نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۵، خرداد - تیر ۱۴۰۰، ص. ۳۵۶-۳۴۲

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 15, Jan.-Jul. 2021, p. 342-356

مقاله پژوهشی

# جانمایی بهینه سنسورها در شبکه توزیع آب با هدف شناسایی مشخصات منبع آلاینده در حداقل زمان تشخیص

سیروس حریف[۱]، غلامرضا عزیزیان[۲]، محمد گیوه‌چی[۳]، محسن دهقانی درمیان[۴*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۴

## چکیده

به‌منظور شناسایی آلودگی در سیستم‌های توزیع آب از سنسورهایی استفاده می‌شود که علاوه بر تشخیص آلودگی، اطلاعات مفیدی در جهت یافتن منبع آلاینده نیز ارائه می‌دهند. وجود این اطلاعات برای یافتن راهکار مناسب به‌منظور مدیریت کیفی شبکه توزیع سودمند است. هدف این پژوهش شناسایی مشخصات چهارگانه منبع آلاینده ورودی به سیستم به‌وسیله رویکردی شبیه‌ساز- بهینه‌ساز با ارائه جانمایی بهینه دو سنسور در شبکه EPANET Example 2 می‌باشد. مشخصات مدنظر این تحقیق شامل گره ورود آلاینده، مقدار غلظت، زمان و مدت ورود آلاینده به شبکه مذکور می‌باشد. نرم‌افزار EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان بهینه‌ساز در جهت رسیدن به اهداف مذکور با یکدیگر ادغام شدند. بدین منظور ابتدا تعداد ده آلودگی مختلف به‌صورت تصادفی تولید شدند سپس در ادامه به یافتن بهترین مکان برای نصب سنسورها در شبکه مذکور با هدف شناسایی مشخصات منبع آلودگی پرداخته شد. چهارده محل مختلف با احتمال تشخیص ۹۰ درصد مستعد قرارگیری سنسورها بودند لذا از بین مکان‌های مستعد، گره‌هایی که قادر به شناسایی آلودگی در کم‌ترین زمان ممکن بودند، انتخاب شدند. نتایج نشان داد که با نصب سنسورها در دو گره شماره ۱۵ و ۲۷ شبکه بنچ‌مارک، علاوه بر دست‌یابی به بیشترین احتمال تشخیص با مقدار ۹۰ درصد، کمترین زمان شناسایی آلودگی در شبکه به‌اندازه ۵۸ دقیقه نیز به ثبت رسید.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی شبکه آب، زمان تشخیص آلودگی، سنسور شناسایی آلاینده، مدل EPANET

## مقدمه

تقریباً ۷۱ درصد سطح کره زمین را آب فراگرفته است که تنها ۲/۵ درصد از این منابع حیاتی شیرین می‌باشد. همچنین، بخش قابل‌توجهی از آب شیرین سطح زمین در یخچال‌های طبیعی و مناطق دارای برف قرار دارند. لذا کمتر از یک درصد از کل آب‌های سیاره زمین را آب شیرین تشکیل می‌دهد و در دسترس تقریباً ۷ میلیارد انسان قرار دارد (Forest et al., 2013). سیستم‌های توزیع آب اجزای اصلی زیرساخت‌های عمومی برای انتقال آب آشامیدنی از منبع (مخازن، چاه‌ها، رودخانه‌ها و ...) به مصرف‌کنندگان می‌باشند. این سیستم از پمپ‌ها، لوله‌ها، مخازن و سایر عناصر تشکیل‌شده است. هدف سیستم‌های توزیع آب تأمین نیازهای آبی مصرف‌کنندگان چه به لحاظ کمی (دبی و فشار) و چه از منظر کیفی (خواص فیزیکی و شیمیایی آب) متناسب با استانداردهای موجود است (Basupi., 2013). کیفیت آب آشامیدنی تأمین‌شده توسط سیستم توزیع آب برای صاحبان صنایع آب، مقامات شهری و مصرف‌کنندگان عادی آب، از اهمیت زیادی برخوردار است (Rutkowski and Prokopiuk, 2018). آب آشامیدنی تمیز به دلیل اهمیت و کمبود آن، به‌عنوان طلای آبی قرن ۲۱ توصیف‌شده است. ازاین‌رو، ذخیره و توزیع آن برای رفاه جامعه اساسی است (Mekonnen and Hoekstra., 2016). امنیت کیفیت آب در سیستم‌های توزیع آب با سلامت مصرف‌کننده ارتباط نزدیک دارد؛ بنابراین، ایمنی سیستم‌های توزیع آب همیشه یک مسئله مهم برای جوامع بوده است. بااین‌حال،

۱- دانشجوی دکترای مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۱- دانشیار مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۳- استادیار بازنشسته مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۴- دکترای مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
(*-نویسنده مسئول: Email: mohsen.dehghani@pgs.usb.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.2.10.2

سیستم‌های توزیع آب در بسیاری از شهرهای جهان به دلیل جریان برگشتی (برگشت جریان آب آلوده از تأسیسات)، زیرساخت‌های قدیمی مانند خوردگی خط لوله، فشار کم، سیفون معکوس، نشت‌های ریز، کاهش و یا فقدان ماده گندزدا، ایجاد و رشد لایه زیستی (بیو فیلم) در جدار لوله‌ها و نفوذ خارجی آلاینده‌ها با تهدید آلودگی تصادفی یا عمدی در هنگام انتقال از تصفیه‌خانه به مصرف‌کنندگان مواجه هستند. به همین دلیل است که آلودگی آب در شبکه‌های توزیع با سهمی معادل ۲۹ درصد مهم‌ترین عامل شیوع بیماری‌های منتقله از راه آب دانسته شده است (Sun et al., 2019, Cristo et al., 2008, De Sanctis et al., 2010) آلودگی آب عبارت است از وجود یک یا چند ترکیب شیمیایی یا عوامل بیماری‌زا در آب به حدی که استفاده از آن برای مصرف‌کننده مخاطره‌آمیز باشد یا منجر به بیماری شود (Hammer., 2000, McGhee et al., 1991). خطر آلودگی تصادفی آب آشامیدنی موضوع جدیدی نیست؛ اما اخیراً نگرانی در مورد آلودگی عمدی شبکه‌های آب شهری، اقدامات حفاظتی جدیدی را طلب می‌نماید. سیستم‌های توزیع آب به دلیل پراکندگی و گستردگی مستعد ورود آلودگی به‌صورت تصادفی و عمدی می‌باشند. به‌طورکلی هر تهدید و خطری برای شبکه‌های آب شهری، به‌طور مستقیم بخشی از جامعه را مورد هدف قرار می‌دهد که از آن استفاده می‌کنند (عباسی و خامچین‌مقدم، ۱۳۹۷). طبق آمار سازمان جهانی بهداشت، سالانه ۱/۱ میلیارد نفر در جهان به منابع آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند (WHO., 2006). طبق گزارش‌های اعلام‌شده در سال ۲۰۱۷ سالانه ۴۸۵۰۰۰ کودک در اثر بیماری مرتبط با آب آلوده (اسهال) جان خود را از دست می‌دهند (WHO., 2017). هنگامی‌که یک رویداد در سیستم انتقال آب اتفاق می‌افتد، مانند آلودگی آب در مقیاس وسیع به‌صورت تصادف یا حمله مخرب، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر جامعه و اقتصاد داشته باشد. به‌طور مثال در سال ۲۰۱۴ در غرب ویرجینیا (ایالات‌متحده آمریکا)، ۳۰۰،۰۰۰ مصرف‌کننده زمانی که سیستم توزیع آب آشامیدنی به‌طور تصادفی با ماده خام شیمیایی MCHM (متیل سیکلوهگزانماتانول) آلوده‌شده بود، تحت تأثیر قرار گرفتند (Cooper., 2014). در سال ۲۰۱۴، بنزن از یک کارخانه شیمیایی در کشور چین به‌صورت تصادفی وارد شبکه آب شد (Chinadaily., 2014). اخیراً، در سال ۲۰۱۹ در نروژ (Askoy)، ۲۷،۰۰۰ مصرف‌کننده تحت تأثیر آب آلوده‌شده توسط ماده Clostridium قرار گرفتند (Qiu et al., 2020).

برای کاهش خطرات ناشی از چنین تهدیداتی برای مردم، باید اقدامات حفاظتی لازم صورت پذیرد. این اقدامات شامل سه گام اساسی است: قدم نخست بهبود امنیت فیزیکی سیستم (به‌عنوان‌مثال استفاده از نرده‌ها، محافظت، امنیت فیزیکی در تصفیه‌خانه‌ها و مخازن ذخیره‌سازی، استفاده از ابزارهای نظارتی و ...) گام دوم قرار دادن ایستگاه‌های کنترل کیفیت آب که شامل سنسورهای تشخیص آلودگی است که به‌سرعت اپراتورهای سیستم را از وجود آلودگی مطلع می‌کند. اگر بتوان همه گره‌های سیستم را با اطمینان کنترل کرد، حداکثر سطح ایمنی به دست می‌آید؛ اما متأسفانه، این امر به دلیل مسائل مالی غیرممکن بوده و برای مقابله با این محدودیت، روش‌های مختلفی برای طراحی ایستگاه‌های نظارتی ایجادشده است. اقدام نهایی مدیریت پیامد شامل تدوین برنامه‌های پاسخ با هدف مهار سریع، از بین بردن یا خنثی‌سازی آلودگی با استفاده از اقداماتی مانند بستن دریچه‌های جداسازی، شستشوی لوله‌های شبکه یا تزریق مواد ضدعفونی‌کننده می‌باشد (Preis and Ostfeld., 2007, Seth et al., 2016). پس از تشخیص وقوع آلودگی در شبکه که به‌وسیله سنسورهای موجود در ایستگاه‌های پایش صورت می‌گیرد، نوبت به تعیین محل یا محل‌های ورود آلاینده به شبکه‌های توزیع آب آشامیدنی می‌رسد. شناسایی مشخصات منبع آلودگی مستلزم محاسبه چهار پارامتر اصلی: محل ورود آلودگی به شبکه آب، زمان ورود آلاینده، مدت‌زمان ورود آلاینده و مقدار آلاینده ورودی به شبکه توزیع آب است. این اطلاعات به کمک مدل‌های جانبی و داده‌های به‌دست‌آمده از سنسورهای نظارتی نصب‌شده در ایستگاه‌های پایش شبکه آب به دست می‌آیند. این مسئله با توجه به پیامدهای قابل‌توجه و منفی آن بر جامعه، موردتوجه محققان قرارگرفته است (Adedoja et al., 2018). هوو و همکاران گزارش کردند که مسئله شناسایی منبع آلودگی در درجه اول به‌عنوان یک مسئله معکوس که پارامترهای ورودی ناشناخته را می‌توان از اطلاعات خروجی تقریباً شناخته‌شده به دست آورد، شناخته می‌شود (Hu et al., 2015). در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در رابطه با شناسایی مشخصات منبع آلودگی به‌منظور کاهش خطرات ناشی از ورود آلودگی به شبکه‌های آب صورت گرفته است. در ابتدا حل مسئله به‌صورت معکوس با مدل‌سازی میزان غلظت کلر بوده است. به این صورت که با اندازه‌گیری مقدار کلر باقی‌مانده در شبکه، سعی می‌شود تا مقدار کلر در محل تزریق محاسبه شود. به‌طور مثال ایسلام و همکاران یک مدل معکوس برای محاسبه غلظت کلر موردنیاز در منابع سیستم آب در شرایط جریان ناپایدار برای تأمین مقدار غلظتی مشخص در یک گره خاص در شبکه ارائه دادند (Islam et al., 1997). شانگ و همکاران یک مدل ورودی–خروجی را ارائه دادند. این مدل با استفاده از الگوریتم ردیابی ذرات اطلاعاتی در مورد روابط بین کیفیت آب در مکان‌های ورودی و خروجی با ردیابی ذرات آب و انتقال آن‌ها به‌طور هم‌زمان در طول مسیر، فراهم می‌کند (Shang et al., 2002). لایرد و همکاران از یک استراتژی برنامه‌ریزی غیرخطی برای حل مسئله معکوس با رویکرد شبیه‌سازی– بهینه‌سازی استفاده کردند. ایشان بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای به مدت ۲۴ ساعت را در نظر گرفتند و میزان آب مصرف‌شده در این بازه‌ها را مشخص کردند سپس یک شبکه با ابعاد متوسط را در نظر گرفتند و تعداد ۱۰۰ سنسور کیفی آب

را در این شبکه جانمایی کردند و طی فرآیند بهینه‌سازی توانستند محل ورود آلاینده به شبکه توزیع آب را تعیین کنند (Laird et al., 2005). کریستو و آنجلو، به شناسایی محل ورود آلودگی تصادفی در شبکه‌های توزیع آب پرداختند. در این پژوهش ابتدا یک ماتریس آلودگی تعریف‌شده سپس بر اساس این ماتریس گروهی از گره‌ها به‌عنوان گره‌های محتمل برای محل ورود آلاینده به شبکه، انتخاب شدند در ادامه از بین گره‌های محتمل به شناسایی گره منبع آلودگی پرداختند. نتایج نشان داد که هرچه تعداد اطلاعات به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های پایش در شبکه بیشتر باشد، احتمال شناسایی محل دقیق ورود آلاینده به شبکه بیشتر است (Cristo and Angelo., 2008). هوو و همکاران پیدا کردن محل ورود آلودگی را هدف قرار داده و برای حل مسئله از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی استفاده کردند. در پژوهش مذکور از EPANET برای شبیه‌سازی و از الگوریتم ژنتیک طاقچه‌ای موازی مبتنی بر کاهش نقشه (MR-PNGA) به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده‌شده است (Hu et al., 2015). آرپان ست و همکاران به مقایسه سه روش استفاده‌شده توسط محققان برای شناسایی مرجع آلودگی در شبکه‌های توزیع آب یعنی روش مبتنی بر احتمال بیزی، الگوریتم وضعیت آلاینده و روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی پرداختند. درنهایت پس از بیان نقاط قوت و ضعف هر یک از روش‌ها به این نتیجه رسیدند که روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی از بقیه موارد کارایی بیشتر و بهتری دارد (Seth et al., 2016). وانگ و شیو ژو با معرفی طرح بیزی متوالی به شناسایی منبع آلودگی در شبکه‌های آب در دو حالت مشخص بودن و مشخص نبودن نیاز گره‌های شبکه پرداخته و حالتی که سنسورها به‌صورت باینری (نرمال یا غیر نرمال) آلاینده را تعیین می‌کنند، بررسی نمودند. ایشان مدل ارائه‌شده را توسط داده‌های واقعی صحت‌سنجی نموده و درنهایت بیان کردند که مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است (Wang and Zhou et al., 2017). زئوسونگ و همکاران برای حل مسئله تعیین مشخصات منبع ورود آلودگی به شبکه‌های توزیع آب شرب، میزان تقاضای آب را غیرقطعی، ولی زمان شروع و مدت‌زمان ورود آلاینده به شبکه را معلوم فرض کرده و مکان و غلظت ورود آلودگی به شبکه را به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفتند. آن‌ها برای پیدا کردن منبع احتمالی آلودگی از مینیمم کردن، ماکزیمم مربع تفاضلات، بین غلظت شبیه‌سازی‌شده و غلظت واقعی استفاده کردند. برای شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار EPANET و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند (Xuesong et al., 2017). امین الاسلام خان و بیجیت کومار با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی – شبیه‌سازی با فرض مشخص بودن محل ورود آلاینده به شبکه، به تعیین غلظت آلاینده واردشده و همچنین زمان و مدت‌زمان ورود آلاینده به شبکه پرداختند. در این پژوهش از مدل عددی EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز و از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده کردند (Khan and Banik., 2017). روتکووسکی و پروکوپیوک با استفاده از یادگیری طبقه‌بندی شبکه عصبی بردار اندازه‌گیری ابتدا گره‌های محتمل برای ورود آلاینده را مشخص کردند سپس از بین گره‌های محتمل به شناسایی محل ورود آلودگی به شبکه آب پرداختند. در این پژوهش تعداد ده سنسور در شبکه موردبررسی نصب شد و با استفاده از اطلاعات این ده پایگاه به شناسایی محل ورود آلاینده پرداخته‌شده، نتایج این بررسی نشان داد که روش ارائه‌شده با دقت ۸۲/۲۹ درصد می‌تواند محل ورود آلاینده را تعیین کند. همچنین ایشان بیان کردند که دقت روش ارائه‌شده به تعداد سنسورهای نصب‌شده در شبکه بستگی دارد (Rutkowski and Prokopiuk., 2018). زئوسونگ و همکاران برخلاف مطالعات پیشین مسئله تعیین مشخصات منبع آلودگی را برای اولین بار به‌صورت دوهدفه در نظر گرفتند و از الگوریتم ژنتیک نیچینک به‌منظور تعیین مشخصات منبع آلودگی استفاده کردند، سپس مدل خود را بر روی دو شبکه توزیع پیاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل ارائه‌شده برای شبکه‌های توزیع با ابعاد کوچک مناسب است (Xuesong et al., 2019). لوکاگرباچیچ و همکاران با استفاده از الگوریتم مبتنی بر یادگیری ماشین به تعیین غلظت آلاینده ورودی به شبکه و همچنین زمان ورود و اتمام آلاینده با مشخص بودن محل ورود آلودگی به شبکه‌های آب پرداختند. مدل ارائه‌شده توسط دو شبکه با ابعاد کوچک و متوسط مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل استفاده‌شده با دقت مناسبی مشخصات منبع آلودگی را تعیین می‌کند (Luka et al., 2020).

مطالعات گسترده انجام‌شده در این عرصه نشان‌دهنده توجه روزافزون به افزایش امنیت و سطح حفاظت از شبکه‌های توزیع آب بخصوص در مقابل حملات تروریستی و جنایت‌کارانه و ارتقای کیفیت آب مصرفی توسط بشر در عرصه جهانی است؛ بنابراین ایجاد ایستگاه‌های پایش کیفیت آب به‌صورت آنلاین و مستمر در شبکه‌های توزیع به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت کیفی آب مصرفی و لزوم ایجاد و استفاده از مدل‌های جانبی برای تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های پایش، بیش‌ازپیش ضرورت خود را نشان می‌دهد. انجام مطالعات ادامه‌دار در این زمینه بیانگر این مطلب است که این موضوع به‌صورت کاملاً جدی در سطح بین‌المللی درحال‌توسعه است. البته تحقیقات در این زمینه با مشکلاتی روبه‌رو است ازجمله این مشکلات می‌توان به پیچیدگی مسئله، نبود اطلاعات کافی، پرهزینه بودن و از همه مهم‌تر استراتژیک بودن این تحقیقات و عدم انتشار اطلاعات کامل و نتایج این دست پژوهش‌ها اشاره نمود. در اکثر پژوهش‌های انجام‌شده در گذشته از روش‌های معکوس و برنامه‌ریزی خطی برای پیدا کردن منبع آلودگی استفاده‌شده است. لذا در این پژوهش از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای قرارگیری بهینه سنسورها در شبکه آب باهدف ماکزیمم کردن احتمال شناسایی منبع

آلودگی در کمترین زمان ممکن برای شناسایی آلودگی موجود در شبکه، استفاده‌شده است.

## مواد و روش‌ها

### نرم‌افزار EPANET

نرم‌افزار EPANET یک برنامه کامپیوتری می‌باشد که رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در شبکه‌های لوله تحت‌فشار و به‌صورت دوره زمانی گسترده شبیه‌سازی می‌کند. مدل EPANET جریان آب در لوله‌ها، فشار در گره‌ها، ارتفاع آب در تانک‌ها و غلظت مواد شیمیایی را در سراسر شبکه طی یک دوره شبیه‌سازی با چندین گام زمانی دنبال می‌کند. این نرم‌افزار به‌عنوان یک ابزار تحقیقاتی باهدف ارتقا درک محققین از حرکت و سرانجام آب در شبکه‌های توزیع آب، طراحی‌شده است. این برنامه می‌تواند برای کاربردهای مختلفی در تحلیل سیستم‌های توزیع آب مورداستفاده قرار گیرد (Rossman., 2000).

### معادله شبیه‌سازی کیفی آب در نرم‌افزار

انتقال مواد تشکیل‌دهنده کیفیت آب در امتداد لوله i ام توسط معادله انتقال کلاسیک زیر ارائه‌شده است:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \pm R(c_i) \qquad (۱)$$

این معادله شامل ترم‌های انتقال و واکنش می‌باشد. در این معادله $c_i$ غلظت آلاینده در لوله i ام در زمان t و مکان x برحسب میلی‌گرم بر لیتر است. مقدار $u_i$ سرعت جریان آب در لوله i ام برحسب متر بر ثانیه است. کمیت $R(c_i)$ مربوط به نرخ واکنش (دیواره و حجمی) است.

### الگوریتم ژنتیک

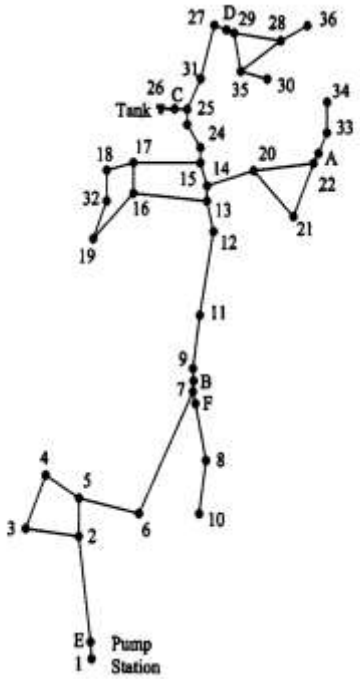
الگوریتم ژنتیک معروف‌ترین روش بهینه‌سازی مبتنی بر هوش دسته‌جمعی است و بر پایه تئوری تکامل داروین قرار دارد. این الگویتم نخستین بار توسط هالند در سال ۱۹۷۵ معرفی شد (Holland., 1975). سپس در سال ۱۹۸۹ گلدبرگ به معرفی کامل این روش پرداخت (Goldberg., 1989). این الگوریتم از اعضای خانواده مدل‌های محاسباتی که از روند تکامل الهام گرفته‌شده است می‌باشد. محاسبات تکاملی به‌صورت انتزاعی از مفاهیم اساسی تکامل طبیعی در جستجو برای یافتن راه‌حل بهینه برای مسائل مختلف بهره می‌گیرد (Mehri and Salmanmahini., 2017). این الگوریتم مبتنی بر تکرار است، در الگوریتم ژنتیک ابتدا جمعیتی از پاسخ‌ها یا افراد (کروموزوم‌ها) ایجاد می‌شود. هریک از افراد دارای خصوصیات منحصربه‌فردی است. این ویژگی‌ها با یک‌رشته دودویی (ژن) نشان داده می‌شود که روی «کروموزوم» ترکیب می‌شوند. هرکدام از ژن‌ها بیانگر مجهولات مسئله موردنظر هستند. ارزش هر کروموزوم در جمعیت با محدودیت‌ها و قیود مسئله مشخص می‌شود. هر فرد از جمعیت، در تابع برازندگی یا تابع هزینه ارزیابی می‌شود و هدف انتخاب بهترین افراد جمعیت است. در هر گام از الگوریتم افرادی به‌عنوان والدین از جمعیت انتخاب می‌شوند که از آن‌ها برای تولید فرزندان نسل بعد استفاده می‌شود. سپس با اجرای عملگر جهش روی کروموزوم‌ها و بازترکیب آن‌ها، نسلی جدید از «کروموزوم‌ها» ایجاد می‌شود که حداقل برخی از اعضای آن، نسبت به نسل قبلی، برازندگی بهتری دارند (Munroe et al., 2019).

### صحت‌سنجی و واسنجی

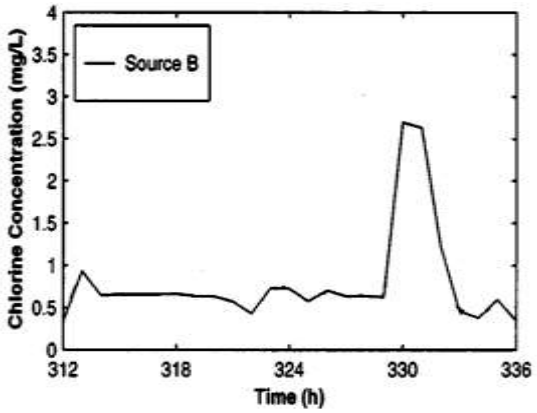
به‌منظور مقایسه و بررسی کد نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB از نتایج شبکه ارائه‌شده توسط موناوالی و کومار (۲۰۰۳)، استفاده شد. تصویری از این مدل آزمایشگاهی در شکل ۱، نشان داده‌شده است. این مدل شامل ۳۴ گره مصرف‌کننده، شش گره تقویت‌کننده (بوستر) (A تا F)، یک گره به‌عنوان منبع، ۴۷ لوله و یک مخزن است که به بررسی غلظت کلر در شبکه می‌پردازد. مدل آزمایشگاهی کومار و همکاران توسط نرم‌افزار EPANET شبیه‌سازی شد و سپس توسط MATLAB مدل‌سازی شد، شرایط مرزی و اولیه مطابق با مدل موناوالی و کومار (۲۰۰۳) به مدل کد نویسی شده در MATLAB اعمال شد (Munavalli and Kumar., 2003). شکل ۲، نتایج ارائه‌شده (غلظت کلر باقی‌مانده) توسط موناوالی و کومار و نرم‌افزار MATLAB را برای دو گره B و E نشان می‌دهد (Munavalli and Kumar 2003). با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که مدل نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB به‌خوبی و با دقت بسیار بالا به نتایج ارائه‌شده توسط موناوالی و کومار رسیده است؛ که این بیانگر کارایی و دقت بالای این مدل برای مدل‌سازی کیفی در شبکه‌های آب می‌باشد.

### مشخصات شبکه

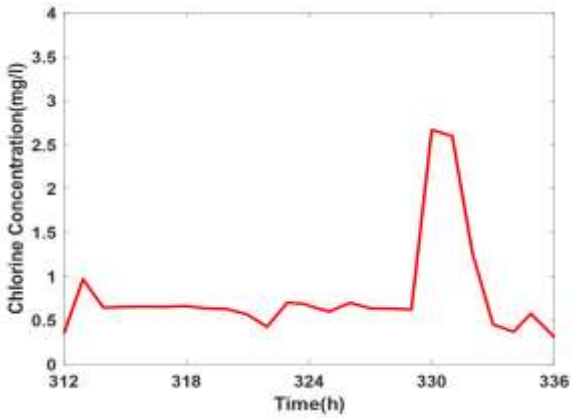
شبکه مورداستفاده در این تحقیق، مثال ۲ نرم‌افزار EPANET می‌باشد. این شبکه شامل ۳۶ گره (مصرف‌کننده و داخلی)، ۴۰ لوله اتصال بین گره‌ها، یک ایستگاه پمپاژ آب و یک مخزن ذخیره می‌باشد. شکل ۳، نمایی از این شبکه را نشان می‌دهد (Rossman, 2000).



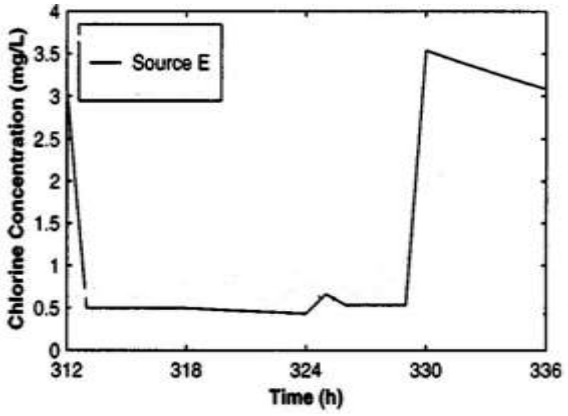

**شکل ۱- مدل آزمایشگاهی موناوالی و کومار (Munavalli and Kumar, 2003).**



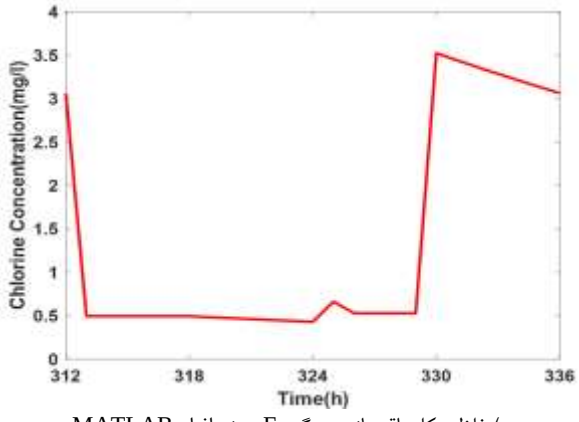

الف) غلظت کلر باقی‌مانده در گره B




ب) غلظت کلر باقی‌مانده در گره B در نرم‌افزار MATLAB

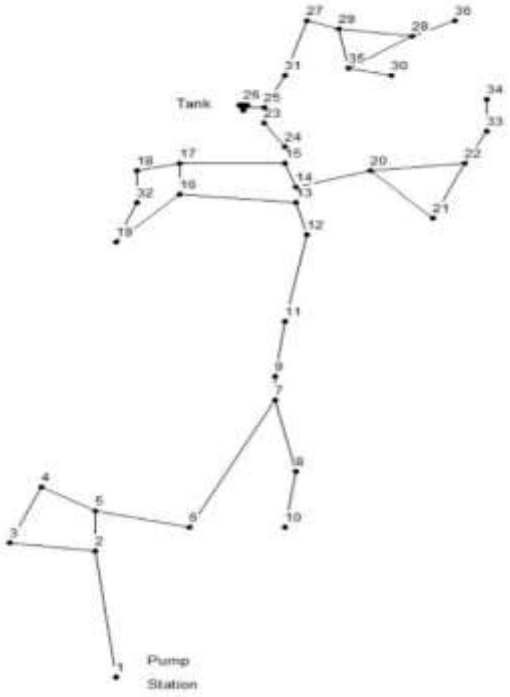



ج) غلظت کلر باقی‌مانده در گره E




د) غلظت کلر باقی‌مانده در گره E در نرم‌افزار MATLAB

**شکل ۲- نتایج ارائه‌شده برای دو گره B و E توسط مدل توسعه‌یافته در نرم‌افزار MATLAB و موناوالی و کومار (۲۰۰۳)**




**شکل ۳- شبکه مورداستفاده در پژوهش (Rossman. 2000)**

## ساختار مسئله

روش جستجو برای یافتن طرح بهینه سنسورها که احتمال شناسایی منبع آلودگی را به حداکثر می‌رساند، شامل سه گام اصلی می‌باشد؛ گام اول دارای مراحل زیر است:

### ایجاد یک مجموعه (ماتریس) آلودگی تزریق‌شده به شبکه

در مرحله نخست یک مجموعه از رویدادهای آلودگی‌های محتمل (ماتریس آلودگی) به تصادف انتخاب می‌شوند که این آلودگی‌ها دارای شرایط ذیل هستند:

الف) امکان نفوذ آلودگی به شبکه از تمامی گره‌ها (به‌جز گره‌های قرارگرفته در انتهای شبکه) وجود دارد.

ب) زمان شروع نفوذ آلودگی به شبکه در هر ساعت از شروع دوره شبیه‌سازی (ساعت ۰۰:۰۰) تا پایان زمان شبیه‌سازی (ساعت ۲۴) می‌باشد.

ت) مقدار آلاینده واردشده به شبکه در بازه بین ۱۰ تا ۱۰۰ گرم بر دقیقه قرار دارد.

ث) مدت‌زمان تزریق آلودگی به شبکه از بازه بین ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه انتخاب می‌شود.

در این پژوهش یک مجموعه از آلودگی‌ها که شامل ده آلودگی می‌باشد به تصادف مطابق با چهار شرط بالا انتخاب شدند. ویژگی‌های این ده آلودگی در جدول ۱، بیان‌شده است. حال از این ماتریس آلودگی موجود جهت طراحی بهینه قرارگیری سنسورها در شبکه بنچمارک، استفاده می‌شود. به‌عبارتی‌دیگر این ده آلودگی به‌عنوان آلودگی‌های مرجع که باید تمامی مشخصاتشان (شماره گره نفوذ، ساعت شروع نفوذ آلودگی به شبکه، مدت‌زمان تزریق آلاینده به شبکه و مقدار جرم آلاینده واردشده به شبکه) توسط سنسورها تعیین شود، مورداستفاده قرار می‌گیرند.

### تقسیم شبکه آب به مناطق نفوذ

در این مرحله شبکه توزیع آب انتخابی بر اساس پیکربندی و هیدرولیک شبکه به مناطق نفوذ تقسیم‌بندی می‌شود. شکل ۴، مناطق نفوذ برای شبکه موردمطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه به پنج ناحیه مجزا تقسیم‌شده است.

### محاسبه تعداد کل ترکیبات ممکن

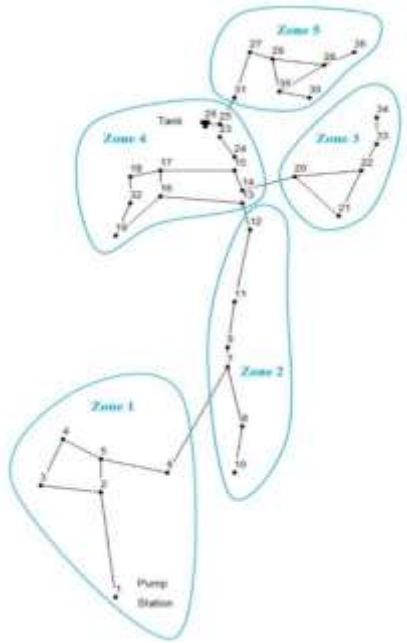
تعداد کل ترکیبات احتمالی قرار دادن تعداد حسگر مشخص در مناطق نفوذ توسط معادله ذیل محاسبه می‌شود.

$$\text{تعداد ترکیبات ممکن} = \frac{(\text{تعداد مناطق تقسیم} + \text{تعداد سنسور ها} - 1)!}{(\text{تعداد سنسورها})! * (\text{تعداد مناطق تقسیم} - 1)!} \quad (۲)$$

در این پژوهش تعداد دو سنسور انتخاب‌شده‌اند تا در مناطق نفوذ شبکه قرار گیرند لذا تعداد کل حالات احتمالی قرارگیری دو سنسور در پنج ناحیه نفوذ شبکه مطابق با رابطه ۲، برابر با پانزده می‌باشد؛ که این پانزده مورد در جدول ۲، ستون‌های ۱ تا ۳، مشاهده می‌شود (به‌طور مثال ترکیب منطقه ۲ با منطقه ۴).

جدول ۱- مشخصات آلودگی‌های انتخاب‌شده برای ماتریس آلودگی

| شماره آلودگی | گره تزریق | مقدار آلاینده (gr/min) | زمان شروع تزریق | بازه زمانی تزریق (min) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۴ | ۳۵ | ۰۳:۴۷ | ۱۱۲ |
| ۲ | ۱۳ | ۸۰/۴۶ | ۱۲:۰۲ | ۹۰ |
| ۳ | ۳۰ | ۷۲/۴۴ | ۱۰:۲۲ | ۱۴۳ |
| ۴ | ۱۵ | ۸۵/۸۹ | ۱۵:۰۰ | ۱۵۶ |
| ۵ | ۱۸ | ۹۳ | ۱۹:۲۹ | ۷۸ |
| ۶ | ۲۶ | ۷۹/۳۹ | ۱۱:۳۹ | ۱۱۳ |
| ۷ | ۳۶ | ۱۳/۸۴ | ۲۱:۲۸ | ۱۷۷ |
| ۸ | ۱۲ | ۴۴/۰۴ | ۰۳:۱۸ | ۱۱۲ |
| ۹ | ۹ | ۷۳/۳۹ | ۰۹:۲۱ | ۷۹ |
| ۱۰ | ۲۳ | ۷۵/۶۶ | ۲۲:۱۵ | ۳۷ |




شکل ٤- تقسیم شبکه به مناطق نفوذ

## ٤- محاسبه احتمال شناسایی منبع آلودگی هر ترکیب

در این گام توانایی هرکدام از پانزده حالت ممکن قرارگیری سنسورها که در مرحله سوم بیان شدند، در شناسایی مشخصات آلودگی‌های مرجع ایجادشده، با کمک اتصال نرم‌افزار EPANET و الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (ستون هفتم جدول ۲) و در ادامه احتمال شناسایی منابع آلودگی برای هر ترکیب محاسبه می‌شود. (نسبت تعداد منابع آلودگی شناسایی‌شده به تعداد کل رویدادهای ماتریس آلودگی مرجع). قابل‌ذکر است که به‌منظور تخمین قابل‌اعتمادتر از احتمال شناسایی منبع آلودگی هرکدام از ترکیبات موجود در جدول ۲، چهار مرتبه مورد ارزیابی قرار گرفتند. به این صورت که هر ترکیب شامل چهار حالت قرارگیری متفاوت از سنسورها می‌باشد که این چهار حالت متفاوت به تصادف انتخاب‌شده‌اند (ستون‌های چهارم تا ششم جدول ۲). (مثلاً برای ترکیب شماره پنج، جدول ۲، یعنی قرارگیری سنسور در مناطق یک و پنج، منطقه یک شامل شش و منطقه پنج شامل هفت گره است یعنی تعداد چهل‌ودو حالت مختلف از ترکیب سنسورها وجود دارد حال از بین این چهل‌ودو حالت مختلف، چهار حالت به تصادف انتخاب‌شده‌اند). قابل‌ذکر است با توجه به اینکه تعداد گره‌های منطقه چهار از بقیه مناطق بیشتر است ترکیباتی که شامل منطقه چهار می‌شوند، پنج حالت به تصادف انتخاب‌شده‌اند. در انتها میانگین این چهار حالت مختلف محاسبه‌شده (ستون ۸) و به‌عنوان احتمال شناسایی منبع آلودگی ذکر می‌شود؛ اما برای تخمین دقیق در

صورتیکه انحراف معیار (ستون ۹) این ترکیبات کم باشد، می‌توان به این مقدار میانگین اعتماد کرد. در این پژوهش حداکثر مقدار انحراف معیار ۰/۲ در نظر گرفته‌شده است و چنانچه برای ترکیبی مقدار انحراف معیار بیشتر از این مقدار باشد بیانگر این است که تقسیم‌بندی شبکه در مرحله دوم به‌درستی انجام‌نشده است و باید تعداد مناطق را افزایش داد.

همان‌طور که گفته شد برای ارزیابی توانایی هرکدام از ترکیبات مختلف در شناسایی منبع آلودگی از ترکیب الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک با مدل عددی EPANET استفاده می‌شود. مراحل الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی به‌صورت ذیل است:

**ایجاد جمعیت اولیه**: در ابتدا یک جمعیت اولیه به تعداد ۵۰ عضو به‌صورت تصادفی توسط الگوریتم ایجاد می‌شود که هر کروموزوم شامل چهار متغیر تصمیم (ژن): گره ورود آلودگی، زمان شروع تزریق آلاینده، مدت‌زمان تزریق آلاینده به شبکه و مقدار (جرم) آلاینده واردشده به شبکه می‌باشد.

**محاسبه تابع هدف:** در این مرحله تابع هدف (هزینه) برای هریک از کروموزوم‌ها مطابق فرمول ذیل محاسبه می‌شود:

$$F=\sum_{i=1}^{n}\{\sum_{t=t_d}^{T}\left[C(measured)_{i,t}-C(computed)_{i,t}\right]^2\} \qquad (۳)$$

تابع هزینه بیانگر حداقل مربعات محاسبه‌شده بین مقادیر غلظت برای هرکدام از رویدادهای ماتریس آلودگی مرجع با مقدار غلظت محاسبه‌شده توسط مدل عددی EPANET برای هر کروموزوم در گره مربوط به محل قرارگیری سنسور می‌باشد. در این فرمول n تعداد ایستگاه‌های نظارت (در این پژوهش دو ایستگاه)، T بیانگر کل زمان ثبت اطلاعات در ایستگاه‌های نظارت از زمان شناسایی آلودگی موجود در شبکه ($t_d$) تا زمان واکنش سیستم به وجود آلودگی ($T=t_d+30$)، برحسب دقیقه می‌باشد. $C(measured)_{i,t}$ و $C(computed)_{i,t}$ به ترتیب بیانگر غلظت اندازه‌گیری شده (غلظت در آلودگی مرجع) و محاسبه‌شده (شبیه‌سازی‌شده توسط مدل EPANET)، برحسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشند.

همان‌طور که در قسمت مقدمه بیان شد مرحله سوم جلوگیری از خطرات ناشی از وجود آلودگی در شبکه، مدیریت پیامد بود یعنی بعد از آگاهی از وجود آلودگی در شبکه برای حفظ سلامت عموم جامعه باید بهترین تدابیر جهت مقابله با آلودگی انجام گیرد. بسته پروتکل واکنشی اداره حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده، توصیه‌هایی جهت کمینه کردن خطرات ناشی از این تهدیدات ارائه نموده است. این توصیه‌ها شامل: ۱- ایزوله کردن ناحیه آلوده‌شده در شبکه، ۲- اعلام‌خطر و اطلاع‌رسانی به مردم، ۳- تخلیه آلودگی از شبکه و ۴- ترکیبی از موارد گفته‌شده می‌باشند (USEPA). در این پژوهش پیش‌بینی می‌شود که پس از تشخیص آلودگی سیستم شبکه آب واکنش نشان داده و یکی از توصیه‌های مذکور انجام گیرد که یا سیستم بسته می‌شود و یا عملکرد آن تغییر می‌کند. به فاصله زمانی از تایم تشخیص آلودگی ($t_d$) تا زمان واکنش نشان دادن سیستم، زمان پاسخ سیستم گفته می‌شود. زمان پاسخ سیستم بسته به نوع سیستم و همچنین شدت آلودگی واردشده به شبکه آب، برنامه‌ریزی‌های انجام‌گرفته برای سیستم و ... متفاوت می‌باشد و در این بازه زمانی ایستگاه‌های نظارت اطلاعات مربوط به آلودگی شناسایی‌شده در شبکه را جمع‌آوری و ذخیره می‌کنند. در این پژوهش بازه زمانی ۳۰ دقیقه برای زمان پاسخ سیستم در نظر گرفته‌شده است ($T=t_d+30$) و همچنین ایستگاه‌های نظارت در بازه‌های زمانی یک‌دقیقه‌ای اطلاعات مربوط به آلودگی را ثبت می‌کنند.

**ایجاد جمعیت جدید:** در این مرحله تعدادی از اعضای جمعیت برای انجام عملیات تولید فرزند (Crossover) جدید و جهش (Mutation) انتخاب می‌شوند و پس‌ازآن جمعیت جدید تولید می‌شود. در این پژوهش نرخ Crossover و Mutation به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۱ در نظر گرفته‌شده است.

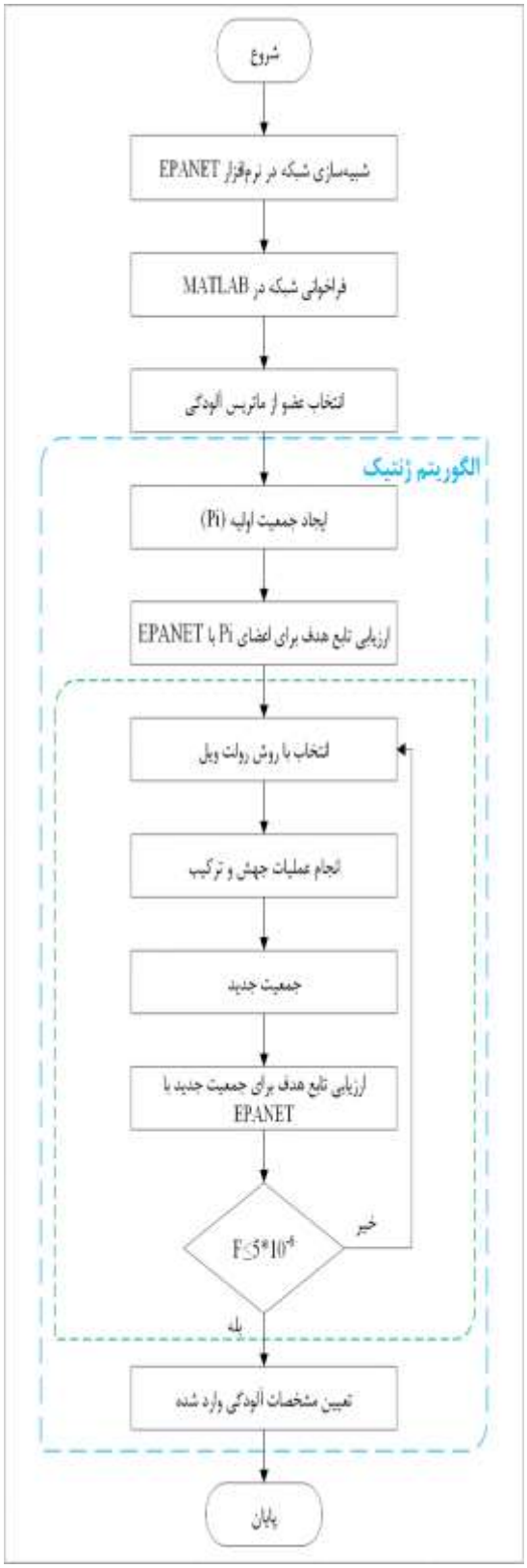
**شرایط خاتمه:** پس از ایجاد جمعیت جدید تابع هدف مطابق فرمول مرحله ۴-۲، برای جمعیت جدید ارزیابی می‌شود و چنانچه مقدار تابع هدف یکی از اعضای جمعیت شرط توقف را داشته باشد الگوریتم خاتمه می‌یابد در غیر این صورت مراحل ۴-۳ و ۴-۴ آن قد تکرار می‌شوند تا به‌شرط خاتمه برسند. در این پژوهش شرط توقف مقدار تابع هدف کمتر از $5*10^{-6}$ در نظر گرفته‌شده است. شکل ۵، فلوچارت مربوط به اتصال نرم‌افزار EPANET و الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک تک‌هدفه جهت شناسایی مشخصات منبع آلودگی واردشده به شبکه موردبررسی را نشان می‌دهد.

**گام دوم:**

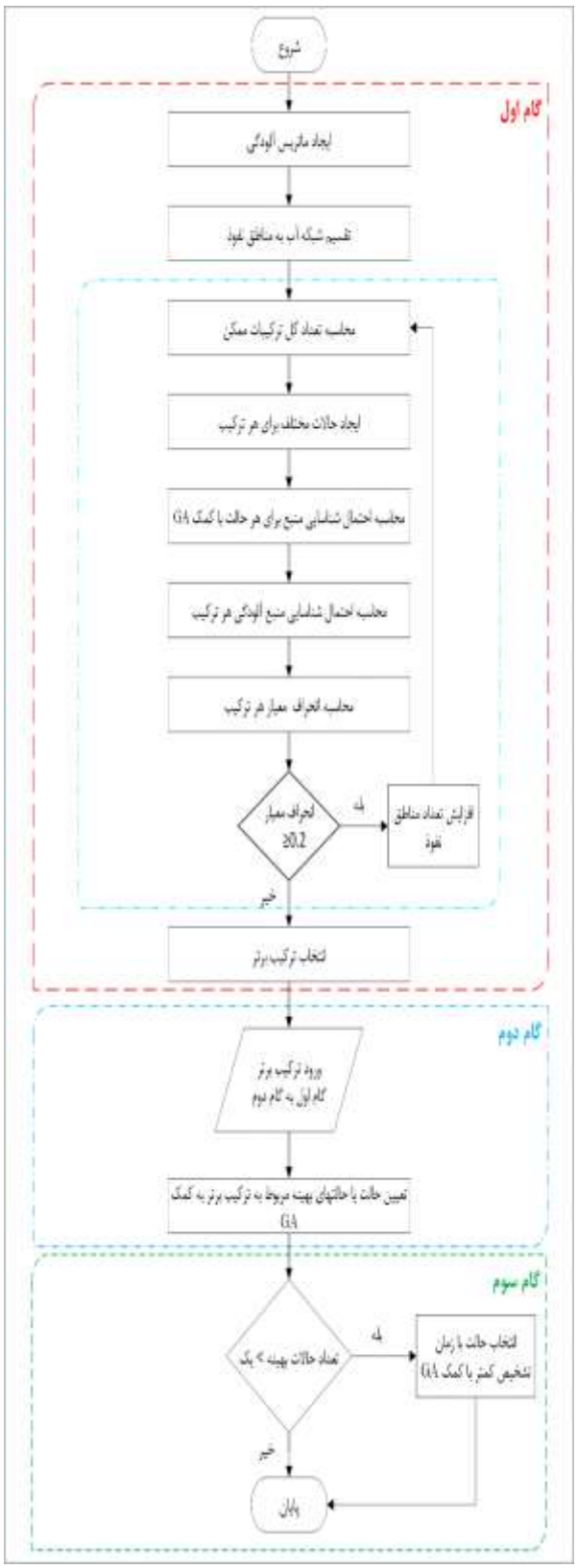
پس از تعیین احتمال شناسایی مشخصات منبع آلودگی واردشده به شبکه توزیع آب در گام اول، ترکیبی که دارای مقدار احتمال شناسایی منبع آلودگی بیشتری از بقیه است انتخاب می‌شود و حال از بین تمامی گره‌های موجود در این ترکیب، حالتی که دارای احتمال تشخیص منبع آلودگی بیشتری است انتخاب می‌شود که برای این کار از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک تک هدفه استفاده می‌کنیم و ترکیب بهینه را انتخاب می‌کنیم.

**گام سوم:**

پس از تعیین مکان‌هایی با احتمال بیشترین درصد تشخیص مشخصات منبع آلاینده واردشده به شبکه در گام دوم، چنانچه مکان‌هایی در شبکه وجود داشته باشند که دارای بیشترین درصد تشخیص یکسان باشند؛ محل‌هایی که وجود آلودگی در شبکه را در مدت‌زمان کمتری تشخیص می‌دهند، به‌عنوان محل نهایی نصب سنسور در شبکه انتخاب می‌شوند.




**شکل ۵- فلوچارت مربوط به اتصال نرم‌افزار EPANET و الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک تک‌هدفه**




**شکل ٦- فلوچارت گام‌های اول تا سوم تعیین محل بهینه قرارگیری سنسورها در شبکه آب**

جهت انتخاب گره‌هایی که دارای زمان تشخیص کمتری هستند از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک با در نظر گرفتن تابع ذیل به‌عنوان تابع هدف استفاده می‌شود:

$$t_d = \min t_i \qquad (۴)$$

در این فرمول $t_i$، زمان شناسایی آلودگی در شبکه توزیع توسط سنسور i ام می‌باشد و $t_d$ معادل کمترین زمان تشخیص آلودگی توسط سنسورهای موجود در شبکه است. برای محاسبه تابع هدف داریم:

$$f_2 = E(t_d) = \sum_{i=1}^{n} t_{d_i} P(t_{d_i}) \qquad (۵)$$

$E(t_d)$ امید ریاضی مربوط به زمان تشخیص آلودگی در سیستم می‌باشد با محاسبه فرمول ۵، زمان شناسایی آلودگی‌های موجود در ماتریس آلودگی به دست می‌آید و تابع هدف موردنظر باید دارای کمترین مقدار باشد تا به ترکیب بهینه سنسورها دست‌یابیم. شکل ۶، فلوچارت مربوط به مراحل گام‌های اول تا سوم جهت تعیین محل بهینه قرارگیری سنسورها را نشان می‌دهد.

## نتایج و بحث

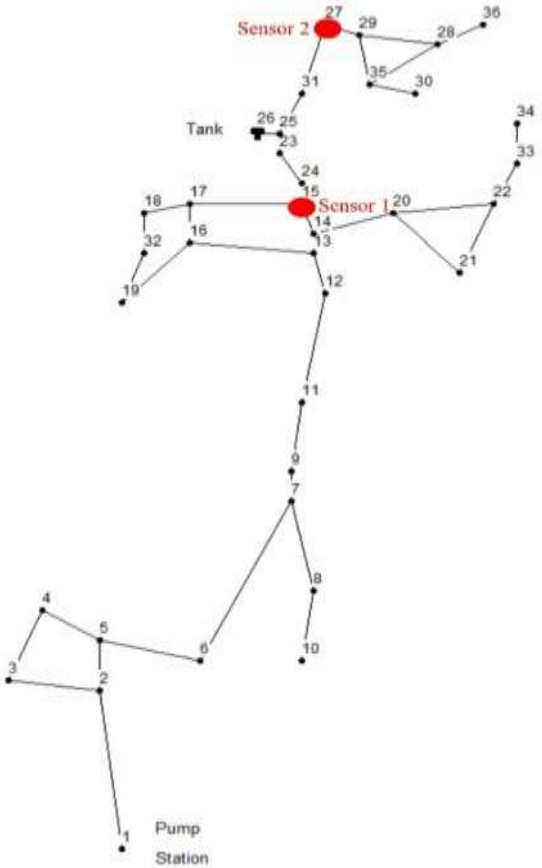
همان‌طور که در قسمت ساختار مسئله توضیح داده شد مراحل مربوط به گام اول برای شبکه موردنظر پیاده‌سازی شد و نتایج مربوطه در جدول ۲، بیان‌شده است. مطابق با این جدول تمامی پانزده ترکیب دارای انحراف معیار کمتر از ۰/۲ بوده و این بدین معنا است که تقسیم‌بندی شبکه به نواحی جداگانه به‌درستی انجام‌گرفته است. مطابق جدول ۲، ترکیبات شماره چهارده و پانزده بیانگر بیشترین مقدار احتمال تشخیص مشخصات منبع آلودگی واردشده به شبکه در بین پانزده ترکیب مختلف می‌باشند. این دو ترکیب به ترتیب دارای احتمال تشخیص ۸۲ و ۷۷/۵ درصد می‌باشند و مقدار انحراف معیار این دو ترکیب برابر با ۰/۰۸ و ۰/۰۵ می‌باشند لذا ترکیب شماره چهارده که احتمال تشخیص بیشتری از بقیه دارد انتخاب‌شده و عملیات مربوط به گام دوم پیاده‌سازی شده است. ترکیب چهارده شامل دو ناحیه‌ی چهار و پنج می‌باشد. مطابق شکل ۴، تعداد گره‌های موجود در ناحیه چهار، برابر با یازده گره و گره‌های موجود در ناحیه پنج برابر با هفت گره می‌باشند لذا تعداد کل حالات ممکن برای این ترکیب برابر با ۷۷=۱۱*۷ می‌باشد. از بین این ۷۷ مورد ممکن با کمک الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک تک‌هدفه حالت بهینه (حالتی که دارای بیشترین احتمال تشخیص منبع آلودگی می‌باشد) انتخاب شد. نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک نشان داد که تعداد چهارده ترکیب دارای بیشترین احتمال تشخیص (۹۰ درصد) بوده و مستعد قرارگیری سنسور بودند. لذا برای انتخاب مناسب‌تر از بین حالاتی که دارای احتمال تشخیص ۹۰ درصد بودند آن نقاطی که دارای زمان تشخیص کمتری نسبت به بقیه بودند با کمک الگوریتم ژنتیک انتخاب شدند. مطابق با گام سوم بیان‌شده در قسمت ساختار مسئله با اجرای الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن رابطه ۵، به‌عنوان تابع هدف مربوطه (مینیمم کردن زمان تشخیص) دو گره ۱۵ و ۲۷ دارای بیشترین مقدار احتمال تشخیص برابر ۹۰ درصد و همچنین کمترین زمان تشخیص وجود آلودگی در شبکه برابر ۵۸ دقیقه به دست آمد. درنهایت با توجه به نتایج مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز پیشنهادی این پژوهش، دو گره مذکور به‌عنوان محل بهینه قرارگیری سنسورها در شبکه انتخاب شدند. شکل ۷، شمای کلی محل قرارگیری این سنسورها در شبکه بنچ‌مارک EPANET Example 2 را به‌وضوح نشان می‌دهد.

**جدول ۲- نتایج مربوط به تعیین احتمال شناسایی منبع آلودگی در گام اول**

| ترکیبات ممکن از قرارگیری ۲ سنسور در ۵ ناحیه نفوذ | | | ایجاد حالات مختلف برای هر ترکیب (هر ترکیب شامل چند حالت زیرمجموعه می‌شود که این حالات به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده‌اند) | | | محاسبه احتمال تشخیص مشخصات منبع آلودگی برای هر ترکیب | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شماره ترکیب | محل قرارگیری سنسور ۱ | محل قرارگیری سنسور ۲ | شماره حالت | محل‌های سنسورها: گره انتخاب‌شده به‌صورت تصادفی برای ناحیه ۱ | محل‌های سنسورها: گره انتخاب‌شده به‌صورت تصادفی برای ناحیه ۲ | محاسبه احتمال شناسایی (٪) منبع آلودگی برای هر حالت با کمک نرم‌افزار EPANET و الگوریتم GA | میانگین (٪) | انحراف معیار |
| ۱ | ناحیه ۱ | ناحیه ۱ | ۱ | ۶ | ۳ | ۱۰ | ۱۰ | ۰ |
| | | | ۲ | ۵ | ۱ | ۱۰ | | |
| | | | ۳ | ۴ | ۵ | ۱۰ | | |
| | | | ۴ | ۴ | ۳ | ۱۰ | | |
| ۲ | ناحیه ۱ | ناحیه ۲ | ۱ | ۵ | ۸ | ۳۰ | ۴۲/۵ | ۰/۱۵ |
| | | | ۲ | ۲ | ۸ | ۳۰ | | |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ۳ | ۵ | ۱۱ | ۶۰ | | |
| | | | ۴ | ۳ | ۷ | ۵۰ | | |
| | | | ۱ | ۲ | ۳۳ | ۲۰ | | |
| | | | ۲ | ۱ | ۲۱ | ۴۰ | | |
| ۳ | ناحیه ۱ | ناحیه ۳ | ۳ | ۲ | ۳۴ | ۴۰ | ۴۰ | ۰/۱۶ |
| | | | ۴ | ۵ | ۲۰ | ۶۰ | | |
| | | | ۱ | ۳ | ۱۳ | ۷۰ | | |
| | | | ۲ | ۵ | ۲۴ | ۷۰ | | |
| ۴ | ناحیه ۱ | ناحیه ۴ | ۳ | ۲ | ۱۶ | ۶۰ | ۶۸ | ۰/۰۴ |
| | | | ۴ | ۴ | ۲۳ | ۷۰ | | |
| | | | ۵ | ۳ | ۲۴ | ۷۰ | | |
| | | | ۱ | ۱ | ۲۹ | ۷۰ | | |
| | | | ۲ | ۱ | ۳۱ | ۷۰ | | |
| ۵ | ناحیه ۱ | ناحیه ۵ | ۳ | ۳ | ۳۱ | ۶۰ | ۶۰ | ۰/۱۴ |
| | | | ۴ | ۶ | ۳۵ | ۴۰ | | |
| | | | ۱ | ۸ | ۱۱ | ۶۰ | | |
| | | | ۲ | ۱۰ | ۸ | ۳۰ | | |
| ۶ | ناحیه ۲ | ناحیه ۲ | ۳ | ۱۱ | ۱۰ | ۶۰ | ۵۲/۵ | ۰/۱۵ |
| | | | ۴ | ۱۲ | ۱۱ | ۶۰ | | |
| | | | ۱ | ۱۱ | ۲۰ | ۶۰ | | |
| | | | ۲ | ۹ | ۲۲ | ۵۰ | | |
| ۷ | ناحیه ۲ | ناحیه ۳ | ۳ | ۱۰ | ۳۳ | ۲۰ | ۴۵ | ۰/۱۷ |
| | | | ۴ | ۷ | ۳۴ | ۵۰ | | |
| | | | ۱ | ۷ | ۱۸ | ۶۰ | | |
| | | | ۲ | ۱۰ | ۱۴ | ۷۰ | | |
| ۸ | ناحیه ۲ | ناحیه ۴ | ۳ | ۹ | ۱۹ | ۵۰ | ۶۴ | ۰/۰۹ |
| | | | ۴ | ۷ | ۱۵ | ۷۰ | | |
| | | | ۵ | ۱۱ | ۲۳ | ۷۰ | | |
| | | | ۱ | ۱۱ | ۲۸ | ۶۰ | | |
| | | | ۲ | ۱۱ | ۳۶ | ۶۰ | | |
| ۹ | ناحیه ۲ | ناحیه ۵ | ۳ | ۹ | ۲۸ | ۵۰ | ۶۲/۵ | ۰/۱۳ |
| | | | ۴ | ۷ | ۳۵ | ۸۰ | | |
| | | | ۱ | ۲۲ | ۲۰ | ۶۰ | | |
| | | | ۲ | ۳۴ | ۲۱ | ۵۰ | | |
| ۱۰ | ناحیه ۳ | ناحیه ۳ | ۳ | ۲۰ | ۳۳ | ۶۰ | ۵۵ | ۰/۰۶ |
| | | | ۴ | ۲۲ | ۳۴ | ۵۰ | | |
| | | | ۱ | ۳۴ | ۱۵ | ۷۰ | | |
| | | | ۲ | ۳۴ | ۲۴ | ۷۰ | | |
| ۱۱ | ناحیه ۳ | ناحیه ۴ | ۳ | ۲۰ | ۱۷ | ۷۰ | ۶۸ | ۰/۰۴ |
| | | | ۴ | ۲۱ | ۳۲ | ۶۰ | | |
| | | | ۵ | ۳۳ | ۱۵ | ۷۰ | | |
| | | | ۱ | ۲۱ | ۳۱ | ۷۰ | | |
| | | | ۲ | ۲۰ | ۳۰ | ۶۰ | | |
| ۱۲ | ناحیه ۳ | ناحیه ۵ | ۳ | ۲۰ | ۲۵ | ۶۰ | ۶۷/۵ | ۰/۱ |
| | | | ۴ | ۳۴ | ۳۱ | ۸۰ | | |
| ۱۳ | ناحیه ۴ | ناحیه ۴ | ۱ | ۱۹ | ۱۵ | ۷۰ | ۷۲ | ۰/۰۵ |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ۲ | ۱۶ | ۱۴ | ۷۰ | | |
| | | | ۳ | ۱۸ | ۱۵ | ۸۰ | | |
| | | | ۴ | ۱۷ | ۱۵ | ۷۰ | | |
| | | | ۵ | ۱۳ | ۱۷ | ۷۰ | | |
| | | | ۱ | ۱۳ | ۲۹ | ۹۰ | | |
| | | | ۲ | ۲۵ | ۳۱ | ۷۰ | | |
| ۱۴ | ناحیه ۴ | ناحیه ۵ | ۳ | ۳۲ | ۲۹ | ۸۰ | ۸۲ | ۰/۰۸ |
| | | | ۴ | ۱۸ | ۲۷ | ۹۰ | | |
| | | | ۵ | ۱۸ | ۳۵ | ۸۰ | | |
| | | | ۱ | ۲۹ | ۳۶ | ۷۰ | | |
| | | | ۲ | ۲۷ | ۳۶ | ۸۰ | | |
| ۱۵ | ناحیه ۵ | ناحیه ۵ | ۳ | ۲۷ | ۳۱ | ۸۰ | ۷۷/۵ | ۰/۰۵ |
| | | | ۴ | ۲۷ | ۲۸ | ۸۰ | | |




**شکل ۷- محل بهینه قرارگیری سنسورها در شبکه موردمطالعه**

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تعیین بهترین مکان قرارگیری سنسورهایی باقابلیت شناسایی مشخصات آلودگی واردشده به شبکه آب (شماره گرهی که آلودگی از آن وارد می‌شود، زمان ورود آلودگی به شبکه، مدت‌زمان تزریق آلودگی به شبکه و همچنین مقدار (جرم) آلاینده ورودی به شبکه) با استفاده از نرم‌افزار EPANET و اتصال آن با الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک پرداخته شد. در این تحقیق جهت بهینه‌سازی محل قرارگیری سنسورها از سه گام اصلی استفاده شد که هرکدام از گام‌ها دارای مراحل مشخصی می‌باشند. به‌طور خلاصه در گام اول ابتدا یک مجموعه از آلودگی‌ها به‌عنوان آلودگی‌های مرجع (ماتریس آلودگی) تولید و انتخاب شدند. سپس در ادامه گام اول،

شبکه بنچ‌مارک موردمطالعه بر اساس پیکربندی و هیدرولیک شبکه به نواحی چندگانه تقسیم‌بندی شده و متناسب با تعداد سنسورهای انتخابی جهت نصب در شبکه ترکیبات مختلف از نواحی شبکه تولید گردید. در ادامه برای هرکدام از ترکیبات، احتمال شناسایی منبع آلودگی با کمک الگوریتم ژنتیک محاسبه‌شده که در الگوریتم ژنتیک هر کروموزوم دارای چهار مجهول شامل: شماره گرهی که آلودگی از آن به شبکه وارد می‌شود، مقدار آلاینده‌ای که به شبکه تزریق‌شده، زمان و مدت ورود آلاینده به شبکه می‌باشد. این مجهولات برای آلودگی‌های موجود در ماتریس آلودگی تعیین می‌شوند. در انتها ناحیه‌هایی از شبکه که دارای احتمال تشخیص بیشینه می‌باشند، انتخاب گردیدند. در گام دوم به بررسی نواحی به‌دست‌آمده از گام اول پرداخته‌شده و از بین حالات ممکن بهترین حالات (حالات با بیشترین احتمال درصد تشخیص منبع آلودگی) با کمک الگوریتم بهینه‌ساز، انتخاب می‌شود. درنهایت در گام سوم از بین حالات انتخابی در گام دوم، حالتی که دارای کمترین زمان تشخیص وجود آلودگی در شبکه بود انتخاب شد. در این مطالعه شبکه بنچ‌مارک EPANET Example 2 که در تحقیقات بسیاری مورداستفاده قرارگرفته، انتخاب شد تا محل بهینه برای نصب دو سنسور در شبکه تعیین شود. درنهایت با اعمال گام‌های اول تا سوم، چهارده حالت مختلف دارای بیشترین مقدار احتمال تشخیص منبع آلودگی برابر ۹۰ درصد بودند. سپس از بین ترکیبات با بیشترین احتمال تشخیص سناریویی که داری کمترین زمان تشخیص وجود آلودگی در شبکه توزیع بود انتخاب گردید. نتایج خروجی رویکرد پیشنهادی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی این تحقیق روی مسئله بنچ‌مارک EPANET Example 2 نشان داد که دو گره ۱۵ و ۲۷، بهترین محل‌ها برای نصب سنسورهای تشخیص مشخصات منبع آلودگی با احتمال تشخیص ۹۰ درصد و همچنین مینیمم زمان تشخیص معادل ۵۸ دقیقه بودند.

## منابع


عباسی، پ. و خامچین مقدم، ف. ۱۳۹۷. مدیریت بروز آلودگی در شبکه‌های توزیع آب شهری. دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، اصفهان.

مهری، آ. و سلمان ماهینی، ع. ۱۳۹۶. مروری بر مدل‌های آمایش سرزمین. فصلنامه انسان و محیطزیست. ۱۵ (۱): ۹۲-۷۱.

Adedoja, O.S., Hamam, Y., Khalaf, B. and Sadiku, R. 2018. Towards development of an optimization model to identify contamination source in a water distribution network. Water. 10(5):579.

Chinadaily Lanzhou tap water tainted with benzene. Updated April 11:2014 http://www.chinadaily.com.cn/china/2014-04/11/content_17428825.htm

Basupi, I. 2013. Adaptive water distribution system design under future uncertainty.

Cooper, W.J. 2014. Responding to crisis: The West Virginia chemical spill.

Cristo, C.D. and Leopardi, A. 2008. Pollution source identification of accidental contamination in water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management. 134(2): 197-202.

De Sanctis, A.E., Shang, F. and Uber, J.G. 2010. Real-time identification of possible contamination sources using network backtracking methods. Journal of Water Resources Planning and Management. 136(4): 444-453.

Forest, J.J., Howard, R.D. and Sheehan, A.M. 2013. Weapons of mass destruction and terrorism. New York: McGraw-Hill.

Goldberg, D.E. 1989. Genetic algorithms in search. Optimization, and MachineLearning.

Grbčić, L., Lučin, I., Kranjčević, L. and Družeta, S. 2020. A machine learning-based algorithm for water network contamination source localization. Sensors. 20(9): 2613.

Hammer, M.J. 2000. Water and Wastewater Technologies. 2nded. John Wiley and Sons, NewYork. 137-157.

Holland, J. 1975. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with application to biology. Control and artificial intelligence.

Hu, C., Zhao, J., Yan, X., Zeng, D. and Guo, S. 2015. A MapReduce based Parallel Niche Genetic Algorithm for contaminant source identification in water distribution network. Ad Hoc Networks. 35: 116-126.

Islam, M.R., Chaudhry, M.H. and Clark, R.M. 1997. Inverse modeling of chlorine concentration in pipe networks under dynamic condition. Journal of environmental engineering. 123(10): 1033-1040.

Khan, M.A.I. and Banik, B.K. 2017. Contamination source characterization in water distribution network. Global Science and Technology Journal. 5(1): 44-55.

Laird, C.D., Biegler, L.T., van Bloemen Waanders, B.G. and Bartlett, R.A. 2005. Contamination source determination for water networks. Journal of Water Resources Planning and Management. 131(2): 125-134.

McGhee, T.J. and Steel, E.W. 1991. Water supply and sewerage (Vol. 6). New York: McGraw-Hill.

Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. Science advances. 2(2): e1500323.

Sun, L., Yan, H., Xin, K. and Tao, T. 2019. Contamination source identification in water distribution networks using convolutional neural network. Environmental Science and Pollution Research. 26(36): 36786-36797.

Toolbox, R.P. 2003. Planning for and Responding to Drinking Water Contamination Threats and Incidents. USEPA: Washington, DC, USA.

Wang, C. and Zhou, S. 2017. Contamination source identification based on sequential Bayesian approach for water distribution network with stochastic demands. IISE Transactions. 49(9): 899-910.

World Health Organization. 2006. World in danger of missing sanitation target; drinking-water target also at risk, new report shows. Geneva: WHO; [Online]. Available from: URL: http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2006/pr47/en.

World Health Organization. 2017. https://www.who.int/news-room/fact sheets/ detail/ drinking-water

Xuesong, Y., Jie, S. and Chengyu, H. 2017. Research on contaminant sources identification of uncertainty water demand using genetic algorithm. Cluster Computing. 20(2): 1007-1016.

Yan, X., Zhao, J., Hu, C. and Zeng, D. 2019. Multimodal optimization problem in contamination source determination of water supply networks. Swarm and Evolutionary Computation. 47: 66-71.

Munavalli, G.R. and Kumar, M.M. 2003. Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems. Journal of water resources planning and management. 129(6): 493-504.

Munroe, S., Sandoval, K., Martens, D.E., Sipkema, D. and Pomponi, S.A. 2019. Genetic algorithm as an optimization tool for the development of sponge cell culture media. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Animal. 55(3): 149-158.

Preis, A. and Ostfeld, A. 2007. A contamination source identification model for water distribution system security. Engineering optimization. 39(8): 941-947.

Qiu, M., Salomons, E. and Ostfeld, A. 2020. A framework for real-time disinfection plan assembling for a contamination event in water distribution systems. Water research. 174: 115625.

Rossman LA. EPANET 2: user's manual.

Rutkowski, T.A. and Prokopiuk, F. 2018. Identification of the contamination source location in the drinking water distribution system based on the neural network classifier. IFAC-PapersOnLine. 51(24): 15-22.

Seth, A., Klise, K.A., Siirola, J.D., Haxton, T. and Laird, C.D. 2016. Testing contamination source identification methods for water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management. 142(4): 04016001.

Shang, F., Uber, J.G. and Polycarpou, M.M. 2002. Particle backtracking algorithm for water distribution system analysis. Journal of environmental engineering. 128(5): 441-450.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 15, Jan.-Jul. 2021, p. 342-356

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۵، خرداد - تیر ۱۴۰۰، ص. ۳۵۶-۳۴۲

# Determining the Optimal Location of Sensors in the Water Distribution Network in order to Identify the Pollution Source in Minimum Detection Time

**S. Harif[1], Gh. R. Azizyan[2], M. Givehchi[3], M. Dehghani Darmian[*4]**

Recived: Nov.16, 2020 Accepted: Feb.02, 2021

## Abstract

In order to detect pollutants in water distribution systems, sensors are used which, in addition to detecting pollution, also provide useful information to identify the source of pollutants. This information is useful for finding a suitable solution for quality management of the distribution network. The purpose of this study is to determine four characteristics of the pollution source to the system by a simulator-optimizer approach with optimally allocating two sensors in EPANET Example 2. These characteristics are: the contaminant injection node, injection mass rate, injection starting time and injection duration time. EPANET and genetic algorithm were linked as the simulator and optimizer tools to achieve these goals, simultaneously. For this purpose, first ten different pollution events were generated randomly, then the best place to install sensors in the network for identifying the source of pollution was found. Moreover, the shortest time of detection was selected among fourteen different combinations with a contamination source identification likelihood equal to 90%. The results showed that by placing sensors in two nodes 15 and 27 of the benchmark problem, the highest contamination source identification likelihood equal to 90% and the minimum detection time equal to 58 minutes were achieved.

**Keywords:** Detection time, EPANET, Pollution detection sensor, Water network pollution

1 - Ph.D. Candidate of Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
2 - Associate Professor of Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
3 - Retired Assistant Professor of Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
4 - Ph.D. of Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
(*- Corresponding Author Email: mohsen.dehghani@pgs.usb.ac.ir)