

مقاله علمی-پژوهشی

طراحی چند منظوره شبکه‌های آبرسانی با هدف کاهش فشار اضافی در سطح شبکه (مطالعه موردی: شبکه آبرسانی اسماعیل آباد)

محمد یوسفی^۱، محمد گیوه‌چی^۲، مهدی اژدری مقدم^{۳*}، جعفر جعفری اصل^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۱۳

چکیده

یافتن قطر بهینه لوله‌ها در شبکه‌های آبرسانی به منظور کمینه کردن هزینه‌های طراحی به دلیل داشتن قیود و متغیرهای تصمیم زیاد، یکی از چالش‌های مهم در مقابل طراحان می‌باشد. در چند دهه‌ی اخیر توسعه و معرفی روش‌های بهینه‌سازی جدید و عملکرد خوب این روش‌ها در حل مسائل پیچیده مهندسی، موجب سوق مهندسين به سمت استفاده از این روش‌ها در طراحی شبکه‌های آبرسانی شده است. در پژوهش حاضر، عملکرد یکی از الگوریتم‌های نوظهور فراکاوشی تحت عنوان الگوریتم شیر مورچه در حل مسئله بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه‌های آبرسانی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور یک مدل بهینه‌سازی - شبیه‌سازی چند هدفه مبتنی بر الگوریتم شیر مورچه و مدل شبیه‌ساز EPANET توسعه داده شد. مدل توسعه داده شده برای بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه اسماعیل آباد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به صورت یک جبهه پارتو بین هزینه طراحی و مجموع مربعات اختلاف فشار ارائه گردید. بررسی پاسخ‌های بدست آمده نشان داد مدل مذکور علاوه بر اینکه توانسته است هزینه طراحی را در حدود ۱۵ درصد نسبت به سایر روش‌های موجود کاهش دهد، میزان اضافه فشار موجود در سطح شبکه را نیز به صورت چشم‌گیری کاهش داده است. در نتیجه می‌توان با اطمینان، از روش مذکور به عنوان روشی کارا در طراحی شبکه‌های آبرسانی بهره برد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فرااکتشافی، بهینه‌سازی، شبکه‌های آبرسانی، EPANET، MATLAB

مقدمه

محدودیت‌های مربوط به سرعت لوله‌ها و فشار گره‌های شبکه، ضروری باشد تا بدون استفاده از ابزارهای کنترل فشار نظیر شیرهای فشار شکن، سرچ تانک و نظایر آن تنها با انتخاب قطر مناسب لوله‌های شبکه اضافه فشار در سطح شبکه کنترل گردد. مطالعات مختلفی با هدف ارائه یک چارچوب جدید و موثر برای حل مسئله بهینه‌سازی قطرهای شبکه‌های آبرسانی صورت گرفته است. به عنوان مثال شمیر و آلپرو (۱۹۷۷) از یک مدل خطی جهت بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی استفاده کردند (Shamir and Alperovits, 1977). سو و همکاران (۱۹۸۷) استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی را جهت بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی پیشنهاد دادند (Su et al., 1987). در دهه‌های اخیر استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی به طور گسترده‌ای برای حل مسائل پیچیده مهندسی مورد توجه محققان قرار گرفته است. الگوریتم‌های فراکاوشی یکی از موثرترین و قدرتمندترین این روش‌ها می‌باشند که تا به امروز به طور گسترده در صنعت مهندسی آب، به خصوص در مدیریت شبکه‌های آبرسانی مورد

در طراحی شبکه‌های آبرسانی، طراحان به دنبال رسیدن به اقتصادی‌ترین طرح ممکن می‌باشند تا علاوه بر تأمین نیاز گره‌ها، هزینه اجرایی نیز تا حد ممکن کاهش یابد. با بزرگتر و پیچیده‌تر شدن این شبکه‌ها رسیدن به این هدف مشکل می‌باشد. پیچیدگی مسئله طراحی بهینه شبکه‌های آبرسانی زمانی بیشتر می‌شود که رعایت

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
 - ۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
 - ۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
 - ۴- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
- (*)- نویسنده مسئول:
(Email: mazhdary@eng.usb.ac.ir)

استفاده کردند. آن‌ها توانستند با استفاده از مدل توسعه داده شده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک هزینه‌های طراحی را در حدود ۵/۱۱ درصد در مقایسه با طرح اولیه کاهش دهند. همچنین استفاده از مدل توسعه داده شده با لحاظ نمودن اثر پدیده ضربه‌قوچ، نشان داد با تغییر تنها ۳ قطر از لوله‌های شبکه، می‌توان اضافه فشار موجود در گره‌ها را ا به طور قابل توجهی کاهش داد.

با توجه به اهمیت طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های آبرسانی، هدف اصلی مطالعه حاضر توسعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چندهدفه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB در ارتباط با مدل شبیه‌ساز EPANET برای بازطراحی شبکه آبرسانی اسماعیل آباد لرستان با هدف کاهش هزینه‌های طراحی شبکه می‌باشد. در مطالعات صورت گرفته بر روی شبکه آبرسانی مذکور، تا کنون به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از طریق مدیریت همزمان فشار در کنار کاهش هزینه‌های طراحی شبکه پرداخته نشده است. همچنین در این مطالعه از یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید و قدرتمند تحت عنوان الگوریتم شیر مورچه جهت یافتن قطر بهینه‌لوله‌ها استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

الگوریتم بهینه‌سازی ALO

الگوریتم ALO برگرفته شده از رفتار شیرمورچه برای شکار مورچه می‌باشد. اساس کار این الگوریتم در نظر گرفتن مورچه به عنوان عامل جستجو در فضای مسئله و در مرحله بعد اجازه شکار شدنش توسط شیرمورچه است. در طبیعت، یک مورچه از مسیرهای مختلفی به صورت تصادفی برای یافتن غذا استفاده می‌کند و در نهایت کوتاه‌ترین مسیر به غذا تا لانه را پیدا می‌کند. در اینجا حرکت مورچه به صورت رابه ۱ مدل‌سازی می‌گردد:

$$X(t) = [0, \text{consum}(2r(t_1) - 1), \text{consum}(2r(t_2) - 1), \dots, \text{consum}(2r(t_n) - 1)] \quad (1)$$

که cumsum نشانگر فراوانی تجمعی است. n و t به ترتیب تعداد حداکثر تکرار و مرحله راه رفتن تصادفی را نشان می‌دهند، $r(t)$ نیز یک تابع تصادفی است که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$R(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{rand} \geq 0.5 \\ 0 & \text{if } \text{rand} \leq 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

که t نشان دهنده مرحله راه رفتن تصادفی و rand یک عدد تصادفی در بازه [0-1] است. موقعیت مورچه‌ها در ماتریسی به صورت زیر ذخیره شده و در طول بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شود.

$$M_{Ant} = \begin{bmatrix} A_{1.1} & A_{1.2} & \dots & \dots & A_{1.d} \\ A_{2.1} & A_{2.2} & \dots & \dots & A_{2.d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n.1} & A_{n.2} & \dots & \dots & A_{n.d} \end{bmatrix} \quad (3)$$

استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه برخی از این مطالعات ارائه شده است. منصوری و ترابی (۱۳۹۴) با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی؛ منصوری و محمدی‌زاده (۱۳۹۷) با استفاده از الگوریتم نیروی مرکزی؛ قبادیان و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی قطر شبکه‌های آبرسانی پرداختند. همچنین می‌توان اشاره کرد به پژوهش جعفری‌اصل و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری؛ جعفری‌اصل (۱۳۹۶) با استفاده از الگوریتم تکامل فرهنگی به بهینه‌سازی موقعیت و تنظیمات شیرهای فشارشکن در شبکه‌های آبرسانی پرداختند. همچنین رجب‌پور و همکاران (۱۳۹۶) نیز از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی برنامه‌زمانی کارکرد پمپ‌ها در شبکه‌های آبرسانی استفاده کردند.

عامل اصلی انتقال آب در شبکه‌های آبرسانی، اختلاف-ارتفاع فشاری بین گره‌ها می‌باشد. فشار بیش از حد تحمل لوله‌ها موجب افزایش نشت و بیشتر شدن حوادث شبکه می‌شود. از طرفی فشار کمتر از حد مطلوب نیز موجب عدم تامین تقاضا در شبکه خواهد شد. همچنین احتمال شکستگی لوله‌ها، شیرآلات و سایر تجهیزات شبکه در فشارهای بالا افزایش یافته و پایداری سازه‌ای شبکه‌های آبرسانی به مخاطره می‌افتد. از این رو حفظ فشار در سطح شبکه در محدوده استاندارد ضروری می‌باشد (جعفری‌اصل و همکاران، ۱۳۹۶). علی‌رغم اینکه تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه‌های آبرسانی صورت گرفته است ولی مسئله مدیریت فشار در این شبکه‌ها نیز با استفاده از بهینه‌سازی قطرها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از مطالعات انجام شده در زمینه طراحی بهینه شبکه‌های آبرسانی و مدیریت فشار به صورت همزمان می‌توان اشاره کرده به تحقیق شاهی‌نژاد (۱۳۹۰) که با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی مختلط اعداد حقیقی و صحیح به بهینه‌سازی شبکه آبرسانی با لحاظ نمودن اثر تغییرات فشار بر روی شبکه پرداخت. در مطالعه آن‌ها شبکه آبرسانی اسماعیل آباد لرستان به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب گردید و بهینه‌سازی قطرهای شبکه تحت دو سناریو با لحظ نمودن اثرات پدیده ضربه‌قوچ و بدون لحاظ نمودن اثرات ضربه‌قوچ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بهینه‌سازی قطرهای شبکه آبرسانی با در نظر گرفتن اثرات ضربه‌قوچ منجر به افزایش هزینه‌های طراحی در حدود ۱۲ درصد نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن اثرات ضربه‌قوچ گردید.

همچنین قبادیان و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به بررسی عددی ضربه‌قوچ بر روی طراحی شبکه‌های شبکه‌های آبرسانی پرداختند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای یافتن مقادیر بهینه قطرها در کنار یک مدل عددی جهت شبیه‌سازی پدیده ضربه‌قوچ

به طوری که M_{Ant} ، A_{ij} و n و d به ترتیب بیانگر موقعیت هر مورچه، مقدار متغیر زام مورچه λ ، n تعداد مورچه‌ها و d تعداد متغیرها می‌باشد. لازم به ذکر است مورچه‌ها در ALO نقش ذرات در PSO و افراد در GA را دارا هستند. به منظور سنجش هر مورچه، یک تابع برازندگی حین بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شود که در ماتریس رابطه (۴) ذخیره می‌شود.

$$M_{OA} = \begin{bmatrix} f(A_{1.1} \cdot A_{1.2} \cdot \dots \cdot A_{1.d}) \\ f(A_{2.1} \cdot A_{2.2} \cdot \dots \cdot A_{2.d}) \\ \vdots \\ f(A_{n.1} \cdot A_{n.2} \cdot \dots \cdot A_{n.d}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

همچنین برای ذخیره موقعیت شیرمورچه‌ها که فرض می‌شود در فضایی پنهان شده اند و تابع هدف آن از دو ماتریس به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$M_{AntLion} = \begin{bmatrix} AL_{1.1} & AL_{1.2} & \dots & \dots & AL_{1.d} \\ AL_{2.1} & AL_{2.2} & \dots & \dots & AL_{2.d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ AL_{n.1} & AL_{n.2} & \dots & \dots & AL_{n.d} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_{OAL} = \begin{bmatrix} f(AL_{1.1} \cdot AL_{1.2} \cdot \dots \cdot AL_{1.d}) \\ f(AL_{2.1} \cdot AL_{2.2} \cdot \dots \cdot AL_{2.d}) \\ \vdots \\ f(AL_{n.1} \cdot AL_{n.2} \cdot \dots \cdot AL_{n.d}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

که $M_{AntLion}$ ماتریس موقعیت شیرمورچه‌ها و M_{OAL} ماتریس تابع هدف هر شیرمورچه را مشخص می‌کند. همچنین $AL_{i,j}$ و n و d به ترتیب بیانگر موقعیت شیرمورچه، تعداد شیرمورچه‌ها و تعداد متغیرها می‌باشد.

الگوریتم ALO در مرحله اول با تولید یک جمعیت اولیه از مورچه‌ها یک مجموعه راه حل تصادفی جهت حل مسئله بهینه‌سازی ایجاد می‌کند. سپس محدوده متغیرها را بررسی می‌کند. در مرحله سوم و مهمترین مرحله، تابع برازندگی مورچه‌ها محاسبه می‌شود که هر کدام از این توابع برازندگی بیانگر میزان بهینه بودن راه حل موجود است (Mirjalili, 2015).

معرفی توابع هدف و قیود

توابع هدف

در این پژوهش مسئله طراحی شبکه‌های آبرسانی با توابع هدف کمینه کردن هزینه‌های طراحی (F_1) و مجموع اختلاف فشار در گره‌ها نسبت به فشار مبدا (F_2) مورد توجه قرار گرفت. همچنین جهت تحلیل هیدرولیکی از نرم افزار EPANET استفاده شد.

$$F_1 = \sum_{i=1}^N c_i l_i \quad (15)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^{NJ} (P_i - P_i^{des})^2 \quad (16)$$

در رابطه (۱۵)، c_i و l_i به ترتیب هزینه واحد طول و طول لوله i ام را نشان می‌دهند و N نیز بیانگر تعداد لوله‌های موجود در شبکه می‌باشد. همچنین، در رابطه (۱۶) H_i و H_i^{des} به ترتیب هد و حداقل هد استاندارد در گره i و N_I تعداد گره‌های فشاری موجود در شبکه می‌باشند.

محدودیت‌های مسئله

قیدهای مسئله بهینه‌سازی شبکه آبرسانی عمدتاً به سه گروه تقسیم می‌گردد. گروه اول مربوط به معادلات پیوستگی در گره‌ها (رابطه ۱۷، ۱۸ و ۱۹) و معادلات افت انرژی در لوله‌ها می‌باشد که به صورت ضمنی در حین شبیه‌سازی توسط مدل هیدرولیکی EPANET رعایت می‌گردند.

$$\sum_{i \in in(k)} q_i - \sum_{i \in out(k)} q_i = Q_k \quad k = 1, \dots, K \quad (17)$$

$$\sum_{i \in p} J_i = 0 \quad p = 1, \dots, P \quad (18)$$

$$J_i = \mu L_i (q_i / ch_i)^\gamma \quad (19)$$

در این روابط K و P به ترتیب تعداد گره‌ها و حلقه‌های شبکه، q_i دبی در لوله i ام، Q_k دبی برداشتی در گره k ، J_i افت انرژی در لوله i ، d_i قطر لوله i ام، ch_i ضریب افت هیزن-ویلیامز در لوله i ام می‌باشند. در رابطه هیزن-ویلیامز (استفاده شده در مدل EPANET) در سیستم SI پارامترهای λ ، γ و μ به ترتیب برابر $1/852$ ، 1.49 و $4/727$ می‌باشند.

دسته دوم این قیدها، محدودیت‌های مربوط به ارتفاع معادل انرژی حداقل و حداکثر گره‌ها (رابطه ۲۰) و سرعت حداقل و حداکثر لوله‌ها (۲۱) می‌باشد.

$$P_{min} \leq P_k \leq P_{max} \quad k = 1, \dots, K \quad (20)$$

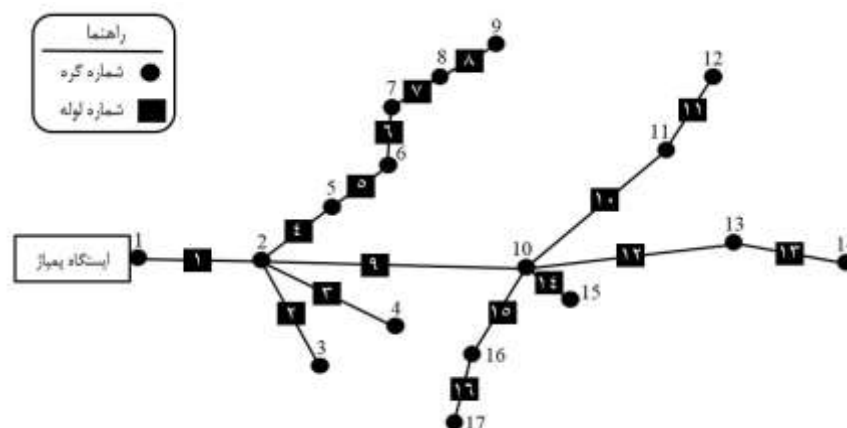
$$V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \quad i = 1, \dots, N \quad (21)$$

در این روابط P_k فشار در گره k ، P_{min} و P_{max} حداقل و حداکثر فشار مجاز در یک گره، V_{min} و V_{max} حداقل و حداکثر سرعت مجاز در لوله‌ها می‌باشند.

محدوده قطر لوله‌های موجود در بازار (۲۲)، دسته سوم قیدها می‌باشد.

$$d_i \in \mathbf{d} \quad i = 1, \dots, N \quad (22)$$

d_i قطر لوله i ام و $\mathbf{d}$ لیست قطر لوله‌های موجود در بازار است.



شکل ۱- آرایش شماتیک شبکه توزیع آب اسماعیل‌آباد

شبکه آبرسانی مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه در این پژوهش، شبکه آبرسانی اسماعیل‌آباد واقع در ۷ کیلومتری شمال غربی شهرستان نورآباد لرستان می‌باشد. اراضی تحت پوشش این شبکه حدود ۱۰۰۰ هکتار می‌باشد. در شکل ۱ آرایش این شبکه به صورت شماتیک نشان داده شده است و همچنین جدول ۱ بیانگر اطلاعات هیدرولیکی و هندسی این شبکه می‌باشد و همچنین در جدول ۲ دبی برداشت و ارتفاع هر گره ذکر شده است. این شبکه توسط شاهی نژاد (۱۳۹۰) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط به صورت بهینه مطلق طرحی گردیده است. در شبکه مورد مطالعه از آبپاش آمبو (AMBO) ساخت ایتالیا استفاده شده است و حداقل فشار مورد نیاز برای استفاده از این نوع ۴ اتمسفر می‌باشد و همچنین با در لحاظ نمودن روابط موجود برای محاسبه میزان فشار در محل اتصال بال آبیاری به لوله اصلی، حداقل فشار استاندارد برای هر گره ۵۰ متر در نظر گرفته شد. بدین ترتیب ارتفاع معادل فشار ورودی ۱۳۹ متر برآورد گردید. همچنین حداقل و حداکثر سرعت مجاز در لوله‌ها نیز به ترتیب ۰/۷ و ۲/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

در جدول ۳ مشخصات و قیمت لوله‌های موجود در بازار به همراه هزینه واحد طول آن‌ها که در طول بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته، ارائه شده است.

نتایج و بحث

در الگوریتم‌های فراکاوشی یافتن مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی الگوریتم یک فرآیند سخت و زمانبر می‌باشد. یکی از مزیت‌های الگوریتم ALO این است که دارای پارامتر تنظیمی نمی‌باشد.

به منظور حل این مسئله بهینه‌سازی، ابتدا قیود مربوط به سرعت جریان و فشار با استفاده از روش تابع جریمه^۱ در تابع هدف مسئله منظور می‌شود و به این ترتیب مسئله مقید فوق به مسئله‌ای نامقید تبدیل می‌شود. هنگام تولید گزینه‌های قابل قبول، مدل تنها مجاز به انتخاب قطرهای استاندارد است و به این ترتیب قید مربوط به قطر لوله‌ها نیز رعایت می‌شود. بر این اساس توابع هدف مورد استفاده در این مدل به صورت رابطه ۲۳ و ۲۴ نوشته می‌شود:

$$\min \begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^N c_i l_i + \alpha * CSV \\ F_2 = \sum_{i=1}^{NJ} (H_i - H_i^{des})^2 \end{cases} \quad (23)$$

$$CSV = \sum_{j=1}^{NJ} \left(\left[\max \left(\frac{P_j}{P_{max}} - 1 \text{ and } 0 \right) \right]^2 + \left[\max \left(\frac{P_j}{P_{min}} - 1 \text{ and } 0 \right) \right]^2 \right) + \sum_{i=1}^{NP} \left(\left[\max \left(\frac{V_i}{V_{max}} - 1 \text{ and } 0 \right) \right]^2 + \left[\max \left(\frac{V_i}{V_{min}} - 1 \text{ and } 0 \right) \right]^2 \right) \quad (24)$$

که در آن CSV تابع جریمه می‌باشد. جریمه تنها در صورتی اعمال می‌شود که قیود مربوط به سرعت جریان یا فشار رعایت نشده باشند. همچنین α پارامتر جریمه می‌باشد که مقدار آن توسط کاربر انتخاب می‌شود. برای بیان صحیح تابع جریمه از تابع پله‌ای^۲ (he) استفاده شده است.

فلوچارت مراحل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

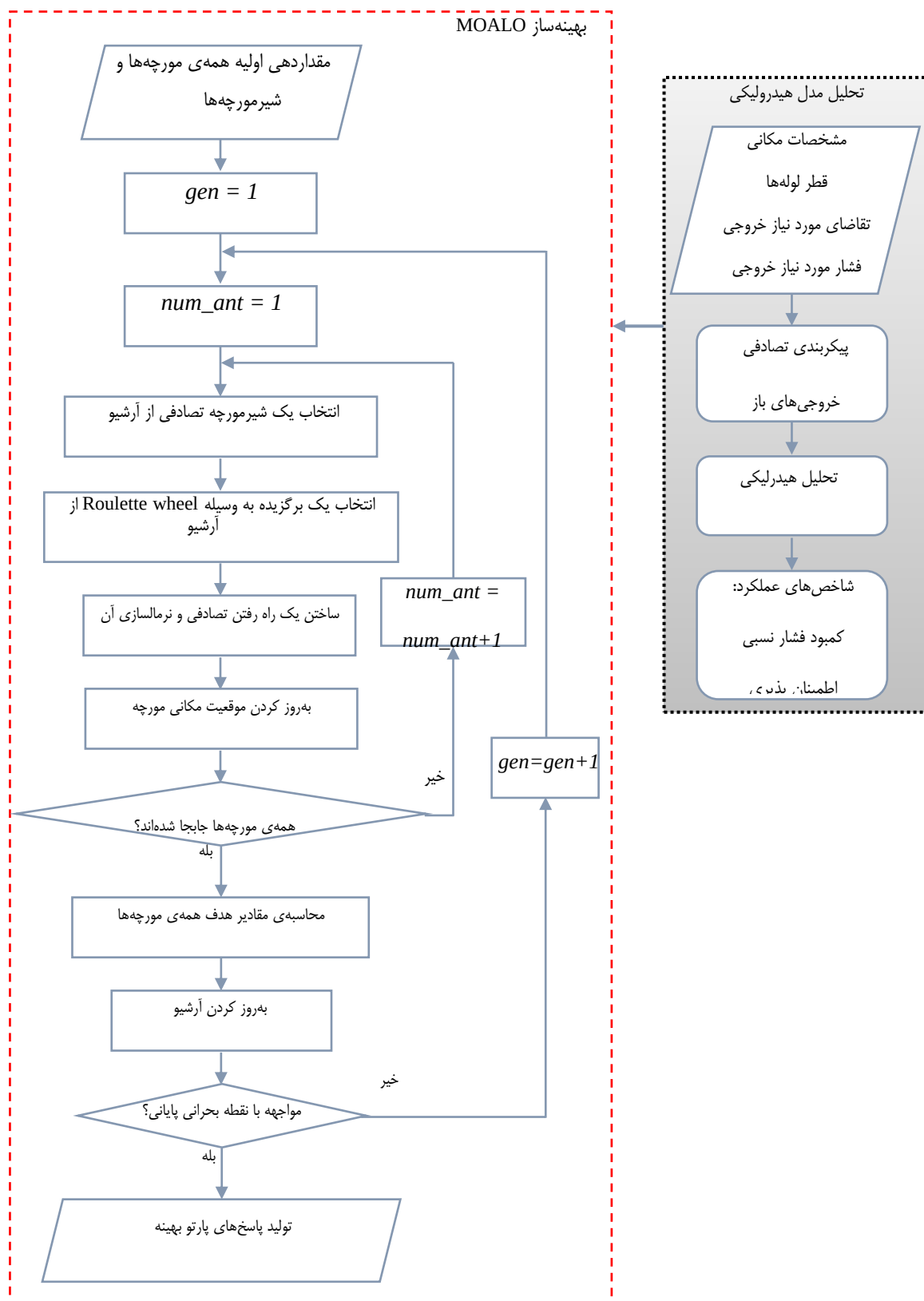
- 1- Penalty Function
2- Heaviside

جدول ۱- اطلاعات هندسی و هیدرولیکی شبکه توزیع آب اسماعیل آباد

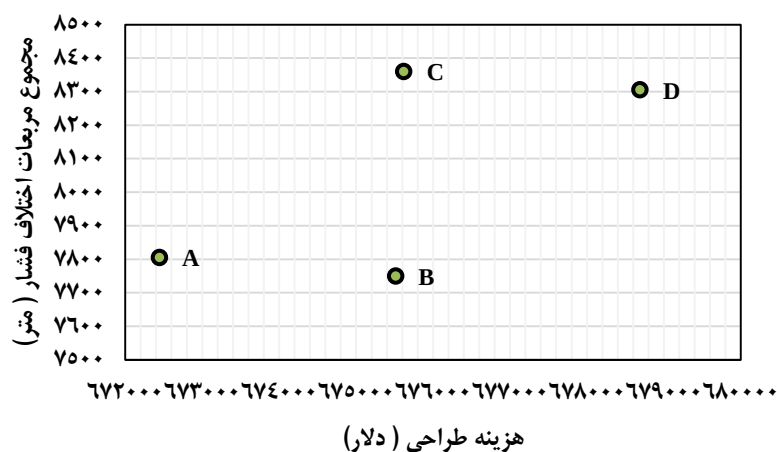
لوله	ارتفاع انتها (متر)	ارتفاع ابتدا (متر)	دبی (لیتر/ثانیه)	طول لوله (متر)
۱	۱۸۴۲/۰۸	۱۷۹۱	۸۵۶/۵۶	۱۱۱۶
۲	۱۸۳۸/۷۱	۱۸۴۲/۰۸	۵۲/۹	۹۹۵
۳	۱۸۵۶/۵۲	۱۸۴۲/۰۸	۱۲۸/۹۴	۱۱۰۰
۴	۱۸۴۷/۰۵	۱۸۴۲/۰۸	۲۴۴/۹۲	۲۰۰
۵	۱۸۴۶/۳۲	۱۸۴۷/۰۵	۱۹۰/۳۴	۲۰۱
۶	۱۸۴۱/۱۸	۱۸۴۶/۳۲	۱۲۸/۹۴	۳۹۰
۷	۱۸۱۱/۳۲	۱۸۴۱/۱۸	۵۸/۳۳	۸۰۶
۸	۱۸۱۰/۹۴	۱۸۱۱/۳۲	۲۱/۴۹	۵۷۵
۹	۱۸۴۷/۵۷	۱۸۴۲/۰۸	۴۲۹/۸	۱۴۳۰
۱۰	۱۸۲۱/۴۸	۱۸۴۷/۵۷	۹۸/۲۴	۶۷۰
۱۱	۱۸۱۴/۴۳	۱۸۲۱/۴۸	۳۳/۷۷	۸۴۰
۱۲	۱۸۲۶/۴۷	۱۸۴۷/۵۷	۱۱۹/۷۳	۷۲۰
۱۳	۱۸۴۷/۹۵	۱۸۲۶/۴۷	۴۹/۱۲	۶۶۰
۱۴	۱۸۴۷/۵۷	۱۸۴۷/۵۷	۴۶/۰۵	۱۱۰
۱۵	۱۸۵۳/۲۱	۱۸۴۷/۵۷	۱۶۵/۸	۵۵۰
۱۶	۱۸۶۱/۸۹	۱۸۵۳/۲۱	۱۳۲	۷۰۰

جدول ۲- داده گره‌ها در شبکه آبیاری اسماعیل آباد

شماره گره	دبی برداشت (لیتر بر ثانیه)	تراز (متر)
۱ (مخزن)	۸۵۶/۵۶	۱۷۸۹
۲	۰	۱۸۴۲/۰۸
۳	۵۲/۹	۱۸۳۸/۷۱
۴	۱۲۸/۹۴	۱۸۶۵/۸۳
۵	۵۴/۵۸	۱۸۴۷/۰۵
۶	۶۱/۴	۱۸۴۶/۳۲
۷	۷۰/۶۱	۱۸۴۱/۱۸
۸	۳۶/۸۴	۱۸۱۱/۳۲
۹	۲۱/۴۹	۱۸۱۰/۹۴
۱۰	۰	۱۸۴۷/۵۷
۱۱	۶۴/۴۷	۱۸۲۱/۴۸
۱۲	۳۳/۷۷	۱۸۱۴/۴۳
۱۳	۷۰/۶۱	۱۸۲۶/۴۷
۱۴	۴۹/۱۲	۱۸۴۷/۹۵
۱۵	۴۶/۰۳	۱۸۴۷/۵۷
۱۶	۳۳/۸	۱۸۵۳/۲۱
۱۷	۱۳۲	۱۸۶۱/۸۹



شکل ۲- الگوریتم بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی با استفاده از MOALO



شکل ۳- جبهه پرتو هزینه اجرای شبکه در مقابل مجموع مربعات اختلاف فشار

جدول ۳- مشخصات و قیمت لوله‌های تجاری (سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۹۴)

شماره	قطر خارجی (mm)	قطر داخلی (mm)	جنس لوله	قیمت (دلار در واحد متر)
۱	۱۱۰	۹۳/۸	PE80	۵/۸۹۵
۲	۱۲۵	۱۰۶/۶	PE80	۵/۸۹۵
۳	۱۴۰	۱۱۹/۴	PE80	۹/۴۹۵
۴	۱۶۰	۱۳۶/۴	PE80	۱۲/۳۷۵
۵	۱۸۰	۱۵۳/۴	PE80	۱۵/۷۰۵
۶	۲۰۰	۱۷۰/۶	PE80	۱۹/۳۰۵
۷	۲۲۵	۱۹۱/۸	PE80	۲۴/۵۲۵
۸	۲۵۰	۲۱۳/۲	PE80	۳۰/۱۵۰
۹	۲۸۰	۲۳۸/۸	PE80	۳۷/۸۰۰
۱۰	۳۱۵	۲۶۸/۶	PE80	۴۷/۷۰۰
۱۱	۳۵۵	۳۰۲/۸	PE80	۶۰/۵۲۵
۱۲	۴۰۰	۳۴۱/۲	PE80	۷۶/۷۲۵
۱۳	۴۵۰	۳۸۳/۸	PE80	۹۵/۲۰۰
۱۴	۵۰۰	۴۲۶/۴	PE80	۱۰۸/۸۲۰
۱۵	۶۰۰	۶۰۰	GRP	۱۱۱/۳۲۳
۱۶	۷۰۰	۷۰۰	GRP	۱۳۷/۹۹۷
۱۷	۸۰۰	۸۰۰	GRP	۱۷۰/۶۶۳
۱۸	۹۰۰	۹۰۰	GRP	۲۰۴/۲۸۹

جدول ۴- هزینه‌های حاصل از هرکدام از پاسخ‌های جبهه پرتو

پاسخ A	پاسخ B	پاسخ C	پاسخ D
۶۷۲۴۴۴/۳۶۷	۶۷۵۵۱۵/۶۱۷	۶۷۵۶۱۹/۱۱۷	۶۷۸۶۹۰/۳۶۷

هزینه (دلار)

جدول ۵- فشار گره‌ای برای هر کدام از پاسخ‌های جبهه پرتو

پاسخ D	پاسخ C	پاسخ B	پاسخ A
۸۲/۴۰	۸۲/۴۰	۸۲/۴۰	۸۲/۴۰
۵۵/۳۵	۵۵/۰۳	۵۵/۰۳	۵۵/۰۳
۵۷/۱۵	۵۷/۱۵	۵۷/۱۵	۵۷/۱۵
۷۵/۴۰	۷۵/۴۰	۷۵/۴۰	۷۵/۴۰
۷۳/۵۶	۷۳/۸۶	۷۳/۸۶	۷۳/۸۶
۷۲/۱۲	۷۲/۱۲	۷۲/۱۲	۷۲/۱۲
۸۵/۱۲	۸۵/۱۱	۸۵/۱۲	۸۵/۱۱
۷۹/۸۷	۷۹/۸۷	۶۶/۴۵	۶۶/۴۵
۷۲/۲۴	۷۲/۲۴	۷۲/۲۴	۷۲/۲۴
۸۵/۶۷	۸۵/۶۷	۸۵/۶۷	۸۵/۶۷
۵۹/۱۱	۵۹/۱۱	۵۹/۱۱	۵۹/۱۱
۸۲/۲۷	۸۲/۲۷	۸۲/۲۷	۸۲/۲۷
۵۰/۷۵	۵۰/۷۵	۵۰/۷۵	۵۰/۷۵
۶۷/۸۳	۶۷/۸۳	۶۹/۶۱	۶۹/۶۱
۶۱/۷۸	۶۳/۸۸	۶۱/۷۸	۶۳/۸۸
۵۰/۸۴	۵۱/۸۸	۵۰/۸۴	۵۱/۸۸

جزئیات هزینه طرح‌های موجود بر روی جبهه پارتو، فشار در هر گره و همچنین قطرهای بهینه شده برای تمام راه حل‌های موجود بر روی جبهه پارتو به ترتیب در جداول ۴، ۵ و ۶ ارائه گردید.

با توجه به جدول ۵، میانگین فشار سطح شبکه برای پاسخ‌های A، B، C و D به ترتیب $۶۸/۷۳$ ، $۶۸/۹$ ، $۶۹/۴۷$ و $۶۹/۴۷$ می‌باشد که نشان می‌دهد فشار گره‌های شبکه در محدوده‌ی نزدیک به فشار مطلوب استاندارد قرار دارند. همچنین مقادیر انحراف از معیار پاسخ‌های A، B، C و D به ترتیب $۱۱/۸۱$ ، $۱۱/۹۲$ ، $۱۲/۱۲$ و $۱۲/۲۳$ می‌باشد که بیانگر توزیع تقریباً یکنواخت فشار در سطح شبکه می‌باشد.

طبق جدول ۶ مشخص است که تفاوت ۴ طرح به دست آمده با یکدیگر تنها در چهار خط لوله از شبکه با یکدیگر متفاوت است که بیانگر این موضوع است که با تعویض چند لوله می‌توان به نتایج متفاوتی از نظر هزینه و مدیریت فشار در سطح شبکه دست یافت.

تاکنون چندین مطالعه با استفاده از روش‌های گوناگون بر روی بهینه‌سازی شبکه آبرسانی اسماعیل آباد انجام شده است. این مطالعات تنها با هدف کاهش هزینه طراحی با یافتن قطرهای بهینه صورت گرفته است. از این مطالعات می‌توان اشاره کرد به منصوری و ترابی (۱۳۹۸) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نیروی مرکزی (CFO) به هزینه برابر با ۷۳۷۹۲۴ دلار دست یافتند. همچنین قبادیان و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک (GA) با

پس از ۵ بار اجرای مدل با در نظر گرفتن جمعیت اولیه و تعداد حداکثر تکرار به ترتیب برابر ۸۰ و ۱۰۰ مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی توسعه داده شده برای بهینه‌سازی قطرهای شبکه آبرسانی اجرا گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل به صورت چهار پاسخ بر روی جبهه پرتو^۱ بین اهداف هزینه طراحی و مربع اختلاف فشار مجموع با چهار پاسخ بهینه ارائه شده است (شکل ۳). تعداد اندک پاسخ‌های موجود بر روی جبهه پرتو بیانگر این می‌باشد که مسئله بهینه‌سازی مذکور دارای قیود پیچیده‌ای می‌باشد.

فشارهای بیشتر از فشار مورد نیاز در سطح شبکه موجب خساراتی همچون نشست و شکست لوله ها و به طبع آن افزایش هزینه بهره‌برداری می‌شود. از این رو مدیریت فشار در سطح شبکه در طول دوره بهره برداری منجر به افزایش قابلیت اطمینان شبکه در طول دوره بهره‌برداری می‌گردد. لحاظ نمودن کاهش فشار اضافی در کنار کاهش هزینه‌های طراحی یکی از موثرترین و به صرفه‌ترین روش‌های مدیریت فشار می‌باشد. در شکل ۳، تعامل دوهدفه بین هزینه‌های طراحی و شاخص فشار مطلوب (کمینه شدن مربع اختلاف فشار طراحی نسبت به فشار مبنا) برقرار شده است که می‌تواند در اتخاذ تصمیم مناسب بر اساس هزینه طراحی و شاخص فشار مطلوب به تصمیم گیرندگان کمک کند. همانگونه که مشخص است نتیجه می‌شود برای رسیدن به شاخص فشار مطلوب بالاتر هزینه طراحی نیز افزایش می‌یابد (جدول ۷).

در نظر گرفتن ضربه قوچ به هزینه ۷۷۵۵۱۱/۲۸ یورو و بدون در نظر گرفتن اثرات ضربه قوچ به هزینه ۷۳۰۹۵۸/۳۷ یورو دست یافتند. که در مقایسه با طرح موجود، روش CFO ۱۰/۶۶ درصد و GA بدون لحاظ کردن ضربه قوچ ۱۱/۵۰ درصد و با لحاظ نمودن پدیده ضربه قوچ ۶/۱۱ درصد موفق به صرفه جویی در هزینه طراحی شدند. در هیچ یک از مطالعات ذکر شده به بهبود وضعیت هیدرولیک شبکه پرداخته نشده است. لذا فشار موجود در سطح شبکه در محدوده

نامطلوب قرار داشته که می‌تواند موجب بروز تلفات و افزایش هزینه بهره‌برداری گردد. در این مطالعه سعی گردید علاوه بر کاهش هزینه طراحی در مقایسه با طرح کنونی شبکه و طرح‌های بهینه به‌دست آمده از مطالعات ذکر شده، وضعیت فشار سطح شبکه نیز به‌صورت مطلوبی کنترل گردد. بدین منظور عملکرد مدل توسعه داده شده در این مطالعه با نتایج مطالعات پیشین و طرح موجود در جدول شماره ۷ مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۶- قطرهای بدست آمده برای لوله‌ها برای هر کدام از پاسخ‌های جبهه پرتو

قطر لوله ۱	قطر لوله ۲	قطر لوله ۳	قطر لوله ۴	قطر لوله ۵	قطر لوله ۶	قطر لوله ۷	قطر لوله ۸	قطر لوله ۹	قطر لوله ۱۰	قطر لوله ۱۱	قطر لوله ۱۲	قطر لوله ۱۳	قطر لوله ۱۴	قطر لوله ۱۵	قطر لوله ۱۶
پاسخ A	۷۰۰	۱۷۰/۶	۳۰۲/۸	۳۸۳/۸	۳۴۱/۲	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۱۹/۴	۶۰۰	۲۸۳/۸	۱۳۶/۴	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۷۰/۶	۳۴۱/۲
پاسخ B	۷۰۰	۱۷۰/۶	۳۰۲/۸	۳۸۳/۸	۳۴۱/۲	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۱۹/۴	۶۰۰	۲۸۳/۸	۱۳۶/۴	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۷۰/۶	۳۴۱/۲
پاسخ C	۷۰۰	۱۷۰/۶	۳۰۲/۸	۳۸۳/۸	۳۴۱/۲	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۵۳/۴	۶۰۰	۲۸۳/۸	۱۳۶/۴	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۵۳/۴	۳۴۱/۲
پاسخ D	۷۰۰	۱۷۰/۶	۳۰۲/۸	۳۸۳/۸	۳۴۱/۲	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۵۲/۴	۶۰۰	۲۸۳/۸	۱۳۶/۴	۲۶۸/۶	۱۹۱/۸	۱۵۲/۴	۳۴۱/۲

جدول ۷- مقایسه هزینه طراحی و همچنین شاخص اختلاف فشار در این پژوهش با پژوهش‌های قبلی

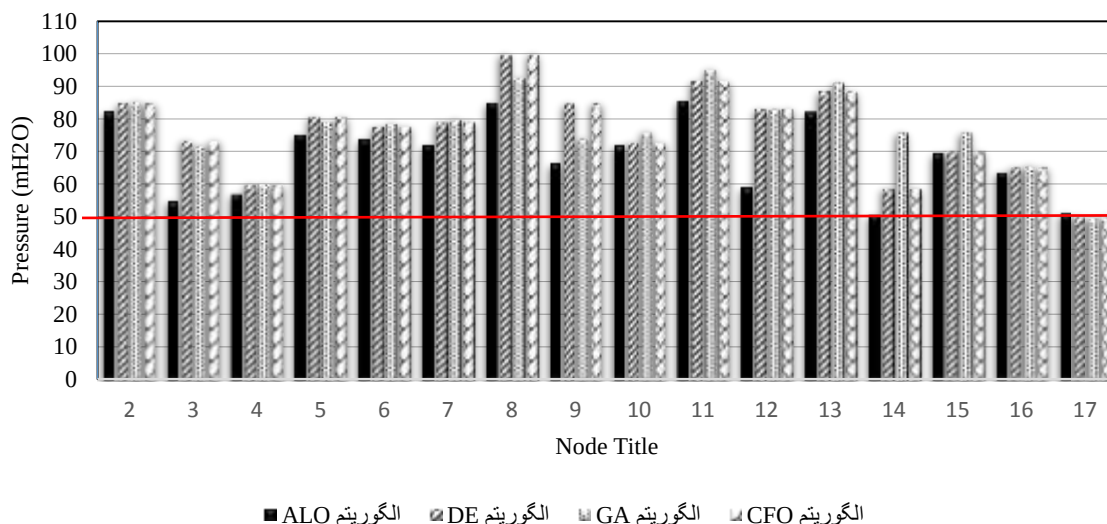
پژوهش	الگوریتم	مربع اختلاف فشار $(h_{req} - h_l)^2$	هزینه (دلار)	درصد صرفه- جویی در هزینه	توضیحات
پژوهش حاضر	ALO	۷۸۰۴/۴۳	۶۷۲۴۴۴/۳۷	۱۸/۵۸	A پاسخ
		۷۷۴۹/۸۰	۶۷۵۵۱۵/۶۲	۱۸/۲۱	B پاسخ
		۸۳۵۹/۷۰	۶۷۵۶۱۹/۲۰	۱۸/۲۰	C پاسخ
		۸۳۰۵/۰۸	۶۷۸۶۹۰/۳۷	۱۷/۸۳	D پاسخ
قبادیان و همکاران	GA	-	۷۳۰۹۵۸/۳۷	۱۱/۵۰	بدون در نظر گرفتن ضربه قوچ
		۱۴۰۱۳/۵۲	۷۷۵۵۱۱/۲۸	۶/۱۱	با در نظر گرفتن ضربه قوچ
منصوری و ترابی	CFO	۱۳۸۵۹/۵۸	۷۳۷۹۳۴	۱۰/۶۶	-
روش تجربی (شرایط موجود)	-	۱۳۹۵۹/۶۷	۸۲۵۹۳۵/۲۸	۰/۰۰	-

با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌گردد که با وجود دوهدفه بودن مدل ارائه شده در این تحقیق، شامل هزینه‌های طراحی و تفاضل مربعات اختلاف فشار در سطح شبکه الگوریتم MOALO توانسته با

هزینه به مراتب کمتر طرح مناسب‌تری ارائه دهد. به گونه‌ای که هزینه اجرای بهترین پاسخ جبهه پرتو در این روش ۱۸/۵۸ از روش تجربی کمتر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود در این پژوهش

کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه نظیر شکست لوله‌ها و نشت در طول زمان بهره‌برداری می‌شود.

علاوه بر کاهش هزینه‌های طراحی شبکه نسبت به سایر روش‌ها، میزان فشار در گره‌های شبکه نسبت به روش تجربی و روش‌های دیگر محققین به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است که موجب



شکل ۴- مقایسه فشار بدست آمده در پژوهش حاضر برای هر گره نسبت به روش‌های پژوهشگران دیگر

لحاظ نمودن عدم قطعیت نیاز گره‌ها روش ارائه شده در این پژوهش برای طراحی شبکه‌های آبرسانی مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع

ترابی‌پوده، ح.، گلیج، ح.، میرشاهی، د. و شاهی‌نژاد، ب. ۱۳۹۶. بهینه‌سازی شبکه‌های آبیاری با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات توسعه یافته و برنامه ریزی خطی. فصلنامه علمی پژوهشی آبیاری و آب. ۳۰ (۸): ۱۸۷-۱۹۹.

منصوری، ر. و محمدی‌زاده، م. ۱۳۹۸. کاربرد الگوریتم نیروی مرکزی (CFO) در بهینه‌سازی شبکه توزیع آب و آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳ (۱): ۱۱۴-۱۰۱.

گلیج، ح. و ترابی‌پوده، ح. ۱۳۹۷. طراحی بهینه شبکه‌های آبیاری با استفاده از الگوریتم فراکاوشی DMPSO. فصلنامه علمی پژوهشی آبیاری و آب. ۳۲ (۸): ۱۸۳-۱۷۲.

رجب‌پور، ر.، سامی کشکولی، ب.، فرجی، ط.، محمدزاده، ا. و امین، س. ۱۳۹۶. بهینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی در سامانه انتقال آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک. نشریه مباحث برگزیده در انرژی. ۲ (۱): ۳۹-۳۹.

جعفری‌اصل، ج.، سامی کشکولی، ب. و بهرامی، م. ۱۳۹۶. کنترل بهینه‌سازی فشار با هدف حداقل سازی نشت در شبکه‌های

نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی به منظور کاهش هزینه این زیرساخت‌ها تاکنون در مطالعات بسیاری مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، در این تحقیق برای اولین بار از یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم شیر مورچه و مدل شبیه‌سازی EPANET برای حل بهینه شبکه آبرسانی اسماعیل‌آباد لرستان استفاده گردید. این شبکه، یک شبکه تحت‌فشار شامل ۱۶ لوله و ۱۷ گره می‌باشد.

در این مطالعه، علاوه بر کمینه‌کردن هزینه اجرای طرح، پارامتر کمینه‌کردن اختلاف فشار گرهی نسبت به فشار مورد نیاز در جهت حفظ فشار گره‌ها در محدوده مطلوب نیز به عنوان هدف دیگر مد نظر قرار گرفت. لازم به ذکر است کلیه محدودیت‌های موجود شامل موجود بودن قطر لوله‌ها در میان قطرهای تجاری و محدودیت فشار و سرعت در گره‌ها نیز در پروسه بهینه‌سازی اعمال گردید. در نهایت یک جبهه پرتو شامل چهار پاسخ با در نظر گرفتن توابع هدف مذکور ارائه شد. نتایج نشان داد تمامی جوابهای حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها علاوه بر کاهش میزان هزینه‌های طراحی در حدود ۲۰ درصد نسبت به طرح حاضر و ۱۵ درصد نسبت به طرح‌های ارائه شده در مطالعات پیشین، در کاهش اضافه فشار موجود در گره‌ها نیز موفق عمل کرده است. با توجه به اینکه نیاز گره‌ها با عدم قطعیت همراه می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی با

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. ۱۳۹۲. ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی. نشریه شماره ۳-۱۱۷. دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا.

Mirjalili, S. 2015. The Ant Lion Optimizer. *Advances in Engineering Software*. 83: 80-89.

Shamir, U. and Alperovits, E. 1977. Design of water distribution systems. *Water Resources Research*. 13(6): 885-900.

Su, Y., Mays, L.W., Duan, N. and Lansey, K.E. 1987. Reliability-Based Optimization Model for Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*. 113(12): 1539-1556.

Wang, KH. and Dal, M. 2017. Optimization and modeling of pressurized irrigation networks. *Turkish Journal of Water Science & Management*. 1(2): 62-80.

توزیع آب. نشریه آب و توسعه پایدار. ۲ (۴): ۴۹-۵۶.

جعفری اصل، ج.، سامی کشکولی، ب. و بهرامی، م. ۱۳۹۴. مدیریت بهینه فشار در جهت حداقل سازی نشت در سیستم‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری. *دوفصلنامه تخصصی علوم مهندسی آب*. ۱۲ (۵): ۶۹-۸۲.

شاهی‌نژاد، ب. ۱۳۹۰. طراحی سیستم‌های انتقال و توزیع شبکه‌های تحت فشار با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مختلط اعداد حقیقی و صحیح. رساله دکتری. دانشکده مهندسی علوم آب. دانشگاه شهید چمران اهواز.

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. ۱۳۹۴. فهرست بهای واحد پایه رشته انتقال و توزیع آب روستایی. فهرست بهای رشته مهندسی آب.

Multi-purpose Design of Water Supply Networks in Order to Reduce Pressure Surplus of Network (Case Study: Ismail Abad Water Supply Network)

M. Yousefi¹, M. Givvehchi², M. Azhdary Moghaddam^{3*}, J. Jafari-Asl⁴

Recived: Apr.09, 2020

Accepted: Jun.02, 2020

Abstract

Finding optimal pipe diameters in water supply networks for minimizing design costs due to the constraints and high decision variables is one of the major challenges for designers. In the last few decades, the development and introduction of new optimization methods, the good performance of these methods in solving complex engineering problems has led engineers to develop these methods in the design of water networks. In the present study, the performance of one of the emerging metaheuristic algorithms called Ant Lion Optimizer (ALO) in solving the problem of optimizing the diameters of water supply networks was considered. For this purpose, a multi-objective optimization-simulation model based on the ALO and the EPANET simulator model was developed. The developed model was used to optimize the diameter of Ismail Abad network pipes. The results were presented as a Pareto front between the design cost and the sum of the pressure difference squares. The results showed that using this model in addition to saving design costs about 15% compared to the existing design conditions; it has been significantly successful in reducing overload pressure in the nodes. As a result, this method can be used with confidence as an efficient method in designing water supply networks.

Keywords: Water supply networks, Optimization, Meta-heuristic Algorithm, EPANET, MATLAB

1- M.Sc. Student of Civil Engineering -Water and Hydraulic Structures, Faculty of Shahid Nikbakht, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Shahid Nikbakht, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Shahid Nikbakht, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

4- Ph.D. Student of Civil Engineering-Water Resources Management, Faculty of Shahid Nikbakht, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

(*- Corresponding Author Email: mazhdary@eng.usb.ac.ir)