Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 8, No. 1, PP. 41-48, Spring 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2022.307115.1289

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۱، صفحات ۴۱-۴۸، بهار ۱۴۰۲

Research Paper

Evaluation of Integration of Pressure Management Methods with Network Management Operations to Reduce Water Loss Using Topsis-Vikor Decision Making Technique

Mohamadhadi Haghighatnejad[1], Reza Tavakkoli-Moghaddam[2] and Hossein Amoozad-Khalili[3*]

1- Master of Technology Management, Research and Development Policy Orientation, Shiraz Water and Wastewater Company, Shiraz, Iran.
2- Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
3- Assistant Professor Department of Industrial Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran.
*Corresponding Author, Email: amoozad92@yahoo.com

Received: 03/10/2021
Revised: 11/06/2022
Accepted: 03/07/2022
© IWWA

Abstract

In order to optimally manage the pressure and reduce the non-revenue water as much as possible, taking into account the costs of each activity, it is necessary to examine the priority of each solution by scientific methods and considering the costs, efficiency and duration of implementation. Therefore, in order to avoid cost wastage and efficient use of financial resources, it is necessary to use a comprehensive and systematic approach to identify different strategies that can be used to manage urban water pressure, the benefits and Compare their disadvantages. In the statistical population of this research, the knowledge and experience of 35 experts in the water and wastewater industry were used. Also in order to prioritize the proposed operations with the aim of reducing non-revenue water based on three criteria: the impact of the project, the duration of the project and the cost of the project, the integrated TOPSIS-VIKOR method has been used. Findings indicate that in the first priority, the installation of online data loggers pressure gauges, the second priority is the continuous updating of water maps and GIS network mapping, and in the third priority the completion of its information layers including pipe life, material and diameter, were located.

Keywords: Pressure Management, Non-Revenue Water, Multi-Criteria Decision Making methods.

مقاله پژوهشی

ارزیابی تلفیق روش‌های مدیریت فشار با عملیات مدیریت شبکه به‌منظور کاهش هدررفت آب با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری تاپسیس - ویکور

محمدهادی حقیقت‌نژاد[۱]، رضا توکلی مقدم[۲] و حسین عموزاد خلیلی[۳*]

۱- کارشناس ارشد مدیریت تکنولوژی، گرایش سیاست‌های تحقیق و توسعه، شرکت آب و فاضلاب شیراز، شیراز، ایران.
۲- استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران.
*نویسنده مسئول، ایمیل: amoozad92@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

برای مدیریت بهینه فشار و کاهش هرچه بیشتر آب بدون درآمد با درنظر گرفتن هزینه‌های هر فعالیت، لازم است تا اولویت هر کدام از راه‌کارها با روش‌های علمی و با توجه به هزینه‌ها، کارایی و مدت زمان اجرا بررسی شوند. بنابراین، به‌منظور جلوگیری از اتلاف هزینه و استفاده بهینه از منابع مالی، ضروری است تا با بهره‌گیری از یک رویکرد جامع و نظام‌مند، راهبردهای مختلفی که به‌منظور مدیریت فشار آب شهری قابل استفاده هستند، شناسایی شده و مزایا و معایب آن‌ها مقایسه شود. در جامعه آماری این تحقیق، از دانش و تجربیات ۳۵ خبره در صنعت آب و فاضلاب کمک گرفته شد. هم‌چنین به‌منظور اولویت‌بندی عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد مبتنی بر ۳ معیار میزان تاثیر اجرای طرح، مدت زمان اجرای طرح و میزان هزینه اجرای طرح، از روش تلفیقی تاپسیس – ویکور استفاده شد. یافته‌های تحقیق بیانگر آن است که به‌ترتیب در اولویت اول، نصب فشارسنج‌های دیتالاگر برخط، اولویت دوم، به‌روز رسانی مستمر نقشه‌های آب و تهیه نقشه GIS شبکه و در اولویت سوم، تکمیل لایه‌های اطلاعاتی آن شامل عمر لوله، جنس و قطر و غیره قرارگرفتند.

کلمات کلیدی: مدیریت فشار، آب بدون درآمد، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره.

۱- مقدمه

امروزه آب یکی از بزرگترین چالش‌های قرن است که می‌تواند در آینده بسیار نزدیک منشا بسیاری از تحولات منفی و مثبت جهان قرار گیرد. با توجه به افزایش روز افزون جمعیت، توسعه صنایع، تغییرات آب و هوا و افزایش آلودگی منابع آب شیرین، دسترسی به آب کافی و مناسب در برخی از کشورها به یک بحران جدی تبدیل شده است. منابع آبی کشور ایران نیز در مرحله بحرانی قرار دارد و مشکل کمبود آب و کیفیت آن مشکلات زیادی را برای مسئولان و کارشناسان امر به‌وجود آورده است. در سال‌های اخیرکمبود شدید منابع و افزایش سریع هزینه‌های تولید آب باعث شده که مدیریت فشار شبکه‌های آب مورد توجه قرارگیرد بنابراین در کنار تامین آب از منابع جدید باید از هدر رفتن آب در مراحل انتقال، تصفیه، ذخیره و توزیع به‌عنوان یک فعالیت درازمدت و با برنامه‌ریزی مدون جلوگیری نمود (ایدی و همکاران، ۱۳۸۷). مدیران در شرکت‌های آب و فاضلاب به دو دلیل مهم سعی بر مدیریت فشار آب و به تبع آن کاهش آب بدون درآمد دارند. اول این‌که به‌دلیل کمبود منابع آب، سعی در کاهش هدررفت آب دارند و با کاهش هدررفت آب به دنبال جبران کمبود آب هستند. دوم این‌که به‌دلیل زیان بالای آب بدون درآمد سعی در کاهش زیان شرکت از طریق کاهش میزان آب بدون درآمد دارند. متاسفانه به‌دلیل عدم شناخت درست شاخص‌های آب بدون درآمد و هم‌چنین نداشتن روش‌های مناسبی برای اولویت‌بندی در حین برنامه‌ریزی پروژه‌ها برای کاهش آن‌ها معمولا خروجی‌های مطلوبی ندارند و فعالیت‌ها در این بخش از بهره‌وری قابل‌قبولی برخوردار نیستند. لذا شناسایی و اولویت‌بندی عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] می‌تواند راه‌کاری اثربخش به مدیران شرکت درخصوص استفاده از این روش‌ها ارائه نماید.

شرکت آب و فاضلاب شیراز یکی از سازمان‌های خدماتی برای آبرسانی شهری است و هم‌اکنون به بیش از ۲ میلیون نفر از ساکنان شهر شیراز خدمات‌رسانی می‌کند. این شرکت نیز مانند تمامی شرکت‌های آب و فاضلاب در کشور دچار چالش‌های زیادی در بحث آبرسانی به مردم است که از آن جمله می‌توان به پدیده خشکسالی‌های طولانی، نبود منابع مالی کافی برای اجرای پروژه‌های توسعه‌ای، فرسوده بودن شبکه‌های توزیع آب به‌علت عمر طولانی شبکه، عدم وجود زون‌بندی در شبکه‌های آب، عدم محاسبه دقیق میزان آب تولید شده به‌دلیل گران‌قیمت بودن کنتورهای محاسبه آب تولیدی، عدم رعایت الگوی مصرف مناسب توسط مشترکین و غیره اشاره نمود. بدیهی است با توجه به وضعیت موجود در این شرکت می‌توان برای کاهش میزان آب بدون درآمد در هریک از مقوله‌های فوق برنامه‌ریزی‌ها و عملیات متعددی را انجام داد. هدف این تحقیق ارزیابی و تحلیل روش‌های مدیریت فشار با هدف کاهش هدررفت آب با استفاده از روش تلفیقی تاپسیس[2] – ویکور[3]، در شبکه‌های آبرسانی و تعمیم آن است. فشار به‌عنوان یکی از عوامل موثر و قابل کنترل در شبکه‌های توزیع نقش مهمی در نحوه چگونگی توزیع آب دارد. هم‌چنین کنترل فشار در شبکه‌های اجرا شده تنها از طریق تنظیم شیرآلات کنترلی میسر است.

۲- مبانی نظری تحقیق

مدیریت فشار یک ابزار کارآمد برای بهره‌وری بیشتر از شبکه‌ها آبرسانی است. عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد منجر به کاهش میزان نشت و افزایش عمر تاسیسات و تجهیزات شبکه، کاهش تعداد حوادث و اتفاقات و هم‌چنین کاهش آب مصرفی می‌شود. در تحقیقی با انتخاب یک DMA و تغییرات فشار به‌صورت فیزیکی و فشارسنجی و تلفیق هم‌زمان نتایج با خروجی نتایج نرم‌افزارهای هیدرولیکی، یک روش پیاده‌سازی مدیریت فشار برروی شبکه آبرسانی ارائه شد. در این روش شبکه توزیع آب به چندین زون فشاری تقسیم و سپس مقادیر دبی لحظه‌ای ورودی به هر زون فشاری و فشار در شبکه اندازه‌گیری می‌شود. سپس با تغییر شرایط و مقادیر خروجی شیرهای فشارشکن، تاثیر تغییرات فشار در میزان تغییرات حداقل جریان شبانه و تاثیر آن روی میزان نشت از شبکه توزیع آب نشان داده می‌شود (تابش و بیگی، ۱۳۹۶).

با استفاده از بهینه‌سازی تنظیم فشار خروجی شیرهای فشارشکن، روشی ارائه شد تا فشار شبکه آب درگره‌های مصرفی تا حد امکان به تابع هدف معرفی شده (طبق استاندارد شبکه‌های آبرسانی) نزدیک شود. برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم فراکاوشی زنبور عسل استفاده شد که به‌وسیله نرم‌افزار Matlab نوشته شده بود. مدل‌سازی شبکه آب در نرم‌افزار WaterGEMS انجام شد. نتایج حاکی از افزایش قابلیت اطمینان شبکه و کاهش نشتی‌های کنترل نشده داشت. هم‌چنین سطح فشار در نواحی مختلف شبکه در حالت مطلوب قرار گرفت (صالحی و همکاران، ۱۳۹۵).

در تحقیقی به‌کمک یک مدل ترکیبی که با تلفیق نرم‌افزارهای EPANET و Matlab ایجاد شده، این روش بررسی و

تاثیر آن بر تغییرات تقاضای آب در گره‌های مصرف مشخص شد. شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه، به‌کمک نرم‌افزار بهبودیافته EPANET به‌منظور تحلیل شبکه به‌روش تحلیل مبتنی بر فشار انجام و از طریق نرم‌افزار Matlab به مدل بهینه‌ساز لینک شد. در این مدل، با کاهش فشار از طریق تنظیم بهینه فشار در شیرهای فشارشکن و در نتیجه کاهش فشار در گره‌های مصرف، دبی قابل برداشت در گره‌ها مطابق با رابطه هد-دبی کاهش می‌یافت. کارایی مدل، با استفاده از سه شبکه فرضی مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد که می‌توان به‌کمک تنظیم بهینه فشار در شبکه توزیع با استفاده از شیرهای فشارشکن، مصرف آب را تا حد قابل‌توجهی کاهش داد (خاشعی و همکاران، ۱۳۹۸).

در تحقیق دیگری مدل‌سازی پایگاه داده برای شبکه توزیع آب و مدل فیزیکی آن در نرم‌افزار پایگاه داده مکانی متن باز PostgreSQL و PostGIS که هزینه‌های تهیه، توسعه و پشتیبانی آن کمتر از نرم‌افزارهای تجاری مشابه بوده، پیاده‌سازی شد. با توجه به این‌که عوامل توپوگرافی، فشار و مصارف مشترکین بیشترین تأثیر را بر توزیع بهینه آب در شبکه توزیع دارند، راه‌کارهایی از قبیل بررسی و تغییر محل شیرهای فشارشکن به‌منظور بهینه کردن فشار در مناطق پرفشار پیشنهاد شد (فلاحی و صالح زاده، ۱۳۹۶).

در مطالعه‌ای دیگر روش تحلیل جدیدی برای برآورد ضریب نشت بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم مقدار نشت، ارائه شد. برای به‌کارگیری روش پیشنهادی و هم‌چنین برای بررسی اثرات فشار بر مصرف و تلفات آب، شبکه یکی از مناطق شهر تهران به‌عنوان پایلوت مطالعاتی انتخاب شد. در این پایلوت با اعمال الگوهای متفاوت فشار برای خروجی شیر فشارشکن نصب شده در بالادست پایلوت، تغییرات حداقل جریان شبانه، جریان ورودی به شبکه و مصرف مشترکین اندازه‌گیری شد که اجرای مدیریت فشار در این پروژه توانست میزان آن‌ها را به‌ترتیب تا ۵۰، ۲۱ و ۳۰ درصد کاهش دهد. سپس با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، روابطی برای تخمین اثرات کاهش فشار بر میزان کاهش جریان شبانه، دبی ورودی به شبکه و همچنین مصرف مشترکین ارائه شد (جلیلی قاضی‌زاده و ایدی، ۱۳۹۵).

هم‌چنین مدل هیدرولیکی شبکه توزیع منطقه فولادشهر توسط نرم افزار WaterGEMS پیاده سازی شد و بعد از عملیات کالیبراسیون به‌روش الگوریتم ژنتیک با ۳ دستگاه ایستگاه‌های فشار سنجی موجود، موقعیت بهینه شیرهای فشار شکن در شبکه مشخص و در نهایت تاثیر شیرهای فشارشکن بر مصرف بهینه، کاهش نشت و مدیریت فشار در شبکه مذکور مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد کالیبراسیون با دقت ۹۵ درصد انجام شده و در گزینه برتر ۵۷ درصد کاهش نشت و ۲۳ درصد کاهش مصرف مشترکین نسبت به وضع موجود به‌دست آمد (معتمدی و همکاران، ۱۳۹۹).

مکان بهینه شیرهای فشارشکن و مقدار بهینه فشار تنظیمی آن‌ها با استفاده از مرتبط کردن نرم‌افزار EPANET با یک الگوریتم بهینه‌سازی به‌دست آمد. الگوریتم بهینه‌سازی، الگوریتم تفاضل تکاملی DE است. در نهایت به‌کارگیری استراتژی به‌دست آمده با این روش برای یک شبکه توزیع آب واقعی در کشور، موجب شد که فشارهای حدی شبکه حدود ۱۸٪ کاهش یافته و لذا عملکرد شبکه ارتقا یابد (مهدوی و همکاران، ۱۳۹۹).

محققان دیگری مدلی برای مدیریت بهینه فشار با هدف کاهش دادن نشت، ضمن تامین قید حداقل فشار در گره‌های برداشت، ارائه نمودند و یکی از انواع الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت تحت‌عنوان الگوریتم جامعه زنبورهای عسل مصنوعی (ABC) در محیط MATLAB را توسعه دادند که با شبیه‌ساز هیدرولیکی مدل EPANET تلفیق شد. نتایج نشان داد که ضمن رعایت کلیه قیود مسئله با به‌کار بردن روش ارائه شده برای جانمایی و تنظیم بهینه شیرهای فشار شکن، میزان نشت متوسط شبکه در سه دوره شرایط نیاز آبی حداکثر، متوسط و حداقل از مقدار ۸۲/۲۸ به ۷۲/۱۵ لیتر بر ثانیه یعنی به‌میزان ۱۴/۷۵ درصد کاهش یافت که نشان می‌دهد روش ارائه شده برای حداقل کردن نشت در شبکه موفق عمل کرده است (جعفری اصل و همکاران، ۱۳۹۹).

در تحقیق دیگری یک مدل ریاضی برای ارزیابی سود حاصل از اجرای مدیریت فشار بر کاهش نشت، شکستگی‌ها، نشت‌یابی فعال، مصرف آب، مصرف انرژی، خسارات وارده به ساختمان‌ها و افزایش رضایت مشتریان و هم‌چنین هزینه‌های ناشی از خرید، نصب، بهره‌برداری و نگهداری و کاهش درآمد حاصل از کاهش مصرف آب، توسعه داده شد. با استفاده از مدل توسعه داده شده، سود خالص و نسبت سود به هزینه برای هر طرح مدیریت فشار محاسبه شد (مصلحی و همکاران، ۱۳۹۹).

در دهه‌های گذشته دسترسی به منابع آب یکی از موضوعات اصلی در دستور کار تمامی دولت‌ها بوده است. در شرایط کاهش شدید منابع آب و تسریع افزایش تقاضای آب، مدیریت تلفات آب بخشی از برنامه‌ریزی برای بقای انسان در زمین است. نشت در شبکه‌های آبرسانی مقدار قابل‌توجهی را تشکیل می‌دهد که گاهی اوقات بیش از ۷۰٪ از کل ورودی آب است. تحقیقات نشان می‌دهد که مدیریت فشار یکی از موثرترین راه‌ها برای کاهش

میزان نشتی در سیستم توزیع آب است. رویکرد ارائه شده در این مطالعه با هدف مدل سازی نشت به‌عنوان تابعی از فشار و طول لوله، کالیبراسیون ضریب نشتی، استفاده از شیرهای فشار شکن ثابت (PRV)[۴] برای کاهش نوسانات فشار و توسعه توسط Kanakoudis and Gonelas (2014) انجام شد. سناریوهای WaterCAD برای به حداقل رساندن نشت از طریق موثرترین تنظیمات شیرها انجام شد. با توجه به برآورد تقاضای آب لحظه‌ای، کد بهینه‌سازی دیگری براساس الگوریتم DE برای کنترل PRVها و VSPهای نصب شده ارائه شد. این امر منجر به توزیع یکنواخت فشار و کاهش فشار بیش از حد بر شبکه آب در تمام ساعات روز شد. بنابراین نشت آب و مصرف انرژی کاهش یافت. نتایج نشان داد که با استفاده از این روش، نشت زمینه شبکه و میزان مصرف انرژی به‌ترتیب ۴۲/۷۲٪ و ۲۸/۴٪ نسبت به حالت غیرمدیریتی کاهش یافته است.

یک چارچوب ارزیابی اقتصادی برای حمایت از فرایند تصمیم‌گیری در مورد طرح‌های جایگزین نگهداری پیشگیرانه (PM)[۵] توسط Moslehi et al. (2020) ارائه شد. این روش برای ارزیابی منافع و هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم اصلی مربوط به استفاده از شیرهای کاهش فشار (PRVs) امکان‌پذیر است. روش ارائه شده برای متقاعد ساختن تصمیم‌گیرندگان تأسیسات آب در تشخیص امکان‌پذیری اقتصادی و مزایای قابل توجه اجرای طرح‌های PM و توجیه سرمایه‌گذاری مرتبط ضروری شناخته شده است.

Fernando and Alex (2019) کاهش نشت آب را با بهینه‌سازی فشار توسط شیرهای کاهش فشار (PRV) ارزیابی کردند. مدل هیدرولیکی مربوط به یک شبکه توزیع واقعی با استفاده از نرم افزار EPANET توسعه یافت. پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی، تجزیه و تحلیل فشار در گره‌ها، سرعت لوله‌ها، از طریق شاخص‌های عملکرد فنی (TPI) انجام شد. نتایج اولیه نشان دهنده نیاز به بهینه‌سازی فشار بود. گره‌هایی با فشار بیش از حد در قسمت پایین شبکه یافت شد. از افزونه نرم‌افزار EPANET برای مدل‌سازی نشت‌ها براساس فشار پس از تعیین ضریب نشت و درنظر گرفتن نصب دو PRV استفاده شد. نتایج بهینه‌سازی، فشار مناسب در ۳۰/۸۳ درصد گره‌ها و به حداقل رساندن نشت در ۶۵/۳۱ درصد گره‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. به‌نوبه خود، شبیه‌سازی با فرض نصب دو PRV مشخص کرد که TPI از ۷۹/۸۱ به ۹۷/۴۵ افزایش می‌یابد.

۳- روش تحقیق

از آن‌جایی‌که این تحقیق مستقیماً در زمینه آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد، تحقیق کاربردی به‌حساب می‌آید و نتایج آن برای پروژه‌هایی که دچار کمبود منابع تامین آب هستند حائز اهمیت است. هم‌چنین از نظر مکانی از نوع تحقیقات میدانی است، زیرا داده‌های آن با حضور در شرکت آب و فاضلاب شیراز تهیه می‌شود و با استفاده از ابزار مصاحبه و پرسشنامه گردآوری می‌شود. از نظر روش نیز در زمره تحقیقات تحلیلی (مقایسه‌ای) است، زیرا به تجزیه و تحلیل و اولویت‌بندی عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد در شرکت آب و فاضلاب شیراز می‌پردازد.

ابزارهای گردآوری اطلاعات به دو دسته کلی کتابخانه‌ای و میدانی قابل تقسیم است. روش‌های میدانی نیز شامل ابزارهایی مانند مشاهده، مصاحبه و پرسشنامه است. جامعه آماری شامل مدیران ارشد، مدیران فنی، کارشناسان خبره مرتبط با صنعت آب و فاضلاب است که تعداد این افراد ۳۵ نفر است. لازم به‌ذکر است که در این پژوهش نمونه و جامعه آماری برهم منطبق بوده و محیط پژوهش نیز شرکت آب و فاضلاب شیراز است. در این پژوهش به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها با تلفیقی از دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس و ویکور، اولویت‌بندی و رتبه‌بندی عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد انجام شد. ابزار گرداوری اطلاعات پرسشنامه است و با انجام مطالعات کتابخانه‌ای و آرشیوی و بررسی پژوهش صورت‌گرفته، استراتژی‌ها و روش‌های مختلف مدیریت فشار آب و عناصرکلیدی برای پیاده‌سازی مدیریت فشارآب شناسایی و در دو پرسشنامه از این مفاهیم استفاده شد. در پرسشنامه‌ها از خبرگان خواسته شد که میزان و شدت تاثیرگذاری هریک از معیارهای عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد را به‌صورت مقدار تاثیر به‌صورتی که در راهنمای فرم‌ها تعریف شد بر روی روش‌های موثر بر آن مشخص نمایند. در این تحقیق با استفاده از ابزار تکمیل پرسشنامه بین نخبگان امر (اساتید دانشگاهی) و نیز مهندسین درگیر با فرآیند مدیریت فشار آب در شرکت آب و فاضلاب شیراز و کسب اطلاعات لازم و جمع‌بندی تجربیات آن‌ها توسط تلفیقی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس و ویکور مورد تحلیل قرار گرفته است. تکنیک‌های تصمیم‌گیری برای کمک به مدیران برای حل مسائل مختلف برای انتخاب و اولویت‌بندی گزینه‌های موجود کاربرد داشته و به‌منظور ارائه مدلی مناسب استفاده شده است. برای ارزیابی روایی محتوای پرسش‌نامه‌ها از

خبرگان مسلط در هریک از حوزه‌ها، نظرسنجی و ارزش‌گذاری شده و روائی آن مورد تایید قرارگرفته است. از آن‌جا که پرسشنامه اولیه پژوهش بر پایه شاخص‌های شناسایی شده در پیشینه پژوهش و دیدگاه خبرگان فراهم شده، بعد از اجرای این روش روایی محتوای پرسشنامه به تایید خبرگان رسیده است. حاصل مشاوره‌ها و پیشنهادات نخبگان، تعداد ۹ روش (گزینه) و ۳ معیار در زمینه عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد به‌شرح جدول ۱ تنظیم شد.

۴- تحلیل داده و یافته‌ها

در این مقاله، مدل پیشنهادی به این‌گونه است که ابتدا با استفاده از مطالعات پیشین، معیارها و عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد انتخاب و با استفاده از نظر خبرگان صنعت آب، این معیارها و روش‌ها غربالگری (ادغام) شد. سپس برای تعیین درجه اهمیت این معیارها و عملیات‌ها، پرسشنامه تهیه و در اختیار خبرگان قرارگرفته و اهمیت این معیارها و روش‌ها به کمک تلفیقی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس و ویکور مورد تحلیل قرارگرفت. در نهایت به کمک اطلاعات حاصل از این روش‌ها، در شرکت آب و فاضلاب شیراز ارائه شد. با مرور ادبیات و انجام مطالعات کتابخانه‌ای و غربالگری معیارها توسط خبرگان نهایتا سه معیار زمان، هزینه، تاثیر (کارایی) انتخاب شدند. هم‌چنین عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد بعد از نهایی‌سازی با خبرگان، مطابق جدول ۱ ارائه شد.

جدول ۱- عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد

ردیف	روش
۱	نصب شیر فشارشکن در نقاط بحرانی شبکه
۲	نصب شیر برقی با امکان کنترل از راه دور بر روی خطوط انتقال آب برای کنترل دبی
۳	نصب فشارسنج‌های دیتالاگر برخط
۴	کنترل خروجی مخازن در ساعات مختلف شبانه روز به‌صورت کنترل از راه دور
۵	به‌روز رسانی مستمر نقشه‌های آب
۶	تهیه مدل هیدرولیکی شبکه آب
۷	تهیه نقشه GIS شبکه آب و تکمیل لایه‌های اطلاعاتی آن شامل عمرلوله، جنس و قطر و غیره
۸	انجام عملیات ناحیه‌بندی شبکه DMA
۹	اصلاح شبکه فرسوده

بعد از شناسایی روش‌ها و شاخص‌های مرتبط، اولین گام در حل هر مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره، تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری است. معمولا، مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری و وزن شاخص‌ها به‌عنوان ورودی در ماتریس تصمیم‌گیری نمایش داده می‌شود. مقادیر وزن‌های شاخص‌ها به‌وسیله کارشناسان و خبرگان تعیین می‌شود و این مقادیر می‌توانند به‌وسیله اشخاص ذی‌نفع، با توجه به اهداف و فرصت‌های آنان تصحیح شوند. در این پرسش‌نامه از طیف لیکرت ۰ تا ۵ استفاده شد و از پاسخ دهندگان خواسته شد نظرات خود را براساس این طیف در پرسش نامه‌ها وارد کنند.

در گام اول، مطابق جدول ۲ داده‌هایی که از ۳۵ پرسشنامه جمع‌بندی شده است از روش میانگین‌گیری داده‌ها محاسبه می‌شود. در گام دوم، وزن عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد با میانگین‌گیری داده‌های هر ردیف جدول ۳ به‌دست آمده است. در گام سوم، مطابق جدول ۴ نرمال‌سازی برداری و ایده‌آل مثبت و منفی به‌روش تاپسیس صورت پذیرفته است. در گام چهارم، مطابق جدول ۵، F^* (نقطه ایده‌آل مثبت) یعنی حداکثر هر ستون جدول نهایی یا همان بهترین مقدار برای معیار j ام و F^- (نقطه ایده‌آل منفی) یعنی حداقل هر ستون جدول نهایی یا همان بهترین مقدار برای معیار j ام که در روش ویکور بیان شده است استخراج شد. در گام پنجم، از طریق رابطه (۱) مقدار سودمندی[۶] S_i و رابطه (۲) تاسف معیارها[۷] R_i برای ۹ روش جدول نهایی نرمالیزه شده مدیریت فشار به‌دست آمد.

سپس برای هر روش، شاخص ویکور Q_i با رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

(۱): مقدار سودمندی
$$L_{1i} = S_i = \sum_{j=1}^{n} W_j \times \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$$

(۲): تاسف معیارها
$$L_{\infty,1} = R_i = Max\ \{W_j \times \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-}\}$$

(۳): شاخص ویکور
$$Q_i = V \times \left[\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*}\right] + (1 - V) \times [\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}]$$

$$S^- = Max\ S_i\ , \quad S^* = Min\ S_i,$$
$$R^- = Max\ R_i\ , \quad R^* = Min\ R_i$$

که S_i: بیانگر فاصله نسبی i ام از راه‌حل ایده‌آل مثبت (بهترین ترکیب) و R_i بیانگر حداکثر ناراحتی گزینه i ام از دوری راه‌حل ایده‌آل مثبت هستند. V ($\in[0, 1]$): وزن برای استراتژی حداکثر مطلوبیت گروهی است.

در جدول ۵ شاخص‌های R_i و S_i به‌ترتیب نزولی مرتب شده در گام ششم و پایانی، مطابق جدول ۶ اولویت‌بندی عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد حاصل می‌شود. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ویکور و تاپسیس براساس

تابع جمع‌آوری به‌وجود آمده‌اند که "نزدیکی به ایده‌آل"، را درنظر داشته و از روش برنامه‌نویسی توافقی نشات گرفته است. در روش ویکور، نرمال‌سازی خطی و در روش تاپسیس، نرمال‌سازی بردار برای از بین بردن واحدهای توابع معیار استفاده می‌شود. در این مرحله برای نرمال‌سازی داده‌ها از نرمال‌سازی برداری استفاده شده است. روش رتبه‌بندی توافقی ویکور یک راه‌حل توافقی را تعیین می‌کند که حداکثر "کاربردپذیری گروه" را برای "اکثریت" و حداقل تاسف فردی را برای "حریف" ارائه می‌دهد. روش تاپسیس یک راه‌حل با کمترین فاصله به راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله به راه‌حل ایده‌آل منفی را تعیین می‌کند. اما در این پژوهش بخشی از مراحل روش ویکور استفاده شده است که اهمیت نسبی این فاصله را درنظر نمی‌گیرد.

جدول ۲- میانگین داده‌های جمع‌آوری شده پرسش‌نامه‌ها

گزینه معیار	تاثیر (کارایی)	هزینه	زمان
نصب شیر فشارشکن در نقاط بحرانی شبکه	۳/۱۱	۲/۳۷	۲/۴۹
نصب شیر برقی با امکان کنترل از راه دور بر روی خطوط انتقال آب برای کنترل دبی	۳/۶۰	۲/۰۹	۲/۵۷
نصب فشارسنج‌های دیتالاگر برخط	۴/۳۷	۳/۸۰	۳/۸۹
کنترل خروجی مخازن در ساعات مختلف شبانه‌روز به‌صورت کنترل از راه دور	۳/۲۹	۲/۶۶	۲/۴۶
به‌روز رسانی مستمر نقشه‌های آب	۲/۲۹	۲/۹۱	۲/۴۳
تهیه مدل هیدرولیکی شبکه آب	۲/۶۹	۲/۵۱	۲/۲۳
تهیه نقشه GIS شبکه آب و تکمیل لایه‌های اطلاعاتی آن شامل عمر لوله، جنس، قطر و غیره	۲/۴۰	۲/۶۶	۲/۵۴
انجام عملیات ناحیه‌بندی شبکه (DMA)	۳/۱۷	۲/۲۰	۲/۳۱
اصلاح شبکه فرسوده	۳	۱/۶۳	۱/۹۱

جدول ۳- نتایج محاسبه وزن عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد

ردیف	روش	وزن
۱	نصب شیر فشارشکن در نقاط بحرانی شبکه	۲/۶۶
۲	نصب شیر برقی با امکان کنترل از راه دور بر روی خطوط انتقال آب برای کنترل دبی	۲/۷۵
۳	نصب فشارسنج‌های دیتالاگر برخط	۴/۰۲
۴	کنترل خروجی مخازن در ساعات مختلف شبانه‌روز به‌صورت کنترل از راه دور	۲/۸۰
۵	به‌روز رسانی مستمر نقشه‌های آب	۲/۵۴
۶	تهیه مدل هیدرولیکی شبکه آب	۲/۴۸
۷	تهیه نقشه GIS شبکه آب و تکمیل لایه‌های اطلاعاتی آن شامل عمر لوله، جنس، قطر و غیره	۲/۵۳
۸	انجام عملیات ناحیه‌بندی شبکه (DMA)	۲/۵۶
۹	اصلاح شبکه فرسوده	۲/۱۸

جدول ۴- مقادیر ایده‌آل مثبت و منفی و موزون شده عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد

F^*	۱/۸۵	۰/۴۶	۰/۲۳
F^-	۰/۶۱	۱/۹۶	۲/۰۱
شاخص / معیار	تاثیر (کارایی)	هزینه	زمان
نصب شیر فشارشکن در نقاط بحرانی شبکه	۰/۸۷	۰/۸۱	۰/۸۵
نصب شیر برقی با امکان کنترل از راه دور بر روی خطوط انتقال آب برای کنترل دبی	۱/۰۵	۰/۷۴	۰/۹۱
نصب فشارسنج‌های دیتالاگر برخط	۱/۸۵	۱/۹۶	۲/۰۱
کنترل خروجی مخازن در ساعات مختلف شبانه‌روز بصورت کنترل از راه دور	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۸۹
به‌روز رسانی مستمر نقشه‌های آب	۰/۶۱	۰/۹۵	۰/۸۰
تهیه مدل هیدرولیکی شبکه آب	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۲۳
تهیه نقشه GIS شبکه آب و تکمیل لایه‌های اطلاعاتی آن شامل عمر لوله، جنس، قطر و غیره	۰/۶۴	۰/۸۶	۰/۸۳
انجام عملیات ناحیه‌بندی شبکه (DMA)	۰/۸۶	۰/۷۲	۰/۷۶
اصلاح شبکه فرسوده	۰/۶۹	۰/۴۶	۰/۵۴

جدول ۵- شاخص‌های مقدار سودمندی، تاسف معیارها و شاخص ویکور عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد

		R^-	۴/۰۲	S^-	۸/۰۲
		R^*	۱/۷۹	S*	۲/۴۱
Q3	۱/۰۰	R3	۴/۰۲	S3	۸/۰۲
Q5	۰/۳۲	R5	۲/۵۴	S5	۴/۱۷
Q7	۰/۲۹	R7	۲/۴۷	S7	۴/۰۰
Q4	۰/۱۸	R6	۲/۲۹	S4	۳/۹۴
Q1	۰/۱۸	R1	۲/۰۹	S1	۳/۶۴
Q6	۰/۱۵	R8	۲/۰۵	S2	۳/۳۵
Q8	۰/۱۴	R9	۲/۰۴	S8	۳/۲۷
Q2	۰/۰۸	R4	۱/۹۹	S6	۲/۸۵
Q9	۰/۰۶	R2	۱/۷۹	S9	۲/۴۱

جدول ۶- رتبه‌بندی نهایی عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد

روش	شاخص ویکور	اولویت
نصب فشارسنج‌های دیتالاگر برخط	۱/۰۰	۱
به‌روز رسانی مستمر نقشه‌های آب	۰/۳۲	۲
تهیه نقشه GIS شبکه آب و تکمیل لایه‌های اطلاعاتی آن شامل عمر لوله، جنس، قطر و غیره	۰/۲۹	۳
کنترل خروجی مخازن در ساعات مختلف شبانه‌روز بصورت کنترل از راه دور	۰/۱۸	۴
نصب شیر فشارشکن در نقاط بحرانی شبکه	۰/۱۸	۵
تهیه مدل هیدرولیکی شبکه آب	۰/۱۵	۶
انجام عملیات ناحیه بندی شبکه (DMA)	۰/۱۴	۷
نصب شیر برقی با امکان کنترل از راه دور بر روی خطوط انتقال آب برای کنترل دبی	۰/۰۸	۸
اصلاح شبکه فرسوده	۰/۰۶	۹

۵- نتیجه گیری

با توجه به وقوع پدیده خشکسالی‌های طولانی، محدودیت منابع مالی، شرایط فیزیکی شبکه‌های آبرسانی، شرایط اقلیمی و رفتار اجتماعی مصرف‌کنندگان، اولویت‌بندی عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد در تحقیق حاضر، کمک شایانی در برای ارتقای وضعیت کنونی منابع آبی کشور خواهد داشت. چرا که مشخص می‌کند که با نصب فشارسنج‌های دیتالاگر برخط، تاثیرگذاری بیشتری با صرف کمترین زمان و هزینه خواهد داشت. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، به‌ترتیب نصب فشارسنج‌های دیتالاگر برخط، به‌روزرسانی مستمر نقشه‌های آب، تهیه نقشه GIS شبکه آب و تکمیل لایه‌های اطلاعاتی آن شامل عمرلوله، جنس، قطر و غیره به‌ترتیب در اولویت‌های اول، دوم و سوم قرارگرفتند. موضوع عملیات‌های پیشنهادی با هدف کاهش آب بدون درآمد، بی‌تردید یکی از مباحث مهم صنعت آب است که با توجه به محدودیت‌های حاضر، روزبه‌روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود. هم‌چنین برای مدیریت فشار نمی‌توان نسخه واحدی برای تمامی شهرها ارائه نمود، بلکه سازمان‌های متولی باید بسته به شرایط محیطی و منابع خود در خصوص کاهش آب بدون درآمد فعالیت نمایند. انجام کارهای موردی درخصوص مدیریت فشار هر چند بدون نتیجه نیست، ولی با توجه به شرایط موجود نمی‌تواند نتایج کامل و دلخواه داشته باشد.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- Multi-Criteria Decision Making (MCDM)
2- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
3- Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR)
4- Pressure Reducing Valve (PRV)
5- Preventive Maintenance (PM)
6- Usefulness Measure
7- Regret Measure

۷- مراجع

ایدی، ض.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، و شمسایی، ا.، (۱۳۸۷)، "بررسی تاثیرات تغییر فشار برشاخص‌های عملکرد نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری (مطالعه موردی یک شبکه نمونه در شمال تهران)"، *هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، تهران، دانشگاه صنعت آب و برق.

تابش، م.، و بیگی، س.، (۱۳۹۶)، "بررسی نقش قیمت آب در توجیه اقتصادی طرح‌های کاهش آب بدون درآمد"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۸(۱)، ۱۱۳-۱۲۵.

جلیلی قاضی‌زاده، م.، و ایدی، ض.، (۱۳۹۵)، "ارائه روابط تحلیلی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب"، *مجله محیط شناسی*، ۴۲(۳)، ۵۱۷-۵۲۹.

جعفری اصل، ج.، ملک محمودی، م.، سامی، ب.، منتصری، ح.، و بهرامی، م.، (۱۳۹۹)، "مدیریت بهینه فشار با هدف کمینه‌کردن نشت در سیستم‌های توزیع آب شهری با استفاده از شیرهای فشارشکن"، *مجله مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۱(۲)، ۲۴-۳۵.

خاشعی، م.، تابش، م.، و شاهنگیان، ا.، (۱۳۹۸)، "بهینه‌سازی فشار در شبکه توزیع آب با هدف مدیریت مصرف آب شهری"، *هجدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، تهران.

صالحی، ا.، زنگی‌آبادی، ر.، و جمالی‌زاده، م.، (۱۳۹۵)، " مفهوم آب بدون درآمد"، *کنفرانس بین المللی نخبگان عمران، معماری و شهرسازی*، تهران.

فلاحی، غ.، و صالح‌زاده، م.، (۱۳۹۶)، "مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از سامانه‌های اطلاعات مکانی و پایگاه داده مکانی متن باز (مطالعه موردی: شهرک گلستان شیراز)"، *مجله آب و توسعه پایدار*، ۴(۲)، ۱۵۱-۱۵۸.

مصلحی، ا.، جلیلی قاضی‌زاده، م.، و یوسفی، ا.، (۱۳۹۹)، "تحلیل اقتصادی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب"، *مجله آب و فاضلاب*، ۳۱(۲)، ۱۰۰-۱۱۷.

معتمدی، ب.، کیماسی، ر.، کیانی، ح.، و ناظمی، ع.، (۱۳۹۹)، "کاهش نشت، مصرف بهینه و مدیریت فشار شبکه توزیع آب منطقه فولادشهر اصفهان با پیاده سازی مدل هیدرولیکی کالیبره"، *نوزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران*، مشهد.

مهدوی، پ.، یزدی، ج.، و شاهسوندی، م.، (۱۳۹۹)، "مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از جانمایی و بهره‌برداری بهینه از شیرهای فشارشکن"، *سومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران*، شیراز.

Fernando, G., and Alex, A., (2019), "Pressure management for leakage reduction using pressure reducing valves, Case study in an Andean city", *Alexandria Engineering Journal*, 58(4), 1313-1326.

Moslehi, I., Jalili Ghazizadeh, MR., and Usefi, E., (2020), "An economic valuation model for alternative pressure management schemes in water distribution networks", *Journal of Utilities Policy*, 67, 101-129.

Kanakoudis, V., and Gonelas, K., (2014), "Applying pressure management to reduce water losses in two Greek cities Water Distribution Systems: Expectations, problems, results and revisions", *Journal of Procedia Engineering*, 89, 318-325.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.