



## بهینه‌سازی چندهدفه شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی PESa-II و SPEA-II

نگین زارعی<sup>۱</sup>، آرش آذری<sup>۲</sup>، محمد مهدی حیدری<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۴

پژوهشی

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

### چکیده

با توجه به محدودیت شدید منابع آب، هزینه‌بر بودن ساخت و بهره‌برداری سامانه‌های آبرسانی و افزایش سریع جمعیت، طراحی بهینه این شبکه‌ها، از ضروریات می‌باشد. مسئله کمینه کردن هزینه از طریق کمینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه انجام می‌شود که موجب کاهش فشار در شبکه می‌شود. از آنجایی که تامین فشار مناسب در گره‌ها از اصول مهم طراحی است، بنابراین در این تحقیق، مسئله بهینه‌سازی در چند شبکه نمونه با اهداف کمینه‌سازی هزینه و کمبود فشار در کل شبکه تعریف شد. از نرم‌افزار EPANET برای تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های نمونه استفاده شد و فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه از طریق کدنویسی الگوریتم‌های فراکاوشی PESa-II و SPEA-II در نرم‌افزار متلب و اتصال آن‌ها به EPANET صورت گرفت. تابع هزینه ابتدا فقط با در نظر گرفتن رابطه بین هزینه، قطر و طول لوله‌ها تعریف شد. سپس در تعریف بعدی، هزینه ناشی از تعدی از محدوده مجاز فشار که حداقل و حداکثر فشار مجاز به ترتیب ۳۰ و ۶۰ متر در نظر گرفته شده‌اند، نیز به این تابع افزوده شد و برنامه مجدداً با تعداد تکرارهایی که به بهترین جواب ختم شود، اجرا گردید. نتایج نشان داد این الگوریتم‌ها توانایی بالایی در یافتن جواب‌های بهینه دارند. در این الگوریتم‌ها، در نظر گرفتن هزینه تعدی از حدود مجاز فشار سبب می‌شود، بهترین جوابی که تا به حال سایر محققین برای شبکه‌های نمونه به دست آورده‌اند، که برای شبکه دو حلقه‌ای و لانس به ترتیب، هزینه ۴۱۹۰۰۰ و ۱۰۶۹۳۹۳ دلار و کمبود فشار صفر بود، حاصل شود و با تعداد تکرار پایین، در شبکه دو حلقه‌ای برای هر دو الگوریتم با ۲۰ تکرار و در شبکه لانس برای الگوریتم‌های PESa-II و SPEA-II به ترتیب با ۲۰۰ و ۱۴۰ تکرار، به تعداد جواب بهینه بیشتری دست پیدا کنیم و زمان رسیدن به همگرایی به طور قابل توجهی کاهش یابد، به طوری که در شبکه دو حلقه‌ای، زمان اجرای الگوریتم‌های PESa-II و SPEA-II به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۵۹ دقیقه و در شبکه لانس به ترتیب ۸/۱ و ۷/۴ دقیقه بود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چند هدفه، شبکه توزیع آب شهری، PESa-II، SPEA-II

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، [negin.zr@yahoo.com](mailto:negin.zr@yahoo.com)

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، [a.azari@razi.ac.ir](mailto:a.azari@razi.ac.ir) (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، [mm.heidari@ut.ac.ir](mailto:mm.heidari@ut.ac.ir)



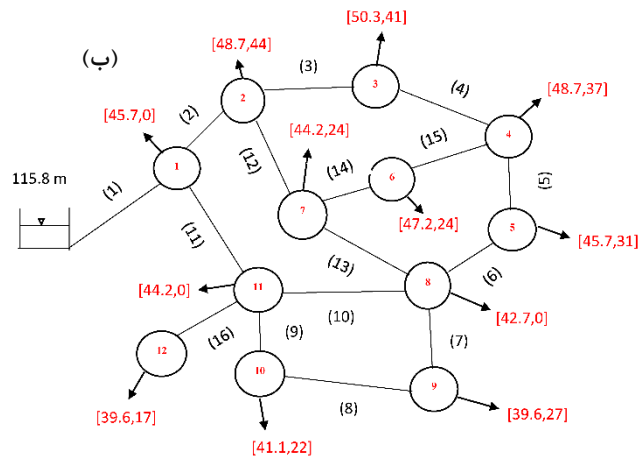
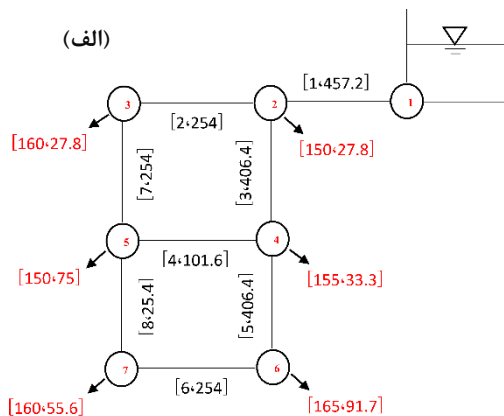
## مقدمه

برای بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های توزیع آب، روش اکتشافی جدیدی که روش نمونه‌برداری اکتشافی پیش‌گرمال شده (PHSM) نامیده می‌شود را پیشنهاد دادند. این روش روی هفت سیستم توزیع آب با اندازه‌های متنوع آزمایش شد. نتایج نشان داد که (PHSM) در همه جا برحسب بازده محاسباتی و قابلیت پیدا کردن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه، بهترین عملکرد را دارد و کارایی آن با گسترش اندازه شبکه افزایش می‌یابد. Marques et al. (2015)، بهینه‌سازی سیستم توزیع آب را براساس الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده چندهدفه لینک شده به شبیه‌ساز هیدرولیکی با رویکرد اصلاح قیود هیدرولیکی انجام دادند. این روش می‌تواند با در نظر گرفتن اهداف متضاد، با اثرات زیست محیطی و عدم قطعیت‌های آینده مقابله کند. Do et al. (2017)، تخمین تقاضا در سیستم‌های توزیع آب را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد مطالعه قرار دادند. این روش نیازی به تعداد ورودی‌های معلوم برابر با تعداد متغیرها ندارد و گره‌ها در مدل می‌توانند هرکدام الگوی تقاضای متفاوت داشته باشند. نتایج میانگین اجراهای الگوریتم ژنتیک چندگانه می‌تواند الگوهای تقاضا را در هر گره تخمین بزند. Minaei et al. (2019)، یک سیستم پشتیبانی تصمیم برای نوسازی شبکه‌های توزیع آب معرفی کردند. آن‌ها دوره طراحی را به چندین فاز نوسازی تقسیم کرده و با استفاده از الگوریتم NSGA-II و نرم‌افزار EPANET یک بهینه‌سازی چندهدفه بین هزینه و قابلیت اطمینان شبکه انجام دادند، و برای اجرای برنامه‌های نوسازی چند فاز، سه رویکرد معرفی کرده و روی شبکه واقعی اعمال کردند و دریافتند که رویکرد طراحی و ساخت فاز به فاز پویا، کارآمدتر است. Palod et al. (2020)، روش بهینه‌سازی غیرپارامتریک JayaNet را برای چهار شبکه معیار توزیع آب به کار بردند، که ترکیبی از الگوریتم Jaya و نرم‌افزار EPANET بود و پارامترهای قابل تنظیم، پارامتر جریمه و اندازه جمعیت بودند. نتایج آن‌ها نشان داد که هزینه‌های بهینه شده برای چهار شبکه در این روش، برابر با یا کمتر از نتایج سایر محققین با تعداد تکرار کمتر است.

روش متداول طراحی شبکه‌های توزیع آب، به این صورت است که طراحان، گزینه‌های مختلف را انتخاب کرده و آن‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند. به دلیل روابط پیچیده میان اجزای مختلف، تعیین تغییراتی که منجر به بهبود طراحی شبکه می‌شود، حتی در شبکه‌های با ابعاد متوسط، مشکل است. به علاوه با استفاده از این روش نمی‌توان مطمئن بود که جواب حاصله، بهینه باشد. بنابراین تلاش‌های بسیاری برای حل مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب صورت گرفته که منجر به استفاده گسترده از روش‌های بهینه‌سازی مدرن شده است. Atiquzzaman et al. (2006)، از مدل شبیه‌ساز ایپانت و الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب استفاده کردند و دریافتند که هزینه طراحی موثر یا اصلاح شبکه‌ی لوله‌ها به بودجه موجود و تامین فشار مورد انتظار در گره‌ها بستگی دارد. Zheng et al. (2015)، بهبود کارایی الگوریتم‌های چندهدفه تکاملی را از طریق تجزیه یک شبکه توزیع آب به زیرشبکه‌های مختلف با استفاده از تکنیک‌های تجزیه مورد مطالعه قرار دادند. اجرای این روش در دو شبکه توزیع آب نشان داد که روش پیشنهادی قادر است نتایج بهتری را نسبت به الگوریتم‌های جستجوی کامل متداول (بهینه‌سازی شبکه بدون تجزیه) ارائه دهد. Mora-melia et al. (2017)، تاثیر اندازه جمعیت بر کارایی الگوریتم‌های تکاملی برای طراحی شبکه‌های آب را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که استخراج بهترین پیکربندی ممکن براساس کیفیت راه‌حل‌ها و سرعت همگرایی الگوریتم، به اندازه جمعیت بستگی دارد. Moosavian and Roodsari (2014)، الگوریتم جدید فراکاشی رقابت لیگ فوتبال را برای طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب مورد مطالعه قرار دادند. نتایج استفاده از این الگوریتم در سه شبکه لوله معیار نشان داد که در مقایسه با سایر روش‌های فراکاشی با قابلیت اطمینان بیشتر و سرعت بالاتری به بهینه‌سراسری همگرا می‌شود. Khedr et al. (2015)، واسنجی سیستم توزیع آب را به صورت یک رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی سه هدفه با استفاده از الگوریتم PA-DDS مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از کارایی خوب الگوریتم در واسنجی سیستم بود. Bi et al. (2015).

حداکثر فشار مجاز در گره‌ها به عنوان یک عامل مهم در بالا بردن سرعت همگرایی الگوریتم در نظر گرفته نشده است. لذا در این تحقیق سعی شده با به کارگیری روش‌های مختلف علاوه بر مقایسه و اصلاح ساختار این الگوریتم‌ها، پیشنهادات ارزنده‌ای برای تعمیم آن به سایر شبکه‌ها ارائه گردد.

این شبکه از ۸ لوله و ۷ گره و یک منبع تشکیل شده است که شامل دو حلقه می‌باشد. طول همه لوله‌ها ۱۰۰۰ متر می‌باشند و ضریب هیزن ویلیامز ۱۳۰ فرض می‌شود. ارتفاع آب در منبع ۲۱۰ متر در نظر گرفته شده است. اعداد داخل کروشه برای هر گره به ترتیب، ارتفاع گره برحسب (m) و مقدار تقاضا برحسب (l/s) می‌باشند و برای هر لوله به ترتیب، شماره لوله و قطر لوله برحسب (mm) می‌باشند (شکل ۱- الف). شبکه نمونه دیگر، شبکه‌ای است که توسط Lansley et al. (2001) به کار برده شد. این شبکه دارای ۱۶ لوله و ۱۱ گره و یک مخزن می‌باشد. اعداد داخل کروشه برای هر گره به ترتیب، ارتفاع گره برحسب (m) و مقدار تقاضا برحسب (l/s) می‌باشند و اطلاعات لوله‌های شبکه در جدول (۱) آورده شده است (شکل ۱- ب).



شکل (۱): الف- شبکه دو حلقه‌ای. ب- شبکه لانسی

استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه با فضای تصمیم دو بعدی در سال‌های اخیر به صورت محدود مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی در تمامی روش‌های به کار گرفته شده، معیار هزینه به عنوان یکی از توابع هدف، تنها تابعی از طول و قطر لوله‌های منتخب بوده و جریمه تعدی از حداقل و

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نرم‌افزار EPANET برای تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی استفاده شد. بهینه‌سازی این سامانه از طریق کدنویسی الگوریتم‌های فراکاوشی PESA-II و SPEA-II در محیط نرم‌افزار متلب و اتصال آن به بدنه نرم‌افزار EPANET از طریق به کار بردن ابزارهای محاسباتی مناسب صورت گرفت. کارایی الگوریتم‌های فراکاوشی چندهدفه در حل مسئله بهینه‌سازی هزینه و کمبود فشار شبکه‌های آبرسانی از طریق مثال‌های شناخته شده‌ای که در تحقیقات گذشته توسط الگوریتم‌های مختلف بررسی شده‌اند، صورت می‌گیرد. در این راستا از دو شبکه معرف که در تحقیقات زیادی از آن‌ها استفاده شده است، برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های PESA-II و SPEA-II استفاده شد. شبکه اول مورد ارزیابی به شبکه دو حلقه‌ای معروف است که توسط Alperovits and Shamir (1977) معرفی شد.

جدول (۱): اطلاعات لوله‌های شبکه لانسبی (Lansley et al., 2001)

شماره لوله	طول (m)	قطر (mm)	ضریب سختی
۱	۳۰۴۸	۶۰۹/۶	۱۱۰
۲	۱۵۲۴	۴۵۷/۲	۱۱۰
۳	۱۵۲۴	۴۰۶/۴	۱۰۰
۴	۱۶۷۶/۴	۳۵۵/۶	۱۰۰
۵	۱۰۶۶/۸	۳۰۴/۸	۱۲۰
۶	۱۶۷۶/۴	۳۵۵/۶	۱۲۰
۷	۱۳۷۱/۶	۳۰۴/۸	۹۰
۸	۷۶۲	۱۵۲/۴	۹۰
۹	۱۰۶۶/۸	۳۰۴/۸	۹۰
۱۰	۶۷۰/۶	۴۰۶/۴	۹۰
۱۱	۱۹۸۱/۲	۴۵۷/۲	۱۱۰
۱۲	۱۵۲۴	۳۵۵/۶	۱۰۰
۱۳	۱۶۷۶/۴	۳۰۴/۸	۱۲۰
۱۴	۹۱۴/۴	۳۵۵/۶	۱۰۰
۱۵	۱۲۱۹/۲	۳۰۴/۸	۱۰۰
۱۶	۱۲۱۹/۲	۴۰۶/۴	۹۰

### بهینه‌سازی شبکه آبرسانی

لوله‌ها برحسب میلی‌متر و هزینه هر واحد طول لوله طبق جدول (۲) در نظر گرفته شد (Atiquzzaman et al., 2006).

مسئله بهینه‌سازی در این تحقیق در قالب یک تابع چندهدفه تعریف شد، طوری که هدف اول شامل کمینه کردن هزینه طراحی سیستم در مقابل هدف دوم یعنی کمینه کردن مجموع کمبود فشار در کل سیستم قرار گرفت.

هدف اول: کمینه نمودن هزینه طراحی کل سیستم

برای بررسی کارایی هر کدام از الگوریتم‌های فراکاوشی مورد استفاده در پیدا کردن جواب‌های بهینه، تابع هزینه به دو روش تعریف گردید. در روش اول این تابع به صورت رابطه (۱) و فقط با در نظر گرفتن رابطه بین هزینه و قطر و طول لوله‌ها تعریف شد و در روش دوم مطابق با رابطه (۳) جریمه ناشی از تخطی از محدوده مجاز فشار نیز به رابطه افزوده شد.

$$\text{Minimize } F1 = \sum_{i=1}^{NL} C_i(D_i) \times L_i \quad (1)$$

$C_i(D_i)$  هزینه هر واحد طول لوله  $i$  با قطر  $D_i$ ،  $L_i$  طول لوله  $i$ ،  $NL$  تعداد لوله‌ها در شبکه می‌باشند. رابطه بین

جدول (۲): سایز و هزینه لوله‌های قابل استفاده برای شبکه (Atiquzzaman et al., 2006)

شماره	قطر (mm)	هزینه (\$/m)	شماره	قطر (mm)	هزینه (\$/m)
۱	۲۵/۴	۲	۸	۳۰۴/۸	۵۰
۲	۵۰/۸	۵	۹	۳۵۵/۶	۶۰
۳	۷۶/۲	۸	۱۰	۴۰۶/۴	۹۰
۴	۱۰۱/۶	۱۱	۱۱	۴۵۷/۲	۱۳۰
۵	۱۵۲/۴	۱۶	۱۲	۵۰۸	۱۷۰
۶	۲۰۳/۲	۲۳	۱۳	۵۵۸/۸	۳۰۰
۷	۲۵۴	۳۲	۱۴	۶۰۹/۶	۵۵۰

$$C_m = C_m + (\max(1 - (\frac{p}{p_{\min}}), 0))^2 \quad (۵)$$

با توجه به رابطه ریاضی بین قطر و هزینه هر واحد طول لوله، تابع هدف اول در روش اول به صورت رابطه (۲) در خواهد آمد.

با توجه به رابطه ریاضی بین قطر و هزینه هر واحد طول لوله، تابع هدف اول در روش اول به صورت رابطه (۲) در خواهد آمد.

$$\text{Minimize } F_1 = \sum_{i=1}^{NL} (3.5712 \times \exp(0.0081(D_i))) L_i \quad (۲)$$

در روش دوم با در نظر گرفتن جریمه ناشی از تخطی از محدوده مجاز فشار، تابع هدف کمینه کردن هزینه به کار رفته در الگوریتم‌های بهینه‌سازی به صورت رابطه (۳) خواهد بود:

$$\text{Minimize } F_1 = ((\sum_{i=1}^{NL} (3.5712 \exp(0.0081(D_i))) \times L_i) / 1000) + (r \times (c_p + c_m)) \quad (۳)$$

جریمه ناشی از تخطی از محدوده مجاز فشار است که یک عدد تصادفی بین صفر و صد می‌باشد. (اجرای الگوریتم-ها با مقادیر مختلف  $r$  و بررسی جواب‌های حاصل شده، موجب تعیین بهترین محدوده  $r$  که منجر به تولید جواب‌های بهینه مورد نظر می‌شود، گردید و حداقل و حداکثر مقادیر  $r$  در تابع ارزیابی تعریف شد).  $C_p$  هزینه ناشی از تجاوز از ماکزیمم فشار مجاز،  $C_m$  هزینه ناشی از کم‌تر شدن از حداقل فشار مجاز می‌باشند.

$$C_p = C_p + (\max((\frac{p}{p_{\max}}) - 1), 0)^2 \quad (۴)$$

هدف دوم: کمینه کردن مجموع کمبود فشار در کل سیستم

برای این منظور از رابطه (۶) استفاده شد

$$\text{Minimize } F_2 = \text{Minimize } \sum_{j=1}^{NP} (\max((p_j^{\min} - p_j), 0)) \quad (۶)$$

$P_j^{\min}$  حداقل فشار مورد نیاز در گره  $j$ ،  $P_j$  فشار محاسباتی در گره  $j$ ،  $NP$  تعداد گره‌ها در شبکه می‌باشند.

قیود در مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شامل دو دسته هستند. دسته اول که به شکل تساوی می‌باشند، معادله پیوستگی و معادله بقای انرژی هستند که به صورت خودکار در نرم‌افزار ایپانت اجرا شده و نیازی به تعریف آن‌ها



$Q_{in}$  جریان ورودی به گره،  $Q_{out}$  جریان خروجی از گره،  $Q_e$  تقاضا در گره می‌باشند.

معادله بقای انرژی: مجموع افت هد در درون هر حلقه باید برابر با صفر باشد (Sedki and ouazar, 2012).

$$\sum_{i \in \text{loop}_l} \Delta H_i = 0 \quad \forall l \in NL \quad (10)$$

$\Delta H_i$  افت هد در لوله  $i$  می‌باشد.

### الگوریتم PESA-II

الگوریتم PESA-II در سال ۲۰۰۰ ارائه شد (Corne et al., 2000). این الگوریتم، نسخه دوم الگوریتم PESA است که از نظر ساختار مشابه یکدیگرند و تفاوت آن‌ها در نوع عملگر انتخاب است. در الگوریتم PESA انتخاب براساس افراد صورت می‌گیرد و در الگوریتم PESA-II براساس نواحی انجام می‌شود که باعث کارایی بهتر این الگوریتم می‌شود. PESA-II یک نوع الگوریتم ژنتیک چندهدفه محسوب می‌شود و دارای یک آرشیو خارجی است که شامل جواب‌های نامغلوب کشف شده در فرآیند جستجو می‌باشد. این الگوریتم از تقسیم‌بندی شبکه‌ای فضای هدف مطابق شکل (۲) استفاده می‌کند.

به صورت قید در تابع ارزیاب نیست. دسته دوم به شکل نا-مساوی هستند و شامل قطر و سرعت در لوله‌ها و... می‌باشند.

قید سرعت: رابطه سرعت به صورت زیر باید در لوله‌های شبکه برقرار باشد (Montesinos et al., 1999):

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i=1, 2, NL \quad (7)$$

$V_i$  سرعت در لوله  $i$ ،  $V_i^{\min}$  حداقل سرعت در لوله  $i$ ،  $V_i^{\max}$  حداکثر سرعت در لوله  $i$  می‌باشند.

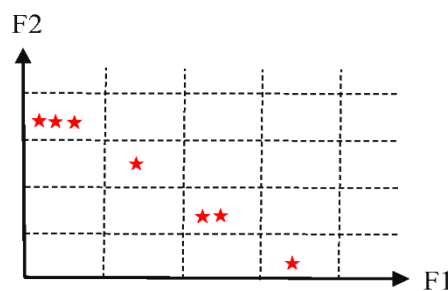
قید قطر: قطر هر لوله باید متعلق به مجموعه قطرهای تجاری موجود در بازار باشد (Sedki and ouazar, 2012):

$$D_i \in \{D\} \quad \forall i \in NL \quad (8)$$

$D_i$  قطر لوله  $i$ ،  $D$  مجموعه قطرهای تجاری موجود هستند.

معادله پیوستگی: مجموع جریان ورودی به گره با مجموع جریان خروجی از گره برابر باشد (Sedki and ouazar, 2012).

$$\sum_{i=1}^{NP} Q_{in} - \sum_{i=1}^{NP} Q_{out} = Q_e \quad (9)$$



شکل (۲): تقسیم‌بندی شبکه‌ای فضای هدف

مراحل کار الگوریتم PESA-II به صورت زیر می‌باشد:  
۱- ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن‌ها و ایجاد یک آرشیو خالی  
۲- انتقال اعضای نامغلوب جمعیت به بایگانی و به‌روز-رسانی تقسیم‌بندی

احتمال انتخاب هر سلول طبق رابطه زیر است:

$$P_c \propto \frac{1}{(n_c)^{\beta}} \quad (11)$$

$n_c$  تعداد اعضای سلول  $c$ ،  $p_c$  احتمال انتخاب سلول  $c$  می‌باشند.



- ۶- ایجاد جمعیت فرزندان، با استفاده از جهش و ترکیب  
۷- ارزیابی جمعیت جدید (فرزندان)  
۸- تکرار از مرحله ۲

۳) تمام جواب‌های نامغلوب موجود در مجموعه  $p_t \cup \bar{p}_t$  را به  $\bar{p}_{t+1}$  (آرشیو مرحله بعد) منتقل می‌کنیم. در صورتی که تعداد اعضای انتقال یافته برابر با ظرفیت آرشیو نباشد، دو حالت رخ می‌دهد:

حالت اول: اگر تعداد جواب‌های نامغلوب ذخیره شده در آرشیو، از ظرفیت آن ( $\bar{N}$ ) کمتر باشد ( $|\bar{p}_{t+1}| < \bar{N}$ )، باید تعداد  $\bar{N} - |\bar{p}_{t+1}|$  از جواب‌های مغلوب موجود در  $p_t \cup \bar{p}_t$  به آرشیو اضافه شوند.

حالت دوم: اگر تعداد جواب‌های نامغلوب ذخیره شده در آرشیو، از ظرفیت آن بیشتر باشد ( $|\bar{p}_{t+1}| > \bar{N}$ )، باید تعداد  $|\bar{p}_{t+1}| - \bar{N}$  از جواب‌های موجود در تراکم بیشتر از آرشیو حذف گردند.

۴) در صورتی که شرایط توقف محقق شده باشد، جواب‌های نامغلوب  $\bar{p}_{t+1}$  را به عنوان جواب‌های نهایی معرفی می‌کنیم.

۵) با استفاده از تورنمنت باینری، والدین را از  $\bar{p}_{t+1}$  انتخاب می‌کنیم.

۶) عملیات جهش و تقاطع بر روی والدین انجام می‌شوند و  $p_{t+1}$  ایجاد می‌شود.

۷) یک واحد به شمارنده اضافه می‌کنیم ( $t \rightarrow t + 1$ ).

۸) تکرار از مرحله ۲

محاسبه برازندگی:

ابتدا میزان شدت هر جواب  $i$  به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$i \in \bar{p}_t \cup p_t \quad (12)$$

$$s_i = |\{j \in \bar{p}_t \cup p_t \mid z_j > z_i\}| \quad (13)$$

$z_i > z_j$  به معنای غلبه جواب  $i$  بر جواب  $j$  می‌باشد.

- ۳- حذف اعضای اضافی با توجه به تقسیم‌بندی‌ها و موقعیت پاسخ  
۴- بررسی شرایط خاتمه و ادامه دادن در صورت نیاز  
۵- انتخاب والدین از آرشیو

### الگوریتم SPEA-II

الگوریتم تکاملی قدرت پارتو (SPEA) در سال ۱۹۹۹ ارائه گردید (Zitzler and Thiele, 1999)، که جهت یافتن مجموعه جواب‌های نزدیک به مجموعه بهینه پارتو از ترکیب چندین روش و تکنیک جدید استفاده می‌کرد و اساس آن بر الگوریتم ژنتیک استوار بود. در این الگوریتم همانند بسیاری از الگوریتم‌های تکاملی دیگر از آرشیو خارجی جهت ذخیره جواب‌های نامغلوب که در طی جستجوی الگوریتم یافت می‌شوند کمک گرفته شد. این الگوریتم دارای ضعف‌هایی بود. از جمله اینکه جهت حذف جواب‌های اضافی آرشیو، رویکرد خوشه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت که سبب حذف جواب‌های مرزی می‌شود. همچنین هنگام محاسبه برازندگی، تمام پاسخ‌هایی که توسط گروه ثابتی از پاسخ‌ها مغلوب شوند دارای مقدار برازندگی یکسانی می‌شوند. از طرفی در آن معیار ثانویه برای مقایسه پاسخ‌های نامغلوب در نظر گرفته نشده است. بنابراین Zitzler et al. (2001) الگوریتم SPEA را بهبود بخشیدند و ضعف‌های آن را برطرف نمودند و تحت عنوان الگوریتم SPEA-II معرفی کردند. در الگوریتم SPEA-II از رویکردی مبتنی بر توزیع داده‌ها برای حذف جواب‌های اضافی آرشیو و از رویکردی برای محاسبه برازندگی که در آن، هم مجموعه جواب‌های نامغلوب و هم مجموعه جواب‌های مغلوب تاثیر دارند استفاده شد. برای پیاده‌سازی عامل ثانویه از روش نزدیک‌ترین همسایگی برای کنترل توزیع بهره گرفته شد.

مراحل کار الگوریتم SPEA-II به شرح زیر می‌باشد (Zitzler et al., 2001):

۱) تولید جمعیت اولیه ( $p_0$ ) و ساخت آرشیو خالی ( $\bar{p}_0 = \emptyset$ ) در  $t=0$

۲) محاسبه برازندگی  $p_t$  (جمعیت اصلی در تکرار  $t$ ) و  $\bar{p}_t$  (آرشیو در تکرار  $t$ )

جوابی که در مرتبه  $k$ ام قرار گرفته به عنوان  $\delta_i^k$  پذیرفته می‌شود. مقدار  $k$  نیز از معادله  $k = \sqrt{N + \bar{N}}$  به دست می‌آید.  $N$  برابر تعداد جمعیت اولیه و  $\bar{N}$  تعداد جمعیت آرشیو می‌باشند. تراکم جواب  $i$  طبق معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$D_i = \frac{1}{\delta_i^{k+2}} \quad (15)$$

در نهایت، مقدار برازندگی نهایی برای هر جواب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F_i = R_i + D_i \quad (16)$$

ساز هیدرولیکی EPANET در شکل (۳) نشان داده شده است.

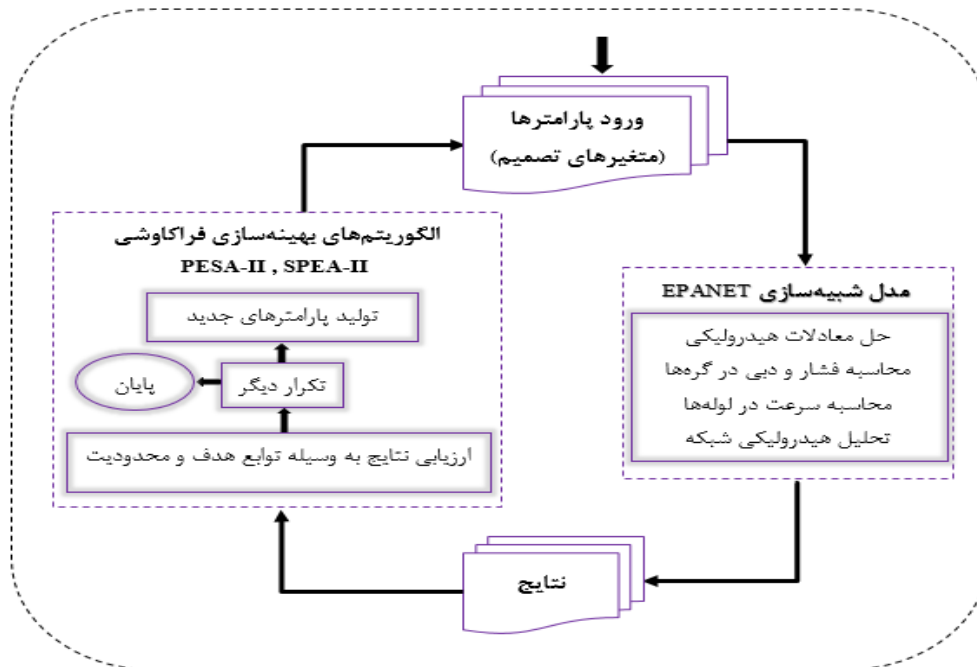
با استفاده از مقادیر  $s_i$ ، اندازه برازندگی خام برای هر عضو جمعیت به دست می‌آید که برابر خواهد بود با مجموع شدت تمامی جواب‌هایی که آن را مغلوب کرده‌اند. همان طور که مشخص است مقادیر کمتر برای  $R_i$  مطلوب‌تر خواهد بود:

$$R_i = \sum_{j \in \bar{p}_i \cup p_i \text{ و } j > i} (S_j) \quad (14)$$

میزان تراکم جواب‌ها از طریق روش نزدیک‌ترین همسایگی محاسبه می‌شود. بدین منظور ابتدا فاصله جواب  $i$  از تک تک جواب‌ها در جمعیت اولیه و آرشیو مشخص شده و سپس این فواصل به صورت صعودی مرتب می‌شوند. فاصله

### انجام فرآیند شبیه‌سازی - بهینه‌سازی

جهت آشنایی بیشتر با نحوه اجرای برنامه، خلاصه‌ای از مراحل اجرای هر یک از این الگوریتم‌ها در اتصال با شبیه



شکل (۳): فلوچارت مراحل اجرای الگوریتم‌های فراکاوشی در اتصال با مدل EPANET



## نتایج و بحث

نتایج حاصل از بهینه‌سازی شبکه‌های دو حلقه‌ای و لانس‌ی با هدف استخراج قطرهای بهینه با استفاده از الگوریتم‌های PESA-II و SPEA-II به دو روش بررسی شد. یک بار نتایج اجرای این الگوریتم‌ها با تعریف تابع هزینه بر اساس رابطه قطر و هزینه و با تعداد تکرار ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ مقایسه شد. در روش بعدی نتایج حاصل از اجرای آن‌ها با در نظر گرفتن جریمه تعدی از حدود مجاز فشار در تابع هزینه با تعداد تکرارهایی تا رسیدن به بهترین جواب انجام شد و با نتایج روش قبلی مقایسه گردید.

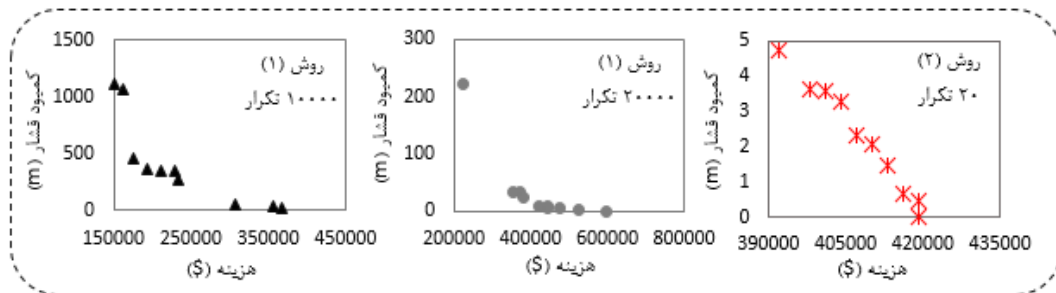
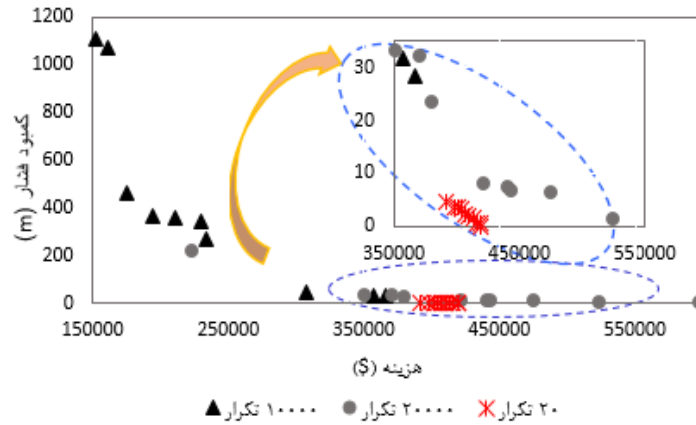
### نتایج حاصل از بهینه‌سازی شبکه دو حلقه‌ای

نتایج اجرای الگوریتم‌های PESA-II و SPEA-II در شبکه دو حلقه‌ای بدون در نظر گرفتن جریمه تعدی از حدود مجاز فشار (روش اول) با تعداد تکرار ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن جریمه تعدی از حدود مجاز فشار در تابع هزینه (روش دوم) با ۲۰ تکرار، به صورت ۱۰ جواب برتر در قالب نمودارهای پارتو نشان داده شده‌اند (شکل (۴)). با توجه به جدول (۳) جواب‌های منتخب حاصل از اجرای الگوریتم PESA-II در روش اول با ۲۰۰۰۰ تکرار و روش دوم با ۲۰ تکرار دارای کمبود فشار صفر هستند و فشار در گره‌ها و سرعت در لوله‌ها در هر دو تکرار در کل شبکه در محدوده مجاز تعیین شده می‌باشند. به دلیل وجود کمبود فشار در اجرا با ۱۰۰۰۰ تکرار، فشار در برخی گره‌ها و سرعت در بعضی از لوله‌ها کم‌تر از حداقل مجاز است. هزینه حاصل از اجرا با ۲۰ تکرار در روش دوم کم‌تر از اجرا با ۲۰۰۰۰ تکرار در روش اول می‌باشد. زمان رسیدن به همگرایی در روش دوم بسیار کم‌تر از روش اول است. همچنین تعداد جواب‌های نزدیک به بهینه، در ۲۰ تکرار، بیشتر از سایر تکرارها است. بنابراین در نظر گرفتن هزینه تعدی از حدود مجاز فشار در تابع هزینه برای الگوریتم PESA-II جهت بهینه‌سازی شبکه دو حلقه‌ای، سبب تولید جواب‌های بهتری نسبت به اجرای الگوریتم بدون در نظر گرفتن هزینه تعدی از حدود مجاز فشار می‌شود.

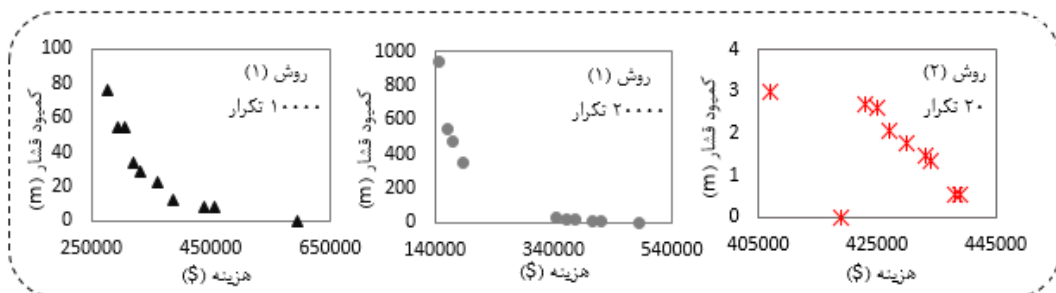
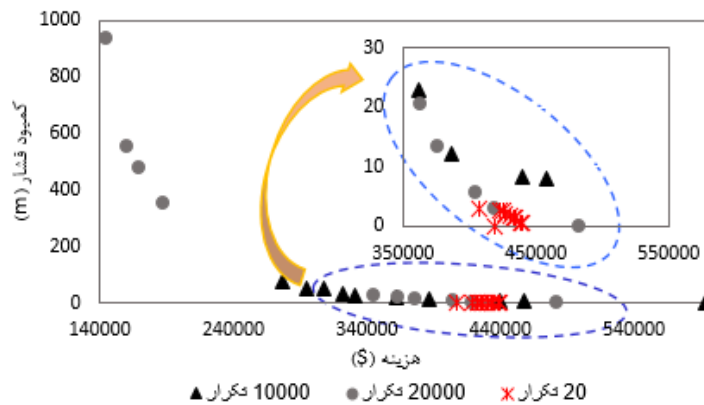
جواب‌های منتخب حاصل از اجرای الگوریتم SPEA-II نیز در هر دو روش دارای کمبود فشار صفر هستند. در جواب منتخب حاصل از ۲۰۰۰۰ تکرار، سرعت در لوله شماره ۸ کم‌تر از حداقل سرعت مجاز می‌باشد. در جواب‌های منتخب حاصل از دو تکرار دیگر در کل شبکه، سرعت در محدوده مجاز قرار دارد. هزینه و زمان رسیدن به همگرایی در جواب حاصل از ۲۰ تکرار، بسیار کم‌تر از سایر تکرارها می‌باشد. تعداد جواب‌های نزدیک به بهینه، در اجرا با ۲۰ تکرار نسبت به سایر تکرارها بیشتر است. بنابراین اجرای الگوریتم SPEA-II به روش دوم جهت بهینه‌سازی شبکه دو حلقه‌ای، سبب تولید جواب‌های بهینه مناسب‌تر، نسبت به اجرای الگوریتم به روش اول می‌شود.

این شبکه، در پژوهش‌های سایر محققین با الگوریتم‌های مختلفی مانند الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)، الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه (SFLA)، الگوریتم جستجوی پراکنده (SS)، الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی پیشنهادی (PSO-DE)، بهینه‌سازی شده است. حداقل هزینه حاصل شده در این تحقیقات برابر ۴۱۹۰۰۰ دلار، و کمبود فشار با در نظر گرفتن حداقل فشار ۳۰ متر، صفر می‌باشد، که این نتیجه در پژوهش حاضر نیز حاصل شد، با این تفاوت که در این تحقیق علاوه بر تابع هدف هزینه، با لحاظ کردن کمبود فشار به عنوان یک تابع هدف، و در نظر گرفتن هزینه تعدی از محدوده مجاز فشار، تعداد جواب‌های بهینه بیشتری حاصل شد و سرعت همگرایی به طور قابل توجهی افزایش یافت و با کمترین تعداد تکرار، برترین جواب به دست آمد که نشان دهنده برتری روش به کار رفته در این پژوهش نسبت به روش‌های به کار گرفته شده در تحقیقات سایرین می‌باشد. در جدول (۴) مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج سایر محققین نشان داده شده است.

### PESA-II



### SPEA-II



شکل (۴): نمودارهای پارتو الگوریتم‌های PESA-II و SPEA-II در شبکه دو حلقه‌ای

جدول (۳): جواب بهینه منتخب الگوریتم‌های PESA-II و SPEA-II در شبکه دو حلقه‌ای

روش	تعداد تکرار	الگوریتم	هزینه (\$)	کمبود فشار (m)	زمان اجرا (min)
(۱)	۱۰۰۰۰	PESA-II	۳۶۶۴۱۹/۶	۲۸/۲۵	۳۴/۶
		SPEA-II	۵۹۳۳۲۱	.	۳۵/۱
	۲۰۰۰۰	PESA-II	۵۹۸۱۵۵	.	۷۱/۰۴
		SPEA-II	۴۸۲۶۲۴/۲	.	۷۰/۱
(۲)	۲۰	PESA-II	۴۱۹۰۰۰	.	۰/۵۵
		SPEA-II	۴۱۹۰۰۰	.	۰/۵۹

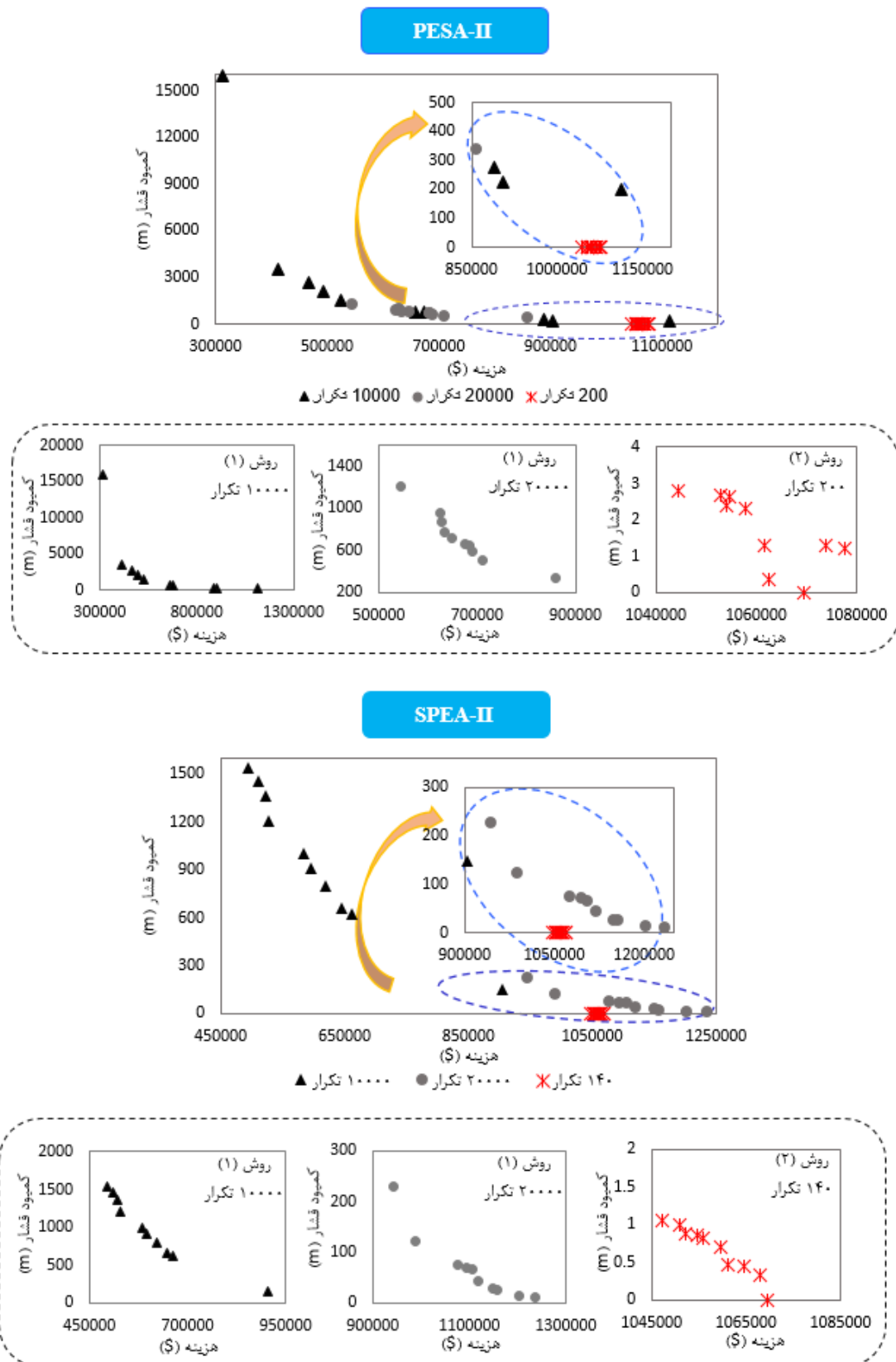
جدول (۴): نتایج حاصل از روش‌های مختلف برای شبکه دو حلقه‌ای

الگوریتم	هزینه (\$/m)	کمبود فشار (m)	تعداد تکرار
GA (Savic et al., 1997)	۴۱۹۰۰۰	.	۲۵۰۰۰۰
SA (Cunha & Sousa, 1999)	۴۱۹۰۰۰	.	۲۵۰۰۰
SFLA (Eusuff & Lansey, 2003)	۴۱۹۰۰۰	.	۱۱۳۲۳
SS (Lin et al., 2007)	۴۱۹۰۰۰	.	۳۲۱۵
HBMO (Ghajarnia et al., 2010)	۴۱۹۰۰۰	.	۷۳۵
PSO-DE (Sedki & Ouazar, 2012)	۴۱۹۰۰۰	.	۳۰۸۰
PESA-II (This work)	۴۱۹۰۰۰	.	۲۰
SPEA-II (This work)	۴۱۹۰۰۰	.	۲۰

### نتایج حاصل از بهینه‌سازی شبکه لانس

PESA-II با ۲۰۰ تکرار و برای الگوریتم SPEA-II با ۱۴۰ تکرار به صورت ۱۰ جواب برتر در قالب نمودارهای پارتو نشان داده شده‌اند (شکل (۵)).

نتایج اجرای الگوریتم‌های PESA-II و SPEA-II در شبکه لانس در روش اول با تعداد تکرار ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌ها در روش دوم برای الگوریتم



شکل (۵): نمودارهای پارتو الگوریتم‌های PESA-II و SPEA-II در شبکه لانسسی

جدول (۵): جواب بهینه منتخب الگوریتم‌های PESa-II و SPEA-II در شبکه لانس

روش	تعداد تکرار	الگوریتم	هزینه (\$)	کمبود فشار (m)	زمان اجرا (min)
(۱)	۱۰۰۰۰	PESA-II	۱۱۱۳۳۳۲	۲۰۰/۹۳	۷۲/۵۷
		SPEA-II	۹۰۵۱۵۲/۳	۱۴۹/۵۳	۷۶
	۲۰۰۰۰	PESA-II	۸۶۰۱۲۴	۳۹۹/۱۵	۱۴۴/۱۳
		SPEA-II	۱۲۳۴۴۸۶	۱۰/۳۶	۱۵۶/۴۱
(۲)	۲۰۰	PESA-II	۱۰۶۹۳۹۳	.	۸/۱
	۱۴۰	SPEA-II	۱۰۶۹۳۹۳	.	۷/۴

مجاز فشار در تابع هزینه برای الگوریتم SPEA-II جهت بهینه‌سازی شبکه لانس، سبب تولید جواب‌های بهینه مناسب‌تر، نسبت به اجرای الگوریتم بدون در نظر گرفتن هزینه تعدی از حدود مجاز فشار می‌شود.

شبکه نمونه لانس که توسط (Laney et al. (2001) به منظور کاهش اثر عدم قطعیت برای شرایط مختلف مصرف در شبکه توسط الگوریتم ژنتیک انتخاب شده بود، با قطر لوله‌های در نظر گرفته شده، هزینه‌ای معادل ۳۱۱۹۰۲۲ دلار داشت، که پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های PESa-II و SPEA-II، هزینه‌ای برابر با ۱۰۶۹۳۹۳ دلار، بدون هیچ کمبود فشاری در شبکه و همچنین سرعت همگرایی بالا حاصل شد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری از الگوریتم‌های چندهدفه PESa-II و SPEA-II استفاده شد. این الگوریتم‌ها یک بار بدون در نظر گرفتن هزینه تعدی از آستانه حداقل و حداکثر فشار استاندارد با دو تکرار ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و بار دیگر با در نظر گرفتن هزینه ناشی از تعدی از مقادیر حداقل و حداکثر فشار استاندارد در تابع هزینه با تکرارهایی تا رسیدن به بهترین جواب و برای دو شبکه نمونه اجرا شدند. عملکرد آن‌ها براساس تولید بهترین جواب و زمان رسیدن به همگرایی برای هر دو شبکه نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور کلی نتایج نشان داد این الگوریتم‌ها توانایی بالایی در یافتن جواب‌های بهینه دارند. در صورت اجرای برنامه با در نظر گرفتن هزینه تعدی از

با توجه به جدول (۵) براساس جواب منتخب اجرای الگوریتم PESa-II در روش اول، در هر دو تکرار کمبود فشار بالاست و در بسیاری از گره‌ها فشار منفی وجود دارد. در ۱۰۰۰۰ تکرار، سرعت در گره شماره ۵ کم‌تر از حداقل مجاز است. در ۲۰۰۰۰ تکرار، سرعت در گره شماره ۲ بیشتر از حداکثر مجاز است. در روش دوم پس از ۲۰۰ تکرار، کمبود فشار در شبکه صفر می‌باشد، سرعت در کل لوله‌های شبکه در محدوده مجاز است، زمان رسیدن به همگرایی، بسیار کم‌تر از سایر تکرارها است و تعداد جواب‌های نزدیک به بهینه، نسبت به سایر تکرارها، بیشتر است. بنابراین در نظر گرفتن هزینه تعدی از حدود مجاز فشار در تابع هزینه برای الگوریتم PESa-II جهت بهینه‌سازی شبکه لانس، سبب تولید جواب‌های بهینه مناسب‌تر، نسبت به اجرای الگوریتم بدون در نظر گرفتن هزینه تعدی از حدود مجاز فشار می‌شود.

در جواب‌های منتخب حاصل از اجرای الگوریتم SPEA-II در روش اول، در تکرارهای ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ کمبود فشار وجود دارد. در جواب منتخب حاصل از ۱۰۰۰۰ تکرار، سرعت در لوله ۱۳ کم‌تر از حداقل سرعت مجاز می‌باشد. در جواب منتخب حاصل از ۲۰۰۰۰ تکرار، سرعت در لوله‌ها در کل شبکه در محدوده مجاز تعیین شده قرار دارد. در روش دوم با ۱۴۰ تکرار، هیچ کمبود فشاری در شبکه وجود ندارد و سرعت در همه لوله‌های شبکه در محدوده مجاز قرار دارند، همچنین زمان رسیدن به همگرایی بسیار کم‌تر از سایر تکرارها و تعداد جواب‌های نزدیک به بهینه، بیشتر از سایر تکرارها است. بنابراین در نظر گرفتن هزینه تعدی از حدود

الگوریتم PESA-II با ۲۰۰ و الگوریتم SPEA-II با ۱۴۰ تکرار به هزینه بهینه و مجموع کمبود فشار صفر در شبکه دست یافتند، که هر دو الگوریتم در مقایسه با هزینه حاصل از قطره‌های پیشنهادی شبکه ارائه شده توسط Lansey et al. (2001)، جواب مناسب‌تر با هزینه پایین‌تری را ارائه دادند. این نتایج نشان داد هر دو الگوریتم با در نظر گرفتن هزینه تعدی از حدود مجاز فشار در تابع هزینه، در پیدا کردن جواب‌هایی با کمبود فشار صفر در شبکه و کمترین هزینه موفق بوده‌اند.

محدوده مجاز فشار با ۲۰ تکرار در شبکه دو حلقه‌ای، از نظر تولید بهترین جواب، هر دو الگوریتم عملکرد مناسبی را نشان دادند و به جواب با کمبود فشار صفر و کمترین هزینه حاصل شده در سایر تحقیقات که معادل ۴۱۹۰۰۰ دلار بود دست یافتند، و از نظر زمان رسیدن به همگرایی نیز، هر دو الگوریتم با تعداد تکرار بسیار پایین‌تر از سایر تحقیقات و سرعت همگرایی بالایی به جواب بهینه رسیدند. همچنین در صورت اجرای برنامه با در نظر گرفتن هزینه تعدی از محدوده مجاز فشار در شبکه لانس، از نظر تولید بهترین جواب،

## منابع

- Alperovits, E. and Shamir, U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *water resources reearch*, 13(6): 885-900.
- Atiquzzaman, Md., liong, s-y. and xinying, yu. 2006. Alternative decision making in water distribution network with NSGA-II. *water resources planning and management*, 132(2): 122-126.
- Bi, W., Dandy, G. C. and Maier, H. R. 2015. Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge. *Environmental Modelling & Software*, 69: 370-381.
- Corne, D. W., Knowles, J. D. and Oates, M. J. 2000. The pareto-Envelope based selection algorithm for multi-objective optimization. In: *Parallel problem solving from nature-PPSNVI*, Berlin, pp. 839-848.
- Cunha, M. D. C. and Sousa, J. 1999. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. *Water Resour Plann Manage*, 125(4): 215-221.
- Do, N., Simpson, A., Deuerlein, J. and Piller, O. 2017. Demand estimation in water distribution systems: solving underdetermined problems using genetic algorithms. *Procedia Engineering*, 186: 193-201.
- Eusuff, M. M. and Lansey, K. E. 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Water Resour Plann Manage*, 129(3): 210-225.
- Ghajarnia, N., Bozorg, H. O. and Marino, M. A. 2010. Performance of a novel hybrid algorithm in the design of water networks. *Water management*, 164(4): 173-191.
- Khedr, A., Tolson, B. and Ziemann, S. 2015. Water distribution system calibration: manual versus optimization-based approach. *Procedia Engineering*, 119: 725-733.
- Lansey, K. E., EL-Shorbagy, W., Ahmed, I., Araujo, J. and Haan, C. T. 2001. Calibration assessment and data collection for water distribution network. *Journal of hydraulic engineering*, 127(4): 270-279.
- Lin, M-D., Liu, Y-H., Liu, G-F. and Chu, C-W. 2007. Scatter search heuristic for least-cost design of water distribution networks. *Engineering Optimization*, 39(7): 857-876.
- Marques, J., Cunha, M. and Savić, D. A. 2015. Multi-objective optimization of water distribution systems based on a real options approach. *Environmental Modelling & Software*, 63(C): 1-13.
- Minaei, A., Haghghi, A. and Ghafouri, H. R. 2019. Computer-Aided decision-making model for multiphase upgrading of aged water distribution mains. *Water Resour Plann Manage*, 145(5): 1-11.



Montesinos, P., Garsia-Guzman, A. and Ayuso, J. L. 1999. Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm. *Water Resources Research*, 35(11): 3467-3473.

Moosavian, N. and Kasaei Roodsari, B. 2014. Soccer league competition algorithm: A novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks. *Swarm and Evolutionary Computation* 17(Supplement C), 14-24.

Mora-Melià, D., Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L. and Gutiérrez-Bahamondes, J. H. 2017. Population Size Influence on the Efficiency of Evolutionary Algorithms to Design Water Networks. *Procedia Engineering*, 186: 341-348.

Palod, N., Prasad, V. and Khare, R. 2020. Non-parametric optimization technique for water distribution in pipe networks. *Water Supply*, 20(8): 3068-3082.

Sedki, A. and Ouazar, D. 2012. Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems. *Advanced Engineering Informatics*, 26(3): 582-591.

Savic, D. and Walters, G. 1997. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of water resources planning and management*, 123(2): 67-77.

Zheng, F., Simpson, A. and Zecchin, A. 2015. Improving the efficiency of multi-objective evolutionary algorithms through decomposition: An application to water distribution network design. *Environmental Modelling & Software*, 69(C): 240-252.

Zitzler, E., Laumanns, M. and Thiele, L. 2001. SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm. *Computer engineering and networks laboratory (TIK), Department of electrical engineering, Swiss Federal Institute Of Technology (ETH)*, 103: 1-21.

Zitzler, E. and Thiele, L. 1999. Multi-objective Evolutionary Algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 2(4): 257-272.



## Multi-Objective Optimization of Urban Water Distribution Networks Using PESA-II and SPEA-II Metaheuristic Algorithms

Negin Zarei<sup>1</sup>, Arash Azari<sup>2</sup>, Mohammad Mehdi Heidari<sup>3</sup>

### Abstract

As for the severe limitation of water resources, costly construction and operation of water supply systems and rapid population growth, the optimal design of these networks is essential. The problem of cost minimization is done by minimizing the diameter of the network pipes, which reduces the pressure in the network. Since providing adequate pressure in the nodes is one of the important design principles, so in this study, the problem of optimization in several sample networks was defined with the objectives of minimizing the cost and lack of pressure in the whole network. EPANET software was used for hydraulic analysis of sample networks and the multi-objective optimization process through coding of PESA-II and SPEA-II algorithms in MATLAB software and their connection to EPANET face Took. The cost function was initially defined only by considering the relationship between cost, diameter, and pipe length. Then, in the next definition, the cost of exceeding the allowable pressure range, where the minimum and maximum allowable pressures are 30 and 60 meters, respectively, was added to this function, and the program again with the number of repetitions that ended in the best answer Was implemented. The results showed that these algorithms have a high ability to find optimal solutions. In these algorithms, considering the cost of exceeding the allowable pressure limits results in the best answer that other researchers have ever obtained for sample networks, which for the two-loop and lansey network, The cost was 419000 and 1069393 \$ respectively, and the pressure shortage was zero and with a low number of iterations, in the two-loop network for both algorithms with 20 iterations and in the lansey network for PESA-II and SPEA-II algorithms with 200 and 140 iterations respectively, to achieve a higher number of optimal answers and the time to achieve convergence is significantly reduced, so that in the two-loop network, the execution time of PESA-II and SPEA-II algorithms are 0.55 and 0.59 minutes respectively, and in the lansey network It was 1/8 and 7.4 minutes respectively.

**Keywords:** Multi-Objective Optimization, Urban Water Distribution Network, PESA-II, SPEA-II

---

<sup>1</sup>MS.c of water resource Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, negin.zr@yahoo.com

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, a.azari@razi.ac.ir (corresponding author)

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, mm.heidari@ut.ac.ir



## Research Paper

## Multi-Objective Optimization of Urban Water Distribution Networks Using PESA-II and SPEA-II Metaheuristic Algorithms

Negin Zarei<sup>1</sup>,Arash Azari<sup>2\*</sup>,Mohammad Mehdi Heidari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MS.c of water resource Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran



10.22125/IWE.2021.262844.1456

Received:  
**December 20, 2020**  
Accepted:  
**April 13, 2021**  
Available online:  
**June.01.2022**

**Keywords:**  
**Multi-Objective  
Optimization, Urban  
Water Distribution  
Network, PESA-II,  
SPEA-II**

### Abstract

As for the severe limitation of water resources, costly construction and operation of water supply systems and rapid population growth, the optimal design of these networks is essential. The problem of cost minimization is done by minimizing the diameter of the network pipes, which reduces the pressure in the network. Since providing adequate pressure in the nodes is one of the important design principles, so in this study, the problem of optimization in several sample networks was defined with the objectives of minimizing the cost and lack of pressure in the whole network. EPANET software was used for hydraulic analysis of sample networks and the multi-objective optimization process through coding of PESA-II and SPEA-II algorithms in MATLAB software and their connection to EPANET face Took. The cost function was initially defined only by considering the relationship between cost, diameter, and pipe length. Then, in the next definition, the cost of exceeding the allowable pressure range, where the minimum and maximum allowable pressures are 30 and 60 meters, respectively, was added to this function, and the program again with the number of repetitions that ended in the best answer Was implemented. The results showed that these algorithms have a high ability to find optimal solutions. In these algorithms, considering the cost of exceeding the allowable pressure limits results in the best answer that other researchers have ever obtained for sample networks, which for the two-loop and lansey network, The cost was 419000 and 1069393 \$ respectively, and the pressure shortage was zero and with a low number of iterations, in the two-loop network for both algorithms with 20 iterations and in the lansey network for PESA-II and SPEA-II algorithms with 200 and 140 iterations respectively, to achieve a higher number of optimal answers and the time to achieve convergence is significantly reduced, so that in the two-loop network, the execution

\* **Corresponding Author: Arash Azari**  
**Address:** Department of Water Engineering, Razi University, , Iran

**Email:** [a.azari@razi.ac.ir](mailto:a.azari@razi.ac.ir)  
**Tel:** +989191257663

time of PESA-II and SPEA-II algorithms are 0.55 and 0.59 minutes respectively, and in the lansley network It was 1.8 and 7.4 minutes respectively.

## 1. Introduction

Due to the complex relationships between the various components of water distribution networks, it is challenging to determine changes that lead to improved network design, even in medium-sized networks. Therefore, many efforts have been made to solve the problem of optimizing these networks. The use of multi-objective algorithms with two-dimensional decision space has received limited attention. On the other hand, in all the methods used, the cost criterion as one of the objective functions is only a function of the length and diameter of the selected pipes and the penalty for exceeding the minimum and maximum allowable pressure in the nodes is an essential factor. The algorithm is not considered in accelerating the convergence. Therefore, in this research, by using different methods and comparing and modifying the structure of these algorithms, valuable suggestions for extending it to other networks are presented.

## 2. Materials and Methods

EPANET software was used to analyze water supply networks' hydraulic analysis in this research. The optimization of this system was done by coding PESA-II and SPEA-II meta-exploration algorithms in the MATLAB software environment and connecting it to the body of EPANET software by using appropriate computational tools. The optimization problem was solved through a two-loop network and Lansley in the form of a multi-objective function. The first goal was to minimize the cost of designing the system versus the second goal of reducing the total pressure shortage in the entire system.

The cost function was defined in two ways. In the first method, this function is defined as equation (1) and only considers the relationship between cost and diameter and length of pipes. According to equation (2) in the second method, the penalty for exceeding the allowable pressure range Was also added to the relationship.

$$\text{Minimize } F1 = \sum_{i=1}^{NL} C_i(D_i) \times L_i \quad (1)$$

$$\text{Minimize } F1 = ((\sum_{i=1}^{NL} (3.5712 \exp(0.0081(D_i))) \times L_i) / 1000) + (r \times (c_p + c_m)) \quad (2)$$

where,  $C_i(D_i)$  is the cost of each unit length of pipe with the diameter  $D_i$ ,  $L_i$  is the length of the pipe  $i$  and  $NL$  is the number of pipes in the network.

$r$  is the penalty for violation of the allowable pressure range, which is a random number between zero and one hundred.  $C_p$  is the cost resulted from the violation of the maximum allowable pressure and  $C_m$  is the cost due to pressures lower than the minimum allowable limit.

Minimizing the total pressure shortage in the whole system was also calculated from equation (3).

$$\text{Minimize } F2 = \text{Minimize } \sum_{j=1}^{NP} (\text{Max}((p_j^{\min} - p_j), 0)) \quad (3)$$

$P_{jmin}$  is the minimum pressure required at node  $j$ ,  $P_j$  is the computational pressure at node  $j$ , and  $NP$  is the number of nodes in the network.

## 3. Results

Two ways investigated the optimization of two-loop and lance networks using PESA-II and SPEA-II algorithms. Once, the results of these algorithms were compared by defining the cost function based on the diameter-cost relationship with 10,000 and 20,000 repetitions. In the next method, the results of their implementation were performed by considering the penalty of exceeding the allowable pressure limits in the cost function with the number of repetitions to reach the best answer and were compared with the results of the previous method.

In the two-loop network based on the selected answers obtained from the implementation of algorithms, for the PESA-II algorithm in the first method, there is a lack of pressure, and in the second method with 20 repetitions, without a lack of pressure, cost and time to reach convergence is much less than the first method. For the SPEA-II algorithm in both ways, the pressure shortage is zero, and the cost and time to achieve convergence in the second method with 20 repetitions is much less than in the first method. In the launch network, the pressure deficit is high based on the selected results obtained from the

implementation of both algorithms in the first method. In the second method, the PESA-II algorithm, after 200 iterations and the SPEA-II algorithm, after 140 iterations, due to zero pressure, arrived in the network. The time to reach their convergence is much less than the first method.

#### 4. Discussion and Conclusion

In the case of running the program, considering the cost of exceeding the allowable pressure limit, in a two-loop network with 20 repetitions, both algorithms achieved the answer with zero pressure deficit and the lowest price obtained in other research, which was equivalent to \$ 419,000. In terms of time to reach convergence, the optimal answer was obtained with a much lower repetition rate than other studies and a high convergence rate. In the lance network, the PESA-II algorithm with 200 and the SPEA-II algorithm with 140 replications achieved the optimal cost and total zero pressure deficit in the network, both of which are compared to the cost of the proposed network diameters provided by Lansey. et al. (2001), which was equivalent to \$ 3119022, provided a more appropriate answer with a lower cost of \$ 1069393. These results showed that both algorithms, considering the cost of exceeding the allowable pressure limits in the cost function, have successfully found answers with zero pressure deficit in the network and the lowest price.

#### 5. Six important references

- Alperovits, E. and Shamir, U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *water resources research*, 13(6): 885-900.
- Atiquzzaman, Md., liong, s-y. and xinying, yu. 2006. Alternative decision making in water distribution network with NSGA-II. *water resources planning and management*, 132(2): 122-126.
- Corne, D. W., Knowles, J. D. and Oates, M. J. 2000. The pareto-Envelope based selection algorithm for multi-objective optimization. In: *Parallel problem solving from nature-PPSNVI*, Berlin, pp. 839-848.
- Lansey, K. E., EL-Shorbagy, W., Ahmed, I., Araujo, J. and Haan, C. T. 2001. Calibration assessment and data collection for water distribution network. *Journal of hydraulic engineering*, 127(4): 270-279.
- Sedki, A. and Ouazar, D. 2012. Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems. *Advanced Engineering Informatics*, 26(3): 582-591.
- Zitzler, E., Laumanns, M. and Thiele, L. 2001. SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm. *Computer engineering and networks laboratory (TIK), Department of electrical engineering, Swiss Federal Institute Of Technology (ETH)*, 103: 1-21.

#### 6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

#### 7. Acknowledgments

We are grateful to .....