

## مدیریت بهینه فشار در جهت حداقل سازی نشت در سیستم‌های توزیع آب با استفاده از

### الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری

جعفر جعفری اصل<sup>۱\*</sup>، بهرام سامی کشکولی<sup>۲</sup> و مهدی بهرامی<sup>۳</sup>

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

(۲) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(۳) استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه فسا، فسا، ایران.

\* نویسنده مسئول: Jafar.Jafariasl@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۸/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۱۴

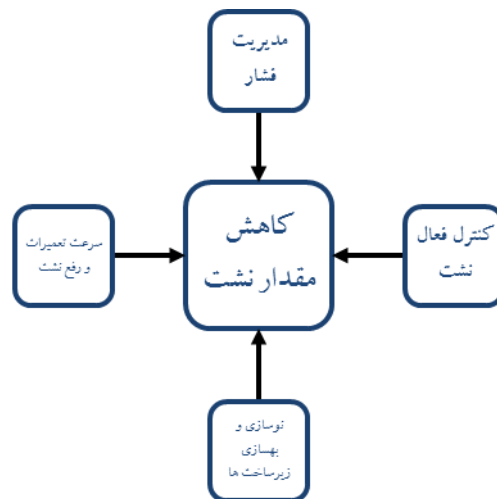
#### چکیده

یکی از روش‌های کاهش نشت در سیستم‌های توزیع آب، مدیریت فشار شبکه با قرار دادن شیرهای کنترل فشار در مسیر جریان و تنظیم بهینه این شیرها در شبکه آب می‌باشد. در این پژوهش مسئله مدیریت بهینه فشار در شبکه‌های توزیع آب در جهت حداقل سازی نشت مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور برای در نظر گرفتن مسائل جانمایی و تنظیمات بهینه شیرهای فشارشکن رویکردی ارائه شده است که در آن بهینه‌سازی هم‌زمان جانمایی شیرها و بهینه‌سازی تنظیمات شیرها مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش برای حل این مسئله از مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی تحت عنوان الگوریتم رقابت استعماری (ICA) استفاده شد. در این مدل الگوریتم بهینه‌سازی ICA در محیط MATLAB با شبیه‌ساز هیدرولیکی مدل EPANET تلفیق شد. نتایج نشان داد که ضمن رعایت کلیه قیود مسئله با به کار بردن روش ارائه شده برای جانمایی و تنظیم بهینه شیرهای فشارشکن میزان نشت متوسط شبکه در سه دوره شرایط نیاز آبی ماکزیمم، متوسط و مینیمم ضمن تأمین قید فشار حداقلی در شبکه، ۱۲ درصد کاهش یافت. که نشان می‌دهد، روش ارائه شده در تنظیم سطح فشار برای حداقل کردن نشت در شبکه موفق بوده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم رقابت استعماری، سیستم‌های توزیع آب، شیرهای فشارشکن، مدیریت فشار و نشت.

## مقدمه

تلفات آب در تمامی سیستم‌های توزیع آب رخ می‌دهد (حتی در بعضی از سیستم‌ها بیشتر از ۳۰ تا ۴۰ درصد آب ورودی به شبکه به تلفات آب تبدیل می‌شود) و هزینه سنگینی را به شرکت‌های آب و فاضلاب تحمیل می‌کند و تنها مقدار و نوع آن متفاوت است که به خصوصیات فیزیکی لوله‌های شبکه و سطح تکنولوژی و تخصص اعمال شده در کنترل این تلفات بستگی دارد. شرکت‌های متولی تأمین آب در سراسر جهان تلاش می‌کنند با مهار تلفات در سطح اقتصادی و قابل قبول، منابع ارزشمند آب را حفظ کنند. در شکل ۱ راه‌کارهای کاهش نشت شبکه به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱: راه‌کارهای کاهش نشت در شبکه (Thornton and Lambert, 2005)

بعد از کار گذاشتن لوله‌های شبکه، در میان تمامی عواملی که بر میزان نشت تأثیرگذار هستند، تنها میزان فشار لوله‌هاست که قابل کنترل بوده و از این لحاظ کاهش میزان فشار راه‌حلی عملی، مؤثر و کم‌هزینه در جهت کنترل میزان نشت به‌تنهایی یا به‌صورت ترکیبی به همراه سایر روش‌ها می‌باشد. باید توجه داشت که این کاهش میزان فشار باید همراه با قید تأمین فشار حداقل در گره‌های مصرف صورت پذیرد تا میزان تقاضای مصرف در تمامی زمان‌ها برآورده گردد. راه‌های مختلفی جهت کاهش سطح فشار در شبکه وجود دارد که یکی از این روش‌ها استفاده از شیرهای کنترل فشار در شبکه و تنظیم بهینه آن‌ها می‌باشد (تابش و واسطی، ۱۳۸۵). Bargiel و Sterling (۲۰۰۵) روشی برای حل مسئله حداقل سازی نشت ناشی از فشار مازاد با استفاده از برنامه‌ریزی خطی، ارائه نمودند. Araujo و همکاران (۲۰۰۶) روشی دوفازی برای بهینه‌سازی تعداد، موقعیت و تنظیمات شیرهای کنترل فشار باهدف حداقل سازی سطح فشار در شبکه با استفاده از روش‌های فرا کاوشی ارائه نمودند. Nicolini و Zovatto (۲۰۰۹) و Nicolini (۲۰۱۱) و بهینه‌سازی تعداد، محل و

تنظیمات شیرهای کنترل فشار را با در نظر گرفتن حداقل فشار مورد نیاز گره‌ها به‌عنوان قید حداقل سازی تعداد شیرهای و حداقل سازی مجموعه نشت سیستم به‌عنوان اهداف مسئله، به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه فرموله کرده و برای حل آن از الگوریتم NSGA-II استفاده کردند. Filion و Roshani (۲۰۱۴) با ترکیب روش مدیریت فشار و روش نوسازی و بهسازی زیرساخت‌ها، با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای پیدا کردن محل بهینه شیرها و تنظیمات بهینه شیرهای فشارشکن در C-Town ایالت متحده آمریکا موفق به کاهش نشت تا ۸۰ درصد شدند. همچنین طبق مطالعه انجام‌شده توسط Babić و همکاران (۲۰۱۴) روی شبکه آب کوتز صربستان، با کاهش فشار ورودی شبکه از ۲۹/۵ متر به ۱۷/۵ متر با استفاده از شیرهای کنترل فشار، از هدر رفت ۹۲۷ لیتر آب در روز جلوگیری شد. Salcedo و Saldarriaga (۲۰۱۵) مطالعه‌ای باهدف پیدا کردن محل بهینه و تنظیمات بهینه روزانه شیرهای فشارشکن در شبکه توزیع آب برای حداقل کردن نشت با استفاده از الگوریتم چندهدفه ژنتیک انجام دادند که نتایج به‌دست‌آمده عملکرد مناسب این روش را نشان داد. در سال‌های اخیر الگوریتم رقابت استعماری (ICA) به‌عنوان یک الگوریتم نوظهور توجه پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است. این الگوریتم اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط Atashpaz-Gargari و Lucas ارائه شد. این الگوریتم با تقلید از روند تکامل اجتماعی، اقتصادی و سیاسی کشورها و با مدل‌سازی ریاضی بخش‌هایی از این فرایند، عملگرهایی را در قالب منظم به‌صورت الگوریتم ارائه می‌دهد که می‌توانند به حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی کمک کنند. درواقع این الگوریتم جواب‌های مسئله بهینه‌سازی را در قالب کشورها نگریسته و سعی می‌کند در طی فرایندی تکرارشونده این جواب‌ها را رفته‌رفته بهبود داده و درنهایت به جواب بهینه مسئله برساند (پور کاظمی و همکاران، ۱۳۹۲).

در این پژوهش مسئله بهینه‌سازی حداقل کردن نشت با استفاده از تنظیمات شیرهای فشارشکن در یک شبکه توزیع آب مدنظر قرار گرفت. در این مسئله موقعیت قرارگیری و تنظیمات شیرها برای شرایط نیاز آبی ماکزیمم، متوسط و مینیمم به‌عنوان متغیر تصمیم در مسئله لحاظ شدند. با توجه به ماهیت متغیرهای تصمیم مسئله، از الگوریتم رقابت استعماری باهدف کاهش میزان نشت در شبکه استفاده شد.

## مواد و روش‌ها

### الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتمی نوظهور در حیطه الگوریتم‌های تکاملی و برگرفته از یک پدیده اجتماعی انسانی است. این الگوریتم هم شبیه الگوریتم‌های تکاملی دیگر، با یک جمعیت اولیه شروع به کار می‌کند. هر عضو از این جمعیت یک کشور نام دارد. هر کشور دارای مشخصاتی است که مکان آن را در فضای جستجو مشخص می‌کند. در مسئله بهینه‌سازی Nvar بعدی، یک کشور یک آرایه  $Nvar \times 1$  است. این آرایه به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

رابطه ۱:  $Country_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iN}]$

هزینه یک کشور با ارزیابی تابع  $f$  در متغیرهای  $[P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iN}]$  یافته می‌شود، بنابراین:

رابطه ۲:  $Cost_i = f(country_i) = f(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iN})$

پس از امتیازدهی تعدادی از بهترین کشورها (از لحاظ میزان برآزش) به عنوان امپراتور و بقیه آن‌ها به عنوان مستعمره این کشورها انتخاب می‌شوند. تمامی مستعمره‌ها بر اساس قدرت امپراتورها بین آن‌ها تقسیم می‌شوند. هرچه میزان قدرت کشور استعمارگر بیشتر باشد، تعداد کشورهای مستعمره بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد.

رابطه ۳:  $C_n = c_n - \max_i \{C_n\}$

$C_n$ : هزینه امپریالیست  $n$ ام.

$\max_i \{C_n\}$  = بیشترین هزینه میان امپریالیست.

$C_n$ : هزینه نرمالیزه شده این امپریالیست.

قدرت نسبی نرمالیزه هر امپریالیست، به صورت رابطه ۴ محاسبه شده و بر مبنای آن کشورهای مستعمره بین این امپریالیست‌ها تقسیم می‌شوند:

رابطه ۴:  $P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right|$

قدرت نرمالیزه شده یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که توسط آن امپریالیست اداره می‌شود. تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست برابر خواهد بود با:

رابطه ۵:  $N.C_n = \text{round} \{P_n, N_{col}\}$

$N.C_n$ : تعداد اولیه مستعمرات یک امپراتوری.

$N_{col}$ : تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در جمعیت کشورهای اولیه.

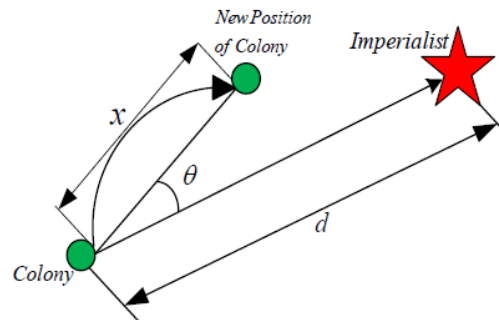
round: تابعی است که نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری را می‌دهد.

بعد از تقسیم تمام مستعمره‌ها بین امپراتورها و تشکیل امپراتوری‌های اولیه، مستعمره‌ها شروع به حرکت به سمت امپراتورها می‌کنند. این حرکت مدل کننده سیاست جذب است. شکل ۲ نشان‌دهنده حرکت یک مستعمره به سمت امپراتور است. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، فاصله مستقیم بین فاصله استعمارگر و مستعمرات برابر با  $d$  در نظر گرفته شده است. حرکت مستعمره به سمت استعمارگر، نه به‌طور مستقیم و بر روی این خط بلکه با زاویه‌ای برابر با  $\theta$  و به اندازه  $X$  واحد انجام می‌شود. مقدار زاویه انحراف و اندازه حرکت به‌طور یکنواخت، در بازه‌های تعیین شده تصادفی مشخص می‌گردند.

رابطه ۶:  $X = U(0, \beta \times d)$

رابطه ۷:  $\theta = U(-\gamma, \gamma)$

$\beta$  و  $\gamma$  اعداد دلخواهی بوده که فضای جستجوی کلونی اطراف امپراتوری را تعیین می کنند.



شکل ۲: نحوه حرکت کشورها در فضای جستجو بر اساس الگوریتم رقابت استعماری

در حین حرکت کشورهای مستعمره به سمت کشورهای استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیت بهتری از استعمار برسند. در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را باهم عوض می کنند. برای مدل سازی این رقابت، ابتدا احتمال تصاحب مستعمرات توسط هر امپراتوری با در نظر گرفتن هزینه کل امپراتوری به صورت رابطه ۸ محاسبه می شود.

رابطه ۸:  $NT.C_n = T.C_n - \max_i \{T.C_i\}$

$NT.C_n$ : هزینه کل نرمالیزه شده امپراتوری.

$T.C_n$ : هزینه کل امپراتوری  $n$ ام که به صورت رابطه ۹ محاسبه می شود:

رابطه ۹:  $T.C_n = \text{cost}(\text{imperialit}_n) + \xi \text{mean}\{\text{colonesofempire}_n\}$

$\xi$ : عددی مثبت در نظر گرفته شده بین صفر و یک و نزدیک صفر.

در حقیقت  $T.C_n$  معادل هزینه کل یک امپراتوری و  $NT.C_n$  معادل قدرت کلی آن است. امپراتوری با کمترین هزینه دارای بیشترین قدرت است. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده احتمال (قدرت) تصاحب مستعمره، رقابت توسط هر امپراتوری به صورت رابطه ۱۰ محاسبه می شود:

رابطه ۱۰:  $P_{pm} = \left| \frac{NT.C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NT.C_i} \right|$

با معلوم بودن احتمال تصاحب هر امپراتوری، برای اینکه مستعمرات مذکور به صورت تصادفی ولی با احتمال تصاحب

هر امپراتوری، بین امپراتورها تقسیم شود، بردار  $P$  از روی احتمال فوق به صورت زیر تشکیل می شود:

$$P = [P_{P1}, P_{P2}, P_{P3}, \dots, P_{PN_{imp}}] \quad \text{رابطه ۱۱}$$

سپس بردار تصادفی  $R$ ، هم بردار با  $P$  ایجاد می‌شود. آرایه‌های این بردار، اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه عددی بین ۰ و ۱ می‌باشد.

$$R = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}}] \quad \text{رابطه ۱۲}$$

سپس بردار  $D$  به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$D = P - R \quad \text{رابطه ۱۳}$$

با داشتن بردار  $D$  مستعمرات به امپراتوری‌ای داده خواهد شد که اندیس مربوط به آن در بردار  $D$  بزرگ‌تر از بقیه باشد. امپراتوری که بیشترین احتمال تصاحب را داشته باشد با احتمال بیشتری اندیس مربوط به آن در بردار  $D$  بیشترین مقدار را خواهد داشت. با تصاحب مستعمره توسط یکی از امپراتورها، عملیات این مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد.

همان‌گونه که بیان شد در جریان رقابت‌های امپریالیستی، امپراتوری‌های ضعیف سقوط کرده و امپراتوری‌های قوی‌تر مستعمرات آن‌ها را تصاحب می‌کنند. برای سقوط یک امپراتوری شروط متفاوتی را می‌توان در نظر گرفت، در الگوریتم پیشنهادی یک امپراتوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد. الگوریتم موردنظر تا برآورده شدن یک شرط همگرایی و یا تا تمام تعداد کل تکرارها ادامه می‌یابد. پس از مدتی همه امپراتورها سقوط کرده و تنها یک امپراتوری باقی خواهد ماند و کشورهای تحت کنترل ایده آل همه مستعمرات توسط یک امپراتوری واحد اداره می‌شوند و موقعیت‌ها و هزینه‌های آن‌ها برابر با موقعیت و هزینه کشور امپریالیست است. در این شرایط تفاوتی میان مستعمرات وجود ندارد. این عدم تفاوت میان آن‌ها و کشور امپریالیست را می‌توان به خوبی دید. در چنین موقعیتی رقابت امپریالیستی به پایان رسیده و الگوریتم متوقف می‌شود. شکل ۳ فلوجارت اجرای الگوریتم را مطابق با توضیحات فوق نشان می‌دهد (Atashpaz و همکاران، ۲۰۰۸).

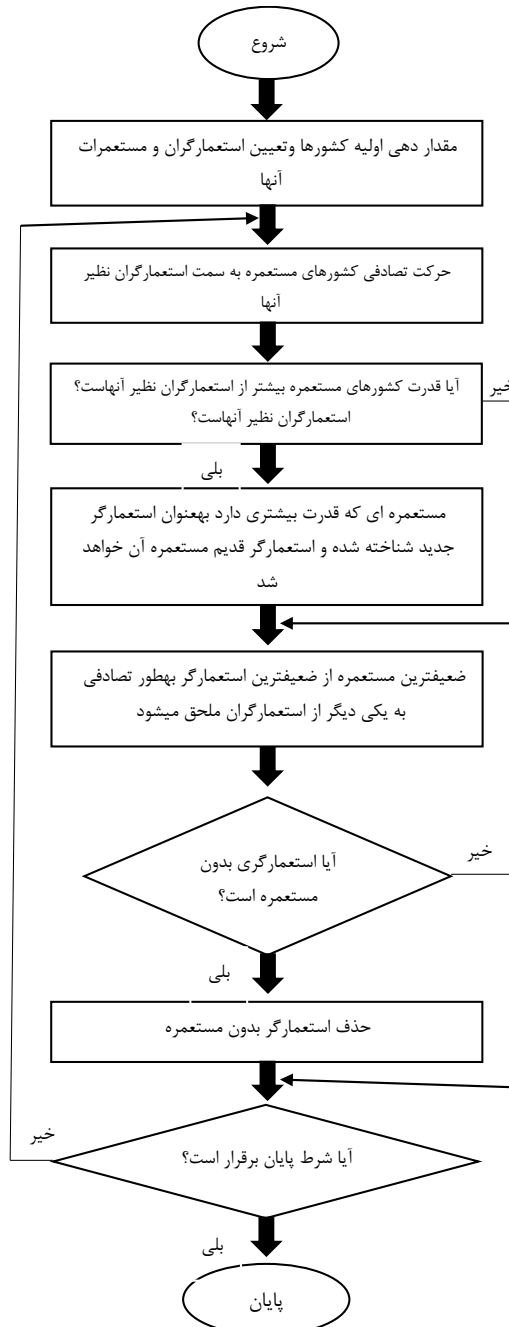
### مدل شبیه‌سازی

اولین گام تهیه یک مدل EPANET از مسئله موردنظر می‌باشد (Rossman، ۲۰۰۰). بدین منظور کلیه مشخصات شبکه از قبیل مشخصات خطوط لوله، گره‌ها و مخازن در مدل وارد شد. معادلات استفاده شده در این پژوهش به صورت زیر بیان شده است:

الف- پیوستگی جریان در هر گره (بقاء جرم)

$$\sum_i Q_{ij} - \alpha_k Q_{req, i} - I_{i, k} = 0, \text{for } i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, N_L \quad \text{رابطه ۱۴}$$

در این رابطه  $Q_{ij,k}$  مقدار جریان بین گره  $i$  و  $j$ ،  $\alpha$  ضریب نیاز آبی،  $Q_{req,i}$  نیاز آبی متوسط گره  $i$ ،  $I_{i,k}$  نشت در گره  $i$ ،  $N$  تعداد گره‌های سیستم،  $N_L$  تعداد کل بازه‌های زمانی منحنی تغییرات نیاز آبی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که اندیس  $k$  نشان‌دهنده بازه زمانی  $k$  ام منحنی تغییرات نیاز آبی است.



شکل ۳: فلوچارت اجرای الگوریتم رقابت استعماری

ب- افت انرژی در هر یک از لوله‌ها (قانون بقای انرژی) به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$H_{i,k} - H_{j,k} = h_{i,j,k} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

در این رابطه  $H_{i,k}$  و  $H_{j,k}$  به ترتیب هد در گره‌های  $i$  و  $j$  و  $h_{i,j,k}$  افت انرژی بین گره  $i$  و  $j$  است. اندیس  $k$  نشان‌دهنده بازه زمانی  $k$  ام منحنی تغییرات نیاز آبی است. متناسب با نوع ارتباط بین گره  $i$  و  $j$ ، مقدار می‌تواند با رابطه مناسب محاسبه گردد. در اینجا روابط زیر در نظر گرفته می‌شوند:

لوله- رابطه هیزن- ویلیامز در واحد SI:

$$h_{i,j,k} = 10.668 C_{ij}^{-1.852} d_{ij}^{-4.871} L_{ij} Q_{ij,k}^{1.852} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

که در آن  $C_{ij}$  ثابت هیزن- ویلیامز،  $d_{ij}$  قطر لوله است.

شیر فشارشکن:

$$h_{i,j,k} = 10.668 C_{ij}^{-1.852} (u_{ij,k}, d_{ij})^{-4.871} L_{ij} Q_{ij,k}^{1.852} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

که در آن  $u_{ij,k}$  ضریب قطر ( عددی بین ۰ تا ۱) است که وجود یک شیر در ارتباط بین گره  $i$  و  $j$  را در بازه زمانی  $k$  ام مدل می‌کند. به‌طور مشخص، برای تبدیل جمله  $u_{ij,k}$  به  $V_{ij,k}$  (تنظیم یا بازشدگی شیر) همانند محققان دیگر (جوویت و زو، ۱۹۹۰ و نیکولینی و زوواتو، ۲۰۰۹ و نیکولینی، ۲۰۱۱) از رابطه زیر برای تعیین بازشدگی شیر استفاده می‌شود:

$$V_{i,j,k} = u_{ij,k}^{4.871/1.852} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

حداقل کردن نشت کل سیستم به‌عنوان هدف مسئله مورد بررسی در نظر گرفته شده است که به‌صورت متوسط تلفات

حقیقی سیستم در کل بازه‌های زمانی در نظر گرفته می‌شود:

$$f = \frac{1}{N_L} \sum_{k=1}^{N_L} \sum_{i=1}^{N_S} I_{i,k} = \frac{1}{N_L} \sum_{k=1}^{N_L} \sum_{i=1}^{N_S} C_{t,i} L_{t,i} P_{i,k}^\gamma \quad \text{رابطه ۱۹}$$

در رابطه فوق  $N_S$  نماینده تعداد گره‌های سیستم است که در آن‌ها نشت اتفاق می‌افتد. مهم‌ترین قید مسئله رعایت

حداقل فشار موردنیاز در گره‌های شبکه است. که به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$P_{i,k} \geq P_{req,i} \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$for\ i = 1, \dots, N$$

در این رابطه  $P_{i,k}$  فشار گره  $i$  در بازه زمانی  $k$  ام و  $P_{req,i}$  حداقل فشار مجاز در گره  $i$  ام می‌باشند.

قید پیوستگی (رابطه ۱۴) و قید انرژی (رابطه ۱۵) هر دو توسط مدل شبیه‌سازی در ضمن شبیه‌سازی یک پاسخ لحاظ

می‌شوند. اما قید (رابطه ۲۰) حداقل فشار مجاز در گره‌های مرجع شبکه است که در اینجا از طریق تعریف یک تابع جریمه

مناسب در مدل بهینه‌سازی وارد می‌شود (رابطه ۲۱).



رابطه ۲۱:

$$penalty = \alpha * \sum_{i=1}^k he(P_{req,i} - P_{i,k}).(P_{req,i} - P_{i,k})$$

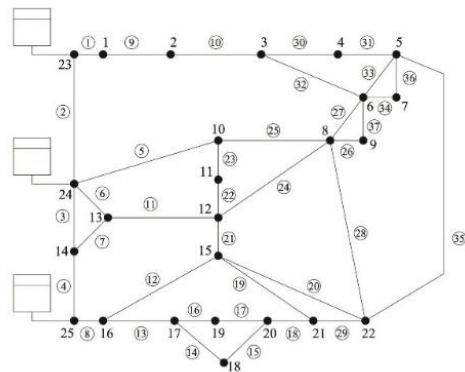
در رابطه فوق he دستور heaviside در متلب و  $\alpha$  پارامتر جریمه است که مقدار آن توسط کاربر انتخاب می‌شود. مدل بهینه‌سازی موردنظر در محیط MATLAB توسعه داده شد. در این مدل برای شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه و تعیین پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز، بخش هیدرولیکی مدل EPANET2 به‌عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات (DLL) در محیط MATLAB وارد شده و با فراخوانی دستورات لازم شبکه موردنظر تحلیل هیدرولیکی می‌شود. مدل بهینه‌سازی که برای مسئله‌ای با فرمول‌بندی ذکرشده در بخش قبل توسعه داده شد، در محیط MATLAB با تحلیل‌گر هیدرولیکی شبکه تلفیق شد.

### مطالعه‌ی موردی

با حل مسئله بهینه‌سازی جانمایی و تنظیمات شیرهای فشارشکن در یک سیستم توزیع آب پایلوت که قبلاً توسط (Jowitt and Xu, 1990؛ Nicolini and Zovatto, 2009؛ Nicolini, 2011) نیز موردتوجه قرار گرفته است، این شبکه شامل ۲۵ گره، سه مخزن و ۳۷ خط لوله است. متوسط مصرف آب در شبکه ۱۵۵ لیتر در ثانیه است (شکل ۴). ضریب متناسب‌کننده نشت در واحد طول لوله به فشار به‌صورت  $(C_L=10^{-5})$  تعیین شده و توان رابطه نشت برابر  $\gamma = 1/18$  در نظر گرفته شده است. تراز آب در مخازن مطابق جدول ۱ ثابت و برابر تراز نرمال در نظر گرفته شده است. حداقل فشار قابل‌قبول برای گره‌های مصرفی شبکه شماره‌های ۱۹، ۲۲، ۲۱ و ۱۳ برابر ۳۰ متر تعیین شده است. در سایر گره‌های فشار می‌تواند از حداقل ۳۰ متر تخطی کند. تعداد شیرها برابر ۵ عدد در نظر گرفته شده است. به‌صورت تجربی متوجه شدیم که تنظیم پارامتر جریمه  $\alpha$  (رابطه ۲۱) برابر ۱۰۰۰۰ اثر به‌سزایی در بهبود نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل دارد.

جدول ۱: مشخصات مخازن شبکه

| شماره گره | سطح حداقل (متر) | سطح متوسط (متر) | سطح حداکثر (متر) |
|-----------|-----------------|-----------------|------------------|
| ۲۳        | ۵۴/۵            | ۵۴/۶۶           | ۵۶               |
| ۲۴        | ۵۴/۵            | ۵۴/۶            | ۵۵/۵             |
| ۲۵        | ۵۴              | ۵۴/۵            | ۵۵/۵             |



شکل ۴: شبکه مورد مطالعه

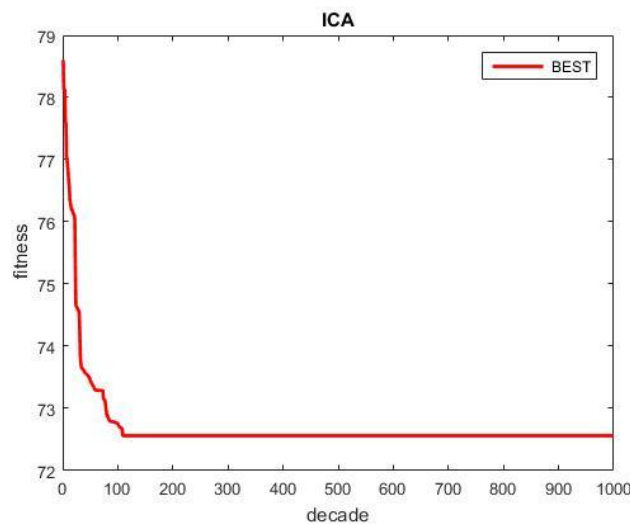
## نتایج و بحث

با استفاده از مدل تهیه‌شده مبتنی بر الگوریتم ICA جانمایی و تنظیمات بهینه شیرهای فشارشکن انجام شد. مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم ICA که پس از چندین بار اجرای مدل با مقادیر مختلف این پارامترها به نحوی تنظیم شد که الگوریتم ICA بهترین عملکرد را داشته باشد، در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای الگوریتم ICA

| مقدار           | پارامتر                   |
|-----------------|---------------------------|
| ۱۰۰             | تعداد کشورهای اولیه       |
| ۱۰              | تعداد امپراتوری‌های اولیه |
| ۱۰۰۰            | ماکزیمم تعداد تکرار       |
| ۲               | $\beta$                   |
| $\frac{\pi}{4}$ | $\gamma$                  |

برای بررسی توانایی مدل توسعه داده‌شده با تنظیم پارامترها برابر مقادیر فوق‌الذکر، مدل ۶ بار مورد آزمایش قرار گرفت. تعداد تکرارهای حلقه الگوریتم ICA در هر یک از این آزمایش‌ها برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. شکل ۵ شمایی از حرکت بهترین عضو هر نسل به سمت پاسخ بهینه را در حلی که منجر به بهترین پاسخ شده است نشان می‌دهد.



شکل ۵: شمایی از حرکت بهترین جزء در هر تکرار به سمت پاسخ بهینه

باتوجه به شکل ۵، می‌توان گفت که همگرایی در ۱۰۰ تکرار اول نشان دهنده‌ی توان جستجوی عمومی خوب و عدم موفقیت در یافتن پاسخ‌های بهتر در ادامه نشان دهنده جستجوی محلی ضعیف می‌باشد. مقدار نشت در شرایط هیدرولیکی Load1، Load2 و Load3 در حل بهینه مسئله توسط مدل بهینه‌سازی نیز در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین فشار در گره‌های مرجع در شرایط هیدرولیکی مختلف نیز به ازای حل بهینه در جدول ۴ نشان داده شده است.

## جدول ۳: جانمایی و تنظیمات بهینه شیرهای کنترل فشار

| Valves                                  | ۲۴    | ۳۷    | ۱     | ۲۰    | ۱۱    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| ضریب قطر ( عددی بین ۰ تا ۱ )<br>Load2   | ۰/۴۴۵ | ۰/۴۵۸ | ۰/۲۱۳ | ۰/۷۷۹ | ۰/۹۰۶ |
| ضریب قطر ( عددی بین ۰ تا ۱ )<br>Load2   | ۰/۰۰۶ | ۰/۹۱۰ | ۰/۳۵۱ | ۰/۰۰۷ | ۰/۷۱۸ |
| ضریب قطر ( عددی بین ۰ تا ۱ )<br>Load3   | ۰/۸۹۸ | ۰/۸۹۴ | ۰/۵۶۴ | ۰/۰۹۶ | ۰/۹۶۲ |
| تنظیمات یا بازشدگی شیر(درصد) برای Load1 | ۱۲    | ۱۳    | ۲     | ۵۲    | ۷۷    |
| تنظیمات یا بازشدگی شیر(درصد) برای Load2 | ۰     | ۷۸    | ۶     | ۰     | ۴۲    |
| تنظیمات یا بازشدگی شیر(درصد) برای Load3 | ۷۵    | ۷۵    | ۲۲    | ۰     | ۹۰    |

## جدول ۴: میزان تغییرات فشار در گره‌های مرجع شبکه

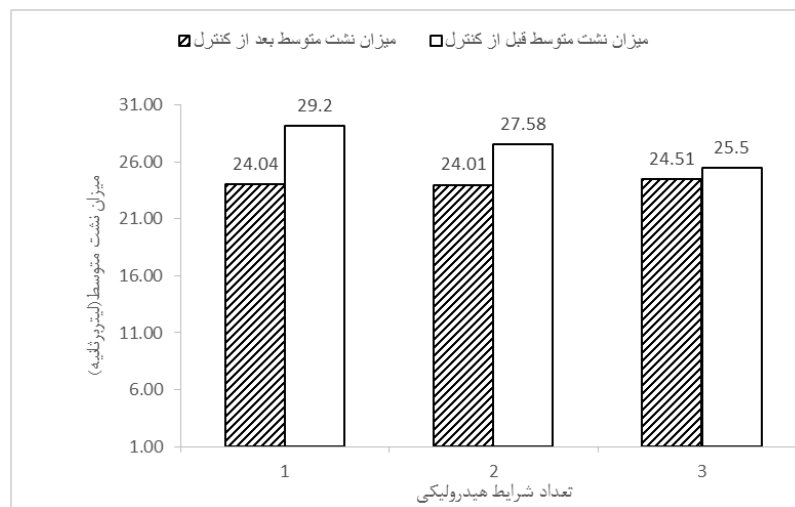
| Trial4       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|
| گره‌های مرجع | Load1 | Load2 | Load3 |
| ۱۳           | ۳۱/۲۶ | ۳۰/۹۰ | ۳۰/۴  |
| ۱۹           | ۲۶/۵۲ | ۳۳/۳۹ | ۳۱/۳۶ |
| ۲۱           | ۳۶/۲۴ | ۳۳/۵۹ | ۳۱/۷۹ |
| ۲۲           | ۳۰/۰۱ | ۳۰/۰  | ۳۰/۷۳ |

جدول ۵ میزان نشت متوسط شبکه و شکل ۶ نمودار میزان نشت متوسط شبکه را قبل و بعد از کنترل در این پژوهش

به‌وسیله‌ی مدیریت فشار با استفاده از الگوریتم ICA را نشان می‌دهند.

## جدول شماره ۵: میزان نشت متوسط در شبکه به‌صورت قبل از کنترل و بعد از کنترل

| میزان نشت متوسط (لیتر بر ثانیه) |              |             |
|---------------------------------|--------------|-------------|
| شرایط هیدرولیکی                 | قبل از کنترل | پس از کنترل |
| Load 1                          | ۲۹/۲         | ۲۴/۰۴       |
| Load 2                          | ۲۷/۵۸        | ۲۴/۰۱       |
| Load 3                          | ۲۵/۵         | ۲۴/۵۱       |
| مجموع نشت متوسط شبکه            | ۸۲/۲۸        | ۷۲/۵۶       |



شکل ۶: نمودار میزان نشت متوسط در شبکه به صورت قبل از کنترل و بعد از کنترل

چنان‌که ملاحظه می‌شود میزان نشت متوسط در سه دوره شرایط نیاز آبی ماکزیمم، متوسط و مینیمم تقریباً به میزان ۱۲ درصد کاهش یافته است، که نشان می‌دهد روش ارائه‌شده در تنظیم سطح فشار برای حداقل کردن نشت در شبکه موفق بوده است. Nicolini و Zovatto (۲۰۰۹) از الگوریتم GA برای تعیین جانمایی بهینه شیرهای فشارشکن از فرمول‌بندی مشابه آنچه در این پژوهش استفاده شده است، استفاده کردند و بهترین پاسخ برابر ۶۸/۸۵ لیتر در ثانیه به دست آمد. در این پژوهش پاسخ بهینه با شش بار حل مدل با استفاده از الگوریتم ICA برابر ۷۲/۵۶ لیتر به دست آمده آمد. در مقایسه این دو روش نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم GA نسبت به الگوریتم ICA با تعداد تکرار و تعداد جمعیت برابر به پاسخ بهتری رسیده است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش مسئله مدیریت بهینه فشار در شبکه‌های توزیع آب در جهت حداقل سازی نشت مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور برای در نظر گرفتن مسائل جانمایی و تنظیمات بهینه شیرها کنترل فشار رویکردی ارائه شد که در آن بهینه‌سازی هم‌زمان جانمایی شیرها و تنظیمات شیرها مورد توجه قرار گرفت. از مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ICA به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شده است. در این مدل الگوریتم بهینه‌سازی ICA در محیط Matlab با شبیه‌ساز هیدرولیکی مدل Epanet تلفیق شد. مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ICA پس از شش بار حل با تعداد جمعیت ۱۰۰ و تعداد دفعات تکرار ۱۰۰۰ بهترین پاسخ برای میزان نشت متوسط از شبکه برابر ۷۲/۵۶ لیتر در ثانیه به دست آمده آمد. همچنین میزان نشت متوسط شبکه در سه دوره شرایط نیاز آبی ماکزیمم، متوسط و مینیمم تقریباً به میزان ۱۲ درصد کاهش یافت. که نشان می‌دهد، روش ارائه‌شده در تنظیم سطح فشار برای حداقل کردن نشت در شبکه موفق بوده است. مسئله مورد بررسی در پژوهش پیشین توسط الگوریتم GA (Nicolini and Zovatto, 2009) نیز

مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. مقایسه بهترین پاسخ‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم GA نسبت به ICA عملکرد بهتری داشته است. که توصیه می‌شود شرکت‌های آب و فاضلاب و آب منطقه‌ای در سطح کشور و شرکت‌های مهندسی مشاور آب و فاضلاب از این متدولوژی با استفاده از الگوریتم GA به عنوان ابزار کنترل بهینه برای جانمایی و تنظیمات شیرهای فشارشکن در جهت به حداقل رساندن نشت در سیستم‌های توزیع آب استفاده نمایند.

### منابع

پورکاظمی، ح. م.، فتاحی، س.، مظاهری، ب. اسدی. (۱۳۹۲). بهینه‌سازی سبب پروژه‌های با اثر متقابل با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری، مجله مدیریت صنعتی، دوره ۵، شماره ۱، ص ۱-۲۰.

تابش، م.، واسطی، م. (۱۳۸۵). کاهش میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری از طریق حداقل نمودن فشار اضافی در شبکه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد- گرایش مهندسی عمران آب- دانشکده فنی دانشگاه تهران.

**Araujo, L. S., Ramos, H., and Coelho, S. T. (2006).** Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Journal of Water Resources Management*, 20, 133-149.

**Atashpaz-Gargari, E., Hashemzadeh, F., Rajabioun, R. and Lucas, C., (2008).** Colonial Competitive Algorithm, a novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, Vol. 1 No. 3, 2008, pp. 337-355.

**Committee for the Vigilance on the Use of Water Resources (COVIRI). (2006).** Relazione annuale al Parlamento sullo stato dei servizi idrici. Anno 2005. Autorità di Vigilanza sulle risorse idriche e sui rifiuti (in Italian).

**Jowitt, P. W., and Xu, C. (1990).** Optimal valve control in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 116(4), 455-472.

**Nicolini, M. (2011).** Optimal pressure management in water networks: Increased efficiency and reduced energy costs. *Defense Science Research Conference and Expo (DSR)*, IEEE, Singapore, 1-4.

**Nicolini, M., and Zovatto, L. (2009).** Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(3), 178-187.

**Roshani, E., & Fillion, Y. (2014).** WDS leakage management through pressure control and pipes rehabilitation using an optimization approach. *Procedia Engineering*, 89, 21-28.

**Rossman, L. A. (2000).** Epanet 2, users manual, EPA/600/R-00/057, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

- Saldarriaga, J., & Salcedo, C. A. (2015).** Determination of Optimal Location and Settings of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Networks for Minimizing Water Losses. *Procedia Engineering*, 119, 973-983.
- Thornton, J. and Lambert, A. (2005).** Progress in practical prediction of pressure: Leakage, pressure: Burst frequency and pressure: Consumption relationships. *Proceedings of IWA Special Conference 'Leakage 2005'*, Halifax, Nova Scotia, Canada