Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 1, pp: 96-109

Loss Management Strategies of Drinking Water in Water Distribution Network of Isfahan City

M. Mokhtari[1], A. R. Akhavan Sarraf[2]*

1. Former Graduate Student in Management, Dept. of Management, Sheikh Bahaee University, Isfahan, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Management, Sheikh Bahaee University, Isfahan, Iran
(Corresponding Author) a.r.akhavan@shbu.ac.ir

(Received June 3, 2022 Accepted Oct. 31, 2022)

To cite this article:
Mokhtari, M., Akhavan Sarraf, A. R. 2023. "Loss management strategies of drinking water in water distribution network of Isfahan City" Journal of Water and Wastewater, 34(1), 96-109. Doi: 10.22093/wwj.2022.345439.3262. (In Persian)

Abstract

The loss of drinking water from water distribution network is one of the problems of Water and Sewage Companies worldwide, which reduces a remarkable part of the company's profit. Therefore, the aims of this research are: determination of strategies and their evaluating criteria for the loss management in water distribution network, prioritization of those strategies and criteria as well as selection of the most effective strategy. This study is a practical research and data gathering was performed via researcher-made questionnaires on snowball sampling based on the idea of 10 experts employed in Water and Sewage Company of Isfahan province. Four strategies of water loss management of water distribution network assessed in questionnaires were selected based on the recommendations of International Water Association, American Water Works Association and the regulations of the non-revenue water committee by the deputy directorate and under supervision of the Water and Wastewater Company of Iran, 2020. Data gathering and analyzing were carried out using paired comparison matrix and analytic hierarchy process by the Expert-choice software. The calculated inconsistency ratio of questionnaires was determined to be 0.02, and therefore the most effective strategy of water loss management of Isfahan water distribution network was determined to be the pressure drop strategy with weight of 0.400. Three other strategies of active leak detection weight 0.259, network repair weight 0.175, and speed and quality of emergencies weight 0.167, were prioritized in the next ranks, respectively. Likewise, the criteria of financial supply weight 0.463 in the first rank, the criteria of technical supply weight 0.289 in the second rank, the criteria of training update weight 0.146 in the third rank, and the criteria of legal supply weight 0.102 in the fourth rank, were prioritized. By increasing the ratio of circular intubation in water distribution network and construction of water storage tanks in the northwestern heights of Isfahan, it is practical to develop the pressure drop strategy in flat districts of Isfahan city leading to the minimum water loss of Isfahan distribution network.

Keywords: Water Loss, Multi Criteria Decision Making, Water Distribution Network, Apparent Loss, Real Loss.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۱، صفحه: ۱۰۹-۹۶

استراتژی‌های مدیریت هدررفت آب شرب در شبکه توزیع آب شهر اصفهان

مریم مختاری[۱]، احمدرضا اخوان صراف[۲*]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت، دانشکده مدیریت، دانشگاه شیخ بهایی، اصفهان، ایران
۲- استادیار، دانشکده مدیریت، دانشگاه شیخ بهایی، اصفهان، ایران
(نویسنده مسئول) a.r.akhavan@shbu.ac.ir

(دریافت ۱۴۰۱/۳/۱۳ پذیرش ۱۴۰۱/۸/۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
مختاری، م.، اخوان صراف، ا. ر.، ۱۴۰۲، "استراتژی‌های مدیریت هدررفت آب شرب در شبکه توزیع آب شهر اصفهان"
مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۱)، ۱۰۹-۹۶. Doi: 10.22093/wwj.2022.345439.3262

چکیده

هدر رفت آب شرب از شبکه توزیع آب، یکی از مشکلات شرکت‌های آب و فاضلاب در کشورهای مختلف است که بخش قابل توجهی از سودآوری این شرکت‌ها را کاهش می‌دهد. بنابراین در این پژوهش، استراتژی‌ها و معیارهای ارزیابی آنها برای مدیریت هدر رفت شبکه‌های توزیع آب شناسایی شد، سپس استراتژی‌ها و معیارهای فوق اولویت‌بندی شد و مؤثرترین استراتژی‌ها انتخاب شدند. این پژوهش از نوع کاربردی بود و جمع‌آوری داده‌ها از طریق پرسش‌نامه محقق شد و به روش گلوله برفی بر اساس نظرات ۱۰ نفر از خبرگان شاغل در شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان انجام شد. چهار استراتژی مدیریت هدر رفت شبکه توزیع آب که در فرم پرسش‌نامه ارزیابی شدند، بر اساس تعریف کمیته هدر رفت انجمن جهانی آب، انجمن امور آب آمریکا و نظام‌نامه کمیته آب بدون درآمد معاونت راهبری و نظارت بر بهره‌برداری شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور در سال ۱۳۹۹ انتخاب شدند. جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها به‌ترتیب با ماتریس مقایسات زوجی و تحلیل سلسله مراتبی توسط نرم‌افزار برگزیده خبره انجام شد. نرخ ناسازگاری پاسخ‌های ارائه شده در پرسش‌نامه‌ها ۰/۰۲ بوده و بر این اساس، استراتژی کاهش فشار شبکه با وزن ۰/۴۰۰ به عنوان مؤثرترین و شاخص‌ترین استراتژی در مدیریت هدر رفت شبکه توزیع آب شهر اصفهان تعیین شد. سه استراتژی نشت‌یابی فعال با وزن ۰/۲۵۹، بازسازی شبکه با وزن ۰/۱۷۵ و سرعت و کیفیت حوادث با وزن ۰/۱۶۷ به ترتیب در رتبه‌های بعدی اولویت‌بندی شدند. همچنین معیار تأمین نیازهای مالی با وزن ۰/۴۶۳ در رتبه نخست، معیار تأمین تجهیزات فنی با وزن ۰/۲۸۹ در رتبه دوم، معیار به روزرسانی آموزش با وزن ۰/۱۴۶ در رتبه سوم و معیار تأمین بسترهای قانونی با وزن ۰/۱۰۲ در رتبه چهارم اولویت‌بندی شدند. با افزایش سهم لوله‌گذاری حلقوی در شبکه توزیع و احداث مخازن ذخیره آب در ارتفاعات شمال غربی شهر اصفهان می‌توان استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب را در مناطق مسطح شهر اصفهان به نحو مطلوب اجرا کرد و هدر رفت شبکه توزیع آب شهر اصفهان را به کمترین حجم ممکن کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: هدر رفت آب، تصمیم‌گیری چند معیاره، شبکه توزیع آب، هدر رفت ظاهری، هدر رفت واقعی

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.345439.3262

۱- مقدمه

هدر رفت آب شرب از شبکه توزیع آب، یکی از چالش‌های شرکت‌های آب و فاضلاب در کشورهای مختلف است. بر اساس پژوهشی که در سال ۲۰۰۶ در مقیاس بین‌المللی انجام شد، حدود ۳۲ میلیارد مترمکعب آب شرب از شبکه‌های توزیع آب کشورهای مختلف به هدر می‌رفت (Mutikanga et al., 2011).

بر اساس تعریف انجمن جهانی آب (Ociepa-Kubicka and Wilczak, 2017) و مطابق گزارش‌های ارائه شده در منابع علمی و فنی، بخشی از آب شرب شبکه توزیع آب که بهایی بابت آن دریافت نمی‌شود با عنوان هدر رفت آب گزارش می‌شود (Morais and De Almeida, 2007).

بنابراین، هدر رفت شبکه توزیع آب (آب به حساب نیامده) شامل اختلاف حجم آب ورودی به شبکه آب‌رسانی و حجم آب قرائت شده از کنتور مشترکین است که به دو بخش هدر رفت واقعی (فیزیکی) و ظاهری (غیرفیزیکی) تقسیم‌بندی شده است (Taha et al., 2020).

در هدر رفت واقعی، حجمی از آب بدون دریافت درآمد از شبکه خارج شده و به مصرف نیز نمی‌رسد؛ در حالی که در هدر رفت ظاهری حجمی از آب بدون دریافت درآمد از شبکه خارج شده اما به نوعی به مصرف می‌رسد. نشتی آب از شکستگی‌های خطوط لوله و خطای قرائت کنتور (Bragalli et al., 2019) به ترتیب مثالی از هدر رفت واقعی و ظاهری شبکه توزیع آب هستند (Kanakoudis and Tsitsifli, 2014).

بخشی از این هدر رفت که به نوعی استفاده شود، گرچه بهایی بابت آن پرداخت نشود، با عنوان هدر رفت ظاهری تعریف شده است (Morais and De Almeida, 2007). هدر رفت ظاهری آب شرب شبکه توزیع آب کشورهای درحال توسعه به‌طور میانگین در حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد و در کشورهای دیگر حدود ۳۰ درصد (Aşchilean et al., 2017) از کل حجم منابع آب شرب شبکه توزیع آب گزارش شده است؛ در حالی که هدف‌گذاری هدر رفت ظاهری آب بر اساس اعلام بانک جهانی کمتر از ۲۳ درصد و بر اساس اعلام اتحادیه کشورهای جنوب آفریقا حدود ۲۰ درصد است (Ndunguru and Hoko, 2016).

عوامل عمده هدر رفت ظاهری آب شرب شبکه توزیع آب عبارت‌اند از: نشتی آب (Garðarsson et al., 2022)، انشعابات غیرمجاز و دست‌کاری کنتورهای آب (Wu et al., 2010, Ndunguru and Hoko, 2016, Selek et al., 2018) که در این بین، نشتی آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل هدر رفت آب شرب شبکه توزیع آب شناخته شده است (Fontana and Morais, 2016, Morais and De Almeida, 2007) و روش‌های مختلفی برای شناسایی موقعیت بررسی شده است (Hu et al., 2021).

بنابراین، مدیریت هدر رفت آب شرب شبکه توزیع آب به‌عنوان یک موضوع تصمیم‌گیری قابل توجه در مواجهه با اهداف استراتژیک شرکت‌های آب و فاضلاب مورد استقبال قرار گرفته و برنامه‌ریزی استراتژیک نیز به‌عنوان یک راهکار ارزشمند برای مدیریت منابع آب است (Mugabi et al., 2007).

در سال‌های اخیر نتایج پژوهش‌های مدیریت هدر رفت آب شرب در شبکه‌های توزیع آب منتشر شده که از رویکردها و مدل‌های مختلفی مانند فرایند تحلیل سلسله مراتبی[1] (Delgado-Galván et al., 2010, Zyoud et al., 2016)، فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (Wang et al., 2011)، روش درجه اولویت بر اساس مشابهت به راه‌حل ایده‌آل (Afshar et al., 2011)، روش تسلط تقریبی یا روش آنالیز هماهنگی نسخه دوم (Bouchard et al., 2010)، روش تسلط تقریبی یا روش آنالیز هماهنگی نسخه سوم (Tlili and Nafi, 2012)، روش سازمان‌دهی به رتبه‌بندی ترجیحی برای ارزیابی بهتر (Silva et al., 2010, Morais and De Almeida, 2007) استفاده کردند. به‌عنوان مثال، در یکی از این پژوهش‌ها حجم هدر رفت ظاهری آب در حدود ۶۰ درصد برآورد شده است (Morais and De Almeida, 2007).

عمده‌ترین مانع در تدوین استراتژی‌های کاهش هدر رفت آب شرب شبکه توزیع آب به انتخاب مدل‌های تصمیم‌گیری ارتباط دارد (Trojan and Morais, 2012)؛ زیرا در برخی مدل‌های تصمیم‌گیری منظر کاملی از سیستم ترسیم نمی‌شود.

در بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۲ پژوهش‌های متعددی در حوزه شبکه‌های توزیع آب انجام شده که بخشی از آنها در حوزه هدر رفت و آب بدون درآمد و بخشی دیگر در حوزه بازسازی شبکه است.

در این راستا کامیاب هدر رفت آب در شبکه توزیع

[1] Analytical Hierarchy Process (AHP)

روستاهای استان یزد (Kamyab, 2019)، مهربان مقدار آب بدون درآمد (هدر رفت) در شهرستان بجنورد (Mehraban, 2019)، حیدری میزان هدر رفت شبکه آب شهر سنندج (Heydari, 2018)، اسپندار هدر رفت شبکه توزیع آب شهر یاسوج (Espandar , 2007)، تابش مدیریت هدر رفت در سیستم‌های توزیع آب ایران با استناد به نشریه ۵۵۶ (Tabesh, 2007) و تابش و همکاران تأثیر سیاست‌های کاهش هدر رفت ظاهری و واقعی آب از شبکه توزیع آب شهری (Tabesh et al., 2020) را بررسی کردند.

در حالی که الشارکاوی و همکاران رتبه‌بندی و اولویت‌بندی تعمیر و نگهداری بخش‌های مختلف شبکه آب شهری یکی از شهرهای کانادا (Alsharqawi et al., 2020)، بابامیری و همکاران سیاست‌های نوسازی و هزینه‌ای شبکه توزیع آب شهری استان اصفهان (Babamiri et al., 2020) و صالحی و همکاران برنامه‌ریزی بازسازی شبکه‌های توزیع آب را در سال‌های مختلفی (Salehi et al., 2018, Salehi et al., 2021) بررسی کردند. همچنین در سال ۲۰۲۲ پژوهش‌های عمده‌ای در حوزه بازسازی شبکه انجام شده که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های (Souza et al., 2022, Salehi et al., 2022, Raspati et al., 2022, Caetano et al., 2022) اشاره کرد.

مدل تلفیقی حاصل از سامانه اطلاعات جغرافیایی و شبکه عصبی، برای اولویت‌بندی استراتژی‌های بازسازی شبکه توزیع آب استفاده شده است. این مدل حجم هدر رفت شبکه توزیع آب را ارزیابی کرده و بر این اساس، برنامه‌های تعویض خطوط لوله فرسوده اولویت‌بندی می‌شوند (Ho et al., 2010). یکی از ویژگی‌های برجسته این مدل، قابلیت تحلیل توزیع مکانی اطلاعات حوادث خطوط لوله شبکه توزیع آب بر اساس داده‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و همچنین تصویرسازی آنها است. از طرف دیگر، محدودیت این مدل منحصر بودن آن به حوادث مربوط به زلزله بوده و بنابراین در فرایندهای جاری بازسازی شبکه توزیع آب کاربرد گسترده‌ای ندارد. علاوه بر این، مدل دیگری نیز برای اولویت‌بندی طرح‌های مختلف بازسازی شبکه توزیع آب طبق سامانه اطلاعات جغرافیایی ارائه شده است (Tabesh and Saber, 2012).

همچنین مدل دیگری برای اولویت‌بندی بازسازی شبکه توزیع آب ارائه شد که در آن با افزایش تعداد مشخصات تجهیزات شبکه توزیع آب، ارزش بازسازی خطوط لوله تعیین می‌شد؛ اما به‌عنوان یک نقطه ضعف، تفکیک هر یک از خطوط لوله از سایر خطوط مقدور نبود (Marzouk et al., 2015).

همچنین نتایج اولویت‌بندی روش‌های بازسازی شبکه توزیع آب و فاضلاب مطابق مسیر خیابان‌ها و تقاطع‌ها بر اساس معیارهای فنی و اقتصادی منتشر شده است؛ اما به‌دلیل تلفیق شبکه توزیع آب با شبکه توزیع فاضلاب، جزئیات مربوط به شبکه توزیع آب به‌طور مستقل لحاظ نمی‌شود (Tscheikner-Gratl et al., 2016). اولویت‌بندی بازسازی شبکه توزیع آب با بیش از ۴۰ معیار فنی و غیرفنی منتشر شد و مزیت آن، امکان اجرای مدل با حداقل اطلاعات اولیه بود؛ زیرا دسترسی به اطلاعات اولیه برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های بازسازی شبکه توزیع آب همواره یکی از محدودیت‌های اصلی است (Salehi et al., 2018).

مطابق الگوی انجمن‌های جهانی آب، امور آب آمریکا و کمیته آب بدون درآمد کشور، استراتژی‌های فعلی مدیریت هدر رفت آب در شهر اصفهان نیز همان چهار استراتژی کاهش فشار شبکه، نشت‌یابی فعال، بازسازی شبکه و سرعت و کیفیت حوادث هستند؛ اما نکته قابل تأمل و موضوع مورد بررسی در این پژوهش آن بود که در حال حاضر این استراتژی‌ها، وزن‌دهی و اولویت‌بندی نشده‌اند. بنابراین در این پژوهش سعی شد که به اهمیت و تأثیر وزن‌دهی و اولویت‌بندی استراتژی‌ها نسبت به دیدگاه رایج (تساوی وزن استراتژی‌ها) پرداخته شود.

نقاط قوت روش پیشنهادی وزن‌دهی و اولویت‌بندی استراتژی‌ها نسبت به روش رایج تساوی وزن استراتژی‌ها عبارت‌اند از: برآورد واقع‌گرایانه‌تر از نتایج مدیریت هدر رفت آب (Mousavi et al., 2017) و همچنین کمّی‌سازی این فرایند به‌منظور پایش و مهندسی عملکرد (Bozkurt et al., 2022).

از طرف دیگر، نقاط ضعف روش پیشنهادی وزن‌دهی و اولویت‌بندی استراتژی‌ها نسبت به روش رایج تساوی وزن استراتژی‌ها عبارت‌اند از: نیاز به تغییر ساختار و دیدگاه حاکم و در نتیجه صرف وقت و انرژی به‌منظور توجیهی این روش (Makaya, 2016).

بنابراین درصورت اهتمام و ارزیابی مقایسه‌ای و تحلیل نتایج عملکرد دو دیدگاه، می‌توان توجیهات علمی، فنی، مدیریتی

جدول ۱- نقاط قوت و ضعف استراتژی‌های چهارگانه مدیریت هدر رفت آب شرب

Table 1. The strengths and weaknesses of the four strategies of loss management of drinking water

Strategies	Strengths	Weaknesses
Pressure drop	Measurement data is available It has high effectiveness	The implementation cost is very high It has the most legal obstacles
Active leak detection	The implementation cost is very low It has the least legal obstacles	It does not have high certainty It requires advanced equipment
Network repair	It has high certainty and reliability It requires simple equipment	High implementation cost It is not highly effective
Speed and quality of emergencies	It has the least legal obstacles It has high certainty and reliability	It is not highly effective Not quantitative evaluation data

و مالی اجرای روش وزن‌دهی استراتژی‌های مدیریت هدر رفت آب شرب را تأیید و تصویب کرد.

در جدول ۱ نقاط قوت و ضعف استراتژی‌های چهارگانه پیشنهادی انجمن‌های جهانی آب، امور آب آمریکا و کمیته آب بدون درآمد کشور برای مدیریت هدر رفت آب شرب نشان داده شده است.

در این پژوهش از یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره (روش تحلیلی سلسله مراتبی) برای اولویت‌بندی استراتژی‌های مدیریت هدر رفت آب شرب در شبکه توزیع آب شهر اصفهان استفاده شد تا بر اساس آن تخصیص هزینه و زمان به هریک از استراتژی‌ها بهینه شود. روش تحلیل سلسله مراتبی به علت ماهیت ساده جامع، هر دو بعد کلی و جزئی را با هم به کار می‌بندد و مقیاسی برای اندازه‌گیری معیارهای کیفی و تخمین اولویت‌ها فراهم می‌کند. در فرایند تحلیل سلسله مراتبی با مجموع مقایسات زوجی گزینه‌ها، هر یک از معیارها اولویت‌بندی می‌شود.

در این پژوهش، بر مبنای معیارهای چهارگانه شامل: تأمین تجهیزات فنی، تأمین بودجه، به‌روزرسانی آموزش و نیز تأمین بسترهای قانونی، استراتژی‌های چهارگانه شامل: کاهش فشار شبکه توزیع آب، نشت‌یابی فعال، بازسازی شبکه و سرعت و کیفیت حوادث، اولویت‌بندی و وزن‌دهی شدند. معیار تأمین بودجه بدون لحاظ کردن حجم اعتبارات یا گردش مالی شامل گستره‌ای از موارد مرتبط با فرایند تأمین بودجه است که می‌تواند دربرگیرنده روش تأمین بودجه، روش تخصصی بودجه، اولویت فهارس بهای خدمات مربوطه، روش بازپرداخت و حتی تواتر باشد.

یکی از نوآوری‌های این پژوهش، اولویت‌بندی استراتژی‌های مدیریت هدر رفت آب شرب برای نخستین بار در شبکه توزیع آب شهر اصفهان است. همچنین برای نخستین بار در کشور، استراتژی‌های مصوب کمیته هدر رفت انجمن جهانی آب و انجمن امور آب آمریکا در یکی از شهرهای ایران اولویت‌بندی شدند. علاوه بر این، برای نخستین بار در اولویت‌بندی فوق به‌طور هم‌زمان از روش نمونه‌برداری گلوله برفی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی و نرم‌افزار برگزیده خبره استفاده شد.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش، پس از شناسایی استراتژی‌های مدیریت هدر رفت شبکه توزیع آب، داده‌های مورد تحلیل از طریق پرسش‌نامه جمع‌آوری شد و سپس به روش تحلیل سلسله مراتبی و با نرم‌افزار تحلیل شدند. مدل مفهوم پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، عنوان پژوهش شامل اولویت‌بندی استراتژی‌های مدیریت هدر رفت آب شرب در شبکه توزیع آب شهر اصفهان است که بر مبنای معیارهای چهارگانه (تأمین تجهیزات فنی، تأمین بودجه، به‌روزرسانی آموزش و تأمین بسترهای قانونی) اجرا شد. بر این اساس، چهار استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب، نشت‌یابی فعال، بازسازی شبکه و سرعت و کیفیت حوادث اولویت‌بندی و وزن‌دهی شدند.

با توجه به اینکه روش مورد بررسی در این پژوهش بر اساس تحلیل سلسله مراتبی بود، روش نمونه‌گیری نیز از نوع غیرتصادفی هدفمند انتخاب شد. نمونه آماری (خبرگان) به صورت تصادفی انتخاب نشدند، بلکه بر اساس تخصص ایشان و معرفی توسط سایر متخصصین این حوزه معرفی شدند؛ بنابراین نوع نمونه‌گیری،

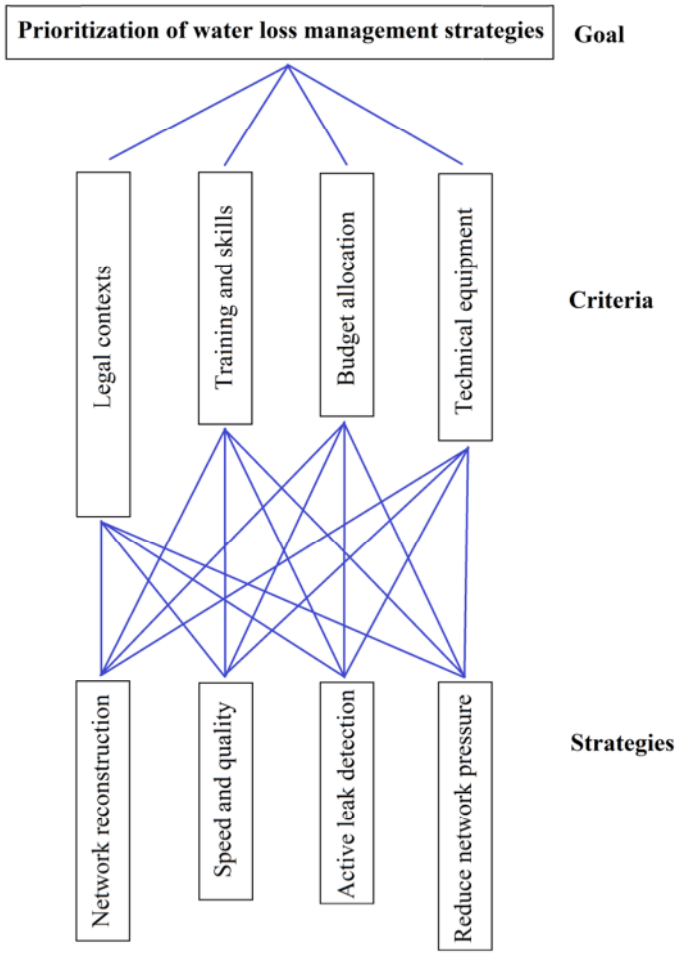

Fig. 1. Conceptual model of research

شکل ۱- مدل مفهومی پژوهش

هدفمند بود، و بر اساس ویژگی تخصص انتخاب شدند. تعداد اعضای نمونه آماری این پژوهش بر اساس منابع علمی و توصیه برخی پژوهشگران (Baby, 2013) تعیین شد. بنابراین ۱۰ نفر از ۲۰۶ نفر که در شرکت امکان انتخاب داشتند برگزیده شدند. خبرگان این پژوهش وزن‌دهی نشدند؛ زیرا هر یک از آنها در یک حوزه خاصی از موضوع هدر روی شبکه آب تخصص داشتند و قابل مقایسه یا سنجش نبودند.

با توجه به عدم وجود معیاری برای شناسایی و انتخاب خبرگان موضوع پژوهش، متخصصین در حوزه مدیریت هدر رفت شبکه توزیع آب به روش جستجوی فردبه‌فرد و بر اساس روش نمونه‌گیری گلوله برفی (زنجیره‌ای) انجام شد. در این روش، ابتدا اولین فرد از جامعه آماری به طریقی انتخاب می‌شود که بیشترین ارتباط را با موضوع پژوهش دارد. از طریق ارتباط این عضو با اعضای دیگر جامعه آماری، امکان دسترسی به سایر نمونه‌ها میسر می‌شود.

گرچه مدل تحلیل سلسله مراتبی یک مدل تصمیم‌گیری است؛ اما فرایند انتخاب تصمیم‌گیرنده‌ها (۱۰ مورد از ۲۰۶ مورد) بر اساس روش نمونه‌گیری غیرتصادفی هدفمند (روش گلوله برفی) انجام شد. مطابق روش گلوله برفی، پس از تعیین نخستین خبره، تعداد دیگری از خبرگان موضوع پژوهش توسط ایشان معرفی شدند و در ادامه، هریک از معرفی‌شدگان نیز تعداد دیگری از خبرگان موضوع پژوهش را معرفی کردند.

بر اساس نتایج دریافت شده از پیشینه پژوهش، یک فرم پرسش‌نامه محقق‌ساخته بر اساس روش مقایسات زوجی طراحی و

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.345439.3262

تهیه شد. سپس توزیع و دریافت پاسخ‌های مندرج در پرسش‌نامه از خبرگان شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان، داده‌های موردنیاز جمع‌آوری شد. فرم پرسش‌نامه شامل بخش راهنما و پرسش‌ها بود که طراحی و محتوای پرسش‌ها بر اساس روش مقایسات زوجی انجام شد. در پرسش‌نامه طراحی شده از ساختار طیف پنج نقطه، به منظور اولویت‌بندی معیارها و گزینه‌های این پژوهش استفاده شد. طبق نظر برخی پژوهشگران در روش تحلیل سلسله مراتبی، تعداد بهینه اعضای نمونه آماری در محدوده ۱۰ تا ۲۰ نفر است (Baby, 2013).

در روش تجزیه‌وتحلیل مقایسه زوجی یک نوع مقایسه دوگانه بین مؤلفه‌های پژوهش انجام می‌شود تا راه‌حل مسئله به‌صورت مؤثرتری انتخاب شود و اولویت‌های موردنظر تعیین شوند. در هر پرسش‌نامه پنج ماتریس مقایسات زوجی طراحی شده که ماتریس اول برای اولویت‌بندی معیارها و چهار ماتریس بعدی به‌منظور اولویت‌بندی استراتژی‌ها بودند. ماتریس‌های اولویت‌بندی استراتژی‌ها بر اساس معیارهای چهارگانه تنظیم شدند. با توجه به حجم نمونه آماری (۱۰ نفر از خبرگان) تعداد ۵۰ ماتریس تکمیل و سپس در نرم‌افزار تغذیه شد.

۲-۱- نرخ ناسازگاری

اعتبار ابزار اندازه‌گیری (روش تحلیل سلسله مراتبی) استفاده شده در این پژوهش توسط نرخ ناسازگاری برای هریک از خبرگان و هریک از معیارهای ارزیابی استراتژی‌ها به‌صورت جداگانه محاسبه شد. همچنین برایند نرخ ناسازگاری هر چهار معیار برای هریک از خبرگان و همچنین برایند نرخ ناسازگاری همه خبرگان برای هریک از چهار معیار نیز محاسبه شد. در پایان، نرخ ناسازگاری کلی این روش نیز محاسبه شد. با توجه به اینکه نرخ ناسازگاری کلی محاسبه شده (۰/۰۲) کمتر از مقدار مجاز (۰/۱) بود، داده‌های مندرج در فرم‌های تکمیل شده پرسش‌نامه‌ها، اعتبار لازم را داشت.

۲-۲- تحلیل حساسیت رتبه‌بندی استراتژی‌ها

تحلیل حساسیت برای ارزیابی پایداری رتبه و اولویت استراتژی‌ها استفاده می‌شود (Chang et al., 2007). هدف از تحلیل حساسیت، شناسایی پارامترهای کاملاً حساس است تا برآورد آنها با دقت و اطمینان بیشتری انجام شود و به همین روش، جواب بهینه نیز محاسبه شود. در شکل ۲ رتبه و وزن استراتژی‌های انتخاب شده برحسب هر یک از چهار معیار مورد استناد نشان داده شده است. در صورتی که وزن نسبی معیارها بر اساس الگوی اظهار شده توسط خبرگان مورد استناد در این پژوهش باشد، از لحاظ سه معیار تأمین تجهیزات فنی، تأمین بودجه و به‌روزرسانی آموزش، استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب در صدر سایر استراتژی‌ها است.

در پژوهش‌های دیگر در شرایط اجرایی متفاوت، این استراتژی به‌عنوان تنها استراتژی کنترل نشت‌ی شبکه توزیع آب معرفی و استفاده شده است (Samir et al., 2017). از طرف دیگر از لحاظ معیار تأمین بسترهای قانونی، استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب به رتبه دوم اولویت‌بندی استراتژی‌ها تنزل می‌یابد؛ درحالی که استراتژی بازسازی شبکه در رتبه نخست قرار می‌گیرد.

از لحاظ دو معیار تأمین تجهیزات فنی و تأمین بودجه، استراتژی نشت‌یاب‌ی فعال در رتبه دوم استراتژی‌ها است، اما از لحاظ دو معیار به‌روزرسانی آموزش و تأمین بسترهای قانونی، این استراتژی به رتبه چهارم تنزل می‌یابد. در خصوص استراتژی بازسازی شبکه، از لحاظ دو معیار تأمین تجهیزات فنی و به‌روزرسانی آموزش در رتبه سوم استراتژی‌ها است، اما از لحاظ دو معیار تأمین نیازهای مالی و تأمین بسترهای قانونی به ترتیب در رتبه‌های چهارم و اول قرار می‌گیرد. در هر صورت با لحاظ کردن هر چهار معیار و وزن‌های مربوطه؛ رتبه و وزن نسبی هریک از چهار استراتژی مدیریت هدر رفت شبکه توزیع آب شهر اصفهان مطابق شکل ۲ محاسبه شد. بر این اساس، استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب در رتبه نخست و استراتژی نشت‌یابی فعال در رتبه دوم قرار دارند. دو استراتژی دیگر نیز تقریبا به طور هم‌سان در رتبه انتهایی قرار گرفتند.

۲-۳- تفسیر نمودار سربه‌سر در رتبه‌بندی استراتژی‌ها

نمودار سربه‌سر، جهت و کمیت برتری دو استراتژی را به صورت مقایسه‌ای برحسب معیارهای مختلف نشان می‌دهد. در کادر فوقانی این نمودارها، دو استراتژی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بنابراین با توجه به اینکه در این پژوهش چهار استراتژی تعریف شده، شش نمودار در غالب شش مقایسه زوجی استراتژی‌ها رسم می‌شود.

در شکل ۳، دو استراتژی کاهش فشار شبکه و نشت‌یابی فعال برحسب معیارهای چهارگانه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقایسه

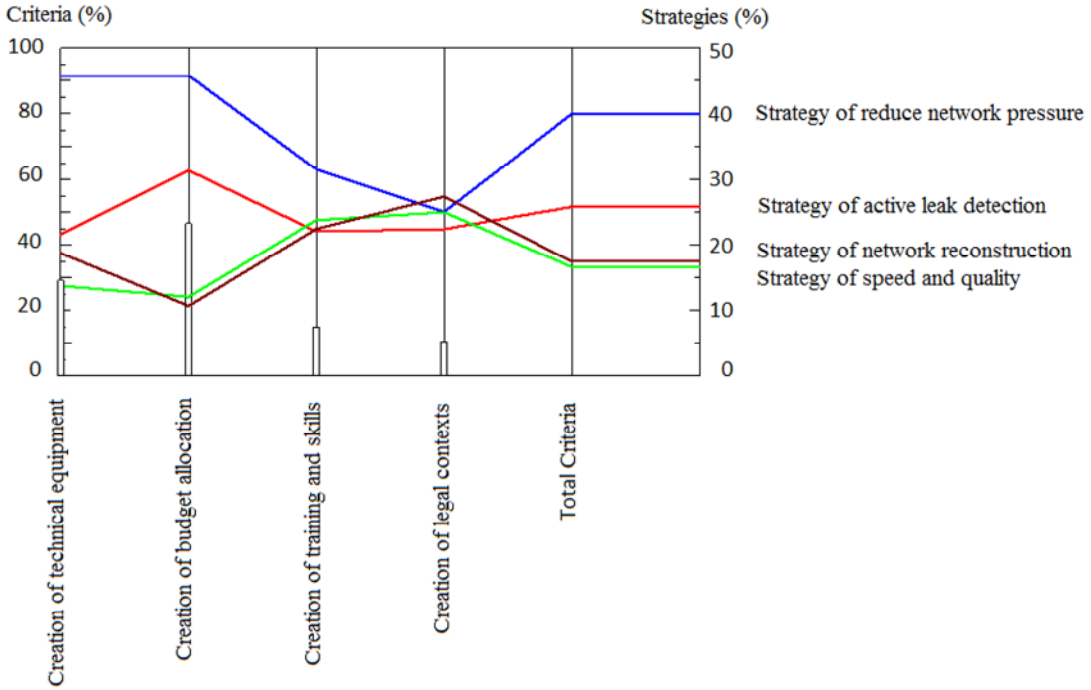

Fig. 2. Sensitivity chart for ranking of the loss management strategies of Isfahan water distribution network according to each of the four criteria based on the opinion of experts

شکل ۲- نمودار حساسیت برای رتبه‌بندی استراتژی‌های مدیریت هدر رفت شبکه توزیع آب شهر اصفهان برحسب هریک از چهار معیار طبق نظر خبرگان

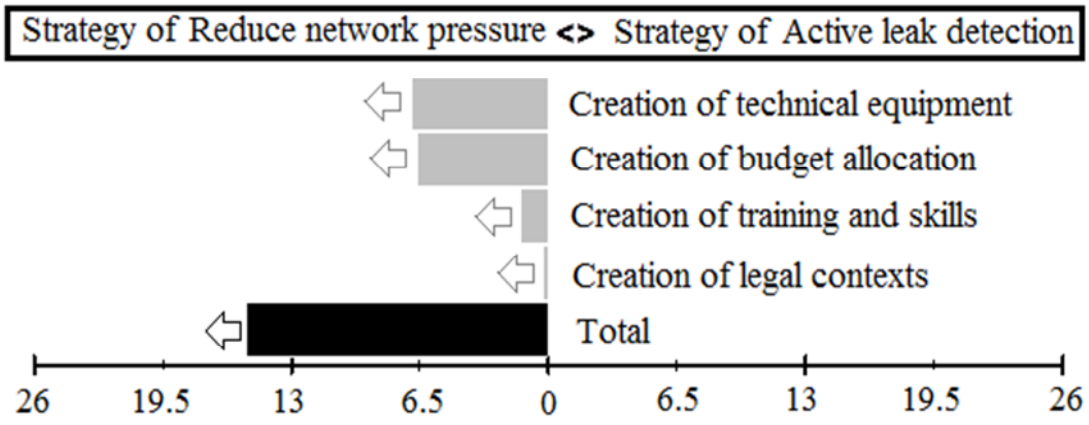

Fig. 3. Overhead diagram to determine the interaction of two strategies of reducing network pressure and active leak detection on each of the criteria and their outcome

شکل ۳- نمودار سربه‌سر برای تعیین تأثیر متقابل دو استراتژی کاهش فشار شبکه و نشت‌یابی فعال بر هریک از معیارها و برایند آنها

اولویت این دو استراتژی از منظر معیار اول (تجهیزات فنی) و معیار دوم به نفع استراتژی کاهش فشار است. این اولویت از منظر استراتژی‌های سوم و چهارم تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته، اما همچنان به نفع استراتژی کاهش فشار است. در نهایت، برایند این چهار منظر، به نفع استراتژی کاهش فشار است. کمیت هر یک از این اولویت‌های نسبی، در مقیاس عددی زیر نمودار، درج شده است.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.345439.3262

۳- نتایج و بحث

همان طور که بیان شد، در این پژوهش از نظرات کارشناسی ۱۰ نفر از خبرگان موضوع پژوهش و شاغل در شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان درخصوص رتبه‌بندی معیارهای چهارگانه و استراتژی‌های چهارگانه برای مدیریت هدر رفت شبکه آب شهری اصفهان به‌صورت ماتریس مقایسات زوجی استفاده شد. داده‌های جمع‌آوری شده در نرم‌افزار برگزیده خبره بارگذاری شد و نتایج آن در قالب نمودار حساسیت، پویایی و سربه‌سر در بخش قبل تحلیل شد.

بر اساس نتایج حاصل از اجرای روش تحلیل سلسله مراتبی توسط نرم‌افزار برگزیده خبره، استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب با اختلاف قابل توجه از سایر استراتژی‌ها به‌عنوان اولین اولویت و استراتژی برتر در مدیریت هدر رفت شبکه توزیع آب شهر اصفهان محاسبه شد. با استناد به منابع، مؤثرترین عوامل تأثیرگذار بر استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب عبارت‌اند از: افزایش سهم لوله‌گذاری حلقوی نسبت به توزیع شاخه‌ای (Sitzenfrei et al., 2013) در شبکه توزیع آب شهر اصفهان و همچنین تغییر الگوی توزیع سیستم‌های افزایش فشار یا همان مخازن ذخیره و پمپاژ (Dai et al., 2017, Nazif et al., 2010, Brentan et al., 2017, Fecarotta and Mcnabola, 2017) در شبکه توزیع آب.

برای ارزیابی‌ی اقدامات انجام شده در زمینه استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب شهر اصفهان در شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان، دو موضوع ساختار لوله‌گذاری شبکه توزیع آب و توزیع سیستم‌های افزایش فشار در شبکه، بررسی شدند. این دو روش که با اصطلاح کاهش فشار شبکه بررسی می‌شوند، در حقیقت باعث توازن فشار در خطوط لوله بالادستی و پایین‌دستی توزیع آب می‌شوند.

۳-۱- ساختار لوله‌گذاری شبکه توزیع آب شهر اصفهان

ساختار لوله‌گذاری شبکه توزیع آب شهر اصفهان از نوع مختلط است که شامل یک ساختار حلقوی در پیرامون شبکه و یک ساختار شاخه‌ای در داخل شبکه می‌شود. فرایند کاهش فشار شبکه توزیع آب هر یک از مناطق آبی شهر اصفهان در شیرخانه‌ها کنترل می‌شود. در زمان انجام این پژوهش ۱۴ شیرخانه فعال (به استثنای شیرخانه‌های دینان و فلاورجان) در شبکه توزیع آب شهر اصفهان برای تنظیم فشار آب مصرفی ۱۵ منطقه شهر اصفهان در حال بهره‌برداری هستند که عبارت‌اند از: شیرخانه‌های فلمن و انتهای فلمن در ابتدای مسیر ورودی کانال‌های اصلی تأمین آب شهر اصفهان؛ شیرخانه‌های شهید فهمیده، دستگرد و میدان استقلال در بخش غربی کمربند ساختار حلقوی شبکه توزیع آب؛ شیرخانه‌های امیرکبیر، کاوه، دولت‌آباد، زینبیه و پایگاه در بخش شمال و شمال شرقی ساختار حلقوی شبکه توزیع آب؛ شیرخانه‌های ارغوانیه و گورت در بخش شرقی و شیرخانه‌های آبشار و ولیعصر در بخش جنوبی ساختار حلقوی شبکه توزیع آب شهر اصفهان. بنابراین تقریباً به ازای هر منطقه، یک شیرخانه احداث شده و در حال بهره‌برداری است. شکل ۴ ساختار لوله‌گذاری شبکه توزیع آب شهر اصفهان که شامل شیرخانه‌ها، کمربند حلقوی و شاخه‌های داخلی است را نشان می‌دهد.

از دیدگاه دیگر، با توجه به سرانه توزیع جمعیت شهر اصفهان، به نظر می‌رسد که تأثیر ساختار حلقوی شبکه توزیع آب شهری در ده منطقه خارجی شهر (مناطق ۴ تا ۷، ۹ و ۱۱ تا ۱۵) بیش از پنج منطقه مرکزی (مناطق ۱ تا ۳، ۸ و ۱۰) است. متقابلاً در مناطق مرکزی نیز تأثیر ساختار شاخه‌ای شبکه توزیع آب شهری بیش از تأثیر این ساختار در مناطق خارجی است.

اجرای استراتژی کاهش فشار شبکه آب در ساختارهای شهری نیازمند گسترش ساختار حلقوی نسبت به ساختار شاخه‌ای است. برای دستیابی به این هدف از روش‌های مختلفی استفاده شده است که یکی از آنها، اجرای ساختار حلقوی دوم و حتی سوم در مناطق مرکزی شهر به صورت دوایر هم مرکز و از طریق تونل‌های زیرزمینی است که در بسیاری از شهرها با ویژگی‌های جغرافیایی مشابه شهر اصفهان اجرا شده است (Dubrou et al., 2013). ساختار لوله‌گذاری حلقوی دوم پیرامون منطقه مرکزی شهر (منطقه ۱) و در نقطه محوری ساختار لوله‌گذاری حلقوی اول، اجرا شده است.

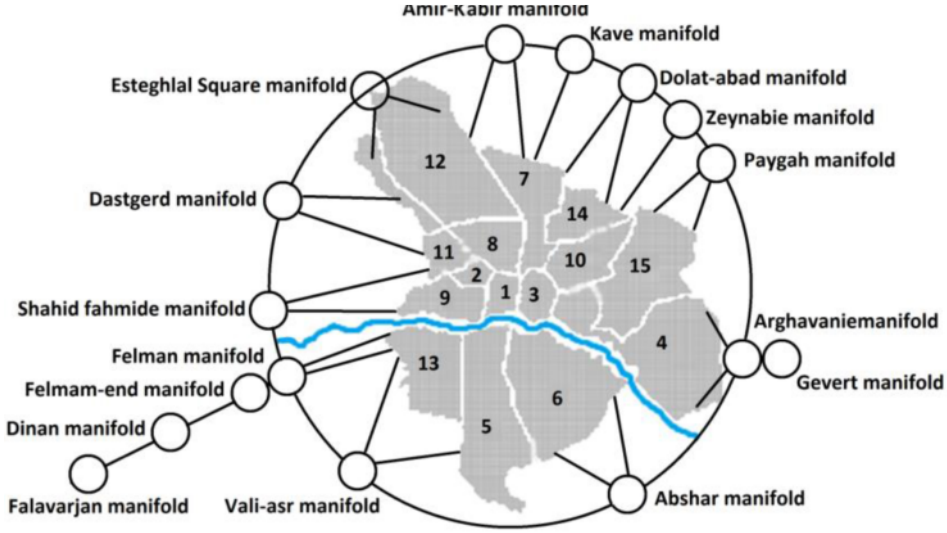

Fig. 4. Schematic of the piping structure of Isfahan water distribution network as a mixed network

شکل ۴- شماتیک ساختار لوله‌گذاری شبکه توزیع آب شهر اصفهان به صورت شبکه مختلط

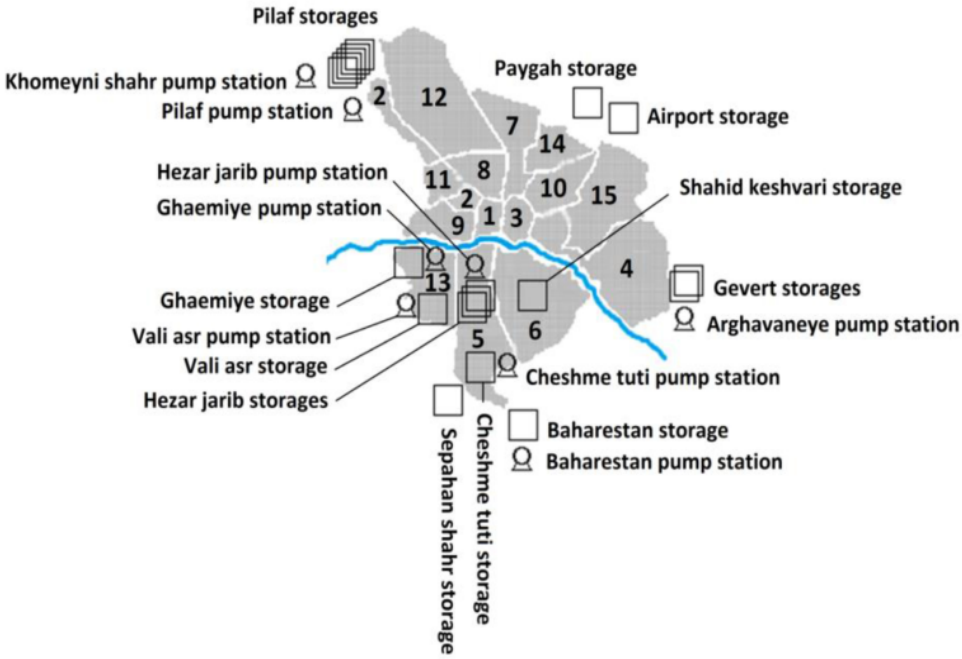

Fig. 5. Schematic of the location of storage tanks and pumping stations to supply pressure to the water distribution network of Isfahan

شکل ۵- شماتیکی از موقعیت مخازن ذخیره و ایستگاه‌های پمپاژ برای تأمین فشار شبکه توزیع آب شهر اصفهان

۳-۲- توزیع سیستم‌های افزایش فشار شبکه آب‌رسانی شهر اصفهان

فشار شبکه توزیع آب از طریق مخازن و پمپ‌ها تأمین می‌شود. شبکه توزیع آب شهر اصفهان نیز ۱۳ مخزن، یک منبع هوایی (کوی سپاهان) و ۶ ایستگاه پمپاژ دارد. در بخش شمال غربی اصفهان، ۵ مخزن دیگر (مخازن پیلاف) به همراه ۲ ایستگاه پمپاژ برای تأمین آب منطقه خمینی‌شهر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند که در آمار محاسباتی شهر اصفهان وارد نمی‌شوند. همان طور که در شکل ۵

نشان داده شده است، مخازن ذخیره و ایستگاه‌های پمپاژ برای تأمین فشار شبکه توزیع آب شهر اصفهان عبارت‌اند از: سه مخزن هزارجریب، دو مخزن گورت و مخازن قائمیه، ولی‌عصر، چشمه توتی، سپاهان‌شهر، بهارستان، شهید کشوری، فرودگاه و پایگاه. ایستگاه‌های پمپاژ و تأمین فشار آب شهر اصفهان نیز عبارت‌اند از: ایستگاه‌های هزارجریب، قائمیه، ولی‌عصر، چشمه توتی، بهارستان و ارغوانیه.

بر اساس الگوی پراکندگی مخازن ذخیره و افزایش فشار شبکه توزیع آب شهر اصفهان، مشخص است که مخازن ذخیره، توزیع یکنواخت و متعادلی در شهر ندارند. گرچه ارتفاعات مناطق جنوبی شهر اصفهان بر گستردگی و تمرکز این مخازن در بخش جنوبی تأثیرگذار است؛ اما نقشه‌های جغرافیایی نشان می‌دهند که ارتفاعات شمال غربی شهر می‌توانند بستر مناسبی برای احداث و بهره‌برداری مخازن جدید شبکه آب (مشابه مخازن پیلاف) باشند. در این خصوص می‌توان مباحث مربوط به تأمین بودجه، تحصیل اراضی، تأمین تجهیزات فنی و اجرای پروژه‌های مشابه را در اولویت بالاتری قرار داد.

۴- نتیجه‌گیری

کلیات موضوع پژوهش شامل اولویت‌بندی استراتژی‌های مدیریت هدر رفت آب شرب در شبکه توزیع آب شهر اصفهان بود که بر مبنای معیارهای چهارگانه (تأمین تجهیزات فنی، تأمین بودجه، به‌روزرسانی آموزش و تأمین بسترهای قانونی) اجرا شد. بر این اساس، چهار استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب، نشت‌یابی فعال، بازسازی شبکه و سرعت و کیفیت حوادث اولویت‌بندی و وزن‌دهی شدند. نتایج اصلی پژوهش عبارت‌اند از:

بر اساس نتایج حاصل از اجرای روش تحلیل سلسله مراتبی توسط نرم‌افزار برگزیده خبره، معیار تأمین نیازهای مالی (با وزن ۴۶/۳) در رتبه نخست، معیار تأمین تجهیزات فنی (با وزن ۲۸/۹) در رتبه دوم، معیارهای به‌روزرسانی آموزش (با وزن ۱۴/۶) در رتبه سوم و معیار تأمین بسترهای قانونی و حقوقی (با وزن ۱۰/۲) در رتبه چهارم قرار گرفتند. طبق نتایج حاصل از اجرای روش تحلیل سلسله مراتبی توسط نرم‌افزار برگزیده خبره، استراتژی کاهش فشار شبکه توزیع آب (با وزن ۰/۴۰۰) با اختلاف قابل توجه از سایر استراتژی‌ها به‌عنوان اولین اولویت و استراتژی برتر در مدیریت هدر رفت شبکه توزیع آب شهر اصفهان محاسبه شد. در ادامه، استراتژی نشت‌یابی فعال (با وزن ۰/۲۵۹)، استراتژی بازسازی شبکه (با وزن ۰/۱۷۵) و سرانجام استراتژی سرعت و کیفیت حوادث (با وزن ۰/۱۶۷) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

یکی از نواقص موجود در این پژوهش که می‌تواند در پژوهش‌های بعدی کامل‌تر بررسی شود، تقسیم‌بندی هر یک از استراتژی‌های مورد بررسی به چند زیر مجموعه و سپس تحلیل و تفسیر آرایش جدید بود. با توجه به فرصت محدود هر پروژه، اجرای مجدد پروژه در قالب زیر مجموعه‌ها امکان‌پذیر نشد. پیشنهادی که برای پژوهش‌های بعدی ارائه می‌شود، تقسیم‌بندی هر یک از استراتژی‌ها به چند زیر مجموعه و سپس تحلیل و تفسیر آرایش جدید است. مقایسه نتایج آرایش جدید و آرایش فعلی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درخصوص این پژوهش نشان دهد.

۵- قدردانی

نویسندگان پژوهش، از حمایت علمی کلیه نهادها و اشخاصی که برای تسهیل دسترسی به اطلاعات مجاز و همچنین تکمیل پرسش‌نامه‌ها و تحلیل نتایج یاری کردند، کمال تشکر را دارند.

References

Afshar, A., Mariño, M. A., Saadatpour, M. & Afshar, A. 2011. Fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis applied to Karun reservoirs system. *Water Resources Management,* 25**,** 545-563.

Alsharqawi, M., Zayed, T., Parvizsedghy, L., Senouci, A. & Al-Derham, H. 2020. Reliability assessment model for water distribution networks. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice,* 11**,** 04019059.

Aşchilean, I., Badea, G., Giurca, I., Naghiu, G. S. & Iloaie, F. G. 2017. Determining priorities concerning water distribution network rehabilitation. *Energy Procedia,* 112**,** 27-34.

Babamiri, A. S., Pishvaee, M. S. & Mirzamohammadi, S. 2020. The analysis of financially sustainable management strategies of urban water distribution network under increasing block tariff structure: a system dynamics approach. *Sustainable Cities and Society,* 60**,** 102193.

Baby, S. 2013. AHP modeling for multicriteria decision-making and to optimise strategies for protecting coastal landscape resources. *International Journal of Innovation, Management and Technology,* 4**,** 218.

Bouchard, C., Abi-Zeid, I., Beauchamp, N., Lamontagne, L., Desrosiers, J. & Rodriguez, M. 2010. Multicriteria decision analysis for the selection of a small drinking water treatment system. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA,* 59**,** 230-242.

Bozkurt, C., Firat, M., Abdullah, A., Yilmaz, S. & ÖzdemİR, Ö. R. 2022. Strategic water loss management: current status and new model for future perspectives. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences,* 40**,** 310-322.

Bragalli, C., Neri, M. & Toth, E. 2019. Effectiveness of smart meter-based urban water loss assessment in a real network with synchronous and incomplete readings. *Environmental Modelling and Software,* 112**,** 128-142.

Brentan, B. M., Luvizotto Jr, E., Montalvo, I., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. 2017. Near real time pump optimization and pressure management. *Procedia Engineering,* 186**,** 666-675.

Caetano, J., Carriço, N. & Covas, D. 2022. Lessons learnt from the application of MCDA sorting methods to pipe network rehabilitation prioritization. *Water,* 14**,** 736.

Chang, C. W., Wu, C. R., Lin, C. T. & Chen, H. C. 2007. An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine. *Computers and Industrial Engineering,* 52**,** 296-307.

Dai, P. D., Cuong, L. Q. & Dai, B. V. 2017. Optimal pump scheduling to pressure management for large-scale water distribution systems. *International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications*, Springer, 532-541.

Delgado-Galván, X., Pérez-García, R., Izquierdo, J. & Mora-Rodríguez, J. 2010. An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management. *Mathematical and Computer Modelling,* 52**,** 1194-1202.

Dubrou, S., Konjek, J., Macheras, E., Welté, B., Guidicelli, L., Chignon, E., et al. 2013. Diversity, community composition, and dynamics of nonpigmented and late-pigmenting rapidly growing mycobacteria in an urban tap water production and distribution system. *Applied and Environmental Microbiology,* 79**,** 5498-5508.

Espandar, A. 2007. Investigating the factors of water loss in the water distribution networks of Yasouj city. M.Sc. Thesis, Aghigh University, Isfahan, Iran. (In Persian)

Fecarotta, O. & Mcnabola, A. 2017. Optimal location of pump as turbines (PATs) in water distribution networks to recover energy and reduce leakage. *Water Resources Management,* 31**,** 5043-5059.

Fontana, M. E. & Morais, D. C. 2016. Decision model to control water losses in distribution networks. *Production,* 26**,** 688-697.

Garðarsson, G. Ö., Boem, F. & Toni, L. 2022. Graph-based learning for leak detection and localisation in water distribution networks. *IFAC-PapersOnLine,* 55**,** 661-666.

Heydari, S. 2018. Application of multi-criteria decision-making models in the loss of urban water network (case study: Sanandaj city). M.Sc. Thesis Kurdistan University, Kurdistan, Iran. (In Persian)

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**,** 177-189.

Hu, X., Han, Y., Yu, B., Geng, Z. & Fan, J. 2021. Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks. *Journal of Cleaner Production,* 278**,** 123611.

Kamyab, L. 2019. Investigating water loss in the distribution network of villages in Yazd province and providing practical solutions. M.Sc. Thesis, Marvdasht University, Marvdasht, Iran. (In Persian)

Kanakoudis, V. & Tsitsifli, S. 2014. Using the bimonthly water balance of a non-fully monitored water distribution network with seasonal water demand peaks to define its actual NRW level: the case of Kos town, Greece. *Urban Water Journal,* 11**,** 348-360.

Makaya, E. 2016. *Water loss management strategies for developing countries.* PhD. Thesis, University of Kassel, Zimbabwe.

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

Mehraban, M. 2019. Investigating the amount of non-revenue water (loss) at the level of Mohammad Ali Pahlavan complex in Bojnord city and it's mitigation methods. M.Sc. Thesis, Eshragh University, Bojnourd, Iran. (In Persian)

Morais, D. C. & De Almeida, A. T. 2007. Group decision-making for leakage management strategy of water network. *Resources, Conservation and Recycling,* 52**,** 441-459.

Mousavi, S. A., Shahbazi, I., Janjani, H., Veysinejad, R., Sobhani, A. A. & Bakhti, M. 2017. Study of non-revenue water status and enforcement measures to reduce water loss: case study in villages of Kermanshah Province of Iran. *Chinese Journal of Population Resources and Environment,* 15**,** 351-356.

Mugabi, J., Kayaga, S. & Njiru, C. 2007. Strategic planning for water utilities in developing countries. *Utilities Policy,* 15**,** 1-8.

Mutikanga, H. E., Sharma, S. K. & Vairavamoorthy, K. 2011. Multi-criteria decision analysis: a strategic planning tool for water loss management. *Water Resources Management,* 25**,** 3947–3969.

Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M. & Moridi, A. 2010. Pressure management model for urban water distribution networks. *Water Resources Management,* 24**,** 437-458.

Ndunguru, M. G. & Hoko, Z. 2016. Assessment of water loss in Harare, Zimbabwe. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development,* 6**,** 519-533.

Ociepa-Kubicka, A. & Wilczak, K. 2017. Water Loss Reduction as the Basis of Good Water Supply Companies' Management. *E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 02015*, Poland.

Raspati, G. S., Bruaset, S., Bosco, C., Mushom, L., Johannessen, B. & Ugarelli, R. 2022. A risk-based approach in rehabilitation of water distribution networks. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 19**,** 1594.

Salehi, S., Jalili Ghazizadeh, M. & Tabesh, M. 2018. A comprehensive criteria-based multi-attribute decision-making model for rehabilitation of water distribution systems. *Structure and Infrastructure Engineering,* 14**,** 743-765.

Salehi, S., Jalili Ghazizadeh, M., Tabesh, M., Valadi, S. & Salamati Nia, S. P. 2021. A risk component-based model to determine pipes renewal strategies in water distribution networks. *Structure and Infrastructure Engineering,* 17**,** 1338-1359.

Salehi, S., Robles-Velasco, A., Seyedzadeh, A., Ghazali, A. & Davoudiseresht, M. 2022. A hybrid knowledge-based method for pipe renewal planning in water distribution systems with limited data: application to Iran. *Utilities Policy,* 78**,** 101407.

Samir, N., Kansoh, R., Elbarki, W. & Fleifle, A. 2017. Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. *Alexandria Engineering Journal,* 56**,** 601-612.

Selek, B., AdigÜzel, A., İrİtaş, Ö., Karaaslan, Y., Kinaci, C., Muhammetoğlu, A., et al. 2018. Management of water losses in water supply and distribution networks in Turkey. *Turkish Journal of Water Science and Management,* 2**,** 58-75.

Silva, V., Morais, D. C. & Almeida, A. T. 2010. A multicriteria group decision model to support watershed committees in Brazil. *Water Resources Management,* 24**,** 4075-4091.

Sitzenfrei, R., Möderl, M. & Rauch, W. 2013. Automatic generation of water distribution systems based on GIS data. *Environmental Modelling and Software,* 47**,** 138-147.

Souza, R. G., Meirelles, G., Brentan, B. & Izquierdo, J. 2022. Rehabilitation in intermittent water distribution networks for optimal operation. *Water,* 14**,** 88.

Tabesh, M. 2007. Loss management in Iran's water distribution systems according to standard–308 A. *The First Conference on Adaptation to Dehydration.* Tehran, Iran. (In Persian)

Tabesh, M., Roozbahani, A., Roghani, B., Salehi, S., Rasi Faghihi, N. & Heydarzadeh, R. 2020. Prioritization of non-revenue water reduction scenarios using a risk-based group decision-making approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,* 34**,** 1713-1724.

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

Taha, A. W., Sharma, S., Lupoja, R., Fadhl, A. N., Haidera, M. & Kennedy, M. 2020. Assessment of water losses in distribution networks: methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. *Resources, Conservation and Recycling,* 152**,** 104515.

Tlili, Y. & Nafi, A. 2012. A practical decision scheme for the prioritization of water pipe replacement. *Water Science and Technology: Water Supply,* 12**,** 895-917.

Trojan, F. & Morais, D. C. 2012. Using ELECTRE TRI to support maintenance of water distribution networks. *Pesquisa Operacional,* 32**,** 423-442.

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**,** 28-40.

Wang, Y., Li, Z., Tang, Z. & Zeng, G. 2011. A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management,* 25**,** 3465-3484.

Wu, Z. Y., Sage, P. & Turtle, D. 2010. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. *Water Resource Planning and Management,* 136**,** 116-128.

Zyoud, S. H., Shaheen, H., Samhan, S., Rabi, A., Al-Wadi, F. & Fuchs-Hanusch, D. 2016. Utilizing analytic hierarchy process (AHP) for decision making in water loss management of intermittent water supply systems. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development,* 6**,** 534-546.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License