

بهینه‌سازی دودنه‌های شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی

حمیدرضا صفوی^{۱*}، وحید قربانی^۲، محمدعلی گرانمهر^۳

۱- استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، hasafavi@cc.iut.ac.ir

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان،

vahid_ghorbani1368@yahoo.com

۳- دانشجوی دکترا، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ma.geranmehr@cv.iut.ac.ir

چکیده

طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب مسئله تک‌هدفه نبوده و لازم است به جنبه‌های مختلف عملکرد شبکه در کنار اقتصادی بودن طرح توجه شود. در این مقاله، مدل بهینه‌سازی دودنه‌های شبکه‌های توزیع آب با هر دو رویکرد قابلیت اطمینان هیدرولیکی و قابلیت اطمینان مکانیکی ارائه شده است. بدین منظور، شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی توسعه داده شده و از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حداقل‌سازی هزینه و حداکثرسازی شاخص مذکور استفاده شده است. قیود طراحی شامل محدودیت‌های فشار و سرعت، به صورت توابع جریمه و به همراه تابع هدف اول در نظر گرفته شده است. یک مثال موردی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد شاخص توسعه داده شده به خوبی می‌تواند منحنی پارتو را ایجاد کرده و گزینه‌های مختلف طراحی را فراهم کند. نهایتاً، طراح می‌تواند گزینه نهایی را بر اساس مصالحه بین هزینه و قابلیت اطمینان ترکیبی که هر دو عملکرد مکانیکی و هیدرولیکی را شامل می‌شود، انتخاب کند.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع آب، بهینه‌سازی چندهدفه، قابلیت اطمینان، منحنی پارتو

۱- مقدمه

طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب یکی از مباحث مهم پژوهشی بوده که هزینه بالای ساخت این شبکه‌ها در کنار غیرخطی بودن معادلات حاکم، اهمیت این موضوع را مشخص می‌کند. در این زمینه اگر هدف اصلی فقط طراحی اقتصادی باشد، شبکه مناسبی فراهم نمی‌شود. زیرا عملکرد شبکه از نظر سایر معیارها مثل قابلیت اطمینان بررسی نشده است. در دو دهه اخیر، تحقیقات بسیاری در زمینه بهینه‌سازی چند هدفه شبکه‌های توزیع آب ارائه شده که در ادامه به طور مختصر مرور می‌شود.

به عنوان پیشگامان طراحی چند هدفه شبکه‌های توزیع آب، (Formiga et al., 2003) با استفاده از یک مدل سه هدفه با اهداف هزینه، آنتروپی و نرخ تامین نیازآبی، مدلی برای طراحی بهینه شبکه توسعه دادند. همچنین Prasad and Park (2004) با معرفی شاخص قابلیت ارتجاع شبکه^۱، از الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای حداقل‌سازی هزینه ساخت شبکه و حداکثرسازی شاخص مذکور استفاده کردند. این شاخص بعداً در تحقیقات زیادی به عنوان هدف دوم استفاده شد (Zheng and Zecchin, 2014, Zheng et al., 2014, Yazdi, 2016, Zheng et al., 2016, Zheng et al., 2017).

استفاده از شاخص‌های مربوط به کیفیت آب، از دیگر اهداف استفاده شده برای بهینه‌سازی چند هدفه شبکه است. به عنوان نمونه، مدلی دو هدفه و مبتنی بر شاخص کیفیت آب توسط Broad et al. (2004) توسعه داده شده است. آنها با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین غلظت کلر، زمان محاسبات را کاهش دادند. Atiquzzaman et al. (2006) با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامعلوب^۲ (NSGA-II) مدلی برای حداقل‌سازی هزینه و حداکثرسازی کمبود فشار در گر‌ها توسعه دادند. Farmani et al. (2006) مدلی چند هدفه مبتنی بر هزینه، قابلیت

ارتجاع و کیفیت آب ارائه و از آن برای طراحی شبکه Anytwon با موفقیت استفاده کردند. در ادامه استفاده از شاخص‌های مرتبط با کیفیت آب به عنوان یکی از معیارهای طراحی تثبیت شد (Li et al., 2014 and Kurek and Ostfeld, 2014). در دهه اخیر ارزیابی روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف برای بهینه‌سازی دو هدفه شبکه متداول شده است. Keedwell and Khu (2006) یک الگوریتم چند هدفه تلفیقی که مبتنی بر دو الگوریتم ژنتیک و اتوماتای سلولی^۳ بود، برای طراحی شبکه توسعه دادند. (Montalvo et al. (2010) از الگوریتم چند هدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ (MOPSO) برای طراحی شبکه استفاده کردند. (Siew and Tanyimboh (2010) یک مدل چند هدفه که نیازی به اعمال توابع جریمه نداشت، توسعه دادند. مدل مذکور عملکرد بسیار خوبی برای طراحی چند هدفه شبکه داشت. جست‌وجوی ابعاد پویای پارتوی ذخیره شده^۵، روشی ابتکاری بود که توسط (Asadzadeh and Tolson (2012) برای بهینه‌سازی چند هدفه شبکه ارائه شد. (Marques et al. (2015) مدلی دو هدفه و مبتنی بر گزینه‌های توسعه شبکه ارائه دادند. (Tanyimboh et al. (2016) و (Saleh and Tanyimboh (2016) از شاخص آنتروپی به عنوان یک شاخص جایگزین برای طراحی دو هدفه شبکه استفاده کردند. (Yazdi (2016) عملکرد الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی مبتنی بر تجزیه^۶ (MOEA/D) را برای طراحی شبکه بررسی و استفاده از آن‌ها را برای شبکه‌های بزرگ مقیاس توصیه کرد. (Bozorg-Haddad et al. (2016) از الگوریتم چند هدفه جفت‌گیری زنبور عسل^۷ (MOHBMO) برای طراحی شبکه با موفقیت استفاده کردند و اذعان داشتند الگوریتم مذکور بسیار کارآمد است.

در این تحقیق، یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه برای طراحی شبکه توسعه داده شده و از الگوریتم (Deb) NSGA-II (et al., 2002) برای حل آن استفاده شده است. همچنین مدل EPANET (Rossman, 2000) به عنوان شبیه‌ساز هیدرولیکی برای حل معادلات شبکه اعمال شده است. تابع هدف اول، حداقل‌سازی مجموع هزینه و تخطی مربوط به محدودیت‌های فشار و سرعت در نظر گرفته شده است. یک شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی شامل دو معیار قابلیت اطمینان هیدرولیکی و قابلیت اطمینان مکانیکی توسعه داده شده و به عنوان تابع هدف دوم اعمال شده است. در پایان شبکه دو حلقه‌ای به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده و نتایج طراحی آن در چند سناریوی مختلف بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ قابلیت اطمینان هیدرولیکی

به طور کلی قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه به معنای احتمال پوشش تقاضای مورد نیاز تحت فشار مشخص تعریف می‌شود. همان‌طور که در پیشینه تحقیق در بخش مقدمه اشاره شد، شاخص قابلیت ارتجاع شبکه به عنوان یکی از شاخص‌های متداول برای ارزیابی قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه استفاده می‌شود. این شاخص بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$I_n = \frac{\sum_{j=1}^m C_j Q_j (H_j - H_j^l)}{\left(\sum_{k=1}^{nr} Q_k H_k + \sum_{i=1}^{npu} \frac{P_i}{\gamma} \right) - \sum_{j=1}^m Q_j H_j^l} \quad (1)$$

که Q_j نیازآبی گره z ام، H_j و H_j^l به ترتیب هد موجود و حداقل هد مورد نیاز (یا هد طراحی) برای گره z ام است. nm و nr به ترتیب تعداد گره‌ها و تعداد مخازن شبکه است. npu تعداد پمپ‌های شبکه و P_i توان تامین شده توسط پمپ i ام است. Q_k و H_k به ترتیب دبی و هد مربوط به مخزن گره k ام است. γ وزن مخصوص آب و C_j شاخص یکنواختی قطر لوله‌های متصل به گره z ام بوده که مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^{npj} D_i}{npj \times \max\{D_i\}} \quad (2)$$

که D_i قطر لوله i ام و npj تعداد لوله‌های متصل به گره j ام است.

۲-۲ قابلیت اطمینان مکانیکی

قابلیت اطمینان مکانیکی یک المان، احتمال عملکرد مداوم آن المان است (Kessler et al., 1990) و آنتروپی یک شاخص جایگزین برای ارزیابی قابلیت اطمینان مکانیکی در شبکه است. رابطه ۳ برای محاسبه آنتروپی شبکه توسط Tanyimboh and Templeman (1993) توسعه داده است.

$$S = - \sum_{j \in IN} \frac{Q_j}{T} \ln \left(\frac{Q_j}{T} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \sum_{j=1}^{mn} T_j \left[\frac{Q_j}{T_j} \ln \left(\frac{Q_j}{T_j} \right) + \sum_{i \in N_j} \frac{q_{ij}}{T_j} \ln \left(\frac{q_{ij}}{T_j} \right) \right] \quad (3)$$

که S آنتروپی شبکه و IN مجموعه گره‌های منبع است. T مجموع نیاز گره‌ها و T_i کل آبی است که به گره i ام می‌رسد. N_j تعداد کل گره‌های شبکه و Q_j نیاز آبی گره j ام است. q_{ij} برابر دبی لوله‌ای است که از گره i به گره j متصل است.

۲-۳ شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی

در این مقاله، شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی (I_m) شامل دو شاخص قابلیت ارتجاع شبکه و شاخص آنتروپی مطابق رابطه ۴ تعریف شده است.

$$I_m = \sqrt{\left(\frac{S}{S_{\max}} \times I_n \right)} \quad (4)$$

که S_{\max} حداکثر آنتروپی شبکه است و برای نرمال‌سازی مقدار شاخص آنتروپی در این رابطه استفاده شده است.

۲-۴ بهینه‌سازی

در این تحقیق یک مدل دو هدفه مطابق روابط زیر برای بهینه‌سازی شبکه ارائه شده است. رابطه ۵ تابع هدف اول شامل حداقل‌سازی هزینه و تخطی قیود است. هزینه مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌شود. رابطه ۷، حداکثرسازی شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی بوده که به عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است.

$$Z_1 = \text{Min} (Cost + (w \times Violation)) \quad (5)$$

$$Cost = \sum_{i=1}^{np} CP_i (D_i) \times L_i + \sum_{k=1}^{np} CR_k (H_k) \quad (6)$$

$$Z_2 = \text{Max } I_m \quad (7)$$

که Z_1 و Z_2 به ترتیب تابع هدف اول و دوم است. $Cost$ هزینه ساخت شبکه و $Violation$ تخطی قیود طراحی است. CP_i هزینه واحد طول لوله i ام و CP_k هزینه مخزن یا پمپ k ام است. np تعداد کل مخازن و پمپ‌هاست. همچنین w ضریب تابع جریمه است که با تحلیل حساسیت به دست می‌آید.

به طور کلی شبکه باید به گونه‌ای طراحی شود که فشار گره‌ای و سرعت در لوله‌های آن در محدوده مناسب باشد. این محدوده مناسب معمولاً به وسیله آیین‌نامه‌های طراحی مشخص می‌شوند. در این تحقیق رابطه ۸ برای محاسبه تابع جریمه استفاده می‌شود.

$$Violation = \sum_{j=1}^{mn} \lambda_j^p + \sum_{i=1}^{np} \lambda_i^v \quad (8)$$

که λ_j^p تخطی فشار در گره j ام و λ_i^v تخطی سرعت در لوله i ام است که به ترتیب بر اساس روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند. np تعداد لوله‌های شبکه است.

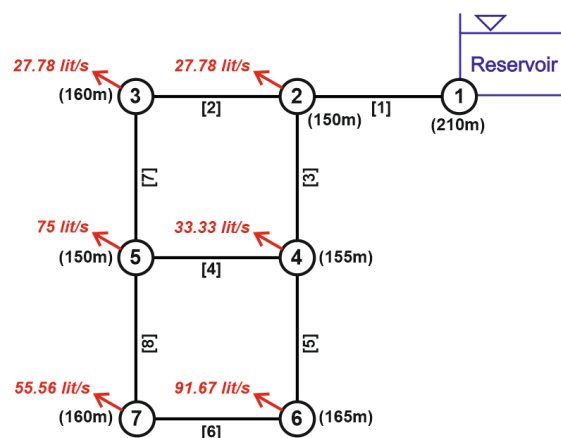
$$\lambda_j^p = \begin{cases} 0 & p_{\min} \leq p_j \leq p_{\max} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda_i^v = \begin{cases} 0 & v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

که v_i سرعت در لوله i ام و p_j فشار در گره j ام است. p_{\max} و p_{\min} به ترتیب حداقل و حداکثر فشار مجاز برای طراحی شبکه است. همچنین v_{\max} و v_{\min} نیز به ترتیب محدودیت سرعت مجاز است.

۳- مثال موردی

شبکه دو حلقه‌ای (Alperovits and Shamir, 1977) به عنوان یک مثال مرجع در این مقاله بررسی می‌شود. این شبکه شامل ۸ لوله، ۶ گره برای تامین نیازآبی و یک گره مخزن است. طول همه لوله‌ها ۱۰۰۰ متر و ضریب هیزن ویلیامز ۱۳۰ است. سایر اطلاعات شبکه شامل نیازآبی و تراز ارتفاعی گره‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. لیست لوله‌های تجاری موجود برای طراحی شبکه، مطابق جدول ۱ است. محدودیت ۳۰ متر و ۶۰ متر به ترتیب برای حداقل و حداکثر فشار مجاز مفروض است. همچنین حداقل و حداکثر سرعت مجاز به ترتیب برابر ۰/۳ و ۲ متر بر ثانیه است. در این مثال طراحی شبکه در سه سناریو بررسی می‌شود. سناریوی اول (S1) طراحی بر اساس شاخص قابلیت ارتجاع و فقط با اعمال قید فشار است. این سناریو برای مقایسه با نتایج تحقیق ارائه شده توسط Prasad and Park (2004). تعریف شده است. در سناریوی دوم (S2)، از شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی به عنوان هدف دوم استفاده شده است. در این حالت نیز فقط قید محدودیت فشار گره‌ها در نظر گرفته شده است. نهایتاً در سناریوی سوم (S3) قابلیت اطمینان ترکیبی و ارضای همه قیود شامل محدودیت‌های سرعت و محدودیت‌های فشار اعمال شده است. برای حل این مثال، از چندین بار اجرای الگوریتم NSGA-II با مقادیر مختلف جمعیت اولیه (۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰)، مقادیر مختلف درصد جهش (0.01، 0.02 و 0.05)، با تعداد تکرار کافی برای اطمینان از همگرایی و با شرط توقف عدم بهبود جواب‌ها در ۵۰ تکرار آخر، استفاده شده و بهترین نتایج گزارش شده است. همچنین مقدار تابع جریمه برابر یک میلیارد واحد در نظر گرفته شد تا جواب‌های نامناسب، به سرعت حذف شوند.



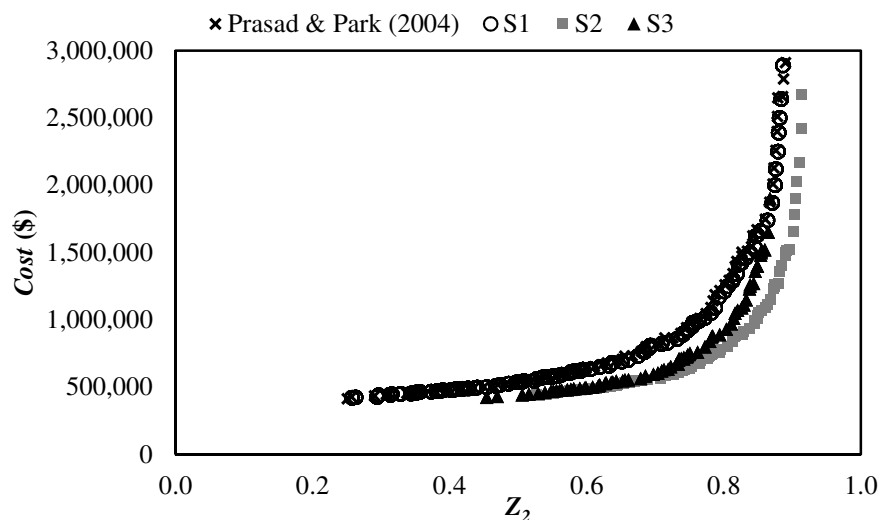
شکل ۱- شبکه دو حلقه‌ای (Alperovits and Shamir, 1977)

جدول ۱- لوله‌های تجاری موجود برای طراحی شبکه دو حلقه‌ای

قطر (میلیمتر)	قیمت واحد طول (دلار بر متر)
25.4	2
50.8	5
76.2	8
101.6	11
152.4	16
203.2	23
254	32
304.8	50
355.6	60
406.4	90
457.2	130
508	170
558.8	300
609.6	550

۴- نتایج و بحث

منحنی پارتو حاصل از طراحی شبکه دو حلقه‌ای برای سه سناریوی مختلف در کنار نتایج گزارش شده توسط Prasad and Park (2004) در شکل ۲ ترسیم شده است. همچنین بخشی از نتایج طراحی در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نتایج سناریوی اول تا حد بسیار زیادی با نتایج ارائه شده توسط Prasad and Park (2004) منطبق است که این موضوع، صحت مدل ارائه شده در این تحقیق را تایید می‌کند. با توجه به منحنی پارتو برای سناریوی دوم، نتایج نشان می‌دهد مقادیر شاخص ترکیبی تعریف شده، مقادیر بیشتری نسبت به شاخص قابلیت ارتجاع دارند. این افزایش به دلیل در نظر گرفتن همزمان قابلیت‌های اطمینان هیدرولیکی و مکانیکی می‌باشد. بنابراین منحنی پارتو به سمت راست متمایل شده است. در سناریوی سوم که قیود سرعت نیز اضافه شده است، قابلیت اطمینان شبکه نسبت به سناریوی دوم اندکی کمتر است. به عنوان جمع‌بندی، مشاهده می‌شود استفاده از شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی در کنار هزینه در یک مدل دو هدفه، به خوبی می‌تواند منحنی پارتو را تشکیل داده و جواب‌های متنوعی برای طراح فراهم آورد. جواب‌هایی که علاوه بر ویژگی اقتصادی بودن، از نظر قابلیت اطمینان هیدرولیکی و همچنین قابلیت اطمینان مکانیکی مناسب بوده و منجر به طراحی شبکه‌ای کارآمد می‌شود.



شکل ۲- منحنی پارتو برای طراحی شبکه دو حلقه‌ای
جدول ۲- بخشی از نتایج طراحی شبکه دو حلقه‌ای

S3		S2		S1		سناریو
Max	Min	Max	Min	Max	Min	نقطه از منحنی پارتو
1.900	0.424	2.670	0.442	2.890	0.420	هزینه (میلیون دلار)
0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	تخطی
0.867	0.454	0.914	0.527	0.886	0.257	مقدار تابع هدف دوم
508	254	609.6	304.8	609.6	355.6	1
609.6	406.4	609.6	406.4	609.6	355.6	2
508	254	558.8	254	558.8	25.4	3
508	254	558.8	254	558.8	355.6	4
508	254	558.8	254	558.8	254	5
355.6	152.4	355.6	152.4	508	152.4	6
355.6	355.6	355.6	355.6	508	355.6	7
609.6	457.2	609.6	457.2	609.6	457.2	8

۵- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی بهینه یک شبکه توزیع آب با اهداف اقتصادی، قابلیت اطمینان هیدرولیکی و قابلیت اطمینان مکانیکی بررسی شد. بدین منظور یک شاخص قابلیت اطمینان ترکیبی تعریف و به صورت حداکثرسازی در کنار حداقل سازی هزینه، در یک مدل دو هدفه استفاده گردید. برای حل این مدل از الگوریتم NSGA-II استفاده و کارایی آن با یک مثال مرجع ارزیابی شد. نتایج نشان داد روش ارائه شده به خوبی می‌تواند گزینه‌های مختلفی برای طراحی شبکه ارائه دهد. در نتیجه طراح قادر است با مصالحه بین هزینه و قابلیت اطمینان، گزینه نهایی را انتخاب نماید. در کل به نظر می‌رسد که شاخص ترکیبی قادر است به عنوان یک شاخص اطمینان‌پذیری مناسب در طراحی‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۹- پی‌نوشت‌ها

- 1- Network Resilience Index
- 2- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, version 2
- 3- Cellular Automaton
- 4- Multi-objective Particle Swarm Optimization
- 5- Pareto archived dynamically dimensioned search method
- 6- Multi-objective Evolutionary Algorithms based on Decomposition
- 7- Multi-objective Honey-Bees Mating Optimization

۱۰- مراجع

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

- Asadzadeh, M., and Tolson, B. (2012). "Hybrid Pareto archived dynamically dimensioned search for multi-objective combinatorial optimization: Application to water distribution network design." *Journal of Hydroinformatics*, 14(1), 192-205.
- Atiquzzaman, M., Liong, S., and Yu, X. (2006). "Alternative Decision Making in Water Distribution Network with NSGA-II." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(2), 122-126.
- Bozorg Haddad, O., Ghajarnia, N., Solgi, M., Loáiciga, H., and Mariño, M. (2016). "A DSS-Based Honeybee Mating Optimization (HBMO) Algorithm for Single- and Multi-objective Design of Water Distribution Networks." *Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering*, X.-S. Yang, G. Bekdaş, and S. M. Nigdeli, eds., Springer International Publishing, 199-233.
- Broad, D., Dandy, G., and Maier, H. (2004). "A Metamodeling Approach to Water Distribution System Optimization." *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, 1-10.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. (2002). "A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II." *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- Farmani, R., Walters, G., and Savic, D. (2006). "Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality." *Journal of Hydroinformatics*, 8(3), 165-179.
- Formiga, K. M., Chaudhry, F., Cheung, P., and Reis, L. R. (2003). "Optimal Design of Water Distribution System by Multiobjective Evolutionary Methods." *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, C. Fonseca, P. Fleming, E. Zitzler, L. Thiele, and K. Deb, eds., Springer Berlin Heidelberg, 677-691.
- Keedwell, E., and Khu, S.-T. (2006). "A novel evolutionary meta-heuristic for the multi-objective optimization of real-world water distribution networks." *Engineering Optimization*, 38(3), 319-333.
- Kessler, A., Ormsbee, L., and Shamir, U. (1990). "A methodology for least-cost design of invulnerable water distribution networks." *Civil Engineering Systems*, 7(1), 20-28.
- Kurek, W., and Ostfeld, A. (2014). "Multiobjective Water Distribution Systems Control of Pumping Cost, Water Quality, and Storage-Reliability Constraints." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(2), 184-193.
- Li, C., Yu, J. Z., Zhang, T. Q., Mao, X. W., and Hu, Y. J. (2014). "Multiobjective optimization of water quality and rechlorination cost in water distribution systems." *Urban Water Journal*, 12(8), 646-652.
- 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(0), 1-13.
- Montalvo, I., Izquierdo, J., Schwarze, S., and Pérez-García, R. (2010). "Multi-objective particle swarm optimization applied to water distribution systems design: An approach with human interaction." *Mathematical and Computer Modelling*, 52(7-8), 1219-1227.
- Prasad, T., and Park, N. (2004). "Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73-82.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 User's Manual*, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, U.S.A.
- Saleh, S., and Tanyimboh, T. T. (2016). "Multi-Directional Maximum-Entropy Approach to the Evolutionary Design Optimization of Water Distribution Systems." *Water Resources Management*, 30(6), 1885-1901.
- Siew, C., and Tanyimboh, T. (2010). "Penalty-Free Multi-Objective Evolutionary Optimization of Water Distribution Systems." *Water Distribution Systems Analysis 2010*, 764-770.
- Tanyimboh, T. T., Siew, C., Saleh, S., and Czajkowska, A. (2016). "Comparison of Surrogate Measures for the Reliability and Redundancy of Water Distribution Systems." *Water Resources Management*, 30(10), 3535-3552.
- Tanyimboh, T. T., and Templeman, A. B. (1993). "Calculating Maximum Entropy Flows in Networks." *The Journal of the Operational Research Society*, 44(4), 383-396.
- Yazdi, J. (2016). "Decomposition based Multi Objective Evolutionary Algorithms for Design of Large-Scale Water Distribution Networks." *Water Resources Management*, 30(8), 2749-2766.
- Zheng, F., Qi, Z., Bi, W., Zhang, T., Yu, T., and Shao, Y. (2017). "Improved Understanding on the Searching Behavior of NSGA-II Operators Using Run-Time Measure Metrics with Application to Water Distribution System Design Problems." *Water Resources Management*, 31(4), 1121-1138.
- Zheng, F., Simpson, A. R., and Zecchin, A. C. (2014). "An efficient hybrid approach for multiobjective optimization of water distribution systems." *Water Resources Research*, 50(5), 3650-3671.



Zheng, F., and Zecchin, A. (2014). "An efficient decomposition and dual-stage multi-objective optimization method for water distribution systems with multiple supply sources." *Environmental Modelling & Software*, 55(0), 143-155.

Zheng, F., Zecchin, A., Maier, H., and Simpson, A. (2016). "Comparison of the Searching Behavior of NSGA-II, SAMODE, and Borg MOEAs Applied to Water Distribution System Design Problems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 04016017.

Two-objective Optimization of Water Distribution Networks Using Mixed Reliability Index

Hamid R. Safavi*¹, Vahid Ghorbani², Mohammadali Geranmehr³

1- Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, hasafavi@cc.iut.ac.ir

2- Graduated Student, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, vahid_ghorbani1368@yahoo.com

3- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, ma.geranmehr@cv.iut.ac.ir

Abstract

Optimal design of water distribution networks is not a single objective problem and other aspects of network performance should be considered with economic criteria. This study presents a model for taking into account both hydraulic and mechanical reliability in multi objective design of water distribution networks. To win this purpose, a new mixed reliability index is developed and genetic algorithm applied in order to minimize the cost and maximizing the presented index. Design constraints, i.e. nodal pressure and pipe velocity limit, are implemented in the model by penalty values which are added to the first objective function. The proposed method was successfully applied at the well-known benchmark network and results show that the new reliability index could shape the Pareto front perfectly. Thus, the designer could be able to choose the best solution by trade-off between cost and reliability, which has both mechanical and hydraulic aspects.

Keywords: Water Distribution Network, Multi-objective optimization, Reliability, Pareto front.