

Economic Analysis of Pressure Management in Water Distribution Networks

I. Moslehi¹, M. R. Jalili Ghazizadeh², E. Yousefie Khoshghalb³

1. PhD Student in Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Water and Wastewater, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) m_jalili@sbu.ac.ir
3. MSc Student in Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received Dec. 22, 2018 Accepted May 20, 2019)

To cite this article:

Moslehi, I., Jalili Ghazizadeh, M. R., Yousefie Khoshghalb, E., 2020. "Economic analysis of pressure management in water distribution networks" Journal of Water and Wastewater, 31(2), 100-117. Doi: 10.22093/wwj.2019.163790.2794. (In Persian)

Abstract

Pressure management (PM) is one of the most effective methods of leakage management in water distribution networks (WDNs). In addition to reducing leakage, it provides many benefits for water utilities. The purpose of this paper is an economic analysis of the PM through a comprehensive cost-benefit analysis, taking into account the various aspects of the implementation of PM in WDNs. For this purpose, a mathematical model was developed for evaluating the benefits arising from implementing PM on the reduction of leakage, pipe breaks, active leakage control, water consumption, energy consumption, building damages and the increase of customer satisfaction and the costs of purchase, installation, operation and maintenance, and revenue reduction due to the reduction of water consumption. Using the developed model, the net benefit and benefit/cost ratio can be calculated for each PM scheme. As a case study, the advanced PM system was implemented through the installation of time modulated (TM) and flow modulated (FM) pressure reducing valves (PRVs) in a district metered area (DMA) located in Mashhad city. The net benefit and benefit/cost ration was then estimated by the developed mathematical model. The results showed that the net benefit of PM system through FM is greater than TM and the benefit/cost ratio was obtained 3.7 and 3.2 respectively. The developed mathematical model will assist water managers and practitioners in comprehensive understanding of the benefits and economic justification for implementing PM schemes.

Keywords: Pressure Management, Economic Analysis, Financial Analysis, Leakage Management, Water Distribution Network.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۲، صفحه: ۱۱۷-۱۰۰

تحلیل اقتصادی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب

ایمان مصلحی^۱، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده^۲، احسان یوسفی خوش‌قلب^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران (نویسنده مسئول) m_jalili@sbu.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران

(دریافت ۹۷/۱۰/۱ پذیرش ۹۸/۲/۳۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

مصلحی، ا.، جلیلی قاضی‌زاده، م. ر.، یوسفی خوش‌قلب، ا.، ۱۳۹۹، "تحلیل اقتصادی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۲)، ۱۱۷-۱۰۰. Doi: 10.22093/wwj.2019.163790.2794

چکیده

مدیریت فشار یکی از مؤثرترین روش‌های مدیریت نشت در شبکه‌های توزیع آب است که علاوه بر کاهش نشت، مزایای بسیاری برای شرکت‌های آب و فاضلاب دارد. هدف از این پژوهش تحلیل اقتصادی مدیریت فشار از طریق تحلیل جامع سود-هزینه با در نظر گرفتن جوانب مختلف اجرای مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب است. به این منظور یک مدل ریاضی برای ارزیابی سود حاصل از اجرای مدیریت فشار بر کاهش نشت، شکستگی‌ها، نشت‌یابی فعال، 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 قابل محاسبه است. به عنوان مطالعه موردی، سامانه مدیریت فشار پیشرفته از طریق نصب شیرهای کاهنده فشار مبتنی بر زمان و جریان در یک ناحیه ایزوله واقع در شهر مشهد اجرا شد و سود خالص و نسبت سود به هزینه حاصل از اجرای آن توسط مدل ریاضی توسعه داده شده در این مقاله، تخمین زده شد. نتایج نشان داد که سود خالص حاصل از اجرای سامانه مبتنی بر جریان از سامانه مبتنی بر زمان بیشتر است و نسبت سود به هزینه برای سامانه‌های مدیریت فشار مبتنی بر جریان و زمان به ترتیب ۳/۷ و ۳/۲ به دست آمد. مدل ریاضی توسعه داده شده در این مطالعه به مدیران و متخصصان صنعت آب برای درک جامعی از مزایا و توجیه اقتصادی اجرای طرح‌های مدیریت فشار کمک خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت فشار، تحلیل اقتصادی، تحلیل مالی، مدیریت نشت، شبکه توزیع آب

۱- مقدمه

از ۵۰ درصد آب ورودی تغییر می‌کند (Puust et al., 2010). در ایران نیز میزان متوسط نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری در سال ۱۳۹۵، حدود ۱۴ درصد گزارش شده است (Jalili, Ghazizade and Moslehi, 2017)

علاوه بر ضررهای اقتصادی و مالی، نشت در شبکه می‌تواند منجر به قطع جریان آب، هدررفت انرژی و ورود آلودگی به شبکه

نشت یکی از معضلات اصلی شبکه‌های توزیع آب در سرتاسر جهان است؛ به طوری که سالانه مقدار قابل توجهی از آب در اثر نشت موجود در شبکه از دست می‌رود. مقدار نشت شبکه‌های توزیع آب در کشورهای مختلف بسیار متفاوت گزارش شده است؛ بر مبنای این گزارش‌ها، در کشورهای توسعه‌یافته مقدار نشت از ۳ تا ۷ درصد آب ورودی به شبکه و در کشورهای در حال توسعه تا بیش

مخازن ذخیره است (Vicente et al., 2015). در عمل، استفاده از شیرهای کاهنده فشار^۲ به منظور کاهش فشار اضافی در ساعاتی مشخصی از روز مخصوصاً در مناطق دارای توپوگرافی به صورت گسترده‌ای توسط شرکت‌های آب‌رسانی مختلف به منظور مدیریت فشار به کار می‌رود. شیرهای کاهنده فشار دارای دو نوع کنترل‌کننده هیدرولیکی یا الکترونیکی هستند.

قدیمی‌ترین و پر استفاده‌ترین شیرهای کاهنده فشار، شیرهای هیدرولیکی هستند که شیرهای کاهنده فشار با خروجی ثابت^۳ (FO) متداول‌ترین آنها هستند. تنظیم فشار پایین دست این نوع شیرها مستقل از فشار بالادست شبکه، ثابت در نظر گرفته می‌شود و برای تغییر و تنظیم فشار خروجی، پایلوت شیر باید به صورت دستی تنظیم شود. طی دو دهه اخیر با پیشرفت تجهیزات الکترونیکی و الگوریتم‌های کنترلی، شیرهای کاهنده فشار بر مبنای کنترل‌کننده‌های الکترونیکی توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از این جمله می‌توان به شیرهای کاهنده فشار با کنترل‌کننده‌های تنظیمی مبتنی بر زمان^۴ (TM)، مبتنی بر جریان^۵ (FM) و مبتنی بر گره کنترل از راه دور^۶ (RNM) اشاره کرد. شیرهای TM، از یک کنترل‌گر و یک تایمر داخلی تشکیل شده و به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که در هر دوره زمانی فشار مورد نیاز بالادست تأمین شود (Awad et al., 2008). اما شیرهای FM قابلیت تنظیم فشار را با توجه به دبی عبوری مهیا می‌سازند که این کار با استفاده از دبی‌سنج استاندارد برای تنظیم رابطه فشار و دبی صورت می‌گیرد. تعدادی از پژوهشگران استفاده از شیرهای کاهنده فشار الکترونیکی را به عنوان روش‌های مدیریت فشار پیشرفته^۷ معرفی نموده‌اند (Lambert and Fantozzi, 2010).

اگرچه مدیریت فشار یکی از کارآمدترین و مؤثرترین روش‌ها برای کنترل و کاهش نشت است، اما مزایای عمده دیگری از جمله کاهش تعداد شکستگی‌ها، کاهش هزینه کنترل فعال نشت، تأخیر در تعویض لوله‌ها، افزایش عمر لوله‌ها، افزایش رضایت مشترکان و کاهش برخی از اجزای مصرف آب را دارد (Lambert and Thornton, 2012, Moslehi and Jalili Ghazizadeh, 2016)

شود (Mutikanga et al., 2012). بنابراین شرکت‌های آب‌رسانی در سرتاسر جهان همواره به دنبال کنترل و کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب هستند و این مسئله به یکی از وظایف اصلی این شرکت‌ها در حوزه بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب تبدیل شده است.

نشت در شبکه‌های توزیع آب شامل نشت از خطوط انتقال، نشت‌های گزارش شده و گزارش نشده، نشت زمینه از خطوط اصلی و انشعابات شبکه و نشت از مخازن ذخیره است (Fanner et al., 2007).

مدیریت نشت به مجموعه اقدامات و استراتژی‌هایی گفته می‌شود که توسط هر شرکت آب‌رسانی اتخاذ شده تا سطح نشت موجود را به سطح اقتصادی نشت^۱ برساند (Yousefi Khoshqalb et al., 2018).

از این منظر، چهار راهکار و استراتژی اصلی مدیریت نشت شامل مدیریت فشار، کنترل فعال نشت، سرعت و کیفیت تعمیرات و مدیریت دارایی‌ها شامل بازسازی و نوسازی شبکه می‌باشند (Lambert, 2002). از بین استراتژی‌های موجود، تنها مدیریت فشار می‌تواند بر هر سه مؤلفه نشت به خصوص نشت زمینه تأثیر داشته باشد و آنها را کاهش دهد (Vicente et al., 2015). از نظر زمانی، مدیریت فشار جزء استراتژی‌های میان‌مدت و بلندمدت است که دوره بازگشت سرمایه آن سریع بوده و حتی به چندین ماه هم می‌رسد (Fanner et al., 2007, Pearson and Trow, 2005). از اینرو، مدیریت فشار به عنوان یک مؤلفه کلیدی و یک ابزار کارآمد و مؤثر با صرفه اقتصادی بالا در مدیریت نشت شناخته شده است (Martinez-Codina et al., 2015, Lambert, 2003).

در حالت کلی منظور از مدیریت فشار، عملیات کنترل و مدیریت فشارهای شبکه تا سطح بهینه است که در آن آب برای مشترکان و مصرف‌کنندگان مجاز به اندازه کافی و کارآمد تأمین شود، در حالی که فشارهای اضافی و غیرلازم کاهش یافته و نوسانات فشاری در شبکه تا حد امکان حذف شوند (Thornton and Lambert, 2005).

مدیریت فشار شامل فعالیت‌های مختلفی نظیر استفاده از شیرهای کاهنده فشار، پمپ‌های دور متغیر و تنظیم ارتفاع آب در

^۱ Economic Level of Leakage (ELL)

^۲ Pressure Reducing Valves (PRVs)

^۳ Fixed Outlet (FO) PRVs

^۴ Time-Modulated (TM) PRVs

^۵ Flow-Modulated (FM) PRVs

^۶ Remote Node-based Modulation (RNM) PRVs

^۷ Advanced Pressure Control (APC)

(NPV)¹ برای تحلیل اقتصادی استفاده کردند و مزایای حاصل از کاهش نشت و شکستگی‌ها را برای یک دوره ۱۵ ساله تخمین زدند (Kanakoudis and Gonelas, 2016).

کریکو و والسکی در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی تحلیل سود-هزینه حاصل از اجرای مدیریت فشار برای یک ناحیه فشار در ایتالیا را انجام دادند. در پژوهش آنها سود حاصل از کاهش نشت و کاهش شکستگی‌ها در نظر گرفته شد. علاوه بر این میزان کاهش نشت با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی برای یک شبکه با نشت زیاد، متوسط و کم تخمین زده شد (Creaco and Walski, 2017).

در اکثر پژوهش‌های یاد شده سود حاصل از اجرای مدیریت فشار در کاهش نشت به تنهایی یا همراه با کاهش شکستگی‌ها و کاهش مصارف وابسته به فشار در نظر گرفته شده و معدود مطالعاتی مزایای دیگر اقتصادی حاصل از اجرای مدیریت فشار را مورد بررسی قرار داده‌اند. علاوه بر این در اغلب این پژوهش‌ها از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی برای پیش‌بینی میزان نشت شبکه استفاده شده و توان رابطه فشار-نشت (توان N_1) بر اساس مطالعات قبلی انتخاب شده است.

هدف از اجرای این پژوهش تحلیل اقتصادی مدیریت فشار از طریق تحلیل جامع سود-هزینه با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف اقتصادی حاصل از اجرای مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب بود. به این منظور یک مدل ریاضی برای ارزیابی سود خالص حاصل از اجرای مدیریت فشار بر کاهش نشت، شکستگی‌ها، عملیات نشت‌یابی فعال، مصرف آب، مصرف انرژی، خسارات وارده به ساختمان‌ها و افزایش رضایت مشتریان و همچنین هزینه‌های حاصل از خرید و نصب، بهره‌برداری و نگهداری و کاهش درآمد حاصل از کاهش مصرف آب توسعه داده شد. در مدل توسعه داده شده برخی فواید حاصل از اجرای طرح‌های مدیریت فشار، نظیر سود حاصل از کاهش شکستگی، بر اساس آخرین یافته‌های گروه تلفات انجمن بین‌المللی آب در ارتباط با رابطه فشار-شکستگی توسعه داده شد؛ علاوه بر این سود حاصل از کاهش تواتر عملیات نشت‌یابی با در نظر گرفتن فاصله زمانی اقتصادی و سود حاصل از کاهش خسارات وارده بر ساختمان‌ها برای اولین بار در

جنبه‌های مختلف اقتصادی حاصل از اجرای یک طرح مدیریت فشار را می‌توان در قالب یک تحلیل جامع سود-هزینه ارزیابی نمود. جرارد و استوارت در سال ۲۰۰۷ مزایای حاصل از مدیریت فشار و کنترل فعال نشت را در شبکه توزیع آب شهر گلدکست استرالیا بررسی کردند. آنها در این مطالعه فقط سود اقتصادی حاصل از کاهش نشت و کاهش شکستگی‌ها حاصل از مدیریت فشار را ارزیابی نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که استراتژی مدیریت فشار و کنترل فعال نشت، کم‌هزینه‌ترین و اقتصادی‌ترین گزینه در بین گزینه‌های موجود برای تأمین آب شهر گلدکست است (Girard and Stewart, 2007).

آواد و همکاران در سال ۲۰۰۸ در مطالعه‌ای تحلیل سود-هزینه حاصل از اجرای مدیریت فشار را در دو ناحیه ایزوله در انگلستان مورد بررسی قرار دادند. در تحلیل انجام گرفته، سود حاصل از کاهش نشت، شکستگی‌ها، کنترل فعال نشت، مصرف آب، مصرف انرژی و رضایت مشتریان محاسبه شد. مقدار کاهش نشت حاصل از مدیریت فشار با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی تخمین زده شد (Awad et al., 2008). در پژوهش ایشان، برای تخمین سود حاصل از کاهش شکستگی‌ها از رابطه فشار-شکستگی شبیه به رابطه فشار-نشت استفاده شد که مطالعات بعدی چنین رابطه‌ای را رد کردند و مدل‌های کامل‌تری ارائه دادند (Lambert et al., 2013, Lambert and Thornton, 2012). علاوه بر اینکه تأثیر مدیریت فشار بر فاصله زمانی عملیات نشت‌یابی در تخمین سود حاصل از کنترل فعال نشت نیز در نظر گرفته نشده بود (Fantozzi and Lambert, 2007, Lambert and Lalonde, 2005).

گومز و همکاران در سال ۲۰۱۱ در پژوهشی مزایای اقتصادی حاصل از مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب را با استفاده از شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه تخمین زدند. آنها میزان نشت و مصارف وابسته به فشار را با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی برای یک مطالعه موردی فرضی به دست آورده و سود حاصل از کاهش نشت و کاهش مصارف وابسته به فشار را تخمین زدند (Gomes et al., 2011).

کاناکودیس و گونالس در سال ۲۰۱۵، در مطالعه‌ای تحلیل اقتصادی سناریوهای مختلف اجرای طرح‌های مدیریت فشار در شهر کوزانی یونان را انجام دادند. آنها از روش ارزش فعلی خالص

¹ Net Present Value (NPV)

متغیر است و به جنس لوله و نوع شکست بستگی دارد (Van Zyl and Clayton, 2007, Puust et al., 2010).

$$CBR = CBR_{RL} + CBR_{URL} \quad (5)$$

$$CBR_{RL} = (BF_{RL0} - BF_{RL1}) \times CB \quad (6)$$

$$CBR_{URL} = (BF_{URL0} - BF_{URL1}) \times CB \quad (7)$$

که در این معادلات

CBR_{RL} سود حاصل از کاهش تواتر شکستگی‌های گزارش شده بر حسب ریال بر سال، CBR_{URL} سود حاصل از کاهش تواتر شکستگی‌های گزارش نشده بر حسب ریال بر سال، BF_{RL0} تعداد شکستگی‌های گزارش شده قبل از اجرای مدیریت فشار بر حسب شکستگی در سال، BF_{RL1} تعداد شکستگی‌های گزارش شده پس از اجرای مدیریت فشار بر حسب شکستگی در سال، BF_{URL0} تعداد شکستگی‌های گزارش نشده قبل از اجرای مدیریت فشار که در آخرین عملیات نشت یابی کشف شده‌اند بر حسب شکستگی در سال، BF_{URL1} = تعداد شکستگی‌های گزارش نشده پس از اجرای مدیریت فشار که با انجام عملیات نشت یابی کشف می‌شوند بر حسب شکستگی در سال، و CB هزینه متوسط تعمیر شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده بر حسب ریال به ازای هر شکستگی است.

هزینه متوسط هر شکستگی به نوع لوله (انشعابات یا خط اصلی)، قطر لوله و جنس لوله بستگی دارد. کاهش تواتر شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده در اثر مدیریت فشار را می‌توان با استفاده از معادله ۸ به دست آورد (Lambert and Thornton, 2012, Lambert et al., 2013)

$$(BF_0 - BF_1) = (BF_0 - BF_{npd}) \times \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N_2} \right) \quad (8)$$

که در آن

BF_{npd} تعداد شکستگی‌های مستقل از فشار است که به سن لوله‌ها، شرایط محیطی و جنس لوله بستگی دارد (تعداد شکستگی در سال)

در این پژوهش، توان N_1 با استفاده از آزمون کاهش پلکانی فشار^۱ برآورد شد (AWWA, 2009). به منظور تخمین میزان نشت شبکه قبل و بعد از مدیریت فشار، با کسر مقدار مصارف شبانه مجاز مشترکان (LNC) ناحیه از جریان حداقل شبانه (MNF)، مقدار جریان خالص شبانه (NNF) به دست می‌آید. این مقدار تخمینی از مقدار نشت در طول دوره جریان حداقل شبانه را ارائه می‌دهد (Hamilton and McKenzie, 2014).

برای تبدیل نرخ نشت شبانه بر حسب مترمکعب بر ساعت، به نرخ متوسط نشت شبانه روز بر حسب مترمکعب در روز، با توجه به تغییرات فشار در طول شبانه روز و مفهوم فاوادم (FAVAD) باید فاکتور روز-شب (NDF) با استفاده از معادله ۴ محاسبه شود. در محاسبه فاکتور روز-شب از مقدار فشار لحظه‌ای ثبت شده در نقطه میانگین ناحیه (AZP) در دوره وقوع جریان حداقل شبانه استفاده می‌شود (AL-Washali et al., 2016, Amoatey et al., 2018, Amoatey et al., 2014)

$$NDF = \sum_{i=0}^{i=23} \left(\frac{AZP_{i,i+1}}{AZNP} \right)^{N_1} = \sum_{i=0}^{i=23} \left(\frac{AZP_{i,i+1}}{AZP_{3-4}} \right)^{N_1} \quad (4)$$

که در این معادله

N_1 توان رابطه فشار-نشت است، $AZNP$ و $AZP_{i,i+1}$ به ترتیب مقدار فشار متوسط شبانه ناحیه و مقدار فشار متوسط در هر ساعت در نقطه میانگین ناحیه است.

لازم به توضیح است قیمت تمام شده آب شامل هزینه‌های خرید آب خام و پرداخت حق النظاره به تأمین کننده آب به علاوه هزینه تصفیه آب شامل هزینه مواد شیمیایی و برق مصرفی داخل تصفیه‌خانه آب برای تولید یک مترمکعب آب است.

۲-۲- سود حاصل از کاهش تواتر شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده

روابط ریاضی سود حاصل از کاهش تواتر شکستگی لوله‌ها (شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده) با استفاده از آخرین تحقیقات انجام گرفته توسط گروه تلفات آب انجمن بین‌المللی آب

¹ Pressure Step Test

دیگری برای تخمین سریع BF_{npd} نیز ارائه شده است که شامل مراحل ۱- جمع آوری داده‌های مربوط به تعمیرات خطوط اصلی (به جز تعمیر شیرها و شیرهای آتش‌نشانی) از مناطقی با بیش از ۱۰ تعمیر در سال؛ ۲- ترسیم داده‌های تواتر شکستگی در مقابل فشار متوسط شبانه منطقه در هر ناحیه و ۳- تخمین حد پایین نقاط رسم شده است که می‌تواند به عنوان تخمین اولیه از BF_{npd} در نظر گرفته شود. البته این مراحل باید برای خطوط اصلی و انشعابات به صورت جداگانه طی شود (Lambert et al., 2013). با توجه به داده‌های حوادث ثبت شده، نسبت شکستگی‌های مستقل از فشار به کل شکستگی‌های گزارش شده قبل از اجرای مدیریت فشار در ناحیه مورد مطالعه تقریباً ۰/۲ تخمین زده شد. از آنجا که چنین اطلاعاتی برای شکستگی‌های گزارش نشده در شبکه مورد مطالعه موجود نبود، مقدار این نسبت در این پژوهش برای این نوع از شکستگی‌ها صفر در نظر گرفته شد؛ البته در عمل می‌توان در صورت عدم وجود اطلاعات، مقدار شکستگی‌های مستقل از فشار گزارش نشده را همانند نسبت شکستگی‌های گزارش شده مستقل از فشار در نظر گرفت.

۳-۲- سود حاصل از کاهش عملیات نشت‌یابی فعال

شکل ۲، یک نمودار کلی از تأثیر مدیریت فشار بر نشت‌ها و شکستگی‌ها و همچنین فاصله زمانی بین دو عملیات نشت‌یابی را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص است، با کاهش فشار، فاصله زمانی اقتصادی بین دو عملیات نشت‌یابی افزایش می‌یابد. روابط ریاضی مربوط به سود حاصل از کاهش عملیات نشت‌یابی فعال (CAL) با در نظر گرفتن تأثیر مدیریت فشار بر تواتر عملیات نشت‌یابی و تعداد کشف شکستگی‌های گزارش نشده در اثر عملیات نشت‌یابی برای نخستین بار در این پژوهش با در نظر گرفتن فاصله زمانی اقتصادی بین دو عملیات نشت‌یابی (EIF)^۱ توسعه داده شد که با استفاده از معادلات ۹ تا ۱۵ تخمین زده می‌شود

$$CAL = CAL_{Cons} + CAL_{Var} \quad (9)$$

$$CAL_{Cons} = \left(\frac{12}{EIF_0} - \frac{12}{EIF_1} \right) \times C_{CAL_{Cons}} \quad (10)$$

¹ Economic Intervention Frequency (EIF)

و N_2 توان رابطه فشار- شکستگی است که مقدار آن نزدیک به ۳ برآورد شده است (Lambert and Thornton, 2012).

شکل ۱، نمودار درصد کاهش شکستگی‌ها را نسبت به درصد کاهش فشار بیشینه در نقطه میانگین ناحیه بر حسب نسبت تعداد شکستگی‌های مستقل از فشار به تعداد کل شکستگی‌ها قبل از اجرای مدیریت فشار ارائه می‌دهد؛ دامنه تغییرات این نسبت بین ۰-۱ است (Lambert et al., 2013). به طور کلی در شبکه‌هایی با عمر لوله‌های کم (شبکه جوان) و فشار حداکثر پایین، درصد بالایی از شکستگی‌ها مربوط به شکستگی‌های مستقل از فشار است و نسبت تعداد شکستگی‌های مستقل از فشار به تعداد کل شکستگی‌ها بالا است. در مقابل در شبکه‌های با عمر لوله‌های بالا (شبکه فرسوده) و مقدار فشار حداکثر بالا (رسیدن به حداکثر ظرفیت فشاری شبکه)، اکثر شکستگی‌ها در اثر فشار یا ترکیب آن با دیگر عوامل بروز شکستگی رخ می‌دهد و نسبت مذکور پایین است (Thornton and Lambert, 2007, Lambert et al., 2013, Creaco and Walski, 2017).

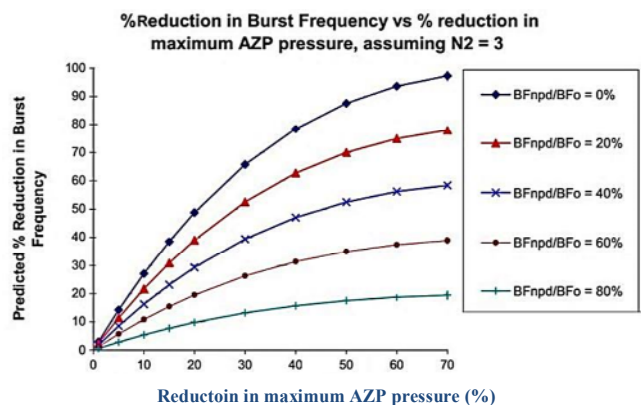


Fig. 1. The percentage reduction in reported and unreported leakage versus percentage reduction in maximum pressure at the AZP (Lambert et al., 2013)

شکل ۱- درصد کاهش شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده در مقابل درصد کاهش فشار ماکسیمم در نقطه میانگین ناحیه

در صورتی که شرکت‌های آب و فاضلاب داده‌های مربوط به شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده و علل وقوع آنها را به دقت ثبت کرده باشند، می‌توان تعداد شکستگی‌های مستقل از فشار (BF_{npd})، ناشی از بار ترافیک، رانش زمین، خوردگی و غیره را از داده‌های ثبت شده توسط شرکت به دست آورد. روش کاربردی

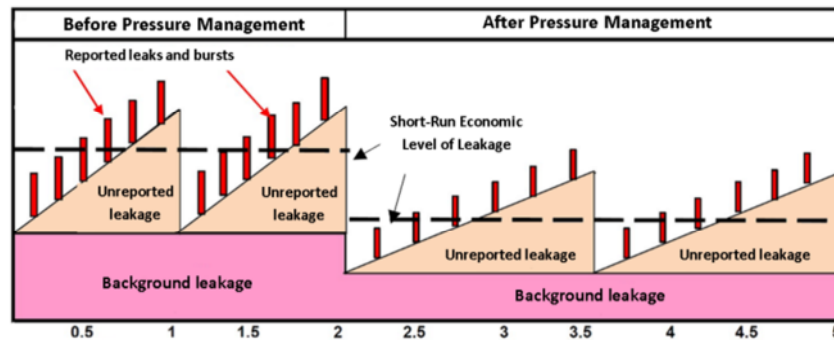


Fig. 2. The effects of the pressure management on the reduction of reported, unreported and background leakages and also the economic intervention frequency between two active leakage surveys

شکل ۲- تأثیر مدیریت فشار بر کاهش نشت‌های گزارش شده، گزارش نشده و نشت زمینه و همچنین فاصله زمانی اقتصادی بین دو عملیات نشت‌یابی فعال

هزینه حاشیه‌ای تولید و توزیع آب بر حسب ریال بر مترمکعب که شامل هزینه پرداختی برای خرید یا استخراج آب خام، مواد شیمیایی مصرفی، نیروی کار، انرژی و نیروی انسانی برای تولید یک مترمکعب آب است. این هزینه برای هر شرکت متفاوت است و باید جداگانه مورد تحلیل و محاسبه قرار گیرد؛ RR نرخ افزایش نشت در اثر شکستگی‌های گزارش نشده بر حسب مترمکعب در روز در سال، C_{MD} هزینه کشف هر نشت روی خطوط اصلی بر حسب ریال بر هر کشف، C_{CD} هزینه کشف هر نشت روی انشعابات بر حسب ریال بر هر کشف است. لازم به توضیح است که اختلاف BF_{URL0} و BF_{URL1} که در معادله ۱۲ ظاهر می‌شود (کسر معادله ۱۴ از معادله ۱۳) را می‌توان با استفاده از معادله ۸ محاسبه نمود.

$$C_{CAL_{Cons}} = C_{L_M} \times L_M + C_{N_C} \times N_C \quad (11)$$

$$CAL_{Var} = CAL_{Var0} - CAL_{Var1} \quad (12)$$

$$CAL_{Var0} = (C_{MD} \times BF_{URL0} + C_{CD} \times BF_{URL0}) \quad (13)$$

$$CAL_{Var1} = (C_{MD} \times BF_{URL1} + C_{CD} \times BF_{URL1}) \quad (14)$$

$$EIF = \left(\frac{0.789 \times C_{CAL_{Cons}}}{CV \times RR} \right)^{0.5} \quad (15)$$

که در این معادلات

CAL_{Cons} سود حاصل از کاهش عملیات ثابت کنترل فعال نشت بر حسب ریال بر سال، CAL_{Var} سود حاصل از کاهش عملیات متغیر کنترل فعال نشت بر حسب ریال بر سال، $C_{CAL_{Cons}}$ هزینه ثابت عملیات نشت‌یابی بر حسب ریال بر هر عملیات، C_{L_M} هزینه ثابت پیمایش لوله‌ها در عملیات نشت‌یابی بر حسب ریال بر هر کیلومتر، L_M طول کل شبکه بر حسب کیلومتر، C_{N_C} هزینه ثابت پیمایش انشعابات در عملیات نشت‌یابی بر حسب ریال بر هر انشعاب، N_C تعداد انشعابات شبکه، EIF_0 فاصله زمانی اقتصادی بین دو عملیات نشت‌یابی قبل از اجرای مدیریت فشار (ماه شمسی)، EIF_1 فاصله زمانی اقتصادی بین دو عملیات نشت‌یابی بعد از اجرای مدیریت فشار (ماه شمسی)، CV

۲-۴- سود حاصل از کاهش مصارف وابسته به فشار

سود خالص ناشی از کاهش مصرف آب وابسته به فشار (CDR) با استفاده از معادلات ۱۶ تا ۲۰ تخمین زده می‌شود (Awad et al., 2008)

$$CDR = (CDR_a - CDR_b) \quad (16)$$

$$CDR_a = (WD_0^* - WD_1^*) \times CWP \quad (17)$$

$$CDR_b = PMD \times (WD_0^* - WD_1^*) \times CWT \quad (18)$$

$$CDE = (D_0 - D_1) \times C_{ED} \times C_E \quad (21)$$

$$D_0 = WD_0 + WL_0 \quad (22)$$

$$D_1 = WD_1 + WL_1 \quad (23)$$

که در آن

D_0 و D_1 به ترتیب کل تقاضا (نشت به علاوه مصرف) قبل و بعد از اجرای مدیریت فشار بر حسب مترمکعب بر سال، C_{ED} میزان انرژی برق مصرفی برای توزیع یک مترمکعب آب در شبکه بر حسب کیلووات ساعت بر مترمکعب و C_E قیمت انرژی مصرفی بر حسب ریال بر کیلووات ساعت است. لازم به توضیح است که در معادلات، تنها هزینه انرژی به منظور توزیع آب در شبکه از طریق پمپاژ باید محاسبه شود، زیرا هزینه انرژی مصرفی برای تولید و انتقال آب در سود حاصل از کاهش نشت محاسبه شده است. میزان مصرف انرژی برق مصرفی برای توزیع یک مترمکعب آب در شبکه بستگی به مشخصات شبکه دارد و برای شبکه‌های ثقلی تقریباً صفر در نظر گرفته می‌شود.

۲-۶- سود حاصل از کاهش نرخ خسارات ساختمان‌ها بابت شکستگی‌ها

یکی از مشکلات نشت در شبکه‌های شهری خسارات وارده به ساختمان‌های مسکونی، تجاری و غیره در اثر نشت حاصل از شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده خطوط اصلی است. در اثر نشت با توجه به تراز قرارگیری لوله‌ها، آب نشت یافته به زیرزمین یا فنداسیون ساختمان‌ها نفوذ یافته و موجب نشست و یا حتی خرابی و وارد آمدن خسارت به ساختمان‌ها می‌شود. از این رو اکثر شرکت‌های آب‌رسانی باید سالانه هزینه‌های قابل توجهی برای جبران خسارات وارده به ساختمان‌ها به مالکان پرداخت کنند. در اکثر کشورهای پیشرفته شرکت‌های آب‌رسانی با برآورد خسارات وارده ناشی از شکستگی‌ها، خود را در برابر چنین حوادثی بیمه می‌کنند. با توجه به رابطه فشار-شکستگی (Lambert and Thornton, 2012) و اجرای مدیریت فشار در یک شبکه، شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده نیز کاهش می‌یابند. در

$$WD_0^* = (1 - RTF) \times PSR \times WD_0 \quad (19)$$

$$WD_1^* = WD_0^* \times \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N_3} \quad (20)$$

که در این معادلات

CDR_a سود حاصل از کاهش مصرف آب بر حسب ریال بر سال و CDR_b کاهش درآمد شرکت به علت کاهش مصرف آب بر حسب ریال بر سال، WD_0^* و WD_1^* مصرف سالانه وابسته به فشار به ترتیب قبل و بعد از اجرای مدیریت فشار بر حسب مترمکعب در سال، PMD درصد کل مصرف که توسط شرکت اندازه‌گیری می‌شود، CWT قیمت فروش آب بر حسب ریال بر هر مترمکعب، PSR درصد کل مصرف WD_0 است که وابسته به فشار است و به نوع مصرف بستگی دارد؛ در مواردی که مصارف به صورت حجمی هستند مانند ذخیره آب توسط ماشین ظرف‌شویی، فلاش‌تانک و توالت، کاهش فشار تأثیری بر مصرف نخواهد داشت ولی در مصارفی مانند استحمام و شستشوی ظروف به صورت دستی، کاهش فشار بر مصرف تأثیرگذار است. برای تعیین دقیق مصارف وابسته به فشار، به مطالعات میدانی و تعیین دقیق درصد مصارف شرب، بهداشتی، پخت و پز و شستشو نیاز است؛ علاوه بر این در یک ناحیه مصارف صنعتی می‌توانند مستقل از فشار باشند. N_3 این توان رابطه فشار-مصرف است که از $0/1$ تا $0/5$ متغیر است. این توان برای مصارف داخلی مانند استحمام و شستشوی ظروف بین $0/1$ - $0/4$ و برای مصارف خارجی مانند آبیاری فضای سبز خانه‌ها بین $0/4$ - $0/5$ گزارش شده است؛ RTF درصد مشتریانی که مخزن ذخیره آب بر روی سقف یا حیاط ساختمان خود دارند که در این صورت مقدار توان N_3 برای آن‌ها برابر صفر خواهد شد (Lambert and Fantozzi, 2010).

۲-۵- سود حاصل از کاهش مصرف انرژی

تأمین آب با فشار مورد نیاز در برخی شبکه‌ها نیازمند تأمین انرژی مورد نیاز از طریق پمپاژ است. از این رو سود حاصل از کاهش مصرف انرژی که در این مطالعه رابطه ریاضی آن توسعه داده شده را می‌توان با استفاده از معادله ۲۱ تخمین زد

که در آن N_4 درصد کاهش تماس‌ها، c_1 ، c_2 ، c_3 به ترتیب هزینه تماس‌های بدون نیاز به پیگیری، با نیاز به پیگیری تلفنی و با نیاز به پیگیری حضوری می‌باشند و n_1 ، n_2 ، n_3 تعداد تماس‌های بدون نیاز به پیگیری، با نیاز به پیگیری تلفنی و با نیاز به پیگیری حضوری می‌باشند. برای بررسی سود حاصل از کاهش تماس مشترکان، به پایگاه داده تماس‌ها و اقدامات انجام شده در خصوص هر تماس نیاز است.

۲-۸- سود حاصل از صرفه‌جویی غیرمستقیم آب

با توجه به کاهش نشت آب و کاهش مصرف در اثر اجرای مدیریت فشار، میزان آب ورودی به شبکه نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه آب کمتری تصفیه و انتقال داده می‌شود. از این رو میزان تلفات آب داخل تصفیه‌خانه و در خطوط انتقال نیز کاهش خواهد یافت. سود حاصل از صرفه‌جویی غیرمستقیم آب را می‌توان با استفاده از معادله ۲۸ تخمین زد (Awad et al., 2008)

$$CIW = A \times (D_0 - D_1) \times CWP \quad (28)$$

که در آن A نسبت کاهش هدررفت آب در تصفیه‌خانه و خط انتقال آب به کاهش جریان کل ورودی به شبکه (نشت به‌علاوه مصرف) است. درصد A به شرایط خط انتقال و تکنولوژی مورد استفاده در تصفیه‌خانه آب بستگی دارد و این نسبت معادل ۱۰ درصد گزارش شده است که مقدار آن ۰/۱ در رابطه جایگذاری می‌شود (Awad et al., 2008).

۲-۹- سود حاصل از صرفه‌جویی غیرمستقیم انرژی

سود حاصل از صرفه‌جویی غیرمستقیم انرژی شامل صرفه‌جویی در انرژی بابت کاهش افت در لوله‌های شبکه، تصفیه‌خانه آب و فاضلاب ناشی از کاهش تقاضا (نشت به‌علاوه مصرف) به شبکه است، که با استفاده از معادله ۲۹ محاسبه می‌شود (Awad et al., 2008)

$$(29)$$

$$CIE = B \times C_E \times [(D_0 - D_1) \times C_{EWT} + (WD_0 - WD_1) \times C_{EWWT}] + B \times CDE$$

نتیجه نرخ خسارات و خرابی ساختمان‌ها بابت شکستگی‌ها منجر به خسارت نیز کاهش خواهند یافت. رابطه ریاضی برای محاسبه سود حاصل از کاهش نرخ خسارات و خرابی ساختمان‌ها (CBD) به دلیل شکستگی‌ها برای نخستین بار در این مطالعه توسعه داده شده و با استفاده از معادلات ۲۴ تا ۲۶ مقدار آن تخمین زده می‌شود

$$CBD = (BF_{BD0} - BF_{BD1}) \times C_{BD} \quad (24)$$

$$BF_{BD0} = C_T \times (BF_{RL0} + BF_{URL0}) \quad (25)$$

$$BF_{BD1} = C_T \times (BF_{RL1} + BF_{URL1}) \quad (26)$$

که در این معادلات

BF_{BD0} تعداد کل شکستگی‌های منجر به خسارت یا خرابی قبل از اجرای مدیریت فشار بر حسب شکستگی در سال، BF_{BD1} تعداد کل شکستگی‌های منجر به خسارت یا خرابی بعد از اجرای مدیریت فشار بر حسب شکستگی در سال، C_{BD} هزینه میانگین یک خسارت یا خرابی بر حسب ریال بر خسارت و C_T درصدی از شکستگی‌ها که تبدیل به خسارت و یا خرابی می‌شوند. مقدار این درصد تجربی بوده و بستگی به شرایط شبکه نظیر جنس لوله، قطر لوله و شرایط محیطی نظیر نوع خاک، لرزه‌خیزی منطقه و غیره دارد. این نسبت به‌طور تجربی برای منطقه مورد مطالعه ۲ درصد برآورد شده است که مقدار آن ۰/۰۲ است.

۲-۷- سود حاصل از کاهش تماس‌های مشترکان یا افزایش رضایت مشتریان

در برخی شبکه‌های توزیع آب، تماس مشترکان و مصرف‌کنندگان هزینه‌هایی را بر شرکت تحمیل می‌کند. این تماس‌ها می‌تواند به علت ۱- شکستگی یا نشت، ۲- قطعی آب، ۳- فشار پایین و یا بالای آب، ۴- کیفیت نامطلوب آب نظیر کدر و بودار بودن آب و ۵- شکایت از قبض صادر شده باشد. سود حاصل از کاهش تماس مشترکان و مصرف‌کنندگان را می‌توان با استفاده از معادله ۲۷ تخمین زد (Awad et al., 2008)

$$CCC = N_4 \times (n_1 \times c_1 + n_2 \times c_2 + n_3 \times c_3) \quad (27)$$

استهلاک تجهیزات سامانه‌های مدیریت فشار) به صورت سالانه محاسبه شده است.

۳- مطالعه موردی

تحلیل اقتصادی مدیریت فشار با استفاده از مدل اقتصادی توسعه داده شده، در یک ناحیه ایزوله^۱ در شهر مشهد انجام گرفت. سامانه مدیریت فشار این ناحیه مبتنی بر شیر کاهنده فشار با خروجی ثابت (FO) بود که قبلاً در ورودی ناحیه نصب شده بود. به منظور تحلیل اقتصادی مدیریت پیشرفته فشار این سامانه فشاری ابتدا از طریق نصب کنترل‌گر فشار در خروجی شیر کاهنده فشار و تنظیم فشار خروجی به صورت زمان‌بندی شده بر اساس تغییرات کنترل‌گر فشار به شیرکاهنده فشار مبتنی بر زمان (TM) تبدیل شد. سپس از طریق نصب کنترل‌گر فشار مبتنی بر جریان در خروجی شیر و تنظیم فشار خروجی بر اساس تغییرات میزان جریان و فشار به شیرکاهنده فشار مبتنی بر جریان (FM) تبدیل شد.

ناحیه مذکور دارای یک ورودی بوده و حدود ۳۰ کیلومتر خطوط اصلی ۴۶۰۷ انشعاب دارد که ۹۰ درصد آنها کنتور دارند. کل جریان ورودی به این ناحیه ۴۸۹۶ مترمکعب در روز است که از این مقدار برابر با ۳۴۵۳ مترمکعب در روز (۷۱ درصد) میزان مصرف و ۱۴۲۴ مترمکعب در روز (۲۹ درصد) میزان نشت است. برای اندازه‌گیری فشار متوسط منطقه، ابتدا نقطه میانگین ناحیه (AZP) با استفاده از ابزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ناحیه مورد مطالعه تعیین شد. سپس یک دستگاه ثبات فشار در نقطه پیشنهادی برای AZP نصب و فشار لحظه‌ای با تواتر زمانی ۱۵ دقیقه ثبت شد. یک دستگاه دبی‌سنج نیز در نقطه ورودی به ناحیه مورد مطالعه نصب و دبی لحظه‌ای با تواتر ۱۵ دقیقه ثبت شد. علاوه بر این سه دستگاه ثبات فشار در نقاط بحرانی به منظور اطمینان از تأمین حداقل فشار نصب و به منظور انجام تحلیل جریان حداقل شبانه (MNF)، اندازه‌گیری فشار در نقاط بحرانی و نقطه میانگین ناحیه و اندازه‌گیری دبی در نقطه ورودی برای هرکدام شیرهای کاهنده فشار به مدت یک ماه انجام گرفت. با توجه به اینکه تغییر عادات رفتاری مصرف‌کنندگان در طول سال منجر به تغییر در الگوی مصرف آب در فصول مختلف می‌شود و برای نمونه، تقاضا

که در آن B نسبت انرژی الکتریکی هدررفته ناشی از افت اصطکاکی در لوله‌های شبکه توزیع، تصفیه‌خانه آب و فاضلاب به کل انرژی تولید شده می‌باشد؛ C_{EWT} میزان انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت برای تصفیه یک مترمکعب آب و C_{EWWT} میزان انرژی الکتریکی مصرفی حسب کیلووات ساعت برای تصفیه یک مترمکعب فاضلاب. مقدار B به جنس لوله‌های شبکه و خط انتقال و همچنین شرایط تصفیه‌خانه آب و فاضلاب بستگی دارد و مقدار آن حدود ۰/۱۳ تخمین زده شده است (Awad et al., 2008).

۲-۱۰- هزینه‌های سامانه مدیریت فشار مبتنی بر شیرهای کاهنده فشار

به منظور انجام تحلیل اقتصادی باید هزینه سالانه سامانه‌های مدیریت فشار مبتنی بر شیرهای کاهنده فشار شامل هزینه نصب و راه‌اندازی به علاوه هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری است که با استفاده از معادله ۳۰ محاسبه می‌شود (Awad et al., 2008)

$$CPRV = \sum_{j=1}^N CPRV_j = \sum_{j=1}^N CCPRV_j \times (CRF_j + MC_j) \quad (30)$$

که در آن $CCPRV_j$ هزینه اولیه شامل هزینه خرید، نصب و راه‌اندازی شیر کاهنده فشار زام بر حسب ریال، MC درصد هزینه سالانه عملیات تعمیر و نگهداری (O & M) شیرهای کاهنده فشار، CRF ضریب بازگشت سرمایه برای تخمین هزینه‌های سالانه بر اساس نرخ بهره سالانه (i) و طول عمر سامانه‌های مدیریت فشار مبتنی بر شیرهای کاهنده فشار (n) که با استفاده از معادله ۳۱ محاسبه می‌شود

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (31)$$

که در این معادله هزینه سرمایه‌گذاری اجرای طرح مدیریت فشار و هزینه بهره‌برداری و نگهداری سامانه‌های مدیریت فشار از طریق محاسبه ضریب بازگشت سرمایه و درصد هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری (درصد

¹ District Metered Area (DMA)

جدول ۱- نتایج تحلیل جریان حداقل شبانه در ناحیه ایزوله و نشت کل شبانه روز و سالیانه تخمین زده شده

برای اجرای سامانه‌های مدیریت فشار

Table 1. The results of the minimum night flow analysis in the DMA and the estimated total annual and daily leakage for implementation of the pressure management systems

Type of PM system	Night consumption (L/h)	MNF (L/h)	Leakage (L/h)	Night-Day Factor (NDF)	Average pressure (m)	Daily leakage (m ³ /day)	Annual leakage (m ³ /year)
Fixed Outlet (FO)	23035	86741	63706	22.4	41.9	1424	519764
Time-Modulated (TM)	18428	76665	58237	21.2	38.03	1232.5	449854
Flow-Modulated (FM)	18428	75864	57436	20.8	36.47	1193.4	435592

گرفته شد. علاوه بر این ضرایب PSR و PMD با توجه به داده‌های اخذ شده از شرکت آب و فاضلاب مشهد به ترتیب برابر ۰/۶ و ۰/۹ قرار داده شد. علاوه بر این قیمت فروش آب برای سادگی در محاسبات به صورت خطی و نه بلوکی - صعودی در نظر گرفته شد. در این تحلیل رابطه ریاضی برای محاسبه سود حاصل از افزایش رضایت مشتریان به علت عدم وجود داده‌های کافی محاسبه نشد. درصد هزینه سالانه عملیات تعمیر و نگهداری سامانه‌های مدیریت فشار ۱۰ درصد هزینه خرید و نصب این سامانه‌ها در نظر گرفته شد. به طور معمول نرخ بهره برای طرح‌های سرمایه‌گذاری، معادل حداکثر نرخ سود بدون ریسک مانند نرخ سود سپرده بلندمدت بانکی به علاوه چند درصد برای پوشش ریسک سرمایه‌گذاری انتخاب می‌شود. اگرچه در اغلب پروژه‌های عمرانی از نرخ بهره ۱۲ درصد استفاده می‌شود، اما استفاده از این نرخ تنزیل در فضای اقتصادی ایران واقعی نیست، زیرا تورم اقتصادی بیشتر از این میزان است و در سرمایه‌گذاری‌های خصوصی قابل توجه نیست (Tabesh and Beigi, 2017). با توجه به نرخ سود بلندمدت بانکی و درصد پوشش ریسک سرمایه‌گذاری، نرخ بهره در این مقاله ۲۰ درصد سالانه در نظر گرفته شد. علاوه بر این، طول عمر مفید سامانه‌های مدیریت فشار ۱۰ سال فرض شد.

۴- نتایج و بحث

نتایج تحلیل سود- هزینه اجرای مدیریت فشار در ناحیه مورد مطالعه، در جداول ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است. جدول ۳، نشان می‌دهد که جمع سود حاصل از اجرای مدیریت فشار برای سامانه مدیریت

در فصول گرم، نسبت به فصول سرد افزایش می‌یابد، متوسط مصرف شبانه مجاز^۱ برای هر انشعاب در فصول گرم و سرد سال به صورت جداگانه و به ترتیب ۵ و ۴ لیتر بر انشعاب در ساعت در نظر گرفته شد (Fantozzi and Lambert, 2012).

توان رابطه فشار- نشت (N_1) با اجرای آزمایش کاهش پلکانی فشار تخمین زده شد (AWWA, 2016)؛ و مقدار آن ۱/۳۵ به دست آمد. سپس فاکتور روز- شب (NDF) برای تبدیل نشت شبانه (لیتر در ساعت) به دست آمده از تحلیل جریان حداقل شبانه به نشت کل شبانه روز (مترمکعب در روز) با استفاده از داده‌های فشار ثبت شده و توان N_1 محاسبه شد (AL-Washali et al., 2016). جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل جریان حداقل شبانه را نشان می‌دهد. همانگونه که جدول ۱ نشان می‌دهد، با تبدیل شیر کاهنده خروجی ثابت به سامانه مدیریت فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان، فشار متوسط در نقطه میانگین ناحیه به ترتیب ۹ درصد و ۱۳ درصد کاهش و نرخ نشت سالانه به ترتیب ۱۳/۵ درصد و ۱۶/۲ درصد کاهش داشت. جدول ۲ کلیه مقادیر پارامترها و قیمت‌های به کار رفته در تحلیل اقتصادی مدیریت فشار را ارائه می‌دهد که مقدار آنها از مراجع مختلف و داده‌های تجربی جمع‌آوری در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ به دست آمده است (Sajjadifar et al., 2017, Tabesh and Beigi, 2017, MOE, 2018).

لازم به توضیح است، مقدار ضریب RTF در این پژوهش با توجه به مشاهدات میدانی از ناحیه مورد مطالعه ۵۰ درصد در نظر

¹ Legitimate Night Consumption (LNC)

جدول ۲- مقادیر پارامترهای استفاده شده در تحلیل اقتصادی مدیریت فشار

Table 2. The parameter values used in the economic analysis of pressure management

Parameter	Term	Value	Unit
Unit cost of water production	CWP	10434	Rial / m ³
Water price paid by the customer	CWT	4500	Rial / m ³
Marginal cost of water	CV	6260	Rial / m ³
Average cost of repairing a break at connections	CB	0.86	Million Rials / Break
Average cost of repairing a break at mains	CB	89.4	Million Rials / Break
Constant leakage monitoring (mains)	C _{LM}	1	Million Rials / km of main
Constant leakage monitoring (connections)	C _{NC}	0.05	Million Rials / connection
Variable cost of unreported leakage detection (mains)	C _{MD}	2.5	Million Rials / Break
Variable cost of unreported leakage detection (connections)	C _{CD}	1.8	Million Rials / Break
Value of consumed energy to distribute 1m ³ of water	C _{ED}	1	KWh / m ³
Cost of energy consumed	C _{ED}	657	Rial / KWh
Value of consumed energy to produce 1m ³ of water	C _{EWT}	0.4	KWh / m ³
Value of consumed energy to treat 1m ³ of wastewater	C _{EWWT}	0.75	KWh / m ³
Cost of purchase and installation of PM system through FO-PRVs	CCPRV	886.5	Million Rials
Cost of purchase and installation of PM system through TM-PRVs	CCPRV	1108	Million Rials
Cost of purchase and installation of PM system through FM-PRVs	CCPRV	1152	Million Rials

جدول ۴- هزینه‌های حاصل از اجرای سامانه مدیریت پیشرفته فشار برای ناحیه ایزوله (میلیون ریال در سال)

Table 4. The costs of implementing advanced pressure management system in the DMA (Million Rials per year)

Components of the developed mathematical model	Type of pressure management system	
	TM	FM
Revenue reduction due to Pressure-sensitive demand reduction (CDR _b)	72.4	102.8
Annual cost of PM system	375.1	390.1
Total costs	447.5	492.9

را برای هر یک از اجزاء مدل ریاضی توسعه داده شده نشان می‌دهد. همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، کاهش نشت بیشترین درصد سود را برای هر دو سامانه مدیریت فشار به خود اختصاص داده که از ضرب مقدار نشت کاهش یافته در قیمت تمام شده آب به دست می‌آید. به ترتیب با کاهش متوسط فشار حدود ۹ و ۱۳ درصدی با استفاده از سامانه‌های مدیریت فشار مبتنی بر زمان و جریان، نرخ نشت به‌طور متوسط ۱۳/۵ و ۱۶/۲ درصد کاهش یافته و سود حاصل از کاهش نشت حدود ۵۱ و ۴۸ درصد حاصل شد. به عبارت دیگر در این پژوهش به ازای هر یک درصد کاهش

جدول ۳- سودهای حاصل از اجرای سامانه مدیریت پیشرفته فشار برای ناحیه ایزوله (میلیون ریال در سال)

Table 3. Benefits arising from implementing advanced pressure management system in the DMA (Million Rials per year)

Components of the developed mathematical model	Type of pressure management system	
	TM	FM
Leakage reduction (CLW)	729.4	878.3
Break frequency reduction (CBR)	224.7	303.6
Pressure-sensitive demand reduction (CDR _a)	186.6	264.8
Active leakage control effort reduction (CALC)	119.7	167.7
Building damages reduction (CBD)	11.7	15.7
Direct energy reduction (CDE)	57.7	72.0
Indirect energy reduction (CIE)	16.6	26.1
Indirect water reduction (CIW)	91.6	114.3
Total benefits	1438	1842.5

فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان برای پروژه مورد مطالعه به ترتیب ۱۴۳۸ و ۱۸۴۲/۵ میلیون ریال تخمین زده شده است. شکل ۳ به تفکیک درصد سود به دست آمده از اجرای مدیریت فشار

در این مطالعه شامل هزینه‌های تولید و توزیع آب می‌شود. محاسبه هزینه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی در قیمت تمام شده آب، سود حاصل از کاهش نشت را می‌تواند به مقدار بیشتری نیز افزایش دهد.

مطابق شکل ۳ پس از نشت، کاهش شکستگی‌ها، مصارف وابسته به فشار و عملیات نشت‌یابی فعال به ترتیب بیشترین سهم درصد سود را به خود اختصاص داده‌اند. به طوری که مجموع آنها برای سامانه مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان به ترتیب حدود ۳۷ و ۴۰ درصد به دست آمده است. بنابراین در مطالعه حاضر، کاهش نشت، شکستگی‌ها، مصارف وابسته به فشار و عملیات نشت‌یابی فعال حدود ۸۸ درصد از کل سود حاصل از اجرای مدیریت پیشرفته فشار را به خود اختصاص داده‌اند. سود حاصل از کاهش نشت در خطوط انتقال و تصفیه‌خانه آب ناشی از کاهش تقاضای کل (نشت به علاوه مصرف) نیز حدود ۶ درصد برای هر دو سامانه یاد شده مدیریت فشار تخمین زده شده است. در این مورد نیز کاهش فشار اضافی موجود در سیستم که به کاهش نشت و مصارف وابسته به فشار منجر شده، تأثیر بسزایی در سود به دست آمده دارد. سود حاصل از کاهش مصرف انرژی به صورت مستقیم و غیرمستقیم نیز حدود ۵ درصد برای هر دو سامانه مدیریت فشار تخمین زده شده است. قیمت انرژی مصرفی و میزان انرژی مصرفی در تولید، توزیع آب و تصفیه فاضلاب که به نوع شبکه (ثقلی یا تحت پمپاژ) و تکنولوژی تصفیه آب و فاضلاب بستگی دارد، سود حاصل از کاهش مصرف انرژی را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. جدول ۴ هزینه‌های حاصل از اجرای سامانه مدیریت فشار، شامل هزینه‌های خرید، نصب، بهره‌برداری و نگهداری و هزینه ناشی از کاهش درآمد حاصل از کاهش مصارف وابسته به فشار را ارائه می‌دهد. همانگونه که در این جدول مشخص است، جمع هزینه‌های حاصل از اجرای سامانه مدیریت فشار مبتنی بر زمان و جریان به ترتیب ۴۴۷/۵ و ۴۹۲/۹ میلیون ریال تخمین زده شده است. شکل ۴، به تفکیک درصد هزینه‌های حاصل از اجرای مدیریت فشار را برای هر یک از اجزای مدل ریاضی توسعه داده شده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، هزینه‌های سالانه خرید، نصب، بهره‌برداری و نگهداری، بیشترین درصد از هزینه کل را به خود اختصاص داده که برای سامانه مبتنی بر زمان و جریان به ترتیب حدود ۸۴ و ۷۹ درصد به دست آمده است. یکی از دلایل درصدهای به دست آمده در این

جدول ۵- سود خالص و نسبت سود به هزینه حاصل از اجرای مدیریت پیشرفته فشار برای ناحیه ایزوله (میلیون ریال در سال)

Table 5. The obtained net benefit and the benefit-cost ratio for implementing advanced pressure management system in the DMA (Million Rials per year)

Components of the developed mathematical model	Type of pressure management system	
	TM	FM
Net benefit (Million Rials / year)	990.5	1349.6
Benefit-cost ratio (B/C)	3.2	3.7

فشار به ترتیب توسط سامانه‌های مدیریت فشار مبتنی بر زمان و جریان به طور متوسط ۱/۵ و ۱/۲۵ درصد کاهش نرخ نشت و به دنبال آن ۵/۷ و ۳/۷ درصد سود حاصل از کاهش نشت حاصل می‌شود. از اینرو در این پژوهش سود حاصل از کاهش نشت تأثیر بسزایی در افزایش سود کل دارد. مهم‌ترین دلیل مقدار بالای نسبت‌های به دست آمده در پژوهش حاضر، وجود فشار اضافی موجود در شبکه مورد مطالعه است که از طریق مدیریت پیشرفته فشار تا حد امکان کاهش داده شده است. علاوه بر این توان رابطه فشار - نشت که به جنس لوله‌ها بستگی دارد و مقدار آن از آزمایش کاهش پلکانی فشار ۱/۳۵ به دست آمد، بر کاهش بیشتر نرخ نشت و افزایش سود حاصل از آن مؤثر است. پارامتر مهم دیگر در افزایش سود حاصل از کاهش نشت، قیمت تمام شده آب است که

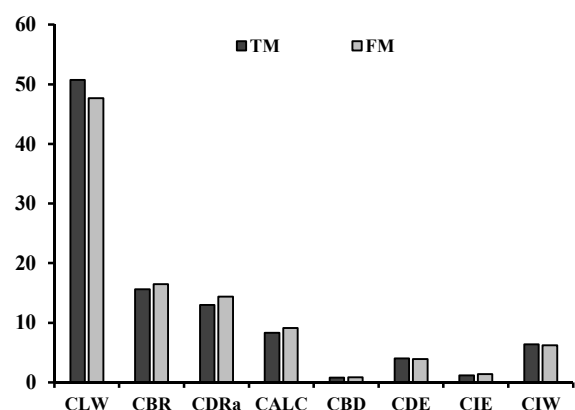


Fig. 3. Percentage of benefits arising from implementing advanced pressure management system for the components of the developed mathematical model

شکل ۳- درصد سود حاصل از اجرای سامانه مدیریت پیشرفته فشار برای اجزاء مدل ریاضی توسعه داده شده

یافته است.

جدول ۵، سود خالص حاصل از اجرای سامانه مدیریت فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان را ارائه می‌دهد که به ترتیب ۹۹۰/۵ و ۱۳۴۹/۶ میلیون ریال به دست آمده است. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، در این پژوهش سامانه مدیریت فشار مبتنی بر جریان با آنکه هزینه سالانه (شامل خرید، نصب، بهره‌برداری و نگهداری) بالاتری دارد اما سود خالص (کسر هزینه از سود حاصل) بیشتری نسبت به سامانه مدیریت فشار مبتنی بر زمان دارد. افزایش سود حاصل از اجرای سامانه مدیریت فشار مبتنی بر جریان که منجر به افزایش سود خالص می‌شود را می‌توان با توجه به نوع عملکرد این سامانه‌ها توضیح داد. در این سامانه‌ها، فشار بهره‌برداری در هر زمان با توجه به میزان جریان عبوری کنترل و تنظیم شده که باعث می‌شود کمترین فشار اضافی در شبکه وجود داشته و فشار بهره‌برداری در نزدیک‌ترین حالت به فشار بهینه مورد نیاز باشد. از اینرو اجرای آن می‌تواند بیشترین تأثیر را بر کاهش نشت، شکستگی‌ها، عملیات نشت‌یابی فعال، مصرف آب و انرژی داشته باشد.

طبق نتایج ارائه شده در جدول ۵، نسبت سود به هزینه در پژوهش حاضر برای سامانه‌های مدیریت فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان به ترتیب ۳/۲ و ۳/۷ به دست آمده است. نسبت‌های یاد شده بیانگر نسبت سود به هزینه قابل توجهی بوده و نشان می‌دهد اجرای سامانه‌های مدیریت فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان، توجیه‌پذیری اقتصادی دارد. علاوه بر این با توجه به مقدار سود خالص به دست آمده و نسبت سود به هزینه محاسبه شده در این پژوهش، اجرای سامانه مدیریت فشار با استفاده از شیر کاهنده فشار مبتنی بر جریان بر سامانه مدیریت فشار مبتنی بر زمان ارجحیت دارد.

یک شاخص هزینه - فایده دیگر در اجرای سامانه‌های مدیریت فشار پیشرفته در نشریه شماره ۵۵۶ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری پیشنهاد شده است. در این شاخص پیشنهادی، هزینه اجرای سامانه‌های مدیریت فشار به ازای هر مشترک برای یک متر کاهش فشار (pm) محاسبه می‌شود (VPSPS, 2012). مقدار این شاخص از تقسیم هزینه اجرای طرح مدیریت فشار (هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری) بر تعداد انشعابات شبکه در مقدار کاهش متوسط فشار ناشی از اعمال

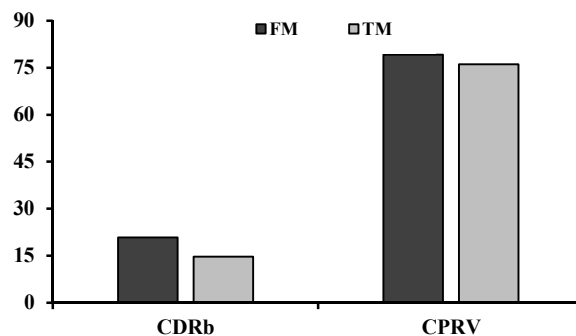


Fig. 4. Percentage of costs of implementing advanced pressure management system for the components of the developed mathematical model

شکل ۴- درصد هزینه‌های حاصل از اجرای سامانه مدیریت پیشرفته فشار برای اجزاء مدل ریاضی توسعه داده شده

پژوهش، نرخ تنزیل در نظر گرفته شده برای محاسبه ارزش فعلی هزینه‌های سالانه شامل هزینه‌های خرید، نصب، بهره‌برداری و نگهداری است. این نرخ، تابعی از زمان و مکان و نوع پروژه سرمایه‌گذاری است و معمولاً مقدار آن از حداکثر نرخ سود بانکی بلندمدت به علاوه چند درصد برای پوشش ریسک سرمایه‌گذاری به دست می‌آید.

ضرر حاصل از کاهش درآمد حاصل از کاهش مصرف وابسته به فشار نیز در این پژوهش به ترتیب ۱۶ و ۲۱ درصد به دست آمده است. به طوری که در پژوهش حاضر به ازای کاهش هر یک درصد فشار متوسط سامانه‌های مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان به طور متوسط ۱/۸ و ۱/۶ درصد ضرر حاصل از کاهش درآمد ناشی از کاهش مصرف وابسته به فشار محاسبه شده است. علت نسبت‌های به دست آمده را می‌توان به وجود تانک‌های ذخیره در پشت‌بام یا حیاط ساختمان‌ها و همچنین قیمت فروش آب نسبت داد. در سال‌های اخیر به علت کمبود آب به خصوص در فصل‌های گرم سال، استفاده از تانک‌های ذخیره در ساختمان‌های کشور، توسعه یافته که در نتیجه مقدار توان رابطه فشار - مصرف (توان N_3) برای چنین مشترکانی صفر خواهد شد. در این حالت کل مصارف آب در ساختمان مستقل از فشار خواهند شد. از طرفی به علت پرداخت یارانه دولتی در بخش آب، قیمت فروش هر مترمکعب آب در ایران تقریباً نصف قیمت تمام شده آب است. بنابراین در پژوهش حاضر، ضرر حاصل از کاهش درآمد ناشی از کاهش مصارف وابسته به فشار در مقابل هزینه‌های سالانه سامانه‌های مدیریت فشار کاهش

نصب، بهره‌برداری و نگهداری و ضرر حاصل از کاهش درآمد ناشی از کاهش مصارف وابسته به فشار توسعه داده شد. روابط ریاضی مربوط به تعدادی از اجزاء مدل ریاضی توسعه داده شده شامل سود حاصل از کاهش خسارات وارده به ساختمان‌ها ناشی از شکستگی‌ها، کاهش عملیات نشت‌یابی فعال کاهش و کاهش شکستگی‌های گزارش شده و گزارش نشده برای اولین بار در این مطالعه ارائه گردید. نتایج حاصل از اجرای سامانه مدیریت فشار پیشرفته با استفاده از شیرهای کاهنده فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان برای یک ناحیه ایزوله واقعی در شهر مشهد با استفاده از مدل توسعه داده شده تخمین زده شد. نتایج نشان داد که سود حاصل از کاهش نشت در این مطالعه برای سامانه‌های مدیریت فشار پیشرفته حدود یک‌دوم از کل سود حاصل از اجرای طرح مدیریت فشار را به خود اختصاص می‌دهد. بعد از آن کاهش شکستگی‌ها، کاهش مصارف وابسته به فشار و عملیات نشت‌یابی فعال مجموعاً حدود ۴۰ درصد از کل سود را شامل می‌شوند. مقایسه سامانه مدیریت فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان نشان داد که سود خالص تخمین زده شده به ترتیب حدود ۹۹۰ و ۱۳۵۰ میلیون ریال و نسبت سود به هزینه ۳/۲ و ۳/۷ به دست می‌آید. بنابراین در این پژوهش استفاده از سامانه مدیریت فشار مبتنی بر جریان نسبت به مبتنی بر زمان اولویت دارد، زیرا استفاده از این نوع سامانه مدیریت فشار به کاهش حداکثری فشار اضافی در شبکه منجر شد و سود بالاتری نسبت به سامانه مبتنی بر زمان داشت. نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیران و متخصصان صنعت آب کشور دید جامعی در مورد فواید متعدد اقتصادی اجرای مدیریت فشار ارائه دهد تا بتوانند یک توجیه اقتصادی جامع از اجرای طرح‌های مدیریت فشار در راستای مدیریت تقاضا در شبکه‌های آب‌رسانی داشته باشند.

۶- قدردانی

نویسندگان از شرکت آب و فاضلاب مشهد و آقای مهندس فریدون عباسپور که برخی از داده‌های مورد نیاز این پژوهش را در اختیار قرار دادند، سپاسگزار هستند.

مدیریت فشار به دست می‌آید. برای سامانه‌های مدیریت فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان اجرا شده در این مقاله مقدار شاخص فوق به ترتیب ۸۸۳۰۰ و ۶۵۴۰۰ ریال به ازای هر انشعاب برای یک متر کاهش فشار به دست آمد که با توجه به پیشنهاد نشریه شماره ۵۵۶، طرح مدیریت فشار پیشرفته برای این ناحیه قابل اجرا است. یکی از نقاط ضعف این روش آن است که تنها بر اساس هزینه‌های اجرای طرح‌های مدیریت فشار محاسبه می‌شود و مزایای حاصل از اجرای مدیریت فشار که به تفصیل در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته را در نظر نمی‌گیرد؛ زیرا فواید حاصل از اجرای مدیریت فشار نظیر سود حاصل از کاهش نشت، شکستگی‌ها، انرژی و مصارف وابسته به فشار می‌تواند بر توجیه‌پذیری اقتصادی اجرای طرح‌های مدیریت فشار تأثیر بسزایی داشته باشد.

مدیریت فشار یکی از کارآمدترین و اقتصادی‌ترین روش‌های مدیریت تلفات در شبکه‌های توزیع آب است. نتایج به دست آمده از این مطالعه به مدیران و متخصصان صنعت آب کشور کمک می‌کند تا درک جامعی از فواید اقتصادی حاصل از اجرای طرح‌های مدیریت فشار با استفاده از شیرهای کاهنده فشار مبتنی بر زمان و مبتنی بر جریان داشته باشند. علاوه بر این مدل ریاضی توسعه داده شده در این پژوهش برای تحلیل اقتصادی مدیریت فشار می‌تواند برای امکان‌سنجی و توجیه اقتصادی اجرای طرح‌های مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب مختلف در سطح کشور و با حداقل داده‌های مورد نیاز استفاده شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به اهمیت مدیریت فشار در شبکه‌های آب‌رسانی به عنوان یک راهکار کارآمد و مؤثر در مدیریت و کاهش تلفات، تحلیل اقتصادی اجرای سامانه‌های مدیریت فشار ارائه شد. به این منظور یک مدل ریاضی برای محاسبه سود حاصل از تأثیر مدیریت فشار بر کاهش نشت، شکستگی‌ها، مصرف آب، مصرف انرژی، عملیات نشت‌یابی فعال، خسارات وارده به ساختمان‌ها و افزایش رضایت مشتریان و همچنین هزینه‌های حاصل از خرید،

References

- Al-Washali, T., Sharma, S. & Kennedy, M. 2016. Methods of assessment of water losses in water supply systems: a review. *Water Resources Management*, 30, 4985-5001.

- Amoatey, P. K., Minke, R. & Steinmetz, H. 2014. Leakage estimation in water networks based on two categories of night-time users: a case study of a developing country network. *Water Science and Technology: Water Supply*, 14, 329-336.
- Amoatey, P. K., Minke, R. & Steinmetz, H. 2018. Leakage estimation in developing country water networks based on water balance, minimum night flow and component analysis methods. *Water Practicle and Technology*, 13, 96-105.
- Awad, H., Kapelan, Z. & Savić, D. 2008. Analysis of pressure management economics in water distribution systems Conference, *Water Distribution Systems Analysis*, National Park, South Africa.
- AWWA. 2009. *Water audits and loss control programs: M36*, American Water Works Association.
- AWWA. 2016. *Water audits and loss control programs*, Denver, American Water Works Association.
- Creaco, E. & Walski, T. 2017. Economic analysis of pressure control for leakage and pipe burst reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143 (12), 04017074..
- Fanner, P., Davis, S., Hoogerwerf, T., Liemberger, R., Sturm, R. & Thornton, J. 2007. *Leakage management technologies*, AWWA Research Foundation.
- Fantozzi, M. & Lambert, A. 2007. Including the effects of pressure management in calculations of short-run economic leakage levels. *IWA Conference "Water loss 2007"*, Bucharest, Romania.
- Fantozzi, M. & Lambert, A. 2012. Residential night consumption–assessment, choice of scaling units and calculation of variability. *Water Loss*, 2012, 26-29.
- Girard, M. & Stewart, R. 2007. Implementation of pressure and leakage management strategies on the Gold Coast, Australia: case study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133, 210-217.
- Gomes, R., Sá Marques, A. & Sousa, J. 2011. Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 8, 65-77.
- Hamilton, S. & Mckenzie, R. 2014. *Water management and water loss*, IWA Publishing, London.
- Jalili Ghazizade, M. & Moslehi, I. 2017. General water loss reduction model in water distribution networks. *The First Seminar with Experts in Water and Environment*, Tehran. (In Persian)
- Kanakoudis, V. & Gonelas, K. 2016. Non-revenue water reduction through pressure management in Kozani's water distribution network: from theory to practice. *Desalination and Water Treatment*, 57, 11436-11446.
- Lambert, A. 2001. What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems. *IWA Conference Systems Approach to Leakage Control and Water Distribution System Management*, UK.
- Lambert, A. 2003. Assessing non-revenue water and its components: a practical approach. *Water*, 21, 50-51.
- Lambert, A. & Fantozzi, M. 2010. Recent developments in pressure management. *IWA Conference "Water loss 2010"*, Sao Paulo, Brazil.
- Lambert, A., Fantozzi, M. & Thornton, J. 2013. Practical approaches to modeling leakage and pressure management in distribution systems–progress since 2005. *Proceedings of the 12th Int. Conference on Computing and Control for the Water Industry-CCWI2013*, Perugia, Italy.
- Lambert, A. & Lalonde, A. Using practical predictions of economic intervention frequency to calculate short-run economic leakage level, with or without pressure management. *Proceedings of IWA Specialised Conference 'Leakage*, 2005, 310-321.

- Lambert, A. & Thornton, J. 2012. Pressure: bursts relationships: influence of pipe materials, validation of scheme results, and implications of extended asset life. *IWA Conference "Water loss 2012"*, Mauila, Philippines.
- Martínez-Codina, Á., Cueto-Felgueroso, L., Castillo, M. & Garrote, L. 2015. Use of pressure management to reduce the probability of pipe breaks: a bayesian approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(9), 04015010.
- MOE. 2018. *Monthly statistical reports of water and electricity industries*, Deputy of Planning and Economic, Tehran, Iran. (In Persian)
- Moslehi, I. & Jalili Ghazizadeh, M. 2016. A review of the relationships between pressure and burst in water supply systems. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 1, 11-19. (In Persian)
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K. & Vairavamoorthy, K. 2012. Methods and tools for managing losses in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139, 166-174.
- Pearson, D. & Trow, S. 2005. Calculating economic levels of leakage. *Leakage 2005 Conference Proceedings*, Jakarta, Indonesia.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. & Koppel, T. 2010. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7, 25-45.
- Sajjadifar, S., Pakrouh, S., Ghane, A. & Fathi, B. 2017. Effective drinking water pricing, a case study of Arak city. *Journal of Water and Wastewater*, 28(1), 95-103. (In Persian)
- Tabesh, M. & Beigi, S. 2017. Water pricing as an economic justification for reducing non-revenue water (NRW) projects. *Journal of Water and Wastewater*, 28(1), 113-125. (In Persian)
- Thornton, J. & Lambert, A. 2005. Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. *Proceedings of IWA Special Conference'Leakage*, 2005, 12-14.
- Thornton, J. & Lambert, A. Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs. *IWA Conference'Water Loss*, 2007, Bucharest, Romania.
- Van Zyl, J. & Clayton, C. 2007. The effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Thomas Telford Ltd, 109-114.
- Vicente, D., Garrote, L., Sánchez, R. & Santillán, D. 2015. Pressure management in water distribution systems: current status, proposals, and future trends. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142, 04015061.
- VPSPS. 2012. Guideline for determining effective parameters on unaccounted for water (UFW) and water losses reduction schemes. Tehran, Iran: Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision. (In Persian)
- Yousefi Khoshqalb, E., Jalili Ghazizade, M. & Moslehi, I. 2018. A review of methods for economic level of leakage in water distribution networks. *2nd Biennial Conference on Water Economics*, Tehran. (In Persian)