

# بهینه‌سازی کیفیت آب در شبکه‌های توزیع بر اساس وضعیت دور پمپ، نحوه تزریق کلر و نوع روش تحلیل

نادیا بابایی<sup>۱</sup>، مسعود تابش<sup>۲</sup>، سارا نظیف<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-آب، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران  
(نویسنده مسئول) nadia\_babaei@ut.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیر ساخت‌های عمرانی،  
پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت ۹۳/۳/۲۱ پذیرش ۹۳/۱۲/۱۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام شود:

Babaei, N., Tabesh, M. & Nazif, S., 2017, "Optimization of water quality in distribution networks based on variable chlorine injection regime, pump speed, and analytical methods Used", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 28 No. 2 (108), 55-64. (In Persian)

## چکیده

امروزه ارتقای کیفیت و اطمینان‌پذیری شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی در راستای تضمین بهره‌برداری بهینه از آنها، امری مهم تلقی می‌شود. به این منظور در این تحقیق برای تأمین اهداف حداقل نمودن هزینه کلرزی و حداکثر نمودن قابلیت اطمینان کیفیت آب در شبکه‌های توزیع، بهینه‌سازی دوهدفه عملکرد این شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان بررسی شد. با منظور نمودن حالات مختلف، تأثیر ثابت یا متغیر بودن نحوه تزریق کلر و وضعیت دور پمپ با در نظر گرفتن انواع روش‌های تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا (DDSM) و مبتنی بر فشار (HDSM)، مورد بحث واقع شد. نتایج بررسی نشان داد که استفاده از پمپ دور متغیر و نرخ متغیر تزریق کلر در مقایسه با حالت ثابت آنها منجر به کاهش هزینه کلرزی و تأمین قابلیت اطمینان کیفی در حد قابل قبول بدون نیاز به پمپ تقویتی می‌شود. همچنین نتایج مقایسه کاربرد انواع روش تحلیل هیدرولیکی نشان می‌دهد که استفاده از روش تحلیل مبتنی بر فشار، کاهش هزینه کلرزی و افزایش قابلیت اطمینان کیفی را به دنبال خواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه‌های توزیع آب، بهره‌برداری بهینه، الگوریتم جامعه مورچگان، هزینه کلرزی، قابلیت اطمینان کیفی

## ۱- مقدمه

امروزه طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری شبکه‌های توزیع آب تابع تأمین اهداف چندگانه‌ای نظیر کاهش هزینه‌های جانبی و افزایش کیفیت عملکرد و قابلیت اطمینان آنها می‌باشد. بنابراین به منظور بهبود کارایی این شبکه‌ها و افزایش قدرت انتخاب در شرایط مختلف برای تصمیم‌گیرندگان، نیاز به بهینه‌سازی چندهدفه در مقایسه با بهینه‌سازی تک‌هدفه بیش از گذشته مورد توجه واقع شده است. یکی از موارد حائز اهمیت که شبکه‌های توزیع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد، شرایط کلرزی است. تزریق کلر در تصفیه‌خانه‌ها و منابع آب آشامیدنی معمولاً فقط در یک نقطه، قبل از ورود آب به شبکه صورت می‌گیرد و این امر باعث وجود غلظت بیش اندازه کلر باقیمانده در گره‌های نزدیک به منابع کیفی و عدم وجود میزان کلر باقیمانده مناسب در گره‌های انتهایی شبکه در برخی از ساعات می‌شود، در نتیجه نیاز به منبع یا منابع کیفی اضافی

کاملاً مشهود است. لذا با افزودن تعداد منابع کیفی به منظور تزریق کلر، بهینه‌سازی میزان تزریق کلر باید در راستای کم کردن هزینه کلر مصرفی در شبکه انجام گیرد و قابلیت اطمینان کیفیت آب هم به صورت مطلوب تأمین شود. در گذشته مطالعاتی در این زمینه انجام شده است که نمونه‌هایی از آنها توضیح داده خواهد شد. طبق استاندارد شماره ۱۰۵۳، حداقل کلر آزاد باقیمانده پس از زمان تماس کافی برای pH بین ۶ تا ۸، برابر با ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته می‌شود و همچنین طبق نشریه شماره ۳-۱۱۷ بازنگری اول، حداقل و حداکثر مجاز کلر آزاد به ترتیب برابر (۰/۲ تا ۰/۴) تا (۱/۲ تا ۰/۸) بر حسب میلی‌گرم در لیتر، توصیه شده است (The Standard 1997; Vice President 2013). همچنین این مقادیر در آخرین ویرایش مربوط به استانداردهای آب

## ۲- روش تحقیق

روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی تزریق کلر در شبکه توزیع آب با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان کیفی، در ادامه ارائه می‌شود.

### ۲-۱- مدل بهینه‌سازی

با توجه به اهمیت تعیین توابع هدف، متغیرهای تصمیم، قیود و پارامترهای پیشنهادی برای مسئله بهینه‌سازی در این تحقیق، این موارد به شرح زیر است:

تابع هدف کاهش هزینه کلر زنی به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود

$$\min E \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^T Q_{jk} C_{jk} \quad (1)$$

که در آن

M تعداد تانک‌ها و مخازن تزریق کلر، T تعداد زمان‌های تحلیل هیدرولیکی (۲۴ ساعت)،  $Q_{jk}$  دبی خروجی از تانک یا مخزن تزریق j در زمان k و  $C_{jk}$  میزان تزریق کلر در تانک یا مخزن تزریق j در زمان k است.

برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان کیفی با توجه به تغییرات اعمال شده در رابطه مورد استفاده در پژوهش گوپتا و همکاران از رابطه ۲ استفاده می‌شود (Gupt et al. 2009)

$$\max R = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^T b_{ik} Q_{ik}^{req} \right) / \left( \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^T Q_{ik}^{req} \right) \quad (2)$$

که در آن

$Q_{ik}^{req}$  نرخ تقاضای آبی در زمان k،  $b_{ik}$  از محور قائم شکل ۱

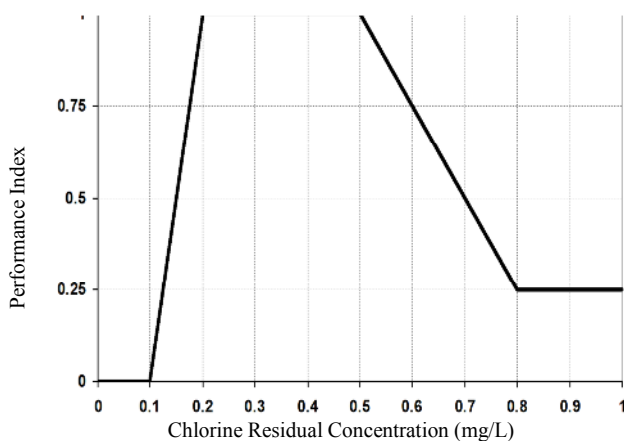


Fig. 1. Penalty curve of the residual free Chlorine (Coelho 1996) - منحنی جریمه برای کلر آزاد باقیمانده (Coelho 1996)

آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی<sup>۱</sup>، به ترتیب ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر توصیه شده است (WHO 2003).

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد Bocelli et al. در سال ۱۹۹۸ توانستند در یک شبکه نمونه، با استفاده از بهینه‌سازی خطی به وسیله کمینه کردن میزان تزریق در بوستر پمپ‌های تزریق کلر در زمان‌های مختلف، میزان کلر باقیمانده در نقاط مختلف شبکه آب را در محدوده مجاز مورد نظر قرار دهند. اما مسئله قابلیت اطمینان را در کار خود لحاظ نکردند. Ostfeld & Slalmmons در سال ۲۰۰۶ برنامه‌ریزی پمپ و بوستر پمپ‌های تزریق کلر را مورد بررسی قرار دادند، اما قابلیت اطمینان را در تحقیق خود لحاظ نکردند. Gibbs et al. در سال ۲۰۱۰ مسئله تزریق دز کلر در ایستگاه‌های تقویتی را همراه با برنامه‌ریزی روزانه پمپ برای یک سیستم واقعی Woronora در سیدنی استرالیا انجام دادند. آنها هم مسئله قابلیت اطمینان را در کار خود لحاظ نکردند. Tabesh et al. در سال ۲۰۱۱ میزان تزریق کلر در محل‌های تزریق را با تلفیق مدل تحلیل هیدرولیکی و کیفی و نیز مدل بهینه‌سازی غیرخطی الگوریتم ژنتیک بهینه کردند و بهترین مکان ایستگاه‌های تزریق کلر و میزان تزریق در آنها را در شبکه‌های توزیع آب تعیین کردند. اما آنها در تحقیق تک هدفه خود با الگوریتم ژنتیک، مسئله قابلیت اطمینان را لحاظ نکردند. Brod et al. در سال ۲۰۰۵ طرح توسعه سیستم توزیع آب شهر نیویورک را به‌عنوان مطالعه موردی بررسی کردند. در تحقیق آنها سعی شده است تا تزریق کیفی تنها از نقطه ورودی به شبکه انجام شود و عمل بهینه‌سازی بر روی مقدار این تزریق صورت گیرد. آنها هم مانند سایر کارهای پیشین، مسئله قابلیت اطمینان را در کار خود در نظر نگرفته بودند. Kurek & Ostfeld در سال ۲۰۱۲ با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی هزینه انرژی پمپاژ پرداختند و سعی نمودند کیفیت آب را در بازه استاندارد تأمین کنند اما هزینه کلر زنی و همچنین بحث بر روی نحوه تزریق کلر، وضعیت دور پمپ و نوع روش تحلیل را بررسی نکردند.

در این تحقیق در جهت تکمیل مطالعات پیشین، به بهینه‌سازی توأم میزان تزریق کلر و قابلیت اطمینان کیفی پرداخته شده و در این راستا شبکه مورد مطالعه با نرم‌افزار شبیه‌ساز هیدرولیکی و کیفی EPANET شبیه‌سازی شد و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز مورچگان تهیه شده در محیط ++C مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، نتایج در حالات مختلف وضعیت‌های دور پمپ و نحوه تزریق کلر با در نظر گرفتن انواع روش‌های تحلیل، مورد بحث قرار گرفت.

<sup>1</sup> World Health Organization (WHO)

تحلیل هیدرولیکی از روش گرادیان و برای تحلیل کیفی از روش زمانمند لاگرانژی (TDM) پیروی می‌کند. در این تحقیق، تحلیل هیدرولیکی شبکه به صورت دینامیکی در دوره زمانی ۲۴ ساعته انجام شد. همچنین در تحلیل کیفی، در مرحله تزریق کلر با دز ثابت برای تمامی ساعات، الگوی زمانی<sup>۱</sup> مربوط به تزریق ماده شیمیایی در شبکه برای تمامی ساعات برابر با یک است، اما در مرحله تزریق کلر با دز متغیر، هر شبانه روز به دوره‌های یک ساعته تقسیم‌بندی شده است. میزان تزریق جهت افزایش دقت محاسبات با گام‌های ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد. در این تحقیق به منظور اطمینان بیشتر برای از بین بردن تأثیر اولیه کلر زنی در نتایج، مدت زمان شبانه روز ششم (از ساعت ۱۲۰ تا ۱۴۴) در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای تعیین رابطه بین فشار و دبی خروجی از گره‌ها به منظور شبیه‌سازی واقعی عملکرد شبکه در روش تحلیل مبتنی بر فشار، از رابطه پژوهش Wagner et al. در سال ۱۹۸۸ به صورت رابطه ۵ استفاده شد

$$\begin{cases} Q_j^{avl} = Q_j^{req} & H_j \geq H_j^{des} \\ Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left( \frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right)^2 & H_j^{min} < H_j < H_j^{des} \\ Q_j^{avl} = 0 & H_j \leq H_j^{min} \end{cases} \quad (5)$$

که در آن

$Q_j^{req}$  دبی درخواستی در گره،  $Q_j^{avl}$  دبی قابل دسترس در گره،  $H_j$  هد موجود در گره،  $H_j^{min}$  هد حداقل در گره که در صورت کمتر بودن مقدار هد موجود در گره از این مقدار، دبی خروجی از گره برابر صفر می‌باشد،  $H_j^{des}$  هد بهره‌برداری، که در صورت بیشتر بودن هد موجود در گره از این مقدار دبی خروجی از گره برابر با دبی درخواستی می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که برای تبدیل تحلیل DDSM در نرم‌افزار EPANET به HDSM از برنامه نوشته شده در محیط ++C استفاده شد.

### ۲-۳- حل مسئله بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌ساز مورد استفاده در این تحقیق، الگوریتم مورچگان دوهدفه نوشته شده در محیط ++C است که مطابق مراحل الگوریتم تحقیق Afshar et al. در سال ۲۰۰۹، عمل می‌کند. در واقع در این تحقیق، مدل هیدرولیکی و کیفیت آب به وسیله نرم‌افزار EPANET تحلیل شد و نتایج به وسیله الگوریتم جامعه مورچگان بررسی و

بر اساس معیار میزان تأمین کیفیت آب در گره تقاضا در محور افقی به دست می‌آید،  $i$  گره تقاضای مورد نظر و  $k$  تعداد بازه‌های زمانی شبیه‌سازی است. لازم به ذکر است که در این تحقیق برای محاسبه قابلیت اطمینان کیفی به روش HDSM، در صورت کسر رابطه ۲ بجای  $Q_{ik}^{req}$  از مقدار  $Q_{ik}^{avl}$  استفاده شده است که منظور از  $Q_{ik}^{avl}$  نرخ جریان در دسترس در مرحله  $k$  است. متغیر تصمیم کیفی و هیدرولیکی به ترتیب میزان تزریق کلر در تمام مخازن و تانک‌های شبکه و همچنین دور پمپ در دوره زمانی ۲۴ ساعته است. در این پژوهش برای کاهش ابعاد فضای جستجو بر اساس پژوهش‌های هاشمی و همکاران از روش مخزن جایگزین استفاده شد که در این صورت متغیر تصمیم هیدرولیکی مسئله در شرایطی که دور پمپ متغیر است، سطح تراز آب در مخزن جایگزین خواهد بود (Hashemi et al. 2012; Hashemi 2010). لذا در این شرایط مقادیر دور متغیر پمپ بر اساس تراز مخزن جایگزین و مطابق با روش برنامه‌ریزی داخلی ایستگاه پمپاژ ارائه شده در پژوهش هاشمی به دست خواهند آمد (Hashemi et al. 2012). در این تحقیق قید فشار به صورت رابطه ۳ به مسئله اعمال شد

$$P_{min} < P_{jk} < P_{max} \quad (3)$$

که در آن

$P_{jk}$  فشار در گره  $j$  در بازه زمانی  $k$  بر حسب متر،  $P_{min}$  حداقل مقدار فشار مجاز برابر ۳۰ متر و  $P_{max}$  حداکثر مقدار فشار مجاز برابر ۵۰ متر برای هر یک از گره‌های شبکه است. همچنین قید بررسی افت سطح تراز تانک‌ها در شبکه به صورت رابطه ۴ در نظر گرفته شد

$$\frac{\left| \sum_{j=1}^{n \tan k} (H_j^{initial} - H_j^{final}) \right|}{\sum_j^{n \tan k} H_j^{final}} \leq \varepsilon \quad (4)$$

که در آن

$H_j^{initial}$  و  $H_j^{final}$  به ترتیب تراز ابتدایی و انتهایی آب در تانک  $j$  بر حسب متر و  $\varepsilon$  مقدار خطای مجاز است که طبق پژوهش‌های هاشمی و مهزاد، برابر عددی نزدیک به صفر (یعنی ۰/۰۵) در نظر گرفته شده است (Hashemi et al. 2012; Mehzaad 2011)

### ۲-۲- مدل شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی شبکه مورد مطالعه در این تحقیق از نرم‌افزار EPANET استفاده شد که به صورت پیش فرض برای

<sup>1</sup> Time Pattern

گرفته شد. همچنین مقدار پارامتر قطعی  $\Phi$  که فاکتور ارزش فرومون است و به مقدار فرومون بستگی دارد، مطابق با محاسبات انجام شده در پژوهش هاشمی، برابر با هزینه زمانی است که تمامی پمپ‌ها در طول روز روشن باشند و میزان آن  $154086240/4$  بر حسب  $m^4/s$  در نظر گرفته شد و در پژوهش یاد شده در تعیین تابع پنالتی به‌کار رفته است (Hashemi 2010). به‌طوری که طبق رابطه ۶ در پژوهش یاد شده، به ازای هر متر افت فشار گره ۶ از ۳۰ متر و به ازای تخطی از قید افت سطح تراز تانک نسبت به مقدار اولیه آن در انتهای روز، مقداری برابر با پارامتر شبه قطعی PEN، بر حسب  $(m^4/s)/m$  به تابع هدف حداقل‌سازی هزینه انرژی مصرفی اضافه می‌شود (Hashemi 2010).

لازم به توضیح است که طبق تحلیل‌های هیدرولیکی ۲۴ ساعته صورت گرفته، گره شماره ۶، گره بحرانی به لحاظ فشار در هر بازه زمانی است. این تابع پنالتی در پژوهش مهزاد هم در نظر گرفته شده است (Mehzad 2011). البته در دو پژوهش نامبرده، چون هدف از محاسبه این دو پارامتر، اعمال جریمه در جهت تامین بهتر قیود فشار و افت سطح تراز تانک‌ها بوده است، پارامتر جریمه در نهایت بصورت عددی بزرگ برای جریمه و حذف جواب‌های نادرست، در کد تدوین شده، وارد شده است که در این تحقیق برای بخش کیفی مسئله هم به صورت جمع عددی بزرگ با تابع هدف هزینه کیفی لحاظ شده تا جواب‌های نادرست از روند برنامه خارج شوند. قید کیفی هم به‌صورت جداگانه در قابلیت اطمینان کیفی لحاظ شده است

$$PEN = \frac{[C(S^{\max}) - C(S^{\min})]}{d} = 154086240 \quad (6)$$

که در آن

PEN مقدار تابع جریمه،  $d$  حداقل میزان افت سطح آب در تانک بوده که در انتهای روز مطابق با پژوهش Zecchin et al. برابر با یک سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (Zecchin et al. 2005).  $C(S^{\min})$  هزینه روزانه حالتی است که تمامی پمپ‌ها خاموش باشند و  $C(S^{\max})$  هزینه روزانه حالتی است که تمامی پمپ‌ها روشن باشند. (لازم به ذکر است که در پژوهش هاشمی، برای تعیین پارامترهای قطعی و شبه قطعی  $\Phi$  و PEN، حاصلضرب  $H.Q$  به نمایندگی از توان مصرفی به‌عنوان هزینه بهینه‌سازی لحاظ شده است (Hashemi 2010).

همچنین در تعیین پارامترهای غیرقطعی الگوریتم، با توجه به حساسیت الگوریتم کلونی مورچگان نسبت به این پارامترها، پس از

خروجی‌های الگوریتم جامعه مورچگان مجدداً به EPANET وارد شد و این روند تا همگرایی به سمت جواب بهینه تکرار شد. از جمله دلایل انتخاب الگوریتم مورچگان برای این تحقیق، سادگی، سرعت مناسب، عملکرد مطلوب و همچنین عدم وجود مطالعات کافی بر روی بهینه‌سازی چندهدفه شبکه‌های توزیع آب با استفاده از این الگوریتم بود.

### ۳- مطالعه موردی

برای ارزیابی روش ارائه شده در این تحقیق، از شبکه موسوم به Anytown استفاده شد که این شبکه برای اولین بار توسط والسکی و همکاران، ارائه شده و از سوی تعدادی از محققان دیگر، از جمله Murphy et al. در سال ۱۹۹۴ و Walski et al. در سال ۱۹۸۷ هم مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۲ شمای کلی شبکه مذکور ارائه شده است. مشخصات مؤلفه‌های این شبکه در پژوهش Hashemi در سال ۲۰۱۰ آورده شده است. برای محاسبه هزینه انرژی مصرفی از مقادیر تعرفه انرژی پژوهش آستفد و توبالزو، استفاده شد و قیمت کلر با توجه به مراجع مختلف برای هر کیلوگرم کلر مصرفی، یک دلار در نظر گرفته شد (Ostfeld & Tubaltzev 2008; Irans's industrid 2012).

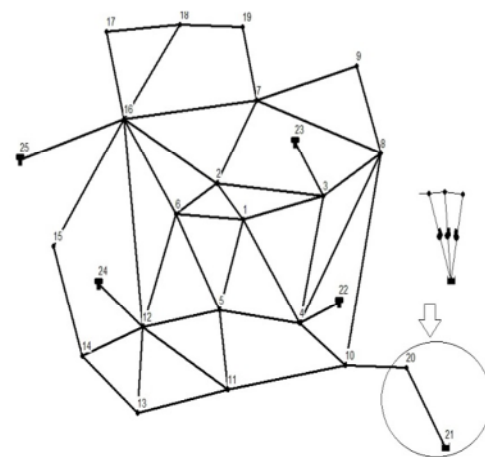


Fig. 2. General schematic of the Anytown Water Distribution Network  
شکل ۲- شمای کلی شبکه آبرسانی Anytown (Murphy et al. 1994)

تزیق کلر در مخازن و تانک‌ها یعنی در ۵ محل تزیق به‌صورت تغلیظی بر حسب میلی‌گرم در لیتر انجام شد و همچنین مطابق با Kurek & Ostfeld در سال ۲۰۱۲، ضریب واکنش حجمی از درجه اول برابر با ۱- بر حسب 1/day و ضریب واکنش از درجه اول با جداره لوله برابر ۰/۲- بر حسب m/day در نظر

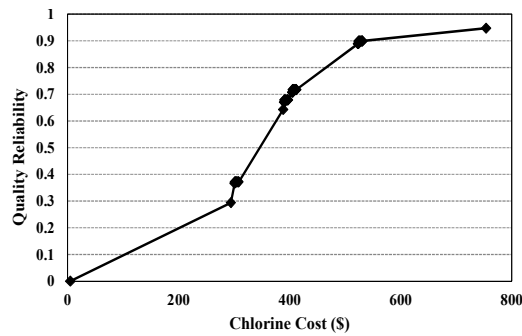


Fig. 3. Pareto curve of the first approach for constant injection and pump rates

شکل ۳- منحنی پارتو مربوط به رویکرد اول در حالت تزریق با نرخ ثابت و دور پمپ ثابت

قرار گرفت که نتیجه این حالت در شکل ۴ آورده شده است.

بر اساس آنالیز حساسیت صورت گرفته در این حالت، میزان فرمون اولیه مسیره‌ها برابر با ۳۰۰ و تعداد مورچه‌ها در هر کلونی ۳۰ در نظر گرفته شد و بر اساس روش چانه زنی یونگ، جواب برگزیده (هزینه: ۳۵۴/۶۰۲ دلار و قابلیت اطمینان: ۰/۶۳۴۹) است (Young 1993). همانطور که قابل مشاهده است با افزایش هزینه در کلر زنی، میزان قابلیت اطمینان کیفی هم به تبع آن، افزایش داشته است.

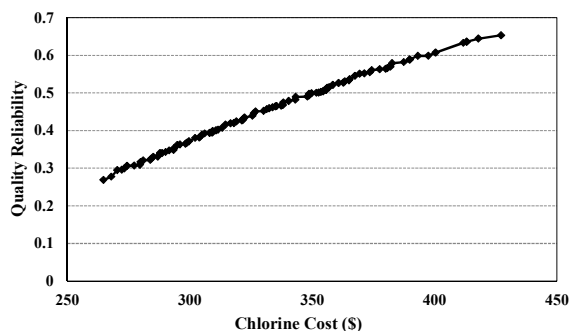


Fig. 4. Pareto curve of the first approach for variable injection and pump rates

شکل ۴- منحنی پارتو مربوط به رویکرد اول در حالت تزریق با نرخ متغیر و دور پمپ متغیر

در این حالت، میزان فرمون اولیه مسیره‌ها برابر با ۳۰۰ و تعداد مورچه‌ها در هر کلونی ۲۰ بوده و بر اساس روش چانه‌زنی یونگ، جواب برگزیده (هزینه: ۳۹۷/۵۱۳ دلار و قابلیت اطمینان: ۰/۵۹۸۸) است (Young 1993). همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش هزینه در کلر زنی، میزان قابلیت اطمینان کیفی هم به تبع آن، افزایش داشته است.

بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه با دز کلر ثابت و دور

انجام آنالیز حساسیت، در نهایت مناسب‌ترین مقدار این پارامترها که منجر به جواب بهینه می‌شود، انتخاب شد. بنابراین با توجه به پژوهش‌های هاشمی، مهزاد و زچین و همکاران و همچنین روند آنالیز حساسیت انجام شده در این تحقیق، تعداد تکرار برابر با ۵۰۰ و تعداد سیکل برابر با ۲۰ و ظرفیت آرشیو خارجی ۱۰۰ و ضرائب وزنی  $\alpha=1$  و  $\beta=0$  و ضریب تخبیر فرمون  $\rho=0.98$  در نظر گرفته شد (Hashemi 2010; Mehzad 2011; Zechin et al. 2005). همچنین با توجه به تعریف رویکردها و حالات متفاوت در این تحقیق و ضرورت انجام آنالیز حساسیت جداگانه برای هر یک از آنها، به منظور دستیابی به پاسخ بهینه مختص هر بخش، میزان فرمون اولیه مسیره‌ها و تعداد مورچه در هر کلونی، در هر مورد، به صورت جداگانه ارائه شد.

#### ۴- نتایج و بحث

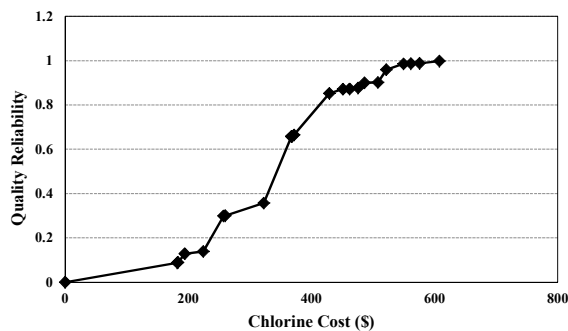
در این بخش نتایج حاصل از این تحقیق ارائه شده است که منحنی‌های پارتوی ارائه شده، بهترین برازش برای نقاط هر منحنی بوده و برای انتخاب بهترین جواب بهینه‌سازی دوهدفه از روی منحنی پارتو، از روش چانه‌زنی یونگ، استفاده شد (Young 1993). در این تحقیق سعی بر آن بوده که با در نظر گرفتن رویکردها و حالات مختلف، هزینه کلر مصرفی کمینه و قابلیت اطمینان کیفی بیشینه شود. لذا دو رویکرد بر اساس نحوه تزریق کلر و دور پمپ و همچنین روش تحلیل مورد بررسی قرار گرفت که در رویکرد اول چهار حالت بر اساس وضعیت دور پمپ و نحوه تزریق کلر در نظر گرفته شد و در رویکرد دوم هم دو حالت بر اساس انواع روش تحلیل مدنظر قرار گرفت که جزئیات آنها در ادامه آورده شده است.

در حالت اول از رویکرد اول، بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه با دز کلر ثابت و دور پمپ ثابت مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن در شکل ۳ قابل مشاهده است.

با بررسی و آنالیز حساسیت صورت گرفته در این حالت، میزان فرمون اولیه مسیره‌ها برابر با ۲۵۰ و تعداد مورچه‌ها در هر کلونی ۱۵ در نظر گرفته شد و بر اساس روش چانه‌زنی یونگ، جواب برگزیده (هزینه: ۴۱۲/۰۰۹ دلار و قابلیت اطمینان: ۰/۷۱) است (Young 1993). همانطور که به وضوح قابل مشاهده است با افزایش هزینه در کلر زنی، میزان قابلیت اطمینان کیفی هم به تبع آن، افزایش داشته است. وضعیت دور پمپ و میزان کلر تزریقی حالت اول، در جواب برگزیده بر اساس روش یونگ، در جدول ۱ آورده شده است. در حالت دوم از رویکرد اول، بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه با دز کلر متغیر و دور پمپ متغیر مورد مطالعه

**Table 1.** Pump rotation and chlorine injection in the first state in the select solution based on Young method  
جدول ۱- وضعیت دور پمپ و میزان کلر تزریقی حالت اول، در جواب برگزیده براساس روش یونگ

Time	Amount of chlororine iniecton (mg/L)					Amount of pumps speed		
	Node21	Tank 22	Tank 23	Tank 24	Tank 25	Pump 1(rpm)	Pump 2(rpm)	Pump 3(rpm)
1	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	1	1
2	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	0	1
3	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	1	1
4	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	1	1
5	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	1	0
6	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	0	0
7	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	1	0
8	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	0	1
9	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	0	0
10	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	1	1
11	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	0	1
12	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	0	1
13	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	0	0
14	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	0	1
15	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	0	1
16	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	1	0
17	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	0	1
18	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	1	0
19	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	1	0
20	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	0	0
21	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	0	0
22	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	1	1
23	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	1	0	0
24	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	0	0
25	0.35	0.34	0.27	0.4	0.07	0	1	1



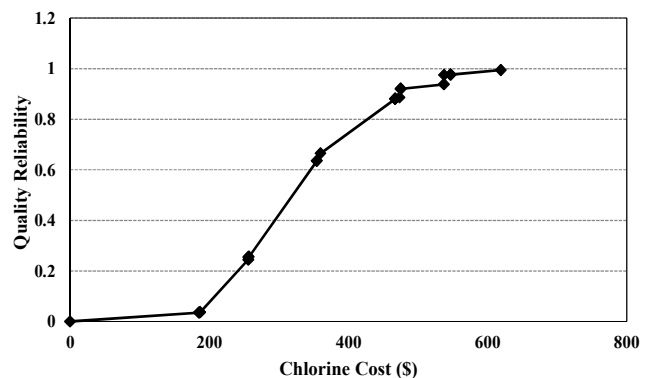
**Fig. 6.** Pareto curve of the first approach for a variable injection rate but a constant pump rotation

شکل ۶- منحنی پارتو مربوط به رویکرد اول در حالت تزریق با نرخ متغیر و دور پمپ ثابت

(هزینه: ۳۶۸/۲۰۵ دلار و قابلیت اطمینان: ۰/۶۵۷۹) است (Young 1995). همانطور که قابل مشاهده است با افزایش هزینه در کلرزی، میزان قابلیت اطمینان کیفی هم به تبع آن، افزایش داشته است. لازم به ذکر است که خروجی‌های برنامه شامل وضعیت‌های مختلف دور پمپ و میزان کلر تزریقی در حالت‌های دوم، سوم و چهارم که مشابه جدول ۱ می‌باشند، در پژوهش بابائی ارائه شده است (Babaei 2013). در چهار حالت شرح داده شده، سعی بر آن بوده که با در نظر گرفتن وضعیت‌های مختلف دور پمپ و نحوه تزریق کلر، ضمن کاهش هزینه کلرزی، قابلیت اطمینان

پمپ متغیر در حالت سوم از رویکرد اول مورد بحث واقع شد که خروجی‌های حاصل از اجرای برنامه، در شکل ۵ آورده شده است. در حالت چهارم از رویکرد اول، بهینه‌سازی میزان تزریق کلر در شبکه با در نظر گرفتن دز کلر متغیر و دور پمپ ثابت انجام شد که نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است.

با بررسی و آنالیز حساسیت انجام شده در این قسمت، میزان فرمون اولیه مسیرها برابر با ۲۵۰ و تعداد مورچه‌ها در هر کلونی ۲۰ و بر اساس روش روش چانه زنی یونگ، جواب برگزیده



**Fig. 5.** Pareto curve of the first approach for a constant injection rate but a variable pump rotation

شکل ۵- منحنی پارتو مربوط به رویکرد اول در حالت تزریق با نرخ ثابت و دور پمپ متغیر

حالت اول، به لحاظ صرف هزینه بیشتر، از یک محدوده‌ای به بعد، نسبت به قابلیت اطمینان کیفی در حالت دوم بیشتر است که می‌توان با اعمال مستقیم قید کیفی به مسئله، در حالت دوم هم به قابلیت اطمینان بالاتری دست یافت که مسلماً این امر نیازمند صرف هزینه بیشتر خواهد بود. اما انتظار می‌رود این هزینه افزوده شده در مقایسه با هزینه حالتی که هم دور پمپ و هم نحوه تزریق کلر ثابت است، کمتر شود. همچنین در محدوده‌ای از حالت اول مشاهده می‌شود که قابلیت اطمینان کیفی به علت ثابت بودن تزریق کلر، سبب می‌شود که کلر باقیمانده در محدوده استاندارد خود قرار نگیرد و با توجه به رابطه ۲ برای محاسبه قابلیت اطمینان کیفی، ضریب رابطه که با توجه به میزان کلر باقیمانده به دست می‌آید، مقدار مناسبی نداشته و بنابراین قابلیت اطمینان کیفی بسیار کم و حتی صفر شده است، که این مسئله تا حد زیادی با در نظر گرفتن حالت دوم می‌تواند برطرف شود. همچنین با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که حالت اول و دوم همپوشانی تقریبی با هم دارند و حالت دوم با وجود صرف هزینه بیشتر در حدود ۰/۴۹۲ دلار، نتیجه آنچنان متفاوتی در قابلیت اطمینان کیفیت (۰/۱۳)، با حالت اول ندارد و در حالت‌های سوم و چهارم نیز، به تبع افزایش هزینه نسبت به حالت اول و دوم، قابلیت اطمینان کیفی هم بیشتر شده است. یعنی رتبه‌بندی کلی میزان هزینه و قابلیت اطمینان کیفی به این صورت است: حالت ۱ > حالت ۲ > حالت ۳.

البته همانطور که گفته شد، با توجه به جدول ۲، نتایج حالت اول و دوم، تقریباً در یک محدوده هستند. همچنین با توجه به شکل ۷، در حالت‌های سوم و چهارم که دور پمپ ثابت و نرخ تزریق کلر متغیر است و یا بالعکس، مشاهده می‌شود که قابلیت اطمینان کیفی در ابتدای نمودار، در مقایسه با حالت‌های اول و دوم، کمتر است. صرف نظر از اختلافات ابتدا و انتها، منحنی‌های پارتو در این حالت‌ها، مشابه با منحنی پارتوی حالت اول که در آن نرخ تزریق کلر و دور پمپ ثابت است، بوده و در بخش اعظم نمودار، با منحنی پارتوی حالت اول و همچنین با یکدیگر، همپوشانی تقریبی دارند. حالت‌های اول، سوم و چهارم، با اختلاف بسیار کم، حالت دوم را هم تحت پوشش خود قرار داده‌اند.

به‌طور کلی با توجه به نتایج ارائه شده مربوط به مقایسه این چهار حالت، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که زمانی که وضعیت نرخ تزریق کلر و دور پمپ، در یک راستا باشند، یعنی هر دو، متغیر یا هر دو ثابت باشند، جواب‌های حاصل از بهینه‌سازی نسبت به زمانی که وضعیت نرخ تزریق کلر و دور پمپ، در دو راستای مختلف باشند که یکی ثابت و دیگری متغیر در نظر گرفته شود، بهتر است. البته با استفاده از پمپ دور متغیر و نرخ متغیر تزریق، انطباق

کیفی در حد مطلوبی تأمین شود که در جدول ۲ نمونه‌ای از نتایج چهار حالت رویکرد اول، که از بین مقادیر نسبتاً نزدیک به یکدیگر، برای مقایسه بهتر، انتخاب شده‌اند، آورده شده است. همچنین در شکل ۷ نمودارهای پارتوی بهینه چهار حالت مختلف رویکرد اول، ارائه شده‌اند که تفاوت ایجاد شده بین فاصله نقاط در نمودارها به علت ماهیت الگوریتم مورچگان و ناشی از انتخاب تصادفی اعداد می‌باشد.

با توجه به شکل ۷ قابل مشاهده است که در حالت دوم که هم دور پمپ متغیر است و هم نرخ تزریق کلر، بازه تغییرات هزینه نسبت به حالت اول، کاهش داشته است که این گویای تأثیر مثبت استفاده از پمپ دور متغیر به لحاظ اقتصادی در کاهش هزینه‌های شبکه حتی هزینه‌های کیفی شبکه است. اما قابلیت اطمینان کیفی در

Table 2. An example of the results for the different states in the first approach

جدول ۲- نمونه‌ای از نتایج حالات مختلف رویکرد اول

Situation	Cholorine cost (\$)	Quality reliability (%)	Amount of cholorine injection				
			Node 21	Tank 22	Tank 23	Tank 24	Tank 25
First state	400	61.6	0.09	0.34	0.27	0.47	0.07
Second state	400.5	61.73	0.27	0.29	0.20	0.28	0.26
Third state	467.3	88.14	0.33	0.25	0.23	0.06	0.22
Fourth state	413.1	74	0.27	0.29	0.26	0.24	0.25

(لازم به ذکر است که برای حالت متغیر، میانگین تزریق کلر در ۲۴ ساعت شبانه روز، درج شده است)

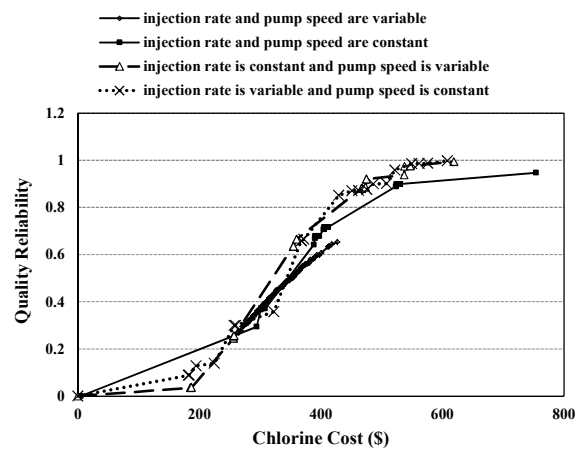


Fig. 7. Pareto curve for the four different states of the first approach

شکل ۷- منحنی پارتو مربوط به چهار حالت مختلف رویکرد اول

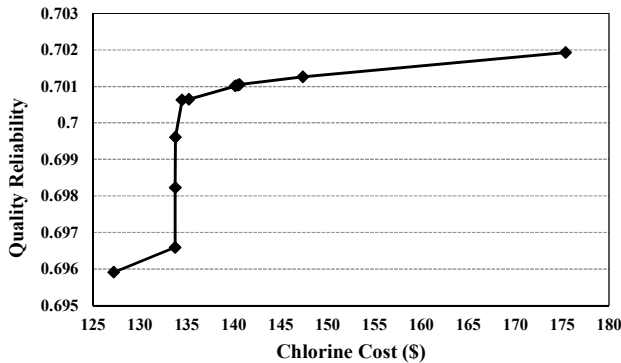


Fig. 9. Pareto curve of the second approach based on the HDSM method

شکل ۹- منحنی پارتو مربوط به رویکرد دوم براساس روش HDSM

(Young 1993). در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش هزینه کلرزنی، قابلیت اطمینان کیفی از ۰/۶۹۶ به ۰/۷۰۲ افزایش یافته است، اما میزان هزینه کلرزنی، در شکل ۹ نسبت به شکل ۸ کمتر است و به ازای این هزینه صرف شده کمتر، قابلیت اطمینان کیفی، همواره در سطح مطلوب‌تری نسبت به شکل ۸ تأمین شده است. از مقایسه مقادیر هزینه و قابلیت اطمینان در شکل‌های ۸ و ۹ که در هر دو وضعیت تزریق کلر و دور پمپ متغیر هستند، مشاهده می‌شود که در روش HDSM که در آن تقاضای گره‌ها با توجه به فشار به دست می‌آید، دبی خروجی از مخازن و تانک‌ها کمتر شده و چون تابع هدف محاسبه هزینه کلر، از حاصلضرب میزان کلر تزریقی در دبی نامبرده به دست می‌آید، با کم شدن میزان کلر مصرفی، هزینه در روش HDSM نسبت به روش DDSM کمتر شده است. همچنین با توجه به رابطه ۲ برای محاسبه قابلیت اطمینان کیفی، در حالت استفاده از روش HDSM، بخشی از میزان قابلیت اطمینان کیفی محاسبه شده، ناشی از تأمین نشدن تقاضا می‌شود و تأمین نشدن فشار مورد نیاز که در رابطه قابلیت اطمینان کیفی لحاظ شده است، با تزریق کلر اضافه‌تر، جبران شده است. به همین دلیل در روش HDSM قابلیت اطمینان کیفی نسبت به روش DDSM بیشتر شده است که برای رفع این مسئله، باید قابلیت اطمینان کیفی در روش HDSM، فارغ از دبی مورد تقاضای شبکه محاسبه شود، تا کمبود ناشی از قابلیت اطمینان هیدرولیکی، توسط قابلیت اطمینان کیفی و مصرف کلر بیشتر جبران نشود و شبکه قبل از بررسی قابلیت اطمینان کیفی به لحاظ هیدرولیکی قابل اطمینان شود. در شکل ۱۰ منحنی‌های پارتوی بهینه نمایش داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ برای مقایسه بهتر، با یکدیگر ارائه شده و تراکم ایجاد شده در شکل ۱۰ در اثر ادغام شکل‌های ۸ و ۹ رخ داده است.

بهتر و مناسب‌تری با شرایط هیدرولیکی و کیفی شبکه توزیع آب حاصل خواهد شد و این حالت نسبت به سایر حالت‌ها، ارجحیت دارد. بنابراین با توجه به بررسی صورت گرفته و توضیحات ارائه شده، باید بر اساس ملاحظات مدیریتی و اولویت‌های تصمیم گیرندگان، نسبت به اتخاذ تصمیم مناسب در حالات مختلف، اقدام نمود.

در رویکرد دوم مقایسه تعامل دو هدفه سناریوی مورد بحث بر اساس نوع روش تحلیل مورد ارزیابی قرار گرفته است که رویکرد اول آن مربوط به روش تحلیل هیدرولیکی و کیفی مبتنی بر تقاضا می‌باشد و نتیجه آن در شکل ۸ ارائه شده است.

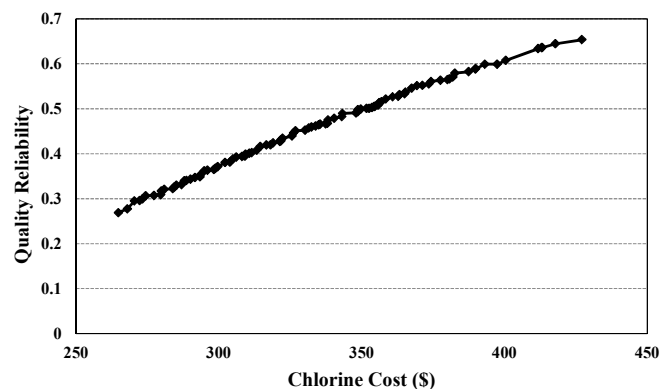


Fig. 8. Pareto curve of the second approach based on the DDSM method

شکل ۸- منحنی پارتو مربوط به رویکرد دوم براساس روش DDSM

با بررسی و آنالیز حساسیت صورت گرفته در این بخش، میزان فرمون اولیه مسیرها برابر با ۳۰۰ و تعداد مورچه‌ها در هر کلونی ۲۰ در نظر گرفته شد. بر اساس روش روش چانه‌زنی یونگ، جواب برگزیده (هزینه: ۳۹۷/۵۱۳ دلار و قابلیت اطمینان: ۰/۵۹۸۸) است (Young 1993). در شکل ۸ مشاهده می‌شود که اگرچه برای رسیدن به قابلیت اطمینان بیشتر، زمان اجرا و هزینه‌های شبکه افزایش یافته است اما با صرف هزینه‌ای در حدود ۱۵۰ دلار اضافه‌تر، رشد قابل قبولی در قابلیت اطمینان به میزان ۴۰ درصد ایجاد می‌شود. همچنین در حالت دوم از رویکرد دوم روش تحلیل مبتنی بر فشار مدنظر قرار داده شده که در شکل ۹ نتیجه تعامل دو هدفه بین هزینه کلر مصرفی و قابلیت اطمینان کیفی، براساس روش تحلیل مبتنی بر فشار قابل مشاهده است. در این حالت میزان فرمون اولیه مسیرها برابر با ۳۰۰ و تعداد مورچه‌ها در هر کلونی ۲۵ بوده و بر اساس روش چانه‌زنی یونگ، جواب برگزیده (هزینه: ۱۴۷/۳۶ دلار و قابلیت اطمینان: ۰/۷۰۱۳) است



برای کاهش هزینه کلر زنی و افزایش قابلیت اطمینان کیفی در تعامل با یکدیگر قرار داده شدند و در آنها در مورد پارامترهایی همچون نحوه تزریق کلر و یا دور پمپ و تراز مخزن جایگزین و همچنین روش‌های تحلیل بحث و نتایج در قالب منحنی‌های تعامل تولید شد. از روی این منحنی‌ها، می‌توان بسته به شرایط مختلف و نظر اشخاص تصمیم گیرنده، تصمیم مناسب را اتخاذ نمود.

با توجه به حالات و رویکردهای مختلف مورد بحث در این تحقیق، نتایج حاکی از کاهش هزینه کلر زنی با استفاده از پمپ دور متغیر و نرخ متغیر تزریق کلر و تأمین قابلیت اطمینان کیفی در حد قابل قبول، بدون نیاز به بوستر پمپ برای تزریق کلر در گره‌های شبکه و همچنین کاهش بیشتر هزینه کلر زنی در صورت استفاده از روش تحلیلی مبتنی بر فشار است. از طرفی در این تحقیق مشاهده شد که با توجه به رابطه شاخص قابلیت اطمینان کیفی ارائه شده، از آنجا که در روش تحلیل مبتنی بر فشار، برای افزایش این شاخص، کاهش قابلیت اطمینان کیفی در اثر عدم تأمین دبی لازم، با تزریق کلر اضافی جبران می‌شود، باید در این روش تحلیل، شاخص نامبرده فارغ از دبی مورد نیاز شبکه محاسبه و قبل از آن، شبکه به لحاظ هیدرولیکی قابل اطمینان شود.

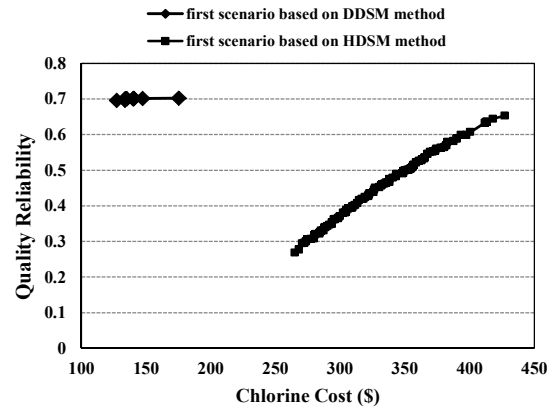


Fig. 10. Pareto curve of the second approach based on the HDSM and DDSM methods

شکل ۱۰- منحنی پارتو مربوط به رویکرد دوم براساس روش HDSM و روش DDSM

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بهینه‌سازی عملکرد کیفی شبکه‌های توزیع آب با الگوریتم جامعه مورچگان با بهره‌گیری از یک شبکه توزیع آب با لحاظ نمودن رویکردها و حالات مختلف بررسی شد. توابع هدف

#### ۶- مراجع

- Afshar, A., Sharifi, F. & Jalali, M. R., 2009, "Non-dominated archiving multi-colony ant algorithm for multi-objective optimization: Application to multi-purpose reservoir operation", *Engineering Optimization*, 41 (4), 313-325.
- Babaei, N., 2013, "Optimizing pump performance and water quality in water distribution networks", MSc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran.
- Boccelli, D.L., Rossman, L.A., Tryby, M.E., Uber, J.G, Zierolf, M.L. & Polycarpou, M. M., 1998, "Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution system", *Journal Water Reserach Planing Management*, 124 (2), 99-111.
- Broad, D.R., Dandy, G.C. & Maier, H.R., 2005, "Water distribution system optimization using metamodells", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131 (3), 172-180.
- Coelho, G.M., 1996, "Standardization of the preparation and quantitation of water-accommodated fractions of petroleum for toxicity testing original research article", *Marine Pollution Bulletin*, 40 (11), 1007-1016.
- Gibbs, M.S., Dandy, G.C. & Maier, H.R., 2010, "Calibration and optimization of the pumping and disinfection of a real water supply system", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136 (4), 493-501.
- Gupta R., Sushma D. and Pramod, R. B., 2009, "Water quality reliability analysis of water distribution networks", *33<sup>rd</sup> International Association of Hydraulic Engineering and Research Congress (IAHR)*, Vancouver, Canada.

- Hashemi, S. S., 2010, "Optimization of water networks by minimizing pumping energy", MSc. Thesis, School of Civil Engineering, Collage of Engineering, University of Tehran, Tehran.
- Hashemi, S. S., Tabesh, M. & Ataei Kia, B., 2012, "Scheduling and operating costs in water distributions networks", *Proceeding of the ICE-Water Management*, 166 (8), 432-442.
- Iran's Industrial-commercial Comprehensive System, 2012, *Tehran acid Kimia engineering-trading company and the price list of several other companies in the field of water disinfection products*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Kurek, W. & Ostfeld, A., 2012, "Multi-objective water distribution systems control of pumping cost, water quality, and storage-reliability constraints", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140 (2), 184-193.
- Mehzad, N., 2011, "Multi-objective optimization of water distribution networks exploitation, taking into account the effects of the pump and the tank", MSc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran.
- Murphy, L. J., Dandy, G. C. & Simpson, A. R., 1994, "Optimum design and operation of pumped water distribution systems", *Proceeding Conference on Hydraulics in Civil Engineering, Institution of Engineers*, Brisbane, Australia, pp. 149-155.
- Ostfeld, A. & Salomons, E., 2006, "Conjunctive optimal scheduling of pumping and booster chlorine injections in water distribution systems", *Journal of Engineering Optimization*, 38 (3), 337-352.
- Ostfeld, A. & Tubaltzev, A., 2008, "Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134, (2), 107-119.
- Tabesh, M. , Azadi, B. & Roozbahani, A., 2011, "Quality management of water distribution networks by optimizing dosage and location of chlorine injection", *International Journal of Environmental Resources*, 5 (2), 321-332.
- The Standard and Industrial Research Organization, 1997, *Physical and chemical characteristics of potable water*, Standard No. 1053, Tehran, Iran. (In Persian).
- Vice President Strategic Supervision, 2013, "Design criteria for rural and urban water transmission and distribution systems", *Journal of the First Review*, Standard Code No. 117-3 (1<sup>st</sup> Revision).
- Wagner, J., Shamir, U. and Marks, D., 1988, "Water distribution system reliability: Analytical methods", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), 253-275.
- Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, L. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., et al., 1987, "Battle of the network models: Epilogue", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113 (2), 191-203.
- World Health Organization, 2003, *Chlorine in drinking-water, background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality-health criteria and other supporting information*, Originally Published in Guidelines for Drinking-Water Quality, 2<sup>nd</sup> Ed., Vol. 2., Geneva, WHO/SDE/WSH/03.04/45.
- Young, H. P., 1993, "An evolutionary model of bargaining", *Journal of Economic Theory*, 59, 145-168.
- Zecchin, A. C., Simpson, A. R., Maier, H. R. & Nixon, J. B., 2005, "Parametric study for ant algorithm applied to water distribution system optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 9 (2), 175-191.