

مکان‌یابی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه‌های توزیع آب شهری با لحاظ تعارضات ذی‌نفعان

ساره سادات ناصری‌زاده قمصری^۱، حسین منتصری^۲ و محمد پروین‌نیا^۳ و محمدرضا نیکو^{۴*}

چکیده

امروزه ورود آلاینده‌ها به شبکه توزیع آب، به‌عنوان یک تهدید برای سلامت افراد جامعه است. در این مقاله، به‌منظور کاهش خطرهای ناشی از ورود آلودگی به داخل شبکه توزیع آب، یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای تعیین تعداد و موقعیت بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی تدوین شده است. در مدل پیشنهادی، علاوه بر بهینه‌سازی چندهدفه سنسورهای تشخیص آلودگی، راه‌حل مورد توافق میان ذی‌نفعان دخیل در طراحی بهینه سنسورها نیز بررسی شده است. در این پژوهش، با استفاده از مدل شبیه‌سازی EPANET، تزریق عمدی آلاینده بر اساس مدل شبیه‌سازی مونت‌کارلو صورت پذیرفت. سپس داده‌های مورد نیاز، برای اتصال به مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و تعیین منحنی تعامل بین اهداف ذی‌نفعان، استخراج شد. راه‌حل مورد توافق از منظر تمامی ذی‌نفعان، با استفاده از روش‌های گزینش اجتماعی و چانه‌زنی بازگشتی مورد ارزیابی قرار گرفت. کلیه روش‌ها در شبکه توزیع شهر لامرد صورت گرفت. در نهایت، تعداد ۶ سنسور از منظر روش گزینش چانه‌زنی بازگشتی با هم‌آرایی، پیشنهاد گردیده است که به ازای این تعداد سنسور، جمعیت آلوده‌شده، زمان تشخیص و احتمال تشخیص ندادن آلاینده به‌ترتیب برابر با ۴۷۳۵ نفر، ۳۳ دقیقه و ۱۳/۶ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تئوری انتخاب اجتماعی، راه‌حل مورد توافق ذی‌نفعان، روش چانه‌زنی بازگشتی، مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، مدل شبیه‌سازی EPANET.

ارجاع: ناصری‌زاده قمصری س.، منتصری ح.، پروین‌نیا م. و نیکو م. ر. ۱۳۹۸. مکان‌یابی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه‌های توزیع آب شهری با لحاظ تعارضات ذی‌نفعان. مجله پژوهش آب ایران. ۳۲: ۱۳۷-۱۴۶.

۱- کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

۴- استادیار گروه مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

* نویسنده مسئول: nikoo@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۹

مقدمه

شبکه‌های توزیع آب شهری، از جمله زیرساخت‌های اساسی کشورند که وظیفه انتقال آب آشامیدنی سالم و با کیفیت را دارا می‌باشند. با توجه به ویژگی‌های اصلی این نوع زیرساخت‌ها (همچون گستردگی، دسترسی آسان به تمامی نقاط شبکه توزیع آب و ...)، شبکه‌های توزیع آب از جمله سیستم‌های آسیب‌پذیر در برابر خطرهای عمدی یا ذاتی می‌باشند که هر گونه اختلال در کیفیت آب انتقالی درون شبکه، منجر به آلوده شدن بخش قابل توجهی از افراد مصرف‌کننده آب می‌شود. بنابراین، پایش تمامی نقاط شبکه توزیع آب، گرچه ایده‌آل است؛ اما به لحاظ اجرایی مورد قبول و امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین، بهینه‌سازی سنسورهای تشخیص آلودگی وارد شده به شبکه، به‌عنوان یک رویکرد مفید برای کاستن خطرهای ناشی از ورود آلاینده در شبکه توزیع آب، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این منظر، موقعیت بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی باید به نحوی باشد که علاوه بر تحت پوشش قراردادن تمامی گره‌های مصرف‌کننده در شبکه توزیع آب، میزان اثر آلودگی بر جمعیت مصرف‌کننده آب آلوده را نیز کمینه گرداند (هارت و ماری، ۲۰۱۰). بهینه‌سازی سنسورهای تشخیص آلودگی از منظر محققان بسیاری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ماهیت چندهدفه بودن تعداد سنسورها در یک شبکه توزیع آب، در دهه اخیر توابع هدف متنوعی از جمله کمینه‌کردن تعداد افراد آلوده‌شده، زمان تشخیص، حجم آب آلوده مصرف‌شده و بیشینه‌کردن احتمال تشخیص رخدادهای آلودگی در تحقیقات محققان با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد ارزیابی قرار گرفته است (کیم و همکاران، ۲۰۱۰؛ شن و مکین، ۲۰۱۰؛ شفیی و زکمان، ۲۰۱۳؛ بازرگان لاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ بازرگان لاری، ۲۰۱۴؛ یو و همکاران، ۲۰۱۵؛ راتهی و گوپتا، ۲۰۱۶). در ادامه، به بررسی برخی از مهم‌ترین مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، در زمینه موقعیت بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در دهه اخیر پرداخته شده است. آرال و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II، دو شبکه مورد آزمایشی را با اهداف کمینه‌کردن زمان تشخیص آلودگی و جمعیت متأثر از آلودگی؛ و همچنین بیشینه‌کردن احتمال تشخیص، بهینه‌سازی کردند. کیم و همکاران (۲۰۱۰) بهینه‌سازی سنسورهای یک شبکه توزیع آزمایشی را به‌صورت یک

مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، شامل کمینه‌کردن احتمال تشخیص رویداد آلودگی وارد شده به شبکه و مدت زمان تشخیص آلودگی با استفاده از الگوریتم چندهدفه ژنتیک MOGA^۱، بررسی کردند. لیو و آکندالر (۲۰۱۴) با استفاده از مدل بهینه‌سازی NSGA-II، منحنی تعامل بین دو هدف فاصله زمانی تشخیص و احتمال تشخیص آلودگی در یک شبکه توزیع فرضی را مورد بررسی قرار دادند. بازرگان لاری (۲۰۱۴) به‌منظور دستیابی به بهترین آرایش سنسور تشخیص آلودگی، با استفاده از رویکرد دو مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره ER^۲ و TOPSIS^۳ به یافتن راه‌حل قابل قبولی از منظر تمامی اهداف، بر روی منحنی تعامل بین اهداف متضاد در مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II پرداختند. یو و همکاران (۲۰۱۵) بر اساس تقاضای آب مصرفی در هر یک از نقاط شبکه توزیع آب شهر و تغییر در هیدرولیک شبکه که منتج به تغییر جهت جریان در شبکه می‌شود، دو روش مرکزیت^۴ و مدل بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی سنسورها در یک شبکه توزیع فرضی ارائه و نتایج آن را با یکدیگر مقایسه کردند. افشار و میری خمبی (۲۰۱۵) موقعیت سنسورهای تشخیص آلودگی با تعداد نامشخص را تحت دو تابع هدف بیشینه‌کردن درصد پوشش شبکه توسط مجموعه سنسورها و کمینه‌کردن میزان آب آلوده مصرف‌شده با استفاده از الگوریتم NA-ACO^۵ بهینه‌سازی کردند. ناصری‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی را به‌منظور جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه توزیع آب شهری با هدف کمینه‌کردن ارزش در معرض ریسک شرطی، احتمال تشخیص ندادن و تعداد سنسور ارائه کردند. در این پژوهش، ریسک از منظر جمعیت آلوده‌شده و زمان تشخیص آلودگی بررسی شد. به‌منظور انتخاب بهترین گزینه بر روی منحنی تعامل، از روش PROMETHEE^۶ به‌عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد.

با توجه به مطالعات انجام‌شده، تاکنون مکان‌یابی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی با توجه به سازمان‌ها و

1- Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA)

2- Evidential Reasoning (ER)

3- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

4- Betweenness Centrality

5- Non-dominated Archiving ACO algorithm (NA-ACO)

6- Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)

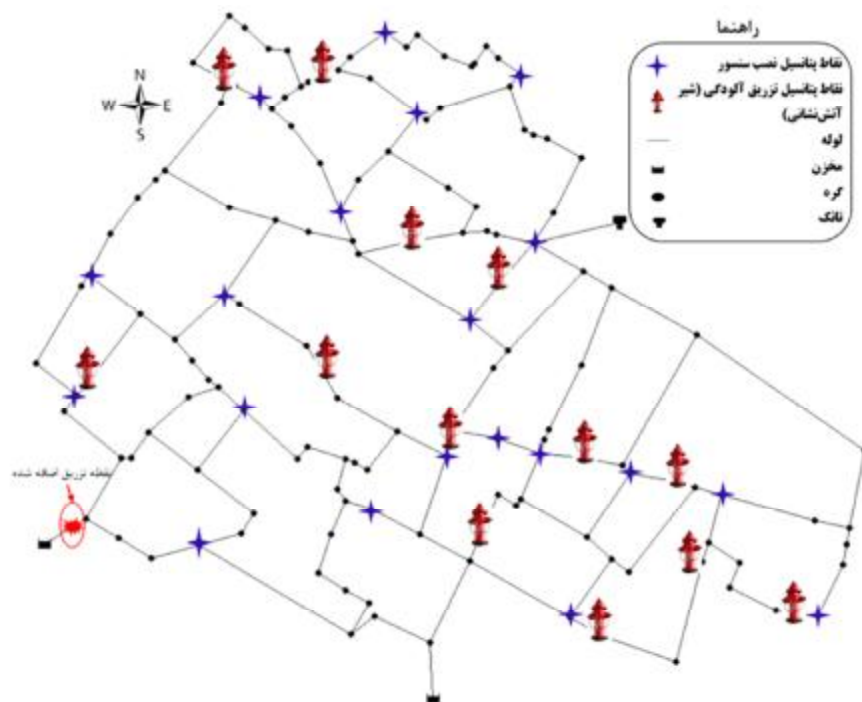
گزینش اجتماعی و چانه‌زنی بازگشتی، راهکار مورد قبول مابین ذی‌نفعان، به‌منظور برآورده‌شدن موقعیت بهینه سنسور تشخیص آلودگی با در نظر گرفتن الویت هر یک از سازمان‌ها انتخاب گردیده است.

مواد و روش‌ها

بررسی موردی

شبکه مورد بررسی در این مقاله، شبکه توزیع آب شهر لامرد در جنوب استان فارس می‌باشد (شکل ۱). این شبکه دارای ۱۲۵ گره و ۱۸۴ لوله و با طول ۳۷/۷۰۲ کیلومتر است. مجموع جمعیت مصرف‌کننده آب در این شهر برابر با ۱۴۷۶۴۳ نفر (مربوط به سال طرح) می‌باشد.

تصمیم‌گیرندگان دخیل، مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است. به همین جهت، ارائه راهکار مورد قبول، بین تصمیم‌گیرندگان و بخش‌های اثرپذیری که کیفیت آب آشامیدنی و عملکرد سیستم توزیع آب را تأمین کند، مورد توجه می‌باشد. در این پژوهش، ارائه راهکار مورد قبول میان ذی‌نفعان با توجه به ماهیت تزریق عمدی درون شبکه توزیع آب، تحت عدم قطعیت‌های موجود بررسی شده است. بنابراین، با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به ورود آلودگی عمدی به شبکه مورد بررسی در شهر لامرد اهداف متضاد، شامل کمینه‌کردن تعداد سنسور و هزینه مربوط به آن، احتمال عدم تشخیص سناریوی آلودگی، زمان تشخیص و جمعیت آلوده‌شده در مدل بهینه‌سازی چندهدفه از منظر سازمان‌های دخیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت، با استفاده از مدل‌های

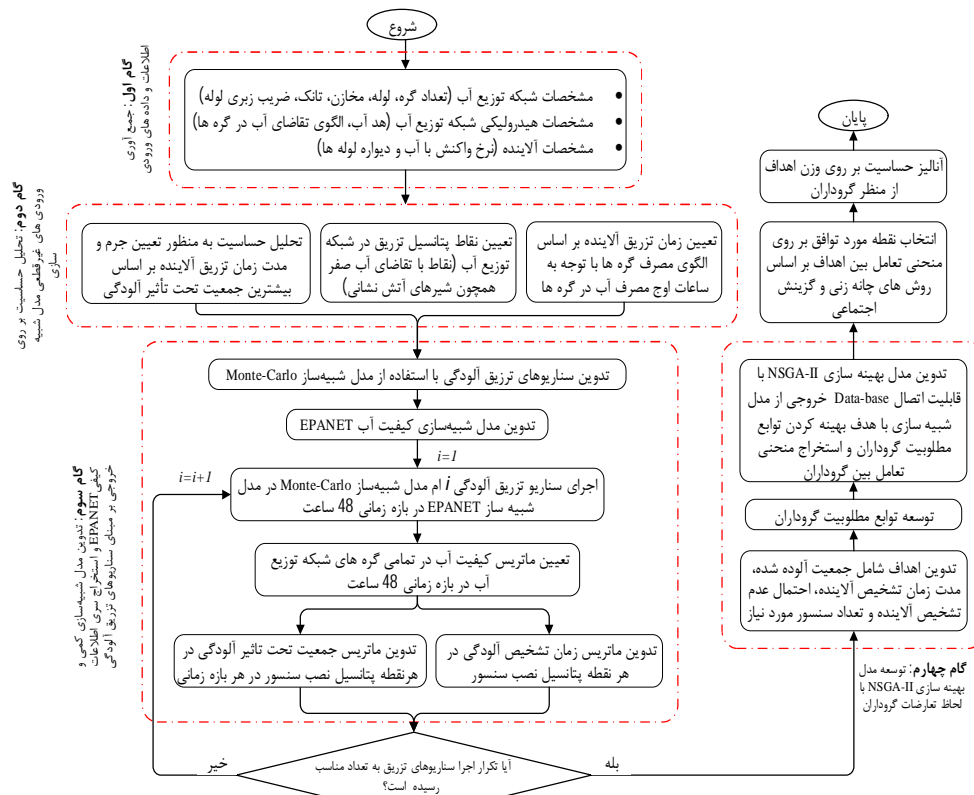


شکل ۱- نمایی از شبکه توزیع آب شهری لامرد (فائدی، ۱۳۸۴)

روش حل مسئله

در شکل ۲، روند روش پیشنهادی مدل توسعه‌داده شده برای بهینه‌سازی چندهدفه مکان و تعداد سنسور در شبکه توزیع آب، با لحاظ تعارضات بین ذی‌نفعان ارائه شده است.

در شبکه توزیع آب شهر لامرد، لوله‌ها عموماً از جنس پلی‌اتیلن و در بعضی مناطق از جنس چدن می‌باشند. در این مطالعه، آرسنیک به‌عنوان یک آلاینده خطرناک مورد بررسی قرار گرفته است؛ چرا که مقدار بسیار کم آن موجب ایجاد شرایط بحرانی در مصرف‌کنندگان می‌گردد.



شکل ۲- ساختار متدولوژی پیشنهادی جهت توسعه مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی چندهدفه سنسورهای تشخیص آلودگی شبکه توزیع آب شهری با لحاظ تعارضات ذی‌نفعان

جدول ۱- پارامترهای هیدرولیکی و کیفی در مدل شبیه‌سازی

EPANET	
مقدار	پارامتر
۴۸ (ساعت)	مدت زمان شبیه‌سازی کیفی و هیدرولیکی شبکه توزیع آب
۵ (دقیقه)	گام‌های زمانی دوره شبیه‌سازی
۱۴۵	ضریب زبری متوسط لوله‌ها
۵۰-۶۰۰ (میلی‌متر)	قطر لوله‌ها
۰/۰۵- (۱/روز)	ضریب ثابت حجمی
۰/۹۳ (لیتر)	حجم آب شرب مصرفی روزانه هریک از مصرف‌کنندگان

در گام دوم، پارامترهای غیرقطعی تزریق آلودگی مشخص شده است. در این پژوهش، نقاط محتمل ورود آلودگی به شبکه، شیرهای آتش‌نشانی در نظر گرفته شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است (بازرگان لاری، ۲۰۱۴). همچنین، یک نقطه تزریق مازاد به‌منظور ارائه یک راه‌حل کارآمد در تمامی شرایط بحرانی، در قسمت پایین شبکه در نظر گرفته شده است. نقاط انتخابی نصب سنسور نیز به‌گونه‌ای تعیین شده‌اند که علاوه بر اینکه این نقاط به‌طور

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی شامل چهار گام اصلی می‌باشد. در گام اول، مشخصات فیزیکی شبکه توزیع آب، شامل تعداد گره‌ها، لوله‌ها، مخازن و تانک مشخص می‌گردد؛ همچنین، مشخصات هیدرولیکی (هد و تقاضای آب در گره‌ها) به‌منظور تحلیل رفتار هیدرولیکی و کیفی جریان آب جمع‌آوری می‌گردد. نوع آلاینده، نرخ واکنش (واکنش مرتبه اول) ضرایب ثابت دیواره‌ای^۱ و حجمی^۲ آرسنیک (مقادیر به ترتیب صفر و ۰/۰۵-) نیز تعیین می‌گردد. پارامترهای هیدرولیکی و کیفی شبیه‌سازی شبکه توزیع آب شهر لامرد در جدول ۱ ارائه گردیده است.

1- Bulk flow reaction coefficient
2- Wall reaction coefficient

برای رسیدن به ترکیب سنسور بهینه و راه حل مورد قبول بر روی منحنی تعامل بین اهداف، روش‌های چانه‌زنی^۱ (چانه‌زنی بازگشتی با هم‌آرایی^۲ و چانه‌زنی بازگشتی با تأیید q چانه‌زن^۳) و گزینش اجتماعی^۴ (امتیازدهی برداش، روش عملی کندروسه^۶ و قانون رأی‌گیری میانه^۷) مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل شبیه‌سازی کمی و کیفی آب EPANET

تعیین غلظت آلاینده در هر گره از شبکه توزیع آب در طول زمان، یکی از بخش‌های مهم متدولوژی پیشنهادی می‌باشد. مدل شبیه‌سازی EPANET، به‌عنوان یک رویکرد شبیه‌سازی عددی، رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در تمامی گره‌ها و لوله‌های شبکه توزیع آب شهری پیش‌بینی می‌کند. در این مدل شبیه‌سازی، دو معادله پایداری انرژی (معادله غیرخطی بین جریان و افت هد در لوله‌ها) و جرم (معادله خطی) به‌صورت هم‌زمان به‌منظور برآورد فشار در گره‌ها و نرخ جریان در لوله‌ها حل می‌شود. در این پژوهش، زوال آرسنیک در شبکه توزیع آب با استفاده از معادله درجه اول شبیه‌سازی می‌شود:

$$R = K_b C^n \quad (1)$$

با توجه به معادله (۱)، R برابر با نرخ آبی واکنش (جرم/حجم/زمان)، k_b ضرائب ثابت دیواره‌ای و C غلظت آلاینده (جرم/حجم) می‌باشد. با توجه به نرخ واکنش از درجه اول، $n = 1$ در نظر گرفته می‌شود. با اجرای مدل شبیه‌سازی، میزان غلظت آلاینده در تمامی گره‌های شبکه در گام‌های زمانی پنج دقیقه‌ای، برآورد گردیده است.

مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و استخراج

منحنی تعامل بین توابع مطلوبیت ذی‌نفعان

با توجه به پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه بهینه‌سازی سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه توزیع آب شهری، اهداف بسیاری در مرحله بهینه‌سازی مورد توجه بوده است. همان‌گونه که ذکر شد، در این تحقیق چهار هدف به‌عنوان اهداف طراحی بهینه سنسورهای تشخیص آلاینده پیش‌روی هر یک از سازمان‌ها قرار داده شده است.

مناسب در سرتاسر شبکه توزیع آب پخش شده‌اند، هر یک از نقاط در مسیر جریان تعداد زیادی از نقاط مجاور و پایین‌دست قرار گرفته باشد. با توجه به زمان اوج مصرف در الگوی مصرف آب و با توجه به ماهیت پدافند غیرعاملی بودن مدل پیشنهادی، ساعت‌های ورود هر یک از سناریوهای تزریق به‌نحوی انتخاب گردیده است تا اثر آلودگی به افراد، قابل توجه و بحرانی گردد. بنابراین، یک دوره شبیه‌سازی از ساعت ۱۸ آغاز می‌شود و تا ساعت ۱۰ روز بعد ادامه می‌یابد و هر دو ساعت یک بار تزریق آلودگی انجام می‌شود. انتخاب میزان متوسط جرم و مدت زمان تزریق آلاینده به شبکه توزیع آب، بر اساس ارزیابی مقدار بحرانی آلاینده اثرگذار بر روی بدن انسان از طریق آشامیدن آب آلوده‌شده و قضاوت مهندسی انجام پذیرفته است. میزان بحرانی $3/5$ میلی‌گرم آرسنیک در بدن هر فرد باعث ایجاد بیماری می‌گردد (شفیعی و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، با توجه به تحلیل حساسیت انجام‌شده با در نظر گرفتن 140 کیلوگرم سم آرسنیک با مدت زمان تزریق 60 دقیقه از تمامی نقاط محتمل تزریق (14 شیر آتش‌نشانی) در ساعت‌های بحرانی، کلیه سناریوهای تزریق آلودگی بر اساس مدل شبیه‌ساز مونت کارلو تولید شده (6888 سناریو) و در مدل اجرای مکرر شبیه‌سازی EPANET وارد می‌گردد. بنابراین در گام سوم، سناریوهای محتمل تزریق آلودگی در مدل شبیه‌ساز EPANET اجرا شده است. با توجه به اجرای سناریوهای تزریق آلودگی به شبکه در مدل شبیه‌سازی، ماتریس زمان تشخیص آلودگی در نقاط انتخابی نصب سنسور و جمعیت آلوده‌شده تا زمان تشخیص آلودگی در هر یک از سناریوهای تزریق آلودگی به‌دست آمده است. در گام چهارم، مدل بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم ژنتیک NSGA-II، بر مبنای مجموعه‌ای از اطلاعات به‌دست آمده از اجرای مکرر مدل شبیه‌سازی EPANET تدوین شد. همان‌گونه که ذکر شد، در این پژوهش سازمان آیفای شهری، سازمان بهداشت و درمان و سازمان مدیریت بحران به‌عنوان سازمان‌های ذی‌نفع شناخته شده‌اند. با در نظر گرفتن توابع مطلوبیت هر یک از ذی‌نفعان به‌عنوان توابع هدف، مدل بهینه‌سازی NSGA-II اجرا شد. با توجه به میزان مطلوبیت هر یک از توابع هدف از منظر ذی‌نفعان دخیل در این مسئله، سناریوهای وزنی‌دهی متفاوتی برای اهداف در نظر گرفته شده است. در نهایت، به‌منظور کمک به تصمیم‌گیرندگان

1- Bargaining Method

2- Unanimity Fallback Bargaining

3- Q-approval Fallback Bargaining

4- Social Choice

5- Borda count

6- Condorcet's Practical Method

7- Median Voting Rule

بنابراین، طراحی سنسورها باید به‌نحوی باشد که اولویت‌های سازمانی هر یک از ذی‌نفعان دخیل در این مسأله را تأمین نماید. از این رو پس از تعیین سازمان‌های تصمیم‌گیرنده و تأثیرگذار، اولویت و مطلوبیت هریک از اهداف چهارگانه مشخص می‌گردد. توابع مطلوبیت هر یک از ذی‌نفعان، با جمع جبری توابع هدف وزن‌دهی شده به دست آمد. توابع مطلوبیت هر یک از ذی‌نفعان، به‌عنوان توابع هدف مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II در نظر گرفته شد. به‌منظور دستیابی به منحنی تعامل بهینه مابین تمامی ذی‌نفعان و همگرایی سریع‌تر، مقادیر پارامترهای اصلی مدل بهینه‌سازی چندهدفه شامل جمعیت اولیه، تعداد نسل، نرخ تزویج است و جهش به‌ترتیب برابر با ۲۰۰، ۳۰۰، ۰/۸ و ۰/۲ در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن مقادیر بالا، ۳۰ نقطه بر روی منحنی تعامل بین ذی‌نفعان به‌دست آمد. ویژگی‌های توابع هدف، قيود مربوط به متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی چندهدفه موقعیت سنسورهای تشخیص آلودگی شبکه توزیع آب شهری و توابع مطلوبیت ذی‌نفعان دخیل در این مسئله به‌صورت زیر لحاظ گردیده است:

بنابراین، طراحی سنسورها باید به‌نحوی باشد که اولویت‌های سازمانی هر یک از ذی‌نفعان دخیل در این مسأله را تأمین نماید. از این رو پس از تعیین سازمان‌های تصمیم‌گیرنده و تأثیرگذار، اولویت و مطلوبیت هریک از اهداف چهارگانه مشخص می‌گردد. توابع مطلوبیت هر یک از ذی‌نفعان، با جمع جبری توابع هدف وزن‌دهی شده به دست آمد. توابع مطلوبیت هر یک از ذی‌نفعان، به‌عنوان توابع هدف مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II در نظر گرفته شد. به‌منظور دستیابی به منحنی تعامل بهینه مابین تمامی ذی‌نفعان و همگرایی سریع‌تر، مقادیر پارامترهای اصلی مدل بهینه‌سازی چندهدفه شامل جمعیت اولیه، تعداد نسل، نرخ تزویج است و جهش به‌ترتیب برابر با ۲۰۰، ۳۰۰، ۰/۸ و ۰/۲ در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن مقادیر بالا، ۳۰ نقطه بر روی منحنی تعامل بین ذی‌نفعان به‌دست آمد. ویژگی‌های توابع هدف، قيود مربوط به متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی چندهدفه موقعیت سنسورهای تشخیص آلودگی شبکه توزیع آب شهری و توابع مطلوبیت ذی‌نفعان دخیل در این مسئله به‌صورت زیر لحاظ گردیده است:

$$\text{Min } U_{WWC} = w_{wwc}^2 f_2 + w_{wwc}^3 f_3 + w_{wwc}^4 f_4 \quad (2)$$

$$\text{Min } U_{WHO} = w_{who}^1 f_1 \quad (3)$$

$$\text{Min } U_{NDM} = w_{ndm}^2 f_2 + w_{ndm}^3 f_3 \quad (4)$$

$$f_1 = \frac{1}{TP} \left(\frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_C} p_i \right) \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{1}{TD} \left(\frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} t_i \right) \quad (6)$$

$$f_3 = \frac{1}{N_C} \left(\sum_{i=1}^{N_C} E_i \right) \quad (7)$$

$$f_4 = \frac{N}{TS} \quad (8)$$

شرح مختصری از نمادهای مورد استفاده در این معادلات در ادامه ارائه می‌شود:

f_1, f_2, f_3, f_4 : مقادیر نرمال شده توابع هدف به‌ترتیب متوسط جمعیت آلوده‌شده به‌وسیله تزریق آلاینده در شبکه توزیع آب (نفر)، متوسط زمان تشخیص آلاینده در شبکه توزیع آب (دقیقه)، احتمال عدم تشخیص سناریوهای تزریق آلاینده در شبکه توزیع آب (درصد)، تعداد سنسور پیشنهادی؛

به‌ترتیب از منظر سازمان آبفا شهری، سازمان مدیریت بحران، سازمان بهداشت و درمان؛

$N_c, N_d, N, N_c, t_i, p_i, TP, TD, TS$: به‌ترتیب مجموع تعداد سناریوهای تزریق شده در شبکه توزیع آب، تعداد سنسورهای پیشنهادی مدل بهینه‌سازی، مجموع تعداد سناریوهای تزریق تشخیص داده‌شده، زمان تشخیص در سناریو تزریق آلودگی i ام (دقیقه)، جمعیت آلوده‌شده در سناریو تزریق i ام (نفر)، مجموع کل جمعیت در شبکه توزیع آب شهری (نفر)، کل دوره شبیه‌سازی (دقیقه) و تعداد کل نقاط پتانسیل نصب سنسور؛
 E_i : در صورت تشخیص سناریو تزریق شده به شبکه برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر است.

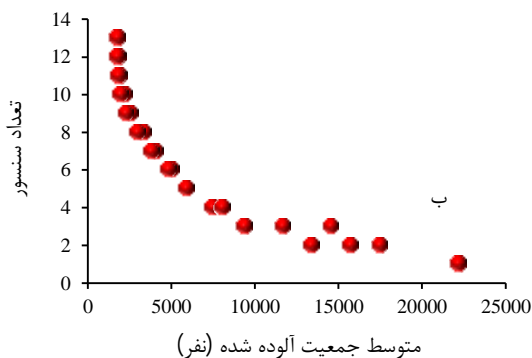
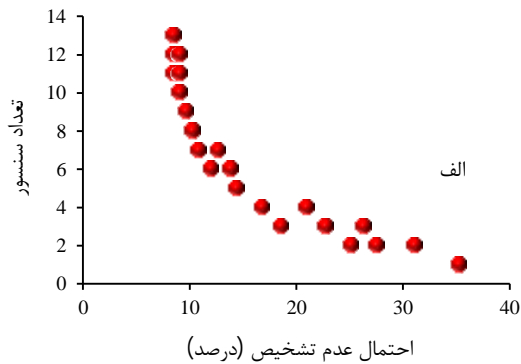
مدل‌های چانه‌زنی و گزینش اجتماعی

نتایج نهایی از مدل بهینه‌سازی، یک منحنی تعامل مابین توابع مطلوبیت ذی‌نفعان است. به‌منظور کمک به تصمیم‌گیرندگان برای انتخاب طراحی بهینه مورد قبول بین ذی‌نفعان، مدل‌های چانه‌زنی بازگشتی و انتخاب اجتماعی مورد استفاده قرار گرفته است (برامز و کیلگور ۲۰۰۱؛ رینولدز و همکاران، ۲۰۰۵؛ مهجوری و بیژنی منظر، ۲۰۱۳).

نتایج و بحث

مدل بهینه‌سازی NSGA-II با اتصال به داده‌های به‌دست آمده از مدل شبیه‌سازی EPANET، منحنی تعامل بهینه بین ذی‌نفعان دخیل در این مسئله مشخص گردیده است (شکل ۳). با توجه به نامشخص بودن مقادیر وزن‌دهی و میزان اهمیت هر یک از اهداف از منظر ذی‌نفعان دخیل در این مسئله، بر مبنای قضاوت مهندسی سناریوی وزدهی ارائه شده در جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، نتایج مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت ذی‌نفعان دخیل در این پژوهش ارائه شده است.

زیاد است. اگرچه زمان تشخیص و جمعیت آلوده شده نسبتاً کم می‌باشد. بنابراین، با توجه به روش چانه‌زنی بازگشتی، با هم‌آرایی تعداد ۶ سنسور پیشنهاد گردیده است که با توجه به جمعیت آلوده شده و زمان تشخیص نسبتاً کم، احتمال عدم تشخیص ۱۱ تا ۱۳ درصدی گزینه قابل قبولی می‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، روش چانه‌زنی بازگشتی، با هم‌آرایی دو گزینه ۲ و ۱۶ را بر روی منحنی تعامل بین اهداف انتخاب کرده است که هر دو گزینه، تعداد ۶ سنسور را پیشنهاد داده‌اند.

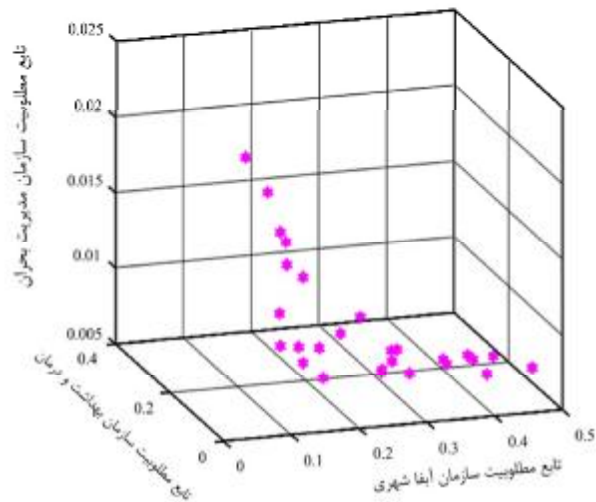


شکل ۴- منحنی تعامل بین تعداد سنسور در برابر احتمال عدم تشخیص (الف) و متوسط جمعیت آلوده شده (ب)

با توجه به ۶ سنسور پیشنهادی با استفاده از روش چانه‌زنی بازگشتی، با هم‌آرایی سایر اهداف، مقادیر متفاوت از هم دارند. دلیل این تناقض، آرایش و نحوه چیدمان سنسورهای پیشنهادی در شبکه توزیع آب شهر لامرد می‌باشد (شکل ۵). با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که ۶ سنسور پیشنهادی گزینه شانزدهم از پراکندگی بهتری در شبکه توزیع آب شهر لامرد برخوردار هستند. با استفاده از این ۶ سنسور، مقدار جمعیت آلوده شده نسبت به وجود سنسورها در شبکه بر اساس گزینه دوم کمتر است (۴۷۳۵)

جدول ۲- سناریو وزندهی هر یک از اهداف از منظر ذی‌نفعان

ذی‌نفعان	وزن اهداف			
	W_{f_4}	W_{f_3}	W_{f_2}	W_{f_1}
سازمان آبفا شهری	۰/۷۰	۰/۲۸	۰/۲۲	۰
سازمان بهداشت و درمان	-	-	-	۱
سازمان مدیریت بحران	-	۰/۲۰	۰/۸۰	-



شکل ۳- منحنی تعامل مابین تابع مطلوبیت ذی‌نفعان

همچنین، با توجه به اهداف مورد نظر در طراحی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی منحنی تعامل تعداد سنسور پیشنهادی در برابر متوسط جمعیت آلوده شده و احتمال عدم تشخیص آلودگی در شکل ۴ ارائه گردیده است.

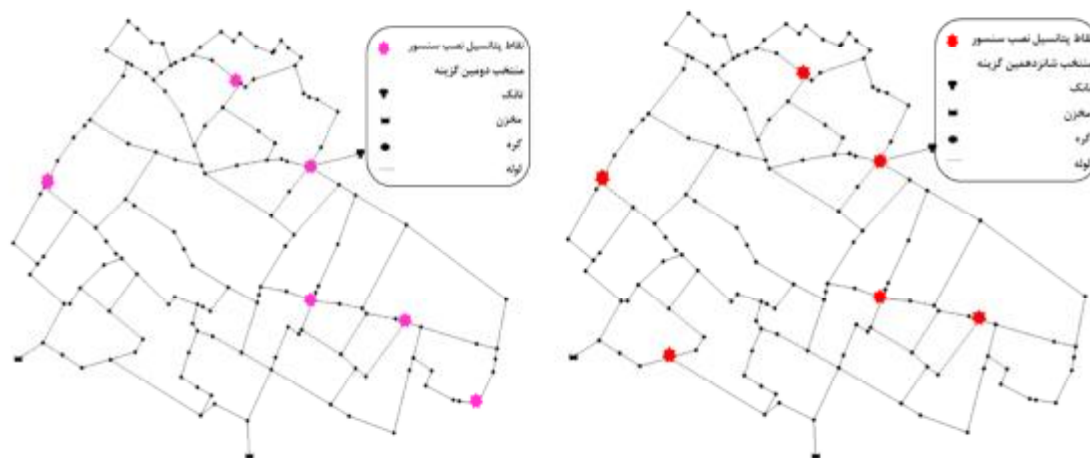
همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، هر چه تعداد سنسورها بیشتر می‌شود، احتمال عدم تشخیص رویدادهای آلودگی کمتر می‌شود. قابل ذکر است با افزایش تعداد سنسورها، مدت زمان تشخیص یک آلاینده در شبکه توزیع آلاینده کمتر است. بنابراین، متوسط افرادی که تحت تأثیر آلودگی قرار می‌گیرند، نیز کمتر می‌باشد. راه‌حل مورد توافق میان تمامی ذی‌نفعان، به نحوی که حداکثر رضایت ذی‌نفعان را برآورده سازد، بر روی منحنی تعامل بهینه با استفاده از روش‌های چانه‌زنی و گزینش اجتماعی انتخاب شده است. در جدول ۳، خصوصیات راه‌حل‌های مورد توافق بر روی منحنی تعامل بین اهداف بهینه‌سازی که توسط مدل‌های انتخاب اجتماعی و چانه‌زنی بازگشتی به دست آمده است، ارائه گردیده است. با توجه به جدول ۳، تعداد سنسورهای پیشنهادی بر مبنای راه‌حل‌های مورد توافق به دست آمده با استفاده از روش‌های گزینش اجتماعی بسیار

به حالت ایمن را مدنظر دارد، بخش عمده‌ای از مطلوبیت خود را به این هدف تخصیص می‌دهد. سازمان آبفای شهری با توجه به هزینه لازم برای نصب و بهره‌برداری سنسورها در شبکه توزیع آب، در سناریوهای وزن‌دهی، بخش عمده وزن‌ها را به تعداد سنسور اختصاص می‌دهد. به همین جهت، کوچک‌ترین تغییر در تعداد سنسورها بر روی توابع مطلوبیت این سازمان اثر زیادی می‌گذارد.

نفر). بر اساس تحلیل حساسیت انجام‌شده روی سناریوهای وزن‌دهی متفاوت به اهداف از منظر ذی‌نفعان، مشاهده شده است میزان تغییرات توابع مطلوبیت سازمان بهداشت و درمان که تنها کمینه‌کردن جمعیت را مدنظر دارد، محسوس نمی‌باشد. سازمان مدیریت بحران نیز به علت اینکه کمینه‌شدن زمان تشخیص آلودگی را برای جلوگیری از آلودگی در بخش بزرگ‌تری از شبکه و بازگرداندن شبکه

جدول ۳- خصوصیات راه‌حل مورد توافق بر روی منحنی تعامل با استفاده از مدل‌های چانه‌زنی و انتخاب اجتماعی

تعداد سنسور	احتمال عدم تشخیص (درصد)	زمان تشخیص (دقیقه)	جمعیت آلوده شده (نفر)	مطلوبیت سازمان مدیریت بحران	مطلوبیت سازمان بهداشت	مطلوبیت سازمان آبفا	نقطه مورد توافق	روش گزینش	روش انتخاب اجتماعی
۱۲	۸/۳	۲۳	۱۷۴۴	۰/۰۲۳	۰/۰۱۲	۰/۴۶۷	۷	امتیازدهی بردا	روش انتخاب اجتماعی
۱۳	۸/۷	۲۲	۱۶۹۸	۰/۰۲۳	۰/۰۱۱	۰/۵۰۳	۲۶	قانون عملی کندروسه	روش انتخاب اجتماعی
۱۳	۸/۳	۲۲	۱۷۰۰	۰/۰۲۲	۰/۰۱۲	۰/۵۰۴	۶	قانون رأی‌گیری میانه	روش انتخاب اجتماعی
۱۳	۸/۳	۲۲	۱۷۰۰	۰/۰۲۲	۰/۰۱۲	۰/۵۰۴	۶	چانه‌زنی بازگشتی با هم‌آرایی	روش چانه‌زنی بازگشتی
۶	۱۱/۹	۳۰	۴۹۷۵	۰/۰۳۲	۰/۰۳۳	۰/۲۵۶	۲	چانه‌زنی بازگشتی با تأیید q چانه‌زن	روش چانه‌زنی بازگشتی
۶	۱۳/۶	۳۳	۴۷۳۵	۰/۰۳۶	۰/۰۳۲	۰/۲۶۱	۱۶		روش چانه‌زنی بازگشتی
۱۳	۸/۳	۲۲	۱۷۰۰	۰/۰۲۲	۰/۰۱۲	۰/۵۰۴	۶		روش چانه‌زنی بازگشتی



شکل ۵- نحوه آرایش و چیدمان ۶ سنسور پیشنهادی گزینه منتخب با استفاده از روش چانه‌زنی بازگشتی با هم‌آرایی بر روی منحنی تعامل بین تابع مطلوبیت ذی‌نفعان در شبکه توزیع آب شهر لامرد

نتیجه‌گیری

دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران. دانشکده

عمران. دانشگاه صنعت آب و برق. ۸۸ ص.

3. Afshar A. and Khombi S. M. 2015. Multi-objective optimization sensor placement in water distribution system; dual use benefit approach. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 5: 315-331.
4. Aral M. M. Guan J. and Maslia M. L. 2008. A multi-objective optimization algorithm for sensor placement in water distribution systems. In *World Environmental and Water Resources Congress 2008, Ahupua'A*. 1-11.
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*. 78: 1-14.
6. Brams S. J. and Kilgour D. M. 2001. Fallback bargaining. *Group Decision and Negotiation*. 10(4): 287-316.
7. Hart W. E. and Murray R. 2010. Review of sensor placement strategies for contamination warning systems in drinking water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 136(6): 611-619.
8. Kim J. H. Tran T. V. T. and Chung G. 2010. Optimization of water quality sensor locations in water distribution systems considering imperfect mixing. In *12th Annual International Conference on Water Distribution Systems Analysis*. 2010. 317-326.
9. Liu Sh. and Auckenthaler P. 2014. Optimal sensor placement for event detection and source identification in water distribution network. *Journal of water supply research and technology*. 63: 51-57
10. Mahjouri N. and Bizhani-Manzar M. 2013. Waste load allocation in rivers using fallback bargaining. *Water resources management*. 27 (7): 2125-2136.
11. Naserizade S. S. Nikoo M. R. and Montaseri H. 2018. A risk-based multi-objective model for optimal placement of sensors in water distribution system. *Journal of Hydrology*. 557: 147-159.
12. Rathi S. and Gupta R. 2016. A simple sensor placement approach for regular monitoring and contamination detection in water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 20(2): 597-608.
13. Reynolds A. Reilly B. and Ellis A. 2005. Electoral system design: the new international IDEA handbook. *International Institute for Democracy and Electoral Assistance*. 237 p.

شبکه توزیع آب شهری، از جمله زیرساخت‌های مهم و آسیب‌پذیر نسبت به خطرهای احتمالی می‌باشد که ورود هر نوع آلودگی به داخل آن باعث ایجاد خسارات گسترده‌ای می‌گردد. در این پژوهش، با در نظر گرفتن تعارضات ذی‌نفعان دخیل در مسئله بهینه‌سازی سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه توزیع آب شهری، یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ارائه گردیده است. تمامی سناریوهای محتمل با توجه به تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای غیرقطعی تزریق آلودگی در شبکه توزیع آب با استفاده از مدل شبیه‌ساز کمی و کیفی EPANET اجرا گردیده است. با اتصال داده‌های به‌دست آمده از مدل شبیه‌سازی EPANET به مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، منحنی تعامل بین توابع مطلوبیات ذی‌نفعان دخیل در این مسئله، شامل سازمان آبفای شهری، سازمان بهداشت و درمان و سازمان مدیریت بحران به‌دست آمده است. توابع مطلوبیت هر یک از ذی‌نفعان، ترکیب وزنی از اهداف طراحی بهینه سنسورها، شامل تعداد سنسور، زمان تشخیص آلاینده، جمعیت آلوده‌شده و احتمال عدم تشخیص می‌باشد. به‌منظور انتخاب راه‌حل مورد توافق با توجه به تعارضات ذی‌نفعان از روش‌های انتخاب اجتماعی و چانه‌زنی بازگشتی استفاده شد. در این مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، فرض شد که تزریق آلاینده تنها از یک نقطه در شبکه توزیع آب شهری رخ می‌دهد. در نتیجه، تحقیقات آینده می‌تواند تزریق آلاینده به‌صورت هم‌زمان از چند نقطه را مورد بررسی قرار دهد. همچنین، استفاده از روش‌های برآورد عدم قطعیت فازی در پارامترهای تزریق، تقاضای آب در گره‌های مصرف‌کننده و برآورد ریسک ناشی از تزریق آلاینده و کمینه‌کردن آن از موضوعات مهم در بهینه‌سازی سنسورهای تشخیص آلودگی می‌باشد.

منابع

۱. بازگان 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.
۲. قائدی م. ۱۳۸۴. مهندسی مجدد و طراحی شبکه‌های توزیع آب شهرستان لامرد. پایان‌نامه

14. Shafiee M. E. and Zechman E. M. 2013. An agent-based modeling framework for sociotechnical simulation of water distribution contamination events. *Journal of hydroinformatics*. 15(3): 862-880.
15. Shen H. and McBean E. 2010. Pareto optimality for sensor placements in a water distribution system. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 137(3): 243-248.
16. Yoo D. G. Chung G. Sadollah A. and Kim J. H. 2015. Applications of network analysis and multi-objective genetic algorithm for selecting optimal water quality sensor locations in water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 19(7): 2333-2344.