

مقایسه شاخص‌های قابلیت اطمینان در طراحی بهینه شبکه‌های آبرسانی شهری

حامد منصف^۱، محمد نقاش زادگان^{۲*}، علی جمالی^۳، راضیه فرمانی^۴

۱. دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۳. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۴. دانشیار، مرکز سیستم‌های آب، دانشگاه اگزتر، اگزتر، انگلستان

naghash@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۰۶

چکیده

در چند دهه اخیر با توجه به هزینه‌های بالای اجرای یک شبکه آبرسانی، طراحان بر آن شدند تا شبکه‌هایی را با کمترین هزینه و بیشترین قابلیت اطمینان طراحی کنند. شبکه‌هایی که قادر باشند در مواجهه با تغییرات تقاضا یا شکست لوله کماکان خدمات مطلوبی را ارائه دهد. از این رو شاخص‌های متعددی برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان معرفی و در بهینه‌سازی به عنوان یکی از توابع هدف در کنار هزینه استفاده شد. یکی از مسائلی که در مطالعات چند سال اخیر مطرح شده این است که کدامیک از این شاخص‌ها در اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شبکه آبرسانی موفق‌تر عمل می‌کند. در مطالعه حاضر برای رفع نقاط ضعف مقایسه‌های انجام شده پیشین، ضمن استفاده از شاخص‌های کاربرد قابلیت اطمینان در طراحی بهینه دو شبکه نمونه با ماهیت متفاوت (تغذیه گرانشی و تغذیه با ایستگاه پمپاژ)، توانایی پاسخ‌های بهینه به دست آمده برای خدمات‌رسانی مطلوب در شرایط غیر طبیعی (مانند تغییرات تقاضا یا شکست لوله‌ها) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد شاخص حداقل هد مازاد (MSH) و شاخص تاب‌آوری (RI) به ترتیب بهترین شاخص برای طراحی بهینه شبکه آبرسانی فاقد ایستگاه پمپاژ و شامل آن است.

واژگان کلیدی: شبکه‌های آبرسانی شهری، بهینه‌سازی، شاخص‌های قابلیت اطمینان، الگوریتم تکامل تفاضلی

لحظات اوج مصرف تامین نماید. همچنین انتظار می‌رود این شبکه‌ها به گونه‌ای طراحی شوند تا در شرایط غیر طبیعی مانند تغییرات محسوس در تقاضا یا شکست یک یا چند لوله بتوانند بیشترین کارایی را داشته باشند. به عبارت دیگر شبکه‌هایی مورد پسند است که قابلیت اطمینان بیشتری را ارائه دهند در حالی که

۱- مقدمه

شبکه‌های آبرسانی شهری یکی از زیرساخت‌های حیاتی هر شهر محسوب می‌شود. این شبکه‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا بتوانند در پایان دوره طرح، حداقل‌های مورد نیاز مشترکین را در

هزینه ایجاد آنها در حد مطلوبی باقی بماند. برای بررسی میزان قابلیت اطمینان شبکه آبرسانی به شاخصی برای اندازه‌گیری این پارامتر نیاز است. Gheisi et al. [1] در سال ۲۰۱۶ یک مرور جامع بر مطالعات انجام شده در خصوص روش‌های ریاضی محاسبه قابلیت اطمینان در شبکه آبرسانی و همچنین دسته‌بندی آنها انجام داده‌اند. به طور کلی مبحث قابلیت اطمینان در شبکه‌های آبرسانی از نظر کمی به دو گروه قابلیت اطمینان هیدرولیکی و قابلیت اطمینان مکانیکی تقسیم می‌شود [2]. قابلیت اطمینان هیدرولیکی به توانایی شبکه در مواجهه با تغییرات تقاضا در زمان اشاره دارد و یکی از پارامترهای اساسی اندازه‌گیری کارایی شبکه است [3]. شاخص‌هایی مانند تاب‌آوری (RI')، تاب‌آوری شبکه (NRI') و تاب‌آوری اصلاح شده (MRI'') از متداولترین شاخص‌ها در بررسی قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه آبرسانی به شمار می‌آیند. از سوی دیگر قابلیت اطمینان مکانیکی به توانایی شبکه در مواجهه با حوادث مکانیکی مانند شکست لوله یا از کار افتادن پمپ اشاره دارد [2]. شاخص آنتروپی جریان (ERI^4) یکی از شاخص‌های متداول در اندازه‌گیری قابلیت اطمینان مکانیکی شبکه بوده که بر اساس تعداد مسیرهای جریان ممکن محاسبه می‌شود [4]. بر اساس نتایج ارائه شده شبکه‌هایی که مقدار شاخص آنتروپی جریان آنها بزرگتر است، دارای قابلیت اطمینان مکانیکی بیشتری هستند [2].

تاکنون چندین مطالعه در خصوص مقایسه شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه ارائه شده که از مهمترین آنها می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد. Raad et al. [5] در سال ۲۰۱۰ چهار شاخص قابلیت اطمینان (RI ، NRI ، ERI و یک قابلیت اطمینان تلفیقی جدید) را روی سه شبکه آبرسانی نمونه (شبکه دو مخزنی، هانوی و نیویورک تونل) مقایسه نمودند. آنها نشان دادند شبکه‌های به دست آمده با استفاده از RI بیشترین توانایی را در مواجهه با افزایش تقاضای نقاط مصرف دارد، پس این شاخص را بهترین گزینه برای محاسبه قابلیت اطمینان هیدرولیکی معرفی نمودند. این در حالی است که در مطالعات آنها شبکه‌های به

دست آمده با استفاده از NRI و شاخص تلفیقی بیشترین توانایی را در مواجهه با شکست لوله‌ها نشان دادند و به عنوان شاخص مطلوب برای محاسبه قابلیت اطمینان مکانیکی بیان شدند. Banos et al. [6] سه شاخص قابلیت اطمینان (RI ، NRI و MRI) را روی دو شبکه آبرسانی نمونه (شبکه دو حلقه‌ای و هانوی) مقایسه نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان دارد در شبکه دو حلقه‌ای شاخص RI و در شبکه هانوی شاخص NRI بهترین عملکرد را دارد.

Atkinson et al. [2] در سال ۲۰۱۴ دو شاخص قابلیت اطمینان (RI و ERI) را روی یک شبکه آبرسانی پیچیده‌تر (Anytown) مقایسه نمودند. آنها نشان دادند استفاده از شاخص MSH^5 در کنار یکی از این دو شاخص در بهینه‌سازی سه هدفه می‌تواند منجر به تولید شبکه‌هایی شود که توانایی بیشتری در مواجهه با شکست لوله یا تغییرات تقاضا دارند. آنها همچنین نشان دادند استفاده همزمان از دو شاخص RI و ERI به عنوان توابع هدف در بهینه‌سازی، بهبود قابل توجهی در قابلیت اطمینان شبکه‌های تولید شده ایجاد نمی‌کند. Creaco et al. [7] در سال ۲۰۱۴ مقایسه‌ی دیگری روی سه شاخص قابلیت اطمینان (RI ، MRI و ERI) انجام دادند. نتایج به دست آمده روی یک شبکه نمونه ساده و یک شبکه واقعی نشان داد که MRI شاخص بهتری در بررسی قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد. در یکی از آخرین مطالعه‌های انجام شده در سال‌های اخیر در خصوص مقایسه شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه‌های آبرسانی، Gheisi & Naser [8] در سال ۲۰۱۵ با تمرکز بر قابلیت اطمینان مکانیکی، نشان دادند ERI شاخص مناسب‌تری نسبت به RI و NRI برای اندازه‌گیری توانایی شبکه در مواجهه با شکست لوله است.

نقطه ضعفی که در مطالعات انجام شده در خصوص مقایسه شاخص‌ها مشاهده می‌شود عدم مقایسه تمامی شاخص‌های پرکاربرد به صورت همزمان در یک قالب و عدم مقایسه آنها بر روی شبکه‌های دارا یا فاقد ایستگاه پمپاژ و مخزن هوایی است. همچنین در برخی مطالعات فقط بر قابلیت اطمینان هیدرولیکی

مقدار RI همیشه بین صفر تا یک بوده و از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^{nn} q_i (h_{a,i} - h_{r,i})}{\left(\sum_{i=1}^{nn} Q_i H_i + \sum_{j=1}^{np} \frac{P_j}{\gamma} \right) - \left(\sum_{i=1}^{nn} q_i h_{r,i} \right)} \quad (1)$$

در رابطه بالا nn تعداد نقاط مصرف یا منابع تامین، Q_i میزان تقاضا بر حسب (m^3/s) ، $h_{a,i}$ هد موجود و $h_{r,i}$ هد مورد نیاز در نقطه مصرف i بر حسب (kPa) ، Q_i جریان خروجی در منبع تامین i بر حسب (m^3/s) و H_i هد در منبع تامین i بر حسب (kPa) ، P_i توان پمپ i بر حسب (kw) و γ وزن مخصوص آب بر حسب (N/m^3) می‌باشد. شایان ذکر است مخازن هوایی در هنگام آبیگری به عنوان نقاط مصرف در نظر گرفته شده و در صورت و ترم دوم منخرج رابطه (۱) قرار می‌گیرند در حالیکه در هنگام تخلیه به عنوان منبع تامین بوده و در ترم اول منخرج کسر رابطه (۱) محاسبه می‌شوند.

۲-۱-۲- شاخص تاب‌آوری شبکه (NRI)

این شاخص توسط Prasad & Park [10] ارائه شد. آنها توان مازاد در شبکه و حلقه‌های قابل دسترس در آن را با در نظر گرفتن تعداد لوله‌های ورودی و خروجی به هر نقطه مصرف بطور هم‌زمان در محاسبات وارد نمودند [2]. NRI نیز مانند RI مقداری بین صفر و یک دارد و از روابط (۲) و (۳) قابل محاسبه است:

$$NRI = \frac{\sum_{i=1}^{nn} c_i \cdot q_i \cdot (h_{a,i} - h_{r,i})}{\left(\sum_{i=1}^{nn} Q_i H_i + \sum_{j=1}^{np} \frac{P_j}{\gamma} \right) - \left(\sum_{i=1}^{nn} q_i h_{r,i} \right)} \quad (2)$$

متغیرهای رابطه فوق مانند رابطه (۱) بوده با این تفاوت که ضریب c_i یکنواختی قطر لوله‌های متصل به نقطه مصرف i را نشان می‌دهد و از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$c_i = \frac{\sum_j^{npi} D_j}{npi \times \max\{D_j\}} \quad (3)$$

در رابطه فوق npi تعداد لوله‌های متصل به نقطه i و D_j قطر لوله j ام متصل به نقطه i را نشان می‌دهد.

۲-۱-۳- شاخص تاب‌آوری اصلاح شده (MRI)

این شاخص نخستین بار توسط Jayaram & Srinivasan [11] ارائه شد. بیان شده که این شاخص نقطه ضعف شاخص

و در برخی دیگر فقط بر قابلیت اطمینان مکانیکی تمرکز شده است. در مطالعه حاضر برای پوشش نقاط ضعف ذکر شده، هفت شاخص اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شامل MRI, NRI, RI, MSH, TSH, ERI و یک شاخص قابلیت اطمینان جدید (که مبنایی برای اندازه‌گیری میزان تعادل هد مازاد در شبکه بوده و در این مطالعه معرفی می‌شود) روی دو شبکه هانوی (با تغذیه گرانشی) و شبکه انی‌تون (با ایستگاه پمپاژ و مخزن هوایی) مقایسه شده است. در این راستا پس از بهینه‌سازی چند هدفه با توابع هدف هزینه و یکی از شاخص‌های قابلیت اطمینان فوق، شبکه‌های برتر برای هر دو شبکه (هانوی/انی‌تون) تعیین می‌شود. سپس تعداد زیادی سناریوی تغییر تقاضا و همچنین تعداد زیادی سناریوی شکست یک یا چند لوله همزمان تولید و بر نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی اعمال می‌شود تا مشخص شود استفاده از کدام شاخص در فرایند بهینه‌سازی می‌تواند منجر به تولید شبکه‌هایی با قابلیت اطمینان بیشتر شود. سناریوهای فوق برای شبیه‌سازی شرایط غیر طبیعی در هنگام بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب بر آنها اعمال می‌شوند.

۲- روابط حاکم

۲-۱-۲- شاخص‌های اندازه‌گیری قابلیت اطمینان

در مطالعه حاضر شاخص‌هایی که از مقبولیت و کارایی بیشتری در مطالعات پیشین بهره‌مند بوده و حداقل ۵ بار در مطالعات مختلف استفاده شده‌اند، مورد مقایسه قرار گرفتند. همچنین در کنار شش شاخص اندازه‌گیری قابلیت اطمینان معروف یک شاخص جدید نیز معرفی شده است که روابط ریاضی تمامی این شاخص‌ها در ادامه خواهد آمد.

۲-۱-۱- شاخص تاب‌آوری (RI)

این شاخص برای اولین بار توسط Todini [9] به عنوان یک شاخص اندازه‌گیری قابلیت اطمینان هیدرولیکی ارائه شد. این شاخص از تقسیم توان هیدرولیکی مازاد شبکه به توان هیدرولیکی در دسترس به دست می‌آید و با توانایی سیستم در ارائه خدمات مطلوب در مواجهه با شکست در ارتباط است [6].

برای بررسی شبکه‌های توزیع آب توسعه دادند. ERI یکنواختی جریان در لوله‌ها را اندازه می‌گیرد [14]. بنابراین مقادیر بالاتر ERI معرف متعادل‌تر بودن شبکه توزیع در زمان آسیب دیدن اجزاء آن مانند پمپ یا لوله‌ها می‌باشد، یا به زبان دیگر شبکه‌ها با ERI بزرگتر، حلقه‌ها یا مسیرهای در دسترس بیشتری برای رساندن آب به نقاط مصرف دارند در نتیجه در زمان شکست یک یا چند لوله می‌توانند خدمات مطلوب‌تری ارائه دهند. ERI از رابطه (۷) قابل محاسبه می‌باشد:

$$ERI = S_R + \sum_{i=1}^{nn} \left(\frac{T_i}{T} \right) S_i$$

$$= - \sum_{i=1}^{nn} \left(\frac{Q_i}{T} \right) \ln \left(\frac{Q_i}{T} \right)$$

$$- \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{nn} T_i \left[\left(\frac{q_i}{T_i} \right) \ln \left(\frac{q_i}{T_i} \right) \right. \quad (7)$$

$$\left. + \sum_{j \in N_i} \left(\frac{q_{ij}}{T_i} \right) \ln \left(\frac{q_{ij}}{T_i} \right) \right]$$

در رابطه فوق S_R و S_i به ترتیب بیانگر آنتروپی منابع تأمین و نقاط مصرف هستند. همچنین T مجموع جریان ورودی به شبکه از منابع تأمین و T_i مجموع جریان رسیده به نقطه i بر حسب (m^3/s) ، N_i مجموعه نقاط بالادست j که به صورت مستقیم (با یک لوله) به نقطه i متصل هستند، q_{ij} نرخ جریان از نقطه i به نقطه j بر حسب (m^3/s) و Q_i میزان جریان ورودی به شبکه از منبع تأمین i است.

۲-۱-۷- شاخص نرخ هد مازاد (RSH^*)

در این مطالعه یک شاخص جدید برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان سیستم توزیع آب ارائه شده است تا در کنار سایر شاخص‌های متداول بررسی شده و کارایی آن مورد ارزیابی قرار گیرد. این شاخص از تقسیم MSH بر میانگین هد مازاد در تمام نقاط به دست می‌آید و مقداری بین صفر و یک خواهد داشت. نزدیک بودن مقدار این شاخص به عدد یک به این معناست که فشار مازاد شبکه متعادل بوده و انرژی مازاد در سطح شبکه به صورت یکنواخت تقسیم شده است. مزیت این شاخص نسبت

RI در بررسی شبکه‌های دارای چند منبع تأمین را پوشش داده است [6]. مقدار MRI بطور مستقیم با توان مازاد کل در نقاط مصرف تناسب دارد و بر خلاف دو شاخص قبل می‌تواند مقداری بیش از یک نیز داشته باشد و از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$MRI = \frac{\sum_{i=1}^{nn} q_i (h_{a,i} - h_{r,i})}{\left(\sum_{i=1}^{nn} q_i h_{r,i} \right)} \quad (4)$$

متغیرهای رابطه فوق مانند رابطه (۱) تعریف می‌شوند.

۲-۱-۴- شاخص حداقل هد مازاد (MSH^1)

این شاخص به کمترین اختلاف بین فشار موجود و حداقل فشار قابل قبول در نقاط مصرف اشاره دارد. در واقع MSH هد مازاد در نقطه بحرانی شبکه را نشان می‌دهد و هر چه این مقدار بزرگتر باشد نشان دهنده توان بیشتر شبکه در مواجهه با شرایط غیر طبیعی است. MSH از رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$MSH = \min(h_{a,i} - h_{r,i}) \quad i = 1..nn \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $h_{a,i}$ هد موجود، $h_{r,i}$ هد مورد نیاز در نقطه مصرف i و nn تعداد نقاط مصرف است. Farmani et al. [12] نشان داد که افزایش MSH در کنار RI می‌تواند قابلیت اطمینان شبکه‌های آبرسانی را افزایش دهد.

۲-۱-۵- شاخص هد مازاد کل (TSH^2)

این شاخص نشان دهنده مجموع اختلاف بین فشار موجود و کمینه فشار قابل قبول در نقاط مصرف است. TSH نشان دهنده کل توان مازاد موجود در شبکه است، در شبکه‌هایی با TSH بالا توان خوبی در تحمل شرایط غیر طبیعی دارند اما در هر حال نقاط بحرانی در شبکه تعیین کننده مطلوب بودن سطح خدمات به مشترکین است. TSH از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$TSH = \sum_{i=1}^{nn} (h_{a,i} - h_{r,i}) \quad (6)$$

متغیرهای رابطه فوق مانند رابطه (۵) تعریف می‌شوند.

۲-۱-۶- شاخص قابلیت اطمینان آنتروپی (ERI)

برای اولین بار Awumah et al. [13] مفهوم آنتروپی برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب را مطرح نمود. سپس Tanyimboh & Templeman [4] شاخص ERI را

۳-۲- شبکه‌های توزیع آب نمونه

در این مطالعه برای پوشش نقطه ضعف مطالعات گذشته در خصوص آزمایش بر روی یک نوع شبکه از دو شبکه توزیع آب نمونه با ماهیت متفاوت استفاده شد. شبکه اول یک شبکه با تغذیه گرانشی به نام هانوی^۲ بوده و از شبکه نمونه انی-تون^۳ (که دارای مخزن هوایی و ایستگاه پمپاژ نیز می‌باشد) به عنوان شبکه دوم استفاده شد. در ادامه مشخصات این دو شبکه تشریح خواهد شد:

۳-۲-۱- شبکه توزیع آب هانوی

شبکه هانوی در کشور ویتنام واقع شده و برای اولین بار توسط Fujiwara & Khang [17] به عنوان یک شبکه نمونه آب مطرح شد. این شبکه دارای ۳۲ نقطه مصرف، ۳۴ لوله و ۳ حلقه می‌باشد که توسط یک مخزن مرتفع تغذیه می‌شود. طول لوله‌های موجود در شبکه هانوی ۳۹,۴ کیلومتر بوده و با ضریب زبری لوله ۱۳۰، مصرفی معادل ۱۹۹۴۰ متر مکعب بر ساعت دارد. در مساله بهینه‌سازی امکان تعویض سایز لوله‌های شبکه با شش قطر تجاری موجود وجود دارد. اختلاف ارتفاع مخزن تا نقاط مصرف ۱۰۰ متر بوده و حداقل فشار مورد قبول در شبکه نیز ۳۰ متر است. شکل (۱) نمایی از این شبکه نشان می‌دهد.

شکل ۱. نمایی از شبکه آب هانوی

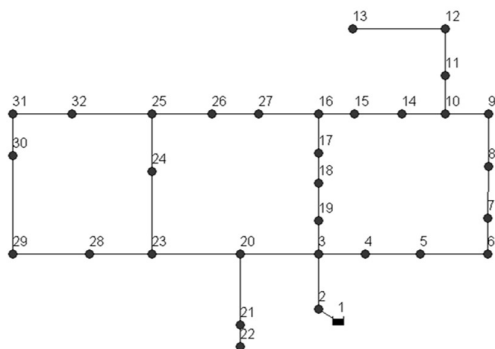


Fig. 1. Schematic view of Hanoi network

به MSH یا TSH، تمرکز بر یکنواختی توزیع فشار مازاد در شبکه به جای تمرکز بر فشار مازاد در نقطه بحرانی یا مجموع فشار مازاد شبکه است. RSH از رابطه (۸) قابل محاسبه است:

$$RSH = \frac{\min(h_{a,i} - h_{r,i})}{\text{avr}(h_{a,i} - h_{r,i})} \quad i = 1..nn \quad (8)$$

متغیرهای رابطه فوق همانند رابطه (۵) تعریف می‌شوند.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه تکامل تفاضلی

همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، در این مطالعه از یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه برای یافتن شبکه‌هایی با کمترین هزینه و بیشترین قابلیت اطمینان استفاده شده است. بر اساس مطالعات پیشین الگوریتم‌های چندهدفه زیادی مانند الگوریتم ژنتیک (NSGA-II)، ازدحام ذرات (MOPSO)، کلونی مورچه (MOAC) و ... توانایی انجام چنین محاسباتی را دارند. در مطالعه حاضر با توجه به سرعت و دقت مورد نیاز از الگوریتم تکامل تفاضلی چند هدفه (MODE^۱) به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده است. الگوریتم تکامل تفاضلی یک الگوریتم تصادفی بر پایه جمعیت برای بهینه‌سازی توابع غیر خطی است که برای اولین بار توسط Storn & Price [15] مطرح شد. این الگوریتم برای تولید جمعیت جدید، اطلاعات برای و فاصله را از اعضای جمعیت فعلی استخراج کرده سپس انحراف تصادفی را برای ایجاد تنوع اضافه می‌نماید. اگر یک پاسخ جدید مقدار تابع هدف بهتری نسبت به یک عضو جمعیت از قبل تعیین شده داشته باشد، با این عضو جایگزین خواهد شد. این فرآیند تکامل تا زمانی که معیار توقف برآورده شود ادامه می‌یابد. الگوریتم تکامل تفاضلی به واسطه تواناییش در حفظ تنوع و انجام جستجوی محلی عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی دارد [16]. در این مطالعه با ترکیب الگوریتم تکامل تفاضلی ارائه شده توسط Storn & Price [15] و مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب (که در الگوریتم NSGA-II مورد استفاده قرار می‌گیرد) یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تکامل تفاضلی تهیه و برای بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳-۲- شبکه توزیع آب انی تون

انی تون یکی از شبکه‌های نمونه شناخته شده و پیچیده است [18]. این شبکه شامل ۴۸ لوله موجود، ۲۵ اتصال (۱۹ نقطه مصرف)، یک مخزن ذخیره، دو مخزن هوایی و یک ایستگاه پمپاژ با سه پمپ موازی است. کمترین فشار مجاز شبکه ۲۷,۶ متر بوده که باید در لحظه اوج مصرف (۱,۸ برابر مصرف متوسط) در کل شبکه ارضا شود. این شبکه همچنین باید توانایی مواجهه با سه سناریوی متفاوت مصرف آتش‌نشانی را در زمان اوج مصرف به مدت ۲ ساعت داشته باشد. شکل (۲) نمایی از شبکه انی تون را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این شبکه مدلسازی آن در بازه زمانی ۲۴ ساعته است در حالی که شبکه هانوی تنها در زمان اوج مصرف مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل مشخص است شبکه به سه قسمت مرکز شهر (با خطوط ضخیم)، محدوده شهر (خطوط نازک) و منطقه در حال توسعه (خط چین) تقسیم شده است. برای کاهش هزینه زیاد تعویض لوله در مرکز شهر و همچنین افزایش آنتروپی شبکه (با افزایش مسیرهای دسترسی برای توزیع آب) امکان جانمایی لوله‌های موازی در کنار لوله‌های موجود در مرکز و محدوده شهر در نظر گرفته شده است. اما در منطقه در حال توسعه تنها استفاده از یک لوله مجاز است. در نتیجه فضای جستجو در این شبکه تعیین قطر ۷۸ لوله است.

شکل ۲. نمایی از شبکه آب انی تون

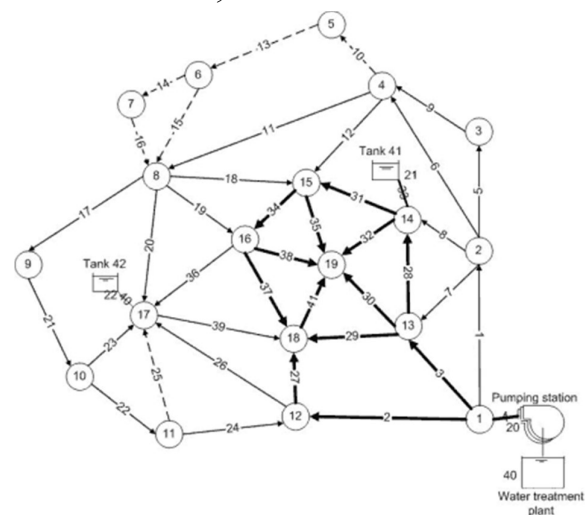


Fig. 2. Schematic view of Anytown network

۳- روش حل مساله

برای بهینه‌سازی مساله مورد نظر در این مطالعه، الگوریتم تکامل تفاضلی چند هدفه در نرم‌افزار Matlab کدنویسی شده و به نرم‌افزار Epanet به عنوان حل‌گر هیدرولیکی ارتباط داده شد. در این مساله قطر لوله به عنوان متغیر طراحی، هزینه و قابلیت اطمینان به عنوان توابع هدف و ارضا شدن حداقل فشار مورد قبول در تمامی نقاط در تمام زمان‌ها به عنوان قیود طراحی مد نظر گرفته شد. برای بررسی قابلیت اطمینان پاسخ‌های به دست آمده در بهینه‌سازی، دو مجموعه سناریو برای شبیه‌سازی شرایط غیر طبیعی در هنگام بهره‌برداری از شبکه تولید شدند. در مجموعه اول که شامل ۵۰۰۰ سناریو است، میزان تقاضا در نقاط مصرف نسبت به میزان تقاضا در طراحی، متفاوت در نظر گرفته شد. برای تولید این سناریوها با استفاده از روش توزیع نرمال، میزان تقاضای تمام نقطه به صورت تصادفی بین ۳۰٪ تا ۳۰٪+ تغییر داده شد. این مقدار به صورت تجربی و بر اساس بیشترین تغییرات تقاضای متصور در نقاط مصرف یک شبکه در نظر گرفته می‌شود. از این رو در مطالعه حاضر مقدار ۳۰٪ به عنوان بیشینه تغییرات تقاضا در نقاط مصرف مطرح شده است. هدف از تولید این سناریوها بررسی کارایی شبکه در هنگام تغییر میزان تقاضا در نقاط مختلف شبکه است. در مرحله بعد این سناریوها بر روی تمامی پاسخ‌های به دست آمده از بهینه‌سازی (با شاخص‌های مختلف) اعمال شد تا مشخص شود هر یک از شبکه‌های موجود در جبهه برتر در مقابل چند درصد از این سناریوها توانایی خدمات‌رسانی مطلوب را دارند.

برای این منظور پارامتری با عنوان درصد درماندگی هیدرولیکی (HFP^۱) تعریف شد. در واقع HFP، درصد سناریوهایی که شبکه در مواجهه با آنها قادر به ارضای محدودیت‌های طراحی نیست را مشخص می‌کند. هر چه میزان این پارامتر کمتر باشد بدان معناست که شبکه در مقابل تغییر تقاضا مقاوم‌تر بوده یا قابلیت اطمینان هیدرولیکی بالاتری دارد. مجموعه دوم سناریوها که آن نیز شامل ۵۰۰۰ سناریو است، مربوط به شکست لوله‌ها است. در هر یک از این سناریوها بین

۱ تا ۵ لوله با جانمایی متفاوت، شکسته در نظر گرفته شده است. مکان لوله یا لوله‌های شکسته به صورت تصادفی انتخاب شده به صورتی که هیچ دو سناریویی دارای لوله‌های شکسته یکسان نیستند. هدف از تولید این سناریوها نیز بررسی کارایی شبکه در هنگام شکست یک یا چند لوله همزمان در شبکه است. برای بررسی میزان توانایی هر شبکه در مواجهه با شکست یک یا چند لوله، پارامتری با عنوان درصد درماندگی مکانیکی (MFP^1) نیز تعریف شد. MFP درصد سناریوهای شکستی را که شبکه در مواجهه با آن‌ها قادر به ارضای محدودیت‌های طراحی نیست مشخص می‌کند و هر چه میزان این پارامتر کمتر باشد بدان معناست که شبکه در مقابل شکست لوله مقاوم‌تر است یا قابلیت اطمینان مکانیکی بیشتری دارد. برای بررسی دقیق‌تر میزان خدمات‌رسانی در شرایط غیر طبیعی، سه حالت تعریف شد.

- حالت A: فشار تمامی نقاط بیشتر از حداقل فشار قابل قبول باشد.

- حالت B: فشار تمامی نقاط بیشتر از ۹۵٪ حداقل فشار قابل قبول باشد.

- حالت C: فشار ۹۵٪ از نقاط بیشتر از حداقل فشار قابل قبول باشد.

شبکه‌هایی که نتوانند در هر حالت محدودیت‌های طراحی را ارضا کنند، شبکه و امانده در آن حالت محسوب شده و در محاسبه میزان HFP و MFP لحاظ می‌شوند. محدودیت‌های طراحی در این تعاریف رساندن میزان تقاضا بطور کامل و با فشار مطلوب به مصرف کننده است. همان‌گونه که در ابتدای این بخش آمد، در مطالعه حاضر برای تحلیل هیدرولیکی شبکه از نرم‌افزار Epanet استفاده شده است. این نرم‌افزار از روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا استفاده می‌کند، یعنی در فرایند حل مساله، میزان آب تحویلی به نقاط مصرف برابر میزان تقاضای آن نقطه در نظر گرفته می‌شود. روش دیگری نیز برای تحلیل هیدرولیکی شبکه توزیع آب به نام تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار وجود دارد. در این نوع تحلیل در صورتی که فشار نقاط، کمتر از کمترین فشار استاندارد باشد، میزان آب قابل استحصال در نقاط مصرف

به صورت کسری از میزان تقاضای آن نقاط تحویل می‌شود. در نتیجه هنگامی که فشار نقاط مصرف در شبکه بیشتر از حداقل فشار استاندارد (که این مقدار در مقالات ۲۰ متر در نظر گرفته شده است) باشد، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا نتایج یکسانی خواهند داشت.

از این رو کمتر بودن فشار نقاط مصرف از ۲۰ متر، معادل کاهش مقدار آب تحویلی به مصرف کننده در روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار خواهد بود. بر اساس تعاریف مطرح شده در این مطالعه، این مهم محدودیت طراحی را نقض کرده و شبکه مذکور یک شبکه نامطلوب محسوب می‌شود. در نتیجه تمام نقاط مصرف یک شبکه مطلوب باید دارای فشار بالاتر از حداقل فشار استاندارد باشند که چگونگی تحلیل هیدرولیکی (مبتنی بر تقاضا یا مبتنی بر فشار) تأثیری بر نتایج تحلیل آن ندارد. پس در این مطالعه از نرم‌افزار Epanet و روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا استفاده شده است.

۴- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد، در این مطالعه برای بهینه‌سازی طراحی دو شبکه هانوی و انی‌تون از الگوریتم چند هدفه تکامل تفاضلی استفاده شده است. در تمام موارد، جمعیت اولیه برابر ۳۵، تعداد تولید نسل برابر ۲۵۰، ضریب مقیاس برابر ۰٫۵ و احتمال تقاطع برابر ۰٫۲، در نظر گرفته شد. در راستای حذف احتمال دستیابی به پاسخ‌های بهینه محلی به جای پاسخ‌های بهینه کلی، هر مساله ۱۰ بار مورد بهینه‌سازی قرار گرفت و نتایج این بهینه‌سازی‌ها با هم مقایسه شدند تا یک جبهه برتر از میان پاسخ‌های به دست آمده فراهم شود. شکل (۳) جبهه‌های برتر به دست آمده از ۷ بهینه‌سازی انجام شده روی دو شبکه نمونه را نمایش می‌دهد. در هر یک از این بهینه‌سازی‌ها یکی از شاخص‌های اندازه‌گیری قابلیت اطمینان (که در بالا ذکر شد) به همراه هزینه به عنوان توابع هدف استفاده شدند. در این مرحله با اعمال سناریوهای تولید شده بر تمام پاسخ‌های به دست آمده در بهینه‌سازی، مقادیر HFP و MFP هر یک از پاسخ‌ها به دست می‌آید. شکل (۴) و (۵) به ترتیب میانگین HFP و MFP شبکه‌های موجود در جبهه

قابلیت اطمینان RI کمترین واماندگی هیدرولیکی را از خود نشان داده‌اند. در این شبکه MSH در رتبه بعدی قرار دارد.

شکل ۴. میانگین HFP برای حالات مختلف در شبکه هانوی (الف) و شبکه انی‌تون (ب)

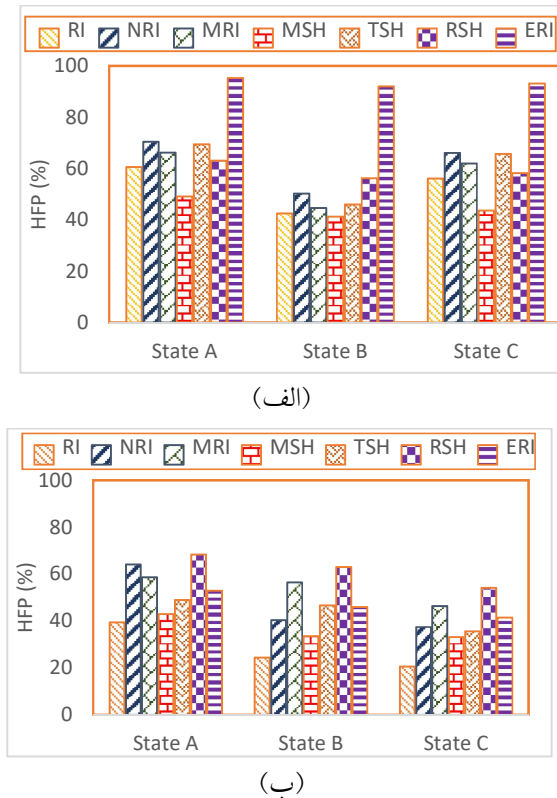


Fig. 4. Average of HFP in different states for Hanoi network (A) & Anytown (B)

نتایج بررسی MFP نشان می‌دهد در شبکه هانوی، شبکه‌های حاصل از بهینه‌سازی با شاخص اطمینان NRI در هر سه حالت در مقابل شکست لوله‌ها مقاوم‌تر بوده‌اند. این نتیجه با نتایج ارائه شده توسط Raad et. al. [5] همخوانی کامل دارد. البته MSH و MRI نیز در رتبه بعدی قرار دارند. همچنین در شبکه انی‌تون استفاده از شاخص RI در بهینه‌سازی منتج به شبکه‌هایی با تاب آوری بیشتر در مقابل شکست لوله‌ها خواهد شد. شاخص MSH نیز در اولویت بعدی قرار دارد.

های برتر هر بهینه‌سازی را در سه حالت مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار نیز مشخص است، پاسخ‌های برتر به دست آمده در بهینه‌سازی شبکه هانوی با توابع هدف هزینه و MSH کمترین درصد واماندگی هیدرولیکی را در هر سه حالت از خود نشان داده است.

شکل ۳. جبهه‌های برتر به دست آمده با شاخص‌های متفاوت در شبکه هانوی (الف) و شبکه انی‌تون (ب)

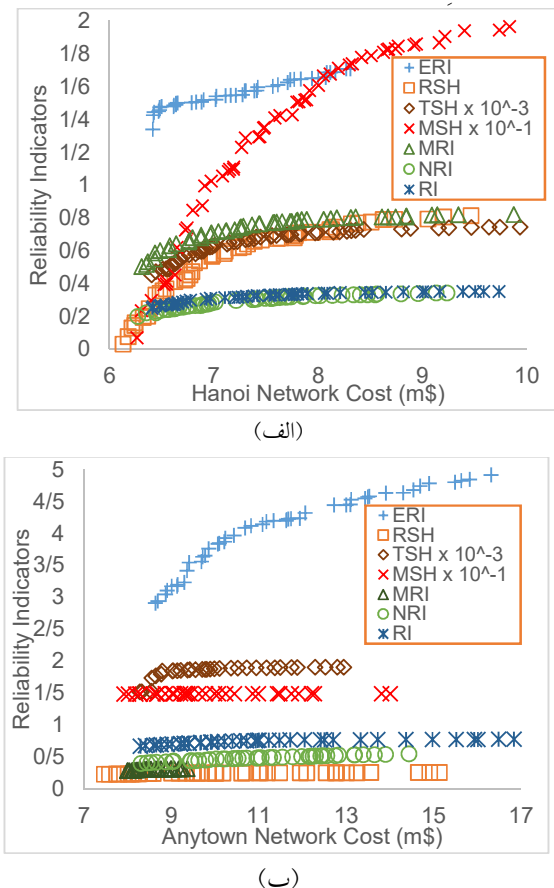


Fig. 3. Obtained Pareto Fronts with different reliability indicators for Hanoi network (A) & Anytown (B)

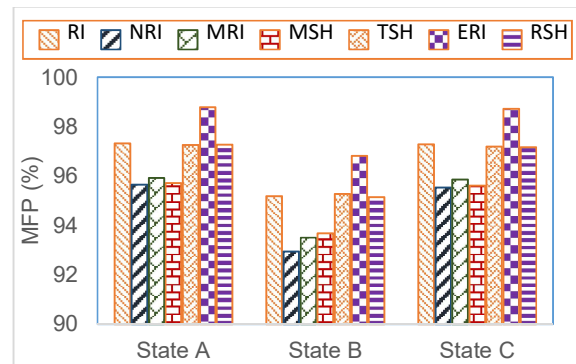
در نتیجه در بهینه‌سازی شبکه‌های با تغذیه گرانشی، در صورت استفاده از این شاخص قابلیت اطمینان (MSH)، شبکه‌هایی به دست می‌آید که در مقابل تغییرات تقاضا مقاومت بهتری را از خود نشان می‌دهد. شاخص قابلیت اطمینان RI و MRI نیز برای این نوع شبکه در اولویت‌های بعدی قرار دارند. اما در شبکه انی‌تون (که یک شبکه دارای پمپ و مخازن هوایی است) نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی با توابع هدف هزینه و شاخص

همچنین سه حالت مختلف برای واماندگی شبکه در شرایط غیر طبیعی تعریف گردید. در پایان درصد واماندگی هیدرولیکی و مکانیکی پاسخ‌های برتر به دست آمده از بهینه‌سازی با شاخص‌های متفاوت برای هر دو شبکه در سه حالت متفاوت محاسبه شد. نتایج نشان دادند که برای شبکه با تغذیه گرانشی، استفاده از شاخص MSH منتج به تولید شبکه‌هایی با قابلیت اطمینان هیدرولیکی بالاتر و استفاده از شاخص MRI منتج به تولید شبکه‌هایی با قابلیت اطمینان مکانیکی بالاتری خواهد شد و اگر هر دو نوع قابلیت اطمینان برای طراح قابل اهمیت باشد، بهترین شاخص MSH خواهد بود چون در مواجهه با شرایط غیر طبیعی (چه تغییر تقاضا و چه شکست لوله) منتج به تولید شبکه‌هایی با تاب‌آوری بالا شده است. همچنین برای شبکه دارای ایستگاه پمپاژ و مخازن هوایی، نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی با شاخص RI بهترین عملکرد را در مواجهه با تغییر تقاضا و سناریوهای شکست لوله از خود نشان داده است. در نتیجه اگر طراح قصد استفاده از یک شاخص برای تولید شبکه‌هایی با قابلیت اطمینان هیدرولیکی و مکانیکی در بهینه‌سازی این نوع شبکه را داشته باشد، استفاده از شاخص RI پیشنهاد می‌شود. همچنین شاخص معرفی شده در این مطالعه (RSH) با اینکه مانند سایر شاخص‌ها در تولید شبکه‌های تاب‌آور موفق بود اما جزو بهترین آنها قرار نگرفت.

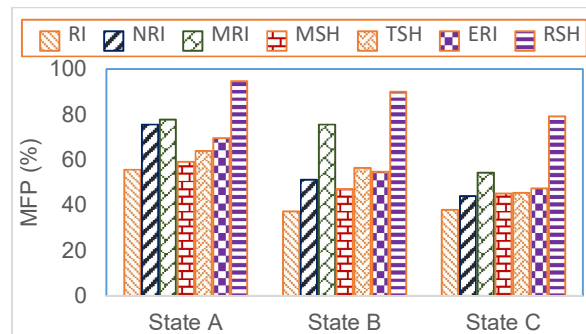
۵- مراجع

- [1] Gheisi, A., Forsyth, M., and Naser, Gh., 2016, Water Distribution Systems Reliability: A Review of Research Literature, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 04016047.
- [2] Atkinson, S., Farmani, R., Fayyaz, A. M. and Butler, D., 2014, Reliability Indicators for Water Distribution System Design: Comparison, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 140, 160-168.
- [3] Ostfeld, A., Kogan, D., and Shamir, U., 2002, "Reliability simulation of water distribution systems - singla and multiquality." *Urban Water*, 4, 53 - 61.
- [4] Tanyimboh, T.T. and Templeman, A.B., 2000, A quantified assessment of the relationship between the reliability and entropy of water

شکل ۵. میانگین MFP برای حالات مختلف در شبکه هانوی (الف) و شبکه انی‌تون (ب)



(الف)



(ب)

Fig. 5. Average of MFP in different states for Hanoi network (A) & Anytown (B)

۴- جمع‌بندی

در مطالعه حاضر از الگوریتم MODE برای بهینه‌سازی چند هدفه و طراحی شبکه‌های توزیع آب با کمترین هزینه و بیشترین قابلیت اطمینان استفاده شد.

شاخص‌های متفاوتی که در مطالعات پیشین بیشتر مورد توجه قرار گرفته بودند و همچنین یک شاخص اطمینان جدید، در کنار هزینه به عنوان توابع هدف این بهینه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. هدف از انجام این مهم بررسی تاب‌آوری نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی با شاخص‌های قابلیت اطمینان متفاوت بود. در این راستا برای مدل کردن شرایط غیرطبیعی، تعداد زیادی سناریو با میزان تقاضای متفاوت از میزان تقاضای طراحی و همچنین سناریوهای شکست یک تا پنج لوله به صورت همزمان در نقاط مختلف شبکه، تولید و بر شبکه‌های به دست آمده از بهینه‌سازی با شاخص‌های متفاوت اعمال شد.

- [16] Sun, J., Zhang, Q., Tsang, E., 2005, DE/EDA: A New Evoluntary Algorithm for Global Optimization, *Information Sciences*, 169, 3–4
- [17] Fujiwara, O. and Khang, D.B. 1990, A Two-Phase Decomposition Method for Optimal Design of Looped Water Distribution Networks, *Water Resources Research*, 26(4), 539–549.
- [18] Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, I. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee, H.L., Liebman, J. C., Mays, L., Morgan, D. R. & Ormsbee, L., 1987, Battle of the network models: epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113 (2), 191–203.
- [5] Raad, D. N., Sinske, A. N. & van Vuuren1, J. H., 2010, Comparison of four reliability surrogate measures for water distribution systems design, *water resources research*, 46, w05524.
- [6] Banos, R., Reca, J., Martínez, J., Gil, C., and Márquez, A., 2011, “resilience indexes for water distribution network design: A performance analysis under demand uncertainty.” *Water Resour. Manage*, 25(10), 2351–2366.
- [7] Creaco, E., Fortunato, A., Franchini, M., Mazzola, M.R., 2014, Comparison between entropy and resilience as indirect measures of reliability in the framework of water distribution network design, *Procedia Engineering*, 70, 379 – 388.
- [8] Gheisi, A., and Naser, Gh., 2015, Multistate Reliability of Water-Distribution Systems: Comparison of Surrogate Measures, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 04015018-1
- [9] Todini, E., 2000. Looped water distribution network design using resilience index based heuristic approach. *Urban Water* 2, 115e122.
- [10] Prasad, T., and Park, N.-S., 2004, “Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks.” *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 130(1), 73–82.
- [11] Jayaram N, Srinivasan K., 2008, Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing. *Water Resour Res* 44:W01417.
- [12] Farmani, R., Wright, A. J., Savic, A., & Walters, A. G., 2005, “Self-adaptive fitness formulation for evolutionary constrained optimization of water systems.” *J. Comput. Civ. Eng.*, 19(2), 212–216.
- [13] Awumah, K., Goulter, I., and Bhatt, S., 1990, “Assessment of reliability in water distribution networks using entropy based measures.” *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 4(4), 309–320.
- [14] Prasad, T. D., and T. T. Tanyimboh, 2008, Entropy based design of ‘Anytown’ water distribution network, paper presented at *10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference (WDSA)*, South Africa.
- [15] Storn, R., and Price, K., 1997, Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, 11, 341–359.

Comparison of reliability indicators in urban water distribution networks optimal design

H. Monsef¹, M. Naghash Zadegan², A. Jamali³, R. Farmani⁴

1. PhD, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Iran.
2. Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Iran.
3. Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Iran.
4. Associate Professor, Centre of Water Systems, Exeter University, United Kingdom.

naghash@guilan.ac.ir

Abstract

In recent decades, due to the high cost of running a water supply network, designers have been trying to design networks with the least cost and maximum reliability. Networks that are able to provide good services in the face of demand changes or failure of the pipeline. Several indexes for reliability measurements were introduced and used as one of the objective functions along with cost in water distribution systems design problem. One of the issues that has been highlighted in recent years is which of these indicators are more successful in measuring the reliability of a water supply network. In this study, six famous reliability indicator entitled Minimum surplus head (MSH), total surplus head (TSH), resilience index (RI), network resilience index (NRI) and modified resilience index (MRI), entropy reliability indicator (ERI) and a new presented reliability indicator entitled Ratio of surplus head (MSH) described and used as one of the objective functions of a water distribution system design optimization problem. For this purpose, a multi-objective differential evolution algorithm has been developed in Matlab software and linked to the Epanet as the hydraulic solver. The generated algorithm applied on two different sample networks with different nature (gravitational feeding and feeding with pumping stations). To analysis of real hydraulic and mechanical reliability of obtained networks in optimization processes, a large number of abnormal operating conditions such as water demand uncertainty or pipes burst scenarios have been generated and applied on obtained Pareto Fronts of each optimization process. Then, the percentage of scenarios that each network could not satisfy the design's constraints or failed in response to them has been calculated. The over demand's scenarios were sampled using the general normal distribution method. The percentage of scenarios that each answer (water network in Pareto Front) cannot satisfy the design constraint has been measured and called Hydraulic Failure Percentage (HFP). Also, for modeling the abnormal mechanical conditions, lot of scenarios were produced with broken pipes. In each of these scenarios, there is a possibility of one to ten different pipes break. The locations of burst pipes are selected randomly. The percentage of scenarios that each case cannot satisfy the design constraint has been measured and called Mechanical Failure Percentage (MFP). These scenarios would remain constant for all of members of Pareto Fronts. The lower value of HFP and MFP demonstrate the greater ability of the network to deal with changes in nodal demand and the pipe bursts respectively. For deeper analysis, the conditions of failing (Not satisfying the constraints) divides into three sub-state as flowing:

State A: Pressure of all nodes is more than the minimum acceptable pressure in all time.

State B: Pressure of all nodes is more than 95% of the minimum acceptable pressure in all time.

State C: Pressure of 95% of nodes is more than the minimum acceptable pressure in all time.

The results of calculations summarized and have been shown in the diagrams. Results show that MSH and RI are the best indicators for optimal design of water supply networks without pumping station and include it.

Keywords: Urban Water Distribution Networks, Optimization, Reliability Indicators, Differential Evolution Algorithm

