



Sensor Placement in Water Distribution Network Under Dynamic Variations of Common Water Quality Parameters

A. Shahmirnori¹, M. Saadatpour^{2*}

Abstract

Detection of pollution in any water distribution network (WDN) is essential to maintain public health. Recent researches have demonstrated common water quality indicators (free Chlorine, pH, Electrical Conductivity, and...) response to contaminants, which can facilitate the pollutant detection in WDNs. In this research, EPANET-MSX model is used to simulate the realistic responses of common water quality parameters to a pollutant event in WDN, represented in example 3 of EPANET 2.0. The aim of the study is to apply EPANET-MSX to trace Chlorine changes in response to the potassium cyanide injection order to optimize sensor placements WDN. Optimal sensor placement is derived based on coupled EPANET-MSX - PSO (particle swarm optimization) framework. PSO is implemented as single and multi-objective algorithm. The objectives of the study are to reduce the pollutant detection time, increase detection likelihood, and reduce the contaminated water consumption as single and/or multi-objective problems. Studies on the sensor numbers, ranging from one to five, indicate 1- the pollutant detection time has decreased from 36.22 to 17.41 hours, 2- the pollutant detection likelihood has increased from 28.8% to 68.6%, and 3- the contaminated water consumption has decreased from 31.87 to 3.78 m³. The results show direct relationship between 1- pollutant detection likelihood and detection time, 2- pollutant detection likelihood and contaminated water consumptions, and 3- pollutant detection time and contaminated water consumption in multi-objective problems. Also, the location of the high-demand nodes in WDN and the contamination events occurrence can affect the location of the sensors.

Keywords: EPANET-MSX, Sensors, Single and/or Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm, Water Distribution Network Contamination.

Received: November 8, 2019

Accepted: June 17, 2020

جانمایی بهینه حسگرهای کنترل کیفیت آب در شبکه توزیع بر مبنای تغییرات دینامیک پارامترهای کیفی متداول

علیرضا شه‌میرنوری^۱ و مطهره سعادت‌پور^{۲*}

چکیده

تشخیص آلودگی‌ها در شبکه توزیع آب برای حفاظت از سلامت مصرف‌کنندگان ضروری است. شاخص‌های معمول کیفیت آب (کلر، pH، هدایت الکتریکی و غیره) در واکنش به آلاینده‌ها، با تغییراتی مواجه می‌گردند که این تغییرات پویا می‌توانند تشخیص آلودگی در شبکه آب را تسهیل نمایند. در این پژوهش، پاسخ پارامترهای معمول کیفیت به رویداد آلودگی تزریق پتانسیم سیانید به شبکه توزیع آب مثال شماره سه مدل EPANET 2.0 مطالعه و از مدل EPANET-MSX برای مشاهده تغییرات کلر در پاسخ به ورود آلاینده استفاده می‌گردد. جانمایی بهینه حسگرها در شبکه توزیع آب با استفاده از ارتباط میان شبیه‌ساز EPANET-MSX و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در ساختار یک و دو هدفه انجام می‌گردد. اهداف مدل‌سازی در این تحقیق کاهش زمان تشخیص، افزایش درست‌نمایی تشخیص و کاهش حجم آب آلوده مصرفی، می‌باشند که به صورت اهداف تک و/یا در قالب دو هدفه لحاظ گردیده‌اند. مطالعه نقش تعداد حسگرها از یک تا پنج حسگر در اهداف کاهش زمان تشخیص آلودگی، افزایش درست‌نمایی تشخیص و کاهش مصرف آب آلوده به ترتیب سبب کاهش زمان تشخیص از ۳۶/۲۲ به ۱۷/۴۱ ساعت، افزایش درست‌نمایی تشخیص از ۲۸/۸ به ۶۸/۶ درصد و کاهش مصرف حجم آب آلوده از ۳۱/۸۷ به ۳/۷۸ مترمکعب گردیده است. بررسی مسائل دو هدفه تعیین جانمایی بهینه حسگر در شبکه، بیانگر رابطه مستقیم: ۱- درست‌نمایی و زمان تشخیص آلودگی، ۲- درست‌نمایی تشخیص و حجم مصرفی آب آلوده و ۳- زمان تشخیص و حجم مصرفی آب آلوده است. همچنین نتایج نشان دادند موقعیت گره‌هایی با تقاضای بالا و نحوه رخ دادهای آلودگی شبکه بر جانمایی حسگرها اثرگذار هستند.

کلمات کلیدی: الگوریتم تک‌هدفه و چندهدفه ازدحام ذرات، آلودگی شبکه توزیع آب، حسگر، EPANET-MSX.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۸/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۳/۲۸

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.

2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology. Email: msaadatpour@iust.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۲- استادیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

مصرف‌کنندگان در طول تاریخ سابقه داشته است که می‌توان به جنگ‌های داخلی در آمریکا، در اروپا و در آسیا در طول جنگ جهانی دوم و در سال ۱۹۹۹ در کزوو اشاره کرد (Ehsani and Afshar, 2010). تشخیص وجود آلودگی و محل ورود آلودگی که منجر به تغییرات کیفیت آب شده، امری دشوار است. از این رو، توسعه شبکه حسگر برای نظارت بر کیفیت آب، در سیستم‌های توزیع آب، در زمان واقعی (آنلاین) راه حل مناسبی به نظر می‌رسد (Wu, 2014). تا به امروز مدل‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌هایی به منظور شناسایی بهترین مکان‌ها برای قرارگیری حسگرها توسعه داده شده‌اند و شامل فرضیاتی در باره اهداف طراحی، عملکرد حسگر و تشخیص رویداد می‌باشند. اهداف مرتبط در مباحث جانمایی حسگرها شامل: ۱- کاهش زمان تشخیص (TD^1)، ۲- کاهش حجم آب آلوده مصرف شده (VC^2)، ۳- کاهش جمعیت در معرض خطر آلودگی (PE^3) و ۴- کاهش گسترش آلودگی در شبکه (EC^4) هستند (Rathi and Gupta, 2014). آلودگی ممکن است در هر نقطه‌ای از شبکه توزیع آب و در هر زمانی وارد شبکه توزیع آب شود، از این رو بهترین حالت پایش شبکه آن است که نظارت در همه گره‌های شبکه توزیع آب صورت گیرد که این کار سبب می‌شود تا نظارت بر شبکه با حداکثر هزینه صورت گیرد. بنابراین، تلاش برای به حداکثر رساندن پوشش (نظارت) شبکه توزیع آب با تعداد محدود حسگرها و به حداکثر رساندن احتمال تشخیص (DL^5) حوادث، صورت گرفته است. همچنین، یک حسگر ممکن است در اندازه‌گیری دچار خطا شود و یا یک رویداد آلودگی را تشخیص ندهد (در صورتی که غلظت آلودگی زیر محدودیت قابل تشخیص حسگر باشد). علاوه بر این، ممکن است تأخیر در پاسخ (ارسال اطلاعات) از حسگرهای مستقر شده صورت گیرد، فاصله بین الکترودها و اندازه الکترودها بر زمان پاسخ حسگر تأثیرگذار است، بنابراین، اهداف دیگری به عنوان کمینه کردن زمان پاسخ حسگر (SRT^6)، به حداقل رساندن تعداد عدم تشخیص (NFD^7)، کمینه کردن احتمال تشخیص اشتباه (PF^8) و حداکثرسازی دقت تشخیص حسگر (SDR^9) نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. همچنین اهدافی مانند درست‌نمایی تشخیص منبع آلودگی ($CSDL^{10}$) و جرم آلودگی مصرف شده (CMC^{11}) در بعضی از تحقیقات پیشین نیز در نظر گرفته شده‌اند (Rathi and Gupta, 2014; Wu, 2014).

در مطالعه Lee and Deninger (1992) یک مفهوم پوشش تقاضا (DC^{12}) تعریف شد. پوشش تقاضا بیانگر درصدی از تقاضای کل شبکه است که توسط یک ایستگاه پایش بررسی می‌شود. فرض ایشان بر این بود که نمونه‌برداری از گره‌ای که آب گره‌های بالادستی را انتقال می‌دهد، می‌تواند اطلاعاتی در مورد آب در گره‌های بالادست فراهم

تأمین آب کافی همراه با کیفیت مناسب همواره یکی از دغدغه‌های مدیران، مسئولین و تصمیم‌گیران حوزه آب است. وابستگی حیات در بخش‌های مختلف به آب، آن را به یکی از مهم‌ترین اولویت‌های هر کشوری تبدیل نموده است. سرمایه‌گذاری در بخش آب و فاضلاب با هدف ایجاد زیر ساخت‌های تأمین آب و تصفیه‌خانه‌ها، سبب می‌شود تا اثرات نامطلوب بر سلامتی و هزینه‌های مربوط به مراقبت‌های بهداشتی و بیماری‌های مرتبط با استفاده از آب آلوده کاهش یابند. این در حالی است که بیماری‌های مرتبط با آب، سالانه جان ۵ میلیون انسان، به‌خصوص کودکان را در سراسر جهان می‌گیرند (Ahuja, 2013; WHO, 2017). آب مورد استفاده مصرف‌کنندگان به طور عمده از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، چاه‌ها و چشمه‌های طبیعی تأمین می‌شود و به منظور انتقال و استفاده مصرف‌کنندگان وارد سیستم‌های توزیع آب می‌گردد. از این جهت دسترسی اغلب مصرف‌کنندگان به آب آشامیدنی از طریق سیستم‌های توزیع آب صورت می‌پذیرد و این استفاده همه‌گیر، سبب می‌گردد تا بتوان شبکه‌های توزیع آب را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیر ساخت‌های شهری در نظر گرفت (Ahuja, 2013; Gong et al., 2016). سیستم‌های توزیع آب با چالش‌های مختلفی در تأمین اهداف کمی و کیفی نیازهای آبی شبکه مواجه می‌باشند. ورود آلودگی، به صورت تصادفی و یا عمدی، از مهم‌ترین چالش‌هایی است که سیستم‌های توزیع آب با آن مواجه هستند. برای مثال، شکست لوله‌ها در شبکه توزیع سبب هدر رفت آب گردیده و همچنین لوله‌های شکسته (ترک خورده) احتمال ورود آلودگی را به واسطه ترک‌های خود افزایش می‌دهند؛ اتفاقی که سبب می‌شود تا آسیب‌پذیری سیستم‌های توزیع آب در بعد کیفی به شدت افزایش یابد (Shen, 2011). در واقع شکستگی (و حتی شل بودن اتصالات) در اجزاء شبکه آب باعث ایجاد دو تهدید می‌شود: ۱- از دست دادن آب (هدر رفت آب)، ۲- خطرات بهداشت عمومی به دلیل ورود آلودگی، که سبب کاهش کیفیت آب می‌شود و جمعیت زیادی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بحران‌های اجتماعی و اقتصادی بسیاری را به دنبال خواهد داشت. مطالعات انجام شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا بیان می‌دارند که بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۱، ۴۵۹ حادثه منجر به بیماری حدود ۱۲۰۰۹۳ نفر گردیده‌اند (Gong et al., 2016).

یکی دیگر از چالش‌های مورد مواجهه در شبکه توزیع آب، تزریق عمدی آلودگی در قالب مسائل پیچیده کنترل، مدیریت و بهره‌برداری است. این نوع حوادث از نظر نوع آلاینده، مکان تزریق آلودگی و زمان شروع و پایان تزریق آلاینده دارای عدم قطعیت می‌باشند. مطالعات نشان داده‌اند که آلوده کردن عمدی آب به عنوان سلاحی علیه

تشخیص، ایشان این شرط را برقرار نمودند که زمانی آلودگی توسط یک شبکه حسگر تشخیص داده می‌شود که اولاً ۳ حسگر از شبکه حسگر، آلودگی را تشخیص داده باشند و ثانیاً فاصله زمانی تشخیص هر دو حسگر بیشتر از ۳۰ دقیقه نباشد (Preis and Ostfeld, 2006). Austin et al. (2009) با اعمال دیدگاه عدم اختلاط کامل در محل اتصال لوله‌ها، نرم‌افزار شبیه‌سازی هیدرولیکی AZRED، نسخه تغییر یافته از EPANET که اختلاط ناقص برای اتصالات صلیبی، دوتایی و اتصالات T و Y شکل را اجرا می‌کند، در کار خود استفاده نمودند. بررسی آنها بر روی شبکه‌ای با ۹۲ گره و ۱۱۷ لوله نشان داد که تفاوت‌های ناچیزی بین در نظر گرفتن اختلاط کامل و ناقص وجود دارد. ایشان اما، این باور را داشتند که در شبکه‌هایی با تعداد حلقه‌ها و اتصالات بیشتر در نظر گرفتن اختلاط ناقص می‌تواند نتایج متفاوتی را به همراه داشته باشد (Austin et al., 2009). Comboul and Ghanem (2013) فقدان اطلاعات در مورد حوادث احتمالی آلودگی، از جمله عدم آگاهی از منابع تزریق، نوع آلودگی، زمان رخداد آلودگی و تغییرات پارامترهای ورودی شبکه آب، مانند تقاضا در گره و ضریب زبری لوله در فرآیند طراحی شبکه حسگر را مهم ارزیابی و در تحقیق خود لحاظ نمودند. نتایج در تحقیق ایشان حساسیت جانمایی حسگرها به پارامترهای غیرقطعی را در مسأله‌ای با توابع هدف کمینه کردن زمان تشخیص و تعداد افراد در معرض آلودگی نشان داد (Comboul and Ghanem, 2013). Eliades et al. (2014) نرم‌افزار جدیدی به اسم S-PLACE را با استفاده از زبان برنامه‌نویسی MATLAB و نرم‌افزار EPANET2.0، به منظور طراحی جانمایی حسگرها در شبکه توزیع آب طراحی کردند. نرم‌افزار طراحی شده، قابلیت تعیین جانمایی بهینه حسگرها را با در نظر گرفتن اهداف مختلف به منظور کاهش ریسک دارا بوده است. همچنین قابلیت ساخت رخدادها بر اساس گره ورود آلودگی، زمان ورود آلودگی، مدت زمان تزریق آلودگی و دبی جریان تزریق آلودگی در نرم‌افزار طراحی شده، وجود داشته است (Eliades et al., 2014). Schwartz et al. (2014b) به حل مسأله جانمایی بهینه حسگر در شبکه توزیع آب متأثر از تزریق آفت‌کش ارگانوفسفات کلرپیریفوس پرداختند. تابع هدف در کار ایشان کاهش جمعیت متأثر از آلودگی ذکر شده در شبکه توزیع آب بوده است. به منظور شبیه‌سازی سرنوشت و انتقال این آلاینده در شبکه از مدل EPANET-MSX استفاده نمودند که به شبیه‌سازی غلظت آلاینده و محصولات منتج از آن در مجاورت کلر و متأثر از pH می‌پرداخت. مطالعه ایشان در شبکه شماره ۱ نرم‌افزار EPANET با ۷ گره مصرف‌کننده (شبکه‌ای بسیار کوچک) با هدف کاهش جمعیت متأثر از آلودگی ورودی و محصولات آن انجام پذیرفت. در کار تحقیقاتی Rathi and Gupta (2016) توابع هدف، به حداکثر رساندن پوشش

کند. با این فرض، آنها نقاط موردنظر برای پایش شبکه را برگزیدند به نحوی که کیفیت آب بخش بزرگی از شبکه با تعداد کمی ایستگاه پایش و کنترل شود (Lee and Deininger, 1992).

Kumar et al. (1997) از ماتریس پوشش، توسعه داده شده توسط Lee and Deininger (1992)، با تغییراتی در روش تحقیق، استفاده نمودند. روش آنها نتایج مشابهی را برای مثال کوچک حل شده توسط Lee and Deininger ارائه داد. اما با آن که ادعا کردند این روش در شبکه‌های بزرگ کارآ است، نتایج را برای شبکه بزرگتر ارائه نمودند (Kumar et al., 1997). Woo et al. (2001) اعتقاد داشتند زمان ماند آب به دلیل آنکه رابطه غیر خطی با کیفیت آب دارد، نمی‌تواند کیفیت آب را به خوبی نشان دهد. ایشان کیفیت آب در گره‌ها را با استفاده از مدل EPANET شبیه‌سازی و کلر را به عنوان پارامتر کیفی مورد مطالعه، برگزیدند (Woo et al., 2001). پس از ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ تغییرات در اولویت‌های نظارت بر سیستم‌های توزیع آب به منظور جانمایی حسگرها بیش از هر زمان دیگری اهمیت یافت. سیستم‌های مورد مطالعه بزرگتر و پیچیده‌تر شدند تا جانمایی حسگرها به شرایط واقعی نزدیک‌تر شوند. Ostfeld and Salomons (2004) مسأله کمینه کردن میزان حجم آب آلوده مصرف شده را مطرح نمودند. ایشان تزریق آلودگی را در چند نقطه از شبکه محتمل و مدت زمانی را برای رخداد یک حمله منظور نمودند. فرضیات در نظر گرفته توسط ایشان سبب شدند تا شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر گردد (Ostfeld and Salomons, 2004). Ostfeld and Salomons (2005) گذشته خود در سال ۲۰۰۴، را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نرخ آلاینده تزریق شده، تقاضای مصرف‌کنندگان، دقت تشخیص حسگر و زمان پاسخ (ارسال اطلاعات) بعد از شناسایی آلودگی توسط حسگر، کامل کردند. نتایج در کار ایشان نشان داد با افزایش دقت حسگر، درست‌نمایی تشخیص افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش زمان تأخیر ارسال اطلاعات حسگر، درست‌نمایی تشخیص کاهش می‌یابد (Ostfeld and Salomons, 2005). Berry et al. (2005) تحقیق از اولین مطالعاتی بود که اثر تزریق آلودگی در سیستم‌های توزیع آب را بر جمعیت، مورد بررسی قرار داد. ایشان احتمال حمله بیشتری را به برخی از گره‌ها نسبت به سایر گره‌ها در نظر گرفته و عدم قطعیت ناشی از جمعیت را متناسب با تغییرات تقاضا در گره محاسبه کردند (Berry et al., 2005). Preis and Ostfeld (2006) طراحی بهینه موقعیت حسگرها در سیستم توزیع آب برای چهار هدف: ۱- به حداکثر رساندن احتمال تشخیص، ۲- به حداقل رساندن زمان تشخیص، ۳- حداکثرسازی دقت تشخیص و ۴- به حداکثر رساندن احتمال شناسایی منبع آلودگی را ارائه نمودند. به منظور محاسبه حداکثرسازی دقت

Schwartz et al. (Helbling and VanBriesen, 2009) (2014a) تزریق حشره کش‌های ارگانوفسفات، کلرپیریفوس و پاراتیون به داخل شبکه توزیع آب را از طریق برنامه EPANET-MSX شبیه‌سازی کردند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد افت کلر در شبکه می‌تواند معیاری برای ورود این نوع آلودگی‌ها در شبکه باشد (Schwartz et al., 2014a). (Yang and Boccelli, 2016) ورود آلودگی‌های شیمیایی پتاسیم سیانید (KCN^{13}) و نیکوتین را با استفاده از برنامه EPANET-MSX شبیه‌سازی و به بررسی تغییرات پویای کیفیت آب تحت ورود دو آلایند نام برده، پرداختند. ایشان سه پارامتر کیفیت کلر، pH و هدایت الکتریکی را به منظور مشاهده تغییرات کیفی آب در اثر تزریق آلودگی‌های اشاره شده، مورد پایش قرار دادند. نتایج کار ایشان نشان داد که پس از ورود این دو آلایند به شبکه، تغییرات معناداری در pH و هدایت الکتریکی که بتوان به واسطه آنها از ورود آلودگی به شبکه اطلاع یافت، حاصل نخواهد گشت. اما غلظت کلر به ورود هر دو آلایند، واکنش نشان داده و با کاهش بسیار زیادی مواجه می‌گردد. بر اساس یافته‌های ایشان، این کاهش ناگهانی در غلظت کلر می‌تواند هشدار (نشان) مناسبی برای ورود آلودگی به شبکه توزیع آب باشد (Yang and Boccelli, 2016). در این کار تحقیقاتی، بر اساس مفاهیم و مبانی ارائه شده در خصوص تغییرات پارامترهای متداول کیفی در آب آشامیدنی متأثر از تزریق سهوی و/یا عمدی آلایند‌های غیرپایستار و غیر متعارف در شبکه توزیع آب، جانمایی بهینه حسگرهای ثابت با رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی استخراج گردیده است. به بیان دیگر، جانمایی بهینه حسگرها در تشخیص تزریق آلودگی‌های غیرمتعارف در شبکه توزیع آب بر اساس تغییرات پارامترهای متداول پایش کیفیت آب شبکه توزیع صورت پذیرفته است. فرض حسگر جامع (حسگری که قادر به اندازه‌گیری غلظت هر نوع آلایند تزریقی به شبکه توزیع آب است) به دلیل محدودیت در قابلیت پایش پارامترهای کیفیت آب در این مطالعه لحاظ نگردیده است تا ترسیم واقع‌بینانه‌تری از دنیای واقعیت در تعریف ریاضی مسأله و تعیین بهینه جانمایی بهینه حسگرها صورت پذیرد. این در حالی است که بسیاری از مطالعات پیشین، که برخی در این مقاله مرور گردیده‌اند، با فرض حسگر جامع، جانمایی بهینه حسگرها را بر اساس غلظت آلایند ورودی به شبکه توزیع آب دنبال نموده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبکه نمونه

شبکه‌ای که برای ارائه در این تحقیق در نظر گرفته شده است، مثال شماره ۳ نرم‌افزار EPANET 2.0 می‌باشد که در بسیاری از تحقیقات

تقاضا و به حداکثر رساندن درست‌نمایی تشخیص با مقید (محدود) کردن زمان تشخیص آلودگی در نظر گرفته شدند. بر اساس یافته‌های این محققین، مقید کردن زمان تشخیص سبب می‌گردد چیدمان حسگرها به رخ‌دادهایی که سریع‌تر شناسایی می‌شوند، وابسته گردد. از این رو، با تشخیص بیشتر رخ‌دادهای آلودگی، پیامدهای منفی ناشی از آلوده شدن شبکه آب‌رسانی کاهش پیدا خواهد کرد. محققین در کار تحقیقاتی خود، حجم آب مصرف شده، جمعیت تحت تأثیر آلودگی و گسترش آلودگی در شبکه را به‌عنوان پیامدهای منفی در نظر گرفتند؛ چرا که باور داشتند با کاهش زمان تشخیص، پیامدهای منفی ناشی از آلودگی کاهش می‌یابد (Rathi and Gupta, 2016). (Sankary and Ostfeld, 2018) در کار تحقیقاتی خود، عدم قطعیت در تقاضای مصرف‌کنندگان را مدنظر قرار دادند. ایشان بر این باور بودند که در نظر گرفتن تقاضای متغیر مصرف‌کنندگان می‌تواند سبب تغییر در جهت جریان در لوله‌ها و فشار در گره‌ها شود و این تغییرات سبب می‌شوند تا شرایط هیدرولیکی تحت تأثیر قرار گرفته و به سبب آن مسیر انتقال آلودگی در شبکه و اثرگذاری آلودگی بر جمعیت متفاوت گردد. نتایج کار ایشان نشان داد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضای مصرف‌کنندگان، راه‌حل‌ها و جواب‌های به دست آمده به شرایط واقعی نزدیک‌تر بوده و قطعیت جواب بهبود می‌یابد (Sankary and Ostfeld, 2018).

در تمامی موارد ذکر شده، محققان از یک فرض محافظه‌کارانه برای تشخیص آلودگی در شبکه آب و جانمایی بهینه حسگرها استفاده کردند. به عبارتی ماده آلایند ورودی به سیستم به صورت پایستار در نظر گرفته شده و از اثرگذاری و اثرپذیری آن در سیستم صرف نظر گردید. فرض پایستاری آلایند ورودی سبب اثرگذاری بر موقعیت حسگر در شبکه به دو صورت می‌گردد. نخست اینکه فرض پایستاری سبب تخمین غیر دقیق از جمعیت در معرض آلایند (به صورت واکنش‌پذیری و سپس زوال جرم آلایند ورودی و/یا ایجاد محصولات سمی در شبکه) می‌گردد. دوم این‌که، جایگذاری حسگرها در شبکه با وابستگی بالا، تابعی از احتمال تشخیص آلودگی در شبکه است و در نظر گرفتن آستانه تشخیص پایین، یک نگاه نادرست در حل این‌گونه مسائل می‌تواند باشد. (Helbling and Vanbriesen, 2009) توسعه مدلی با استفاده از برنامه EPANET-MSX به شبیه‌سازی تغییرات کلر در یک شبکه توزیع آب در اثر ورود مقدار مشخصی از آلودگی میکروبی (بیولوژیکی) پرداختند. آنها با استفاده از مدل‌سازی این برهم‌کنش‌ها و نحوه انتشار کلر به این نتیجه رسیدند که می‌توان از حسگرهای کلرسنج برای تشخیص آلودگی‌های بیولوژیکی در شبکه‌های توزیع آب استفاده نمود

مجاز آن بوده است. برای تمام گره‌های مصرف‌کننده و در تمام رخ‌دادها، ماتریس ذکر شده، ساخته و در ارتباط با الگوریتم بهینه‌ساز قرار داده می‌شود تا با توجه به اهداف سه‌گانه (کاهش زمان تشخیص، افزایش درست‌نمایی تشخیص و کاهش حجم آب مصرفی) مسأله حل و نقاط بهینه‌ساز جانمایی حسگرها در شبکه توزیع آب تعیین گردند. شکل ۲ دیگرام مراحل کار انجام شده در تحقیق حاضر را نمایش می‌دهد.

۳-۲- رخ‌دادهای آلودگی

دوره شبیه‌سازی در این تحقیق ۱۲ روز در نظر گرفته شده است. تعداد رخ‌دادهای آلودگی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، برابر با ۱۰۰۰ رخ‌داد آلودگی می‌باشند. رخ‌دادها براساس محل تزریق آلودگی، شدت تزریق آلودگی، زمان شروع (تزریق) آلودگی و مدت زمان تزریق آلودگی تعیین شده‌اند. به منظور تعیین محل ورود آلودگی، از مخازن و تانک‌ها صرف نظر شده است، چرا که فرض شده است مخازن و تانک‌های یک شبکه توزیع آب، عموماً تحت نظارت هستند و احتمال آن که عملیات خرابکارانه‌ای از طریق آنها صورت گیرد پایین می‌باشد. در ۹۲ گره باقی‌مانده از تعدادی گره، از جمله گره‌های انتهایی شبکه (۱۰ گره)، صرف نظر شده است و آلودگی می‌تواند تنها از ۸۲ گره وارد شبکه شود. در ارتباط با ۸۲ گره باقی‌مانده، احتمال ورود آلودگی از تمامی آنها یکسان فرض شده است و در هر رخ‌داد آلودگی، آلاینده (پتاسیم سیانید) تنها از یک گره، که به صورت تصادفی انتخاب خواهد شد، وارد شبکه می‌شود. شدت آلاینده ورودی، از میان ۴ مقدار $\frac{2}{5}$ ، ۳، $\frac{3}{5}$ و ۴ مول در دقیقه، به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در هر ساعتی از روز ۱۱ ام، امکان ورود آلودگی به شبکه وجود دارد. مدت زمان تزریق آلودگی برابر ۳، ۴، ۵ و ۶ ساعت فرض شده است، که در هر رخ‌داد آلودگی یکی از ساعات ذکر شده به شکل تصادفی انتخاب خواهد شد. به ترتیبی که به آن اشاره شد، یک ماتریس رخ‌داد آلودگی به ابعاد 1000×4 ساخته شد که هر سطر آن نشان‌دهنده یک رخ‌داد آلودگی با ویژگی‌های ذکر شده می‌باشد.

۴-۲- معادلات زوال کلر

معادله زوال کلر مطابق رابطه (۱) می‌باشد. در حالت کلی، معادله زوال حجمی مرتبه n برای کلر به شکل زیر است (Zanjani, 2015):

$$\frac{dC}{dt} = -k_b C^n \quad (1)$$

که در آن C غلظت کلر، k_b ضریب زوال حجمی و n مرتبه واکنش می‌باشد. Fisher et al. (2011) یک مدل درجه دو، با واکنش‌دهنده را به عنوان یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی غلظت کلر (C) ارائه دادند.

پیشین در جانمایی حسگرها، از این شبکه بهره گرفته شده است. این شبکه دارای ۱۱۷ لوله و ۹۷ گره می‌باشد که ۲ گره آن مخزن، ۳ گره آن تانک و ۹۲ گره دیگر، گره‌های مصرف‌کننده می‌باشند؛ در این تحقیق، فقط گره‌های مصرف‌کننده دارای پتانسیل قرارگیری حسگر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۱، تصویر شماتیک این شبکه ارائه گردیده است.

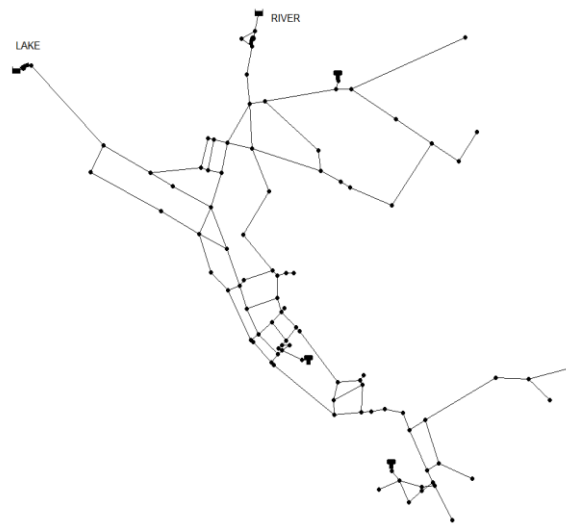


Fig. 1- Schematic representation of water distribution network of example 3 in EPANET 2.0
شکل ۱- نمایش شماتیک شبکه توزیع آب مثال ۳ نرم‌افزار EPANET 2.0

۲-۲- روش حل مسأله

به منظور شبیه‌سازی تزریق آلودگی به شبکه آب‌رسانی و استفاده از برنامه EPANET-MSX، دو فایل ورودی: ۱- شامل روابط و ضرایب واکنش‌های شیمیایی با پسوند MSX* و ۲- شامل اطلاعاتی مانند رقم ارتفاعی، میزان تقاضا در هر گره، طول، قطر و غیره از شبکه توزیع آب با پسوند INP* مورد نیاز می‌باشند. پس از شبیه‌سازی تمام رخ‌دادهای آلودگی (سناریوهای متعدد تصادفی مبتنی بر محل تزریق، زمان تزریق، شدت جرم تزریق آلودگی و تداوم تزریق)، غلظت کلر در تمام گره‌های مصرف‌کننده و در گام‌های زمانی مختلف، به عنوان خروجی از برنامه گرفته می‌شود. سپس با توجه به غلظت کلر در هر گره و در هر گام زمانی، برای هر گره مصرف‌کننده ماتریسی در ابعاد $i \times j$ به صورت صفر و ۱ ساخته می‌شود که i برابر کل تعداد گام‌های زمانی و j برابر با تعداد کل رخ‌دادهای شبیه‌سازی شده، می‌باشند. در ماتریس ساخته شده، عدد صفر نشان‌دهنده آن است که در گام زمانی i ام در رخ‌داد (سناریوی) j ام، غلظت کلر در گره مورد نظر کمتر از حد مجاز آن بوده است و عدد ۱ بیانگر آن است که در گام زمانی i ام و در رخ‌داد j ام غلظت کلر در گره مورد نظر بیشتر و یا برابر با غلظت

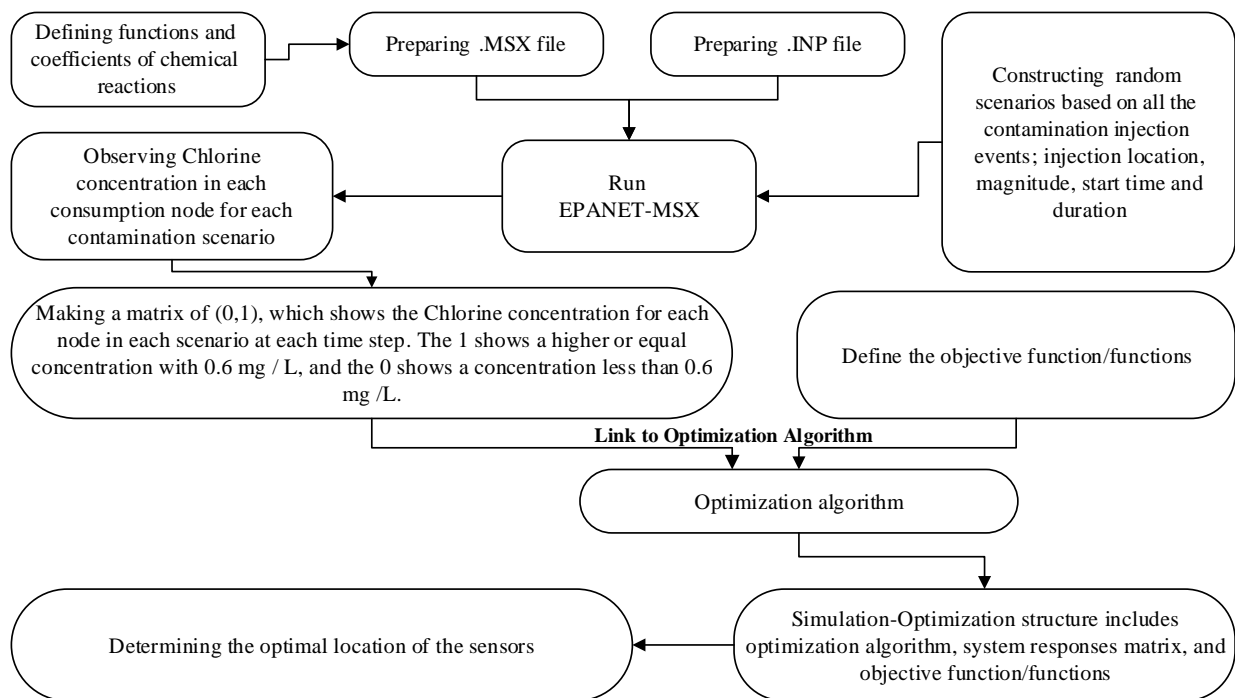


Fig. 2- Schematic representation of steps in determination of optimal sensor placement in the current study

شکل ۲- مراحل حل مسأله تعیین جانمایی بهینه حسگرها در مطالعه حاضر

به شبکه توزیع آب انجام پذیرد. در جدول ۱ مقادیر ضرایب واکنش که در روابط (۳) تا (۵) استفاده شده‌اند، نمایش داده شده است.

Table 1- Reaction coefficients (Yang and Boccelli, 2016)

جدول ۱- ضرایب واکنش (Yang and Boccelli, 2016)

| Reaction coefficient | Value | Unit |
|----------------------|-----------------------|----------------|
| k_1 | 0.09 | L / (mg × HR) |
| k_2 | 0.27 | L / (mg × HR) |
| k_3 | 4.39×10^{12} | L / (MOL × HR) |

۲-۵- مقدار حد مجاز کلر

مطابق استاندارد ۱۰۵۳ (آب آشامیدنی- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، تجدید نظر پنجم) حداکثر سطح مجاز کلر در آب آشامیدنی برابر با ۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (ISIRI, 1053). در ادامه این استاندارد حداقل مقدار مجاز کلر آزاد باقی‌مانده، پس از مدت زمان نیم ساعت تماس، متناسب با pH، مطابق جدول ۲ است.

از آنجایی که در این تحقیق سطح pH در آب برابر با ۸/۳۸ در نظر گرفته شده است، مقدار حداقل سطح مجاز کلر در شبکه برابر با ۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر لحاظ شده است. از این رو معیار تشخیص آلودگی

در این مدل فرض بر این است که دسته اول با سرعت زیاد (f) و دسته دوم با سرعت کم (s) واکنش می‌دهند (Fisher et al., 2011).

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dC_f}{dt} + \frac{dC_s}{dt} = -k_f C C_f - k_s C C_s \quad (2)$$

در رابطه بالا C_s و C_f به ترتیب غلظت مواد شیمیایی با نرخ واکنش زیاد و کم با ماده کلر (C) در آب است. معادله زوال کلر مورد استفاده در این تحقیق مبتنی بر مدل مرتبه دوم دو قسمی (ماده‌ای)، که در مطالعه Yang and Boccelli (2016) ارائه شده است و روابط آن به شرح زیر، می‌باشد (Yang and Boccelli, 2016):

$$\frac{d[A]}{dt} = -k_1[A][D] - k_3[A][C] \quad (3)$$

$$\frac{d[D]}{dt} = -k_2[A][D] \quad (4)$$

$$\frac{d[C]}{dt} = -k_3[A][C] \quad (5)$$

که در آن A غلظت کلر، D کربن آلی محلول (DOC) و C غلظت آلاینده است. همچنین k_1 و k_2 ضرایب واکنش بین کلر و کربن آلی محلول و k_3 ضرایب واکنش بین کلر و آلاینده می‌باشند. در این تحقیق، پتاسیم سیانید (KCN) به عنوان آلاینده ورودی به شبکه توزیع آب در نظر گرفته شده است و ضرایب واکنش (k_1, k_2, k_3) با آنچه که در کار تحقیقاتی Yang and Boccelli (2016) تعریف گردیده، به برنامه EPANET-MSX معرفی گردید تا شبیه‌سازی ورود آلودگی

$$T_d = \begin{cases} t_{\max} & \text{چنانچه غلظت کلر بیشتر یا برابر با } 0/6 \text{ میلی گرم بر لیتر باشد (آلودگی تشخیص داده نشود)} \\ \min(t_i) & \text{چنانچه غلظت کلر کمتر از } 0/6 \text{ میلی گرم بر لیتر باشد (آلودگی تشخیص داده شود)} \end{cases} \quad (6)$$

رابطه (۷) تابع ریاضی نحوه محاسبه زمان مورد انتظار تشخیص است (Ehsani and Afshar, 2010):

$$Z_1 = \frac{1}{A} \sum_d^A T_d \quad (7)$$

در رابطه فوق A برابر کل رخ داده‌های آلودگی است و مقدار تابع Z_1 می‌باید کمینه گردد.

۲-۶-۲-۲- درست‌نمایی تشخیص

درست‌نمایی تشخیص یک شبکه حسگر برابر است با احتمال تشخیص موفق یک رخداد آلودگی توسط یک حسگر در آن شبکه توزیع آب (Ehsani and Afshar, 2010). درست‌نمایی تشخیص در یک شبکه حسگر از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$Z_2 = 1 - \frac{1}{A} \sum_d^A d_i \quad d = 1, 2, \dots, A \quad (8)$$

در رابطه فوق A برابر با تعداد کل رخ داده‌های آلودگی است. d_i که نشان‌دهنده تشخیص و یا عدم تشخیص آلودگی برای رخداد d ام است و مقداری برابر صفر و ۱ دارد. d_i برابر با ۱ است چنانچه در رخداد آلودگی d ام، غلظت کلر در گره‌ای که حسگر در آن قرار دارد به کمتر از $0/6$ نرسد و d_i برابر با صفر است چنانچه در رخداد آلودگی d ام، غلظت کلر در آن گره‌ای که حسگر قرار دارد به زیر $0/6$ برسد. به بیانی دیگر d_i برابر با ۱ است؛ اگر آلودگی توسط حسگر تشخیص داده نشود و d_i برابر با صفر است چنانچه آلودگی توسط حسگر تشخیص داده شود. مقدار تابع Z_2 می‌باید بیشینه گردد.

۲-۶-۳- حجم آب آلوده مصرفی

وجود سیانید در آب بسیار خطرناک بوده و حتی می‌تواند مرگ‌آور باشد و سرعت واکنش بالایی دارد $(\text{MOL} \times \text{HR}) / 10^{12} \times 4/39$ ، ضریب واکنش بین سیانید و کلر) و پس از اضافه شدن به آب، با توجه به غلظت کلر، بلافاصله مقدار آن صفر می‌شود. لذا امکان محاسبه آن که چه میزان از سیانید وارد شده به شبکه توسط مصرف‌کنندگان، مصرف می‌شود وجود ندارد، اما ورود آن به شبکه باعث می‌شود تا غلظت کلر به شدت در شبکه کاهش یابد و به کمتر از میزان استاندارد آن برسد. از این رو، میزان حجم آب مصرفی آلوده (آب با غلظت کلر

یک گره آن است که غلظت کلر در آن گره به کمتر از $0/6$ میلی گرم بر لیتر برسد.

Table 2- Minimum permitted level of Chlorine according to pH level (ISIRI, 1053)

جدول ۲- حداقل مقدار مجاز کلر متناسب با سطح pH

(ISIRI, 1053)

| Row | pH | Free Chlorine Limit (mg/L) |
|-----|-----|----------------------------|
| 1 | < 8 | 0.5 |
| 2 | 8-9 | 0.6 |

۲-۶-۲-۱- اهداف مدل بهینه‌سازی

در این تحقیق کمینه کردن زمان مورد انتظار برای تشخیص آلودگی، بیشینه کردن درست‌نمایی تشخیص و کمینه کردن مصرف آب آلوده (آب با غلظت کلر به کمتر از حد استاندارد $(0/6$ میلی گرم بر لیتر))، مورد بررسی قرار می‌گیرند. بهینه‌سازی این اهداف در قالب مسأله تک‌هدفه و در قالب مسأله دوهدفه (بکارگیری دو دویی اهداف ذکر شده اخیر) در جانمایی بهینه حسگرها دنبال می‌گردند.

۲-۶-۱-۱- زمان مورد انتظار برای تشخیص آلودگی

فاصله بین شروع رخداد آلودگی و زمان اولین تشخیص توسط یک حسگر، از میان حسگرهایی که در یک شبکه حسگر قرار دارند، زمان تشخیص آن رخداد توسط آن شبکه حسگر نامیده می‌شود. برای یک رخداد آلودگی، زمان تشخیص (t_i) برای یک حسگر، واقع در گره i برابر با مدت زمان بین آغاز آلودگی تا اولین تشخیص توسط آن حسگر می‌باشد. در این حالت، چنانچه آلودگی وارد شبکه گردیده و حسگرهای نصب شده در شبکه، غلظت کلر کمتر از $0/6$ میلی گرم بر لیتر را ثبت ننمودند (آلودگی توسط شبکه حسگرها تشخیص داده نشود)، زمان تشخیص آن رخداد، صفر در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه با توجه به آثار آلودگی مثل تغییر رنگ و مزه آب، بیمار شدن بخشی از مردم، گزارشات مردمی و عواملی از این قبیل، آلوده شدن شبکه گزارش خواهد گردید (Ehsani and Afshar, 2010). لذا زمان تشخیص در این حالت (زمانی که آلودگی تشخیص داده نمی‌شود) در این مطالعه، ۴۸ ساعت (۲ روز) بعد از ورود آلودگی به شبکه در نظر گرفته می‌شود. در واقع T_d (زمان تشخیص شبکه حسگر در رخداد d ام) در حالتی که تشخیص آلودگی صورت نگیرد به جای صفر برابر t_{\max} در نظر گرفته می‌شود که برابر با ۴۸ ساعت است. رابطه (۶) بیانگر چگونگی محاسبه زمان تشخیص است:

که در آن v_i^t سرعت ذره i ام در تکرار t ام، w تابع وزن دهی، C_j ضریب شتاب، $rand$ عددی تصادفی بین صفر و یک، x_i^t موقعیت کنونی ذره i ام در تکرار t ام، $pbest_i$ بهترین جواب ذره i ام و $gbest$ بهترین جواب به دست آمد از کل ذرات است. الگوریتم با یک تعداد ذرات تصادفی شروع به کار می‌کند. در هر تکرار، سرعت ذرات با استفاده از رابطه (۱۱) و موقعیت هر ذره با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. با توجه به ماهیت گسسته مسائل حل شده در این تحقیق، نتیجه حاصل از معادله ۱۲ با استفاده از تابع تبدیل گرد کردن، به نزدیکترین عدد صحیح مربوطه تبدیل خواهد گردید. این روند تا زمانی که قید مسأله ارضاء گردد، ادامه می‌یابد.

۳- نتایج

۳-۱- نتیجه شبیه‌سازی ورود آلودگی (پتاسیم سیانید) به شبکه توزیع آب

به منظور مقایسه عملکرد مدل توسعه یافته کیفیت منابع آب شبکه متأثر از تزریق پتاسیم سیانید در محیط EPANET-MSX، نتایج حاصل از مدل‌سازی این تحقیق با نتایج مطالعات Yang and Boccelli (2016) در شرایط تزریق و عدم تزریق آلودگی پتاسیم سیانید مورد مقایسه قرار گرفتند (شکل ۳). بر اساس داده‌های ارائه شده در مقاله، محل تزریق آلودگی گره شماره ۱۲۳، زمان شروع تزریق آلودگی ساعت ۱۰:۲۹، شدت جرمی تزریق آلاینده در شبکه ۲/۵ مول در دقیقه و مدت زمان تداوم تزریق ۴ ساعت در نظر گرفته شدند.

در شبکه تحت مطالعه، گره ۱۱۹ در پایین دست گره ۱۲۳ قرار گرفته و تقریباً ۱۵ دقیقه بعد از ورود آلودگی به شبکه، غلظت کلر در این گره شروع به کاهش می‌نماید و کاهش غلظت کلر تا تقریباً ۴ ساعت ادامه می‌یابد. در این مدت، مقدار غلظت کلر به شدت کاهش یافته و غلظت آن برای دقایقی به صفر می‌رسد. این کاهش ناگهانی در غلظت کلر، می‌تواند بیانگر یک رخداد مهم و مخرب در شبکه باشد.

۳-۲- ارزیابی تعداد حسگر و اثر آن بر مقادیر توابع هدف در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه

در این بخش از تعداد متفاوت ۱، ۳ و ۵ حسگر ثابت استفاده شده و اثر آنها بر مقادیر توابع هدف: ۱- کاهش زمان مورد انتظار تشخیص آلودگی، ۲- بیشینه‌سازی درست‌نمایی تشخیص و ۳- کاهش حجم آب مصرفی آلوده در مسأله تعیین جانمایی بهینه حسگرها، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کمتر از مقدار استاندارد) محاسبه می‌شود. متوسط میزان حجم آب مصرفی زمانی که غلظت کلر به مقدار کمتر از استاندارد برسد، از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه گردیده است (Murray et al., 2010).

$$VC = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^N q(x_i, t_j) \times \Delta t \quad \text{if } C_{cl}(x_i, t_j) < C_{standard}$$

$$Z_3 = \frac{1}{A} VC \quad (10)$$

در روابط فوق Z_3 ، برابر با متوسط حجم آب مصرفی (VC) زمانی که غلظت کلر کمتر از حد استاندارد باشد. T برابر است با تعداد گام‌های زمانی مورد مطالعه و N برابر است با تعداد گره‌های مصرف‌کننده. $q(x_i, t_j)$ میزان تقاضا گره i ام در گام زمانی t_j ام است. Δt برابر با گام زمانی است که در این مطالعه برابر با ۵ دقیقه می‌باشد. $C_{cl}(x_i, t_j)$ غلظت کلر در گره i ام در گام زمانی t_j ام است و $C_{standard}$ حداقل سطح استاندارد کلر در شبکه است که در این تحقیق برابر با ۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است. A کل تعداد رخدادهای بوده و تابع Z_3 می‌باید کمینه گردد. لازم به ذکر است در این کار تحقیقاتی فرض گردیده که بلافاصله پس از تشخیص آلودگی در شبکه، هیچ آبی از گره‌های مصرف در اختیار مصرف‌کننده قرار نخواهد گرفت.

۷-۲- الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات (PSO^{14}) الهام گرفته از پرواز همزمان پرندگان، شنای ماهیان و زندگی اجتماعی آنها می‌باشد که با استفاده از یک سری روابط ساده فرمول‌بندی شده است. این الگوریتم متشکل از یک سری ذره‌ها در فضای جستجو می‌باشد که با به‌روز کردن موقعیت ذره‌ها با توجه به میزان شایستگی آنها مجموعه را به سمت جواب بهینه هدایت می‌کند. این الگوریتم با تعدادی ذرات به صورت تصادفی شروع به کار می‌کند و برای یافتن جواب بهینه در فضای مسأله با به‌روز کردن موقعیت و سرعت ذره‌ها به جستجو می‌پردازد. هر ذره با دو مقدار x و v که به ترتیب موقعیت و سرعت ذره می‌باشند، نمایش داده می‌شوند. هر ذره، برای به‌روزرسانی موقعیت خود نیازمند داشتن اطلاعاتی شامل موقعیت کنونی، سرعت کنونی، فاصله از بهترین جوابی که ذره مورد نظر تا کنون به آن دست یافته ($pbest$)، و فاصله از بهترین جوابی که اجتماع ذرات به آن رسیده‌اند ($gbest$) می‌باشد (Kennedy and Eberhart, 1997).

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + C_1 \times rand \times (pbest_i - x_i^t) + \quad (11)$$

$$C_2 \times rand \times (gbest - x_i^t)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (12)$$

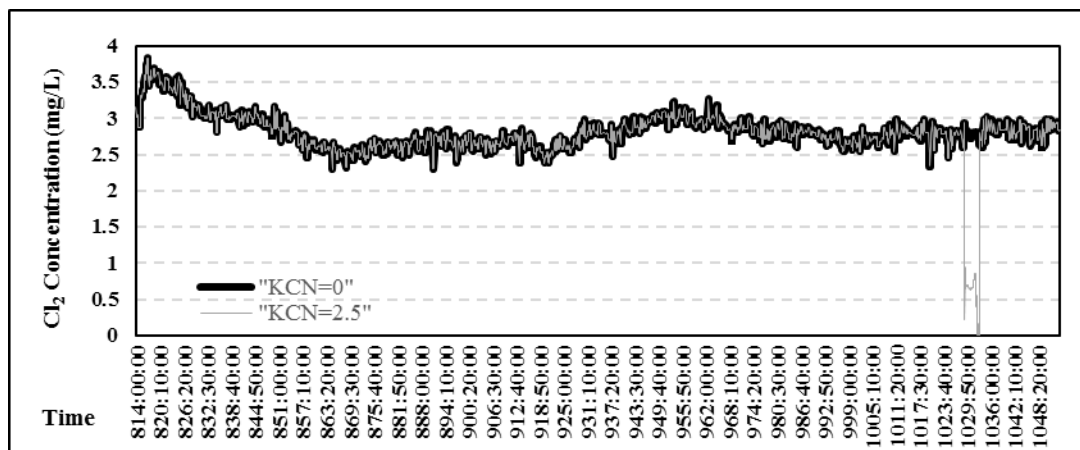


Fig. 3- Chlorine concentration at node 119 with and without KCN injection

شکل ۳- غلظت کلر در گره ۱۱۹ با و بدون تزریق پتاسیم سیانید

تشخیص به هنگام افزایش حسگرها از ۱ به ۳، تقریباً ۱۲ ساعت می‌باشد که کاهش قابل توجهی به نظر می‌رسد. با افزایش تعداد حسگرها به ۵ حسگر، کاهش زمان تقریباً ۷ ساعت می‌باشد که نسبت به حالت قبل ۵ ساعت کمتر است. علی‌رغم آنکه در هر دو حالت ۲ حسگر به شبکه اضافه می‌شود، اما تفاوت ۵ ساعته در کاهش زمان تشخیص مشاهده می‌شود. در رابطه با درست‌نمایی تشخیص، با افزایش از ۱ حسگر به ۳ حسگر افزایش ۲۵۰ موردی از رخ دادهای شناسایی شده (برابر با یک چهارم کل رخ دادها ۲۵٪) حاصل گردیده است.

نتایج به ترتیب در جداول ۳، ۴ و ۵ آورده شده‌اند. هم چنین روند تغییرات برای هر تابع هدف به ازای تعداد حسگرهای مورد استفاده در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. در این بخش از الگوریتم بهینه‌سازی تک‌هدفه ازدحام ذرات ارتباط یافته با EPANET-MSX برای حل مسائل استفاده گردیده است.

با افزایش تعداد حسگر، رخ دادهای آلودگی بیشتری شناسایی و متناسباً تعداد کمتری عدم تشخیص در شبکه ثبت خواهد گردید (تعداد عدد ۴۸ در محاسبه زمان تشخیص کاهش می‌یابد) که در کاهش زمان تشخیص آلودگی در شبکه مؤثر خواهد بود. با این حال کاهش زمان

Table 3- Sensor placement nodes based on TD reduction objective

جدول ۳- موقعیت حسگر مبتنی بر هدف کاهش زمان تشخیص آلودگی

| Number of Sensors | Placement Node | | | | | TD (hr) |
|-------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|---------|
| 5 | 241 | 177 | 143 | 197 | 203 | 17.41 |
| 3 | 177 | 241 | 143 | | | 24.78 |
| 1 | 241 | | | | | 36.22 |

Table 4- Sensor placement nodes based on DL increasing objective

جدول ۴- موقعیت حسگر مبتنی بر هدف افزایش درست‌نمایی تشخیص آلودگی

| Number of Sensors | Placement Node | | | | | DL (%) |
|-------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|--------|
| 5 | 231 | 203 | 177 | 197 | 143 | 68.6 |
| 3 | 197 | 231 | 143 | | | 53.8 |
| 1 | 231 | | | | | 28.8 |

Table 5- Sensor placement nodes based on reduction of VC

جدول ۵- موقعیت حسگر مبتنی بر هدف کاهش مصرف آب آلوده

| Number of Sensors | Placement Node | | | | | VC (g) |
|-------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|---------|
| 5 | 241 | 177 | 143 | 197 | 203 | 988.97 |
| 3 | 203 | 241 | 177 | | | 3168.3 |
| 1 | 203 | | | | | 8432.12 |

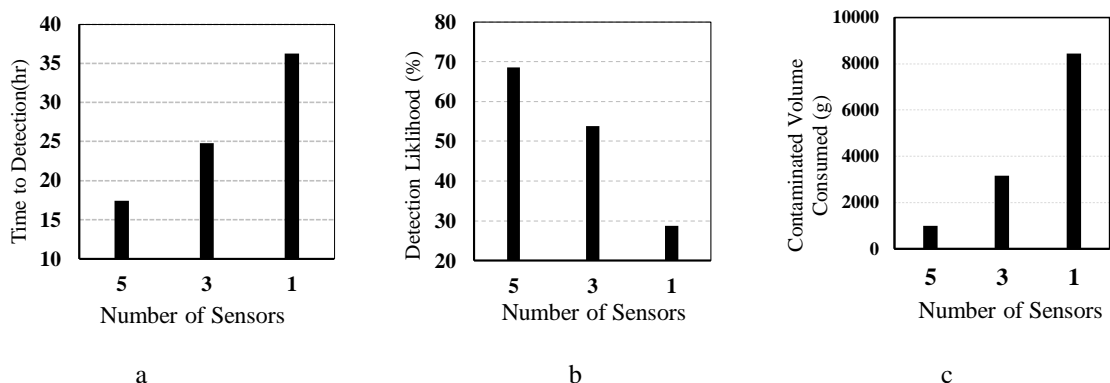


Fig. 4- The effects of sensor numbers on a) Pollutant TD b) Pollutant DL c) Pollutant VC
 شکل ۴- ارزیابی تعداد حسگر بر (a) زمان موردانتظار تشخیص (b) درست‌نمایی تشخیص و (c) حجم آب مصرفی آلوده

۱۷۷، ۱۴۳، ۱۹۷ و ۲۰۳) زمان تشخیص برابر با ۱۷/۴۱ ساعت است که نسبت به چیدمان سه حسگری، ۱۰ ساعت کمتر می‌باشد و می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که زمان تشخیص بر کاهش حجم آب آلوده مصرفی، اثر زیادی دارد. در شبکه مورد مطالعه این تحقیق، گره شماره ۲۰۳ که تقاضای به مراتب بیشتری نسبت به سایر گره‌های شبکه دارد (تقاضا این گره بیشتر از ۴۳۰۰ گالن بر دقیقه (۱۶/۲۵) مترمکعب بر دقیقه) می‌باشد، در موقعیت مکانی میانه شبکه قرار داشته و بر اساس نتایج رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی توسعه داده شده در این تحقیق، گره‌ای با ویژگی کاهش زمان تشخیص آلودگی بوده است. گره کناری (پایین‌دست) گره ۲۰۳، گره شماره ۲۰۱ می‌باشد. اگرچه جانمایی حسگر در این گره به زمان تشخیص کمتری در برخی سناریوها منجر می‌گردد، اما تعداد عدم تشخیص‌های بسیاری نیز در این گره ثبت گردیده‌اند. از این روی، الگوریتم بهینه‌سازی، گره ۲۰۱ را برای جانمایی بهینه حسگر در مسأله کاهش زمان تشخیص آلودگی انتخاب نخواهد نمود.

۳-۳- حل مسأله جانمایی بهینه حسگرها در شبکه توزیع آب در قالب مسأله دوهدفه

در این بخش مسأله جانمایی بهینه حسگرهای ثابت، با در نظر گرفتن دو هدف و با محدودیت استفاده از ۵ حسگر ثابت ارائه گردیده است. نتایج جانمایی بهینه موقعیت حسگرها و مقادیر تابع هدف در قالب اهداف دوگانه، در جداول ۶ و ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

حال با اضافه شدن دو حسگر دیگر به شبکه و رساندن تعداد آنها به ۵ حسگر، افزایش ۱۴۸ موردی رخداده (۱۴/۸٪ کل رخداده) نسبت به به‌کارگیری سه حسگر حاصل خواهد گردید. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، با افزایش تعداد حسگرهای پایش در شبکه، تعداد شکست در تشخیص رخدادهای آلودگی محدودتر می‌گردد، اما قاعدتاً شیب افزایش تشخیص رخدادهای آلودگی در هر مسأله‌ای بسته به ماهیت فیزیکی شبکه و سناریوهای تهدیدکننده آلودگی آن از نقطه‌ای به بعد، متفاوت خواهد گردید. در این مسأله نیز، روند افزایش درست‌نمایی تشخیص در تغییر تعداد حسگر از ۱ به ۳ به مراتب بیشتر از تغییر تعداد حسگر از ۳ به ۵ واحد است. در ادامه و در رابطه با حجم آب مصرفی، در شبکه مورد مطالعه این تحقیق بیشترین تقاضای آب در دو گره به شماره‌های ۲۰۳ و ۳۵ ثبت گردیده‌اند. با افزایش حسگرها به ۳ مورد، هر دو گره ۲۰۳ و ۳۵ تحت نظارت حسگرها قرار می‌گیرند (موقعیت ۲۰۳ و ۱۷۷). جانمایی حسگرها در این دو گره، حجم آب آلوده مصرفی را ۶۲ درصد کاهش می‌دهد (کاهش از ۸۴۳۲/۱۲ گالن به ۳۱۶۸/۳ گالن معادل ۳۱/۸۷ مترمکعب به ۱۱/۹۸ مترمکعب). با افزایش تعداد حسگرها به ۵ حسگر، علی‌رغم آنکه دو گره ۲۰۳ و ۳۵ باز هم تحت پوشش هستند (موقعیت ۲۰۳ و ۱۷۷)، کاهش حجم آب مصرفی قابل توجه و برابر با ۶۸ درصد می‌باشد (کاهش از ۳۱۶۸/۳ گالن به ۹۸۸/۹۷ گالن معادل ۱۱/۹۸ مترمکعب به ۳/۷۸ مترمکعب). مقایسه‌ای بین زمان تشخیص آلودگی در چیدمان ۳ حسگر و ۵ حسگر نشان می‌دهد که در چیدمان سه حسگری (گره‌های ۲۰۳، ۲۴۱، ۱۷۷) زمان تشخیص برابر با ۲۷/۷۵ ساعت است و در چیدمان ۵ حسگر (گره‌های ۲۴۱،

Table 6- Sensor node placement considering TD reductions and DL increasing objectives

| جدول ۶- موقعیت حسگر در اهداف کاهش زمان و افزایش درست‌نمایی تشخیص آلودگی | | | | | TD (hr) | DL (%) |
|---|-----|-----|-----|-----|---------|--------|
| Node Placement | | | | | | |
| 241 | 177 | 143 | 197 | 203 | 17.41 | 66.9 |
| 231 | 177 | 143 | 197 | 203 | 18.69 | 68.6 |

Table 7- Sensor node placement considering TD and VC reductions objectives
جدول ۷- موقعیت حسگر در اهداف کاهش زمان تشخیص و کاهش مصرف آب آلوده

| Node Placement | | | | | TD (hr) | VC(g) |
|----------------|-----|-----|-----|-----|---------|--------|
| 241 | 177 | 143 | 197 | 203 | 17.41 | 988.97 |

Table 8- Sensor node placement considering DL increasing and reduction of VC objectives
جدول ۸- موقعیت حسگر در اهداف افزایش درست‌نمایی تشخیص و کاهش مصرف آب آلوده

| Node Placement | | | | | VC (g) | DL (%) |
|----------------|-----|-----|-----|-----|--------|--------|
| 241 | 177 | 143 | 197 | 203 | 988.97 | 66.9 |
| 231 | 177 | 143 | 197 | 203 | 1980 | 68.6 |

بر دقیقه (۱۶/۲۵ و ۶/۰۴۸ مترمکعب بر دقیقه)). وجود حسگر در اطراف این دو گره برای شناسایی رخ داده‌های آلودگی که مسیر منتهی به این گره‌ها دارند، در کاهش حجم آب مصرفی آلوده مؤثر و بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر این، با فرض آنکه اگر آلودگی در شبکه تشخیص داده شود، بلافاصله مصرف آب در شبکه قطع می‌گردد، انتظار می‌رفت که کاهش حجم آب مصرفی به کاهش زمان تشخیص وابستگی داشته باشد. بر اساس جواب‌های بهینه مسأله جانمایی ۳ حسگر ثابت با لحاظ نمودن تنها یک هدف (جدول ۳ و جدول ۵)، برای تابع هدف کاهش زمان مورد انتظار تشخیص آلودگی، الگوریتم گره‌های ۲۱۴، ۱۷۷ و ۱۴۳ را به عنوان بهترین جواب ارائه و برای تابع کاهش هدف کاهش حجم آب مصرفی آلوده، چیدمان ۲۴۱، ۱۷۷ و ۲۰۳ انتخاب گردیده است. چیدمان ارائه شده در جدول ۷ تلفیقی از دو چیدمان ذکر شده است. گنجاندن گره ۱۹۷ در چیدمان فوق، همانند با مسأله جانمایی بهینه سه حسگر با هدف افزایش بیشینه درست‌نمایی تشخیص آلودگی است که می‌تواند به افزایش رخ داده‌های شناسایی نشده کمک و جواب بهینه را بهبود بخشد. در رابطه با دو هدف بیشینه‌سازی درست‌نمایی تشخیص و کاهش حجم آب مصرفی (جدول ۸)، تفاوت در این گزینه‌های غالب تنها در گره‌های شماره ۲۳۱ و ۲۴۱ می‌باشد. همان‌طور که قبلاً در رابطه با آن توضیح داده شد. جانمایی حسگر در گره ۲۴۱ منجر به کمترین زمان تشخیص آلودگی در شبکه و جانمایی حسگر در گره ۲۳۱، منجر به بیشترین تعداد تشخیص می‌گردد. این حالت سبب می‌شود تا برای کاهش حجم آب مصرفی، الگوریتم گره ۲۴۱ را انتخاب نماید که نشان دهنده اثر زمان تشخیص بر حجم آب آلوده مصرفی است. بر اساس مطالعات، با هدف افزایش درست‌نمایی تشخیص، انتخاب گره ۲۳۱ به عنوان موقعیت حسگر توسط الگوریتم صورت می‌پذیرد. جواب‌های به دست آمده دیگر نیز تماماً مغلوب این دو جواب گردیده و لذا پرتو حاصله تنها فقط شامل دو نقطه است.

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد برای هر دو هدف کاهش زمان تشخیص و افزایش درست‌نمایی تشخیص، چیدمان تقریباً مشابهی برای شبکه حسگر ارائه گردیده و تفاوت تنها در گره‌های شماره ۲۴۱ و ۲۳۱ می‌باشند. گره شماره ۲۴۱ گره‌ای است که اگر تنها یک حسگر ثابت، امکان قرارگیری در شبکه را داشته و تابع هدف هم کاهش زمان مورد انتظار تشخیص باشد، انتخاب خواهد گردید؛ چرا که زمان تشخیص کمتری از این گره نسبت به گره‌های دیگر حاصل خواهد گردید (۳۶/۲۱۸۸ ساعت). تعداد رخ داده‌هایی که توسط این گره شناسایی می‌شوند برابر با ۲۶۸ مورد می‌باشند. اما در طرف مقابل گره شماره ۲۳۱ بهترین جواب را در میان دیگر گره‌ها برای تابع هدف بیشینه کردن درست‌نمایی تشخیص دارد که برابر با تعداد ۲۸۸ مورد می‌باشد. زمان تشخیص این گره به تنهایی برابر با ۳۸/۶۲۷۲ ساعت می‌باشد. ترکیب دو گره ۲۳۱ و ۲۴۱ با هم دیگر تعداد ۳۰۸ رخداد آلودگی را شناسایی می‌کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که تعداد ۶۰ رخداد آلودگی در سیستم از ۳۰۸ رخداد تشخیص داده شده، یا توسط گره ۲۳۱ و یا توسط گره ۲۴۱ تشخیص داده می‌شوند. از این ۶۰ مورد، ۴۰ مورد را گره ۲۳۱ و ۲۰ مورد دیگر را گره ۲۴۱ تشخیص می‌دهد. اما آن چه که باعث می‌شود تا گره ۲۴۱ با تعداد تشخیص کمتری، زمان تشخیص کمتری هم داشته باشد آن است که، چنانچه رخدادی توسط این گره تشخیص داده شود که گره ۲۳۱ آن را تشخیص ندهد، آن رخداد در زمان بسیار کوتاهی (زیر ۱ ساعت) توسط این گره شناسایی می‌شود. ۲۰ رخداد قابل شناسایی توسط حسگر واقع در گره شماره ۲۴۱ و غیر قابل شناسایی توسط حسگر واقع در گره شماره ۲۳۱، از آلودگی‌هایی ناشی می‌گردند که از گره‌های نمایش داده شده در محدوده دایره‌ای شکل ۵، در شبکه تزریق می‌شوند.

در رابطه با دو هدف کاهش زمان مورد انتظار تشخیص و کاهش حجم آب آلوده مصرفی (جدول ۷)، گره‌های ۲۰۳ و ۳۵ بالاترین تقاضا را در شبکه به خود اختصاص داده‌اند (به ترتیب تقریباً) ۴۳۰۰ و ۱۶۰۰ گالن

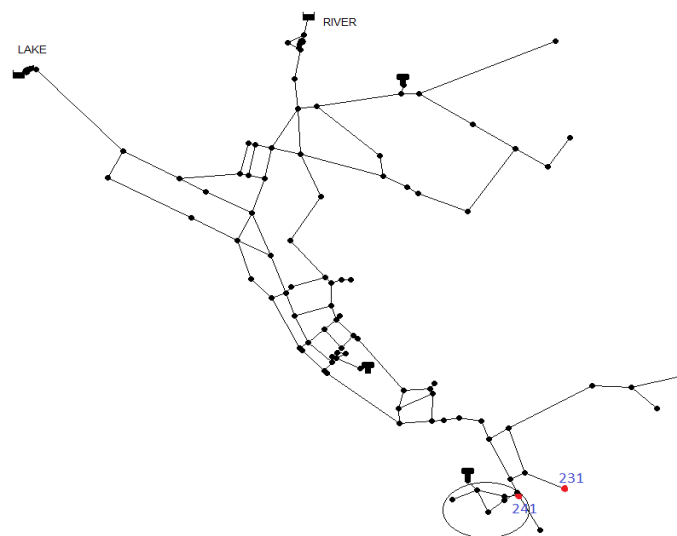


Fig. 5- Position of nodes 241 and 231 i the case study
شکل ۵- موقعیت گره‌های ۲۴۱ و ۲۳۱ در شبکه تحت مطالعه

۴- نتیجه گیری

می‌شود. البته باید در نظر داشت که محل قرارگیری گره‌هایی که تقاضای مصرف آب در آنها به نسبت گره‌های دیگر بیشتر است نیز، بر جانمایی بهینه حسگرها می‌تواند تأثیر به‌سزایی داشته و جواب را تحت تأثیر خود قرار دهد. علاوه بر این، نتایج مطالعات این تحقیق در رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر در نظر گرفتن توأم دو هدف، بیانگر رابطه مستقیم میان بیشینه درست‌نمایی تشخیص و کمینه کردن زمان مورد انتظار تشخیص آلودگی و نیز رابطه مستقیم میان بیشینه درست‌نمایی تشخیص و کمینه کردن حجم آب آلوده مصرفی است. کلیه پاسخ‌های ارائه شده از حل مسائل جانمایی بهینه حسگرها در شبکه توزیع آب در این تحقیق، با در نظر گرفتن یک هدف یا دو هدف، با لحاظ نمودن ۱۰۰۰ رخداد تصادفی مبتنی بر عدم قطعیت در محل و زمان تزریق آلودگی، شدت جرمی تزریق آلودگی و تداوم تزریق آلودگی استخراج گردیده‌اند.

با توجه به آنچه که در این تحقیق به آن اشاره شد، شبکه‌های توزیع آب به واسطه یک حمله عامدانه و یا یک رخداد تصادفی از ورود آلودگی، آسیب‌پذیر بوده که می‌تواند پیامدهای منفی اقتصادی و اجتماعی را به همراه داشته باشد. بررسی‌ها در این تحقیق نشان دادند که تغییرات غلظت کلر به هنگام ورود آلودگی (پتاسیم سیانید) می‌تواند کمک شایانی به جانمایی بهینه حسگرهای ثابت نماید. از آنجایی که حسگرهای مورد استفاده در شبکه‌های توزیع آب عمدتاً می‌توانند پارامترهای کیفی شاخص را اندازه‌گیری نمایند، می‌توان بیان کرد که طراحی شبکه حسگر بر اساس تغییرات غلظت پارامترهای متداول کیفی آب مثل کلر، pH، هدایت الکتریکی و غیره به هنگام ورود آلودگی، می‌تواند شرایط را به آنچه که در واقعیت رخ می‌دهد، نزدیک‌تر نماید. با این حال، استفاده از حسگرهایی که قابلیت اندازه‌گیری چندین پارامتر کیفی را دارند می‌باید لحاظ شود، چرا که آلودگی‌های متفاوت می‌توانند اثرات متفاوتی بر پارامترهای کیفی آب مختلف داشته باشند.

پیشنهادات تحقیقات آتی در مسائل جانمایی بهینه حسگرهای پایش کیفیت آب در شبکه توزیع شهری در قالب به‌کارگیری حسگرهای متحرک، منظور نمودن اثر واکنش آلاینده تزریقی با دیواره‌های لوله در شبکه، تزریق آلودگی از چند نقطه شبکه، لحاظ نمودن نقش ایستگاه‌های کلر زنی در شبکه، گستردگی ابعاد شبکه، تعیین تعداد بهینه حسگرها با توجه به توابع هدف متفاوت و با در نظر گرفتن بودجه در دسترس، شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه با تکنیک تحلیل مبتنی بر فشار و غیره، می‌توانند افق‌های تحقیقاتی نوینی پیش روی محققین این حوزه فراهم نماید.

در حل مسأله به صورت تک‌هدفه، در حالت کلی و با اهداف تعریف شده مدیریت شبکه توزیع آب، با افزایش تعداد حسگر توابع هدف به جواب‌های بهتری می‌رسند. در واقع با هر بار افزایش تعداد حسگر، امکان پیدایش رخدادهای بیشتر فراهم می‌شود که باعث بهبودی جواب‌ها می‌شوند. نتایج در این تحقیق نشان داده‌اند که توابع هدف کاهش زمان مورد انتظار تشخیص و کاهش حجم آب آلوده مصرفی با یکدیگر رابطه مستقیمی دارند. به این صورت که هرچه آلودگی در شبکه زودتر تشخیص داده شود، حجم آب آلوده کمتری مصرف

and localization in municipal water networks. *Environmental Modelling & Software* 80:306–321

Helbling DE, VanBriesen JM (2009) Modeling residual chlorine response to a microbial contamination event in drinking water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering* 135(10):918–927

ISIRI (1053) Drinking water- Physical and chemical specifications. 5th revision, Institute of Standards and Industrial Research of Iran (In Persian)

Kennedy J, Eberhart RC (1997) A discrete binary version of the particle swarm algorithm. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*. October 12-15, Orland, Florida, USA

Kumar A, Kansal ML, Arora G (1997) Identification of monitoring stations in water distribution system. *Journal of Environmental Engineering* 123(8):746–752

Lee BH, Deininger RA (1992) Optimal locations of monitoring stations in water distribution system. *Journal of Environmental Engineering* 118(1):4–16

Murray R, Haxton T, Janke R, Hart WE, Berry J, Phillips C (2010) Sensor network design for drinking water contamination warning systems: A compendium of research results and case studies using the TEVA-SPOT software. National Homeland Security Research Center, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, USA

Ostfeld A, 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

Ostfeld A, Salomons E (2005) Optimal early warning monitoring system layout for water networks security: inclusion of sensors sensitivities and response delays. *Civil Engineering and Environmental Systems* 22(3):151-169, DOI: 10.1080/10286600500308144

Preis A, Ostfeld A (2006) Multiobjective sensor design for water distribution systems security. 8th Annual Conference on Water Distribution Systems Analysis (WDSA), August 12-15, Cincinnati, Ohio, USA

Rathi S, Gupta R (2014) Sensor placement methods for contamination detection in water distribution networks: A review. *Procedia Engineering* 89:181-188

Rathi S, 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

پی نوشتها

- 1- Time to Detection
- 2- Volume of Water Consumed
- 3- Population Exposed
- 4- Extent of Contamination
- 5- Detection Likelihood
- 6- Sensor Response Time
- 7- Number of Failed Detection (Number or Percent of Incidents not Detected)
- 8- Probability of Failed Detection
- 9- Sensor Detection Redundancy
- 10- Contamination Source Detection Likelihood
- 11- Contaminated Mass Consumed
- 12- Demand Coverage
- 13- Potassium Cyanide
- 14- Particle Swarm Optimization

۶- مراجع

Ahuja S (2013) monitoring water quality, pollution assessment, and remediation to assure sustainability. 1st Edition, Elsevier B.V.

Austin RG, Choi CY, Preis A, Ostfeld A, Lansey K (2009) Multi-objective sensor placements with improved water quality models in a network with multiple junctions. *World Environmental and Water Resources Congress*, 17-21 May, Kansas City, Missouri, USA

Berry JW, Fleischer L, Hart WE, Phillips CA, Watson J-P (2005) Sensor placement in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 131(3):237–243

Comboul M, Ghanem R (2013) Value of information in the design of resilient water distribution sensor networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 139(4):449–455

Ehsani N, Afshar A (2010) Optimization of contaminant sensor placement in water distribution networks: multi-objective approach. 12th Annual Conference on Water Distribution Systems Analysis (WDSA), September 12-15, Tucson, Arizona, USA

Eliades DG, Kyriakou M, Polycarpou MM (2014) Sensor placement in water distribution systems using the S-PLACE Toolkit. *Procedia Engineering* 70:602–611

Fisher I, Kastl G, Sathasivan A (2011) Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water Research* 45(16):4896–4908

Gong W, Suresh MA, Smith L, Ostfeld A, Stoleru R, Rasekh A, Banks MK (2016) Mobile sensor networks for optimal leak and backflow detection

- Health Organization 1–541, Available at: <http://www.who.int/iris/handle/10665/254637>
- Woo H-M, Yoon J-H, Choi D-Y (2001) Optimal monitoring sites based on water quality and quantity in water distribution systems. World Environmental and Water Resources Congress, May 20-24, Orlando, Florida, USA
- Wu R (2014) Development of a mobile sensor for potable water quality monitoring. Ph.D. Thesis, Purdue University
- Yang X, Boccelli DL (2016) Dynamic water-quality simulation for contaminant intrusion events in distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142(10):4016038
- Zanjani S (2015) Investigation of widespread contamination of urban water distribution networks. M.Sc. Thesis, School of Civil Engineering, University of Tehran (In Persian)
- Sankary N, Ostfeld A (2018) Multiobjective optimization of inline mobile and fixed wireless sensor networks under conditions of demand uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management* 144(8), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000930](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000930)
- Schwartz R, Lahav O, and Ostfeld A (2014a) Integrated hydraulic and organophosphate pesticide injection simulations for enhancing event detection in water distribution systems. *Water Research* 63:271-284
- Schwartz R, Lahav O, Ostfeld A (2014b) Optimal sensor placement in water distribution systems for injection of chlorpyrifos. World Environmental and Water Resources Congress, June 1-5, Portland, Oregon, USA
- Shen H (2011) Optimal sensor location algorithm and contaminant source identification procedure in water distribution systems. Ph.D. Thesis, University of Guelph
- WHO (2017) Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating first addendum. World