Development of a Prioritization Model for Rehabilitation of Pipes in Water Distribution Systems with Minimum Structural Data

S. Salehi[1], M. Tabesh[2], M. R. Jalili Ghazizadeh[3]

1. PhD, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Prof., Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Assist. Prof, Civil, Water and Environmental Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) m_jalili@sbu.ac.ir

(Received July 5, 2017 Accepted Aug. 22, 2017)

To cite this article :
Salehi, S., Tabesh, M., Jalili Ghazizadeh, M.R., 2018, "Development of a prioritization model for rehabilitation of pipes in water distribution systems with minimum structural data." Journal of Water and Wastewater, 29(6), 40-55. Doi: 10.22093/wwj.2017.91467.2447 (In Persian)

Abstract

Having a reliable rehabilitation plan with sufficient operational data is crucially important for the operation and maintenance of a water distribution systems. This research was conducted to develop a prioritization model for planning the rehabilitation of pipes in water networks when minimum structural data is available. To accomplish the main objective of the study, WDSR-Min model with Fuzzy TOPSIS technique capability was used to prioritize the pipes rehabilitation. The proposed model was used for the prioritization of pipes rehabilitation in a two-loop water distribution system. The prioritization of pipes rehabilitation were evaluated under two methods by using: 1) the pre-defined template of the WDSR-Min model, and 2) the template consistent with the conditions of the study area. The results showed that the rehabilitation plan obtained from WDSR-Min was aligned with the real needs for rehabilitation in the water network pipes. Furthermore, it was found that to prioritize the pipes rehabilitation it was preferred to localize the model criteria for the conditions of the study area, while to determine the pipes rehabilitation strategies the use of the pre-defined template of the WDSR-Min model was preferred. Using the proposed model in this work makes it possible to determine the prioritization/strategies of pipes rehabilitation using the minimum structural data of water distribution networks and independent of operational data.

Keywords: Water Distribution Systems, Rehabilitation, Prioritization, WDSR-Min, Fuzzy TOPSIS.

Archive of SID
www.SID.ir

 dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.91467.2447

توسعه یک مدل اولویت‌بندی برای بازسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب با حداقل اطلاعات ساختاری

ستار صالحی[۱]، مسعود تابش[۲]، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[۳]

۱- دانش‌آموخته دکترای رشته مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
m_jalili@sbu.ac.ir (نویسنده مسئول)

(دریافت ۹۶/۴/۱۴ پذیرش ۹۶/۵/۳۱)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
صالحی، س.، تابش، م.، جلیلی قاضی‌زاده، م.ر.، ۱۳۹۷، "توسعه یک مدل اولویت‌بندی برای بازسازی لوله‌های" شبکه‌های توزیع آب با حداقل اطلاعات ساختاری مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۶)، ۵۵-۴۰. Doi: 10.22093/wwj.2018.91467.2447

چکیده

یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری شبکه‌های توزیع آب است که برنامه‌ریزی برای بازسازی این تأسیسات، همواره به‌علت استفاده از اطلاعات غیردقیق بهره‌برداری، با پیچیدگی‌های فراوانی همراه است. هدف اصلی در این پژوهش، توسعه یک مدل برنامه‌ریزی بازسازی لوله‌های شبکه توزیع آب با استفاده از حداقل اطلاعات ساختاری و مستقل از اطلاعات بهره‌برداری است. مدل توسعه داده شده در این پژوهش تحت عنوان WDSR-Min نامگذاری شده، که در آن با استفاده از هسته تحلیل‌گر Fuzzy TOPSIS علاوه بر ارائه اولویت بازسازی لوله‌ها، سیاست‌های بازسازی آنها نیز مستقل از اطلاعات بهره‌برداری ارائه می‌شود. با استفاده از مدل توسعه داده شده، اولویت‌بندی بازسازی لوله‌های یک شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای به‌همراه سیاست‌های بازسازی آنها با دو روش: ۱) استفاده از الگوی پیش فرض مدل WDSR-Min؛ و ۲) استفاده از الگو منطبق با شرایط مسئله موجود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با هم مقایسه شد. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که برنامه بازسازی به‌دست آمده از مدل WDSR-Min، منطبق بر نیازهای واقعی لوله‌های شبکه توزیع آب برای عملیات بازسازی است. همچنین مشخص شد که برای تعیین اولویت بازسازی لوله‌ها ابتدا باید معیارهای مدل با شرایط منطقه مورد بررسی، تطبیق داده شود؛ در حالی که برای تعیین سیاست‌های بازسازی لوله‌ها ضروری است که صرفاً از الگوی پیش فرض مدل WDSR-Min استفاده شود. به‌وسیله مدل ارائه شده در این پژوهش می‌توان با استفاده از حداقل اطلاعات ساختاری شبکه‌های توزیع آب و مستقل از اطلاعات بهره‌برداری، اولویت‌بندی و سیاست‌های بازسازی لوله‌های شبکه را با دقت قابل قبولی تعیین نمود.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع آب، بازسازی، اولویت‌بندی، WDSR-Min، Fuzzy TOPSIS

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع آب یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری است (Kabir et al., 2015) که علاوه بر سلامت بهداشت یک جامعه (Tabesh and Saber, 2012)، می‌تواند بر ساختار اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی جوامع نیز تأثیر به‌سزایی داشته باشد (Tee et al., 2014). لذا همواره چگونگی برنامه‌ریزی کارآمد طرح‌های بازسازی شبکه‌های توزیع آب مورد توجه خاص پژوهشگران فعال در این حوزه بوده است (Scholten et al., 2014, Salehi, 2017). معمولاً پژوهش‌های انجام شده در حوزه بازسازی شبکه‌های توزیع آب، این موضوع را از زوایای مختلفی مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد و در هر یک از

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.91467.2447

آنها از انواع مختلفی از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود (Engelhardt et al., 2000, Tscheikner-Gratl et al., 2017, Salehi et al., 2017).

کلیات این مدل‌ها معمولاً مشتمل بر دو دیدگاه کلی است، که با یکدیگر اختلافاتی دارند (Kabir et al., 2014, Scholten et al., 2014, Tscheikner-Gratl et al., 2017).

دیدگاه اول مربوط به مدل‌های بهینه‌سازی سیاست‌های بازسازی است، که مبتنی بر تأمین اهداف مختلف و برنامه‌ریزی چند هدفه بازسازی شبکه است (Alvisi and Franchini, 2009, Siew et al., 2014, Tee et al., 2014, Li et al., 2015, Rahmani et al., 2015, Wang and Chen, 2015).

دیدگاه دوم مربوط به مدل‌های اولویت‌بندی سیاست‌های بازسازی شبکه و برنامه‌ریزی چند شاخصه این عملیات است (Cioc and Anton, 2004, Ho et al., 2010, Salehi et al., 2018, Carrico et al., 2012, Tabesh and Saber, 2012, Choi et al., 2015, Marzouk et al., 2015, Tscheikner-Gratl et al., 2016, Tscheikner-Gratl et al., 2017, Salehi et al., 2017).

در پژوهش‌هایی که مبتنی بر برنامه‌ریزی چند هدفه و بهینه‌سازی بازسازی شبکه است، اهداف مختلفی مانند بهینه‌سازی فشار حاکم بر شبکه و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در نظر گرفته شده و به‌صورت توابع وابسته تعریف می‌شود و بر این مبنا حالت بهینه عملیات بازسازی شبکه مشخص می‌شود (Siew et al., 2014, Tee et al., 2014).

در مدل‌های اولویت‌بندی و برنامه‌ریزی چند شاخصه، با تعیین معیارهای مؤثر در بازسازی شبکه توزیع آب (مانند قطر و جنس لوله‌ها و غیره) و همچنین طبقه‌بندی سیاست‌های مختلف بازسازی شبکه (اعم از تعمیر و یا تعویض)، فعالیت‌های بازسازی اولویت‌بندی و سیاست‌های بازسازی مربوط به هر بخش تعیین می‌شود (Cioc and Anton, 2004, Carrico et al., 2012, Choi et al., 2015).

بررسی‌های اخیر در حوزه بازسازی شبکه‌های توزیع آب قابلیت مطلوب مدل‌های اولویت‌بندی را تأیید می‌کند و عملکرد مطلوب این مدل‌ها را نسبت به مدل‌های برنامه‌ریزی چند هدفه نشان می‌دهد (Scholten et al., 2014, Tscheikner-Gratl et al., 2017). اساس این مدل‌ها مبتنی بر یک ساختار گزینشی عقلانی است و به گونه‌ای طراحی شده‌اند که می‌توانند علی‌رغم تحلیل معیارهای متعدد، عدم قطعیت متغیرهای تصمیم‌گیری را به‌طور قابل توجهی مرتفع نموده و گزینه‌های متعددی را به‌عنوان جواب مسئله ارائه دهند (Scholten et al., 2014, Salehi et al., 2017). بر این اساس همواره مدل‌های اولویت‌بندی یکی از مدل‌های مورد توجه در حوزه بازسازی شبکه‌های توزیع آب است (Kabir et al., 2014, Tscheikner-Gratl et al., 2017).

از جمله مهم‌ترین مدل‌های اولویت‌بندی توسعه داده شده در دهه اخیر می‌توان به مدل توسعه داده شده توسط (Tabesh and Saber, 2012, Ho et al., 2010, Tscheikner-et al., 2016, Marzouk et al., 2015, Marzouk and Gratl Osama, 2015, Salehi et al., 2017) اشاره نمود.

هو و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک مدل اولویت‌بندی ارائه داده‌اند که با تلفیق یک مدل شبکه عصبی و یک مدل GIS میزان نشت شبکه توزیع آب را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و بر اساس آن برنامه تعویض لوله‌ها را اولویت‌بندی می‌کند. نقطه قوت این پژوهش در قابلیت تحلیلی مدل آن بر روی توزیع مکانی اطلاعات حوادث لوله‌ها توسط GIS و مصورسازی آن است. با این حال باید در نظر داشت که مدل توسعه داده شده در این پژوهش عمدتاً متمرکز بر حوادث ناشی از رخداد زلزله بوده و عملاً در استفاده برای برنامه‌ریزی بازسازی شبکه‌های توزیع آب در حالت متعارف دارای محدودیت است (Ho et al., 2010).

تابش و صابر در سال ۲۰۱۲ یک مدل اولویت‌بندی برای بازسازی شبکه‌های توزیع آب ارائه دادند. مدل اولویت‌بندی ارائه شده متشکل از سه لایه هیدرولیکی، فیزیکی و گسیختگی لوله بود و در آن با استفاده از یک ساختار تحلیلی GIS-based، یک لایه اولویت‌بندی بازسازی لوله‌های شبکه ارائه شده بود. باید توجه داشت که الحاق نمودن یک لایه مجزا از ساختارهای مدون مدل‌های اولویت‌بندی مانند ELECTRE، PROMETHEE، AHP و TOPSIS به این مدل می‌تواند قابلیت‌های این مدل را در تعیین استراتژی‌های بازسازی بهبود ببخشد (Tzeng and Huang, 2011).

مرزوک و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک مدل اولویت‌بندی را ارائه نمودند که در آن متغیرهای دخیل در بازسازی شبکه‌های توزیع آب افزایش یافته بود ولی روش آنها در اولویت‌بندی بازسازی شبکه توزیع آب مبتنی بر روش Simo' بوده و از ساختار مدل‌های

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.91467.2447

اولویت‌بندی استفاده نشده است (Marzouk et al., 2015). همچنین مدل اولویت‌بندی این پژوهش بر اساس یک الگوی انعطاف‌ناپذیر صورت گرفته، که در صورت تراکم مشخصات لوله‌های یک منطقه در یک محدوده خاص، امکان متمایزسازی ارزش بازسازی این لوله‌ها وجود نخواهد داشت. در پژوهشی در سال ۲۰۱۶ یک مدل اولویت‌بندی فعالیت‌های بازسازی شبکه‌های توزیع آب ارائه شد، که در آن برای تعیین اولویت‌های بازسازی شبکه از مسیر و مقاطع خیابان‌ها استفاده شده بود (Tscheikner-Gratl et al., 2016). در پژوهش مذکور علاوه بر پارامترهای فنی، معیارهای اقتصادی نیز مورد توجه قرار گرفت. البته باید توجه داشت که بازسازی شبکه‌های توزیع آب به‌صورت یک ساختار یکپارچه با شبکه‌های فاضلاب در نظر گرفته شده بود که این ارزیابی یکپارچه الزاماً نمی‌تواند تمامی جزئیات مربوط به بازسازی شبکه‌های توزیع آب به‌صورت مستقل را در بر بگیرد. صالحی و همکاران در سال ۲۰۱۷ مدلی را برای اولویت‌بندی بازسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب معرفی نمودند که در آن پارامترهای تأثیرگذار اعم از عوامل فنی و غیر فنی به تعداد ۴۲ پارامتر، مورد توجه قرار گرفته است (Salehi et al., 2017). با این حال باید توجه داشت که یکی از اصلی‌ترین مشکلات برنامه‌ریزی فعالیت‌های بازسازی شبکه‌های توزیع آب عدم دسترسی به اطلاعات این پارامترها است و تدوین بهینه‌ترین برنامه‌های بازسازی با کمترین اطلاعات همواره ضروری است (Salehi et al., 2018).

با توجه به دغدغه مذکور، در پژوهش حاضر مدلی توسعه داده شد که بتواند برای برنامه‌ریزی عملیات بازسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب صرفاً از حداقل اطلاعات ساختاری شبکه استفاده نماید و مستقل از اطلاعات دوران بهره‌برداری باشد. مدل اولویت‌بندی توسعه داده شده در این پژوهش تحت عنوان WDSR-Min[1] نامگذاری شد، که در آن با استفاده از هسته تحلیل‌گر Fuzzy TOPSIS عملیات بازسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب اولویت‌بندی و سیاست‌های بازسازی آنها مستقل از اطلاعات بهره‌برداری تعیین می‌شود. در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد WDSR-Min، اولویت‌بندی بازسازی لوله‌های یک شبکه دو حلقه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت و سیاست‌های بازسازی این لوله‌ها تعیین شد. این عملیات با استفاده از دو روش استفاده از الگوی پیش فرض مدل WDSR-Min و استفاده از الگوی منطبق با شرایط شبکه دو حلقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بیانگر آن است که با استفاده از مدل WDSR-Min می‌توان اولویت‌های بازسازی لوله‌های شبکه و سیاست‌های مربوط به این عملیات را تعیین نمود.

۲- روش کار

۲-۱- مدل مفهومی WDSR-Min

معمولاً در شرکت‌های آب و فاضلاب، برنامه‌ریزی فعالیت‌های بازسازی شبکه‌های توزیع آب، بر اساس طیف گسترده‌ای از اطلاعات بهره‌برداری شبکه انجام می‌شود. در این میان مشکلات مربوط به فرایند ثبت این اطلاعات و عدم قطعیت موجود در آنها، همواره استفاده از این اطلاعات را برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های بازسازی با پیچیدگی‌های عدیده‌ای مواجه می‌سازد (Salehi et al., 2018).

لذا در این پژوهش یک مدل بازسازی شبکه‌های توزیع آب توسعه داده شد، که به‌صورت مستقل از اطلاعات بهره‌برداری و صرفاً با استفاده از "حداقل اطلاعات ساختاری شبکه" بتوان عملیات بازسازی لوله‌ها را اولویت‌بندی و سیاست‌های این فعالیت‌ها را تعیین نمود. از دیگر شاخص‌های متمایزکننده این مدل نسبت به دیگر مدل‌های موجود، برنامه‌ریزی فعالیت‌های بازسازی شبکه به‌صورت لوله به لوله است، به‌صورتی که "بهبود عملکرد هر لوله" به‌عنوان یک گزینه بازسازی ارائه می‌شود. در این مدل آنچه که لوله‌ها (گزینه‌های بازسازی) را از یکدیگر متمایز می‌سازد، معیارهایی است که شامل حداقل اطلاعات ساختاری شبکه یعنی مشخصات هیدرولیکی و مکانیکی لوله‌ها اعم از فشار، سرعت جریان، دبی، سن، طول و قطر لوله‌ها می‌شود. باید توجه داشت که چون کیفیت جنس لوله‌ها مبتنی بر کارخانه سازنده آنها متغیر و متفاوت است، لذا به‌عنوان یک معیار ساختاری قابل اعتماد در این پژوهش مورد توجه قرار نگرفته است. ساختار تحلیلی مدل WDSR-Min به گونه‌ای طرح‌ریزی شده که با استفاده از معیارهای هیدرولیکی و مکانیکی ذکر شده شرایط عملکردی هر یک از لوله‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و پس از مقایسه کلیه لوله‌ها با یکدیگر،

[1] WDSR-Min: Water Distribution Systems Rehabilitation-Minimum

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.91467.2447

اولویت‌ها و سیاست‌های بازسازی هر یک از لوله‌ها تعیین می‌شود. در شکل ۱ مدل مفهومی WDSR-Min نشان داده شده است.

۲-۲- اولویت‌بندی بازسازی لوله‌ها در مدل WDSR-Min

در مدل WDSR-Min برای تعیین اولویت‌های بازسازی هر یک از لوله‌های شبکه توزیع آب، شرایط عملکردی آن لوله نسبت به استانداردهای موجود مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس ابتدا محدوده‌های مطلوب و بحرانی هر یک از معیارهای هیدرولیکی/مکانیکی لوله‌ها مبتنی بر استانداردهای موجود (VPSPS, 2013, MPO, 2005) مشخص شد (جدول ۱)، سپس براساس جانمایی هر لوله در هر یک از محدوده‌های تعیین شده، اولویت بازسازی هر لوله نسبت به هر معیار مشخص شد. در جدول ۱ محدوده‌های پیش‌فرض معیارها در مدل WDSR-Min برای تعیین اولویت بازسازی هر لوله نسبت به هر معیار نشان داده شده است.

در این جدول مقادیر حداقل و حداکثر هر یک از معیارها در لایه پیش فرض مدل WDSR-Min براساس استانداردهای مذکور تعیین شده و تقسیم‌بندی فواصل بین مقادیر حداقل و حداکثر معیارها با استفاده از مقیاس هفت فاصله‌ای PORTER (از مقیاس‌های فاصله‌ای استاندارد و متشکل از هفت فاصله یکسان) صورت گرفته است (Asgarpour, 2012). بر این اساس میزان اهمیت هر لوله برای عملیات بازسازی نسبت به هر یک از معیارها در یکی از

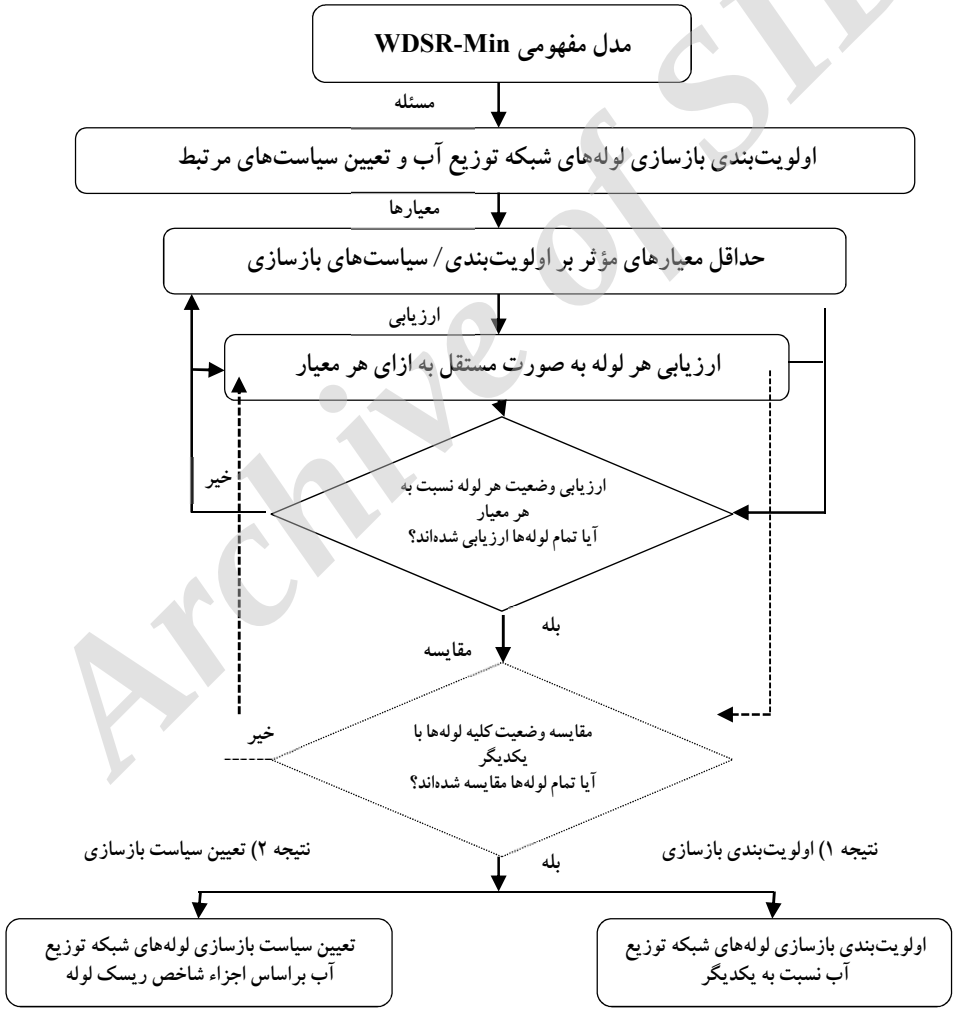

Fig. 1. Conceptual model of WDSR-Min

شکل ۱- مدل مفهومی WDSR-Min

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱- محدوده‌های پیش فرض معیارها در مدل WDSR-Min برای تعیین اولویت بازسازی هر لوله نسبت به هر معیار

Table 1. The pre-defined template layer of WDSR-Min model with relevant references

Criteria	The pipe importance for rehabilitation according to each criteria							Relevant references
	Very low	Low	Relatively low	Medium	Relatively high	High	Very high	
Pressure (m)	26	30.8 ≥ 23.6 ≤	35.6 ≥ 21.2≤	40.4 ≥ 18.8 ≤	45.2 ≥ 16.4 ≤	50 ≥ 14 ≤	14 > 50 <	VPSPS 2013
Flow velocity (m/s)	1 ≥ 0.8 ≤	1.2 ≥ 0.7 ≤	1.4 ≥ 0.6 ≤	1.6 ≥ 0.5 ≤	1.8 ≥ 0.4 ≤	2 ≥ 0.3 ≤	0.3 > 2 <	VPSPS 2013
Flow rate (l/s)	75 ≥	90 ≥ 75 <	105 ≥ 90 <	120 ≥ 105 <	135 ≥ 120 <	150 ≥ 135 <	150 <	VPSPS 2013
Length (m)	10 ≥	108 ≥ 10 <	206 ≥ 108 <	304 ≥ 206 <	402 ≥ 304 <	500 ≥ 402 <	500 <	MPO 2005
Diameter (Stiffness) (mm)	500 <	500 ≥ 403 <	403 ≥ 306 <	306 ≥ 209 <	209 ≥ 112 <	112 ≥ 15 <	15 ≥	VPSPS 2013 MPO 2005
Diameter (Flow) (mm)	15 ≥	112 ≥ 15 <	209 ≥ 112 <	306 ≥ 209 <	403 ≥ 306 <	500 ≥ 403 <	500 <	VPSPS 2013 MPO 2005

هفت حالت اهمیت "بسیارکم"، "کم"، "تا حدودی کم"، "متوسط"، "تا حدودی زیاد"، "زیاد" و "بسیار زیاد" قرار می‌گیرد. اولویت‌های بازسازی هر لوله به ازای هر معیار تعیین و با در نظر گرفتن این اولویت‌ها نسبت به کلیه معیارها، نهایتاً شاخص RPI برای هر لوله تعیین می‌شود. منظور از RPI در این مدل، اولویت بازسازی هر لوله است. اثرگذاری نوسانات هر یک از معیارها بر RPI لوله‌ها در جدول ۲ نیز شرح داده شده است.

۲-۳- تعیین سیاست‌های بازسازی لوله‌ها در مدل WDSR-Min

در مدل WDSR-Min با استفاده از جدول ۱ علاوه بر اولویت بازسازی لوله‌ها، می‌توان سیاست‌های بازسازی آنها را تعیین نمود. برای این امر از مفهوم شاخص ریسک لوله‌ها استفاده می‌شود. شاخص ریسک لوله در شبکه توزیع آب عبارت است از (AWWA, 2014):

(۱) شاخص ریسک لوله = احتمال رخداد حادثه در هر لوله × پیامد رخداد حادثه در هر لوله

که در آن، منظور از حادثه تغییر مشخصات کیفی، هیدرولیکی و یا سازه‌ای لوله از حالت استاندارد به حالت نامطلوب است (Farley, 2001). در مدل WDSR-Min احتمال رخداد حادثه با شاخص FPI[1] و پیامد رخداد حادثه با شاخص FCI[2] نشان داده می‌شوند. در این مدل اثر گذاری هر یک از معیارهای هیدرولیکی و مکانیکی بر FPI و FCI به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول ۳ اثرگذاری این معیارها بر این دو شاخص به‌طور جداگانه ارائه شده است. مقادیر FPI و FCI دقیقاً مشابه شاخص RPI و با استفاده از جدول ۱ و با در نظر گرفتن اثرگذاری معیارها بر این شاخص‌ها (جدول ۳) تعیین می‌شوند. لذا با توجه به این جدول، همواره مقادیر عددی RPI و FPI مشابه یکدیگر هستند، زیرا می‌توان اثبات نمود که کلیه معیارها بر شاخص FPI مؤثر است (Farley, 2001, Farley and Trow, 2003, Thornton et al., 2008). لیکن با توجه به این که کلیه معیارها بر شاخص FCI مؤثر نمی‌باشد، لذا مقدار FCI مشابه RPI نخواهد شد (جدول ۳). پس از تعیین مقادیر عددی FPI و FCI با استفاده از جدول ۱ (که بین ۰ تا ۱ می‌باشند)، و با در نظر گرفتن اثر ترکیبی "احتمال" و "پیامد" رخداد حادثه (AWWA, 2014)، سیاست‌های بازسازی لوله‌ها تعیین می‌شود. در شکل ۲ اثر ترکیبی این شاخص‌ها برای تعیین سیاست‌های بازسازی نشان داده شده است. به‌عنوان مثال سیاست بازسازی لوله‌ای با FPI=۰/۷ و FCI=۰/۴ برابر با "نوسازی برنامه‌ریزی شده" است.

[1] FPI: Failure Probability Index
[2] FCI: Failure Consequence Index

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲- چگونگی اثرگذاری معیارها بر RPI لوله‌ها در مدل WDSR-Min

Table 2. The criteria affecting the prioritization of pipes rehabilitation in WDSR-Min model

معیارها	تأثیر نوسانات معیار بر اولویت بازسازی لوله
فشار	لوله‌هایی با فشار بیشتر و یا کمتر از فشار ایده‌آل (۲۶ تا ۳۰ متر ستون آب) (Trifunovic, 2006; Shammas and Wang, 2011, VPSPS, 2013)، تحت شرایط ترکیدگی و افزایش نشت (شکست فیزیکی) و یا رخداد فشار منفی و آلودگی شبکه (گسیختگی کیفی) قرار می‌گیرند (Farley, 2001, Farley and Trow, 2003, Thornton et al., 2008). لذا لوله‌ها را می‌توان براساس میزان نزدیکی فشار آنها به فشار ایده‌آل برای بازسازی اولویت‌بندی نمود.
سرعت جریان	لوله‌هایی با سرعت جریان بیشتر یا کمتر نسبت به سرعت ایده آل استاندارد (۰/۸ تا ۱ متر بر ثانیه) (Walski et al., 2003, Trifunovic, 2006, Swamee and Sharma, 2008, Shammas and Wang, 2011, VPSPS, 2013) می‌توانند شرایط رخداد فرسایش زودرس و یا ترسیب زودرس در لوله را فراهم نمایند (Trifunovic, 2006). این امر منجر به ایجاد اختلال کمّی و کیفی در فرایند آبرسانی آنها می‌شود (Bhave and Gupta, 2006)؛ لذا لوله‌ها را می‌توان براساس میزان نزدیکی سرعت جریان آنها به سرعت جریان ایده‌آل برای بازسازی اولویت‌بندی نمود.
دبی	لوله‌هایی با حجم دبی بالاتر شاخه‌های اصلی‌تر شبکه محسوب شده (Punmia et al., 1995, Swamee and Sharma, 2008)، که شکست فیزیکی و یا گسیختگی کیفی آنها در دوران بهره‌برداری می‌تواند تبعات منفی بالاتری داشته باشد و جمعیت بالاتری را تحت شرایط بحران آبرسانی قرار دهد. لذا لوله‌ها را می‌توان براساس میزان کمیت دبی آنها برای عملیات بازسازی اولویت‌بندی نمود.
سن لوله	هر چه سن لوله بیشتر باشد، احتمال شکست فیزیکی و یا گسیختگی کیفی لوله در دوران بهره‌برداری بالاتر بوده و دارای اهمیت بالاتری برای بازسازی خواهد بود.
طول لوله	عموماً با توجه به آنکه بار ترافیکی و بار خاک وارده بر لوله‌ها و همچنین بار ناشی از وزن آنها به صورت یک بار گسترده اعمال می‌گردد (Asgari et al., 2005, Shakib and Emadi, 2012)، و نقاط انتهایی لوله‌ها متناسب با شرایط بستر به صورت تکیه‌گاه‌های گیردار و یا مفصلی عمل می‌کنند (Moser, 1990, atkins and Anderson, 2010)؛ لذا حداکثر "بار خمشی طولی" وارده بر لوله‌ها مشابه با بار خمشی بارگذاری گسترده تیرها تحت تکیه‌گاه‌های گیردار ($Wl^2/12$) و یا تکیه‌گاه‌های مفصلی ($Wl^2/8$) می‌باشد (Moser, 1990, Hibbeler et al., 2006, Jarquio, 2007). بر این مبنا کاملا مشخص است که با افزایش طول لوله‌ها بار وارده بر آنها افزایش و احتمال شکست فیزیکی لوله‌ها در اثر بارگذاری خارجی افزایش می‌یابد. لذا از این دیدگاه می‌توان لوله‌هایی با طول بیشتر را از حیث بازسازی دارای ارجحیت بالاتری دانست.
قطر لوله (سختی)	با توجه به ۳ نکته اساسی که: ۱) سختی خمشی لوله در سطح مقطع ($S_f = E^* \times I / B_C^3$) وابسته به مدول الاستیسیته لوله در حالت کرنش مسطح (E^*)، ممان اینرسی لوله ($I = t^3/12$، t ضخامت جداره لوله) و قطر خارجی لوله (B_C) می‌باشد (Moser, 1990, Asgari et al., 2005, Shakib and Emadi, 2012)؛ ۲) نحوه توزیع بار خارجی بر روی لوله ($Y = E_S^* / S_f$) تابعی از نسبت مدول الاستیسیته خاک اطراف لوله در حالت کرنش مسطح (E_S^*) و سختی خمشی لوله است (Asgari et al., 2005, Shakib and Emadi, 2012)؛ و ۳) هر چه مقدار Y کمتر باشد معرف آن است که بار بیشتری بر روی لوله قرار می‌گیرد (Shakib and Emadi, 2012)؛ بنابراین می‌توان اذعان نمود که تحت یک جنس ثابت از خاک و لوله، هر چه قطر لوله کاهش یابد احتمال شکست فیزیکی لوله در آن افزایش می‌یابد. لذا از این دیدگاه می‌توان لوله‌هایی با قطر کمتر را از حیث بازسازی دارای ارجحیت بالاتری دانست.
قطر لوله (جریان)	کاملاً مشهود است که هر چه لوله دارای قطر بیشتری باشد، از نظر آبرسانی ارزش و اهمیت بالاتری داشته و لذا می‌توان از منظر آبرسانی اشاره داشت که هر چه قطر لوله بیشتر باشد، از حیث بازسازی دارای ارجحیت بالاتری است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳- اثرگذاری معیارها بر FPI و FCI در مدل WDSR-Min

Table 3. The effects of the criteria on FPI and FCI in WDSR-Min model

معیارها	اثرگذاری معیار بر FPI	اثرگذاری معیار بر FCI
	آیا معیار بر افزایش احتمال رخداد حادثه کیفی/هیدرولیکی/سازه‌ای در لوله مؤثر است؟	آیا معیار بر افزایش پیامد رخداد حادثه کیفی/هیدرولیکی/سازه‌ای در لوله مؤثر است؟
فشار	بله (ترکیدگی یا آلودگی بیشتر در فشارهای نامطلوب‌تر)	بله (ترکیدگی مخرب تر و یا آلایندگی بیشتر در فشارهای نامطلوب‌تر)
سرعت جریان	بله (فرسایش و یا رسوب‌دهی بیشتر در سرعت‌های نامطلوب‌تر)	خیر (نوسانات سرعت جریان لوله تأثیری در پیامد حادثه ندارد)
دبی	بله (افت فشار بیشتر در دبی‌های بالاتر)	بله (اختلال آبرسانی به جمعیت بیشتر در دبی‌های بالاتر)
سن لوله	بله (شکست فیزیکی بیشتردر سنین بالاتر)	خیر (سن لوله تأثیری در پیامد حادثه ندارد)
طول لوله	بله (شکست فیزیکی بیشتر در طول‌های بزرگ‌تر)	بله (اختلال آبرسانی به جمعیت بیشتر در طول‌های بزرگ‌تر)
قطر لوله	بله (شکست فیزیکی بیشتر در اقطار کمتر)	بله (اختلال آبرسانی به جمعیت بیشتر در اقطار بزرگ‌تر)

Fig. 2. Determination of pipe rehabilitation strategies using combined effect of FPI and FCI (AWWA 2014) in WDSR-Min model

شکل ۲- تعیین سیاست بازسازی هر لوله با استفاده از اثر ترکیبی FPI و FCI (AWWA 2014) در مدل WDSR-Min

۲-۴- هسته تحلیل گر Fuzzy TOPSIS در WDSR-Min

همانطور که پیش‌تر نیز ذکر شد در مدل WDSR-Min برابر با تعداد لوله‌ها، گزینه بازسازی تعریف می‌شود، که این تعدد گزینه، لزوم استفاده از یک مدل تصمیم‌گیری توانمند برای مدل‌سازی حجم قابل توجهی از گزینه‌ها و معیارها را ضروری ساخته است. لذا در این مدل برای هسته تحلیل‌گیر از مدل تصمیم‌گیری TOPSIS استفاده شد. علت انتخاب این مدل به‌عنوان هسته تحلیل‌گر WDSR-Min، قابلیت مطلوب این روش در تحلیل ساختارهایی است که معیارها و گزینه‌های تصمیم‌گیری متعددی دارند (Bazargan-Lari, 2014, Tscheikner-Gratl et al., 2017, Salehi et al., 2017).

مدل TOPSIS اولین بار در سال ۱۹۸۱ ارائه شد در این روش m گزینه به وسیله n معیار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Tzeng and Huang, 2011, Vommi, 2017).

در این پژوهش برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در اطلاعات ساختاری شبکه‌های توزیع آب، هر یک از معیارها فازی‌سازی شدند (Kahraman, 2008, Azar and Faraji, 2009, Ataei, 2011, Marzouk and Osama, 2015). برای فازی‌سازی هر یک از این معیارها، به هر یک از ۷ ناحیه مربوط به اهمیت لوله‌ها یک عدد فازی ذوزنقه‌ای استاندارد (Ataei, 2011) و منطبق با مقیاس هفت فاصله‌ای PORTER (Ataei, 2011, Salehi et al., 2017) تخصیص داده می‌شود. در جدول ۴ اعداد فازی مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.91467.2447

جدول ۴- اعداد فازی مورد استفاده در مدل WDSR-Min

Table 4. Fuzzy values used in the WDSR-Min model

اهمیت لوله‌ها برای بازسازی و اعداد فازی مربوط به هر ناحیه اهمیت						
بسیار زیاد	زیاد	نسبتاً زیاد	متوسط	نسبتاً کم	کم	بسیارکم
(۸,۹,۱۰,۱۰)	(۷,۸,۸,۹)	(۵,۶,۷,۸)	(۴,۵,۵,۶)	(۲,۳,۴,۵)	(۱,۲,۲,۳)	(۰,۰,۱,۲)

روش TOPSIS مورد استفاده در WDSR-Min مبتنی بر منطق فازی یعنی روش Fuzzy TOPSIS بوده، که کاملا مشابه مدل TOPSIS کلاسیک است و تنها مراحل تحلیلی آن با استفاده از اعداد فازی تشریح می‌شود (Ataei 2011). در شکل ۳ گام‌های محاسباتی هسته تحلیل‌گر Fuzzy TOPSIS در مدل WDSR-Min نشان داده شده است. در تشریح هر یک از گام‌های هسته تحلیل‌گر Fuzzy TOPSIS (شکل ۳) می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

گام اول: در این گام با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی و اطلاعات شبکه توزیع آب مورد مطالعه، مقادیر هر یک از معیارهای ذکر شده در بخش ۲-۱ برای هر یک از لوله‌ها تعیین می‌شود؛

گام دوم: در این گام پس از تعیین اهمیت بازسازی هر لوله نسبت به هر معیار و تخصیص عدد فازی مربوطه (با استفاده از جدول ۱)، ماتریس تصمیم‌گیری فازی توسط مدل WDSR-Min تشکیل داده می‌شود؛

گام سوم: با توجه به این که معیارهای مختلف دارای مقیاس‌های سنجش متفاوتی می‌باشند، لذا در این گام عملیات بی‌مقیاس‌سازی مقادیر فازی کلیه معیارها انجام می‌شود، تا به این صورت کلیه اعداد فازی یکپارچه و هم جنس شوند؛

گام ۱: تشکیل ماتریس اطلاعات شبکه توزیع آب با درایه‌های X_{mc} (با استفاده از داده‌های شرکت آب و فاضلاب)

X_{mc}: اطلاعات لوله **m** ام از شبکه نسبت به معیار **c** ام

گام ۲: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی با درایه‌های $\tilde{x}_{mc}$ (محاسبه توسط WDSR-Min)

$\tilde{x}_{mc}$: عدد فازی مربوط به شرایط لوله **m** ام از شبکه نسبت به معیار **c** ام

گام ۳: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی بی‌مقیاس شده با درایه‌های $\tilde{v}_{mc}$ (محاسبه توسط WDSR-Min)

$$\tilde{v}_{mc} = \left(\frac{x_{min(mc)}}{x_{max+(c)}}, \frac{x_{avel(mc)}}{x_{max+(c)}}, \frac{x_{ave2(mc)}}{x_{max+(c)}}, \frac{x_{max(mc)}}{x_{max+(c)}} \right) \quad / \quad x_{max+(c)} = \underset{m}{Max}\ x_{max(mc)}$$

$\tilde{v}_{mc}$: عدد فازی بی‌مقیاس شده مربوط به شرایط لوله **m** ام از شبکه نسبت به معیار **c** ام

گام ۴: تعیین گزینه ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی (محاسبه توسط WDSR-Min)

گزینه ایده‌آل فازی: $V^{+} = \{\tilde{v}_{01}^{+}, \ldots, \tilde{v}_{c}^{+}\} \quad / \quad \tilde{v}_{c}^{+} = Max_{m}\{\tilde{v}_{mc}\}$

گزینه ایده‌آل فازی: $V^{-} = \{\tilde{v}_{01}^{-}, \ldots, \tilde{v}_{c}^{-}\} \quad / \quad \tilde{v}_{c}^{-} = Min_{m}\{\tilde{v}_{mc}\}$

گام ۵: تعیین فاصله هر لوله از گزینه ایده‌آل/گزینه ضد ایده‌آل (محاسبه توسط WDSR-Min)

فاصله از گزینه ایده‌آل/گزینه ایده‌آل $S_m^{\pm} = \sum_{c=01}^{c} d(\tilde{v}_{mc}, \tilde{v}_{c}^{\pm})$

$$= \sqrt{\frac{1}{4}\left[(v_{min(mc)} - v_{min(c)}^{\pm})^2 + (V_{avel(mc)} - V_{avel(c)}^{\pm})^2 + (V_{ave2(mc)} - V_{ave2(c)}^{\pm})^2 + (V_{max(mc)} - V_{max(c)}^{\pm})^2 \right]}$$

گام ۶: تعیین شاخص RPI، FPI و FCI لوله m ام از شبکه توزیع آب (محاسبه توسط WDSR-Min)

$$RPI_m / FPI_m / FCI_m = \frac{S_m^{-}}{S_m^{+} + S_m^{-}}$$

Fig. 3. Computational steps of Fuzzy TOPSIS used in WDSR-Min model

شکل ۳- مراحل محاسباتی هسته تحلیل‌گر Fuzzy TOPSIS در مدل WDSR-Min

Archive of SID
www.SID.ir

گام چهارم: در این گام با تعریف و تعیین لوله‌هایی با بیشترین و کمترین اهمیت برای بازسازی در کلیه معیارها (گزینه ایده‌آل و ضد ایده‌آل)، شاخص‌هایی ایجاد می‌شود تا اهمیت لوله‌های شبکه برای بازسازی بر این اساس تعیین شود؛

گام پنجم: در این گام وضعیت هر لوله در هر معیار نسبت به گزینه‌های ایده‌آل و ضد ایده‌آل سنجیده می‌شود؛

گام ششم: در این گام شاخص‌های CPI/FPI/RPI تعیین می‌شود. در واقع عملیات تحلیلی گام‌های قبل برای هر یک از این شاخص‌ها جداگانه انجام می‌شود و نهایتاً این سه شاخص به‌صورت مجزا ارائه می‌شود.

لازم به ذکر است که این شاخص‌ها سه عدد بین صفر و ۱ به ازای هر لوله بوده، که هر چه این شاخص‌ها به عدد ۱ نزدیک‌تر باشند، در RPI نشان‌دهنده اولویت بالاتر لوله برای بازسازی، در FPI بیانگر افزایش احتمال رخداد حادثه در آن لوله و در FCI نشان‌دهنده پیامدهای نامطلوب‌تر حادثه در صورت رخداد در آن لوله است. اثر ترکیبی FPI و FCI در حالت نزدیکی هر دو شاخص به عدد ۱ منجر به بحرانی‌تر شدن سیاست‌های بازسازی لوله می‌شود (شکل ۲).

۳- بازسازی لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از مدل WDSR-Min

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل WDSR-Min یک شبکه دو حلقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. این شبکه اولین بار در سال ۱۹۷۷ برای معرفی روش طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب توسعه داده شد (Alperovits and Shamir, 1977). سپس در سال‌های آتی توسط پژوهشگران متعددی در حوزه آبرسانی شهری مورد استفاده قرار گرفت (Gomes et al., 2008, Ekinci and Konak, 2009, Chandramouli and Alleswararao, 2011, Sil et al., 2013)

طرح شماتیک این شبکه دو حلقه‌ای به‌صورت شکل ۴ است. در این شبکه سن لوله‌ها مشخص نیست، و این معیار در تحلیل‌های مربوط به این شبکه در نظر گرفته نشده است. با استفاده از مشخصات لوله‌ها و گره‌ها که برگرفته از اطلاعات مرجع اولیه آن است (Alperovits and Shamir, 1977)، این شبکه در نرم‌افزار EPANET مدل‌سازی شد و نتایج تحلیل هیدرولیکی به‌صورت جداول ۵ و ۶ به‌دست آمد. در این فرایند برای تعیین فشار هر لوله، میانگین فشار گره‌های مرتبط با هر لوله در نظر گرفته شد.

۳-۱- تعیین RPI لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای

روش اول- تحلیل مسئله با استفاده از الگوی پیش‌فرض مدل WDSR-Min

برای تعیین شاخص اولویت بازسازی (RPI) لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای، ابتدا از لایه الگوی پیش فرض مدل WDSR-Min استفاده شد. منظور از لایه پیش فرض جدول ۱ است. مقدار به‌دست آمده برای هر یک از معیارهای لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای (جدول ۶)

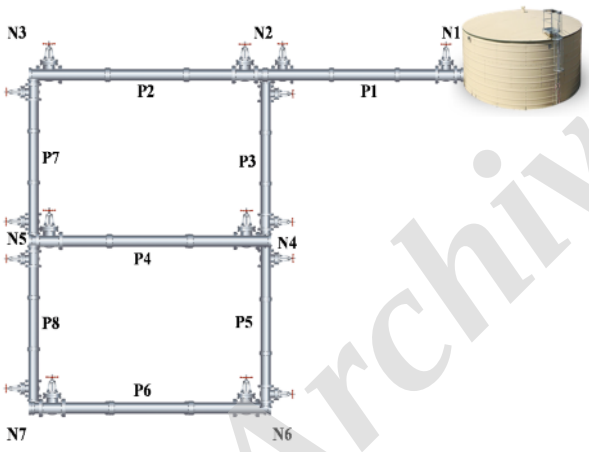

Fig. 4. The two-loop water distribution system assessed in WDSR-Min model

شکل ۴- شبکه دو حلقه‌ای مورد بررسی در مدل WDSR-Min

جدول ۵- اطلاعات پایه و نتایج تحلیل هیدرولیکی گره‌های شبکه دو حلقه‌ای به وسیله EPANET

Table 5. The basic data and the hydraulic analysis results for the nodes of the two-loop network using EPANET

Parameter	Determined by	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
Elevation (m)	Basic data	210	150	160	155	150	165	160
Demand (m^3/hr)	Basic data	--	100	100	120	270	330	200
Pressure (m)	EPANET	0	53.25	30.46	43.45	33.81	30.44	30.55

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۶- اطلاعات پایه و نتایج تحلیل هیدرولیکی لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای به وسیله نرم‌افزار EPANET

Table 6. The basic data and the hydraulic analysis results for the pipes of the two-loop network using EPANET

Parameter	Determined by	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
C_{HW}	Basic data	130	130	130	130	130	130	130	130
Diameter (mm)	Basic data	457.2	254	406.4	101.6	406.4	254	254	25.4
Length (m)	Basic data	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Velocity (m/s)	EPANET	1.9	1.85	1.46	1.12	1.14	1.1	1.3	0.32
Flow (l/s)	EPANET	311.1	93.6	189.8	9	147.4	55.7	65.8	0.2
Pressure (m)	EPANET	26.6	41.8	48.3	38.6	36.9	30.5	32.1	32.2

جدول ۷- RPI لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای و اولویت بازسازی آنها با استفاده از الگوی پیش فرض مدل WDSR-Min

Table 7. The Pipes' RPI/Priorities in the two-loop network using pre-defined template of WDSR-Min model

Parameter	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
RPI	0.5939	0.5677	0.6572	0.3515	0.5055	0.2882	0.3522	0.4466
Rehabilitation priority	2	3	1	7	4	8	6	5

با محدوده‌های الگوی پیش فرض WDSR-Min مقایسه و سپس با توجه به اهمیت هر لوله نسبت به هر معیار، یک عدد فازی به آن اختصاص داده شد (جدول ۱). بر این اساس ماتریس تصمیم‌گیری فازی تشکیل شد (گام ۲ از شکل ۳) و با انجام دیگر مراحل محاسباتی، نهایتاً شاخص RPI برای هر یک از لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای تعیین شد (شکل ۳). RPI لوله‌های این شبکه و اولویت بازسازی آنها در جدول ۷ نشان داده شده است. همانطور که پیش‌تر نیز ذکر شد هر چه RPI یک لوله به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، دارای اولویت بالاتری برای بازسازی است.

روش دوم- تحلیل مسئله با استفاده از الگوی منطبق با شرایط مسئله:

در این روش برای تعیین RPI لوله‌های شبکه، لایه الگو با شرایط مسئله تطبیق داده شد. برای این امر حداکثر/حداقل معیارها با مقادیر حداکثر/حداقل داده‌های لوله‌های شبکه (جدول ۶) تطبیق و مقیاس هفت فاصله‌ای PORTER براساس این مقادیر مشخص شد (جدول ۸).

جدول ۸- لایه الگوی مطابق با داده‌های مسئله

Table 8. The template layer consistent with the problem data

Criteria	The Pipe importance for rehabilitation according to each criteria	Very low	Low	Relatively low	Medium	Relatively high	High	Very high	Relevant References
	The corresponding fuzzy number	(0,0,1,2)	(1,2,2,3)	(2,3,4,5)	(4,5,5,6)	(5,6,7,8)	(7,8,8,9)	(8,9,10,10)	
Pressure (m)		30	33.66 ≥ 29.32 ≤	37.32 ≥ 28.64≤	40.98 ≥ 27.96 ≤	44.64 ≥ 27.28 ≤	48.3 ≥ 26.6 ≤	26.6 > 48.3 <	Problem data
Flow velocity (m/s)		1 ≥ 0.8 ≤	1.18 ≥ 0.704 ≤	1.36 ≥ 0.608 ≤	1.54 ≥ 0.512 ≤	1.72 ≥ 0.416 ≤	1.9 ≥ 0.32 ≤	0.32 > 1.9 <	Problem data
Flow rate (l/s)		0.2 ≥	62.38 ≥ 0.2 <	124.56 ≥ 62.38 <	186.74 ≥ 124.56 <	248.92 ≥ 186.74 <	311.1 ≥ 248.92 <	311.1 <	Problem data
Length (m)		10 ≥	108 ≥ 10 <	206 ≥ 108 <	304 ≥ 206 <	402 ≥ 304 <	500 ≥ 402 <	500 <	MPO 2005
Diameter (Stiffness) (mm)		457.2 <	457.2 ≥ 370.84 <	370.84 ≥ 284.48 <	284.48 ≥ 198.12 <	198.12 ≥ 111.76 <	111.76 ≥ 25.4 <	25.4 ≥	Problem data
Diameter (Flow) (mm)		25.4 ≥	111.76 ≥ 25.4 <	198.12 ≥ 111.76 <	284.48 ≥ 198.12 <	370.84 ≥ 284.48 <	457.2 ≥ 370.84 <	457.2 <	Problem data

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۹- RPI لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای و اولویت بازسازی آنها با استفاده از الگوی مطابق با شرایط مسئله

Table 9. The Pipes' RPI/Priorities in two-loop network using template layer consistent with the problem data

Parameter	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
RPI	0.7017	0.5773	0.6081	0.3888	0.4206	0.3261	0.3906	0.4280
Rehabilitation Priorities	1	3	2	7	5	8	6	4

جدول ۱۰- نتایج FPI و FCI لوله‌های شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای و سیاست‌های بازسازی در مدل WDSR-Min

Table 10. FPI/FCI of pipes in the two-loop water distribution system in WDSR-Min model

Parameter	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
FPI	0.5939	0.5677	0.6572	0.3515	0.5055	0.2882	0.3522	0.4466
FCI	0.4826	0.5263	0.6122	0.3162	0.6733	0.3465	0.3865	0.2978
Rehabilitation Strategies	Assess Proactively	Assess Proactively	Schedule Renewal	Repair on Failure	Schedule Renewal	Monitor	Assess Proactively	Repair on Failure

سپس مقادیر معیارها در لوله‌ها با الگوی جدید مقایسه شد. RPIهای به‌دست آمده به این روش در جدول ۹ ارائه شده است.

۳-۲- تعیین FPI و FCI لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای

برای تعیین شاخص احتمال ریسک (FPI) و شاخص پیامد ریسک (FCI) در لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای از همان الگوی پیش فرض مدل WDSR-Min استفاده شد (جدول ۱)؛ زیرا تطبیق لایه الگوی مدل با شرایط مسئله اگر چه می‌تواند RPI دو لوله با شرایط نزدیک به یکدیگر را بهینه‌تر نماید، ولی الزاماً تعیین سیاست‌های بازسازی متفاوت برای این دو لوله صحیح نیست. در این راستا برای تعیین FPI و FCI هر لوله مشابه آنچه که برای تعیین RPI انجام شد، مقادیر به‌دست آمده برای معیارهای هر یک از لوله‌ها (جدول ۵) با محدوده‌های تعریف شده جدول ۱ به‌طور مجزا مقایسه شد، و به‌صورت جداگانه و طی مراحل تحلیلی مجزا هر یک از شاخص‌های FPI و FCI برای هر یک از لوله‌ها به‌دست آمد.

در این میان باید توجه داشت نحوه اثرگذاری هر یک از معیارها بر شاخص FPI مشابه اثرگذاری آنها بر شاخص RPI است؛ لذا مقدار آنها مشابه یکدیگر به‌دست آمد. لیکن در تعیین شاخص FCI با توجه به آن که معیار سرعت جریان تأثیری در مقدار این شاخص ندارد (جدول ۳)، لذا مقدار به‌دست آمده برای این شاخص متفاوت شد.

درشاخص‌های FPI و FCI نیز هر چه مقدار عددی به‌دست آمده نزدیک‌تر به عدد ۱ باشد، نشان‌دهنده شرایط بحرانی‌تر برای آنها است که ضروری است با توجه به اثر ترکیبی آنها (شکل ۲)، سیاست‌های بازسازی بحرانی‌تری برای لوله‌های مرتبط به آنها اتخاذ نمود. در جدول ۱۰ شاخص‌های FPI و FCI به‌دست آمده برای هر یک از لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای و سیاست‌های بازسازی آنها نشان داده شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- اولویت‌بندی بازسازی لوله‌ها

با ارزیابی نتایج به‌دست آمده از اولویت‌بندی بازسازی لوله‌ها در هر دو روش می‌توان نتایج زیر را به‌دست آورد:

اولویت اول

همانطور که در نتایج به‌دست آمده مشخص است، اولویت‌های ارجح بازسازی مربوط به لوله‌هایی است که نقشی حیاتی در آبرسانی شبکه مورد مطالعه دارند (لوله‌های ۱ تا ۳)؛ زیرا دیگر لوله‌های شبکه عملاً از این لوله‌ها تغذیه می‌شوند. لیکن با انطباق الگوی WDSR-Min بر شرایط حاکم بر شبکه، اولویت‌های بازسازی بهینه‌تر شده و عملاً لوله شماره ۱ که به‌عنوان خط اصلی تغذیه این دو شبکه محسوب می‌شود، بالاترین اولویت را به خود اختصاص داده است. این در حالی است که در روش اول اولویت این لوله در جایگاه دوم قرار داشت. لذا به‌نظر می‌رسد که عملکرد مدل در روش دوم بهینه‌تر شده باشد.

اولویت دوم و سوم

لوله‌های ۲ و ۳ پس از لوله ۱ عملاً لوله‌های تغذیه‌کننده دیگر لوله‌ها و گره‌های شبکه می‌باشند. لذا مشخصات هیدرولیکی و مکانیکی آنها بحرانی‌تر است. لیکن باید توجه داشت که در هر دو روش تحلیلی،

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.91467.2447

لوله ۳ ارجحیت بازسازی بالاتری نسبت به لوله ۲ دارد که با نگاهی بر مشخصات لوله ۳ اعم از فشار حاکم، سرعت جریان و دبی لوله و مقایسه آن با لوله ۲ می‌توان صحت این ارجحیت را شناسایی نمود. لذا انتخاب مدل مبنی بر اولویت دوم بازسازی برای لوله ۳ و همچنین اولویت سوم برای لوله ۲ در هر دو روش صحیح به نظر می‌رسد.

اولویت چهارم و پنجم

این اولویت‌ها در هر دو روش متعلق به لوله‌های شماره ۵ و ۸ است؛ با این تفاوت که در روش اول لوله شماره ۵ و در روش دوم لوله شماره ۸ ارجح است. باید توجه داشت که شرایط فشار حاکم بر هر دو لوله تقریباً شرایط یکسانی است. لیکن علی‌رغم آن که لوله شماره ۵ دبی مصرفی بالاتری را تأمین می‌نماید، به‌علت آن که لوله شماره ۸ دارای قطر کمتری است و شرایط نامطلوبی از نظر سرعت جریان دارد، در روش دوم اولویتی بالاتر از لوله شماره ۵ پیدا نموده است. البته باید توجه داشت که در شرایط عملی و با توجه به دبی تأمین شده توسط لوله ۵، می‌توان اولویت بازسازی این دو لوله را عملاً یکسان در نظر گرفت.

اولویت ششم، هفتم و هشتم

در هر دو روش اول و دوم، این اولویت‌ها به‌ترتیب به لوله‌های ۷، ۴ و ۶ اختصاص یافته است. با توجه به مشخصات هر یک از این لوله‌ها مشخص می‌شود که هر دو لوله ۷ و ۶ دبی مصرفی بالاتری را تأمین می‌نمایند. لیکن با توجه به آن که دبی تأمین کننده لوله ۶ کمتر است و همچنین لوله ۴ قطر کوچک‌تری دارد، ترتیب اولویت بازسازی این لوله‌ها به‌صورت لوله ۷، ۴ و ۶ است که به نظر می‌رسد عملکرد مدل در این محدوده نیز منطقی بوده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از اولویت‌بندی عملیات بازسازی لوله‌ها می‌توان اذعان نمود که نتایج تحلیلی مدل WDSR-Min در حالتی که الگوی پیش‌فرض مدل منطبق بر شرایط منطقه مورد مطالعه است، از دقت بهتری برخوردار است.

بر این مبنا به‌منظور استفاده از مدل WDSR-Min برای تعیین اولویت‌های بازسازی لوله‌ها بهتر است همواره لایه الگوی مدل بر اساس مقدار معیارها در منطقه مورد مطالعه تطبیق داده شود.

۴-۲- تعیین سیاست بازسازی لوله‌ها

بر اساس نتایج به‌دست آمده می‌توان اذعان داشت که لوله‌هایی با اولویت بالاتر (لوله‌های ۱، ۲، ۳، ۵ و ۸) ۸۰ درصد دارای سیاست‌های بحرانی‌تری همچون "نوسازی برنامه‌ریزی شده" و "ارزیابی پیشگویانه" می‌باشند، که این نشان از اهمیت این لوله‌ها دارد که در بخش تعیین اولویت‌های بازسازی نیز به این اهمیت اشاره شد. لذا به نظر می‌رسد، عملکرد مدل WDSR-Min در تعیین چنین سیاست‌هایی برای این لوله‌ها صحیح بوده و عملیات تحلیلی درستی صورت گرفته است.

با توجه به سیاست‌های بازسازی به‌دست آمده برای لوله‌های ۴، ۶ و ۷ که بیش از ۶۰ درصد این سیاست‌ها ("تعمیر در صورت خرابی" و "نظارت و کنترل") است و از درجه بحرانی کمتری نسبت به سیاست‌های بازسازی لوله‌های ۱، ۲، ۳، ۵ و ۸ برخوردار است، نتیجه‌گیری می‌شود که تعیین این سیاست‌ها با توجه به اولویت پایین‌تر این لوله‌ها نسبت به لوله‌های دیگر صحیح بوده و مدل WDSR-Min به درستی توانسته است برای لوله‌هایی با اولویت پایین‌تر نیز سیاست‌های بازسازی غیر بحرانی‌تری را در نظر بگیرد.

همانطور که پیش‌تر نیز شرح داده شد، با توجه به آن که تعیین سیاست‌های بازسازی هر یک لوله‌ها براساس مفهوم افزایش ریسک رخداد حادثه برای هر لوله می‌باشد، لذا تطبیق لایه الگو مدل WDSR-Min که برگرفته از استانداردهای موجود است، می‌تواند منجر به نتایج غلطی برای سیاست‌های بازسازی لوله‌ها شود. لذا ضروری است همواره تعیین سیاست‌های بازسازی لوله‌ها مبتنی بر الگوی پیش فرض WDSR-Min صورت پذیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی ارائه شد که می‌تواند با استفاده از حداقل اطلاعات ساختاری شبکه‌های توزیع آب، یک نمای کلی از اولویت‌های بازسازی لوله‌ها و همچنین سیاست‌های بازسازی آنها ارائه دهد. با استفاده از این روش می‌توان یک نقشه راه کلی از فعالیت‌های بازسازی تدوین نمود و به‌عنوان یک ابزار پوششی، علاوه بر تحلیل اطلاعات تاریخچه حوادث، از این نقشه راه کلی نیز استفاده کرد. با استفاده از نتایجی که از مدل WDSR-Min به‌دست آمد، ارجح است برای تعیین اولویت‌های بازسازی لوله‌ها،

Archive of SID
www.SID.ir

لایه الگوی پیش فرض این مدل، با اطلاعات به‌دست آمده از شبکه بهینه شود. در همین راستا باید توجه داشت که این بهینه‌سازی برای تعیین سیاست‌های بازسازی لوله‌ها ضرورتی نداشته و باید از لایه الگوی پیش فرض WDSR-Min برای تعیین سیاست بازسازی لوله‌های شبکه مورد مطالعه استفاده شود. لازم به ذکر است که برای استفاده از این مدل در نمونه‌های مطالعاتی واقعی می‌توان حداقل اطلاعات ساختاری شبکه را متناسب با اطلاعات موجود در آن شبکه توزیع آب به‌طور موردی افزایش داد و به این صورت گستره تحلیلی مدلWDSR-Min را متناسب با منطقه مورد مطالعه توسعه داد.

References

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

Alvisi, S. & Franchini, M. 2009. Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 135 (6)**,** 426-439.

Asgari, M.R., Sarabi, A., Akhavan Leil Abadi, M.R. & Tahouni, S. 2005. *Water transmission line engineering,* University of Tehran Press, Tehran, Iran. (In Persian)

Asgarpour, M.J. 2012. *Multiple criteria decision making,* University of Tehran Press, Tehran, Iran. (In Persian)

Ataei, M. 2011. *Fuzzy multi-criteria decision making*, Shahroud University of Technology Press, Shahroud, Iran. (In Persian)

AWWA. 2014. *Rehabilitation of water mains-m28,* 3rd Ed., American Water Works Association, USA.

Azar, A. & Faraji, H. 2009. *Fuzzy management science*, Iran Management and Productivity Study Center, Tarbiat Modares University, Tabriz, Iran. (In Persian)

Bazargan-Lari, M.R. 2014. An evidential reasoning approach to optimal monitoring of drinking water distribution systems for detecting deliberate contamination events. *Journal of Cleaner Production,* 78**,** 1-14.

Bhave, P.R. & Gupta, R. 2006. *Analysis of water distribution networks*, Alpha Science Int'l Ltd., UK.

Carrico, N., Covas, D., Almeida, M.C., Leitão, J. & Alegre, H. 2012. Prioritization of rehabilitation interventions for urban water assets using multiple criteria decision-aid methods. *Water Science and Technology,* 66 (5)**,** 1007-1014.

Chandramouli, S. & Malleswararao, P. 2011. Reliability based optimal design of a water distribution network for municipal water supply. *International Journal of Engineering and Technology*, 3 (1)**,** 13-19.

Choi, T., Han, J. & Koo, J. 2015. Decision method for rehabilitation priority of water distribution system using electre method. *Desalination and Water Treatment,* 53 (9)**,** 2369-2377.

Cioc, D. & Anton, A. 2004. Can the water supply rehabilitation process be prioritized on technical grounds. *Transactions on Mechanics, Scientific Bulletin "Politehnica" University of Timişoara,* 49 (63)**,** 21-22.

Ekinci, Ö. & Konak, H. 2009. An optimization strategy for water distribution networks. *Water Resources Management,* 23 (1)**,** 169-185.

Engelhardt, M., Skipworth, P., Savic, D., Saul, A. & Walters, G. 2000. Rehabilitation strategies for water distribution networks: A literature review with a UK perspective. *Urban Water,* 2 (2)**,** 153-170.

Farley, M. 2001. *Leakage management and control*, *A best practice training manual*, WHO, Geneva, Switzerland.

Farley, M. & Trow, S. 2003. *Losses in water distribution networks: A practitioner's guide to assessment, monitoring and control*, IWA Publishing, London.

Gomes, H.P., Bezerra, S.D.T.M. & Srinivasan, V.S. 2008. An iterative optimisation procedure for the rehabilitation of water-supply pipe networks. *Water*, 34 (2)**,** 225-235.

Hibbeler, R.C., Tan, K.-H. & Nolan, B. 2006. *Structural analysis*, Pearson Prentice Hall, N.Y.

Archive of SID
www.SID.ir

Ho, C.-I., Lin, M.-D. & Lo, S.-L. 2010. Use of a gis-based hybrid artificial neural network to prioritize the order of pipe replacement in a water distribution network. *Environmental Monitoring and Assessment,* 166 (1-4)**,** 177-189.

Jarquio, R.V. 2007. *Structural analysis: The analytical method*, CRC Press, USA.

Kabir, G., Sadiq, R. & Tesfamariam, S. 2014. A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering,* 10 (9)**,** 1176-1210.

Kabir, G., Tesfamariam, S., Francisque, A. & Sadiq, R. 2015. Evaluating risk of water mains failure using a bayesian belief network model. *European Journal of Operational Research*, 240 (1)**,** 220-234.

Kahraman, C. 2008. *Fuzzy multi-criteria decision making: Theory and applications with recent developments*: Springer Science & Business Media.

Li, F., Ma, L., Sun, Y. & Mathew, J. 2015. Optimized group replacement scheduling for water pipeline network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142 (1)**,** Article ID: 04015035.

Marzouk, M., Hamid, S.A. & El-Said, M. 2015. A methodology for prioritizing water mains rehabilitation in Egypt. *HBRC Journal,* 11 (1)**,** 114-128.

Marzouk, M. & Osama, A. 2015. Fuzzy approach for optimum replacement time of mixed infrastructures. *Civil Engineering and Environmental Systems,* 32 (3)**,** 269-280.

Moser, A.P. 1990. *Buried pipe design*, McGraw-Hill, New York.

MPO. 2005. *General technical specification for urban water pipelines and sewage systems*, Management and Planning Organization, Tehran, Iran. (In Persian)

Punmia, B., Jain, A.K. & Jain, A.K. 1995. *Water supply engineering*, Firewall Media.

Rahmani, F., Behzadian, K. & Ardeshir, A. 2015. Rehabilitation of a water distribution system using sequential multiobjective optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 142 (5)**,** Article ID: C4015003.

Salehi, S., Jalili Ghazizadeh, M. & Tabesh, M. 2017. A comprehensive criteria-based multi-attribute decision-making model for rehabilitation of water distribution systems. *Structure and Infrastructure Engineering.* Accepted paper with DOI: 10.1080/15732479.2017.1359633.

Salehi, S., Tabesh, M., Jalili Ghazizadeh, M.R. 2018. HRDM method for rehabilitaion of pipes in water distribution networks with inaccurate operational failure data. *Journal of Water Resources Planing and Management*, Accepted paper, doi: 10.1061. ASCE.WR.1943-5452.0000943.

Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M. & Lienert, J. 2014. Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research,* 49**,** 124-143.

Shakib, H. & Emadi, A. 2012. *Buried pipes: Analysis and design*, Azadeh Press, Tehran, Iran. (In Persian)

Shammas, N.K. & Wang, L.K. 2011. *Water supply and wastewater removal*, John Wiley & Sons, N.Y.

Siew, C., Tanyimboh, T.T. & Seyoum, A.G. 2014. Assessment of penalty-free multi-objective evolutionary optimization approach for the design and rehabilitation of water distribution systems. *Water Resources Management,* 28 (2)**,** 373-389.

Sil, B.S., Banerjee, P., Kumar, A., Bui, P.J. & Saikia, P. 2013. Use of excel-solver as an optimization tool in design of pipe network. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 2 (4)**,** 59-63.

Swamee, P.K. & Sharma, A.K. 2008. *Design of water supply pipe networks*, John Wiley & Sons, N.Y.

Tabesh, M. & Saber, H. 2012. A prioritization model for rehabilitation of water distribution networks using GIS. *Water Resources Management,* 26 (1)**,** 225-241.

Tee, K.F., Khan, L.R., Chen, H.P. & Alani, A.M. 2014. Reliability based life cycle cost optimization for underground pipeline networks. *Tunnelling and Underground Space Technology,* 43**,** 32-40.

Archive of SID

www.SID.ir

Thornton, J., Sturm, R. & Kunkel, G. 2008. *Water loss control*, McGraw-Hill, New York.

Trifunovic, N. 2006. *Introduction to urban water distribution: Unesco-ihe lecture note series*, CRC Press, USA.

Tscheikner-Gratl, F., Egger, P., Rauch, W. & Kleidorfer, M. 2017. Comparison of multi-criteria decision support methods for integrated rehabilitation prioritization. *Water,* 9 (2)**,** 68, doi : 10.3390/w9020068.

Tscheikner-Gratl, F., Sitzenfrei, R., Rauch, W. & Kleidorfer, M. 2016. Integrated rehabilitation planning of urban infrastructure systems using a street section priority model. *Urban Water Journal,* 13 (1)**,** 28-40.

Tzeng, G.-H. & Huang, J.-J. 2011. *Multiple attribute decision making: Methods and applications*, CRC Press, USA.

Vommi, V. 2017. Topsis with statistical distances: A new approach to MADM. *Decision Science Letters,* 6 (1)**,** 49-66.

VPSPS. 2013. *Design criteria of urban and rural water supply and distribution systems*, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Tehran, Iran. (In Persian)

Walski, T.M. Chase, D.V. Savic, D.A., Grayman, W.M., Beckwith, S. & Koelle, E. 2003. *Advanced water distribution modeling and management*, Haestad Press, Water bury, CT.

Wang, H. & Chen, X. 2015. Optimization of maintenance planning for water distribution networks under random failures. *Journal of Water Resources Planning and Management,* 142 (2), Aricle ID: 04015063.

Watkins, R.K. & Anderson, L.R. 2010. *Structural mechanics of buried pipes*, CRC Press, USA.

Archive of SID

www.SID.ir