بحران‌های گوناگون از جمله اقدامات خراب‌کارانه، بیش از پیش توجه شود تا بتوان با تکنولوژی‌های برتر، در عرصه‌های مختلف در برابر آن بحران‌ها، راهکار مؤثری اتخاذ کرد و آسیب‌پذیری را کمینه کرد. بدین منظور ضروری است که در زمان‌هایی غیر از وقوع بحران، راه‌حلهایی تحت عنوان پدافند غیرعامل برای تأسیسات در دست مطالعه و همچنین تأسیسات موجود، اندیشیده شود.

پدافند غیرعامل در حوزه آب به پیشگیری، آمادگی و مقابله در برابر تهدیداتی مانند آلوده‌سازی عمدی آب به گونه‌ای می‌پردازد که کاهش آسیب‌پذیری این تأسیسات در شرایط بحران برای تأمین آب را در پی دارد (قاضی‌زاده، ۱۳۸۷). پایش دایمی شبکه، می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری شبکه‌های آب داشته باشد. به عنوان نمونه، کراس و همکاران (۲۰۰۸) و بازرگان‌لاری (۲۰۱۴) مدلی را برای جانمایی مؤثر حسگرها در ایمنی شبکه توزیع آب در مقابل آلودگی با روش تحلیل چند معیاره ارائه کردند. از مهم‌ترین معیارهای کمی پیشنهاد شده در پژوهش‌های ایمنی شبکه توزیع آب در مقابل آلودگی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- حجم آب آلوده مصرفی (کسلر و همکاران، ۱۹۹۸)
- جمعیت تحت تأثیر (بری و همکاران، ۲۰۰۵)
- زمان تشخیص (کومار و همکاران، ۱۹۹۷)

ژوو همکاران (۲۰۱۰) به طراحی شبکه حسگر خبره‌ای برای تشخیص آلودگی تصادفی در شبکه توزیع آب پرداختند. ایشان سنسورهایی در هر گره از شبکه توزیع برای تسریع اطلاع‌رسانی به تمام جمعیت تحت پوشش شبکه جانمایی کردند. همچنین در این مطالعه ژوو همکاران (۲۰۱۰) به بررسی پژوهش‌های مهم انجام شده توسط چانگ (۱۹۸۶)، برندو و چو (۱۹۸۹)، اون و داسکین (۱۹۹۸)، رول و ایسلت (۲۰۰۵) و اشنایدر (۲۰۰۶) که برای توسعه مدل‌های بهینه‌سازی انجام گرفته است، پرداختند. در مکان‌یابی سنسورها از سه روش محدودیت‌های مالی و فیزیکی استفاده از سه روش

مکان‌یابی مبتنی بر بهینه‌سازی قطعی^۱، بهینه‌سازی تصادفی^۲، بهینه‌سازی مطمئن^۳، مرسوم است. در بهینه‌سازی قطعی، کسلر و همکاران (۱۹۹۸) بدون بررسی طبیعت دینامیکی سیستم، ترکیب عدم قطعیت آلودگی‌های رخ داده را بررسی می‌کند. در صورتی که کراس (۲۰۰۸) به عدم قطعیت آلودگی‌های رخ داده و طبیعت دینامیکی شبکه توزیع آب توجه کرده است. در بهینه‌سازی تصادفی، لی و دینینگر (۱۹۹۲) بر شاخص بدتر شدن آلودگی آب متمرکز شدند و برای مطالعه عدم قطعیت آلودگی‌های رخ داده و طبیعت دینامیکی شبکه توزیع آب، از تصویرهای لحظه‌ای استفاده کردند تا بتوانند آسیب‌های بلندمدت در سناریوهای مختلف آلودگی را کم کنند. در بهینه‌سازی مطمئن کر و همکاران (۲۰۰۶) با توجه به عدم قطعیت مکان‌های آلودگی و احتمال رخداد آلودگی در آن، راه حلی قدرتمند ارائه کردند. شناسایی سریع و به موقع آلودگی باعث شد که عکس‌العمل‌های مناسب و به‌هنگام را برای جلوگیری از بروز یک فاجعه به دست آورد. ژوو همکاران (۲۰۱۰) با در نظر گرفتن زمان وقوع آلودگی در مکان‌یابی مطمئن سنسورها عدم قطعیت مکانی و زمانی را همزمان در نظر گرفتند از آنجا که با بالا رفتن تقاضا، حجم آب آلوده شده مصرفی نیز بیشتر می‌شود، ثبت گزارش آلودگی از سنسورها در مدل ارائه شده توسط ژوو، مشکل و پرهزینه است (ژوو و همکاران، ۲۰۱۰). انجام مطالعات ادامه‌دار در این زمینه تأییدکننده این مطلب است که این موضوع به‌صورت جدی در سطح بین‌المللی در حال توسعه است.

انتخاب تعداد و چیدمان مناسب ایستگاه‌های پایش به‌دلیل گستردگی عدم قطعیت‌های مربوط به زمان و مکان تزریق آلاینده از مسائل پیچیده‌ای است که نیاز به تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است و می‌تواند در صورت تزریق آلودگی در شبکه، نقش مهمی در کم کردن خسارت‌ها داشته باشد. به عبارت دیگر، با انتخاب تعداد و چیدمان مناسب ایستگاه‌های پایش، می‌توان در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با بیشترین قابلیت اطمینان، از وقوع آلودگی آگاه‌شد و بدین‌ترتیب خسارت‌ها را کم کرد. در مدل پیشنهادی این پژوهش، کم کردن تعداد ایستگاه‌های پایش در جهت کاهش هزینه احداث و بهره‌برداری در کنار

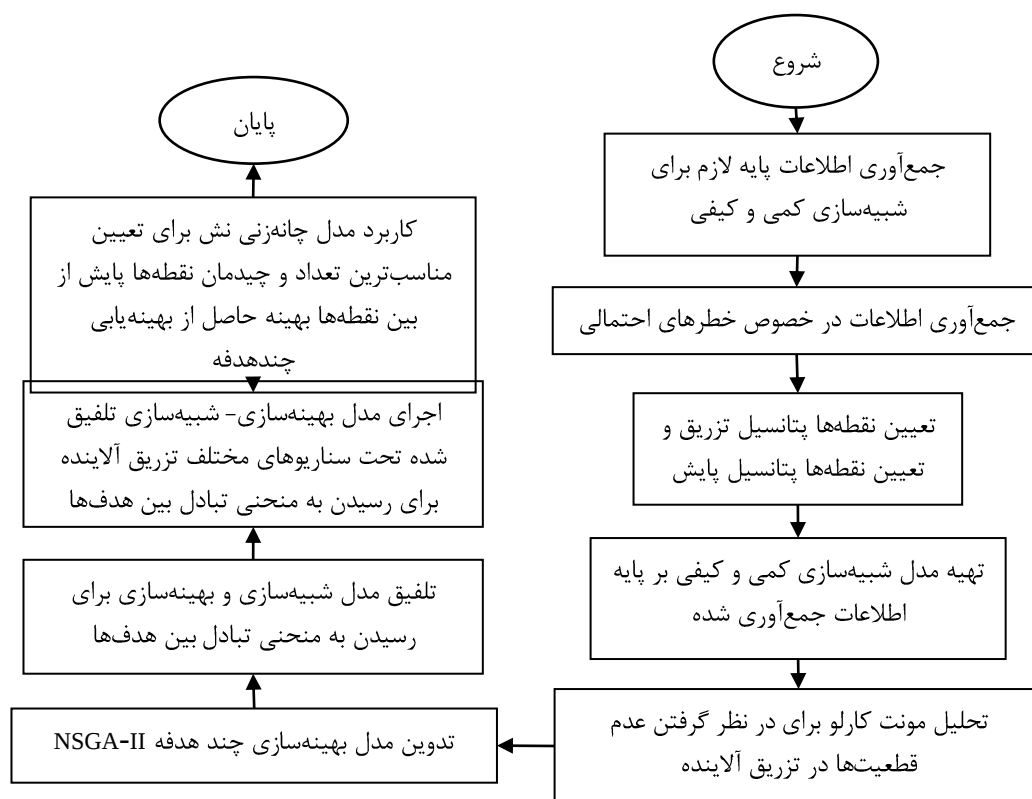
1- Deterministic optimization
2- Stochastic optimization
3- Robust optimization

که در شکل ۱ نشان داده شده است، لازم است در ابتدا اطلاعات پایه لازم برای مدل شبیه‌سازی کمی و کیفی شبکه، در محدوده منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شود. در شبکه‌های توزیع آب شهری، با توجه به امکان تزریق مواد آلاینده از طریق شیرهای آتش‌نشانی در شرایط واقعی، این نقطه‌ها به‌عنوان نقطه‌ها پتانسیل تزریق آلودگی مطرح‌اند. از این روی، علاوه بر مشخصات هیدرولیکی لازم، در اختیار داشتن اطلاعاتی در خصوص محل گره‌ها، لوله‌ها، جمعیت تحت تأثیر هر گره (جمعیت مصرف‌کننده آب آشامیدنی در هر گره) و محل شیرهای آتش‌نشانی نیز ضروری است.

بیشینه کردن قابلیت اطمینان تشخیص توجه شده که این مهم از طریق کم کردن زمان تشخیص آلودگی، کم کردن جمعیت تحت تأثیر آلودگی در زمان تشخیص و کم کردن تعداد حالت‌های عدم تشخیص وقوع آلودگی، ممکن شده است.

مواد و روش‌ها

در شکل ۱، ساختار مدل پیشنهادی برای تعیین سامانه بهینه تشخیص آلاینده در شبکه‌های توزیع آب شهری نشان داده شده است. مدل توسعه داده شده در این پژوهش از سه بخش اصلی مدل شبیه‌سازی، مدل بهینه‌یابی و مدل چانه‌زنی تشکیل شده است. همان‌طور



شکل ۱- ساختار مدل پیشنهادی برای تعیین سامانه بهینه تشخیص آلاینده در شبکه‌های توزیع آب شهری

آب مهم است.

پس از تعیین ماده آلاینده شاخص، با توجه به پایداری آن در آب (واکنش آن با آب و جداره لوله) و میزان حداکثر مجاز آن آلاینده، ضریب‌های لازم برای مدل‌سازی کیفی شبکه توزیع آب تعیین می‌شود. از آنجا که در روند بهینه‌یابی، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در

در گام جمع‌آوری اطلاعات در خصوص خطرهای احتمالی، نوعی سم به‌عنوان ماده آلاینده شاخص با توجه به مشخصات شیمیایی مواد سمی به‌کار رفته در اقدامات خراب‌کارانه گذشته، انتخاب می‌شود. در انتخاب آلاینده شاخص، توجه به هزینه تهیه آن، قابل دسترس بودن، سرعت انحلال و اثر سم در آب مانند تغییر رنگ، بو و مزه

ویرایش جدیدی است از الگوریتمی که بار اول توسط دب و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شد. بهترین جواب‌ها در NSGA-II بر پایه الگوریتم ژنتیک و با توجه به برآزش، گسترش و پراکندگی جواب‌ها در یک روند نخبه گرایانه انتخاب می‌شود (برای جزئیات بیشتر به دب و همکاران، ۲۰۰۲ مراجعه شود). از تلفیق مدل بهینه‌سازی چندهدفه با مدل شبیه‌سازی کمی و کیفی آب و اجرای آن برای تمامی سناریوهای تزریق آلودگی با توجه به تضاد موجود در هدف‌ها، به جای یک جواب بهینه مشخص، مجموعه‌ای از بهترین جواب‌های ممکن تعیین می‌شوند که در واقع بهترین پیشنهاد برای انتخاب تعداد و محل ایستگاه‌های پایش کیفی هستند. نتایج حاصله از این مدل تلفیقی، رویه‌ای از مجموعه جواب‌های بهینه غریب‌ست در فضای هدف‌ها است که به منحنی تبادل بین هدف‌ها مشهور است.

تصمیم‌گیری در مورد انتخاب نقطه مناسب از بین جواب‌های بهینه، از موضوعات چالش برانگیز بوده است که از طریق مدل‌های چانه‌زنی ممکن است. به دلیل ماهیت چندهدفه بودن مسئله حاضر، تئوری چانه‌زنی نش^۲ که از مشهورترین تئوری‌های رفع اختلاف است می‌تواند برای انتخاب نقطه تعادل منحنی تبادل بین هدف‌ها به کار رود. نقطه تعادل نش از کمینه کردن تابع ضربی زیر به دست می‌آید:

$$\text{Min} \prod_{j=1}^m (f_j - I_j) \quad (1)$$

در این معادله که حل تئوری چانه‌زنی برای مواردی است که توابع هدف ارزش یکسانی دارند، m تعداد توابع هدف، f_j مقدار تابع هدف j ام و I_j نقطه عدم توافق تابع هدف j ام است (بازرگان لاری و کراچیان، ۲۰۰۸). نقطه تعادل حاصل از کاربرد تئوری نش در فضای هدف‌ها مشخص کننده بهترین تعداد و چیدمان نقطه‌ها پایش است که متناظر با کمترین هزینه، سریع‌ترین متوسط زمان تشخیص و کمترین جمعیت تحت تأثیر در زمان وقوع حادثه است.

معرفی منطقه مورد مطالعه

شبکه مورد استفاده در این پژوهش، شبکه آب شهر لامرد در جنوب استان فارس است که در شکل ۲ نشان داده

مسئله لازم است مدل شبیه‌سازی بارها برای سناریوهای مختلف آلودگی در بدنه مدل بهینه‌سازی اجرا شود، تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ضروری است. در این پژوهش برای شبیه‌سازی کمی- کیفی شبکه از EPANET که از پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده در شبکه‌های توزیع آب است و درستی آن بارها توسط پژوهشگران مختلف به اثبات رسیده، استفاده شده است. محل تزریق آلودگی، زمان تزریق و غلظت آلاینده، متغیرهایی هستند که ماهیت تصادفی آن‌ها در ساختار پیشنهادی از طریق آنالیز مونت کارلو در نظر گرفته شده است. با توجه به زیاد بودن سناریوهای تولیدی، برای رسیدن به هدف‌های این پژوهش، لازم است امکان اجرای دایم مدل شبیه‌ساز در بدنه مدل بهینه‌سازی با تغییر خودکار ورودی‌های مدل و بازیابی نتایج مدل‌سازی کمی- کیفی شبکه ممکن شود تا با تغییر ورودی مدل شبیه‌ساز کمی- کیفی شبکه، پس از هر شبیه‌سازی مقادیر توابع هدف متناظر با سناریوی مربوطه به طور خودکار مشخص شود و به مدل بهینه‌یاب گزارش شود.

در هر سناریوی تزریق، محل گره‌هایی که در آن‌ها غلظت آلاینده از حد مجاز گذشته است، همچنین زمان سپری شده تا لحظه تشخیص آلودگی در ایستگاه‌های پایش و کل جمعیت تحت تأثیر (آلوده شده) در زمان تشخیص، مؤلفه‌هایی هستند که از خروجی مدل شبیه‌ساز استخراج شده و به مدل بهینه‌یاب گزارش می‌شوند. شرایطی وجود دارد که در برخی از سناریوهای تزریق آلودگی، نقطه‌ها پایش مشخص شده در کل بازه زمانی شبیه‌سازی قادر به تشخیص آلودگی نیستند، از این شرایط به حالت‌های عدم تشخیص یاد می‌شود. در یک شبکه پایش بهینه، باید تعداد حالت‌های عدم تشخیص نیز کمینه شوند. از آنجا که مدل بهینه‌سازی در این پژوهش، مبتنی بر کمینه کردن همزمان چند تابع هدف است، انتخاب یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه سریع به دلیل بزرگی ابعاد مسئله، لازم است. الگوریتم چندهدفه^۱ NSGA-II که بر اساس طبقه‌بندی غریب‌ست عمل می‌کند، در دهه گذشته به دلیل عملکرد مناسب در حل مسائل چندهدفه، تعدادی پژوهشگران با موفقیت به کار گرفته شده است (به عنوان نمونه بازرگان لاری و همکاران، ۲۰۰۹؛ باشی و همکاران، ۲۰۱۰ و بازرگان لاری و همکاران، ۱۳۸۹). این الگوریتم

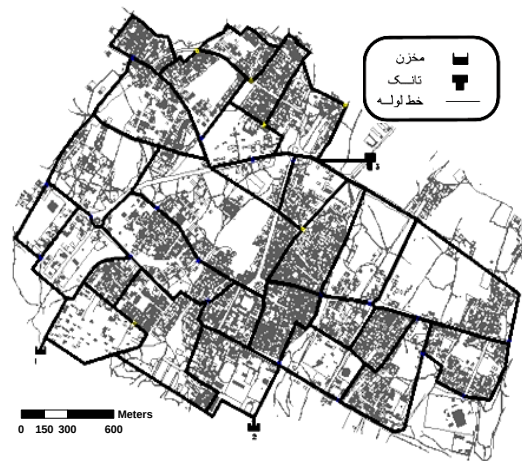
کیفی آب (آلاینده) برای تزریق در شبکه در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که سم آرسنیک پس از انحلال، در رنگ، بو و مزه آب تغییرات ناچیزی به وجود می‌آورد که به راحتی قابل تشخیص نیست.

همان‌طور که در مدل مفهومی شکل ۴ دیده می‌شود، در ابتدا، موقعیت ایستگاه‌های پایش برای انجام شبیه‌سازی، با مدل بهینه‌سازی NSGA-II تعیین می‌شود. سپس در مدل شبیه‌سازی تمام سناریوهای آلودگی برای این شبکه پایش، بررسی و مقادیر توابع هدف مورد نظر ثبت می‌شود. برای تعیین پاسخ شبکه به حالت‌های ممکن برای چیدمان نقطه‌های پایش و در حالت‌های مختلف ممکن تزریق عمده آلودگی، لازم است که چندین بار شبیه‌سازی سناریوهای مختلف صورت پذیرد. از اینرو برای هر دوره زمانی تزریق و برای هر گره پتانسیل تزریق آلودگی، اجراییک مدل شبیه‌سازی آلودگی لازم است. بدین منظور زیربرنامه‌ای تدوین شده است که در ازای هر سناریوی پایش، برای هر یک از حالت‌های ممکن تزریق تولید شده در قالب شبیه‌سازی مونت کارلو، به طور خودکار فایل ورودی مدل EPANET را تولید کرده و پس از اجرای مدل شبیه‌ساز مقادیر توابع هدف را از خروجی مدل استخراج کند. نتایج هر حالت به طور جداگانه ذخیره می‌شود تا بتوان به کمک آن‌ها مقادیر متوسط توابع هدف را جهت گزارش به مدل بهینه‌سازی محاسبه کرد. برای کلیه گره‌های پتانسیل تزریق که بر طبق شکل ۳ تعداد ۲۱ شیر آتش‌نشانی موجود در شبکه توزیع آب شهر لامرد است، چون به طور معمول اقدامات خراب‌کارانه با استفاده از تاریکی شب انجام می‌شود، محدوده ساعت ۶ بعدازظهر تا ۶ صبح به‌عنوان بازه زمانی تزریق و بازه‌های غلظت تزریق آرسنیک نیز از ۲ تا ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد و بر این اساس برای منطقه مورد مطالعه ۱۵۰۰ سناریو آلودگی به‌صورت تصادفی تولید شد.

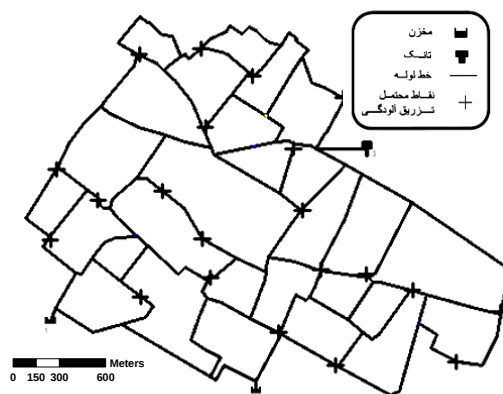
در روند رسیدن به نقطه‌های غیرپست بر منحنی تبادل بین هدف‌ها، در یک پروسه تکرار شونده هدفمند، به ازای هر چیدمان نقطه‌های پایش که از طریق مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود، سناریوهای محتمل نفوذ عمده آلودگی، اجرا و مقادیر توابع هدف از شبیه‌سازی در گام‌های زمانی یک ساعته، تعیین می‌شوند.

شده است. این شبکه حلقوی، دارای ۱۲۵ گره و ۱۸۴ لوله با طول ۳۷/۷۰۲ کیلومتر است. آب این شهر از تصفیه‌خانه، هم به‌صورت پمپاژ و هم به‌صورت ثقلی در شبکه توزیع آب جریان می‌یابد.



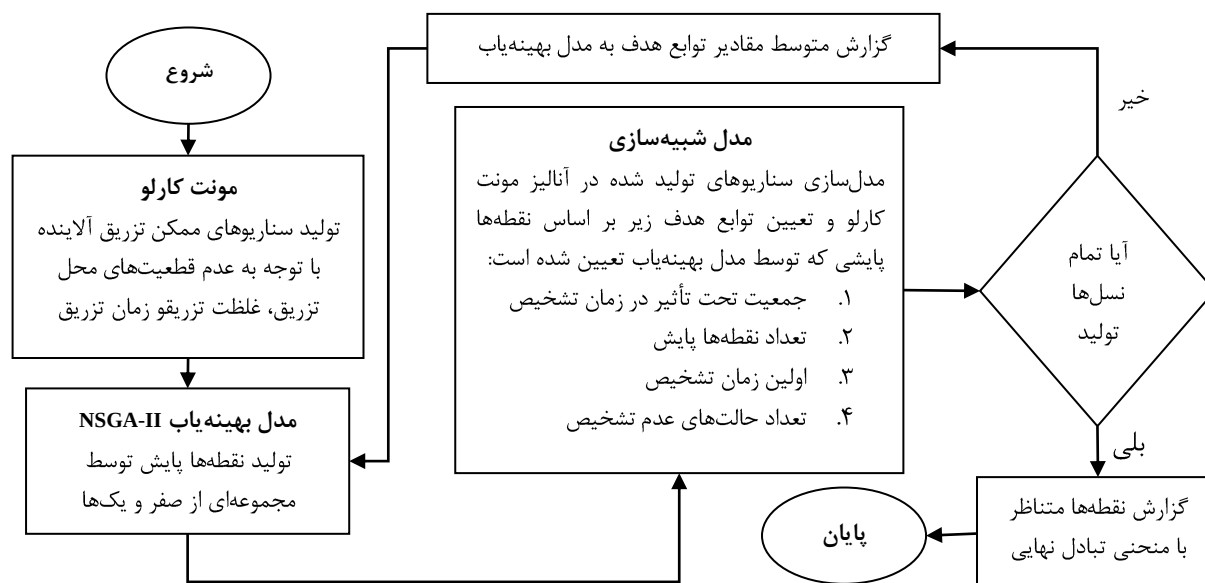
شکل ۲- شمای کلی منطقه مورد مطالعه و شبکه توزیع آب شهر لامرد (فائدی، ۱۳۸۴)

در شبکه توزیع مورد مطالعه، ۲۱ شیر آتش‌نشانی وجود دارد که نقطه‌های مناسبی برای تزریق ماده سمی احتمالی به شبکه‌اند. موقعیت این نقطه‌ها با نشانگر + در شکل ۳ نشان داده شده است. در مدل‌سازی محدوده مورد مطالعه هیدرولیک شبکه در یک دوره ۲۴ ساعته مدل‌سازی شده است.



شکل ۳- محل نقطه‌ها پتانسیل تزریق آلاینده در نظر گرفته شده در شبکه مورد مطالعه (بازرگان لاری و همکاران، ۱۳۹۱)

سم آرسنیک که از نمک‌های در دسترس و ارزان قیمت است و انحلال آن در آب راحت و سریع است. در این پژوهش با توجه به سابقه کاربرد، این سم به‌عنوان شاخص



شکل ۴- مدل مفهومی تلفیق مدل شبیه‌سازی و مدل بهینه‌سازی

نتایج و بحث

پس از تلفیق مدل بهینه‌یابی چند هدفه NSGA-II و مدل شبیه‌سازی کمی و کیفی شبکه آب شهری، با در نظر گرفتن سناریوهای تولیدی تزریق آلودگی، تعداد و محل بهینه ایستگاه‌های پایش کیفی بر مبنای سناریوهای تزریق آلودگی تعیین می‌شود. در مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تدوین شده، ضمن بررسی نتایج تزریق آلودگی در تمام سناریوها و در تمامی ایستگاه‌های پایش پتانسیل، مجموعه‌ای از بهترین جواب‌ها به‌عنوان بهترین تعداد و محل بهینه برای ایستگاه‌های پایش کیفی تعیین می‌شود. مدت زمان لازم برای اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی و رسیدن به جواب بهینه در نسل ۲۰۰م و اجرای برنامه در مجموعه موازی شده ۳ کامپیوتر Pentium 4، حدود ۷ روز طول کشید. همگرایی جواب‌های حاصله از نسل ۱۵۰ به بعد مشهود بوده و تغییرات منحنی تعامل بین هدف‌ها

از این نسل به بعد بسیار ناچیز بوده است. با این وجود برای حصول اطمینان از بهینه‌بودن نقطه‌ها، اجرای مدل تا نسل ۲۰۰م ادامه پیدا کرد. نمونه‌ای از مقادیر توابع هدف به ازای تعداد ۵ تا ۱۰ ایستگاه پایش کیفی، در جدول ۱ نمایش داده شده است. صفر و یک‌های نشان داده شده در این جدول به‌ترتیب مبین غیرفعال یا فعال بودن نقطه‌های پایش پتانسیل است. افزایش تعداد نقطه‌های پایش، بهبود سایر هدف‌ها را در پی دارد ولی هزینه را افزایش خواهد داد. همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش، برای انتخاب بهترین گزینه از بین جواب‌های بهینه حاصله و تعیین تعداد مناسب نقطه‌های پایش به‌صورتی که سهم هزینه پایش را به میزان زیادی افزایش ندهد و همزمان احتمال تشخیص و سایر هدف‌ها مدنظر را برآورده سازد از مدل چانه‌زنی نش استفاده شده است.

جدول ۱- نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی در منطقه مورد مطالعه

بهترین چیدمان نقطه‌ها پایش	تعداد حالات عدم تشخیص	متوسط جمعیت تحت تأثیر (نفر)	متوسط زمان تشخیص (دقیقه)	تعداد ایستگاه‌های پایش
۰۰۰۰۰۱۱۰۰۰۰۰۰۰۰۱۱۰	۲۶۹	۲۷۹۹	۲۵۲	۵
۰۰۰۰۰۱۰۰۰۰۰۰۰۱۱۰۱۱۱	۲۲۱	۲۹۷۰	۲۳۰	۶
۰۰۰۰۰۱۱۰۱۰۰۰۰۱۰۱۰۱۱۰	۲۲۲	۲۸۰۸	۲۳۸	۷
۰۰۰۰۰۱۱۱۰۱۰۰۰۱۱۱۰۰۰۱	۱۲۹	۶۱۳۶	۲۱۸	۸
۰۱۰۰۰۱۱۱۱۱۰۰۱۰۰۰۱۰۱	۱۳۵	۴۹۵۷	۲۱۴	۹
۰۱۰۰۰۱۱۱۱۰۱۱۱۰۰۰۱۱۱	۱۸۹	۴۷۴۶	۲۱۶	۱۰

به عبارتی بهترین جواب بهینه فرض می‌شود. بدین ترتیب با استفاده از تئوری چانه‌زنی نش از میان جواب‌های بهینه آخرین نسل تولید شده با مدل بهینه‌سازی چند هدفه، بهترین جواب یعنی بهترین تعداد و مکان استقرار ایستگاه‌های پایش شبکه، با هدف بالابردن احتمال تشخیص و کمینه‌کردن هزینه‌های تشخیص در شهر لامرد تعیین شد.

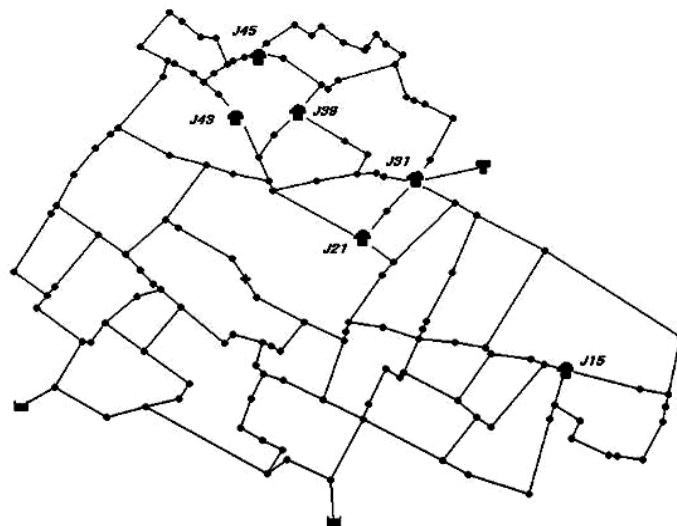
با تقسیم مقادیر چهار تابع هدف تشریح شده بر مقدار بیشینه ممکن هر هدف، مقدار هر تابع هدف بین صفر و یک مقیاس یا به اصطلاح استاندارد می‌شود تا با ارزش یکسان در تابع ضریبی نش به کار روند. در جدول ۲، مقادیر استانداردسازی شده جواب‌های متناظر با آخرین نسل مدل بهینه‌سازی ارائه شده است. طبق معادله ۱، در شرایطی که ارزش هر سه تابع هدف یکسان است سطر متناظر با کمترین مقدار تابع ضریبی نش، نقطه تعادل و یا

جدول ۲- کاربرد تئوری چانه زنی نش در تعیین نقطه تعادل منحنی تبادل به کمک توابع هدف استاندارد شده

مقدار تابع ضریبی نش	تعداد عدم تشخیص استاندارد شده	متوسط جمعیت تحت تأثیر استاندارد شده	متوسط زمان تشخیص استاندارد شده	تعداد ایستگاه‌های پایش استاندارد شده
۰/۰۳۵	۰/۹۳۹	۰/۶۹۰	۰/۸۷۵	۰/۰۶۳
۰/۰۵۹	۰/۴۲۶	۰/۸۴۹	۰/۸۷۱	۰/۱۸۸
۰/۰۳۶	۰/۴۶۸	۰/۲۶۶	۰/۹۲۶	۰/۳۱۳
۰/۰۳۴۵	۰/۳۸۴	۰/۲۸۳	۰/۸۴۶	۰/۳۷۵
۰/۰۴۰	۰/۳۸۶	۰/۲۶۷	۰/۸۷۵	۰/۴۳۸
۰/۰۵۳	۰/۲۲۴	۰/۵۸۴	۰/۸۰۱	۰/۵۰۰

(ایستگاه‌های پایش مجاور گره‌های شماره ۱۵، ۲۱، ۳۱، ۳۹، ۴۳ و ۴۵) در شهر لامرد در شکل ۵ نشان داده شده است. تمرکز این نقطه‌ها در بخش‌های پرجمعیت شهر، نشان دهنده منطقی بودن جواب‌های به دست آمده از مدل بهینه‌سازی است.

نقطه تعادل نش متناظر با انتخاب ۶ ایستگاه پایش است و این در شرایطی است که با این انتخاب، متوسط زمان طی شده از تزریق تا تشخیص آلودگی برابر ۲۳۰ دقیقه بوده و متوسط جمعیت آلوده شده تا لحظه تشخیص آلودگی، ۲۹۷۰ نفر است. مکان استقرار ۶ ایستگاه پایش بهینه



شکل ۵- نمایش بهترین موقعیت ایستگاه‌های پایش به دست آمده از مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

ایجاد ایستگاه‌های پایش و پایش دایم شبکه‌های توزیع آب به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت کیفیت آب لازم است. بدین منظور، در این پژوهش، روشی مناسب برای تعیین

نتیجه‌گیری

با توجه به آسیب‌پذیری شبکه‌های توزیع آب و خسارت‌های جبران‌ناپذیر جانی ناشی از آلودگی شبکه آب،

کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده آب، دانشگاه صنعت آب و برق. ۹۷ ص.

5. Bazargan-Lari M. R. 2014. An evidential reasoning approach to optimal monitoring of drinking water distribution systems for detecting deliberate contamination events. *Journal of Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.061, in press.
6. Bazargan-Lari M. R. and Kerachian R. 2008. Developing a Conflict Resolution Model for Conjunctive Use of Surface and Groudwater Resources: Application of NSGA-II and the NASH Bargaining Theory. *Proceeding of International Water Association (IWA) World Water Congress and Exhibition*. Austria Center. Vienna. Austria.
7. Bazargan-Lari M. R. Kerachian R. and Mansoori A. 2009. A Conflict resolution model for conjunctive use of surface and groundwater resources considering the water quality issues: A case study. *Environmental Management*. 43(3):470-482.
8. Bashi-Azghadi S. N. Kerachian R. Bazargan-Lari M. R. and Solouki K. 2010. Characterizing an unknown pollution source in groundwater resources systems using PSVM and PNN. *Expert Systems with Applications*. 37(10):7154-7161.
9. Berry J. W. Fleischer L. Hart W. E. Phillips C. A. and Watson J. P. 2005. Sensor placement in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1313:237-243.
10. Brandeau M. L. and Chiu S. S. 1989. An overview of representative problems in location research. *Management Science*. 35(6):645-674.
11. Carr R. D. Greenberg H. J. Hart W. E. Konjevod G. Lauer E. Lin H. Morrison T. and Phillips G. A. 2006. Robust optimization of contaminant sensor placement for community water systems. *Mathematical Programming Series B*. 107:337-356.
12. Chung C. 1986. Recent applications of the maximal covering location planning (M.C.L.P.) model. *Journal of the Operational Research Society*. 37(8):735-746.
13. Deb K. Pratap A. Agarwal S. and Meyarivan T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 6(2):182-197.
14. Kessler A. Ostfeld A. and Sinai G. 1998. Detecting accidental contaminations in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 124(4):192-198.
15. Krause A. Leskovec J. Guestrin C. VanBriesen j. and Faloutsos C. 2008. Efficient sensor placement optimization for securing large water distribution networks *Journal of Water*

تعداد و محل نقطه‌ها پایش کیفی در شبکه توزیع آب با تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ارائه شد. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، با شبیه‌سازی شبکه آب شهر لامرد و تلفیق مدل شبیه‌ساز با مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و استفاده از تئوری چانه‌زنی نش، بهترین موقعیت ایستگاه‌های پایش در شبکه توزیع آب تعیین شد. پیشنهادی بودن احتمال تشخیص در صورت تزریق مواد آلاینده و نیز در نظر گرفتن آلاینده‌ای واقعی با غلظت معین و منطقی، در کنار کاهش هزینه‌های پایش با توجه به بهینه‌کردن تعداد و مکان ایستگاه‌های پایش از مشخصه‌های روش پیشنهادی است. نتایج حاصله، نشان از قابلیت مناسب مدل پیشنهادی برای به کارگیری در شهرهای بزرگ، با هدف پدافند غیرعامل و جلوگیری از اعمال خراب‌کارانه یا حتی در حوادث اتفاقی و مدیریت بحران‌های مربوط به آلودگی آب دارد. گام بعدی این پژوهش می‌تواند شامل آنالیز نتایج نمونه برداری‌های انجام شده در نقطه‌های پایش بهینه برای تشخیص نقطه تزریق آلودگی و دامنه گسترش ماده سمی در شبکه توزیع آب باشد که در تعیین روش پاک‌سازی شبکه تأثیر زیادی دارد.

منابع

۱. بازرگان لاری م. ر. باشی‌ازغدی س. ن. مدیری ف. و کریمی ا. ۱۳۹۱. کاربرد تئوری تأسف در طراحی بهینه سامانه تشخیص آلاینده در شبکه توزیع آب شهری. مجموعه مقالات نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان. ایران. ۱-۶.
۲. بازرگان لاری م. ر. کراچیان ر. صدقی ح. فلاح‌نیا م. عابدعلمدوست ا. و نیکو م. ر. ۱۳۸۹. تدوین قوانین احتمالاتی برای بهربرداری بهینه تلفیقی کمی- کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زمان واقعی: کاربرد ماشین‌های بردار پشتیبان. مجله علمی- پژوهشی آب و فاضلاب. ۴: ۵۴-۶۹.
۳. قائدی م. ۱۳۸۴. مهندسی مجدد و طراحی شبکه‌های توزیع آب شهرستان لامرد. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران. دانشکده عمران. دانشگاه صنعت آب و برق. ۸۸ ص.
۴. قاضی‌زاده ع. ۱۳۸۷. ارزیابی اجزای سامانه‌های آبرسانی از دیدگاه مهندس پدافند غیرعامل. پایان‌نامه دوره

- Resources Planning and Management, ASCE. 134(6):516-526.
16. Kumar A. Kansal M. L. and Arora G. 1997. Identification of monitoring stations in water distribution system. *Journal of Environmental Engineering*. 1238:746-752.
 17. Lee B. H. and Deininger R. A. 1992. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system. *Journal of Environmental Engineering*. 118(1):4-16.
 18. Owen S. H. and Daskin M. S. 1998. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*. 111(3):423-447.
 19. ReVelle C. S. and Eiselt H. A. 2005. Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*. 165(1):1-19.
 20. Snyder L. V. 2006. Facility location under uncertainty: A review. *IIE Transactions* 38(7):537-554.
 21. Xu J. Johnson M. P. Fischbeck P. S. Small M. and VanBriesen J. M. 2010. Robust placement of sensors in dynamic water distribution systems. *European Journal of Operational Research*. 202:707-716.

