

Water and Wastewater, Vol. 34, No. 2, pp: 124-137

# Developing an Optimal Chlorination Pattern in Water Distribution System Utilizing Meta-Heuristic Algorithms

Sh. Najafian<sup>1</sup>, A. R. Zahiri<sup>2\*</sup>, A. Jabbari<sup>3\*</sup>, M. Meftah Halaghi<sup>4</sup>

1. PhD. Student in Water Structures, Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2. Assoc. Prof., in Water Structures, Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran  
(Corresponding Author) [zahiri.areza@gmail.com](mailto:zahiri.areza@gmail.com)
3. Lecturer, Dept. of Civil Engineering and Surveying, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) [jabbari.az@gmail.com](mailto:jabbari.az@gmail.com)
4. Assoc. Prof., in Water Structures, Dept. of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(Received Dec. 22, 2022 Accepted Feb. 14, 2023)

**To cite this article:**

Najafian, Sh., Zahiri, A. R., Jabbari, A., Meftah Halaghi, M. 2023. "Developing an optimal chlorination pattern in water distribution system utilizing meta-heuristic algorithms"  
Water and Wastewater, 34(2), 124-137. Doi: 10.22093/wwj.2023.376970.3309. (In Persian)

**Abstract**

Control of residual chlorine concentration within a desirable range throughout water distribution systems can cause the destruction of potentially harmful pathogens without chlorine adverse health effects & its toxic by-products. Hence, optimal scheduling of booster chlorination stations in the WDSs to ensure healthy water supply with the lowest dose of chlorine consumption is vital. The aim of the present study is to develop a multi-objective optimization model in order to minimize the mass injection rate as well as the probability of chlorine violation in the WDSs, which has been implemented in the MATLAB-EPANET platform. Multi-objective krill herd and multi-objective particle swarm optimization algorithms have been utilized as optimizers to obtain the desired Pareto front in the real-scale Brushy Plains network. The resulted Pareto fronts showed that in most of their solutions, as long as the mass injection rate increased, the probability of chlorine violation decreased. In this study, the solution with the less PCV in each Pareto was selected as the optimal solution to assure the healthy water supply. Though the MOPSO resulted Pareto showed more solution diversity, MKH optimal solution has a better MIR function than MOPSO optimal solution with the same amount of PCV. Analyzing the residual chlorine concentration profiles of the monitoring period corresponding to the MKH optimal solution showed that the chlorine concentration of the most nodes of Brushy Plains network exist in the desirable range of 0.2 to 0.8 mg/L and the residual chlorine of 100% of nodes exist in the range of 0.2 to 1.6 mg/L. Also, the MKH results are superior to those of the previous studies in terms of the total mass injection rate. Generally, in addition to economic advantages, minimizing chlorine injection rate and the probability of chlorine violation simultaneously in the water distribution systems reduces the adverse health effects of the disinfectant by-products.

**Keywords:** Mass Injection Rate, Probability of Chlorine Violation, Multi-Objective Krill Herd Algorithm, Multi-Objective Particle Swarm Optimization.



آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۲، صفحه: ۱۳۷-۱۲۴

## تدوین الگوی بهینه تزریق کلر در شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

شادی نجفیان<sup>۱</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۲\*</sup>، آزاده جباری<sup>۳\*</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

(نویسنده مسئول) [zahiri.arez@gmail.com](mailto:zahiri.arez@gmail.com)

۳- مدرس، گروه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی(ره) شهر ری، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) [jabarv.az@gmail.com](mailto:jabarv.az@gmail.com)

۴- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

پدیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲۵ (دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۱)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

نجفیان، ش.، ظهیری، ع.ر.، جباری، آ.، مفتاح هلقی، م.، ۱۴۰۲، "تدوین الگوی بهینه تزریق کلر در شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری آب و فاضلاب"، ۳۴(۲)، ۱۳۷-۱۲۴. Doi: 10.22093/wwj.2023.376970.3309

### چکیده

کنترل غلظت کلر باقیمانده در بازه مطلوب در سراسر شبکه‌های توزیع آب، می‌تواند باعث تخریب پاتوزن‌های بالقوه مضر بدون ایجاد اثرات ضد سلامت انسان و محصولات جانبی سمی کلر شود. بنابراین، برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های تزریق کلر در این شبکه‌ها برای اطمینان از تأمین آب سالم با کمترین مقدار کلر مصرفی، اهمیت حیاتی دارد. هدف از این پژوهش، توسعه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه به منظور کاهش نرخ تزریق کلر هم‌زمان با کاهش احتمال نقض کلر در گره‌ها در شبکه‌های توزیع آب بود که در بستر نرم‌افزاری MATLAB-EPANET اجرا شد. به منظور به‌دست آوردن جبهه پارتوی موردنظر در یک شبکه واقعی (Brushy Plains)، الگوریتم‌های گروه میگوهای چند هدفه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه به‌عنوان بهینه‌سازها به‌کار گرفته شدند. جبهه پارتوهای به‌دست آمده نشان دادند که در اغلب موارد، با افزایش نرخ تزریق کلر مقدار تابع احتمال نقض کلر در گره‌ها کاهش می‌یابد. در این پژوهش، به‌منظور اطمینان از تأمین آب سالم، پاسخ دارای کمترین مقدار احتمال نقض کلر در گره‌ها در هر جبهه پارتو به‌عنوان پاسخ بهینه انتخاب شد. اگرچه پارتوی حاصل از بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه، تنوع پاسخ بیشتری نسبت به پارتوی حاصل از الگوریتم گروه میگوهای چند هدفه دارد، پاسخ بهینه انتخاب شده در پارتوی الگوریتم گروه میگوهای چند هدفه دارای مقدار نرخ تزریق کلر کمتری نسبت به پاسخ بهینه انتخاب شده در پارتوی بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه با مقدار یکسان احتمال نقض کلر در گره‌ها است. تحلیل نیم‌رخ‌های غلظت کلر باقیمانده متناظر با پاسخ بهینه الگوریتم گروه میگوهای چند هدفه در یک دوره نظارت ۲۴ ساعته نشان داد که غلظت کلر در اغلب گره‌های شبکه Brushy Plains در بازه مطلوب ۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر قرار دارد و غلظت کلر در ۱۰۰ درصد گره‌های این شبکه در بازه ۰/۲ تا ۱/۶ میلی‌گرم در لیتر قرار دارد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ بهینه الگوریتم گروه میگوهای چند هدفه نسبت به نتایج پژوهش‌های قبلی، نرخ تزریق کلر کمتری دارد. به‌طور کلی، علاوه بر مزایای اقتصادی، به حداقل رساندن میزان تزریق کلر و احتمال نقض کلر در گره‌ها به‌طور هم‌زمان در سیستم‌های توزیع آب، اثرات نامطلوب بهداشتی محصولات جانبی کلر را نیز کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: نرخ تزریق جرمی، احتمال نقض کلر در گره‌ها، الگوریتم گروه میگوهای چند هدفه، بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه



## ۱- مقدمه

سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری، قسمتی از تأسیسات آبرسانی هستند که آب خام را از منابع آبهای زیرزمینی و یا آبهای سطحی تصفیه شده برداشت و در بین مصرف‌کنندگان توزیع می‌کنند. آب در طی مراحل انتقال و توزیع، در معرض برخی از آلودگی‌ها از جمله آلودگی‌های میکروبی قرار می‌گیرد. با هدف کاهش خطرات میکروبی آب توزیع شده، آب آشامیدنی قبل از اینکه در دسترس مصرف‌کنندگان قرار گیرد، گندزدایی می‌شود. یکی از ترکیبات گندزدایی که به‌طور عمده استفاده می‌شود، کلر است.

همان‌طور که کلر محلول در داخل لوله‌های سامانه توزیع حرکت می‌کند، با مواد آلی و غیرآلی موجود در حجم آب (زوال حجمی)<sup>۱</sup>، بیوفیلیم‌ها و مواد موجود روی دیواره لوله (زوال دیواره)<sup>۲</sup>، واکنش داده و مقدار آن در طول زمان کاهش می‌یابد. از این‌رو، غلظت کلر باقیمانده در تمام نقاط شبکه یکسان نبوده و نوساناتی دارد. مسئله مهم در مدیریت کیفی شبکه‌های آبرسانی، کنترل میزان کلر آزاد باقیمانده در یک بازه استاندارد در کلیه نقاط شبکه است. استفاده از ایستگاه‌های تقویت‌کننده کلرزی (بوستر پمپ‌ها) در نقاط مختلف شبکه به جای روش سنتی کلرزی فقط در تصفیه‌خانه‌ها، تقریباً مشکلات مقدار زیاد کلر باقیمانده در نزدیکی منبع‌های آب و کمبود کلر باقیمانده در نقاط دورافتاده یک سامانه توزیع آب را، حل خواهد کرد (Behzadian et al., 2012).

در این روش، تعیین مکان و میزان تزریق کلر در شبکه به طوری که غلظت آن در تمامی نقاط شبکه در بازه مشخص شده باشد، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه بهینه‌سازی کیفی شبکه‌های انتقال آب انجام شده و از روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای کاهش هزینه‌ها و برآورده شدن قیود و محدودیت‌های کیفی و هیدرولیکی شبکه استفاده شده است.

بوچلی و همکاران، برای اولین بار با تابع هدف خطی و اعمال محدودیت‌های مناسب به منظور قرار گرفتن غلظت در کلیه نقاط شبکه در بازه مشخص با استفاده از تزریق در بوستر پمپ‌ها، میزان کلر مصرفی تزریق شده را به روش بهینه‌سازی خطی بهینه کردند (Boccelli et al., 1998).

همچنین برنامه‌ریزی عدد صحیح<sup>۳</sup> نیز توسط ترایبای و همکاران، برای حل این مسئله استفاده شده است (Tryby et al., 1999) با این حال از آنجایی که استفاده از چنین روش‌هایی و جستجوی همه جانبه در شبکه‌های بزرگ توزیع آب، نیازمند صرف زمان و هزینه بیشتری برای حل این نوع مسائل هستند، امروزه استفاده از الگوریتم‌های جستجوی فرا ابتکاری<sup>۴</sup> بیشتر مورد توجه قرار گرفته و پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است از جمله: تابش و همکاران، با استفاده از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک توانستند بهترین ایستگاه‌های کلرزی را مشخص و نیز میزان بهینه کلر تزریقی را به دست آورند (Tabesh et al., 2011a).

در پژوهشی نیز الگوریتم تکاملی قوت پارتو<sup>۵</sup> به‌منظور بهینه‌سازی کیفیت آب (بر اساس میزان غلظت کلر و سن آب)، همچنین هزینه بهره‌برداری پمپ و ابعاد تانک ذخیره به‌کار برده شده و عملکرد رضایت‌بخش این الگوریتم چند هدفه در ارائه جبهه بهینه پارتو<sup>۶</sup> برای مسئله مورد نظر نشان داده شد (Kurek and Ostfeld, 2013).

همچنین نوری در سال ۲۰۱۷، از الگوریتم ژنتیک نامغلوب<sup>۷</sup> به‌منظور تعیین میزان بهینه کلر تزریقی و تعداد ایستگاه‌های کلرزی بهره برد (Nouiri, 2017).

در پژوهشی نیز با به‌کارگیری الگوریتم NSGA و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به بهینه‌سازی دو هدفه یک شبکه آب واقعی پرداختند (Nono and Basupi, 2019).

به‌علاوه ماهشواری و همکاران، با استفاده از بستر نرم‌افزاری MATLAB-EPANET-MSX و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه نمودار پارتوی دو تابع حداقل‌سازی نرخ تزریق کلر و حداکثرسازی حجم آب سالم تأمین شده (با تأکید بر میزان سرب و کلر باقیمانده) را در یک شبکه توزیع آب واقعی تحت شرایط مختلف شیمیایی آب به دست آوردند. به این ترتیب در پژوهش ایشان برنامه نرخ تزریق کلر طوری تعیین شد که به‌صورت هم‌زمان خطرات رشد میکروبی و میزان انحلال سرب ناشی از خوردگی لوله‌ها در آب کاهش یابد (Maheshwari et al., 2020).

<sup>3</sup> Integer Programming (IP)

<sup>4</sup> Meta-Heuristic

<sup>5</sup> Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2)

<sup>6</sup> Pareto Optimal Front

<sup>7</sup> Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

<sup>1</sup> Bulk Decay

<sup>2</sup> Wall Decay



بررسی نشان داد که این روش می‌تواند مدیران را در تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد تزریق کلر در شرایط عدم قطعیت یاری رساند (Wang and Zhu, 2022).

پژوهش‌های پیشین، موفقیت الگوریتم‌های به‌کار برده شده را در کمینه‌سازی میزان کلر مصرفی سامانه‌های توزیع آب در شرایطی که تابع هدف حداقل‌سازی میزان کلر مصرفی در نظر گرفته شود نشان داده‌اند، در حالی که احتمال تخطی از حدود مجاز کلر در گره‌ها به‌طور هم‌زمان با میزان کلر مصرفی، کمتر بررسی شده است. همچنین تاکنون الگوریتم فرا ابتکاری گروه میگوی چندهدفه<sup>۵</sup> که علاوه بر بهره‌مندی از مزایای هوش جمعی و حرکت جستجوگرها (میگوها) تحت عامل‌های تأثیر جمعی، ویژگی حرکت‌های فردی و همچنین حرکت‌های تصادفی را نیز دارد.

از این رو در این پژوهش، در راستای حداقل‌سازی میزان نرخ تزریق<sup>۶</sup> کلر و احتمال نقض کلر<sup>۷</sup> در گره‌ها، با استفاده از الگوریتم MKH و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه<sup>۸</sup> و به‌کارگیری نرم‌افزار EPANET در محیط برنامه‌نویسی MATLAB (بستر نرم‌افزاری MATLAB-EPANET) پارتنوی بهینه این دو تابع تولید و بررسی شد. به این منظور در این پژوهش، مدل EPANET در محیط نرم‌افزار MATLAB فراخوانی شد. همچنین الگوریتم‌های بهینه‌سازی MKH و MOPSO نیز در این محیط کدنویسی و با مدل EPANET ارتباط داده شدند. به این ترتیب که در هر بار اجرای الگوریتم‌ها تعدادی مشخص الگوی تزریق کلر برای ایستگاه‌های کلرزی تولید و به مدل EPANET وارد شد، سپس این مدل اجرا شده و خروجی آن به لحاظ غلظت کلر باقیمانده در سراسر شبکه در MATLAB خوانده و مقدار توابع هدف محاسبه شدند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل هیدرولیکی و کیفی EPANET

EPANET یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل شبکه توزیع آب است که قادر به شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی آب بر اساس

پیندا ساندووال و همکاران، به‌منظور تأمین حداقل کلر آزاد باقیمانده در تمام نقاط مصرف شبکه، مطابق با استانداردهای بهداشتی و نیز کاهش میزان کلر تزریقی در بوستر پمپ‌های تزریق که بر اساس الگوی زمانی ۱ ساعته انجام می‌شود، مسئله مکان‌یابی بوستر پمپ‌های تزریق را با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم ازدحام ذرات در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، در برآورد مقدار بهینه کلر تزریقی عملکرد بهتری داشت (Pineda Sandoval et al., 2021).

یو و همکاران، از الگوریتم جستجوی هارمونی<sup>۱</sup> در بهینه‌سازی تعداد ایستگاه‌های کلرزی و میزان کلر تزریقی در شبکه توزیع آب بهره بردند. مقایسه نتایج الگوریتم HS با الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> نشان داد که در شرایط مشابه (از نظر تعداد ایستگاه تزریق)، الگوریتم HS در برآورد میزان بهینه کلر تزریقی، عملکرد بهتری دارد (Yoo et al., 2018).

زین و همکاران، با معرفی شاخص نوین سن کلر به بهینه‌سازی تعداد ایستگاه‌های کلرزی و میزان کلر تزریقی در آنها در شرایط عدم قطعیت پرداختند. در این پژوهش تأثیر عدم قطعیت تقاضای گره‌ها بر روی غلظت کلر باقیمانده در گره‌های شبکه با استفاده از روش تحلیل مونت کارلو<sup>۳</sup> بررسی شد. در مرحله اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک تابع هدف مربوط به متوسط سن کلر در شبکه بهینه شده است، سپس مسئله مکان‌یابی بوستر پمپ‌ها و میزان تزریق در آنها به‌وسیله الگوریتم ژنتیک نامغلوب در شرایط عدم قطعیت بهینه‌سازی شد (Xin et al., 2019).

همچنین وانگ و ژو، با اشاره به این نکته که مسئله بهینه‌سازی هزینه طراحی و بهره‌برداری بوستر پمپ‌های تزریق تابعی درجه دوم است و نیز پارامترهای غیر قطعی (حدود پایین و بالای غلظت کلر باقیمانده در شبکه و ماتریس ضرایب پاسخ غلظت کلر در هر گره) در دو طرف محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی (سمت راست و چپ معادلات) قرار دارند، با به‌کار بردن روش بهینه‌سازی درجه دوم با محدودیت اعتبار فازی<sup>۴</sup>، هزینه ساخت و بهره‌برداری از بوستر پمپ‌ها را در شرایط عدم قطعیت کمینه کردند. نتایج حاصل از این

<sup>5</sup> Multiobjective Krill Herd Algorithm (MKH)

<sup>6</sup> Mass Injection Rate (MIR)

<sup>7</sup> Probability of Chlorine Violation (PCV)

<sup>8</sup> Multiobjective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

<sup>1</sup> Harmony Search (HS)

<sup>2</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>3</sup> Monte Carlo

<sup>4</sup> Fuzzy Credibility-Constrained Quadratic Programming (FCCQP)



معادله ۳ محاسبه می‌شود

$$R = \frac{A}{V} K_w C^n \quad (3)$$

که در آن

$K_w$  ضریب نرخ واکنش دیواره و  $\frac{A}{V}$  مساحت در واحد حجم داخل لوله است.

در مدل EPANET تزریق کلر در ایستگاه‌های تزریق در شبکه‌های توزیع آب بر مبنای چهار روش غلظت<sup>۴</sup>، جریان عبوری<sup>۵</sup>، تزریق جرمی<sup>۶</sup> و یا نقطه تنظیمی<sup>۷</sup> انجام می‌شود. در تزریق بر مبنای غلظت، غلظت کلر با مقدار و الگوی زمانی مشخص حفظ می‌شود. در تزریق بر مبنای جریان عبوری، غلظت مشخصی از کلر در یک الگوی زمانی معین به غلظت ماقبل که ناشی از جریان ورودی از یک لوله به گره است اضافه می‌شود.

در تزریق جرمی، همواره جریان جرمی مشخصی بر حسب میلی‌گرم بر دقیقه به دبی که گره را ترک می‌کند، اضافه می‌شود و در نهایت در تزریق بر مبنای نقطه تنظیمی، غلظت هر جریان خروجی از گره تا زمانی که غلظت از همه جریان‌های ورودی به آن گره کمتر از نقطه تنظیمی باشد، ثابت در نظر گرفته می‌شود. نقطه تنظیمی، غلظتی از کلر است که برای همه گره‌ها در همه زمان‌ها باید مطلوب باشد.

## ۲-۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌سازی گروه میگوها<sup>۸</sup> بر اساس شبیه‌سازی حرکات و رفتار گروهی از میگوها برای یافتن غذا عمل می‌کند. در الگوریتم KH، حرکت میگوها توسط سه فاکتور اصلی انجام می‌شود که عبارت‌اند از: حرکت ایجاد شده توسط سایر میگوها (حرکت القا شده)، رفتار غذایی و پراکنندگی تصادفی. در این فرایند، میگوها زمانی که در جستجوی غذا و بیشترین تراکم هستند، در واقع به سمت بهترین راه‌حل حرکت می‌کنند. رابطه اصلی حرکت میگوها در الگوریتم بهینه‌سازی گروه میگوها به صورت زیر است

روش‌های مبتنی بر تقاضا<sup>۱</sup> و روش مبتنی بر فشار<sup>۲</sup> و همچنین شبیه‌سازی رفتار کیفی آب در شبکه لوله‌های تحت فشار است (Rossman, 2000). در پژوهش دینی و تابش، از روش DDSM که سرعت بیشتری در شبیه‌سازی کیفی و هیدرولیکی شبکه توسط EPANET دارد (Dini and Tabesh, 2018) استفاده شد.

همچنین نرم‌افزار EPANET قادر است تولید یا تخریب یک ماده در اثر واکنش آب در درون شبکه توزیع را با به‌کارگیری رویکرد مبتنی بر زمان لاگرانژی<sup>۳</sup> ردیابی کند و به این منظور نرخ که ماده در آن واکنش می‌دهد و چگونگی وابستگی این نرخ به غلظت نیاز است. واکنش‌ها می‌تواند هم در حجم آب (زوال حجمی) و هم با مواد موجود در جداره لوله (زوال دیواره) رخ دهد. این نرم‌افزار قادر است واکنش‌هایی با مرتبه  $n$  سینماتیکی را که در حجم جریان رخ می‌دهد، مدل‌سازی کند، که در این حالت سرعت واکنش با معادله ۱ بیان می‌شود

$$R = K_b C^n \quad (1)$$

که در آن

$R$  نرخ واکنش بر حسب (جرم/حجم/زمان)،  $K_b$  ضریب نرخ واکنش جریان،  $C$  غلظت واکنش‌دهنده (جرم/حجم) و  $n$  درجه واکنش است. ضریب واکنش جریان برای واکنش‌های تولید یک ماده (محصولات جانبی گندزدایی) مثبت و برای واکنش‌های تخریب (زوال کلر) منفی در نظر گرفته می‌شود. EPANET همچنین واکنش‌هایی که در آن محدوده غلظت برای تولید یا تخریب یک ماده وجود دارد را نیز می‌تواند شبیه‌سازی کند. در این موارد معادله به فرم معادله ۲ تغییر می‌یابد

$$\begin{aligned} R &= K_b (C_1 - C) C^{(n-1)} & \text{for } n > 0, K_b > 0 & \quad (2) \\ R &= K_b (C - C_1) C^{(n-1)} & \text{for } n > 0, K_b < 0 & \end{aligned}$$

که در آن

$C_1$  محدوده غلظت است. نرخ واکنش‌های کیفی آب که در نزدیکی جداره لوله رخ می‌دهد به غلظت در حجم جریان وابسته است و با

<sup>4</sup> Concentration

<sup>5</sup> Flow-Paced Booster

<sup>6</sup> Mass Injection

<sup>7</sup> Set-Point Booster

<sup>8</sup> Krill Herd (KH)

<sup>1</sup> Demand Driven Simulation Method (DDSM)

<sup>2</sup> Head Driven Simulation Method (HDSM)

<sup>3</sup> Lagrangian Time-Driven Approach



## ۳-۲- توابع هدف

در این پژوهش، تابع‌های هدف به منظور کمینه‌سازی MIR کلر در شبکه و PCV در گره‌های شبکه، به صورت زیر تعریف و در نظر گرفته شده است

$$\text{Min MIR} = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} u_i^k \Delta t_k \quad (5)$$

$$\text{Min PCV} = \sum_{j=1}^{n_m} P_j \quad (6)$$

که در آنها

$n_b$  تعداد ایستگاه‌های تزریق کلر،  $n_k$  تعداد دوره‌های تزریق کلر،  $u_i^k$  میزان تزریق کلر بر حسب میلی‌گرم در روز (mg/min) در ایستگاه کلرزی  $i$  در دوره تزریق کلر  $k$ ،  $n_m$  تعداد گره‌های کنترل‌شونده،  $\Delta t_k$  طول گام‌های زمانی تزریق (min) در یک دوره هیدرولیکی (در اینجا دوره هیدرولیکی ۲۴ ساعت و  $\Delta t_k$  ۱ ساعت است) و  $P_j$  احتمال اینکه غلظت کلر باقیمانده در گره کنترل‌شونده  $j$  در محدوده مجاز قرار نداشته باشد، است که به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$P_j = \frac{\sum_{m=t}^{t+n_m-1} \gamma_j^m}{T} \quad (7)$$

$$\gamma_j^m = \begin{cases} 0 & \text{if } C_j^{\min} < C_j^m < C_j^{\max} \\ \Delta t_m & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

که در آنها

$n_m$  تعداد زمان‌های کنترل (نظارت)،  $t$  زمان شروع به کنترل غلظت کلر باقیمانده در دوره‌های متناوب ثابت گره کنترل‌شونده،  $\gamma_j^m$  تابع مربوط به غلظت کلر باقیمانده،  $T$  کل گام‌های زمانی کنترل گره‌ها در مدت دوره شبیه‌سازی،  $\Delta t_m$  طول گام‌های زمانی کنترل (در اینجا ۱ ساعت)،  $C_j^{\min}$  و  $C_j^{\max}$  به ترتیب حدود پایین و بالای غلظت کلر در گره کنترل‌شونده  $j$  و  $C_j^m$  غلظت کلر باقیمانده در گره کنترل‌شونده  $j$  در گام زمانی نظارت  $m$  است که با استفاده از شبیه‌ساز EPANET مشخص می‌شود.

$$\frac{dx_i}{dt} = N_i + F_i + D_i \quad (4)$$

که در آن

$N_i$ ،  $F_i$  و  $D_i$  به ترتیب حرکت ایجاد شده توسط سایر میگوها (الفائی)، حرکت غذاییابی و پراکندگی فیزیکی آمین میگو هستند. نحوه محاسبه این عامل‌ها و فرایند حرکت میگوها در الگوریتم KH در مرجع (Hasanpour et al., 2022) در دسترس است. در اینجا عملگرهای اضافه شده به این الگوریتم و توسعه الگوریتم MKH تشریح می‌شود.

در توسعه الگوریتم MKH (Ayala et al., 2015) مفاهیم مرتب‌سازی پاسخ‌های نامغلوب<sup>۱</sup> و تعیین فاصله تراکمی<sup>۲</sup> پاسخ‌ها، موجود در روش‌های GA نامغلوب (NSGA-II) و MOPSO به کار برده شده است (Coello and Lamont, 2004, Coello et al., 2004). به این ترتیب در الگوریتم MKH، در انتهای هر تکرار جمعیت میگوها ترکیب و بر اساس رتبه سطح نامغلوب و فاصله تراکمی مرتب می‌شوند. سپس تعداد مشخصی از میگوهای نامغلوب در یک مخزن خارجی<sup>۳</sup> ذخیره می‌شوند. انتخاب بهترین میگوی مخزن<sup>۴</sup> باز بر اساس همان روش رتبه‌بندی و به طور تصادفی از میان میگوهای با بهترین رتبه انجام می‌شود. بنابراین به میگویی که ناحیه نامغلوب و کم جمعیت‌تری را جستجو کرده، شانس بیشتری برای تحت تأثیر قرار دادن دیگر میگوها در طی یک تکرار از الگوریتم داده می‌شود. نتایج این بررسی حاکی از آن است که الگوریتم MKH جبهه پارتوی واقعی را به طور مناسبی تقریب می‌زند و عملکردی رضایت‌بخش و مشابه با GA نامغلوب، دارد.

همچنین در این پژوهش، به منظور ارزیابی نتایج الگوریتم MKH، مسئله بهینه‌سازی کیفیت آب در شبکه توزیع، با نتایج الگوریتم MOPSO مقایسه شد. اطلاعات مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO در پژوهش‌های پیشین (Coello and Lamont, 2004, Coello et al., 2004) شرح داده شده و در دسترس است. به طور خلاصه روندنمای این الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Non-Inferiority

<sup>2</sup> Crowding Distance

<sup>3</sup> Repository (Rep)

<sup>4</sup> Global Best Krill



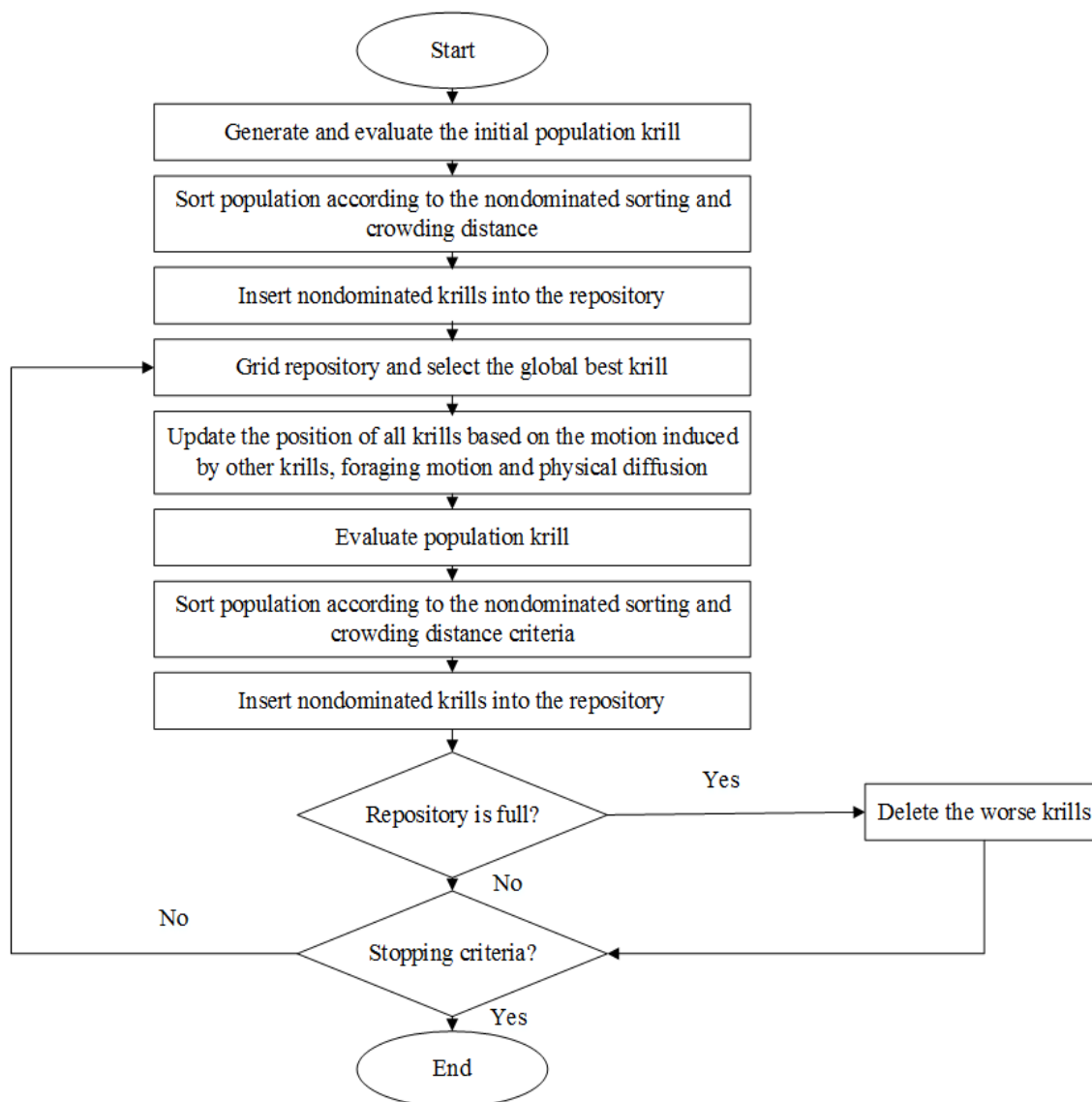


Fig. 1. Flowchart of MKH algorithm  
شکل ۱- روندنمای الگوریتم MKH

#### ۲-۴- شبکه توزیع آب مورد مطالعه

در این پژوهش، شبکه آبرسانی Brushy Plains در شهر Branford در آمریکا که یکی از شبکه‌های مرجع در پژوهش‌های پیشین است، بررسی شد. این شبکه، ۳۶ گره دارد که گره‌های ۱ و ۲۶ به ترتیب ایستگاه پمپاژ واقع در اول شبکه و تانک ذخیره موجود در شبکه هستند. تانک ذخیره از نوع استوانه‌ای با قطر ۵۰ فوت و سطح آب آن حداقل ۵۰ و حداکثر ۷۰ فوت از کف است. همچنین تزریق کلر در این شبکه فقط توسط بوستر پمپ‌های تزریق کلر و به صورت تزریق جرمی برحسب گرم بر دقیقه انجام می‌شود. در

پژوهش‌هایی از جمله (Boccelli et al., 1998, Munavalli and Kumar, 2003, Tabesh et al., 2011b) و به منظور بهینه‌سازی کیفی این شبکه، نحوه چیدمان بوستر پمپ‌ها و میزان بهینه تزریق کلر بررسی شده است که نتیجه این پژوهش با نتایج پیشین، مقایسه شد. جدول‌های مربوط به مشخصات هیدرولیکی شبکه و میزان تقاضا در گره‌های مصرف‌کننده و همچنین ضرایب الگوی مصرف آب ۲۴ ساعته در شبکه در مرجع (Boccelli et al., 1998) در دسترس است. طرح این شبکه و جانمایی ایستگاه‌های تزریق در این پژوهش که بر اساس جانمایی در پژوهش



ایستگاه E در نزدیکی منبع اصلی تأمین آب شبکه، به منظور تزریق کلر به شبکه در زمان تأمین آب از این منبع به کار برده شد (Munavalli and Kumar, 2003).

تزریق در این ایستگاهها به صورت تزریق جرمی و برحسب میلی گرم در دقیقه است. تزریقها به صورت دوره‌ای در ۴ دوره زمانی ۶ ساعته در هر ۲۴ ساعت انجام شد. به این صورت که میزان تزریق در هر ایستگاه در طول ۶ ساعت ثابت است و برای هر ایستگاه تزریق ۴ نرخ تزریق برای یک دوره ۲۴ ساعته مشخص می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه ۶ ایستگاه تزریق در نظر گرفته شد، متغیرهای تصمیم در این پژوهش ۲۴ متغیر بود که در واقع این عدد تعداد ابعاد موقعیت میگوها در الگوریتم MKH و ابعاد موقعیت ذرات در الگوریتم MOPSO بود.

مقدار ضرایب زوال حجمی و زوال دیواره در رابطه زوال کلر با مرتبه یک در شبکه مورد مطالعه به ترتیب  $K_b = -0.5$  (1/day) و  $K_w = 0.2$  (m/day) در نظر گرفته شد. همچنین مقدار حداکثر و حداقل مجاز کلر باقیمانده در گره‌های شبکه به ترتیب ۰/۲ و ۴ میلی گرم در لیتر در نظر گرفته شد (Cotruvo, 2017).

همچنین برای اطمینان یافتن از اینکه نیمرخ‌های هیدرولیکی و کیفی به صورت یک الگوی پایدار متناوب<sup>۱</sup> حاصل شوند، کل دوره شبیه‌سازی ۷۲۰ ساعت (۳۰ روز) انتخاب شد. به این ترتیب دوره نظارت کیفیت آب از ساعت ۶۹۷ تا ۷۲۰ در نظر گرفته شد که در واقع ۲۴ ساعت پایانی در دوره شبیه‌سازی است. از آنجایی که الگوی زمانی دبی‌های تقاضا در گره‌های شبکه در دوره ۲۴ ساعته با فاصله زمانی ۱ ساعت است (Boccelli et al., 1998)، فاصله زمانی نظارت نیز ۱ ساعت در نظر گرفته شد. در طول این دوره نظارت میزان تزریق کلر در ایستگاه‌های تزریق و غلظت کلر باقیمانده در گره‌های شبکه به منظور محاسبه تابع‌های هدف به کار برده شد.

به منظور اجرای الگوریتم MKH تعداد میگوها با انجام حساسیت‌سنجی در بازه ۱۵ تا ۵۰ که بر اساس تعداد میگوهای در نظر گرفته شده در پژوهش‌های پیشین از جمله (Ayala et al., 2015) انتخاب شد. ۳۰ عدد در نظر گرفته شد. همچنین تعداد تکرار این الگوریتم با انجام حساسیت‌سنجی در بازه ۲۰ تا ۱۰۰ که با

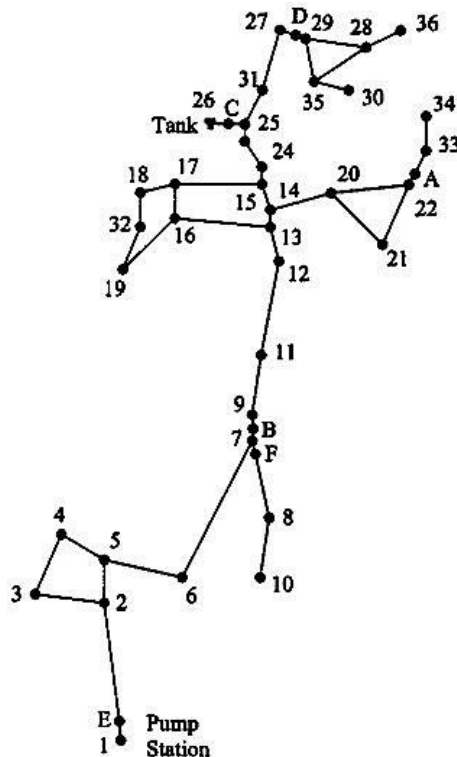


Fig. 2. Schematic of Brushy Plains network (Munavalli and Kumar, 2003)

شکل ۲- شبکه آبرسانی Brushy Plains (Munavalli and Kumar, 2003)

(Munavalli and Kumar, 2003) است، در شکل ۲ نشان داده شده است.

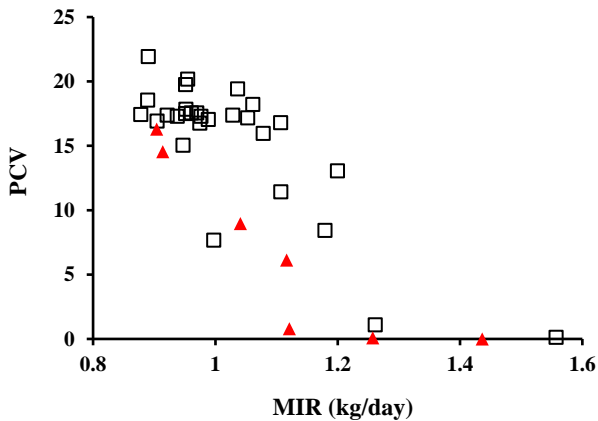
### ۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، مدل چند هدفه توسعه داده شده بر روی شبکه واقعی Brushy Plains به کار برده شد. در اینجا موقعیت ایستگاه‌های بوستر پمپ‌های تزریق کلر مطابق با پژوهش (Munavalli and Kumar, 2003) در نظر گرفته شد. موقعیت این ایستگاهها با حروف A تا F در شکل ۲ نشان داده شده است. ایستگاه‌های A و F به منظور افزایش غلظت کلر به ترتیب در گره‌های دور دست ۳۴ و ۱۰ در نظر گرفته شدند. ایستگاه B به منظور تأمین غلظت کلر در بخش‌های پایین تر شبکه در زمان تخلیه تانک ذخیره در نظر گرفته شد. از طریق ایستگاه C نیز، غلظت کلر در حین ورود جریان به تانک ذخیره کنترل می‌شود و در زمان تخلیه تانک نیز کلر را به شبکه اضافه می‌کند. ایستگاه D به منظور تأمین غلظت کلر در گره‌های دور دست ۳۰ و ۳۶ مشخص شد. همچنین

<sup>1</sup> Periodic



مثلث‌های قرمز رنگ نشان داده شده است. مقدار ارزیابی ذرات (پاسخ‌های) موجود در منحنی پارتوی این شکل در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار تابع‌های هدف مربوط به پاسخ بهینه انتخاب شده به صورت رنگی در این جدول آمده است.

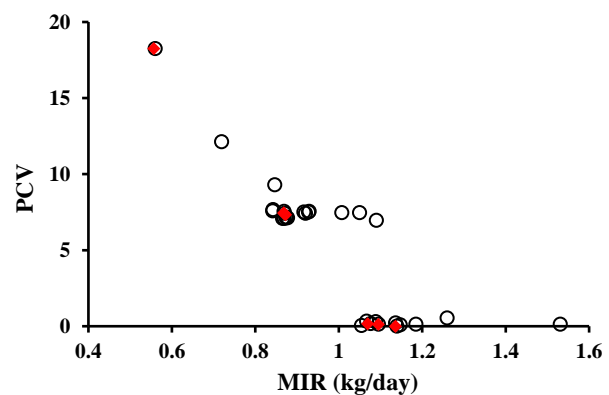


**Fig. 4.** Objective space in the last iteration of the MOPSO algorithm (hollow squares) and Pareto optimal front in this iteration (red triangles)

شکل ۴- فضای برازندگی ذرات در تکرار آخر الگوریتم MOPSO (مربع‌های توخالی) و جبهه پارتوی بهینه در این تکرار (مثلث‌های قرمز)

نتایج به دست آمده از دو الگوریتم MKH و MOPSO نشان داد، پاسخ بهینه انتخاب شده در الگوریتم MKH دارای نرخ تزریق کلر کمتری نسبت به پاسخ بهینه یافته شده توسط الگوریتم MOPSO است. از این رو در ادامه به تحلیل نتایج کیفی متناظر با پاسخ بهینه الگوریتم MKH در شبکه مورد مطالعه پرداخته می‌شود. با انجام شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه Brushy Plains در پاسخ بهینه حاصل از الگوریتم MKH نیم‌رخ‌های غلظت کلر باقیمانده در ۶ ایستگاه تزریق کلر در این شبکه در دوره نظارت ۲۴ ساعته به صورت منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۵ به دست آمده است. همچنین نیم‌رخ‌های غلظت کلر باقیمانده در تعدادی از گره‌های بحرانی در شبکه مورد مطالعه در دوره نظارت در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این دو شکل در صورت تزریق کلر بر اساس الگوی پاسخ بهینه یافته شده توسط الگوریتم MKH، غلظت کلر در ایستگاه‌های تزریق کلر (شکل ۵) و در گره‌های بحرانی که در دورترین نقاط شبکه واقع شده‌اند (شکل ۶) در طول ۲۴ ساعت پایانی دوره شبیه‌سازی، در بازه مطلوب ۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر قرار دارد. به علاوه با توجه به غلظت کلر باقیمانده

توجه به مراجع (Ayala et al., 2015) انتخاب شد، ۵۰ تکرار در نظر گرفته شد. به علاوه، تعداد ۷ میگو به عنوان بهترین میگوهای که در مخزن (Rep) ذخیره می‌شوند تعیین شد. همچنین در اجرای الگوریتم MOPSO تعداد ذرات، تعداد تکرار این الگوریتم و تعداد ذرات ذخیره‌شونده در مخزن به ترتیب ۳۰ ذره، ۵۰ تکرار و ۷ ذره در نظر گرفته شد با اجرای الگوریتم MKH فضای ارزیابی میگوها در تکرار آخر در شکل ۳ به صورت دایره‌های توخالی مشکی رنگ به همراه منحنی پارتوی دو تابع هدف در این تکرار (به صورت آیتم‌های قرمز رنگ) نشان داده شده است. در اینجا مقدار مربوط به MIR بر حسب کیلوگرم در روز ارائه شده است.



**Fig. 3.** Objective space in the last iteration of the MKH algorithm (hollow circles) and Pareto optimal front in this iteration (red squares)

شکل ۳- فضای برازندگی میگوها در تکرار آخر الگوریتم MKH (دایره‌های توخالی) و جبهه پارتوی بهینه در این تکرار (مربع‌های قرمز)

همچنین میزان تزریق کلر در ۶ ایستگاه تزریق به ازای هر کدام از این پاسخ‌ها در دوره‌های تزریق در جدول ۲ آمده است. از آنجایی که هدف مسئله آب‌رسانی تأمین آب با کیفیت مطلوب برای مصرف‌کنندگان است و باید ایمنی آب نوشیدنی ۱۰۰ درصد باشد، بنابراین در این پژوهش پاسخ بهینه دارای تابع هدف دوم (PCV) برابر با صفر که در آن تأمین سلامت آب در کل شبکه ۱۰۰ درصد است، به عنوان پاسخ بهینه در پارتوی به دست آمده انتخاب شد. مقدار تابع‌های هدف و نرخ‌های تزریق کلر در این پاسخ به صورت رنگی در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

همچنین با اجرای الگوریتم MOPSO فضای ارزیابی ذرات در تکرار آخر در شکل ۴ به صورت مربع‌های توخالی مشکی رنگ به همراه منحنی پارتوی به دست آمده در این تکرار به صورت



جدول ۱- پاسخ‌های پارتوی بهینه در الگوریتم MKH

Table 1. Pareto optimal solutions in MKH algorithm

Row	1	2	3	4	5	6	7
PCV	7.3333	0.1666	0.1250	<b>0.0000</b>	7.4583	18.2500	7.4166
MIR (kg/day)	0.8722	1.0691	1.0948	<b>1.1359</b>	0.8683	0.5568	0.8685

جدول ۲- میزان تزریق کلر در ایستگاه‌های مختلف برای هر پاسخ در پارتوی بهینه الگوریتم MKH برحسب میلی‌گرم در دقیقه (mg/min)

Table 2. Chlorine injection rate in different stations for each solution in Pareto optimal of MKH algorithm (mg/min)

Booster location	Time period	Solution						
		1	2	3	4	5	6	7
A	1	3.28	2.22	1.77	<b>2.27</b>	1.43	2.71	1.55
	2	3.49	4.72	1.43	<b>4.02</b>	2.89	3.61	2.89
	3	3.08	5.00	1.32	<b>3.00</b>	3.86	3.27	4.04
	4	3.17	2.24	4.62	<b>3.27</b>	2.87	3.56	2.82
B	1	76.39	9.13	79.16	<b>8.44</b>	73.02	62.48	73.02
	2	4.56	8.40	77.96	<b>78.60</b>	6.65	40.82	6.69
	3	49.97	46.54	4.13	<b>13.45</b>	45.39	34.70	45.40
	4	57.32	58.08	76.83	<b>71.23</b>	55.32	3.00	55.32
C	1	181.58	185.22	468.85	<b>468.91</b>	181.41	175.00	181.41
	2	458.03	263.91	175.26	<b>181.21</b>	458.31	222.45	458.31
	3	396.24	331.06	176.45	<b>289.32</b>	391.30	456.90	391.30
	4	225.93	418.63	175.00	<b>227.42</b>	223.96	223.91	223.96
D	1	17.67	20.00	19.06	<b>17.55</b>	16.64	17.46	17.19
	2	16.46	18.59	19.68	<b>18.71</b>	16.70	17.54	16.70
	3	18.02	18.61	19.77	<b>19.49</b>	19.09	19.31	19.09
	4	16.87	16.31	18.59	<b>17.71</b>	17.33	18.52	17.61
E	1	650.73	846.39	848.46	<b>817.81</b>	649.39	169.82	649.39
	2	0.01	40.07	0.27	<b>13.81</b>	4.15	13.81	4.15
	3	199.11	650.54	849.28	<b>847.33</b>	201.30	0.45	201.30
	4	18.99	3.16	1.09	<b>31.97</b>	22.34	36.23	22.37
F	1	6.58	3.19	7.57	<b>6.36</b>	4.58	5.39	4.58
	2	5.61	6.54	3.78	<b>4.83</b>	4.81	5.58	4.21
	3	3.85	5.80	5.76	<b>5.15</b>	3.76	4.21	3.76
	4	6.09	5.52	5.05	<b>3.46</b>	5.51	6.07	5.51

جدول ۳- پاسخ‌های پارتوی بهینه در الگوریتم MOPSO

Table 3. Pareto optimal solutions in MOPSO algorithm

Row	1	2	3	4	5	6	7
PCV	<b>0.0000</b>	6.1250	0.0833	14.5416	16.2916	0.7916	8.9583
MIR (kg/day)	<b>1.4363</b>	1.1166	1.2573	0.9139	0.9040	1.1210	1.0408



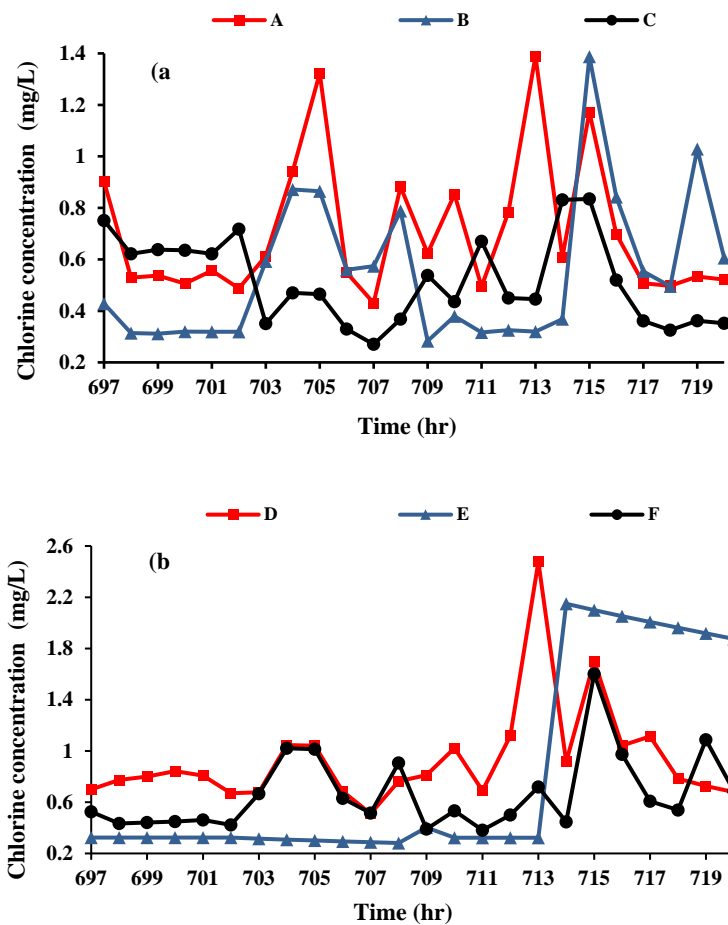


Fig. 5. Chlorine concentrations for the monitoring period at sources a) A, B and C b) D, E and F in the Brushy Plains network in the optimal solution selected in MKH Pareto

شکل ۵- غلظت‌های کلر در دوره نظارت در منابع‌های تزریق الف) A، B و C ب) D، E و F در شبکه

Brushy Plains در پاسخ بهینه انتخابی در پارتوی MKH

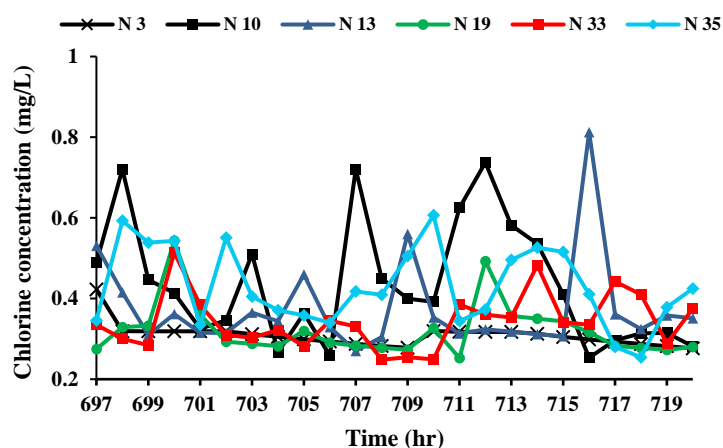


Fig. 6. Chlorine concentrations for the monitoring period at nodes 3, 10, 13, 19, 33 and 35 in the Brushy Plains network in the optimal MKH Pareto solution

شکل ۶- غلظت کلر در گره‌های ۳، ۱۰، ۱۳، ۱۹، ۳۳ و ۳۵ در شبکه Brushy Plains در دوره نظارت در پاسخ بهینه انتخابی در پارتوی MKH



تنوع پاسخ بیشتری داشت. با این حال پاسخ‌های پارتوی بهینه الگوریتم MKH، مقدار کمتری از تابع PCV داشتند. همچنین پاسخ بهینه انتخابی در پارتوی MKH دارای مقدار تابع MIR کمتری نسبت به پاسخ بهینه انتخابی در پارتوی MOPSO بود. از این رو به تحلیل غلظت کلر باقیمانده در شبکه مورد مطالعه به‌ازای مقدار نرخ تزریق کلر متناظر با پاسخ بهینه انتخابی در پارتوی MKH پرداخته شد.

نمودار فراوانی غلظت‌های کلر باقیمانده به‌ازای این پاسخ بهینه در سراسر شبکه در دوره نظارت نشان داد که بیشتر غلظت‌های کلر باقیمانده در شبکه در بازه  $0/2$  تا  $0/8$  میلی‌گرم در لیتر و  $100$  درصد غلظت‌های کلر در بازه  $0/2$  تا  $1/6$  میلی‌گرم در لیتر قرار دارند. همچنین نرخ تزریق کلر در پاسخ بهینه انتخابی در پارتوی MKH به‌میزان  $1/1359$  کیلوگرم در روز بود و نسبت به پژوهش‌های پیشین به‌عنوان نمونه، پژوهش (Munavalli and Kumar, 2003) به‌میزان  $2/1451$  کیلوگرم در روز و پژوهش (Tabesh et al., 2011b) به‌میزان  $1/3706$  کیلوگرم در روز، مقدار کمتری داشت. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، علاوه بر تأمین سلامت جامعه شهری از طریق کمینه‌سازی میزان کلر مصرفی، به‌دلیل حفظ حداقل کلر باقیمانده موردنیاز و غلظت کمتر محصولات جانبی‌گندزدایی، آثار مثبت اقتصادی نیز داشت.

#### ۵-قدردانی

به این وسیله نویسندگان، مراتب قدردانی خود را از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان اعلام می‌کنند.

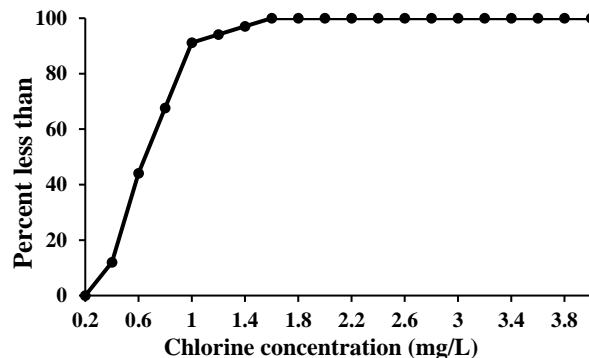


Fig. 7. Frequency plot of chlorine concentrations for Brushy Plains network for the monitoring period in the selected optimal solution of MKH Pareto

شکل ۷- نمودار فراوانی غلظت کلر در سراسر شبکه Brushy Plains در دوره نظارت در پاسخ بهینه انتخابی در پارتوی MKH

در تمامی گره‌های این شبکه در طول دوره نظارت نمودار فراوانی غلظت کلر باقیمانده ترسیم و در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی نشان‌دهنده درصد تعداد گره‌هایی است که میزان غلظت کلر باقیمانده در آنها کمتر از مقدار متناظر نشان داده شده در محور افقی است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با توسعه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه در بستر نرم‌افزاری MATLAB-EPANET و با به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی MKH و MOPSO نمودار پارتوی بهینه دو تابع هدف حداقل‌سازی MIR و حداقل‌سازی PCV در شبکه مرجع Brushy Plains به‌دست آمد. با توجه به پارتوهای بهینه حاصل شده توسط MKH و MOPSO، پارتوی به‌دست آمده توسط MOPSO،

#### References

- Ayala, H. V., Segundo, E. H., Mariani, V. C. & Coelho, L. D. S. 2015. Multiobjective krill herd algorithm for electromagnetic optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52, 1-4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2483060>.
- Behzadian, K., Alimohammadnejad, M., Ardeshtir, A., Jalilsani, F. & Vasheghani, H. 2012. A novel approach for water quality management in water distribution systems by multi-objective booster chlorination. *International Journal of Civil Engineering*, 10(1), 51-60. <https://doi.org/10.1089/gjre.2016.201011>.



- Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G., Rossman, L. A., Zierolf, M. L. & Polycarpou, M. M. 1998. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124, 99-111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496).
- Coello, C. A. C. & Lamont, G. B. 2004. *Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms*, World Scientific Pub., Toh Tuck Link, Singapore. [https://doi.org/10.1142/9789812567796\\_0001](https://doi.org/10.1142/9789812567796_0001).
- Coello, C. A. C., Pulido, G. T. & Lechuga, M. S. 2004. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8, 256-279. <https://doi.org/10.1109/tevc.2004.826067>.
- Cotruvo, J. A. 2017. 2017 WHO guidelines for drinking water quality: first addendum to the fourth edition. *Journal-American Water Works Association*, 109, 44-51. [[Link](#)]
- Dini, M. & Tabesh, M. 2018. A new reliability index for evaluating the performance of water distribution network. *Journal of Water and Wastewater*, 29(3), 1-16. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2017.51035.2154>.
- Hasanpour, Z., Shahinejad, B., Torabi Poteh, H. & Jabbari, A. 2022. Optimum design of water distribution networks utilizing optimization krill herd algorithm. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 51, 31-43. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/JCEE.2020.10592>.
- [Kurek, W. & Ostfeld, A.](#) 2013. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems. *Journal of Environmental Management*, 115, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.030>.
- Maheshwari, A., Abokifa, A., Gudi, R. D. & Biswas, P. 2020. Optimization of disinfectant dosage for simultaneous control of lead and disinfection-byproducts in water distribution networks. *Journal of Environmental Management*, 276, 111186. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111186>.
- Munavalli, G. & Kumar, M. M. 2003. Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129, 493-504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496).
- [Nono, D. & Basupi, I.](#) 2019. Robust booster chlorination in water distribution systems: design and operational perspectives under uncertainty. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 68, 399-410. <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.007>.
- Nouiri, I. 2017. Optimal design and management of chlorination in drinking water networks: a multi-objective approach using genetic algorithms and the Pareto optimality concept. *Applied Water Science*, 7, 3527-3538. <https://doi.org/10.1007/s1320101706207>.
- [Pineda Sandoval, J. D., Brentan, B. M., Lima, G. M., Cervantes, D. H., García Cervantes, D. A., Ramos, H. M., et al.](#) 2021. Optimal placement and operation of chlorine booster stations: a multi-level optimization approach. *Energies*, 14, 5806. <https://doi.org/10.3390/en14185806>.
- Rossman, L. 2000. *EPANET 2 Users Manual*, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory: EPA/600/R-00/057. Cincinnati, OH, USA. [[Link](#)]
- Tabesh, M., Azadi, B. & Roozbahani, A. 2011a. Quality management of water distribution networks by optimizing dosage and location of chlorine injection. *International Journal of Environmental Research*, 5, 321-332. <https://doi.org/10.22059/IJER.2011.317>.
- Tabesh, M., Azadi, B. & Roozbahani, A. 2011b. Optimization of chlorine injection dosage in water distribution networks using a genetic algorithm. *Journal of Water and Wastewater*, 22(1), 2-11. (In Persian). [https://www.wwjournal.ir/?\\_action=xml&article=1132&lang=en](https://www.wwjournal.ir/?_action=xml&article=1132&lang=en).



- Tryby, M. E., Boccelli, D. L., Koechling, M. T., Uber, J. G., Summers, R. S. & Rossman, L. A. 1999. Booster chlorination for managing disinfectant residuals. *Journal-American Water Works Association*, 91, 95-108. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833>.
- Wang, Y. & Zhu, G. 2022. Fuzzy credibility-constrained quadratic optimization for booster chlorination of the water distribution system under uncertainty. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71, 608-627. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.010>.
- Xin, K., Zhou, X., Qian, H., Yan, H. & Tao, T. 2019. Chlorine-age based booster chlorination optimization in water distribution network considering the uncertainty of residuals. *Water Supply*, 19, 796-807. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.125>.
- Yoo, D. G., Lee, S. M., Lee, H. M., Choi, Y. H. & Kim, J. H. 2018. Optimizing re-chlorination injection points for water supply networks using harmony search algorithm. *Water*, 10, 547. <https://doi.org/10.3390/w10050547>.



© The Author(s)

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)