

بررسی برخی شاخص‌های عملکردی در طراحی شبکه آبرسانی بر پایه معیارهای اطمینان‌پذیری هیدرولیکی و مکانیکی

مهدی تاجی، جعفر یزدی*

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۴

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:

شبکه‌های آبرسانی شهری

بهینه‌سازی

شاخص‌های قابلیت اطمینان

NSGA-II

خلاصه: با توجه به هزینه‌های بالای اجرای یک شبکه آبرسانی، طراحی شبکه‌هایی با کمترین هزینه و بیشترین قابلیت اطمینان اهمیت بالایی از نظر مهندسی دارد. یکی از مسائلی که در تحقیقات چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است مقایسه شاخص‌ها و بررسی موفقیت نسبی آن‌ها در اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شبکه‌های آبرسانی است. مطالعات زیادی تا کنون در رابطه با اطمینان‌پذیری شبکه‌های توزیع آب انجام شده است. در مطالعه حاضر، عملکرد شاخص‌های هیدرولیکی و مکانیکی متنوع و مقایسه کارایی آن‌ها نسبت به هم در شرایط شکست لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق، شاخص‌های عملکرد بیشتری نسبت به مطالعات پیشین ارائه داده است. در این مقاله، بررسی بر روی شاخص عملکرد فشار گره‌ای، سرعت، اختلاف فشار، شاخص توام سرعت و فشار گره‌ای، شاخص عملکرد انعطاف‌پذیری شبکه (NRI)، شاخص حداقل هد مازاد (MSH) و شاخص عملکرد آنتروپی (ERI) روی شبکه توزیع آب هانوی و Pcaresa بوسیله الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II و نرم افزار Epanet انجام شد. نتایج نشان داد در طراحی شبکه‌ی توزیع آب کوچک (هانوی)، شاخص عملکرد انعطاف‌پذیری شبکه (NRI) بهترین عملکرد را داشته و در طراحی شبکه آب متوسط (Pescara)، در سطح هزینه پایین، شاخص عملکرد فشار گره‌ای (PIP) و در سطح هزینه بالا، شاخص انعطاف‌پذیری شبکه (NRI) بهترین عملکرد را در بین سایر شاخص‌ها داشته‌اند؛ این دو شاخص، بطور میانگین فشار بیشتری را نسبت به شاخص‌های دیگر در شبکه ایجاد کرده‌اند و انرژی مازاد در شبکه را افزایش داده‌اند. همچنین در هنگام شکست تصادفی چند لوله، نیاز آبی گره‌های شبکه را نسبت به سایر شاخص‌ها، بیشتر تامین کرده‌اند.

۱- مقدمه

سامانه آبرسانی نگرانی‌هایی در مورد توانایی سیستم برای تامین آب مورد نیاز در هر یک از نقاط تقاضا و با فشار کافی در شرایط شکست تصادفی اجزای مختلف سیستم و یا تغییرات میزان تقاضا وجود دارد. هیچ سیستمی صد درصد قابل اطمینان نبوده و در این میان شبکه‌های توزیع و تاسیسات آب نیز استثنا نیستند. شرایط شکست شبکه، جنبه‌های مختلفی دارد. خشکسالی و یا آلودگی جریان‌های سطحی، از مدار خارج شدن پمپ‌ها، نشت و شکست لوله‌ها، خرابی سیستم‌های تصفیه، افزایش تقاضا و یا فشار برای تضمین سطح خاصی از سرویس‌دهی و یا کاهش فشار نسبت به مقدار استاندارد، تعدادی از بحرآن‌هایی هستند که می‌توانند اطمینان‌پذیری سامانه آبرسانی

قابلیت اطمینان (اطمینان‌پذیری) سامانه‌های آبرسانی از جمله مهم‌ترین شاخص‌ها در زمینه طراحی و مدیریت این سیستم‌ها، در شرایط بهره‌برداری عادی یا بحرانی (مانند وقوع شکست) است. در مورد کنترل بهره‌برداری و اصلاح شبکه از نظر ظرفیت و سطح ارائه سرویس در شبکه‌های توزیع آب تاکید زیادی وجود دارد. از نظر کلی قابلیت اطمینان را می‌توان احتمال این که سیستم ماموریت و وظیفه خود را با یک سری محدودیت‌های خاص، در یک محدوده زمانی و مکانی خاص انجام دهد، در نظر گرفت. بطور خاص در مورد یک

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j_yazdi@sbu.ac.ir



را در اغلب موارد تحت تاثیر قرار دهند. این بحرآن‌ها می‌توانند منجر به ضررهای زیاد اقتصادی و یا آسیب‌رسانی به سلامتی انسان‌ها و بهداشت عمومی شوند. همچنین تناوب وقوع شکست‌ها، از هر دو جنبه خود حادثه و تاثیر آن بر روی گروه خاصی از مصرف‌کنندگان نیز از اهمیت بالایی برخوردار است [۱]. باید توجه داشت که تا زمانی که عملکرد متوسط شبکه مناسب است، امکان دارد تاثیر شکست و تناوب آن در شبکه تنها به تعداد کمی از مصرف‌کنندگان محدود شود. Gheisi et al 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 به دو گروه قابلیت اطمینان هیدرولیکی و قابلیت اطمینان مکانیکی تقسیم می‌گردد [۲]. قابلیت اطمینان هیدرولیکی به توانایی شبکه در مواجهه با تغییرات تقاضا در زمان اشاره دارد و یکی از پارامترهای اساسی اندازه‌گیری کارایی شبکه است. شاخص‌هایی مانند انعطاف‌پذیری (RI^۱)، انعطاف‌پذیری شبکه (NRI^۲) و انعطاف‌پذیری اصلاح شده (MRI^۳) از متداول‌ترین شاخص‌ها در بررسی قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه آب‌رسانی به شمار می‌آیند. شاخص RI برای اولین بار توسط Todini در سال ۲۰۰۰ به عنوان یک شاخص اندازه‌گیری قابلیت اطمینان هیدرولیکی ارائه شد [۳]. 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. شاخص NRI نیز توسط Prasad & Park در سال ۲۰۰۴ 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. NRI نیز مانند RI مقداری بین صفر و یک دارد [۴]. Farmani در کنار این دو شاخص، شاخص حداقل هد مازاد (MSH^۴) را نیز بعنوان یک شاخص قابلیت هیدرولیکی معرفی کرده است. 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

- 1 Resilience Index
- 2 Network Resilience Index
- 3 Modified Resilience Index
- 4 Minimum Surplus Head

شبکه در مواجهه با شرایط غیر طبیعی می‌باشد [۵]. قابلیت اطمینان مکانیکی به توانایی شبکه در مواجهه با حوادث مکانیکی مانند شکست لوله یا از کار افتادن پمپ اشاره دارد. شاخص آنتروپی جریان (ERI^۵) یکی از شاخص‌های متداول در اندازه‌گیری قابلیت اطمینان مکانیکی شبکه بوده که بر اساس تعداد مسیرهای جریان ممکن محاسبه می‌شود. برای اولین بار Awumah در سال ۱۹۹۰ مفهوم آنتروپی برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب را بر اساس تابع Shannon (۱۹۸۴) مطرح نمود [۶]. سپس Tanyimboh & Templeman در سال ۱۹۹۳ شاخص ERI را برای بررسی شبکه‌های توزیع آب توسعه دادند. ERI یکنواختی جریان در لوله‌ها را اندازه‌گیری می‌گیرد. بنابراین مقادیر بالاتر ERI معرف متعادل‌تر بودن شبکه توزیع در زمان آسیب دیدن اجزاء آن مانند پمپ یا لوله‌هاست، یا به زبان دیگر شبکه‌های 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. شاخص آنتروپی جریان محدوده استاندارد نداشته و مقدار آن به تعداد نقاط شبکه و تعداد لوله‌های متصل به آن‌ها بستگی دارد [۷]. بر اساس نتایج ارائه شده شبکه‌هایی که مقدار شاخص آنتروپی جریان آن‌ها بزرگ‌تر است، دارای قابلیت اطمینان مکانیکی بیشتری هستند. در ارتباط با شاخص‌های اعتمادپذیری شبکه‌های توزیع آب، تحقیقات متعددی انجام شده است. Gupta برای ارزیابی شبکه‌های توزیع آب، یک پارامتر جدید به نام اعتمادپذیری کیفی را ارائه دادند که معنای فیزیکی داشته و تنها برای کیفیت و کمیت آب در دسترس در گره‌های مختلف یک شبکه آب تعریف می‌شود. ارزیابی این شاخص با دو نمونه از شبکه‌های مرجع صورت گرفت و شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه تحت شرایط کمبود فشار ناشی از قطع لوله و شرایط شکست پمپ با استفاده از آنالیز جریان گره انجام و شکست لوله و شرایط شکست پمپ به عنوان رویداد تصادفی در نظر گرفته شد. سرانجام اعتمادپذیری هیدرولیکی و کیفی آب در شبکه‌های نمونه مقایسه و مشاهده شد که در برخی از گره‌ها، آب با کیفیت مورد نظر تحویل نمی‌شود. آن‌ها هم چنین توصیه داشتند، اعتمادپذیری شبکه با در نظر گرفتن کیفیت و کمیت آب بطور همزمان تعیین شود و در

داد یک شبکه توزیع می‌تواند قادر به دستیابی بالاترین سطح قابلیت اطمینان باشد اگر در طراحی بر مبنای شاخص‌های اعتمادپذیری، شکست لوله‌ها همزمان فرض شوند [۱۱].

Jeong بیان داشتند که تخمین حداقل هد مورد نیاز برای محاسبه شاخص‌های انعطاف‌پذیری شبکه ضروری است و روش جدیدی برای تخمین حداقل هد مورد نیاز ارائه کردند که جهت جریان در لوله‌ها و گرادیان هیدرولیکی شبکه را نیز در نظر می‌گرفت [۱۲].

Monsef و همکاران نشان دادند که شاخص‌های متداول قابلیت اطمینان نمی‌توانند بطور کامل توانایی مدل کردن این شبکه‌ها را در مواجهه با شرایط غیر طبیعی مانند تغییر تقاضای گره‌ای یا ترکیدن لوله داشته باشند. نتایج همچنین نشان داد که برخی ساختارهای شبکه توزیع آب، علی‌رغم داشتن مقادیر قابلیت اطمینان بالا، قادر به تحمل شرایط غیر طبیعی نیستند. ایشان همچنین، یک روش تصادفی و مبتنی بر همبستگی بین ارزش‌های شاخص‌های قابلیت اطمینان و توانایی شبکه توزیع آب برای عملکرد در شرایط غیر طبیعی، برای پیدا کردن بهترین شاخص قابلیت اطمینان در هر شبکه توزیع آب پیشنهاد دادند [۱۳].

Moosavian and Lence شاخصی تحت عنوان شاخص یکنواختی ۱ را برای شبکه‌های توزیع آب ارائه کردند. بنا به گفته مولفین، طراحی بر اساس این شاخص، جریان در محل گره‌ها را یکنواخت‌تر بین لوله‌ها توزیع می‌کند و قابلیت مکانیکی بیشتری نسبت به شاخص انعطاف‌پذیری شبکه ایجاد می‌کند. در استاندارد طراحی شبکه توزیع آب (نشریه ۳-۱۱۷ بازنگری اول) نیز شاخص‌های عملکرد فشار گره‌ای، سرعت لوله‌ها، ترکیب آن‌ها و شاخص عملکرد اختلاف فشار جهت بررسی قابلیت اطمینان شبکه معرفی شده است (مدیریت و برنامه‌ریزی وزارت نیرو (۱۳۷۱)) [۱۵]. تاکنون مطالعه‌ای برای بررسی و مقایسه این شاخص‌های طراحی و شاخص‌های متداول در تحقیقات بین‌المللی که در بخش فوق به آن‌ها پرداخته شد، انجام نشده است. هدف مقاله حاضر بررسی هفت شاخص مختلف اطمینان‌پذیری و مقایسه عملکرد آن‌ها در یک چارچوب واحد برای طراحی شبکه‌های توزیع آب است. به عبارت دیگر، این مقاله به دنبال پاسخ به این سوال است که اگر یک شبکه توزیع آب با در نظرگیری هر یک از شاخص‌های متداول در سابقه تحقیق و یا شاخص‌های اشاره

طراحی شبکه‌های توزیع آب سطح مطلوب اطمینان به دست آید [۸]. Tsakiris عملکرد سیستم‌های توزیع آب را با استفاده از شاخص‌های انعطاف‌پذیری و شکست ارائه شده توسط Todini (۲۰۰۰) و با استفاده از بسته نرم افزاری EPANET2 ارزیابی کردند. مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی برداری با دو تابع هدف هزینه و شاخص انعطاف‌پذیری فرمول‌بندی شد. این روش در تحلیل سیستم توزیع آب شهر Sofades در Thessaly مرکزی بکار گرفته شد و نشان داده شد که شاخص انعطاف‌پذیری (که مستقیماً با قابلیت اطمینان سیستم مرتبط است) شاخصی قدرتمند برای ارزیابی عملکرد سیستم بوده و با استفاده از آن ارزیابی غیرمستقیم قابلیت اطمینان سیستم نیز می‌تواند انجام شود [۹]. Farmani دو شاخص قابلیت اطمینان موجود، یعنی شاخص انعطاف‌پذیری Todini و آنتروپی را با تحلیل روابط آن‌ها و زیرمجموعه‌های مختلف قابلیت اطمینان، یعنی قابلیت اطمینان مکانیکی (تحمل شبکه به شکست لوله) و قابلیت اطمینان هیدرولیکی (تحمل شبکه به تغییر تقاضا) بررسی کردند. تجزیه و تحلیل با استفاده از مقایسه نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی هزینه در برابر شاخص‌های انتخاب شده، انجام و نشان داد که شبکه توزیع آب طراحی شده با مقدار شاخص آنتروپی بالا باعث افزایش قابلیت اطمینان مکانیکی شده، ولی گران بوده و عملکرد هیدرولیکی و کیفی پایینی دارد. در مقابل، شبکه‌های با شاخص انعطاف‌پذیری بالا ارزان‌تر و عملکرد هیدرولیکی معقولی را ارائه کرده و در عین حال قابلیت اطمینان مکانیکی بالایی دارند. به نظر می‌رسد که هر دو شاخص با قابلیت اطمینان هیدرولیکی همبستگی دارند، اما هر کدام دارای معایب مربوط به خود هستند. به هنگام بهینه‌سازی شبکه با در نظر گرفتن هر دو شاخص، منحنی تعامل بین آن‌ها نشان داد که افزایش قابل توجه هردو به طور همزمان امکان‌پذیر نیست؛ و در نتیجه یک شاخص جدید برای نشان دادن قابلیت اطمینان مکانیکی و هیدرولیکی در حین تضمین معیارهای مناسب عملکرد هیدرولیکی توصیه شد [۱۰].

Gheisi روشی برای تعیین قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. ایشان، با توجه به تجربیات پیشین، شکست همزمان لوله و خطاها را در قابلیت اطمینان شبکه توزیع آب ارزیابی کردند. مقایسه حالت‌های مختلف قابلیت اطمینان، اطلاعاتی درباره حساسیت سیستم به شکست همزمان چند لوله در اختیار قرار داد. نتایج ایشان نشان

$$NRI = \frac{\sum_{j=1}^{Nn} (Q_j^{avl} \times H_j^{avl} - Q_j^{req} \times H_j^{des})}{\sum_{r=1}^{Nr} (Q_r^{avl} \times H_r^{des}) + \sum_{i=1}^{Npu} \left(\frac{P_i}{\gamma} \right) - \sum_{j=1}^{Nn} (Q_j^{req} \times H_j^{des})} \quad (1)$$

$$C_i = \frac{\sum_j^{NDi} D_j}{NDi \times \max\{D_j\}} \quad (2)$$

در رابطه فوق Q_j^{req} مقدار دبی برداشتی (کل نیاز آبی مصرف کنندگان) در گره j ، H_j^{avl} هد موجود در گره j ، Q_j^{avl} مقدار دبی موجود، H_j^{des} هد مورد نیاز در گره j ، H_r^{des} هد طراحی در مخزن r ، Q_r^{avl} میزان برداشت از مخزن r ، Nr تعداد مخازن موجود در شبکه توزیع آب، N_{pu} تعداد پمپ‌های موجود در شبکه، N_n تعداد گره‌های موجود در شبکه هستند. در رابطه فوق C_i یکنواختی قطر لوله‌های متصل به نقطه مصرف i ، ND_i تعداد لوله‌های متصل به نقطه i و D_j قطر لوله j از متصل به نقطه i را نشان می‌دهد.

۲-۱-۲- شاخص حداقل هد مازاد (MSH)

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 (۳) قابل محاسبه است:

$$MSH = \min(H_j^{avl} - H_j^{des}) \quad (3)$$

Farmani et al (۲۰۰۵) نشان داد که افزایش MSH می‌تواند قابلیت اطمینان شبکه‌های آبرسانی را افزایش دهد.

۲-۱-۳- شاخص قابلیت اطمینان آنتروپی (ERI)

برای اولین بار Awumah در سال ۱۹۹۰ مفهوم آنتروپی برای

شده در استاندارد مذکور طراحی شود، کدام شبکه طراحی شده در شرایط بحرانی نظیر شکست برخی از لوله‌ها (شرایط طبیعی و غیر طبیعی) عملکرد هیدرولیکی بهتری (نظیر تامین حداقل فشار لازم در گره‌های مصرف) را می‌تواند ارائه نماید. در این تحقیق، طراحی بهینه شبکه با شاخص‌های قابلیت اطمینان مختلف و در نظرگیری حداقل‌سازی هزینه‌های ساخت انجام شده است و بر اساس تحلیل نتایج به دست آمده، بهترین شاخص عملکرد، هنگام شکست ناگهانی لوله‌ها معرفی شده است.

۲- روابط حاکم و روش حل مسئله

در این قسمت از مقاله، شاخص‌های اعتمادپذیری مختلف شامل، شاخص عملکرد فشار در گره‌ها، شاخص سرعت در لوله‌ها، شاخص عملکرد تلفیق فشار گرهی و سرعت در لوله‌ها، شاخص اختلاف فشار شبکه، شاخص عملکرد انعطاف پذیری شبکه (NRI)، شاخص حداقل هد مازاد (MSH) و شاخص آنتروپی (ERI) معرفی شده و مسئله طراحی شبکه بر مبنای شاخص‌های مذکور برای دو شبکه توزیع آب نمونه (شبکه مرجع) با بکارگیری الگوریتم بهینه سازی NSGA-II و حل گر هیدرولیکی EPANET تشریح خواهد شد. چهار شاخص از شاخص‌های مورد بررسی تاکنون در هیچ یک از مطالعات انجام شده برای طراحی شبکه‌های توزیع آب مورد بررسی و تحلیل قرار نگرفته است. مدل EPANET یک نرم‌افزار رایگان تحلیل هیدرولیکی شبکه با قابلیت اتصال به کدهای مختلف بهینه‌سازی در محیط‌های برنامه‌نویسی است. اعتبار این مدل در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب در مقالات علمی بسیار زیادی تایید شده است و در این پژوهش نیز با توجه به این موارد، از آن به عنوان مدل تحلیل گر هیدرولیکی استفاده شده است.

۲-۱-۲- شاخص‌های قابلیت اطمینان

۲-۱-۲-۱- شاخص انعطاف پذیری شبکه (NRI)

این شاخص توسط Prasad & Park در سال ۲۰۰۴ 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 به طور همزمان در محاسبات وارد نمودند. NRI مقداری بین صفر و یک دارد و از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است:

عملکرد ۰/۲۵، برای فشار (H_2) که بر اثر آن، دبی خروجی نصف دبی مورد نیاز باشد شاخص عملکرد ۰/۵ و نهایتاً برای فشاری که در آن، دبی خروجی سه چهارم دبی مورد نیاز باشد شاخص عملکرد ۰/۷۵، اختصاص داده شده است. با استفاده از رابطه Wanger، مقادیر H_1 ، H_2 و H_3 عبارتند از: منحنی مطلوبیت شاخص فشار در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۶].

$$H_1 = \frac{1}{16} H^{des} \quad (۵)$$

$$H_2 = \frac{1}{4} H^{des} \quad (۶)$$

$$H_3 = \frac{9}{16} H^{des} \quad (۷)$$

۲-۱-۵- شاخص عملکرد سرعت (PIV)

حداقل سرعت آب در لوله‌های شبکه به این منظور در نظر گرفته می‌شود که در اثر سرعت کم، رسوب در لوله‌ها ایجاد شده و نیز گازهای محلول در آب به صورت حباب‌هایی در می‌آیند که در قسمت‌های مرتفع شبکه جمع شده و جریان آب را مختل می‌کنند. به علاوه کم بودن سرعت یا ایستایی آب، سبب تغییر مزه آب شده و از گوارایی آن می‌کاهد. (استاندارد طراحی شبکه توزیع آب، نشریه ۳-۱۱۷ بازنگری اول). برای محدوده یک دوم حداقل سرعت تا مقدار حداقل سرعت، شاخص عملکرد ۰/۲۵ به معنی سرویس دهی غیرقابل قبول و برای مقادیر سرعت کمتر از یک دوم سرعت حداقل، شاخص عملکرد صفر که به معنی عدم سرویس دهی است، تعلق می‌گیرد. برای یک بازه کوتاه منحنی جریمه، شاخص عملکرد یک (یعنی بهترین حالت سرویس دهی) اختصاص یافته است. حد پایین این بازه که با V_{opt} مشخص شده است، دارای مقدار ۰/۸ متر بر ثانیه است و حد بالای این بازه با V_{opt} نشان داده شده و دارای مقدار عددی ۱/۲-۱ متر بر ثانیه است. در توضیح مقادیر یاد شده باید به این نکته اشاره شود که در طراحی شبکه‌های توزیع آب مفهومی به نام سرعت اقتصادی یا سرعت بهینه مطرح است که در این بازه‌ها قرار می‌گیرد (شکل ۲).

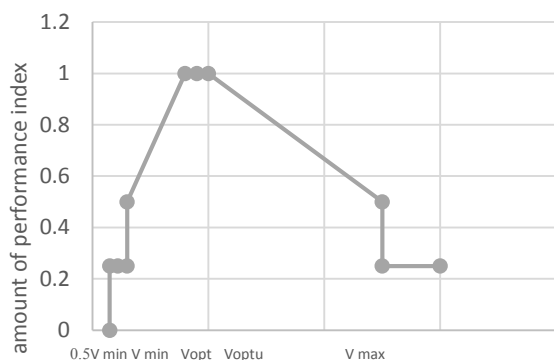
اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب را بر اساس تابع Shannon مطرح نمود. سپس Tanyimboh & Templeman در سال ۱۹۹۳ شاخص ERI را برای بررسی شبکه‌های توزیع آب توسعه دادند. ERI یکنواختی جریان در لوله‌ها را اندازه می‌گیرد. بنابراین مقادیر بالاتر ERI معرف متعادل تر بودن شبکه توزیع در زمان آسیب دیدن اجزاء 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 مطلوب تری ارائه دهند. ERI از رابطه (۴) قابل محاسبه می‌باشد:

$$ERI = -\sum_{r=1}^{N_r} \frac{Q_r}{T} \ln\left(\frac{Q_r}{T}\right) - \left[\sum_{j=1}^{N_n} \frac{T_j}{T} \times \frac{Q_j}{T_j} \ln\left(\frac{Q_j}{T_j}\right) + \sum_{ij \in ND_i} \frac{Q_{ij}}{T_j} \ln\left(\frac{Q_{ij}}{T_j}\right) \right] \quad (۴)$$

در رابطه فوق T مجموع نیاز آبی گره‌ها و T_j مجموع جریان رسیده به نقطه j بر حسب (Nn/m^3) تعداد گره‌های شبکه است، Q_r جریان ورودی از مخزن r ، N_r تعداد مخازن، Q_j نیاز آبی در گره j ، Q_{ij} جریان در لوله از گره i به گره j ، ND_i تعداد لوله‌های جریان که از گره j خارج می‌شوند.

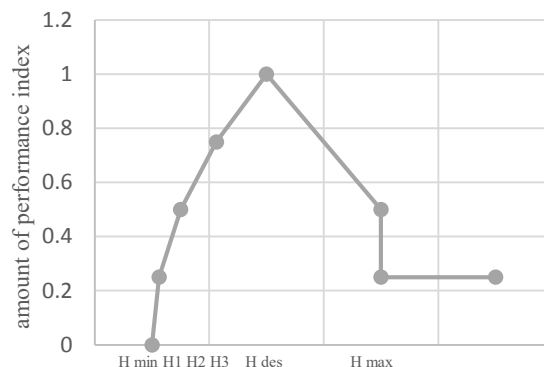
۲-۱-۴- شاخص عملکرد فشار (PIP)

مطابق استاندارد ایران، برای حداقل فشار لازم به منظور تامین مصارف مورد نیاز گره‌های مصرف در شبکه‌ها (H^{des}) مقدار شاخص عملکرد برابر یک، به مفهوم بهترین حالت سرویس دهی، اختصاص داده شده است. فشار کمتر از H^{des} منجر به کاهش در تامین مصارف خواهد شد و فشار بیشتر نیز در شبکه‌ها مطلوب نیست، زیرا هر اندازه فشار افزایش یابد تلفات واقعی (نشت) و آب به حساب نیامده در شبکه افزایش خواهد یافت که مطلوب نیست. اساس طبقه بندی بر این اساس بوده است که برای فشاری که در آن فشار (H_1) دبی خروجی یک چهارم دبی مورد نیاز باشد ($Q^{act} = \frac{1}{4} Q^{rec}$) شاخص



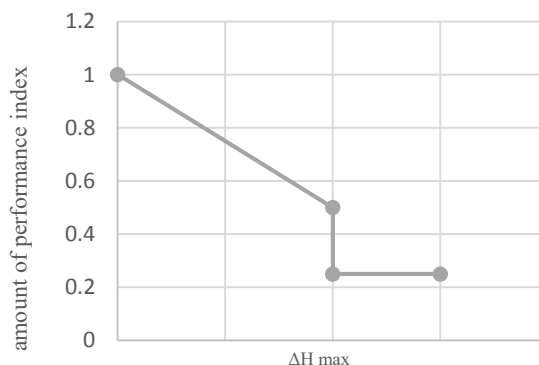
شکل ۲. شاخص عملکرد سرعت

Fig. 2. Performance Index of Velocity (PIV)



شکل ۱. شاخص عملکرد فشار

Fig. 1. Performance Index of Pressure (PIP)



شکل ۳. شاخص عملکرد اختلاف فشار

Fig. 3. Performance Index of Pressure difference (ΔH)

و طبق استانداردهای طراحی، فشارهای تا H^{\max} هم قابل قبول خواهند بود. مبنای سنجش تغییرات فشار به این صورت است که فشار به دست آمده برای نقاط مصرف با استفاده از نتایج تحلیل هیدرولیکی، با مقدار حداقل فشار مورد نیاز (H^{des}) مقایسه خواهد شد. شاخص عملکرد از ۱ تا ۰/۲ تا بیشترین مقدار اختلاف فشار $(\Delta H_{\max} = H^{\max} - H^{des})$ به طور خطی کاهش می‌یابد (سرویس دهی قابل قبول) و برای مقادیر بزرگتر از ΔH_{\max} ، شاخص عملکرد ۰/۲۵ (سرویس دهی غیرقابل قبول) تعلق می‌گیرد (شکل ۳).

۲-۲- مسئله طراحی بهینه شبکه بر مبنای معیارهای قابلیت اطمینان

۲-۱-۲- شاخص عملکرد فشار گره‌ای و سرعت در لوله (PI)
این شاخص عملکرد، تلفیقی از شاخص عملکرد فشار گره‌ای و سرعت در لوله است و به طور همزمان مقدار سرعت و فشار را بررسی می‌کند.

۲-۱-۲- شاخص عملکرد تغییرات فشار گره‌ها (ΔH)
تغییرات گسترده فشار در شبکه‌های توزیع آب مطلوب نیست و سرویس دهی مناسب موقعی صورت می‌گیرد که فشار نقاط مصرف ضمن تامین کامل مقدار جریان مورد نیاز، ثابت باشد. بهترین مقدار فشار در شبکه‌های توزیع آب، H^{des} (حداقل فشار مورد نیاز) است

در مقالات علمی، هزینه شبکه و قابلیت اطمینان، دو تابع هدفی هستند که برای طراحی چند هدفه شبکه توزیع آب اغلب به کار برده شده اند. در این مقاله، هزینه شبکه به عنوان یک تابع هدف و شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان به عنوان تابع هدف دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. فرمول‌بندی این مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & I) NRI \\ & II) MSH \\ & III) ERI \\ & (9) \end{aligned}$$

$$2) \text{Maximize: } IV) PIP = \frac{\sum_{j \in N_n} PIPE_j}{N_n}$$

$$V) PIV = \frac{\sum_{j \in N_m} PIVE_{ij}}{N_m}$$

$$VI) \Delta H_{\max} = \min(H^{\max} - H^{des})$$

$$VII) PI = w_1.PIP + w_2.PIV$$

قیدهای مسئله بهینه‌سازی به شرح زیر است:

$$\sum_{j=1}^{N_n} Q_{in} - \sum_{j=1}^{N_n} Q_{out} = Q_d \quad (10)$$

Q_{in} و Q_{out} جریان ورودی و خروجی از گره است. Q_d نیاز

آبی گره است.

$$\sum_{i \in \text{loop}} \Delta h_i = 0 \quad (11)$$

افت هد در لوله i است. N_l تعداد حلقه شبکه است. افت هد

$$1) \text{Minimize Cost} = \sum_{i=1}^{N_m} f(D_i).L_i \quad (8)$$

در رابطه فوق، D_i قطر لوله i ام، N_m تعداد لوله‌ها و L ، طول لوله i ام است. در رابطه ۹، PIP : شاخص عملکرد فشار گره‌ای کل شبکه، N_n : تعداد گره‌های شبکه، $PIPE_j$: شاخص عملکرد گره j . PIV : شاخص عملکرد سرعت لوله‌ای کل شبکه، N_m : تعداد لوله‌ها، $PIVE_{ij}$: شاخص عملکرد لوله ij . PI لوله ij : شاخص عملکرد تلفیقی فشار گره‌ای و سرعت لوله‌ای، w_1 و w_2 ضرایب ثابتی به مقدار 0.5 است. رابطه (۱۱) تابع هدف را نشان می‌دهد که در این مسئله، هدف شاخص قابلیت اطمینان به ترتیب:

۱- شاخص انعطاف پذیری شبکه (NRI)

۲- شاخص حداقل هد مازاد شبکه (MSH)

۳- شاخص قابلیت اطمینان آنتروپی (ERI)

۴- شاخص عملکرد فشار گره‌ای شبکه (PIP)

۵- شاخص عملکرد سرعت در لوله (PIV)

۶- شاخص عملکرد اختلاف فشار گره‌ای (ΔH)

۷- شاخص عملکرد تلفیقی فشار گره‌ای و سرعت در لوله (PI)

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم NSGA-II

Table 1. NSGA-II Algorithm Parameters

Mutation rate	۰/۱
Crossover prob	۱
Mutation prob	۰/۱
Tournament size	۱۰
Mutation step size	$0.1 \times \text{Variable range}$

۲-۴- نرم افزار EPANET 2

این مدل، یک برنامه کامپیوتری است که توسط سازمان محیط زیست امریکا توسعه داده شده است و قادر است رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در داخل شبکه لوله‌های تحت فشار که ممکن است اجزای دیگری مانند پمپ‌ها، شیرها و تانک‌های ذخیره یا مخازن نیز داشته باشد، شبیه سازی کند. EPANET جریان آب در هر لوله، فشار در هر گره، ارتفاع آب در هر تانک و غلظت یک نوع ماده شیمیایی را در سراسر شبکه در طی یک دوره شبیه سازی می‌کند [۱۸]. برخی از توانایی‌های حل‌گر هیدرولیکی EPANET عبارتند از:

- ۱- شبیه سازی رفتار هیدرولیکی آب در شبکه‌های تحت فشار
- ۲- شبیه سازی رفتار کیفی آب
- ۳- امکان مدل‌سازی انواع شیرهای آب، پمپ‌ها، اتصالات ...
- ۴- امکان ردیابی جریان آب در هر لوله از شبکه
- ۵- امکان ردیابی یک جزء شیمیایی در سرتاسر شبکه
- ۶- امکان ردیابی اثر منبع آلودگی و نیز سن آب (WATER AGE) در سرتاسر شبکه
- ۷- اختلاط آب خروجی از منابع مختلف در شبکه

۲-۵- شبکه توزیع آب هانوی

شبکه هانوی در کشور ویتنام واقع شده و برای اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط Fujiwara & Khang به عنوان یک شبکه نمونه آب مطرح گردید. شبکه هانوی دارای ۳۲ نقطه مصرف، ۳۴ لوله و ۳ حلقه می‌باشد که توسط یک مخزن مرتفع تغذیه می‌گردد. 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 مسئله بهینه سازی 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 در نظر گرفته شده است [۱۹]. شکل ۴ نمایی از این شبکه را نشان می‌دهد.

۲-۶- شبکه توزیع آب نمونه Pescara

این شبکه نمونه توزیع آب در کشور ایتالیا واقع شده است. Bragalli از این شبکه به عنوان شبکه بنچمارک برای الگوریتم‌های بهینه سازی استفاده کرد [۲۰]. این شبکه شامل ۳ مخزن، ۲۷ حلقه،

معمولا توسط روابطی مانند داریسی ویسباخ یا هیزن ویلیامز محاسبه می‌شود.

$$H_j^l \leq H_j \leq H_j^n \quad \forall j = 1, 2, \dots, N_n \quad (12)$$

H_j هد فشار در گره j است؛ H_j^l مینیمم هد فشار مورد نیاز در گره j است؛ H_j^n ماکزیمم هد فشار مجاز در گره j است.

$$D_i \in \{A\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_m \quad (13)$$

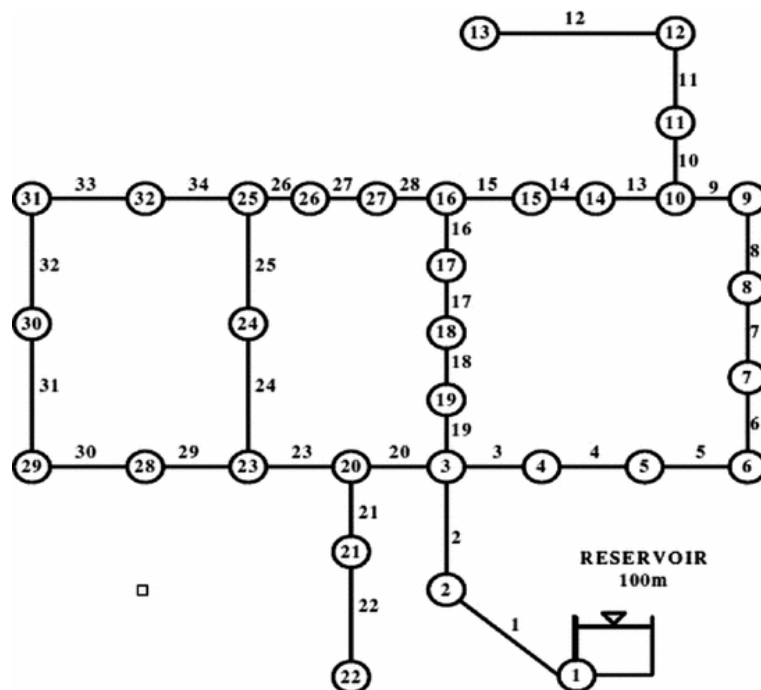
D_i قطر لوله i ، A قطر لوله‌های در دسترس است.

۲-۳- الگوریتم حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه

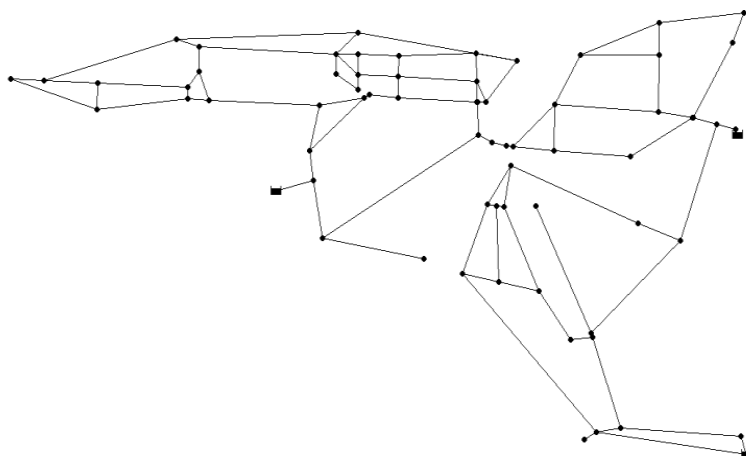
برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. این یک الگوریتم، یک روش بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر جمعیت است که توسط Deb معرفی شد. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است [۱۷]. روش کار این الگوریتم به شرح زیر است:

- ایجاد جمعیت اولیه
- محاسبه معیارهای برازندگی
- مرتب کردن جمعیت براساس شرط‌های غلبه کردن
- محاسبه فاصله ازدحامی
- انتخاب: به محض اینکه جمعیت اولیه براساس شرط‌های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود که این انتخاب بر اساس رتبه جمعیت و فاصله ازدحامی می‌باشد.

همچنین این الگوریتم در طراحی مسائل بهینه سازی چند هدفه کارایی زیادی داشته است. مقادیر توصیه شده برای پارامترهای این الگوریتم به شرح جدول ۱ است.



شکل ۴. شبکه آب هanoi
Fig. 4. Hanoi water network



شکل ۵. شبکه توزیع آب Pescara
Fig. 5. Pescara water distribution network

آمده فراهم شود. شکل ۴ و شکل ۵ جبهه های پارتوی به دست آمده از بهینه سازی با توجه به هفت معیار انجام شده بر روی شبکه نمونه هانوی و Pescara را برای یک نمونه اجرای مدل بهینه سازی نمایش می دهد. در هر یک از این بهینه سازی ها یکی از شاخص های اندازه گیری قابلیت اطمینان (که در بالا ذکر شد) به همراه هزینه به عنوان توابع هدف استفاده شدند. مشخصات مسئله بهینه سازی و تعداد ارزیابی های تابع هدف و همچنین قطرهای تجاری برای دو شبکه مذکور در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. نمودار شکل ۶ و ۷ محدوده تغییرات قابلیت اطمینان در مقابل هزینه را برای مجموعه جواب های بهینه نشان می دهد. برای بررسی دقیق تر و تحلیل نتایج به دست آمده، چند سطح هزینه ثابت به صورت اختیاری انتخاب شده است (سطح هزینه طوری انتخاب شده است که اکثر شاخص های قابلیت اطمینان در آن سطح هزینه دارای جواب بوده اند). در هر سطح هزینه انتخابی، عملکرد شبکه بهینه به دست آمده از شاخص های مختلف مقایسه می شود. چهار سطح هزینه ۶/۵، ۷/۵، ۸/۵ و ۱۰ (میلیون دلار) برای شبکه آب هانوی و سطوح هزینه ۱/۹، ۲/۰۵، ۳ و ۴ (میلیون دلار) برای شبکه آب Pescara به طور اختیاری به گونه ای انتخاب شده است که شاخص های بیشتری در آن سطوح هزینه جواب داشته باشند و در عین حال دامنه متنوعی از هزینه سرمایه گذاری را نیز در بر بگیرند. جدول ۴ مقادیر تابع هدف اطمینان پذیری جواب بهینه هر شاخص را در سطوح هزینه انتخابی نشان می دهند. در بعضی

۹۹ لوله و ۶۸ گره مصرف است. جنس لوله های این شبکه از آهن و حداقل فشار مورد نیاز برای نقاط مصرف، ۲۰ متر است. شکل ۵ شبکه توزیع آب Pescara را نشان می دهد.

۳- اجرای مدل و تحلیل نتایج

برای بهینه سازی مسئله مورد نظر در این مطالعه، الگوریتم بهینه سازی چند هدفه در نرم افزار Matlab کد نویسی شده و به نرم افزار Epanet به عنوان حل گر هیدرولیکی ارتباط داده شد. نرم افزار Epanet یک حل گر مبتنی بر تقاضا می باشد. در هنگامی که فشار نقاط مصرف در شبکه هانوی و Pescara به ترتیب بیشتر از حداقل فشار مجاز (که در مقاله این مقدار ۳۰ و ۲۰ متر در نظر گرفته شده است) باشد، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا نتایج یکسانی خواهند داشت. در این مسئله قطر لوله به عنوان متغیر تصمیم، هزینه و شاخص قابلیت اطمینان به عنوان توابع هدف و ارضا شدن قید پیوستگی در گره ها و انرژی برای حلقه ها و حداقل فشار گرهی مورد قبول در تمامی نقاط در تمام زمان ها به عنوان قیود هیدرولیکی مسئله بهینه سازی مد نظر گرفته شد. در راستای حذف احتمال دستیابی به پاسخ های بهینه محلی به جای پاسخ های بهینه کلی، هر مسئله ۱۰ بار و با ۱۰۰۰ تکرار مورد بهینه سازی قرار گرفت و نتایج این بهینه سازی ها با هم مقایسه شدند تا یک جبهه پارتوی برتر از میان پاسخ های به دست

جدول ۲. قطرهای تجاری شبکه های مورد بررسی

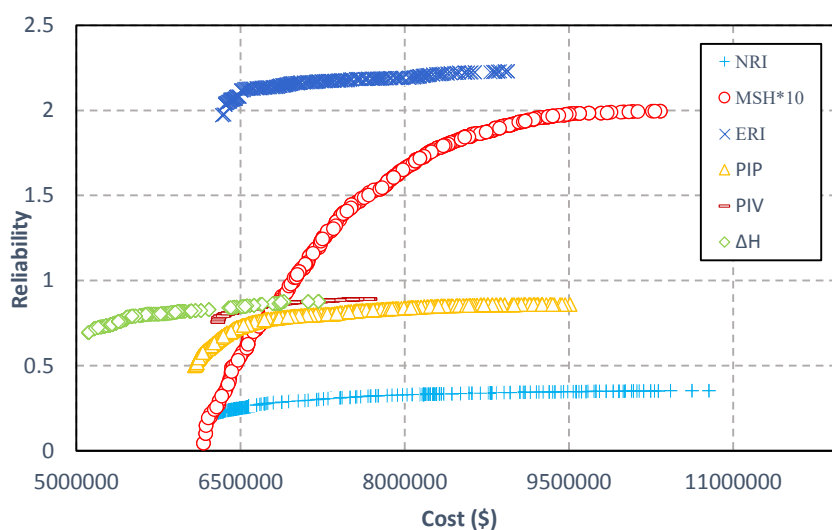
Table 2. Commercial diameters in the investigated network

Network	diameter (mm)	(\$ cost)	diameter (mm)	(\$ cost)	diameter (mm)	(\$ cost)
Pescara	۱۰۰	۲۷/۷	۱۵۰	۴۰/۵	۲۵۰	۷۵
	۱۲۵	۳۸	۲۰۰	۵۵/۴	۳۰۰	۹۲/۴
	۳۵۰	۱۲۳/۱	۴۰۰	۱۴۱/۹	۴۵۰	۱۶۹/۳
	۵۰۰	۱۹۱/۵	۶۰۰	۲۴۶	۷۰۰	۳۱۹/۶
	۸۰۰	۳۹۱/۱				
Hanoi	۳۰۴/۸	۴۵/۷۲۶	۵۰۸	۹۸/۳۸۷	۷۶۲	۱۸۰/۷۴۸
	۴۰۶/۴	۷۰/۴	۶۰۹/۶	۱۲۹/۳	۱۰۱۶	۱۷۸/۲۸

جدول ۳. مشخصات و تنظیمات مسئله بهینه‌سازی

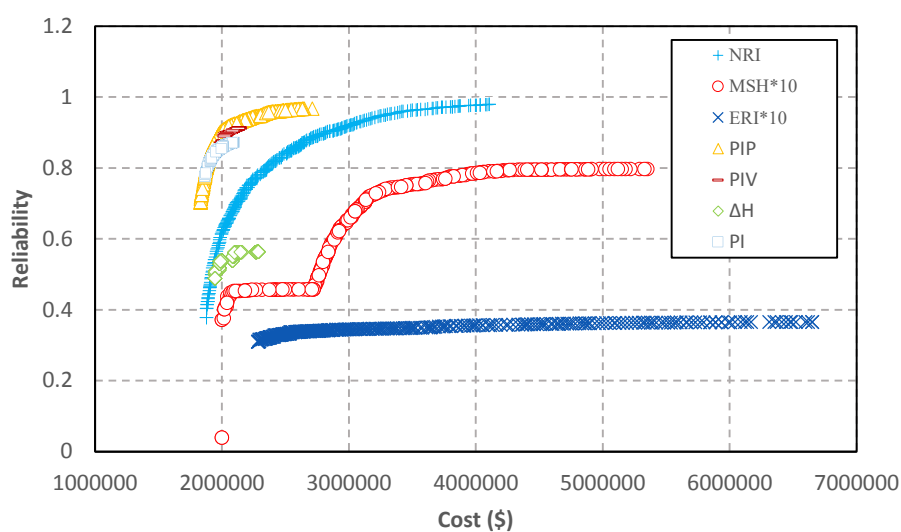
Table 3. Optimization Problem Specifications and Settings

Network	NFE	Population size	Number of pipes	Number of diameters
Hanoi	۲۰۰۰۰۰	۲۰۰	۳۴	۶
Pescara	۲۰۰۰۰۰	۲۰۰	۹۹	۱۳



شکل ۶. جبهه‌های پارتوی به دست آمده برای طراحی بهینه شبکه اب Hanoi

Fig. 6. Obtained Pareto fronts for optimal design of the Hanoi water network



شکل ۷. جبهه‌های پارتوی به دست آمده برای طراحی بهینه شبکه آب Pescara

Fig. 7. Obtained Pareto fronts for optimal design of the Pescara water network

جدول ۴. مقادیر بهینه شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان در سطوح مختلف هزینه

Table 4. Optimum values of different reliability indicators at different cost levels

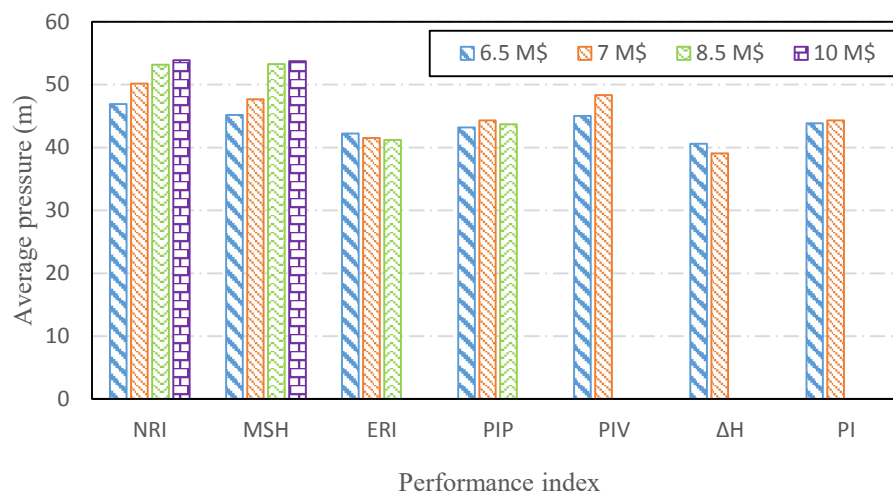
شبکه	هزینه (میلیون دلار)	NRI	MSH	ERI	PIP	PIV	ΔH	PI
Hanoi	۶/۵	۰/۲۵	۵/۵۶	۲/۱۱	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۶۹	۰/۷۲
	۷	۰/۲۹	۱۰/۱۸	۲/۱۵	۰/۷۹	۰/۸۷	۰/۷۰	۰/۷۷
	۸/۵	۰/۳۳	۱۸/۲۷	۲/۲۲	۰/۸۵			
	۱۰	۰/۳۵	۱۹/۹					
Pescara	۱/۹	۰/۴۵			۰/۷۹		۰/۴۸	۰/۷۳
	۲/۰۵	۰/۶۵	۴/۳۷		۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۵۳	۰/۸۶
	۳	۰/۹۱	۶/۵۷	۳/۴۴	۰/۹۶			
	۴	۰/۹۷	۷/۸۴	۳/۵۵	۰/۹۷			

شده بر اساس دو شاخص عملکرد NRI و MSH میانگین فشار بیشتری نسبت به دو شاخص عملکرد دیگر دارد. در نهایت در سطح هزینه ۱۰ میلیون دلار (بالاترین سطح هزینه)، مقادیر معیارهای فشار در شبکه‌های طراحی شده بر مبنای دو شاخص NRI و MSH نشان داده شده است؛ سایر شاخص‌ها در این سطح هزینه دارای جواب بهینه نیستند. در این سطح هزینه شبکه طراحی شده بر مبنای شاخص NRI میانگین فشار بیشتری نسبت به شاخص MSH دارد (۵۳/۸۸ متر). با توجه به محتوی جدول ۵، می‌توان نتیجه گرفت در مورد شبکه مرجع Hanoi، شبکه بازطراحی شده بر اساس شاخص NRI در کل مقادیر فشار گره‌ای بیشتری را در شبکه ایجاد می‌کند. به طور مشابه، نمودار شکل ۹، مقادیر میانگین فشار گره‌ای در شبکه (Pescara) طراحی شده بر اساس هفت شاخص مختلف را در سطوح مختلف هزینه نشان می‌دهد. در این شبکه طبق فرضیات این مسئله مرجع، ماکزیمم فشار مجاز در هر گره متغیر است، ولی حداقل فشار مورد نیاز برای تمامی گره‌ها ثابت و برابر ۲۰ متر است. حداکثر سرعت مجاز در لوله‌ها نیز برابر ۲ متر بر ثانیه است. نمودار شکل ۹ معیار فشار شبکه بهینه به دست آمده بر مبنای هر یک از شاخص‌های اعتمادپذیری را نشان می‌دهد. در سطح هزینه ۱/۹ میلیون دلار (پایین‌ترین سطح هزینه)، سه شاخص عملکرد MSH، ERI و PIV دارای جواب بهینه نبوده و مقادیر فشار و سرعت در این سه شاخص تعریف نشده است. در این سطح هزینه، شبکه طراحی شده بر اساس شاخص NRI و PIP، میانگین فشار بیشتری نسبت به

از سطوح هزینه، برخی از شاخص‌ها جواب بهینه‌ای نداشته‌اند. (بازه trade off هزینه-اطمینان‌پذیری جوابی در آن سطح هزینه ارائه نکرده است).

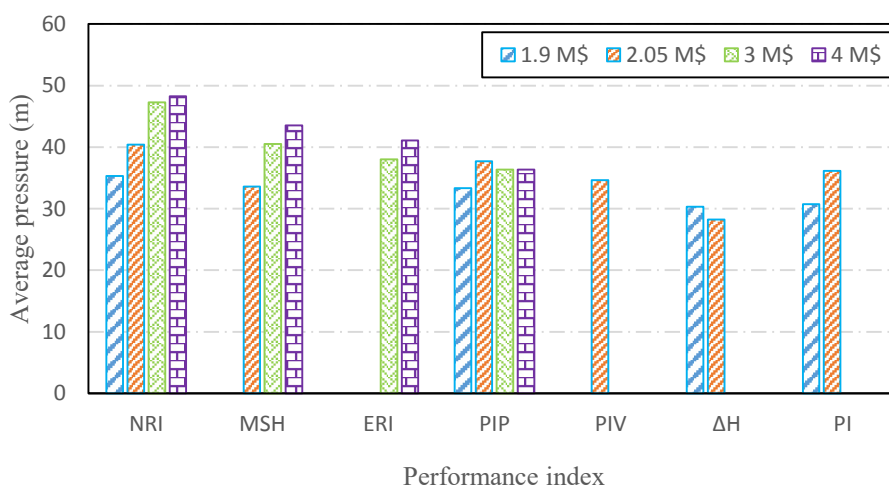
نمودار شکل ۸، مقادیر میانگین فشار در گره‌های شبکه طراحی شده بر اساس هفت شاخص مختلف را به ازای سطوح منتخب هزینه نشان می‌دهد (شبکه Hanoi). حداقل فشار مورد نیاز برای نقاط مختلف این شبکه، ۳۰ متر است که به صورت قید حداقل فشار در محاسبات وارد شده است. فشار حداکثر در این شبکه محدودیتی نداشته و مقدار آن ۹۷/۱۴ متر در اجراهای مختلف به دست آمده است. نتایج حاصل از شکل ۸ نشان می‌دهد که در سطح هزینه ۶/۵ میلیون دلار (پایین‌ترین سطح هزینه)، میانگین فشار گره‌ای در شبکه طراحی شده بر مبنای شاخص NRI نسبت به شاخص‌های دیگر، بیش‌ترین مقدار را دارا است (۴۶/۹ متر).

همچنین شبکه طراحی شده بر اساس شاخص MSH بعد از NRI، دارای میانگین فشار گره‌ای بیشتری است. در سطح هزینه ۷ میلیون دلار، مقادیر میانگین فشار در شاخص‌های مختلف نشان می‌دهد که شبکه طراحی شده بر مبنای شاخص NRI میانگین فشار گره‌ای بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارد (۵۰/۱۷ متر). همچنین بعد از آن، شاخص عملکرد PIV بیش‌ترین مقدار میانگین فشار را در شبکه دارد. در سطح هزینه ۸/۵ میلیون دلار، تنها چهار شاخص دارای جواب بهینه هستند، که مقادیر فشار در این چهار شاخص در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که شبکه طراحی



شکل ۸. مقادیر فشار در شاخص‌های مختلف شبکه Hanoi و در چهار سطح هزینه

Fig. 8. Pressure values in various indices of the Hanoi network and at four cost levels



شکل ۹. مقادیر فشار در شاخص‌های مختلف طراحی شبکه Pescara و در چهار سطح هزینه

Fig. 9. Pressure values in various indices of the pescara network and at four cost levels

کرده است. در سطح هزینه ۲/۰۵ میلیون دلار، بجز شاخص عملکرد ERI، بقیه شاخص‌ها دارای جواب بهینه بوده‌اند. در این سطح هزینه، شبکه طراحی شده بر مبنای دو شاخص عملکرد NRI و PIP بیش‌ترین مقدار میانگین فشار را دارند. در سطح هزینه ۳ و ۴ میلیون دلار، تنها چهار شاخص عملکرد ERI، MSH، NRI و PIP دارای جواب بهینه بوده و سه شاخص عملکرد دیگر جوابی

شاخص‌های دیگر دارند و شاخص NRI میانگین فشار بیشتری نسبت به شاخص PIP ارائه کرده است. در سطح هزینه ۲/۰۵ میلیون دلار، بجز شاخص عملکرد ERI، بقیه شاخص‌ها دارای جواب بهینه بوده‌اند. در این سطح هزینه، شبکه طراحی شده بر اساس شاخص NRI و PIP، میانگین فشار بیشتری نسبت به شاخص‌های دیگر دارند و شاخص NRI میانگین فشار بیشتری نسبت به شاخص PIP ارائه

ارائه نکرده‌اند (یعنی شبکه‌ای در آن سطوح هزینه ارائه نکرده‌اند). در این دو سطح هزینه، مشاهده می‌شود که مجدداً شبکه طراحی شده بر مبنای شاخص NRI، میانگین فشار گره‌ای بیشتری نسبت به شاخص‌های عملکرد دیگر دارد. در هر سطح هزینه منتخب، برای ارزیابی و مقایسه طرح‌های بهینه شبکه که هر یک از آن‌ها بر مبنای یکی از شاخص‌های مختلف اطمینان‌پذیری به دست آمده‌اند، شبکه بهینه در معرض سناریوهای مختلف شکست لوله‌ها قرار داده می‌شود؛ و قابلیت اطمینان شبکه در تامین نیازهای گره‌ای شبکه بررسی می‌شود. برای این منظور، ۳ سناریوی مختلف ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد شکست لوله‌های شبکه تعریف شده است و برای مقایسه منصفانه‌تر، لوله‌های دچار شکست برای همه طرح‌های بهینه یکسان در نظر گرفته می‌شود. تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار برای آنالیز جریان در حالتی که شکستگی لوله در شبکه وجود دارد با واقعیت انطباق بیشتری دارد. در این مقاله، فرض بر این است که لوله‌های شکسته شده به طور کامل عملکرد خود را از دست داده‌اند و کاملاً از شبکه خارج شده و جریان آبی از آن‌ها عبور نمی‌کند. این حالت حدی را می‌توان با تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا شبیه‌سازی کرد و هدف از تعریف این نوع سناریوهای شکست، صرفاً بررسی و سنجش میزان اعتمادپذیری شبکه طراحی شده با معیارهای مختلف در شرایط کاملاً بحرانی است، نه شبیه‌سازی شرایط یک شکست واقعی در سیستم که لوله علی‌رغم شکست جزئی همچنان بخشی از عملکرد خود را دارد. سناریو ۲۰ درصد شکست لوله‌ها در هنگام بلایای طبیعی همچون زلزله رخ می‌دهد؛ به همین دلیل چندین سناریوی شکست از جمله شکست ۲۰٪ در این مقاله تعریف شده است.

با توجه به اینکه شبکه آب Hanoi متشکل از ۳۴ لوله است در سناریوی شکست ۵٪، ۱ یا ۲ لوله، با جانمایی‌های متفاوت، شکست در نظر گرفته شده است. هر سناریوی شکست تصادفی (مثلاً ۵٪)، ۱۰۰ بار تکرار شده است. مکان لوله یا لوله‌های شکسته به صورت تصادفی انتخاب شده به طوری که در دفعات مختلف تکرار شکست، لوله‌های شکسته یکسان نباشند. با توجه به اینکه با شکست چند لوله، فشار در بعضی از گره‌های شبکه، از فشار حداقل کمتر می‌شود، میانگین فشار و تعداد لوله‌های دارای کمبود فشار (نسبت به حداقل فشار مجاز) در این ۱۰۰ بار تکرار محاسبه می‌شود. هدف از تولید این سناریوها نیز بررسی کارایی شبکه در هنگام شکست یک یا چند لوله

همزمان در شبکه است. در شبکه آب Hanoi در سناریوی شکست ۱۰٪، بین ۳ تا ۴ لوله و در شکست ۲۰٪، ۷ لوله، شکسته در نظر گرفته شده است. همچنین در شبکه اب Pescara (با ۹۹ لوله) در سناریوی شکست ۵٪، ۵ لوله، در سناریوی شکست ۱۰٪، ۱۰ لوله و در سناریوی شکست ۲۰٪، ۲۰ لوله به تصادف شکسته در نظر گرفته شده است. تحت این سناریوها، طرح بهینه به دست آمده از هر یک از شاخص‌های اعتمادپذیری بر حسب اطمینان‌پذیری تامین نیاز گره‌ای ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده برای شبکه Hanoi در جدول ۵ ارائه شده است. ستون‌های ۴ تا ۱۰ این جدول تعداد دفعاتی را که شاخص مورد نظر بهترین عملکرد (کمترین تعداد گره‌های دارای کمبود فشار در کل شبکه) را داشته است، نشان می‌دهد. نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد در شبکه آب Hanoi، در هنگام شکست تصادفی چند لوله (سناریوی شکست ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪)، و در سطوح هزینه ۶/۵، ۷ و ۱۰ میلیون دلار، شاخص NRI بیشترین دفعات عملکرد برتر را در بین سایر شاخص‌ها داشته است. به عبارت دیگر، شاخص NRI، در ۱۰۰ بار تکرار ناشی از شکست لوله، حداکثر ۹۸ بار کمترین میزان کمبود فشار در شبکه را داشته است و نیاز آبی اکثر گره‌های شبکه تامین می‌شود. این بدان معناست که شاخص NRI قابلیت اطمینان بیشتری برای شبکه در هنگام شکست لوله‌ها ایجاد می‌کند و بهترین شاخص برای طراحی این شبکه در سه سطح هزینه مذکور می‌باشد. در سطح هزینه ۶/۵ و ۷ میلیون دلار به ترتیب دومین رتبه مربوط به شاخص‌های MSH و PIV است. در سطح هزینه ۱۰ میلیون دلار شاخص MSH در رتبه دوم قرار دارد (۱۳ شبکه طراحی شده با این شاخص ۱۳ بار از ۱۰۰ بار تکرار، کمترین میزان کمبود فشار گره‌ای را داشته است). شاخص قابلیت اطمینان MSH در سطح هزینه ۸/۵ میلیون دلار و در شکست تصادفی چند لوله (سناریو شکست ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ بیشترین تعداد جواب‌های برتر را در بین سایر شاخص‌ها داشته است. شبکه حاصل از طراحی بر مبنای شاخص در ۱۰۰ بار تکرار ناشی از شکست لوله، حداکثر ۶۹ بار کمترین میزان کمبود فشار را داشته است و نیاز آبی اکثر گره‌های شبکه تامین می‌شود. در این سطح هزینه، شبکه طراحی شده بر مبنای شاخص NRI دومین رتبه را داشته است و از بین ۱۰۰ سناریوی شکست تصادفی، در تمام دفعاتی که شبکه MSH شبکه برتر نبوده است، شبکه طراحی شده بر مبنای NRI عملکرد

تنها چهار شاخص ΔH ، PI ، PIP و NRI دارای جواب هستند و سه شاخص دیگر در این سطح هزینه جواب بهینه ندارند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو شبکه توزیع آب نمونه بر اساس هفت شاخص اطمینان‌پذیری هیدرولیکی و مکانیکی، طراحی و در شرایط شکست لوله‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. برای طراحی شبکه، دو معیار هزینه و شاخص اعتماد‌پذیری به عنوان توابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و با تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی $NSGA-II$ و شبیه‌ساز هیدرولیکی $EPANET$ مسئله مورد نظر تحلیل شد. سپس جواب‌های بهینه مسئله به صورت جبهه پارتو استخراج شد. برای مقایسه شاخص‌ها، از جبهه پارتوی به دست آمده برای هر شاخص، چهار جواب (چهار شبکه بهینه) در سطح هزینه یکسان انتخاب و در سناریوهای شکست مختلف لوله‌ها، عملکرد شبکه طراحی شده مقایسه شد. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

در یک نمونه شبکه توزیع آب کوچک (شبکه Hanoi)، علاوه بر استخراج طرح بهینه شبکه بر اساس معیارهای مختلف، نشان داده شد که در هنگام شکست و از کار افتادگی لوله‌ها که ممکن است به طور طبیعی یا غیر طبیعی اتفاق افتد، شاخص عملکرد NRI نتایج مطلوب‌تری نسبت به سایر شاخص‌ها ارائه می‌کند. همچنین، برای یک شبکه توزیع آب با اندازه متوسط (شبکه Pescara)، در محدوده سطوح هزینه پایین، طراحی بر اساس شاخص عملکرد فشار گره‌ای (PIP) و سپس شاخص NRI بهترین نتیجه را بر مبنای تامین نیاز گرهی به دنبال داشته است. در محدوده سطوح هزینه بالا، مجدداً شاخص عملکرد NRI نسبت به سایر شاخص‌ها برتری داشته است. این دو شاخص، علاوه بر افزایش تاب آوری شبکه در برابر از کارافتادگی لوله‌ها، فشار مورد نیاز در گره‌ها را نیز تامین می‌نمایند. با توجه به نتایج به دست آمده به‌طور کلی، میانگین فشار شبکه طراحی شده بر مبنای شاخص NRI ، بیشتر از شبکه طراحی شده با سایر شاخص‌هاست، این امر نشان دهنده این است که انرژی مزاد بیشتری در شبکه طراحی شده بر اساس این شاخص وجود دارد. با توجه به وجود ضریب یکنواختی لوله‌ها در معیار NRI ، یکنواختی قطر لوله‌های مجاور در شبکه طراحی شده بر اساس شاخص NRI ، نسبت به شبکه مربوط به شاخص‌های دیگر بیشتر بوده و این موضوع

برتر داشته است. دیگر شاخص‌ها، در هیچ سناریوی شکستی عملکرد بهتری نسبت به دو شاخص مذکور نداشته‌اند. همچنین در سطح هزینه ۸/۵ میلیون دلار تنها چهار شاخص قابلیت اطمینان NRI ، MSH ، ERI و PIP دارای جواب و بقیه شاخص‌ها بدون جواب بهینه هستند (بعضی از شاخص‌ها در این سطح هزینه قرار ندارند و دارای جواب بهینه نیستند). در بالاترین سطح هزینه، سطح هزینه ۱۰ میلیون دلار فقط دو شاخص قابلیت اطمینان NRI و MSH دارای جواب بهینه هستند و مابقی شاخص‌ها در این سطح هزینه قرار ندارند و دارای جواب نیستند. نتایج به دست آمده برای شبکه Pescara در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق این جدول، برای شبکه Pescara، در هنگام شکست تصادفی چند لوله (سناریوی شکست ۵٪ و ۱۰٪ و ۲۰٪) و در سطح هزینه ۳ و ۴ میلیون دلار، شاخص NRI بیش‌ترین تعداد جواب‌های برتر را در بین سایر شاخص‌ها داشته است به طوری که در ۱۰۰ بار شکست ناشی از شکست لوله، ۵۵ تا ۸۳ بار کمترین میزان کمبود فشار در شبکه را داشته است. در سطح هزینه ۱/۹ و ۲/۰۵ میلیون دلار و سناریو شکست ۵٪ و ۱۰٪ و ۲۰٪ شاخص PIP بیش‌ترین دفعات عملکرد برتر را در بین سایر شاخص‌ها داشته است. این شاخص، در ۱۰۰ بار شکست ناشی از شکست لوله، ۳۳ تا ۸۹ بار کمترین میزان کمبود فشار در شبکه را داشته است و لذا قابلیت اطمینان بیشتری برای شبکه در هنگام شکست لوله ایجاد کرده و بهترین شاخص برای طراحی این شبکه در دو سطح هزینه مذکور به دست آمده است. در دو سطح هزینه ۱/۹ و ۲/۰۵ میلیون دلار، شبکه طراحی شده بر مبنای شاخص NRI در رتبه دوم قرار دارد. در سطح هزینه ۳ میلیون دلار، شبکه طراحی شده بر مبنای شاخص PIP در رتبه دوم قرار دارد. در سطح هزینه ۴ میلیون دلار و سناریو شکست ۵٪ رتبه دوم مربوط به شاخص ERI است و در سناریو شکست ۱۰٪ شاخص MSH در رتبه دوم بعد از NRI قرار دارد. در سناریو شکست ۲۰٪ رتبه دوم مربوط به شاخص PIP است. لازم به ذکر است که در سطح هزینه ۳ و ۴ میلیون دلار، تنها چهار شاخص قابلیت اطمینان MSH ، NRI و ERI و PIP دارای جواب بهینه هستند و سه شاخص دیگر در این سطح هزینه جوابی (شبکه‌ای) ارائه نکرده‌اند. در سطح هزینه ۲/۰۵ میلیون دلار، به جز شاخص قابلیت اطمینان ERI ، بقیه شاخص‌ها دارای جواب بهینه هستند (یعنی شبکه‌ای با این حدود هزینه ارائه کرده‌اند) و در سطح هزینه ۱/۹ میلیون دلار،

- distribution network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2005. 131(3): p. 161-171.
- [6] Awumah, K., I. Goulter, and S. Bhatt, Assessment of reliability in water distribution networks using entropy based measures. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 1990. 4(4): p. 309-320.
- [7] Tanyimboh, T. and A. Templeman, Optimum design of flexible water distribution networks. *Civil Engineering Systems*, 1993. 10(3): p. 243-258.
- [8] Gupta, R., et al., Water quality based reliability analysis for water distribution networks. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 2012. 18(2): p. 80-89.
- [9] Tsakiris, G. and M. Spiliotis, Applying resilience indices for assessing the reliability of water distribution systems. *Water Utility J*, 2012. 3: p. 19-27.
- [10] Farmani, R. and D. Butler, Implications of urban form on water distribution systems performance. *Water resources management*, 2014. 28(1): p. 83-97.
- [11] Gheisi, A. and G. Naser, Multistate reliability of water-distribution systems: comparison of surrogate measures. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015. 141(10): p. 04015018.
- [12] Jeong, G., A. Wicaksono, and D. Kang, Revisiting the resilience index for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017. 143(8): p. 04017035.
- [13] Monsef, H., et al., Comparison of evolutionary multi objective optimization algorithms in optimum design of water distribution network. *Ain Shams Engineering Journal*, 2019. 10(1): p. 103-111.
- [14] Moosavian, N. and B. Lence, Flow-Uniformity Index for Reliable-Based Optimal Design of Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020. 146(3): p. 04020005.
- [15] ODSSDTA, Design Criteria of Urban and Rural Water Supply and Distribution Systems. 2013. No. 117-3. (in persian)
- [16] Wagner, J.M., U. Shamir, and D.H. Marks, Water distribution reliability: analytical methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1988. 114(3): p. 253-275.

باعث کاهش افت انرژی در محل اتصال لوله‌ها شده و متوسط فشار شبکه را بالا می‌برد. بنابراین این شاخص می‌تواند فشار مورد نیاز گره‌های شبکه را بیشتر از شاخص‌های دیگر حتی در شرایط شکست لوله‌ها تامین کند. شاخص عملکرد PIP در رتبه دوم قرار داشته است. این شاخص نیز تلاش می‌کند فشار گرهی را در مطلوب‌ترین مقدار ممکن قرار دهد و از محدوده حداقل مجاز فشار فاصله بگیرد. لذا بعد از شاخص NRI، این شاخص، میانگین فشار گره‌ای بیشتر و در نتیجه انرژی مازاد بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها فراهم کرده است که تاب آوری شبکه را در شرایط شکست لوله‌ها افزایش می‌دهد.

در انتها پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، شاخص‌های اعتمادپذیری هیدرولیکی و مکانیکی برای شبکه‌های توزیع آب بزرگ‌تر و با توپولوژی متفاوت شامل پمپ، شیرآلات و دیگر اجزاء نیز مورد آزمون قرار گیرد تا در خصوص میزان اثربخشی این شاخص‌ها با اطمینان بیشتری بتوان اظهار نظر نمود. همچنین باید توجه شود که در حالت شکست لوله‌ها با توجه به ایجاد افت فشار و کمتر شدن فشار گرهی از مقدار استاندارد، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار نسبت به تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا با استفاده از Epanet، مدل‌سازی واقعی‌تری از عملکرد شبکه را ارائه می‌دهد. لذا بررسی اعتمادپذیری با استفاده از رویکرد تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] Tabesh, M., reliability. *Advanced Modeling of Water Distribution Networks*. 2016: p. 394-398. (in persian)
- [2] Gheisi, A., M. Forsyth, and G. Naser, Water distribution systems reliability: A review of research literature. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016. 142(11): p. 04016047.
- [3] Todini, E., Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water*, 2000. 2(2): p. 115-122.
- [4] Prasad, T.D. and N.-S. Park, Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004. 130(1): p. 73-82.
- [5] Farmani, R., G.A. Walters, and D.A. Savic, Trade-off between total cost and reliability for Anytown water

- networks. *Water resources research*, 1990. 26(4): p. 539-549.
- [20] Bragalli, C., et al., On the optimal design of water distribution networks: a practical MINLP approach. *Optimization and Engineering*, 2012. 13(2): p. 219-246.
- [17] Deb, K., et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. in *International conference on parallel problem solving from nature*. 2000. Springer.
- [18] Rossman, L.A., *EPANET 2: users manual*. 2000.
- [19] Fujiwara, O. and D.B. Khang, A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Taji, J. Yazdi, Investigation of Some Performance Indices in Design of Water Distribution Network Based on Hydraulic and Mechanical Reliability Criteria. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(6) (2021) 2639-2656

DOI: [10.22060/ceej.2020.17480.6574](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17480.6574)



