



## بهینه سازی موقعیت حسگرهای کیفی در شبکه های توزیع آب به منظور شناسایی ورود همزمان آلودگی از چند گره

شکوفه شفیعی<sup>۱</sup>، علی نصیریان<sup>۲</sup>، حسین نصیرپور<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

نوع مقاله: پژوهشی

### چکیده

شبکه های آبرسانی از زیرساخت های حیاتی هستند که باید از حملات عمدی و تصادفی محافظت شوند. کیفیت آب در تصفیه خانه ها مورد بررسی قرار می گیرد، با این حال، می تواند به طور قابل توجهی در هنگام انتقال از تصفیه خانه تا وقتی که به دست مصرف کنندگان می رسد، دست خوش تغییرات شود. مکان ورود آلاینده به شبکه غیرقابل پیش بینی است. همچنین آلودگی می تواند همزمان از چند مکان به شبکه وارد شود. وجود آلودگی در شبکه را می توان توسط حسگرهای نظارت بر کیفیت آب و سیستم هشداردهنده آلودگی نصب شده در شبکه، تشخیص داد. عملکرد یک سیستم هشداردهنده آلودگی به تعداد حسگرهای نصب شده در شبکه و موقعیت آنها بستگی دارد. در این تحقیق با فرض ورود آلودگی بصورت عمدی در یک یا دو گره، تعداد حسگرهای نصب شده در شبکه بین یک تا چهار حسگر متغیر در نظر گرفته شد. همچنین چهار تابع هدف برای انتخاب موقعیت و تعداد بهینه حسگر مورد بررسی قرار گرفت. شبکه در بازه زمانی طولانی مدت تحلیل شد و از طریق برقراری ارتباط پویا بین EPANET و Matlab در هر حالت نصب حسگر، حجم آب آلوده مصرف شده و وسعت منطقه آلوده شده بررسی شد و مقادیر توابع هدف محاسبه و مقایسه شد و بهترین حالتها برگزیده شد. روش مورد استفاده توانست برای توابع هدف مختلف، بهترین موقعیت برای نصب حسگرها را شناسایی کند.

واژه های کلیدی: شبکه های توزیع آب، ورود آلودگی، ورود آلودگی در چند گره، سنسورهای تشخیص آلودگی

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، ۰۵۶۳۲۳۲۰۵۵۲، آدرس پست الکترونیکی shokoofeshafiei91@birjand.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، ۰۵۶۳۲۳۲۰۵۵۲، آدرس پست الکترونیکی a.nasirian@birjand.ac.ir (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه بیرجند، ۰۵۶۳۲۳۲۰۵۵۲، آدرس پست الکترونیکی hossein.nasiripoor@yahoo.com

## مقدمه

آب از اساسی‌ترین ملزومات برای زندگی موجودات زنده است. سیستم‌های تأمین و توزیع آب شهری از قسمت‌هایی شامل منابع تأمین، خطوط انتقال اصلی، تصفیه‌خانه‌ها و مخازن ذخیره تشکیل شده‌اند. شبکه‌های آب شهری به دلیل پراکندگی و گستردگی بخش‌های تشکیل‌دهنده‌شان می‌توانند در معرض دو نوع خطر قرار گیرند: ۱- مکانیکی، ایجاد خرابی یا شکست در اجزای شبکه. ۲- ورود مواد شیمیایی یا بیولوژیکی. این خطرها می‌توانند به صورت طبیعی، عمدی و یا غیرعمدی رخ دهند (Di Nardo et al., 2013). حملات عمدی در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند که عبارتند از:

۱- حملات سایبری، که با هدف اعمال خسارات مالی، بخش کنترل و نظارت را هدف قرار می‌دهد.

۲- حملات بیولوژیکی، که سلامت مردم را به خطر می‌اندازند.

۳- حملات فیزیکی، ساختار تشکیل‌دهنده شبکه مانند تصفیه‌خانه‌ها، مخازن و لوله‌های انتقال آب مستقیماً مورد حمله قرار می‌دهند. از بین این سه دسته حملات بیولوژیکی و شیمیایی خطرناک‌تر و پیچیده‌تر می‌باشد که دلایل آن را می‌توان عدم قطعیت‌های موجود در شرایط مانند نوع ماده شیمیایی بکار گرفته شده، مکان و زمان ورود آلودگی دانست. همچنین دسترسی آسان به مواد سمی و گستردگی نقاط محتمل برای تزریق آن‌ها به شبکه از دلایل دشواری مقابله با این نوع حملات می‌باشند. در صورت ورود آلودگی به شبکه باید برای جلوگیری از پیامدهای ناشی از آن اقداماتی از قبیل اعلام خطر به افراد به منظور عدم استفاده از آب، ایزوله کردن ناحیه آلوده شده و تخلیه کردن آب آلوده از صورت گیرد (Mac Kenzie et al., 1994).

آلودگی می‌تواند به تک‌تک گره‌ها یا لوله‌ها وارد شود. سیستم‌های هشداردهنده خطر برای کشف آلودگی در شبکه‌های توزیع آب ضروری هستند. این

سیستم‌ها برای دستیابی سریع به شاخص کیفیت آب بسیار مناسب هستند. به همین دلیل اکثر تحقیقات صورت گرفته در زمینه تشخیص ورود آلودگی به نصب حسگرهای تشخیص، در شبکه آب تأکید دارند. برای اولین بار (Lee and Deininger, 1992) در پژوهش خود برای تشخیص ورود آلاینده، یک مفهوم پوشش تعریف کردند و روش‌هایی در مورد چگونگی تعیین ایستگاه‌های نظارت در شبکه شرح دادند و به این نتیجه رسیدند که بهترین مجموعه از قرارگیری حسگرها چیدمانی است که پوشش را به حداکثر می‌رساند. آنها برای حل مسئله بهینه‌سازی از یک کد برنامه‌نویسی اعداد صحیح استفاده کردند. (Rathi and Gupta, 2013) یک روش ساده اکتشافی برای تصمیم‌گیری درباره مکان ایستگاه‌های نظارت براساس مفهوم "ساخت کوتاه‌ترین درختان سفر" برای دستیابی به سطح خدمات هدفمند پیشنهاد کردند و روش را شبکه‌های واقعی با چند منبع گسترش دادند. کار محاسباتی در این روش کمتر از روش‌های پیشین است. (Housh and Ohar, 2016) نشان دادند که یک سیستم تشخیص آلودگی که با استفاده از مدل کیفی آب و مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی عمل می‌کند، می‌تواند سیستم تشخیص آلودگی مبتنی بر پردازش سیگنال را بهتر کند. همچنین آنها نشان دادند که سیستم هشدار مبتنی بر مدل می‌تواند داده‌های تمام ایستگاه‌های نظارت در یک شبکه را بصورت همزمان تجزیه و تحلیل کند. (Mukherjee et al., 2017) مسئله حسگر گذاری را با توجه به عدم اطمینان تقاضا در نقاط مختلف و موقعیت مکانی ورود آلودگی و همچنین دقت تشخیص حسگرها بررسی کردند. آن‌ها از یک الگوریتم بهینه‌سازی برای سیستم‌های نامشخص غیرخطی (BONUS) استفاده کردند. روش آن‌ها نشان داد در نظر گرفتن ضریب اطمینان پایین و عدم اطمینان تقاضا برای قرار دادن حسگر در موقعیت بهینه در سیستم‌های توزیع آب، طرح‌های قرارگیری بهتر حسگر با حداقل تأثیرات آلودگی را در پی دارد (Yan et al., 2017). بحث شناسایی منبع



یک مدل برای بهینه سازی قرار دادن حسگرها در شبکه های آب شهری برای تشخیص آلاینده های مضر تزریق شده ارائه دادند. هدف از قرارگیری بهینه حسگرها، کمینه کردن جمعیت در معرض خطر می باشد. آنها این مشکل را به عنوان یک برنامه عدد صحیح مختلط، حل کردند. در این تحقیق موقعیت های مطلوب حسگر برای سه شبکه آزمایشی با خطر و مصارف مصنوعی ارائه شد. آزمایش ها نشان داد که این روش سریع بوده و نسبت به غیرواقعی بودن داده های استفاده شده حساس نمی باشد. (Afshar and Mariño, 2012) یک روش عددی برای بهینه سازی موقعیت نصب حسگر در یک سیستم توزیع آب در حالت استاتیک ارائه دادند. مبنای روش آنها انتخاب مجموعه ای از ایستگاه های نمونه گیری است که حداکثر حجم آب با حداقل تعداد حسگر پوشش داده شود. آن ها از الگوریتم کلونی مورچه ها برای بهینه سازی استفاده کردند. سهولت تعمیر و ماهیت چند هدفه از ویژگی های روش آنها می باشد. (Chang et al., 2012) یک سیستم حمایتی برای نصب حسگر مبتنی بر قانون<sup>۲</sup> (RBDSS) ایجاد کردند. آنان روش خود را برای یک شبکه آب آشامیدنی در مقیاس کوچک در روستای کنتاکی ایالات متحده، عملی کردند. نتایج نشان داد که روش RBDSS قادر به تولید نسبتا سریع راهکارهایی مناسب نصب حسگر برای شبکه های آب در مقیاس کوچک است. در این تحقیق، چهار تابع هدف ۱- زمان تشخیص، ۲- جمعیت آلوده شده، ۳- آب آلوده مصرف شده و ۴- احتمال تشخیص آلودگی در نظر گرفته شد. (Klise et al., 2013) برای طراحی شبکه حسگرها با هدف به حداکثر رساندن احتمال تشخیص نفوذ آلودگی به شبکه توزیع آب، پارامترهای تصادفی تعریف کردند و تحلیل ها را براساس عدم قطعیت آنها انجام دادند. آنها برای مسائل بهینه سازی از الگوریتم های حریص استفاده کردند. نتایج نشان داد طرح شبکه حسگر به لحاظ کردن عدم اطمینان در پارامترهای تصادفی و اینکه

آلاینده را به صورت مسئله بهینه سازی مطرح کردند و سپس الگوریتم فرهنگی<sup>۱</sup> را برای حل آن، با توجه به اندازه های مختلف شبکه های آبرسانی استفاده کردند. در نهایت نتایج تجربی، اثر بخشی روش پیشنهادی آنها را تایید کرد. (Khorshidi et al., 2018) با استفاده از تکنیک های نظریه اطلاعات از جمله ارزش اطلاعات و انترپی اطلاعات ترانسفورماتور، برای نصب حسگرها در شبکه، چارچوبی را پیشنهاد کردند. این روش از فضای جستجو برای انتخاب محل نصب حسگر با توجه به نقاط حساس و بالقوه برای ورود آلودگی، تشکیل می شود. آنها با افزایش فضای تصمیم گیری، جواب دقیق تری ارائه دادند. این روش محاسباتی کمتری نسبت به سایر روش ها دارد.

تحقیقات صورت گرفته از جنبه هایی مانند توابع هدف، نوع شبیه سازی هیدرولیکی و کیفی و روش بهینه یابی مورد استفاده، متمایز هستند. توابع هدف که می توانند بصورت منفرد (Palleti et al., 2016) و یا ترکیبی (Sankary and Ostfeld, 2017) لحاظ شوند. مواردی از قبیل به حداقل رساندن زمان تشخیص، به حداقل رساندن حجم آب آلوده مصرف شده، کمینه کردن جمعیت در معرض آلودگی، حداقل سازی زمان پاسخ حسگر، به حداقل رساندن تعداد تشخیص نادرست و افزایش احتمال تشخیص آلودگی توسط حسگر هستند. در ادامه به برخی مطالعات و تفاوت های آنها، اشاره خواهد شد. (Ostfeld et al., 2004) با هدف حداقل کردن حجم آب آلوده شده، یک روش برای یافتن طرح مطلوب یک سیستم تشخیص هشدار اولیه ارائه دادند که شامل مجموعه ای از ایستگاه های تشخیص برای امنیت سیستم های توزیع آب شهری است. شبیه سازی کیفی و هیدرولیکی بصورت دینامیکی انجام شده است و برای بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. این روش متشکل از دو مرحله اصلی، ساخت یک ماتریس آلودگی تصادفی و ستون حداکثر پوشش می باشد که با دو مثال کاربردی نشان داده شد. (Berry et al., 2005)

<sup>2</sup> Rule-based Decision Support System

<sup>1</sup> cultural

### مواد و روش‌ها

#### معادلات تحلیل کیفی شبکه لوله‌ها

در تحقیق حاضر تحلیل کیفی شبکه، در نرم‌افزار ایپانت انجام شده است که معادلات حاکم بر تحلیل کیفی آن بصورت زیر می‌باشد (Rossman, 2000). حرکت مواد موجود در آب، درون شبکه‌های توزیع شامل سه فرآیند عمده است. انتقال، اختلاط و واکنش مواد موجود در آب با یکدیگر و همچنین واکنش با مواد دیواره لوله‌ها و مخازن می‌باشد. انتقال در یک لوله با معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{\partial C_i(x, t)}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i(x, t)}{\partial x} + rC_i(x, t) \quad (1)$$

$C_i$ : غلظت (جرم / حجم) در لوله  $i$  به عنوان تابعی از فاصله  $x$  و زمان  $t$ ؛  $u_i$ : سرعت جریان (طول / زمان) در لوله  $i$  و  $r$ : نرخ واکنش (جرم / حجم / زمان) می‌باشد (Rossman, 2000).

در اتصالات که جریان از دو یا چند لوله بهم می‌رسند، مایعات به طور کامل و در لحظه مخلوط می‌شوند. بنابراین غلظت یک ماده در آب در محل اتصال، برابر مجموع وزن دار غلظت جریان از لوله‌های ورودی است. برای یک گره خاص  $k$  می‌توان نوشت:

$$C_i|_{x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_j|_{x=L_j} + Q_{k,e} C_{k,e}}{\sum_{j \in I_k} Q_j + Q_{k,e}} \quad (2)$$

$i$ : لوله متصل به گره  $k$  و دارای جریان خروجی،  $I_k$ : مجموعه لوله دارای جریان ورودی متصل به گره  $k$ ،  $L_j$ : طول لوله  $j$ ،  $Q_j$ : جریان در لوله  $j$ ،  $Q_{k,e}$ : جریان منبع خارجی ورودی به شبکه در گره  $k$ ،  $C_{k,e}$ : غلظت جریان ورودی خارجی در گره  $k$  است. نماد  $C_i|_{x=0}$  نشان دهنده غلظت در شروع لوله  $i$  است، در حالی که  $C_i|_{x=L}$  غلظت در انتهای لوله است (Rossman, 2000).

آیا هر یک از حسگرها معدوم شده‌اند یا خیر وابسته می‌باشد. (Rathi and Gupta, 2016) دو تابع هدف ۱- پوشش تقاضا و ۲- محدودیت زمان احتمال تشخیص بصورت وزن دار در یک تابع هدف ترکیب کردند. آن‌ها یکبار پاسخ‌هایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و یکبار با تغییر وزن دو تابع ترکیب شده بدست آوردند. مقایسه دو روش نشان داد که روش ساده پیشنهاد شده برای کاهش تلاش‌های محاسباتی، راه حل‌هایی نزدیک به پاسخ‌های الگوریتم GA، ارائه داده است. (Banik et al., 2017) بهینه‌سازی قرارگیری حسگرها را با استفاده از الگوریتم‌های حریص<sup>۱</sup> (GRs) انجام دادند. همچنین آنها نتایج خود را با الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (GA) مقایسه کردند که نشان‌دهنده عملکرد بهتر GR بود. توابع هدف چندگانه در این مطالعه کمینه کردن زمان تشخیص، میزان مصرف آب آلوده، جمعیت در معرض، احتمال تشخیص غلط، زمان پاسخ حسگر و افزونگی احتمال تشخیص می‌باشد. (He et al., 2018) احتمال ورود آلودگی را برای گره‌ها یکسان در نظر نگرفتند. آنها براساس طول لوله‌های متصل به هر گره، دبی گره، تراکم جمعیت و ویژگی مصرف کنندگان در هر منطقه، توابعی را تعریف کردند تا احتمال آلودگی برای هر منطقه را مشخص کند. روش آنها بسیار سریع‌تر از روش‌های سنتی بود. توابع هدف در نظر گرفته در این مطالعه به حداقل رساندن زمان ورود آلودگی تا هنگام تشخیص و به حداکثر رساندن احتمال تشخیص است. تحقیق حاضر روی شبکه نمونه استاندارد و با هدف کمینه کردن تعداد گره‌های آلوده شده، حجم آب آلوده شده و تعداد حسگرهای مورد استفاده انجام شده است. در این مطالعه برای یافتن حالت بهینه، کل حالت‌های ممکن، از طریق برقراری لینک بین نرم‌افزار Matlab و EPANET و کدنویسی در محیط Matlab مورد بررسی قرار گرفت. مزیت این روش علاوه بر دست‌یابی به حالت بهینه مطلق، امکان شناسایی تمامی حالات بهینه در صورت وجود چند حالت بهینه مشابه، می‌باشد.

<sup>2</sup> Genetic Algorithm

<sup>1</sup> Greedy Algorithms



وضعیت‌ها همه حالت‌های ممکن برای تزریق آلودگی بررسی شده‌است. همچنین در این تحقیق تعداد حسگرها متغیر در نظر گرفته شده‌است (۴ تا ۱ حسگر). مراحل انجام کار در شکل (۱) بیان شده است.

در گام اول، پس از ساخت مدل هیدرولیکی شبکه، پارامترهای زمان اجرای کل شبیه‌سازی، گام‌های زمانی، مصارف گره‌ای، الگوی مصرف ساعتی و ... تعیین و تنظیم می‌شوند. سپس تعداد گره‌هایی که بصورت همزمان آلاینده به شبکه وارد می‌کنند تعیین می‌شود. تعداد گره‌های ورود آلاینده، یک یا دو گره در نظر گرفته شده است.

در گام سوم برای ورود آلودگی از یک یا دو گره، حالت‌های محتمل زیادی وجود دارد که همه آن‌ها باید بررسی شوند. حالت‌های مختلف گره‌های ورود آلودگی از طریق یک زیر برنامه تولید می‌شود و به صورت یک ماتریس به برنامه اصلی معرفی می‌گردد. در این ماتریس، هر سطر نشان‌دهنده شماره گره‌های ورود آلودگی می‌باشد و تعداد سطرهای آن برابر با تعداد حالات ممکن برای ورود آلودگی می‌باشد.

در اکثر مواقع لوله‌ها به مخازن و تانک‌ها متصل هستند. رابطه تعادل غلظت‌های ورودی و خروجی تانک یا مخزن به صورت معادله (۳) است.

$$\frac{\partial(V_s C_s)}{\partial t} = \sum_{i \in I_s} Q_i C_i|_{x=L_i} - \sum_{j \in O_s} Q_j C_s + r C_s \quad (3)$$

که  $V_s$ : حجم ذخیره سازی در زمان  $t$ :  $C_s$ : غلظت در محفظه ذخیره سازی،  $I_s$ : مجموعه‌ی لوله‌هایی که جریان را به مخازن وارد می‌کند و  $O_s$ : مجموعه‌ی لوله‌هایی که جریان را از مخازن خارج می‌کند (Rossman, 2000).

### روش بهینه‌یابی

این تحقیق به منظور معرفی بهترین حالت برای نصب حسگر انجام گرفته است. برای چگونگی ورود آلاینده به شبکه دو وضعیت در نظر گرفته شده‌است. در وضعیت اول قرار بر این است که آلاینده تنها از یک گره به شبکه ورود کند و در وضعیت دوم آلاینده از دو گره بصورت همزمان وارد شبکه می‌شود. برای هر کدام از این



شکل (۱): فلوچارت روش تعیین حالت بهینه نصب حسگر



مقدار رابطه را داشته باشد پاسخ بهینه برای تعداد حسگر مورد نظر می‌باشد:

$$FO = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m of(i, j) \times \alpha(j) \times \beta(i) \quad (4)$$

که در آن  $FO$  ارزش هر چیدمان بهینه برای هر تابع هدف در هر تعداد گره ورود آلاینده،  $i$  تابع هدف،  $z$  تعداد گره‌های ورود آلاینده،  $n$  تعداد حالات ورود آلودگی،  $m$  تعداد توابع هدف،  $of$  مقدار توابع هدف،  $\alpha$  ضریب اهمیت تابع هدف و  $\beta$ : ضریب احتمال تعداد گره ورود آلاینده می‌باشد که ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  توسط نهادهای مربوطه تعیین می‌شود.

مقدار  $FO$  برای همه موارد بهینه هر تعداد حسگر، محاسبه می‌شود و آن گزینه که مقدار  $FO$  کمتری دارد به عنوان بهترین انتخاب برای حسگرگذاری برگزیده می‌شود.

### توابع هدف

توابع هدف در این مطالعه عبارتند از:

۱- کمینه شدن متوسط تعداد گره‌های آلوده شده ( $AN$ ): با توجه به گره ورود آلودگی و موقعیت حسگرها، تعدادی از گره‌های شبکه قبل از شناسایی آلودگی توسط حسگرها، آلوده خواهند شد. تعداد آن‌ها برای هر موقعیت قرارگیری حسگر به ازای ورود آلودگی در تمامی گره‌های محتمل بدست می‌آید و از آنها میانگین گرفته می‌شود. آن موقعیت حسگرها که دارای حداقل میانگین باشد به عنوان موقعیت بهینه نصب حسگر انتخاب می‌شود.

$$AN(j) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n N(i, j)}{n} \right) \quad (5)$$

که در آن  $n$ : تعداد حالات ورود آلودگی در شبکه،  $N(i, j)$ : تعداد گره‌های آلوده شده در زمان نصب حسگر در حالت  $z$  و ورود آلودگی در حالت  $i$  و  $AN(j)$ : مقدار تابع هدف متوسط تعداد گره‌های آلوده شده می‌باشد.

در گام بعد، تعداد حسگرها (یک تا چهار حسگر) جهت نصب در شبکه مشخص می‌شوند. در این مرحله نیز، حالت‌های زیادی برای نصب حسگرها وجود دارد که برای تولید ماتریس حالت نصب حسگر از زیر برنامه قسمت قبل استفاده می‌شود. سپس با تحلیل شبکه از طریق برقراری ارتباط پویا بین EPANET و Matlab در گام‌های زمانی یک ساعته تعریف شده، تعداد گره‌ها و حجم آب آلوده شده برای هر حالت قرارگیری حسگر در هر حالت ورود آلودگی تعیین می‌شوند. در گام بعدی، برای هر تعداد حسگر در هر حالت ورود آلودگی شبکه تحلیل می‌شود و حجم آب و تعداد گره‌های آلوده شده قبل از تشخیص، برای همه حالات ممکن نصب حسگر محاسبه می‌گردد. در ادامه، توابع هدف به‌ازای همه حالات قرارگیری حسگرها برای همه حالت‌های ممکن ورود آلودگی محاسبه می‌شوند. سپس برای هر کدام از چیدمان حسگرها، حداکثر و میانگین مقادیر توابع هدف محاسبه می‌شود. سپس با مقایسه مقادیر محاسبه شده، چیدمانی که حداقل مقدار را برای هر تابع هدف دارا باشد، به عنوان حالت بهینه برای نصب حسگر برای آن تابع هدف انتخاب می‌شود.

از آنجا که هر تابع هدف در هر حالت ورود آلودگی برای هر تعداد حسگر، پاسخی متفاوت نسبت به سایر توابع هدف دارد و همچنین برخی از توابع هدف بیش از یک پاسخ بهینه دارند، برای رسیدن به یک حالت نصب حسگر، برای هر تعداد حسگر مورد نظر، یک رابطه تعریف می‌شود و برای هر چیدمانی که به نحوی بهینه شده است، اعمال می‌شود. رابطه ذکر شده با اختصاص دادن یک ضریب اهمیت برای هر تابع هدف در هر حالت ورود آلودگی و لحاظ کردن مقادیر آن (مقادیر نرمال شده توابع هدف) و یک ضریب احتمال برای هر تعداد گره ورود آلاینده، بدست می‌آید. مقدار رابطه بدست آمده برای هر چیدمان نصبی که برای هر تابع هدف بعنوان گزینه بهینه انتخاب شده است محاسبه می‌شود. در نهایت برای هر تعداد حسگر، حالت نصبی که حداقل

آلوده شده است. علت در نظر گرفتن این پارامتر این می‌باشد که در مناطق با جمعیت بالا ممکن است تعداد گره‌ها کم باشد اما حجم آب مورد مورد تقاضا در آنها زیاد باشد.

$$MV(j) = (Max (V(i, j))) \quad (۸)$$

که در آن  $MV(j)$ : مقدار تابع هدف حداکثر حجم آب آلوده شده در زمان نصب حسگر در حالت  $j$  می‌باشد.

#### شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه یک شبکه فرضی است که در ابتدا توسط پولاکیس و همکاران برای نشت یابی مورد بررسی قرار گرفت. این شبکه شامل ۳۱ گره و ۵۱ لوله می‌باشد که ۲۰ حلقه را تشکیل داده‌اند. در این شبکه طول لوله‌های افقی ۲۰۰۰ متر، طول لوله‌های عمودی ۱۰۰۰ متر و ضریب زبری هیزن- ویلیامز، ۱۳۰ است. تراز در مخزن ۲۱۰ متر در گره شماره ۳۱، ۱۴۰ متر و در سایر گره‌ها صفر می‌باشد. شماره گره‌ها و لوله‌ها در کنار آنها نوشته شده‌است. برای تعیین مصارف گره‌ای، شبکه به چهار ناحیه تقسیم شده‌است که مصرف گره‌های قرار گرفته در نواحی ۱، ۲، ۳، و ۴ به ترتیب ۵۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. در شکل ۲، ناحیه بندی گره‌ها و همچنین قطر لوله‌ها برحسب میلی‌متر مشخص شده‌است.

ضریب الگوی مصرف ساعتی آب در ۲۴ ساعت در شکل ۳ آمده است.

۲- کمینه شدن حداکثر تعداد گره های آلوده شده (MN): تعداد گره‌های آلوده شده برای هر موقعیت نصب حسگر در هر گره محتمل ورود آلودگی با استفاده از برنامه‌های نوشته شده مشخص شده‌است. برای هر موقعیت نصب حسگر، حداکثر تعداد گره‌های آلوده در نظر گرفته می‌شود و با همتای آن برای تمامی موقعیت‌های نصب حسگر مقایسه می‌شود. حالت قرارگیری که در این مقایسه دارای حداقل مقدار می‌باشد به‌عنوان حالت بهینه قرارگیری حسگر انتخاب می‌شود.

$$MN(j) = (Max (N(i, j))) \quad (۶)$$

که در آن  $MN(j)$ : مقدار تابع هدف حداکثر تعداد گره‌های آلوده شده می‌باشد.

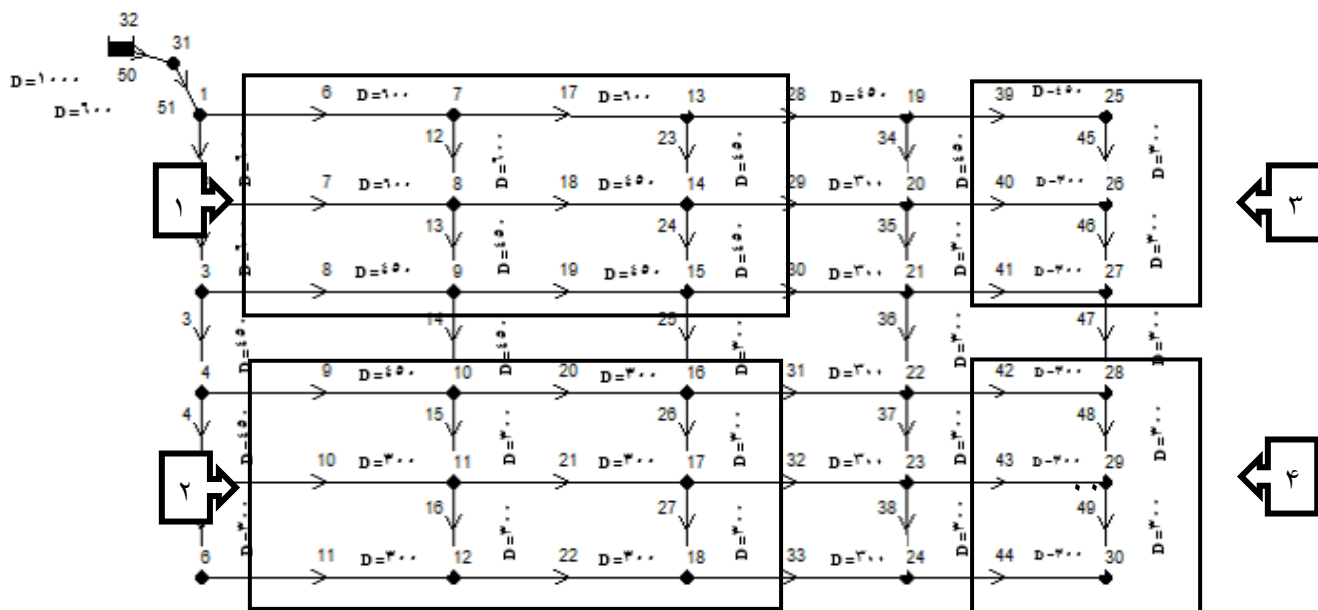
۳- کمینه شدن مقدار متوسط آب آلوده مصرف شده (AV): به روش مشابه برای تابع هدف شماره ۱ عمل می‌شود. اما روی اطلاعات مربوط به مقادیر حجم آب آلوده شده اعمال می‌شود.

$$AV(j) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n V(i, j)}{n} \right) \quad (۷)$$

که در آن  $n$ : تعداد حالات ورود آلودگی در شبکه،  $V(i, j)$ : حجم آب آلوده شده در زمان نصب حسگر در حالت  $j$  و ورود آلودگی در حالت  $i$  و  $AV(j)$ : مقدار تابع هدف متوسط حجم آب آلوده شده می‌باشد.

۴- کمینه شدن مقدار حداکثر آب آلوده مصرف شده (MV): روند کار مشابه تابع هدف شماره ۲ می‌باشد. اطلاعات بکار گرفته شده مربوط به مقادیر حجم آب

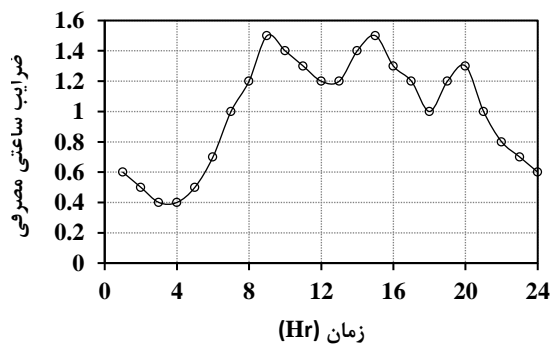




شکل (۲): شبکه پولاکاپیس

در تحلیل کیفی و دریافت گزارشات یک ساعته بوده- است.

شکل (۴-الف) روند افزایش آلودگی در گره ۱۰ برای ورود آلاینده از یک نقطه در طول زمان و هنگامی- که ورود آلودگی در گره های ۱، ۲، ۷، ۸ و ۳۱ اتفاق می افتد، نشان می دهد. شکل (۴-ب) زیر نمایشی از نحوه آلوده شدن گره ۲۸ در شرایط ورود آلودگی از دو نقطه همزمان، نقاط ۱ و ۲، ۶ و ۱، ۱۰ و ۱، و ۱۳ وارد شبکه شود، ارائه می دهد.

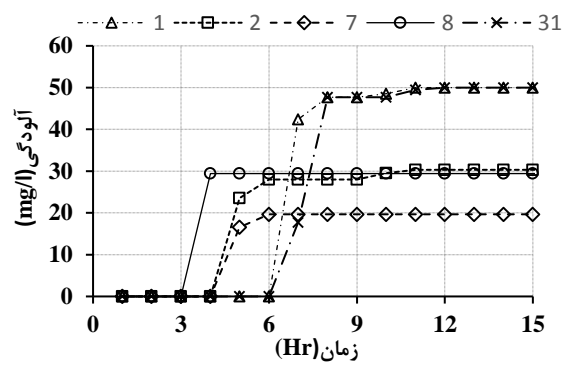


شکل (۳): صرفی ساعتی آب مصرفی مشترکین

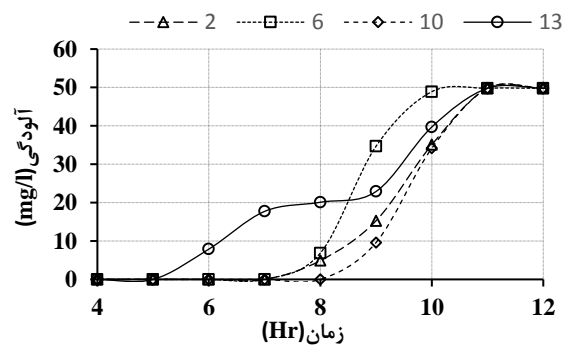
## نتایج و بحث

### نتایج

در تحلیلها فرض شده است آلاینده با غلظت  $50 \text{ mg/l}$  به صورت پیوسته در مدت شبیه سازی به شبکه تزریق می شود. زمان شبیه سازی در نرم افزار ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. در این مدت آلودگی به تمام گره ها رسیده و به مقدار ثابتی می رسد. گام های زمانی

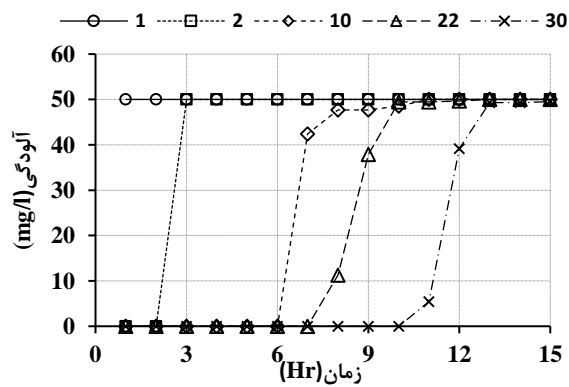


(الف)

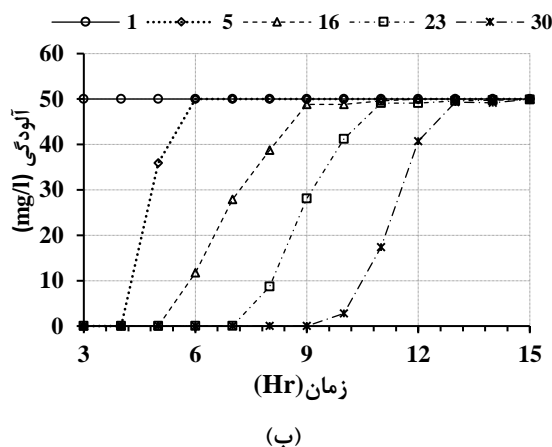


(ب)

شکل (۴): تغییرات آلودگی در گره ۱۰ با ورود آلودگی در چند گره



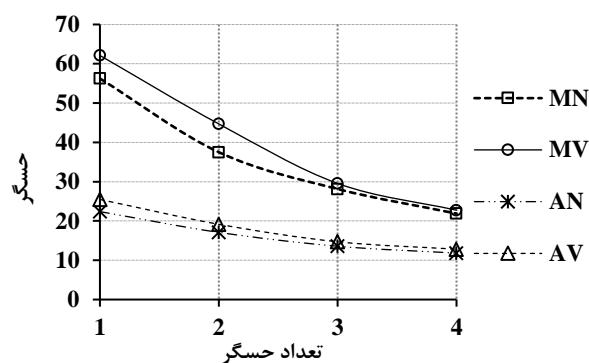
(الف)



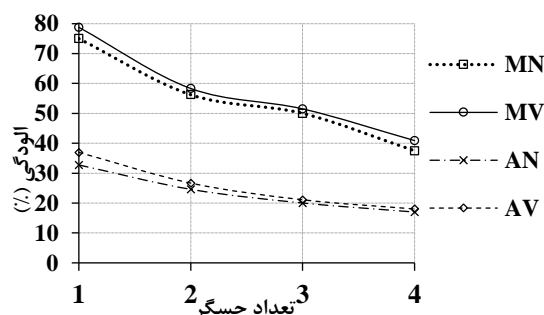
شکل (۵): روند افزایش آلودگی در چند گره، ورود آلودگی در گره شماره ۱

با ورود آلاینده در یک نقطه و در نقطه ۱ آب در همه لوله‌ها جز لوله ۵۰ و ۵۱ آلوده می‌شوند. به همین دلیل غلظت آلودگی در گره‌های انتخابی برای رسم نمودارها در شکل بالا و سایر گره‌ها بجز گره ۳۱ و ۳۲ به غلظت آلاینده در هنگام ورود می‌رسد. توضیحات در مورد ورود آلاینده از دو نقطه نیز مشابه است. شکل (۶-الف) بیانگر مقدار توابع هدف در حالت بهینه در قالب درصد، به ازای تعداد حسگرهای متفاوت و برای یک نقطه ورود آلودگی و شکل (۶-ب) برای دو نقطه ورود آلودگی می‌باشد.

در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود که آب از لوله‌های ۹ و ۱۴ وارد گره ۱۰ می‌شود. بسته به نقطه ورود آلودگی ممکن است آب هر دو لوله آلوده باشد که در این صورت مقدار آلودگی در گره ۱۰ در نهایت به حداکثر مقدار ممکن می‌رسد. اما اگر آلودگی در جایی وارد شود که آب یکی از لوله‌های ۹ و ۱۴ آلوده نباشد، آنگاه غلظت گره ۱۰ هرگز به حداکثر مقدار نمی‌رسد و در غلظتی کمتر از غلظت آلاینده، ثابت می‌ماند. توضیحات در حالت (ب) مشابه است. با انتخاب گره ۱ برای ورود آلودگی از یک نقطه، نحوه آلوده شدن گره‌های ۱، ۲، ۱۰، ۲۲ و ۳۰ در طول زمان در شکل (۵-الف) ترسیم شده است. همچنین برای درک بهتری از نحوه آلوده شدن گره‌ها هنگام ورود آلودگی از دو نقطه همزمان، بطور مثال زمانی که آلاینده از طریق گره ۱ و ۲ به شبکه وارد شود روند آلوده شدن گره‌های ۱، ۵، ۱۶، ۲۳ و ۳۰ در شکل (۵-ب) نمایش داده شده است.



(الف) - ورود آلودگی در یک گره



(ب) - ورود آلودگی در دو گره

شکل (۶): مقادیر توابع هدف در حالت بهینه برای تعداد حسگرهای مختلف

تعداد حسگرها باعث کاهش تمامی توابع هدف می‌شود. اما این کاهش بر روی مقادیر حداکثر بیشتر است. بطوری‌که کاهش مقدار بین یک حسگر و چهار حسگر به‌طور متوسط حدود ۱۵٪ و ماکزیمم ۴۰٪ است. همانطور که قابل مشاهده است هر چه تعداد حسگرهای نصب شده در شبکه بیشتر باشد، تعداد گره‌ها و حجم آب آلوده شده کمتر می‌شود.

همانگونه که مشاهده می‌شود، در قسمت (الف) در صورت نصب یک حسگر در شبکه در بهترین موقعیت با فرض اینکه آلودگی بصورت تصادفی وارد شود بطور متوسط ۲۵٪ شبکه آلوده می‌شود. اما اگر عملیات تروریستی باشد و خطرناک‌ترین شرایط انتخاب شود، می‌تواند تا ۶۳٪ شبکه آلوده شود. براین اساس نصب یک حسگر در این شبکه کافی به نظر نمی‌رسد. افزایش



جدول (۱): نقاط منتخب برای نصب حسگر

تعداد حسگر	توابع هدف			
	AV	AN	MV	MN
	ورود آلاینده از یک نقطه			
۱	۱۵	۱۵	۱۵ ۱۶ ۲۱	۹
۲	۱۷و۸ ۲۲و۸	۲۱و۸	۲۲و۸ ۲۲و۹ ۲۲و۱۴	۱۷و۹ ۱۴و۱۰ ۱۴و۱۱
۳	۲۱و۱۷و۸	۲۱و۱۷و۸	۲۱و۱۷و۸ ۲۱و۱۸و۸ ۲۳و۲۱و۸	۲۳و۱۵و۸
۴	۲۲و۱۵و۱۱و۸ ۲۲و۱۵و۱۲و۸ ۲۱و۱۷و۱۵و۸ ۲۲و۱۷و۱۵و۸ ۲۷و۱۷و۱۵و۸ ۲۱و۱۷و۱۳و۹	۲۲و۱۵و۱۱و۸ ۲۲و۱۵و۱۲و۸ ۲۲و۱۷و۱۵و۸ ۲۲و۱۸و۱۵و۸ ۲۳و۲۲و۱۵و۸	۲۰و۱۷و۹و۱ ۲۱و۱۷و۹و۱ ۲۲و۱۵و۱۱و۸ ۲۷و۱۷و۱۵و۸	۲۷و۱۷و۱۵و۷ ۲۷و۱۷و۱۵و۸
	ورود آلاینده از دو نقطه			
۱	۱۵	۹	۹ ۱۴	۹
۲	۲۱و۸	۲۱و۸	۲۱و۸	۲۱و۸
۳	۲۱و۱۷و۸	۲۱و۱۷و۸	۱۸و۱۵و۸ ۲۳و۱۵و۸	۱۷و۱۶و۸ ۱۶و۱۱و۸ ۲۱و۱۱و۸ ۱۵و۱۲و۸ ۱۶و۱۲و۸ ۲۱و۱۲و۸ ۱۷و۱۳و۹ ۱۷و۱۳و۱۰ ۱۷و۱۵و۱۳
۴	۲۱و۱۷و۹و۱ ۲۱و۱۷و۹و۱	۲۰و۱۷و۹و۱ ۲۰و۱۷و۹و۱	۲۰و۱۷و۹و۷ ۲۰و۱۷و۹و۷	۲۰و۱۷و۹و۱ ۲۰و۱۷و۹و۲ ۲۰و۱۷و۹و۷

حجم آب آلوده مهم‌تر از تعداد گره‌های آلوده می‌باشد. از طرفی اهمیت ماکزیمم حجم آب و تعداد گره آلوده شده از متوسط حجم آب و تعداد گره آلوده شده بیشتر می‌باشد. این مطلب بر این فرض استوار است که اگر عملیات آلودگی تروریستی بخواهد اتفاق افتد، تروریستها از محل حسگرها اطلاع دارند و آلودگی را در نقطه ای وارد خواهند کرد که آثار مخرب شدیدتری داشته باشد. همچنین احتمال ورود آلاینده از یک گره بیشتر از احتمال ورود آلاینده از دو گره در نظر گرفته شده است. اما یک ضریب نزدیک به واقعیت را نهادهای مربوطه با توجه به ایمنی شبکه مورد نظر و پارامترهای دیگر اتخاذ می‌کنند. رابطه (۴) برای همه گزینه‌های بهینه برای هر تعداد حسگر و درحالت ورود آلاینده از یک گره و دو گره، محاسبه شده است و در نهایت چیدمانی که دارای حداقل مقدار بدست آمده از رابطه (۴) باشد به عنوان حالت بهینه حسگر گذاری برای تعداد حسگر مورد نظر انتخاب می‌شود. در جدول (۳) چیدمان‌های بهینه، مقدار رابطه (۴) متناظر با آنها و در نهایت، انتخاب نهایی آورده شده است.

جدول (۲): ضرایب اهمیت توابع هدف

توابع هدف	$\alpha$	تعداد آلودگی	$\beta$
MN	۲	۱	۲
MV	۴	۱	۲
AN	۱	۲	۱
AV	۳	۲	۱

پس از انجام تحلیل‌ها و بررسی نتایج، نقاط مناسب برای نصب حسگر مشخص شد. بسته به هدف مورد نظر محل مناسب جهت قرارگیری حسگر متفاوت است. در جدول (۱) گزارشی از شماره نقاط بدست آمده برای نصب حسگرها در تعداد مورد نظر، برای توابع هدف ذکر شده آورده شده است. در جدول (۱)، زمان برنامه‌های اجرا شده در سیستمی با RAM 4 و Core i5-5200U CPU 2.20 GHz گزارش شده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود برخی از توابع هدف، بیش از یک پاسخ بهینه دارند. برای حالت ورود آلاینده از گره، تابع هدف AV در ۴ حسگر جهت نصب و برای حالت ورود آلاینده از دو گره، تابع هدف MN و ۳ حسگر، بیشترین پاسخ‌های بهینه را دارا می‌باشند. قابل ذکر است که مقدار تابع هدف در تمامی این حالت‌ها برابر و با توجه به شکل (۶-ب) برابر ۵۰ درصد از گره‌های کل شبکه می‌باشد.

### بحث

نتایج بدست آمده برای هر تعداد حسگر، بسته به تابع هدف و تعداد نقاط ورود آلودگی متفاوت است. اما برای رسیدن به یک پاسخ واحد، به‌ازای هر تعداد حسگر، ابتدا به هر تابع هدف یک ضریب اهمیت اختصاص یافته است که این ضریب باید از طریق نهادهای مربوطه تعیین شود، اما در این مطالعه، ضرایب مطابق جدول (۲) فرض شده اند. توابع هدف از نظر اهمیت به این ترتیب اولویت بندی شدند که مقدار



جدول (۳): مقدار توابع هدف در حالت بهینه شدن یکی از آنها و نتایج بهینه نهایی

انتخاب نهایی	OF	مقدار نرمال شده تابع هدف (ورود آلاینده از دو گره)				مقدار نرمال شده تابع هدف (ورود آلاینده از یک گره)				حالت‌های بهینه حسگرگذاری	تعداد حسگر
		MN	MV	AN	AV	MN	MV	AN	AV		
۹	۱۵۴۵/۸۹	۷۵	۷۸/۷۹	۳۲/۷۵	۳۷	۵۶/۲۵	۶۳/۶۴	۲۲/۴۷	۲۶/۳۳	۹	۱
	۱۶۵۵/۱۰	۹۰/۶۲	۹۶/۲۱	۳۳/۴۴	۳۶/۹۶	۶۲/۵	۶۲/۱۲	۲۲/۳۸	۲۵/۴۹	۱۵	
	۱۶۷۱/۴۸	۹۰/۶۲	۹۲/۴۲	۳۶/۳۴	۳۹/۰۲	۶۵/۶۲	۶۲/۱۲	۲۴/۲۲	۲۶/۵۴	۱۶	
	۱۶۸۶/۱۲	۹۳/۷۵	۹۶/۲۱	۳۵/۷۵	۳۸/۰۸	۶۵/۶۲	۶۲/۱۲	۲۴/۰۳	۲۶/۰۴	۲۱	
	۱۶۱۰/۴۵	۸۱/۲۵	۷۸/۷۹	۳۳/۱۶	۳۷/۲۴	۶۲/۵	۶۶/۶۷	۲۲/۷۵	۲۶/۵۲	۱۴	
	۱۱۶۹/۲۲	۶۲/۵	۶۸/۱۸	۲۴/۹۷	۲۷/۳۰	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۷/۱۹	۱۹/۴۴	۹-۱۷	
	۱۲۲۹/۴۵	۶۸/۷۵	۷۲/۷۳	۲۷/۰۳	۳۰/۴۰	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۸/۷۵	۲۱/۹۵	۱۰-۱۴	
	۱۲۰۹/۰۱	۶۸/۷۵	۷۲/۷۳	۲۵/۱۹	۲۸/۲۳	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۷/۴۷	۲۰/۳۶	۱۱-۱۴	
	۱۱۸۱/۷۷	۶۵/۶۲	۶۵/۱۵	۲۵/۵۰	۲۷/۳۳	۴۳/۷۵	۴۴/۷۰	۱۷/۴۷	۱۹/۱۵	۸-۲۲	
۹-۱۷	۱۱۷۷/۷۳	۶۲/۵	۶۵/۱۵	۲۵/۴۴	۲۷/۵۲	۴۳/۷۵	۴۴/۷۰	۱۷/۴۷	۱۹/۴۴	۹-۲۲	۲
	۱۲۰۱/۲۳	۶۸/۷۵	۶۷/۴۲	۲۵/۶۳	۲۷/۶۷	۴۳/۷۵	۴۴/۷۰	۱۷/۷۵	۱۹/۵۵	۱۴-۲۲	
	۱۱۸۱/۵۶	۵۶/۲۵	۵۸/۳۳	۲۴/۵۹	۲۸/۶۸	۴۶/۸۷	۴۹/۲۴	۱۷/۰۹	۱۹/۲۵	۸-۲۱	
	۱۱۸۲/۸۵	۶۵/۶۲	۶۴/۳۹	۲۵/۰۳	۲۷/۰۲	۴۳/۷۵	۴۵/۴۵	۱۷/۱۹	۱۹/۱۵	۸-۱۷	
	۸۸۱/۲۱	۵۰	۵۱/۵۲	۲۰/۳۸	۲۲/۱۱	۲۸/۱۲	۳۱/۸۲	۱۳/۹۷	۱۵/۵۸	۸-۱۵-۲۳	
	۸۶۸/۳۰	۵۰	۵۲/۲۷	۱۹/۱۹	۲۱/۱۱	۳۱/۳۵	۲۹/۵۵	۱۳/۵۶	۱۴/۷۰	۲۱-۱۷-۸	
	۸۹۷/۵۷	۵۳/۱۲	۵۵/۳۰	۲۰/۸۴	۲۱/۹۰	۳۱/۳۵	۲۹/۵۵	۱۴/۴۴	۱۵/۵۵	۲۱-۱۸-۸	
	۸۹۵/۹۳	۵۳/۱۲	۵۵/۳۰	۲۰/۷۸	۲۱/۹۳	۳۱/۳۵	۲۹/۵۵	۱۴/۲۵	۱۵/۳۴	۲۳-۲۱-۸	
	۹۲۹/۵۳	۵۰	۵۳/۰۳	۱۹/۰۹	۲۰/۱۸	۳۷/۵	۳۷/۸۸	۱۰/۳۴	۱۰/۶۸	۱-۱۱-۱۴	
	۸۹۳/۷۳	۵۰	۶۱/۳۶	۱۹/۳۸	۲۰/۸۱	۳۱/۳۵	۳۱/۸۲	۱۰/۴۴	۱۱/۰۱	۱-۱۵-۱۷	
	۸۶۰/۸۶	۵۰	۵۲/۲۷	۱۹/۸۱	۲۰/۹۴	۳۱/۳۵	۳۱/۸۲	۱۱/۱۳	۱۱/۲۲	۲-۱۱-۱۴	
	۸۶۷/۹۳	۵۰	۵۲/۲۷	۲۰/۰۶	۲۱/۱۸	۳۱/۳۵	۳۱/۸۲	۱۱/۶۳	۱۲/۰۷	۲-۱۵-۱۷	
	۸۹۰/۳۵	۵۰	۵۶/۸۲	۲۰/۴۱	۲۱/۶۹	۳۱/۳۵	۳۲/۵۸	۱۱/۱۳	۱۱/۶۲	۵-۸-۱۶	
	۸۸۱/۶۹	۵۰	۵۶/۸۲	۳۸/۱۹	۲۰/۶۸	۳۱/۳۵	۳۲/۵۸	۱۰/۵۳	۱۱/۰۶	۶-۸-۱۶	
	۶۳۹/۶۴	۵۰	۴۰/۹۱	۱۵/۶۳	۱۶/۳۹	۱۸/۷۵	۲۱/۲۱	۸/۱۹	۸/۳۶	۷-۱۱-۱۴	
	۷۲۱/۶۲	۵۰	۴۱/۶۷	۱۵/۲۲	۱۶/۳۷	۲۵	۲۸/۰۳	۷/۹۱	۸/۴۳	۷-۱۵-۱۷	
	۹۸۷/۸۹	۵۰	۵۳/۰۳	۲۱/۳۱	۲۳/۱۲	۳۷/۵	۳۷/۸۸	۱۵/۰۳	۱۷	۸-۱-۲۱	
۱۰۴۰/۶۷	۵۰	۵۲/۲۷	۲۰/۰۹	۲۲/۵۳	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۴/۳۴	۱۶/۹۳	۸-۱۱-۱۵		
۷-۱۱-۱۴	۱۰۴۸/۴۵	۵۰	۵۲/۲۷	۲۱/۴۱	۲۳/۵۷	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۵/۰۳	۱۷/۲۶	۸-۱۱-۱۶	۳
	۹۱۲/۰۷	۵۰	۵۲/۲۷	۲۰/۰۶	۲۱/۷۲	۳۱/۳۵	۳۴/۰۹	۱۳/۷۸	۱۵/۴۱	۸-۱۱-۲۱	
	۱۰۴۱/۵۷	۵۰	۵۲/۲۷	۲۰/۴۴	۲۲/۵۱	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۴/۶۶	۱۶/۹۳	۸-۱۲-۱۵	
	۱۰۴۳/۳۲	۵۰	۵۲/۲۷	۲۱/۱۶	۲۲/۵۱	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۵/۰۳	۱۶/۹۷	۸-۱۲-۱۶	
	۹۱۳/۲۷	۵۰	۵۲/۲۷	۲۰/۴۷	۲۱/۷۹	۳۱/۳۵	۳۴/۰۹	۱۴/۰۶	۱۵/۴۱	۸-۱۲-۲۱	
	۱۰۳۴/۲۰	۵۰	۵۲/۲۷	۲۰/۰۶	۲۱/۹۳	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۴/۱۶	۱۶/۲۲	۸-۱۵-۱۷	
	۱۰۴۰/۷۴	۵۰	۵۲/۵۲	۲۰/۸۱	۲۲/۵۸	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۰۳/۱۵	۱۷/۰۷	۸-۱۵-۱۸	
	۸۸۱/۲۱	۵۰	۵۲/۵۲	۲۰/۳۸	۲۲/۱۱	۲۸/۱۲	۳۱/۸۲	۱۳/۹۷	۱۵/۵۸	۸-۱۵-۲۳	
	۱۰۴۶/۹۲	۵۰	۵۲/۲۷	۲۱/۵۹	۲۳/۳۶	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۵/۱۳	۱۷/۰۵	۸-۱۶-۱۷	
	۱۰۴۵/۱۲	۵۰	۵۲/۲۷	۲۱/۲۸	۲۲/۷۲	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۵/۳۴	۱۷/۰۵	۸-۱۶-۱۸	
	۹۰۰/۴۷	۵۰	۵۲/۲۷	۲۱/۰۳	۲۲/۴۴	۳۱/۳۵	۳۱/۸۲	۱۴/۴۴	۱۵/۷۷	۸-۱۶-۲۳	
	۱۰۱۱/۹۳	۵۰	۵۳/۰۳	۲۱/۰۹	۲۲/۳۷	۴۰/۶۲	۴۰/۱۵	۱۴/۹۴	۱۶/۳۳	۸-۱۶-۲۷	
	۱۰۴۲/۹۹	۵۰	۵۲/۲۷	۲۰/۹۷	۲۲/۹۳	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۴/۷۵	۱۶/۸۳	۹-۱۳-۱۷	
	۱۱۰۸/۶۶	۶۸/۷۵	۵۶/۸۲	۲۲/۱۹	۲۴/۱۱	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۵/۵۳	۱۷/۴۵	۱۰-۱۳-۱۷	
	۱۰۶۲/۳۵	۵۰	۵۶/۸۲	۲۱/۱۹	۲۳/۱۰	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۴/۸۴	۱۶/۸۸	۱۳-۱۵-۱۷	



ادامه جدول (۳): مقدار توابع هدف در حالت بهینه شدن یکی از آنها و نتایج بهینه نهایی

									۸-۱۱-۱۵-
									۲۲
									۸-۱۲-۱۵-
									۲۲
									۸-۱۵-۱۷-
	۷۱۴/۴۷	۴۳/۷۵	۴۵/۴۵	۱۷/۰۳	۱۸/۴۵	۲۱/۸۷	۲۲/۷۳	۱۱/۸۱	۱۳/۳۰
	۷۱۴/۵۶	۴۳/۷۵	۴۵/۴۵	۱۷/۴۷	۱۸/۶۰	۲۱/۸۷	۲۲/۷۳	۱۲/۰۹	۱۳/۰۸
	۷۴۹/۶۸	۴۰/۶۲	۴۶/۲۱	۱۷/۵۰	۱۸/۶۵	۲۱/۸۷	۲۷/۲۷	۱۲/۰۹	۱۳/۳۸
	۷۱۷/۳۶	۴۳/۷۵	۴۵/۴۵	۱۷/۶۹	۱۸/۷۸	۲۱/۸۷	۲۷/۷۳	۱۲/۲۲	۱۳/۳۸
	۷۵۰/۳۳	۴۳/۷۵	۴۶/۲۱	۱۷/۲۲	۱۸/۲۰	۲۱/۸۷	۲۷/۲۷	۱۱/۸۱	۱۲/۸۱
	۷۴۹/۴۷	۴۰/۶۲	۴۶/۲۱	۱۷/۴۴	۱۸/۶۰	۲۱/۸۷	۲۷/۲۷	۱۲/۰۹	۱۳/۳۸
۸-۱۱-	۷۳۵/۵۰	۴۶/۸۷	۴۵/۴۵	۱۷/۵۹	۱۸/۴۸	۲۵	۲۷/۷۳	۱۲/۴۱	۱۳/۳۸
۱۵-۲۲	۷۴۱/۵۷	۴۶/۸۷	۴۵/۴۵	۱۸/۱۹	۱۹/۲۷	۲۵	۲۷/۷۳	۱۲/۶۹	۱۳/۸۰
	۷۸۲/۵۲	۳۷/۵	۴۱/۶۷	۱۶/۸۸	۱۸/۱۹	۲۵	۳۳/۳۳	۱۱/۸۱	۱۳/۱۹
	۸۱۴/۴۸	۴۶/۸۷	۵۱/۵۲	۱۷/۱۶	۱۸/۰۳	۲۸/۱۲	۲۸/۷۹	۱۱/۸۱	۱۲/۸۳
	۸۸۰/۷۹	۵۰	۵۵/۳۰	۱۷/۶۶	۱۸/۴۹	۳۱/۲۵	۳۲/۵۸	۱۲	۱۲/۸۱
	۷۴۸/۶۳	۳۷/۵	۴۱/۶۷	۱۷/۱۳	۱۸/۴۲	۲۵	۳۳/۳۳	۱۱/۹۰	۱۳/۳۵
	۱۰۹۶/۳۸	۵۳/۱۲	۶۱/۳۶	۱۹/۱۳	۲۰/۳۷	۳۷/۵	۴۵/۴۵	۱۴/۲۵	۱۵/۸۸
									۱-۹-۱۷-۲۰
									۱-۹-۱۷-۲۱
									۷-۱۵-۱۷-
									۲۷
									۲-۹-۱۷-۲۰
									۷-۹-۱۷-۲۰



برقرار شده است. در این بررسی‌ها تعداد حسگرها بین ۱ تا ۴ عدد متغیر می باشد و تعداد نقاط ورود آلودگی همزمان بین یک تا دو نقطه در نظر گرفته شده است. همه حالت‌های مختلف قرارگیری حسگرها و ورود آلودگی تحلیل شده اند. پاسخ بهینه برای هر چهار تابع هدف تعریف شده در این مطالعه، منحصر بفرد می باشد. به طوری که برای هر تعداد حسگر مورد نظر، با توجه به دو حالت ورود آلودگی و چهار تابع هدف حداقل ۸ دسته جواب وجود دارد. اما برای رسیدن یک دسته جواب برای هر تعداد حسگر، به هر تابع هدف یک ضریب اهمیت تخصیص داده شده است، که با استفاده از روابط تعیین شده و مقادیر تابع هدف در حالت‌های بهینه، رسیدن به یک جواب منحصر بفرد تحقق یافته است.

#### تقدیر و تشکر

از همکاری و مساعدت مدیران و کارشناسان شرکت آب و فاضلاب شهری استان خراسان جنوبی و بخصوص جناب آقای مهندس مرادی تقدیر و تشکر می شود.

همانگونه که ملاحظه می شود در این روش در صورت وجود چندین گزینه برای بهینه مطلق، تمامی آنها شناسایی می شوند. از بین گزینه‌های بهینه متعدد بدست آمده برای هر تعداد حسگر، با لحاظ یک ضریب برای هر تابع هدف و مرتبط کردن آن با مقدار توابع هدف برای هر تعداد حسگر یک گزینه بهینه واحد بدست آمده است. گزینه بهینه بدست آمده برای چهار حسگر، با اختلاف ناچیزی نسبت به گزینه بهتر قبل از خود انتخاب شده است و این امکان فراهم می شود که اگر در صورت وجود مشکلات اجرایی در حالت بهینه نهایی، بتوان گزینه دیگری را برگزید. در حالی که برای سه حسگر اختلاف بین بهترین گزینه و گزینه بعد از آن زیاد است و بهتر است همان چیدمان بهینه بدست آمده، نهایی شود. همچنین یک چیدمان که برای یک تابع هدف بهینه است، ممکن است در سایر توابع هدف نیز مقدار مناسب و قابل قبولی داشته باشد و یا ممکن است که برای توابع هدف دیگر مقادیری دور از مقدار بهینه داشته باشد. در رابطه ذکر شده این بحث، لحاظ شده است.

#### نتیجه گیری

در این مقاله، جهت تعیین نقاط مناسب برای نصب حسگر، ارتباط پویا بین نرم افزار ایپانت با نرم افزار متلب

#### منابع

- Afshar, A and M.A. Mariño. 2012. Multi-objective coverage-based ACO model for quality monitoring in large water networks. *Water resources management*, 26(8):2159-2176.
- Banik, B. K., L. Alfonso., C. Di Cristo and A. Leopardi. 2017. Greedy algorithms for sensor location in sewer systems. *Water*, 9(11): 856.
- Berry, J.W., L. Fleischer., W. E. Hart., C. A. Phillips and J. P. Watson. 2005. Sensor placement in municipal water networks. *Water Resources Planning and Management*, 131(3): 237-243.
- Chang, N. B., N. P. Pongsanone., and A. Ernest. 2012. A rule-based decision support system for sensor deployment in small drinking water networks. *Cleaner Production*, 29: 28-37.
- Di Nardo, A., M. Di Natale, M. Guida and D. Musmarra. 2013. Water network protection from intentional contamination by sectorization. *Water resources management*, 27(6): 1837-1850.
- He, G., T. Zhang., F. Zheng and Q. Zhang 2018. An Efficient Multi-Objective Optimization Method for Water Quality Sensor Placement within water distribution systems considering contamination probability variations. *Water Research*.



Housh, M and Z. Ohar 2017. Integrating physically based simulators with event detection systems: Multi-site detection approach. *Water research*, 110: 180-191.

Khorshidi, M. S., M. R. Nikoo and M. Sadegh. 2018. Optimal and objective placement of sensors in water distribution systems using information theory. *Water research*, 143: 218-228.

Klise, K. A., C. A. Phillips and R. J. Janke. 2013. Two-tiered sensor placement for large water distribution network models. *Infrastructure Systems*, 19(4): 465-473.

Lee, B. H., and R. A. Deininger. 1992. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system. *Environmental Engineering*, 118(1): 4-16.

Mac Kenzie, W. R., N. J. Hoxie., M. E. Proctor., M. S. Gradus., K. A. Blair., D. E. Peterson., N. B. Chang., N. P. Pongsanone and A. Ernest. 2012. A rule-based decision support system for sensor deployment in small drinking water networks. *Cleaner Production*, 29: 28-37.

Mukherjee, R., U. M. Diwekar., and A. Vaseashta 2017. Optimal sensor placement with mitigation strategy for water network systems under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 103: 91-102.

Ostfeld, A., A. Kessler and I. Goldberg. 2004. A contaminant detection system for early warning in water distribution networks. *Engineering Optimization*. 36(5): 525-538.

Palleti, V. R., S. Narasimhan., R. Rengaswamy., R Teja and S. M. Bhallamudi. 2016. Sensor network design for contaminant detection and identification in water distribution networks. *Computers & Chemical Engineering*, 87: 246-256.

Rathi, S and R.Gupta. 2014. Monitoring stations in water distribution systems to detect contamination events. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 20(2): 142-150.

Rathi, S and R. Gupta. 2016. A simple sensor placement approach for regular monitoring and contamination detection in water distribution networks. *KSCE Civil Engineering*, 20(2): 597-608.

Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2: users manual*.

Sankary, N and A. Ostfeld. 2017. Scaled multiobjective optimization of an intensive early warning system for water distribution system security. *Hydraulic Engineering*, 143(9): 04017025.

Yan, X., W. Gong., and Q. Wu 2017. Contaminant source identification of water distribution networks using cultural algorithm. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 29(24): e4230.



## **Optimization of water quality sensors placement in water distribution networks to detect contamination entrance from several nodes, simultaneously**

**Shokoofe shafiei<sup>1</sup>, Ali nasirian<sup>2</sup>, Hossein Nasirpour<sup>3</sup>**

### **Abstract**

Water distribution networks are critical infrastructure that should be protected against deliberate and accidental attacks. The quality of water is investigated in the treatment plant; however, it can be significantly changed during transmission from the treatment plant to consumers. The contamination entry place is unpredictable and contamination can be entered from several locations simultaneously. Water quality sensors and the pollution warning system can detect the contamination. The alarm system function is depends on the number of sensors installed on the network and their location. In this research, contamination is entered in one or two nodes and the number of sensors installed in the network is one to four. In addition, four objective functions were considered to optimize the locations and the number of sensors. The network was analyzed dynamically. For each sensor placement, the consumed contamination water and the contaminated area are evaluated. The method was able to identify the best location for the different objective function.

**Keywords: Water distribution networks, deliberate entry of contamination, number of entry points of contamination, pollution detection sensor**

---

<sup>1</sup> M.S. student in civil engineering, engineering and management of water resources University of Birjand, Email address shokoofeshafiei91@birjand.ac.ir

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Birjand; Email address a.nasirian@birjand.ac.ir (Corresponding author)

<sup>3</sup> M.S. student in civil engineering, engineering and management of water resources University of Birjand, Email address: hossein.nasirpour@yahoo.com