

مقاله علمی-پژوهشی

جانمایی حسگرهای کیفی در شرایط عدم قطعیت تقاضا در شبکه‌های توزیع آب

حمیده جعفری^{۱*}، طاهر رجائی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱

چکیده

ورود آلودگی به صورت تصادفی یا عمدی به شبکه‌های توزیع آب به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی هر کشور، موجب خسارت‌های گسترده در ابعاد مختلف جامعه می‌شود. تشخیص و هشدار به موقع تزریق آلودگی در شبکه توزیع آب بسیار ضروریست. این مطالعه با هدف جانمایی بهینه حسگرهای کیفی، روش جدیدی بر پایه نامشخص بودن زمان و مکان ورود آلودگی و عدم قطعیت تقاضا ارائه می‌دهد. این مطالعه الگوریتمی دو هدفه با استفاده همزمان از نتایج بهینه‌سازی تک هدفه PSO برای یکی از قیود NSGA-II بر اساس عدم قطعیت تقاضا با روش کمینه‌ی بیشینه و رویکرد استوار ارائه می‌دهد. دو هدف مدنظر عبارتند از: کمینه کردن بیشترین خسارت محتمل ناشی از حجم آب آلوده مصرفی و کمینه کردن هزینه تهیه و نصب حسگر. این مطالعه که بر روی یک شبکه مرجع GoYang انجام گرفته است، با در نظر گرفتن سه سناریو (S1، S2 و S3) به منظور تزریق آرسنیک با غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از گره‌های مختلف و در گام‌های زمانی متفاوت بررسی می‌شود. نتایج مدل توسعه داده شده نشان می‌دهد که در هر یک از سناریوهای S1، S2 و S3 نصب تنها یک حسگر خسارت را به ترتیب ۷۵، ۷۰ و ۶۱ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، سناریوهایی که منجر به ایجاد خسارت بحرانی در شبکه می‌شوند، در حالتی اتفاق می‌افتد که آلودگی از ساعت‌های ۱۹ و ۲۰ وارد شوند. با وجود اینکه جانمایی حسگرها به غلظت آلاینده تزریق شده وابسته است، با این حال محل‌هایی مانند گره‌های ۵، ۱۵، ۱۷ و ۱۹ در جواب‌های تولید شده بیشترین تکرار را داشتند. شکل‌گیری مناسب جبهه پارتو در هر سه سناریو نشان داد که رویکرد ریاست، با حداقل انحراف تابع هدف از مقدار بهینه خود به ازای تمام پارامترهای دارای عدم قطعیت جواب‌های موثری تولید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، حسگر کیفی، عدم قطعیت، مصرف آب آلوده، NSGA-II

مقدمه

می‌تواند در هشدار و تشخیص ورود آلودگی بسیار مؤثر باشد. این حسگرها با تشخیص آلودگی، ریسک خطرات احتمالی را کاهش می‌دهند. برای جانمایی حسگرهای کیفی چهار روش کلی شامل: روش‌های تجربی (Berry et al., 2005)، روش‌های مبتنی بر قوانین و استانداردها (Chang et al., 2012)، روش‌های ریاضی (Diao et al., 2011; Shen et al., 2013)، و روش‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی وجود دارد. به دلیل محدودیت‌هایی اعم از دقت کم و پیچیدگی محاسباتی سه روش اول، در این مطالعه از روش چهارم استفاده شده است. در این روش با شبیه‌سازی ورود آلودگی تحت سناریوهای مختلف، محل بهینه حسگرها به کمک یک روش بهینه‌سازی تعیین می‌شود. توابع هدف در نظر گرفته شده در تحقیقات پیشین به گونه‌ای تعریف شده که اثر آلودگی حداقل شود. به عنوان مثال در مطالعات اهار و همکاران، کوزولینو و همکاران، اسپوارتز و همکاران و ناصری‌زاده و همکاران تابع هدف، کمینه کردن جمعیت در خطر (Ohar et al., 2015; Cozzolino et al., 2006; Schwartz et al., 2014;

شبکه‌های توزیع آب یکی از زیرساخت‌های حیاتی می‌باشند. ورود آلودگی به این سیستم حساسیت زیادی دارد. آلودگی پس از ورود به شبکه توسط جریان به نقاط دیگر منتقل می‌شود. به علت گستردگی شبکه‌های توزیع آب، تعداد بالای گره‌ها و اتصالات؛ وجود تأسیسات مختلف اعم از شیر، مخازن و پمپ‌ها، نفوذ آلودگی به این سیستم‌ها اجتناب‌ناپذیر است. تأمین سلامت مصرف کنندگان در برابر آسیب-پذیری ناشی از آلودگی آب از پرهزینه‌ترین موارد در بهره‌برداری و نگهداری از شبکه‌های توزیع آب است. به کارگیری حسگرهای کیفی

۱- دکترای مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، ایران

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، ایران

(Email: hhjafari@yahoo.com)

*نویسنده مسئول:

عدم اطمینان تقاضا و محل ورود آلودگی حل کردند. شبکه مورد بررسی آنها مثال شماره یک ایپانت بود که شامل ۱۲ گره می باشد (Mukherjee, 2017). ناصری زاده و همکاران از روش CvaR برای اندازه گیری ریسک عدم قطعیت های احتمالی برای بهینه سازی جایگذاری حسگر استفاده کردند. آن ها ترکیبی از عدم قطعیت های تزریق آلودگی شامل مکان، جرم، طول مدت و زمان تزریق آلودگی را با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو برای تولید تمام سناریوهای احتمالی تزریق استفاده کردند (Naserizade et al., 2018). خورشیدی و همکاران از روش تئوری بازی ها استفاده کرده و دو هدف کاهش هزینه حسگر و کاهش زمان تشخیص آلودگی را برای جانمایی بهینه حسگرها در نظر گرفتند. آنها نیز از روش مونت کارلو برای تولید سناریوهای احتمالی تزریق استفاده کردند (et al., 2018). Khorshidi). شفیع و همکاران (۱۳۹۹) فرض کردند آلودگی به صورت عمدی و در یک یا دو گره وارد می شود. در این مطالعه، دو تابع هدف کمینه سازی شامل تعداد گره ها و حجم آب آلوده شده در نظر گرفته شد. تعداد حسگر در تحقیق آن ها بین یک تا چهار حسگر در نظر گرفته شد. وینتر و همکاران اهداف مختلفی شامل احتمال تشخیص و شناسایی آلودگی توسط حسگر، متوسط زمانی که حسگر آلودگی را تشخیص می دهد و تخمین اثر حمله را در یک رابطه جمع بندی کردند و یک مدل تک هدفه مبتنی بر الگوریتم حریصانه برای جانمایی بهینه حسگرهای شبکه توزیع آب توسعه دادند (Winter et al., 2019). خورشیدی و همکاران از روش تئوری بازی ها استفاده کرده و دو هدف کاهش هزینه حسگر و کاهش زمان تشخیص آلودگی را برای جانمایی بهینه حسگرها در نظر گرفتند (Khorshidi et al., 2019). اخیراً جعفری و همکاران در تحقیقی بر روی یک شبکه فرضی گره ها را از نظر اهمیت به پنج دسته تقسیم کردند و ضریبی به نام ضریب اهمیت را به هر گره به صورت وزن گره اختصاص دادند. آن ها الگوریتم دو هدفه شامل: کمینه سازی خسارت ناشی از جمعیت مؤثر و کمینه کردن تعداد حسگرها در نظر گرفتند (et al., 2020). (Jafari et al., 2020).

بررسی مطالعات پیشین نشان می دهد که با وجود تلاش های انجام شده در زمینه جانمایی بهینه حسگرها، بعضی فرض های در نظر گرفته شده با واقعیت منطبق نمی باشد. در بسیاری از تحقیقات پیشین برای مقابله با حجم محاسبات بالا و پیچیدگی های مدل، مسئله جانمایی حسگر را با در نظر گرفتن تعداد ثابت حسگر یا محدود کردن تعداد گره های ورود آلودگی مدل کردند. در حالی که این فرض منطبق با واقعیت نمی باشد (Weickgenannt et al., 2010; Bazargan-Lari, 2014; Afshar and Khombi, 2015; Tinelli et al., 2017; Janke et al., 2017). هر تابع هدف می تواند اثر متفاوتی در مسئله جانمایی حسگر داشته باشد. بسیاری از تحقیقات تنها توابع هدفی از نوع مینیمم کردن زمان تشخیص را مدنظر قرار دادند

(Naserizade et al., 2018) و در مطالعات استفلد و سالامونز و بری و همکاران تابع هدف، کمینه کردن حجم آب آلوده مصرف شده بود (Berry et al., 2006; Salomons and Ostfeld, 2004).

در برخی از تحقیقات اولیه (Lee and Deininger, 1992; Berry et al., 2005) از ابزار بهینه سازی-برنامه نویسی عدد صحیح (MIP) استفاده شد. ولی به دلیل پیچیدگی و عدم انعطاف این روش، استفاده از الگوریتم های تکاملی محبوبیت بیشتری پیدا کرد. شاستری و دیوکر برای اولین بار عدم قطعیت الگوهای تقاضا را با توجه به نمونه های جمعیتی در نظر گرفتند (Shastri and Diwekar, 2006). پس از آن تحقیقات بر روی مسئله جانمایی حسگر با رویکردهای دیگر ادامه پیدا کرد. کامبول و غانم پارامترهای تصادفی و تحلیل عدم قطعیت را برای طراحی شبکه های حسگر با هدف حداکثر رساندن احتمال تشخیص نفوذ آلودگی در شبکه آب توصیف کردند. آن ها از شبیه سازی مونت کارلو برای عدم قطعیت در زمینه تقاضای آب استفاده کردند (Comboul and Ghanem, 2013). بازرگان لاری و همکاران مدلی را برای جانمایی مؤثر حسگرها در ایمنی شبکه توزیع آب در مقابل آلودگی، با روش تصمیم گیری چندمعیاره ارائه کردند. در این روش از الگوریتم NSGA-II برای بهینه سازی و آنالیز مونت کارلو برای عدم قطعیت تزریق آلودگی استفاده شده است. توابع هدف این مطالعه شامل زمان تشخیص ورود آلودگی، رخدادهای تشخیص داده نشده، تعداد ایستگاه های پایش و جمعیت آلوده شده می باشد. در ادامه به منظور انتخاب بهترین نقطه پارتو از یک روش تصمیم گیری چندمعیاره به نام استدلال شهودی استفاده کردند (Bazargan-Lari et al., 2014). لیو و همکاران با در نظر گرفتن یک تابع احتمالاتی نرمال، عدم قطعیت مربوط به تقاضا در گره های شبکه توزیع آب شهری را مدل کردند. ورود آلودگی به شبکه تحت یک سناریو تزریق با مدت زمان تزریق واحد، در بازه زمانی ۱۲ ساعت در هر یک از گره های شبکه توزیع آب شبیه سازی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامعلوب (NSGA-II) مرز پارتوی بهینه بین اهداف به دست آمده است. اهدافی که آن ها در نظر گرفتند: کمینه سازی زمان تشخیص و بیشینه کردن احتمال تشخیص آلودگی بود (Liu et al., 2013). راتی و همکاران از آنالیز مبتنی بر خطر برای انتخاب رخداد آلودگی و جانمایی حسگر در شبکه استفاده کردند. در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک برای مکان یابی بهینه حسگرهای کیفیت آب برای بیشینه کردن احتمال تشخیص رخداد آلودگی در زمان قابل قبول در مناطق با خطر بالا برای بهبود امنیت شبکه آب استفاده شده است (Rathi et al., 2016). موخرجی با استفاده از روش عدد صحیح مخلوط غیرخطی و تصادفی، مشکل جانمایی حسگر را با استفاده از

1- Mixed Integer linear Programming

2- Non dominated Sorting Genetic Algorithm

مواد و روش‌ها

مدل دینامیکی و واکنش کیفی شبکه

فرآیند تحلیل کیفی در شبکه شامل سه فرآیند انتقال، اختلاط و واکنش‌های حجمی است. انتقال شامل حرکت در جهت جریان و حرکت در تمام جهات به دلیل اختلاف غلظت بوده که به کمک قانون بقای جرم و قانون فیک^۵ مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود (تابش، ۱۳۹۵):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -v_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (1)$$

که v_i سرعت بر حسب $[L t^{-1}]$ و C_i غلظت در لوله i ام بر حسب $[M V^{-1}]$ است که تابعی از مکان (x) و زمان (t) می‌باشد. همچنین r نرخ واکنش بوده که تابعی از غلظت $[M V^{-1} t^{-1}]$ است.

در انشعاباتی که جریان را از دو یا چند لوله دریافت می‌کنند اختلاط جریان به صورت آنی و کامل لحاظ می‌شود. بنابراین، غلظت یک ماده در آب خروجی از انشعاب برابر با مجموع وزنی غلظت جریان‌های ورودی به آن گره می‌باشد (Rossman, 2000):

$$C_j = \frac{\sum_{i \in I_j} Q_i C_i + q_j C_{0j}}{\sum_{i \in I_j} Q_i + q_j} \quad (2)$$

که C_j غلظت در گره j ام و C_{0j} هر گونه غلظت ورودی از خارج از شبکه به گره j ام و Q جریان در گره i و q جریانی که از منبع خارج شده و به گره j وارد می‌شود.

واکنش حجمی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$r = BC^{nr} \quad (3)$$

که r نرخ واکنش بر حسب $[M V^{-1} t^{-1}]$ ، B ضریب نرخ واکنش جریان، C غلظت واکنش‌دهنده $[M V^{-1}]$ و nr نمایه یا مرتبه واکنش یا ایزوترم آن است. مقدار B برای واکنش تولید یک ماده، مثبت و برای واکنش زوال، منفی خواهد بود (Rossman, 2000).

تحلیل کیفی شبکه شامل حل همزمان معادلات فوق به همراه معادلات مربوط به اختلاط در مخازن است. نرم‌افزار EPANET2 قادر است تولید یا زوال یک ماده در اثر واکنش آب درون شبکه توزیع را ردیابی کند. لازم به ذکر است برای انجام تحلیل کیفی، ابتدا باید تحلیل هیدرولیکی انجام شود. همچنین به دلیل این که فرآیند تحلیل کیفی به زمان وابسته است، لازم است از تحلیل دوره گسترده برای شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان استفاده شود. در این مطالعه، مدل سازی زوال آلاینده در طول جریان در شبکه توزیع آب با استفاده از نرخ واکنش درجه اول (فرونولیش ایزوترم) محاسبه می‌گردد. با اجرای

(Khorshidi et al., 2019; Cozzolino et al., 2006) در صورتی که چگالی جمعیت همه گره‌ها یکسان نیست. خلأهای تحقیقاتی زیادی وجود دارد که نیاز به توجه بیشتری دارد. پیچیدگی مسأله، هزینه و عدم قطعیت‌هایی که در نوع، زمان، جرم و محل ورود آلودگی و تقاضای آب وجود دارد، مهمترین مشکلاتی هست که اکثر تحقیقات با آن روبرو هستند. در تحقیقات انجام گرفته سه رویکرد عمده‌ی بهینه‌سازی، عبارت است از بهینه‌سازی قطعی^۱، بهینه‌سازی تصادفی^۲ و بهینه‌سازی استوار^۳. بهینه‌سازی قطعی که عمدتاً در مطالعات ابتدایی در نظر گرفته شدند عدم قطعیت را شامل نمی‌شدند (Lee and Deininger, 1992; Woo et al., 2001; Ghimire and Barkdoll, 2006; Propato and Piller, 2006). ولی در رویکرد بهینه‌سازی تصادفی، عدم قطعیت در مدل ترکیب شده است (Naserirzade et al., 2018; Khorshidi et al., 2018; Comboul and Ghanem, 2013). این رویکرد از این واقعیت که توزیع احتمالی حاکم بر داده‌ها مشخص و یا قابل تخمین است، بهره می‌برند، در حالی که توزیع احتمالاتی در عدم قطعیت پارامترهای نفوذ آلودگی به راحتی قابل تشخیص نیست. در صورتی که به نظر می‌رسد رویکرد بهینه‌سازی استوار به علت اینکه کران‌های پارامترهای عدم قطعیت را در نظر می‌گیرد و یک رویکرد سخت و دقیق در مقایسه با سایر رویکردها به شمار می‌آید، جواب‌های مطمئن‌تری ارائه دهد.

هر رخداد آلودگی ممکن است از هر گره و در هر بازه زمانی اتفاق بیفتد. از طرفی، تقاضای گره‌ها قطعی نمی‌باشد. هدف این مطالعه، جانمایی بهینه حسگرهای کیفی برای بحرانی‌ترین سناریوی محتمل بر اساس مدل‌های بهینه‌ساز با استفاده از NSGA-II می‌باشد. رویکرد تحلیل عدم قطعیت تقاضای گره‌ها، روش کمینه‌ی بیشینه با رویکرد بهینه‌سازی استوار می‌باشد. اهداف الگوریتم بهینه‌سازی عبارتند از: ۱- حداقل رساندن بیشترین خسارت محتمل ناشی از مصرف آب آلوده ۲- کمینه کردن هزینه ناشی از تعداد حسگر. در این روش از چهار دسته الگوی مصرف بر اساس کاربری‌های گره‌ها در نظر گرفته می‌شود. عملکرد مدل پیشنهادی بر روی شبکه مرجع ارزیابی می‌شود. برای محاسبه بیشترین خسارت محتمل، از یک الگوریتم بهینه‌ساز تک هدفه (PSO^۴) استفاده می‌شود. متغیرهای تصمیم این الگوریتم شامل محل ورود آلودگی، زمان ورود آلودگی و تقاضای گره‌هاست. الگوریتم PSO در داخل NSGA-II قرار دارد. در واقع برای ارزیابی هر جواب محتمل جانمایی حسگرها توسط NSGA-II، یک بار PSO اجرا می‌شود تا بیشترین خسارت محتمل را به دست آورد.

- 1- Deterministic Optimization
- 2- Stochastic Optimization
- 3- Robust Optimization
- 4- Particle Swarm Optimization

شبهه‌سازی، میزان غلظت در تمامی گره‌های شبکه در گام‌های زمانی محاسبه می‌شود.

مدل بهینه‌سازی

در این تحقیق برای محاسبه پارامتر بیشترین خسارت محتمل، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با عنوان الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) برای حل مسئله بهینه‌سازی دو هدفه غیرخطی پیشنهادی استفاده شده است.

مدل NSGA-II

یکی از کارآمدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی، به ویژه برای مسائل شبکه‌های توزیع آب، الگوریتم ژنتیک است. مدل NSGA-II که توسط دب و جین ارائه شده است (Deb and Jain, 2014)، یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه قوی برای یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو است. مدل NSGA-II یک روش مرتب‌سازی نامغلوب را به کار می‌گیرد و از یک اندازه جمعیت ثابت استفاده می‌کند. بر اساس سطح غیرمغلوب در NSGA-II یک رتبه (fitness) به هر راه‌حل اختصاص می‌یابد. مفهوم غلبه به این صورت است که فرض کنید $x_1 \in F$ و x_2 دو جواب از این مسأله باشد، گفته می‌شود x_1 بر x_2 غالب است (یا x_2 مغلوب x_1 است) اگر و فقط اگر x_1 نسبت به x_2 در هیچ کدام از اهداف بدتر نباشد ($f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$) و x_1 نسبت به x_2 حداقل در یکی از اهداف اکیداً بهتر باشد ($f_i(x_1) < f_i(x_2)$) (Deb and Jain, 2014). فاصله ازدحامی برای اندازه‌گیری فاصله بین راه‌حل‌ها تعریف شده است. برای بدست آوردن پخش یکنواخت راه‌حل‌ها در امتداد جبهه پارتو، اندازه‌گیری فاصله ازدحام توسط NSGA-II استفاده می‌شود. (Deb and Jain, 2014; Rossman, 2000). مرتب‌سازی جمعیت با توجه به سطح غیرمغلوب و ازدحام فاصله یک کار پیچیده است. اولین جمعیت به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود. پس از آن، جمعیت فرزندی که از طریق عملگرهای تقاطع و جهش بوجود آمده‌اند، ارزیابی شده و به هر یک از فرزندان میزانی از برازندگی اختصاص می‌یابد. سپس، جمعیت فرزند و والد ترکیب شده و مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها و فاصله ازدحامی اجرا می‌شود. این روند تا زمانی که ملاک توقف (تعداد نسل‌ها) برآورده شود، تکرار می‌شود. اطلاعات بیشتر در مورد الگوریتم NSGA-II در مقاله ارائه شده توسط دب و جین آورده شده است (Deb and Jain, 2014).

الگوریتم PSO

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهات

و کندی، با الهام از حرکت پرندگان و ماهی‌ها و بر اساس مفهوم هوش ازدحامی توسعه داده شده است (Yang, 2010; Kennedy and Eberhart, 1994). این الگوریتم یکی از قدرتمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حوزه مسائل پیوسته است. در این الگوریتم، هر ذره نمایانگر یک جواب احتمالی برای مسئله بهینه‌سازی است. ابتدا تعدادی دلخواه از ذرات، تولید شده و ارزیابی می‌شوند. مسیر حرکت این ذرات بر اساس متغیر سرعت مشخص شده که توسط یک مؤلفه (component) تصادفی و قطعی تنظیم می‌شوند. سپس بر اساس فرایند تکرار، ذرات به سمت نقاط بهینه حرکت می‌کنند، اما تمایل به حرکت تصادفی دارند. محل جدید هر ذره نشان‌دهنده بهترین موقعیتی که تاکنون توسط جمعیت ذرات بدست آمده (global best) (gbest) و بهترین خودش (pbest) در طول سابقه ذرات و ضرایب تصادفی است. ویژگی‌های تصادفی الگوریتم، امکان تغییر راه حل را برای تضمین بهره‌برداری از فضای راه حل فراهم می‌کند. شرط توقف الگوریتم می‌تواند سپری شدن تعداد تکرار مشخص یا عدم بهبود قابل توجه در تابع هدف باشد. یکی از مزایای بهینه‌سازی ذرات نسبت به سایر روش‌های بدون مشتق‌گیری، کاهش تعداد پارامترها برای تنظیم وزن و پذیرش محدودیت‌هاست (Clerc and Kennedy, 2002).

توابع هدف

همانطور که در مقدمه ذکر شد، افزایش تعداد حسگرها منجر به افزایش هزینه نصب و هزینه عملیاتی سیستم نظارت می‌شود. برای کاهش هزینه حسگر، تابع هدف اول به شرح زیر است:

$$Z_1 = \min(N) \quad (4)$$

که N برابر است با تعداد حسگرها و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N = \sum_{j=1}^{nj} x_j \quad (5)$$

تابع هدف دوم که به منظور حداقل کردن اثرات منفی نفوذ آلاینده خطرناک با منبع ناشناخته می‌باشد به صورت حداقل‌سازی «بیشترین خسارت محتمل» ناشی از مصرف آب آلوده در نظر گرفته می‌شود. بیشترین خسارت محتمل برای هر جواب به کمک الگوریتم PSO محاسبه می‌شود. تابع هدف دوم به صورت زیر است:

$$Z_2 = \min(MPD) \quad (6)$$

متغیرهای تصمیم بردار X به صورت زیر بوده که المان‌های آن به تعداد گره‌ها (n_j) می‌باشد.

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_j \ \dots \ x_{n_j}] \quad (7)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, n_j \quad (8)$$

که x_j متغیری باینری (صفر و یک) بوده که یک نمایش دهنده وجود حسگر و صفر نشان دهنده عدم وجود حسگر در گره z است.

پارامتری تحت عنوان «بیشترین خسارت محتمل» در این تحقیق تعریف می‌شود. برای محاسبه این پارامتر، لازم است از یک ابزار بهینه‌ساز بهره گرفت. در این مطالعه برای محاسبه این پارامتر از الگوریتم PSO استفاده می‌شود. این ابزار با تغییر مقادیر تقاضای گره‌ها، محل ورود آلودگی و گام زمانی ورود آلودگی، بیشترین مقدار محتمل برای خسارت کل شبکه را محاسبه می‌کند.

جزئیات محاسبه این پارامتر به فرم یک مسئله بهینه‌سازی فرعی، به شرح ذیل است.

متغیرهای تصمیم مسئله، مقادیر تقاضای گره‌ها، گره محل ورود آلودگی (CEN^x) و گام زمانی ورود آلودگی (CET^x) هستند:

$$W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_i \ \dots \ w_m]$$

$$w_1 = CEN \quad (13)$$

$$w_2 = CET$$

$$w_3 \text{ to } w_m = \text{Nodal Demand}$$

که W بردار متغیرهای تصمیم فرعی و w_i متغیر تصمیم فرعی i ام است. m تعداد متغیرهای تصمیم فرعی بوده که برابر با $2+nj$ خواهد بود.

محدوده و بازه تغییرات این متغیرهای تصمیم فرعی، مطابق زیر است:

$$w_1 \in \{1, 2, \dots, nj\} \quad (14)$$

$$w_2 \in \{1, 2, \dots, nt\} \quad (15)$$

$$q_j^{\min} \leq q_j \leq q_j^{\max} \quad (16)$$

$$\text{for } j = 1, 2, \dots, nj$$

تابع هدف فرعی در محاسبه بیشترین خسارت محتمل (MPD) حداکثرسازی مقدار خسارت کل شبکه است:

$$MPD = \max(ND) \quad (17)$$

کاربرد مدل

در این مطالعه جانمایی بهینه حسگرها بر روی شبکه مرجع در [GoYang](https://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/cws/reso/urces/benchmarks) (شکل ۱) مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه و اطلاعات اولیه شبکه از قبیل قطر و طول لوله‌ها و مشخصات هیدرولیکی شامل سرعت و فشار در <https://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/cws/reso/urces/benchmarks> بیان شده است. این شبکه، فاقد حسگر تشخیص آلودگی بوده و شامل ۲۲ گره برداشت، ۳۰ لوله، یک ایستگاه پمپاژ و یک مخزن است. الگوی مصرف ساعتی آب در ۲۴ ساعت، بر اساس نشریه ۳-۱۱۷ در نظر گرفته شده است (نشریه ۳-۱۱۷،

مقادیر اولیه تصادفی برای جانمایی حسگرها به عنوان جواب‌های اولیه الگوریتم NSGA-II تعریف می‌شود. مرتب‌سازی نامغلوب برای جواب‌های الگوریتم NSGA-II انجام شده و شرط توقف آن کنترل می‌شود. در صورت عدم توقف، عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش اعمال شده و جواب‌های جدید برای الگوریتم NSGA-II (محل حسگرها) تولید می‌شود.

محاسبه بیشترین خسارت محتمل

در این مطالعه، خسارت به صورت حجم آب آلوده مصرف شده تعریف می‌شود. برای محاسبه خسارت شبکه، نیاز به مقادیر غلظت‌ها بوده که از شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی به دست می‌آید:

$$C = EPANET \left(\begin{array}{l} [q_1 \ \dots \ q_{nj}], \\ CEN, \\ \text{other fixed parameters} \end{array} \right) \quad (9)$$

که C ماتریس غلظت‌های شبکه بوده و نشان دهنده مقادیر غلظت هر گره در هر گام زمانی و CEN گره محل ورود آلودگی است.

در صورت عدم وجود حسگر در شبکه، خسارت در گره j در گام زمانی t ($D_{t,j}$) برابر است با:

$$D_{t,j} = B_{t,j} \times q_j \quad (10)$$

$$\text{for } j = 1, \dots, nj, \quad t = 1, \dots, nt$$

که q_j تقاضای گره j و $B_{t,j}$ مشخص کننده آلوده بودن یا نبودن هر گره در هر گام زمانی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B_{t,j} = \begin{cases} 1 & C_{t,j} \geq C_{allow} \\ 0 & C_{t,j} < C_{allow} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{for } j = 1, \dots, nj, \quad t = 1, \dots, nt$$

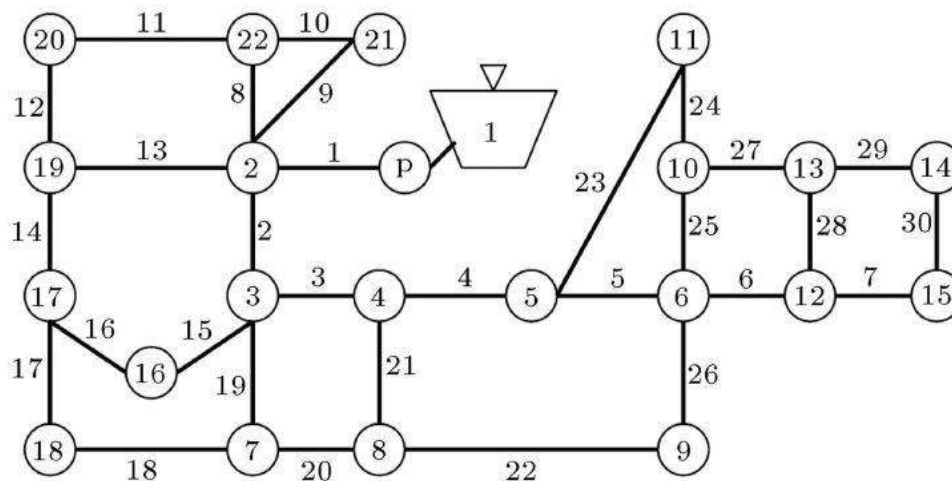
که $C_{t,j}$ غلظت در گره j در گام زمانی t و C_{allow} غلظت مجاز، nt تعداد کل گام‌های زمانی و nj تعداد کل گره‌های برداشت است. خسارت کل شبکه (ND) به صورت مجموع خسارت همه گره‌های شبکه مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$ND = \sum_{t=1}^{nt} \sum_{j=1}^{nj} D_{t,j} \quad (12)$$

با توجه به عدم قطعیت تقاضای گره‌ها، محل ورود آلودگی و گام زمانی ورود آلودگی، خسارت کل شبکه، عدد ثابتی نیست. به منظور در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت محتمل در مسئله جانمایی حسگرها،

S1، ۵۰ میلی گرم بر لیتر، در سناریوی S2، ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر و در سناریوی S3، ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است. همچنین، فرض می شود تزریق آلاینده از یک گره (نامشخص) ممکن است. با توجه به ابعاد شبکه، کل مدت شبیه سازی ۴۸ ساعت در نظر گرفته می شود و تزریق آلاینده فقط از ۲۴ ساعت اول ممکن است.

(۱۳۹۲). عدم قطعیت تقاضا بر اساس روش کمینه ی بیشینه و در بازه ۱۵٪+ و ۱۵٪- در نظر گرفته می شود. این مطالعه برای سه سناریو به شرح ذیل بررسی می شود. در هر سه سناریو آرسنیک به عنوان آلاینده خطرناک به مدت یک ساعت از گره های مختلف و در گام های زمانی متفاوت به شبکه تزریق می شود. غلظت تزریق آلاینده در سناریوی



شکل ۱- نمای شبکه مرجع GoYang (Kim et al., 1994)

غلظت در گام زمانی بعد از ورود آلودگی است. این مقدار در نزدیک ترین گره بعد از گره ورود آلودگی و با غلظتی کمی کمتر از غلظت آلودگی وارد شده (به دلیل زوال) می باشد.

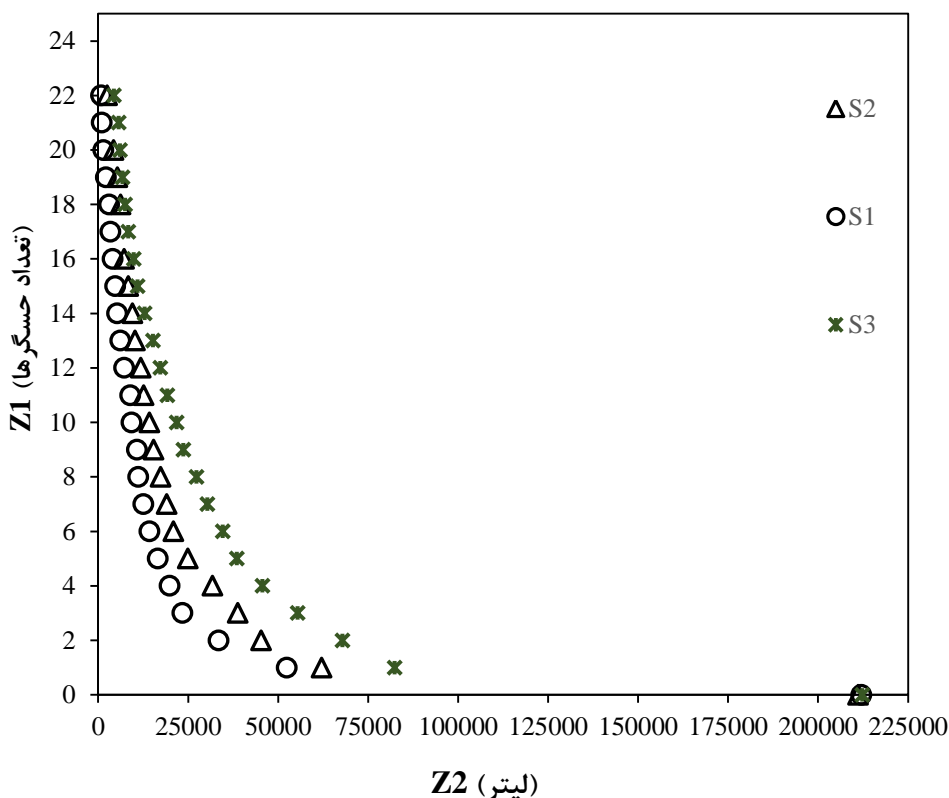
در جدول ۱، خصوصیات بهترین جواب های نمودار پارتوی شکل ۲، برای هشت وضعیت مختلف شامل: حالتی که هیچ حسگری در شبکه نصب نشده باشد و حالت هایی که یک تا هفت حسگر در شبکه نصب شده باشند، ارائه شده است. مطابق جدول ۱، در حالتی که حسگری در شبکه وجود ندارد، بیشترین خسارت به شبکه وارد می شود. این خسارت به ازای تزریق آلودگی از زمان و مکانی است که منجر به آلوده شدن بیشترین حجم آب مصرفی می شود (ساعت ۱۹). در تمامی حالت های محاسبه شده، خسارت بحرانی در سناریوی S3 از دو سناریوی دیگر بزرگتر می باشد ولی فاصله تغییرات مقادیر خسارت وقتی تعداد حسگر افزایش می یابد، کاهش می یابد. مطابق نتایج بدست آمده در جدول فوق، خسارت ناشی از مصرف آب آلوده با نصب فقط یک حسگر در سناریوهای S1 تا S3 به ترتیب ۷۵، ۷۰ و ۶۱ درصد کاهش پیدا می کند. درصد تغییرات خسارت ناشی از مصرف آب آلوده به ازای نصب یک تا ۷ حسگر در نمودار ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۳، شیب نمودارهای S1، S2 و S3 با افزایش تعداد حسگرها به تدریج کاهش پیدا می کند. کاهش شیب نمودار در سناریوی S1 سریعتر از دو سناریوی دیگر و در سناریوی S3 کندتر از دو سناریوی دیگر است. به نظر می رسد با نصب بیشتر از هفت حسگر در شبکه، خسارت کاهش زیادی پیدا نمی کند. بنابراین همین تعداد

نتایج و بحث

جبهه پارتو بر روی شبکه مرجع GoYang برای هر سه سناریو در شکل ۲ ارائه شده است. این نتایج از پیاده سازی دو الگوریتم PSO و NSGA-II به گونه ای که برای هر یک از مقادیر تقاضای گره ها عدم قطعیت ۱۵ درصد با رویکرد کمینه ی بیشینه بدست آمده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که راه حل های مختلف به خوبی بین دورترین نقاط (خسارت بحرانی ناشی از مصرف آب آلوده به ازای صفر و ۲۲ حسگر) توزیع شده اند. به صورت کلی خسارت های محاسبه شده در سناریوی ۳ از دو سناریوی دیگر بیشتر می باشد و عملکرد الگوریتم NSGA-II در مدل پیشنهادی مناسب بوده است. در هر سه سناریو، با افزایش تعداد حسگرها در محل مناسب، خسارت بحرانی ناشی از مصرف آب آلوده کمتر می شود ولی تابع هزینه افزایش پیدا می کند.

نتایج EPANET بسیار زیاد بوده و قابل ارائه جدولی یا نموداری نیست. به عنوان نمونه، برای یک شبیه سازی شبکه، تحت یک مقدار منحصر به فرد برای نیازآبی گره ها، با یک گره ورودی آلودگی خاص و یک غلظت مشخص، تعداد ۲۴ غلظت برای هر گره وجود دارد. حال آن که چند سناریوی مختلف ورود آلودگی و عدم قطعیت برای نیازآبی گره ها وجود دارد. به نظر می رسد بهترین روش، استفاده از شاخص هایی مثل «بیشترین خسارت محتمل» است که در این مقاله تعریف شده است. لازم به ذکر است در هر شبیه سازی، بیشترین

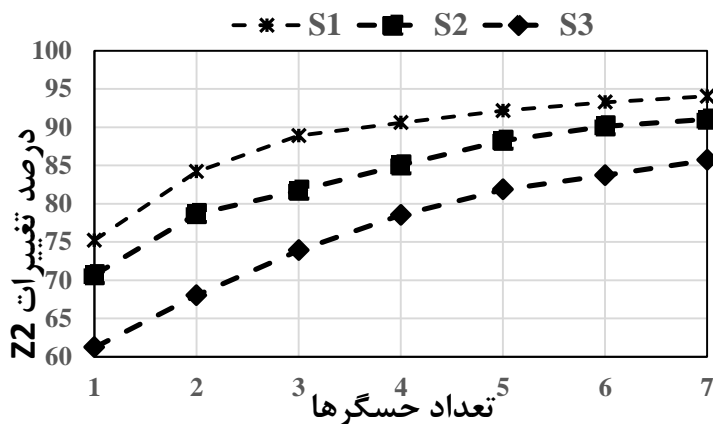
حسگر قادر به کنترل خسارت در کل شبکه می‌باشد.



شکل ۲- پارتوی بهینه محل حسگرها بر اساس خسارت بحرانی (حجم آب آلوده) به ازای تعداد حسگرها

آب در شبکه نیز می‌باشند. مطابق نتایج بدست آمده جانمایی حسگرها در هر سناریو، متفاوت است. مثلاً به ازای نصب یک حسگر، بهترین مکان نصب در سناریوی ۱ و ۳، گره پنج و در سناریوی ۲، گره ۱۷ می‌باشد. تغییر دوز آلاینده ورودی تأثیر بسیار زیادی در مقادیر تابع هدف Z2 و به تبع چیدمان بهینه حسگرها در شبکه توزیع آب دارد.

یکی دیگر از عوامل مؤثر در نحوه آلودگی شبکه و محاسبه تابع خسارت، زمان ورود آلودگی می‌باشد. در این مطالعه، نامشخص بودن زمان ورود آلودگی لحاظ شد و فرض شد که آلودگی می‌تواند از هر ۲۴ ساعت، در رأس ساعت وارد شود. نتایج نشان می‌دهد که ورود آلودگی در ساعت‌های ۱۹ و ۲۰ به عنوان یک عامل مؤثر، منجر به تولید سناریوی بحرانی می‌شود. این دو زمان، ساعت‌های اوج مصرف



شکل ۳- درصد تغییرات بیشینه خسارت محتمل به ازای افزایش حسگرها در هر سه سناریو (۱ تا ۷ حسگر)

جدول ۱- خصوصیات جواب‌های بهینه نمودار پارتو به ازای $Z_1 = 0$ تا $Z_1 = 7$

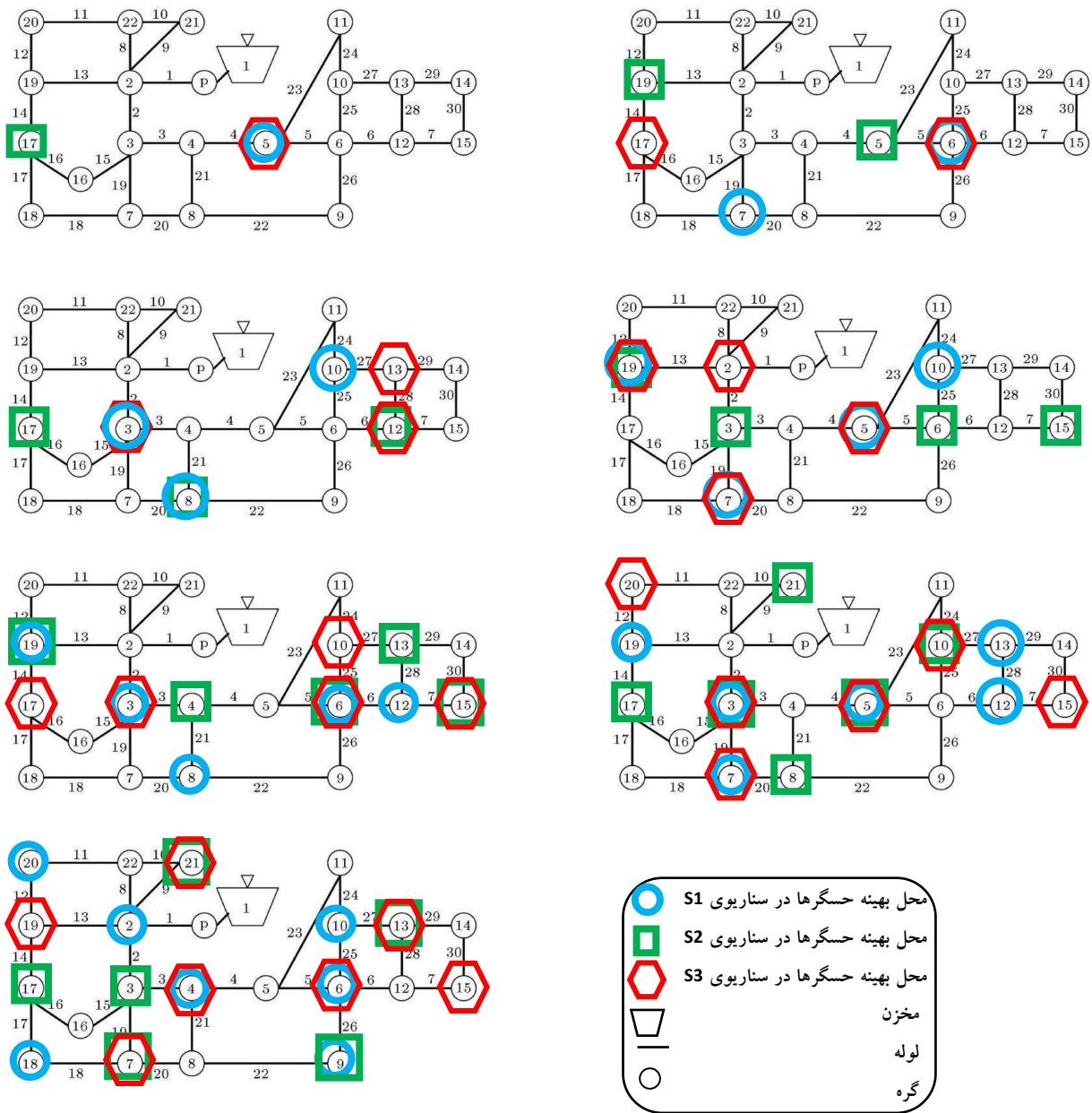
سناریوها	Z_1	ساعت بحرانی ورود آلودگی	Z_2 (لیتر)	بهترین مکان حسگرها	تغییرات خسارت به علت بکارگیری حسگرها (%)
S_1	$Z_1 = 0$	۱۹	۲۱۱۱۳۸/۸	-	-
S_2		۱۹	۲۱۱۹۸۳/۵	-	-
S_3		۱۹	۲۱۲۲۹۰/۴	-	-
S_1	$Z_1 = 1$	۲۰	۵۲۳۴۵/۰۵	{۵}	-۷۵/۲۰
S_2		۲۰	۶۲۱۱۰/۷	{۱۷}	-۷۰/۷
S_3		۲۰	۸۲۳۴۵/۳۴	{۵}	-۶۱/۲۱
S_1	$Z_1 = 2$	۲۰	۳۳۴۰۰	{۶، ۷}	-۸۴/۱۸
S_2		۲۰	۴۵۲۳۴/۶۷	{۵، ۱۹}	-۷۸/۶۶
S_3		۲۰	۶۷۹۰۰/۰۸	{۶، ۱۷}	-۶۸/۰۱
S_1	$Z_1 = 3$	۲۰	۲۳۴۲۱/۰۴	{۳، ۸، ۱۰}	-۸۸/۹۰
S_2		۲۰	۳۸۷۶۵/۱۱	{۸، ۱۲، ۱۷}	-۸۱/۷۱
S_3		۲۰	۵۵۴۳۲/۰۸	{۳، ۶، ۱۳}	-۷۳/۸۹
S_1	$Z_1 = 4$	۲۰	۱۹۸۷۶/۲۶	{۵، ۷، ۱۰، ۱۹}	-۹۰/۵۹
S_2		۲۰	۳۱۷۰۹	{۳، ۶، ۱۵، ۱۹}	-۸۵/۰۴
S_3		۲۰	۴۵۶۲۵/۵۶	{۲، ۵، ۷، ۱۹}	-۷۸/۵۰
S_1	$Z_1 = 5$	۱۹	۱۶۵۴۳/۷۲	{۳، ۶، ۸، ۱۲، ۱۹}	-۹۲/۱۶
S_2		۱۹	۲۴۹۰۰/۳۳	{۴، ۶، ۱۳، ۱۵، ۱۹}	-۸۸/۲۵
S_3		۱۹	۳۸۵۴۲/۰۱	{۳، ۶، ۱۰، ۱۵، ۱۷}	-۸۱/۸۵
S_1	$Z_1 = 6$	۲۰	۱۴۲۱۳	{۳، ۵، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۹}	-۹۳/۲۷
S_2		۲۰	۲۰۹۰۰/۹۱	{۳، ۵، ۸، ۱۰، ۱۷، ۲۱}	-۹۰/۱۴
S_3		۲۰	۳۴۵۶۸	{۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰}	-۸۷/۷۲
S_1	$Z_1 = 7$	۲۰	۱۲۵۶۷/۱۸	{۲، ۴، ۶، ۹، ۱۰، ۱۸، ۲۰}	-۹۴/۰۵
S_2		۲۰	۱۹۰۰۰/۲۳	{۳، ۵، ۷، ۹، ۱۳، ۱۷، ۲۱}	-۹۱/۰۴
S_3		۲۰	۳۰۳۵۹/۰۵	{۴، ۶، ۷، ۱۳، ۱۵، ۱۹، ۲۱}	-۸۵/۷۰

یکسان نمی‌باشد ولی بعضی از مکان‌ها مانند گره‌های ۵، ۱۵، ۱۷ و ۱۹ بیشترین تکرار را داشتند. به نظر می‌رسد گره‌هایی که جریان خروجی بیشتری داشتند با احتمال بالاتری به عنوان محل نصب حسگرها انتخاب شدند.

نتیجه‌گیری

جانمایی مناسب حسگرهای تشخیص آلودگی که برای حفاظت از ایمنی کیفیت آب شبکه توزیع آب استفاده می‌شود می‌تواند در تشخیص زودهنگام ورود آلودگی به شبکه توزیع آب و اقدامات مدیریتی بعدی مؤثر باشند. اغلب تحقیقات پیشین با این فرض که تقاضای گره‌ها مقادیر قطعی هستند به حل این مسئله می‌پرداختند. در حالی که وجود عدم قطعیت در تخمین تقاضا، محاسبه مصرف آب آلوده مورد انتظار را پیچیده می‌کند که در این تحقیق، با اعمال $\pm 15\%$ تغییر در تقاضا و بهینه‌سازی خسارت این امر مورد بررسی قرار گرفته است.

برای درک بهتر شماتیک مسئله، محل پیشنهادی حسگرها در شکل ۴ نشان داده شده است. محل پیشنهادی نصب حسگرها در سناریوی S_1 با دایره توخالی آبی، سناریوی S_2 با مربع تو خالی سبز و در سناریوی S_3 با مثلث تو خالی قرمز نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، برای آمادگی شبکه در برابر حمله از هر یک از گره‌های شبکه، حسگرها به خوبی در کل شهر توزیع شده‌اند. به عبارتی، گره‌های سمت چپ شبکه برای نصب حسگرها در اولویت بالاتری نسبت به نیمه راست شبکه داشتند. علت این امر وجود مخزن و گره‌های بالادست در این قسمت شبکه می‌باشد. البته، قابل ذکر است که اعمال عدم قطعیت تقاضای مسئله جانمایی حسگر را پیچیده می‌کند. این پیچیدگی متأثر از غیرقابل پیش‌بینی بودن تغییر احتمالی جهت جریان شبکه تحت فشار و تقاضای گره‌ها می‌باشد. با این حال گره میانی شماره ۵ نیز اهمیت زیادی در جلوگیری از آلودگی کل شبکه دارد و در حالت‌های زیادی به عنوان محل نصب حسگر پیشنهاد شده است. در هیچ یک از سناریوها محل پیشنهادی حسگرها



شکل ۴- محل بهینه حسگرها به ازای ۱ تا ۷ حسگر در شبکه مطالعاتی

قطعیت تقاضا همزمان با عدم قطعیت‌های مؤثر در رخداد آلودگی شامل زمان و محل ورود آلودگی، جانمایی محل حسگرها را واقعی‌تر کرده و بر عملکرد الگوریتم اثر می‌گذارد. بررسی نقاط انتخابی نشان داد که پراکندگی حسگرها در مسیر جریان گرهی است که آلودگی از آن منجر به بیشترین خسارت ممکن می‌شود. در این مطالعه از رویکرد استوار استفاده شده است. استفاده از این رویکرد سطحی محافظه-کارانه و موجه از جواب‌ها را به ازای تمام پارامترهای دارای عدم قطعیت بوجود می‌آورد. نتایج نشان داد که وجود یک حسگر می‌تواند

در این مطالعه، بهینه‌سازی دو هدفه شبکه حسگرها، شامل: کمینه کردن بیشترین خسارت محتمل به علت مصرف آب آلوده و کمینه کردن هزینه شبکه حسگرها با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضای گره‌ها و عدم قطعیت زمان و محل ورود آلودگی توسعه داده شد. با توجه به پیچیدگی حل ریاضی مسئله ناشی از وجود عدم قطعیت در تقاضای گره‌ها، از ایده استفاده همزمان از الگوریتم PSO برای محاسبه تابع خسارت که یکی از قیدهای مدل NSGA-II است، استفاده شد. مطابق یافته‌های این تحقیق، لحاظ کردن عدم

- rule-based decision support system for sensor deployment in small drinking water networks. *Journal of Cleaner Production*. 29–30 (0): 28-37.
- Clerc, M. and Kennedy, J. 2002. The Particle Swarm-Explosion Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 58-73.
- Comboul, M. and Ghanem, R. 2013. Value of Information in the Design of Resilient Water Distribution Sensor Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 139: 449-455.
- Cozzolino, L., Mucherino, C., Pianese, D. and Pirozzi, F. 2006. Positioning, within water distribution networks, of monitoring stations aiming at an early detection of intentional contamination. *Civ Eng Environ Syst*. 23(3): 161-174, DOI: 10.1080/10286600600789359.
- Deb, K. and Jain, H. 2014. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: Solving problems with box constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 18: 577–601.
- Diao, K., and Rauch, W. 2013. Controllability analysis as a pre-selection method for sensor placement in water distribution systems. *Water Research*. 47 (16): 6097-6108.
- Ghimire, S. R. and Barkdoll, B. D. 2006. A Heuristic Method for Water Quality Sensor Location in A Municipal Water Distribution System: Mass-Released Based Approach, paper presented at 8th Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati.
- Jafari, H., Rjaee, T. and Nazif, S. 2020. An investigation of the possible scenarios for the optimal locating of quality sensors in the water distribution networks with uncertain contamination. 18 (5): 704–721.
- Janke, R., Murray, R., Haxton, T.M., Taxon, T., Bahadur, R., Samuels, W., Berry, J., Boman, E., Hart, W., Riesen, L. and Uber, J. 2017. Threat ensemble vulnerability assessment-sensor placement optimization tool (TEVA-SPOT) graphical user interface user's manual. 147. EPA/600/R-08.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C. 1995. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. 4:1942-1948.
- Kim J. H., Kim, T. G. and Yoon, Y. N. 1994. A study on the pipe network system design using nonlinear programming. *Journal of Korea Water Resources Association*. 27 (4): 59-67.
- Khorshidi, M. S. Nikoo, M. R. and Sadegh, M. 2018. Optimal and objective placement of sensors in water distribution systems using information theory. *Water* خسارت را بین ۶۱ تا ۷۵ درصد کاهش دهد. همچنین، دوز تزریق آلاینده پارامتر بسیار مهمی در تعیین تعداد و محل حسگرها می‌باشد. با وجود اینکه هر سناریو منجر به جانمایی متفاوتی از حسگرها می‌شود، گره‌های ۵، ۱۵، ۱۷ و ۱۹ بیشترین تکرار را در محل‌های پیشنهادی داشتند. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر است با نزدیک کردن توابع هدف به مقادیر بهینه خود، مکان‌های مناسبی را برای حسگرها ارائه دهد. نتایج این تحقیق مجموعه‌ای از راه‌های نامغلوب بهینه را برای تصمیم‌سازان فراهم می‌کند. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی اثر عدم قطعیت دوز آلاینده و طول مدت تزریق آلودگی بر جانمایی بهینه حسگرها بررسی شود. همچنین با توجه به اینکه حسگرها قادر به شناسایی انواع آلاینده‌ها نیستند، راهکار جدیدی با استفاده از سنجش پارامترهای کیفی استاندارد آب شبکه توزیع آب ارائه شود.
- ### منابع
- تابش، م. ۱۳۹۵. مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب، انتشارات دانشگاه تهران.
- راهبردی، م.ب.رو.ن. ۱۳۹۲. نشریه ۳-۱۱۷، ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی، بازنگری اول. ۱۳۹۲.
- شفیعی، ش.، ع. نصیریان. و ح. نصیریور. ۱۳۹۹. بهینه‌سازی موقعیت حسگرهای کیفی در شبکه‌های توزیع آب به منظور شناسایی ورود همزمان آلودگی از چند گره، نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۴۱): ۳۰۴-۲۸۶.
- Afshar, A. and Khombi, S.M. 2015. Multi-objective optimization of sensor placement in water distribution networks; dual use benefit approach. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 5(3): 315–331.
- 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.
- Berry, J.W., Fleischer, L., Hart, W. E., Phillips, C. E. and J. P. Watson. 2005. Sensor Placement in Municipal Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 131 (3): 237-243.
- Berry, J., Hart, W. E., Phillips, C. A., Uber, J. G. and P. Watson, J. 2006. Sensor placement in municipal water networks with temporal integer programming models. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 132 (4): 218-224.
- Chang, N.-B., Pongsanone, N.P. and Ernest, A. 2012. A

- scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 64 (5): 915-932.
- Rathi, S. Gupta, R., Kamble, S. and Sargaonkar, A. 2016. Risk Based Analysis for Contamination Event Selection and Optimal Sensor Placement for Intermittent Water Distribution Network Security. *Water Resources Management*. 30 (8): 2671-2685.
- Rossman, L. A. 2000. EPANET 2 user's manual. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, U.S.A
- Schwartz, R. Lahav, O. and Ostfeld, A. 2014. Optimal sensor placement in water distribution networks for injection of chlorpyrifos. In: *World Environmental and Water Resources Congress*. Portland, OR, USA. 485-494.
- Shastri, Y. and Diwekar, U. 2006. Sensor Placement in Water Networks: A Stochastic Programming Approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 132 (3): 192-203.
- Shen, H. and McBean, E. 2011. Diminishing marginal returns for sensor networks in a water distribution system. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 60 (5): 286-293.
- Tinelli, S., Creaco, E. and Ciaponi, C. 2017. Sampling Significant Contamination 727 Events for Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 143(9): 04017058.
- Weickgenannt, M., Kapelan, Z., Blokker, M. and Savic, D. A. 2010. Risk based sensor placement for contaminant detection in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 136(6): 629-636, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000073.
- Yang, S. and Li, C. 2010. A Clustering Particle Swarm Optimizer for Locating and Tracking Multiple Optima in Dynamic Environments. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 14 (6): 959-974.
- Research. 143: 218-228.
- Khorshidi, M.S., Nikoo, M.R., Ebrahimi, E. and Sadegh, M. 2019. A robust decision support leader follower framework for design of contamination warning system in water distribution network. 214: 666-673.
- 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.
- Liu, S. and Auckenthaler, P. 2013. Optimal sensor placement for event detection and source identification in water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 63 (1): 51-57.
- Mukherjee, R., Diwekar, U. M. and Vaseastha, A. 2017. Optimal Sensor Placement with Mitigation Strategy for Water Network Systems under Uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*. 103: 91-102.
- 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
- Ohar, Z., Lahav, O. and Ostfeld, A. 2015. Optimal sensor placement for detecting organophosphate intrusions into water distribution system. *Water Research*. 73: 193-203
- Ostfeld, A. and Salomons, E. 2004. Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130 (5): 377-385
- Propato, M., and Piller, O. 2006, Battle of the Water Sensor Network, paper presented at 8th Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati.
- Rahmati, S.H.A., Zandieh, M. and Yazdani, M. 2013. Developing two multi-objective evolutionary algorithms for the multi-objective flexible job shop

Quality Detection Sensors Location in Water Distribution Networks for Uncertain Water Demand Conditions

H. Jafari^{1*}, T. Rajaei²

Received: Nov. 10, 2020

Accepted: May. 01, 2021

Abstract

Accidental or intentional entry of pollution into water distribution networks as one of the vital life lines of any country, causes extensive damage in society. Early detection and warning of contaminant injection in the water distribution network is of significant importance. In order to optimize the location of quality sensors, this study presents a new algorithm based on uncertainty in pollution entry location and time and water demands. For the first time, this study presents a bi-objective algorithm using the results of single-objective PSO optimization simultaneously for one of the NSGA-II constraints based on water requirement uncertainty by the Minimax method and robust approach. The two goals are to minimize the maximum possible damage caused by the contaminated water consumed and to minimize the cost of sensor preparation and installation. In this study, considering three scenarios (S1, S2 and S3), arsenic injection with concentrations of 50, 100 and 150 mg / l from different nodes and in different time steps are investigated. The results of the developed model on a reference network reveal that in each of the three injection rate scenarios S1, S2 and S3, the installation of only one sensor reduces the damage by 75, 70 and 61%, respectively. Also, the entry of pollution from 19:00 and 20:00 leads to a critical scenario. Although, the location of the sensors depends on the concentration of the injected contaminant, the highest repeated location in the generated responses was found in nodes 5, 17, and 19. The proper formation of the Pareto front in all three scenarios of injection rate showed that for all parameters with uncertainty, the robust approach generates justified responses with a minimum deviation of the objective function from its optimal value.

Keywords: Contaminated water consumed, NSGA-II, PSO, Quality sensor, Uncertainty

1- PhD, Department of Civil Engineering, University of Qom, Iran

2- PhD, Department of Civil Engineering, University of Qom, Iran

(*Corresponding Author Email: hhjafari@yahoo.com)