

## ارائه روابط تحلیلی مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب

محمد رضا جلیلی قاضی زاده<sup>۱\*</sup> ضیاالدین ایدی

۱. استادیار دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی

۲. دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه رازی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۸/۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۶/۱۴

### چکیده

مدیریت فشار، یکی از روش‌های مدیریت تقاضای آب است. برای ارزیابی تأثیر تغییر فشار بر میزان نشت شبکه، معمولاً از رابطه فاواد (FAVAD) استفاده می‌شود که در این رابطه، مقدار توان ترم فشار ( $N$ ) باید تعیین گردد. برای محاسبه  $N$  یا باید اطلاعاتی از منافذ نشت لوله‌ها داشت یا همراه با تغییرات فشار، مقدار نشت شبکه تعیین شود که اندازه‌گیری آن مشکل است. همچنین، مطالعات انجام شده برای تعیین اثر تغییرات فشار بر مصارف و نشت آب نیز کافی به نظر نمی‌رسد. در مطالعه حاضر، روش تحلیلی جدیدی برای برآورد  $N$  بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم مقدار نشت ارائه شده است. در به‌کارگیری روش پیشنهادی، همچنین در بررسی آثار فشار بر مصرف و تلفات آب، شبکه یکی از مناطق شهر تهران پایلوت مطالعاتی انتخاب و ایزوله 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 مشترکان اندازه‌گیری شد. اجرای مدیریت فشار در این پروژه توانست میزان آن را به ترتیب تا ۵۰٪، ۲۱٪ و ۳۰٪ کاهش دهد. در ادامه با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، روابطی برای تخمین آثار کاهش فشار بر میزان کاهش جریان شبانه، دبی ورودی به شبکه، همچنین مصرف مشترکان ارائه شد.

### کلیدواژه

توان  $N$ ، توزیع آب، شبکه‌های رابطه فشار-نشت، مدیریت فشار، نشت.

### ۱. سرآغاز

اهمیت بیشتری دارد و با وجود آنکه کارهای زیادی برای معرفی و حل مشکل آب بدون درآمد انجام گرفته است، تعداد کمی از آن شرایط کشورهای در حال توسعه را در نظر دارد. از طرف دیگر، تلاش‌ها برای کاهش آب بدون درآمد در کشورهای در حال توسعه ممکن است با عواملی به بن‌بست برسد، از جمله عدم کنترل به موقع نشت، فقدان عملکرد مدیریت مؤثر، و عدم اجرای آیین‌نامه‌ها و مقررات عمومی (Chowdhury et al., 1997).

در کشور ایران، بر اساس گزارش‌های موجود، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۰ شمسی تمام سدهای اصلی کشور احداث شود و منبع جدیدی برای افزایش ذخایر آب

آب شرب که در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد معمولاً حاصل اقدام‌های پرهزینه تأمین، توزیع، بهسازی و پالایش آب است. اتلاف زیاد آب با چنین ویژگی‌هایی چه در شبکه توزیع و چه در حوزه استفاده مشترکان زیانی بر اقتصاد ملی است و موجب افزایش محدودیت در امر تأمین آب می‌شود. نشت از شبکه‌های توزیع تا ۷۰٪ مجموع کل تلفات آب می‌رسد و برآورد می‌شود مقدار سالانه نشت در دنیا حدود ۳۲ میلیارد مترمکعب باشد (Guo, et al., 2013). مشکلات ناشی از کمبود منابع آب و لزوم به‌کارگیری تمهیدات لازم در کاهش نشت در کشورهای در حال توسعه

سطحی وجود نداشته باشد. در چنین شرایطی برای حل معضل کمبود آب باید به روش‌های مدیریت تقاضای آب روی آورد (جلیلی قاضی‌زاده، ۱۳۸۸).

بعد از کارگذاشتن لوله‌های شبکه، در میان تمام روش‌های کنترل نشت، تنها مدیریت فشار است که بدون حفاری و بازکردن ترانشه قابلیت کاهش و کنترل نشت را دارد، لذا از این لحاظ، مدیریت فشار، راه‌حلی عملی، مؤثر و کم‌هزینه در کنترل میزان نشت است. ابزار زیادی برای اعمال مدیریت فشار وجود دارد، از جمله کنترل پمپ‌ها، کنترل‌های ارتفاعی و نصب شیرهای کاهش‌دهنده یا نگه‌دارنده فشار. از جمله منافع مدیریت فشار می‌توان به کاهش هزینه تعمیرات، تعمیرات اضطراری کمتر، برنامه‌ریزی بهتر و نارضایتی کمتر مشترکان اشاره کرد (Thornton and Lambert, 2006). مقدار فشار بالا در شبکه باعث فرسودگی بیشتر تجهیزات و بالطبع افزایش هزینه تعمیرات، مصرف بیشتر آب توسط مشترکان و افزایش حوادث و اتفاقات می‌شود. فشار اضافی حتی نارضایتی مصرف‌کنندگان را نیز به همراه دارد. از طرف دیگر، فشار پایین‌تر از حد استاندارد در شبکه باعث معضلاتی از قبیل نارضایتی مشترکان، جریان‌های برگشتی، کاهش توانایی سامانه در اطفای حریق و به وجود آمدن خطا در سیستم‌های اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، احتمال شناسایی نشت‌های کنونی با تقلیل فشار کاهش می‌یابد، زیرا با کاهش دبی نشت، صدای نشت نیز کم و ردیابی آن مشکل‌تر می‌شود. بنابراین، لازم است ضمن در نظر داشتن حداقل فشار مورد نیاز سامانه، با استفاده از تجهیزات و روش‌های متداول، نسبت به تنظیم بهینه فشار شبکه توزیع اقدام کرد. یکی از راه‌های اساسی و کاربردی در کاهش نشت، تنظیم و کاهش فشار اضافی شبکه است. کاهش فشار سامانه توزیع نرخ هر نوع نشتی را کاهش می‌دهد.

از جمله اولین پیشرفت‌ها در زمینه نشت در سیستم‌های توزیع، در دهه ۱۹۹۰ است که روش‌های برآورد ترکیب‌های و نشت زمینه (BABE)<sup>۱</sup> را تیم کاری

متشکل از متخصصانی از بخش آب انگلستان و ولز ارائه کردند. تکنیک‌های BABE به‌خوبی مستندسازی شده و به‌صورت گسترده‌ای بهترین روش در برآورد و مدیریت نشت در سیستم‌های توزیع آب شرب در اکثر نقاط دنیا پذیرفته شده است (McKenzie and Seago, 2005). بعد از معرفی روش BABE، پیشرفت‌های کلیدی دیگری انجام شد که همگی به شرح فرایند نشت و چگونگی تحلیل و کاهش آن می‌پردازد. برخی از مهم‌ترین این پیشرفت‌ها عبارت است از استانداردسازی روش بالانس آب (IWA, 2001)، استفاده از شاخص‌های عملکرد نشت در اندازه‌گیری نشت‌های واقعی (Lambert and Mckenzie, 2002)، نظریه منافذ ثابت و متغیر (May, 1994) و مفهوم نشت‌های واقعی سالانه و اجتناب‌ناپذیر (Lambert et al., 1999). Lambert و Thorton (۲۰۰۶) نشان دادند که کاهش فشار نه‌فقط باعث کاهش میزان نشت از منافذ موجود، بلکه باعث کاهش مقدار نشت‌های جدید و کاهش رخدادهای آن نیز می‌شود.

رابطه (۱) رابطه بین تغییرات فشار و نشت آب را بر اساس رابطه FAVAD نشان می‌دهد (May 1994).

$$\frac{L_1}{L_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^N \quad (1)$$

که در این رابطه  $L_0$  و  $L_1$  مقادیر نشت از شبکه است هنگامی که مقادیر فشارهای مشخص به ترتیب  $P_0$  و  $P_1$  باشد. عدد  $N$  توان ثابت رابطه است که ارتباط بین نشت و فشار را نشان می‌دهد. حداقل و حداکثر مقدار  $N$  به ترتیب ۰/۵ و ۲/۵ گزارش شده است (Lambert, 1997). مقدار  $N$  مشخصه‌ای اصلی است که از روابط نظری، داده‌های آزمایشگاهی یا اندازه‌گیری‌های میدانی تعیین شود و به عوامل مختلفی از جمله ثابت یا متغیر بودن سطح مقطع منفذ نشت وابسته است. شرایط منفذ نشت نیز خود تابع جنس لوله است. برای تعیین مقدار  $N$  مطالعاتی انجام و اعداد متفاوتی گزارش شده است. بررسی‌های جداگانه از داده‌های تحقیقاتی در ژاپن و انگلستان نشان می‌دهد که در

تحقیقات صورت گرفته در کشورهای مختلف در تعیین این مقدار  $N$  بین ۱ تا ۱/۱۵ است. با این حال، مقدار  $N$  از شبکه‌ای ایزوله به شبکه مجاور بسیار متفاوت است (Fanner et al., 2007). در جدول ۱ تعدادی از نتایج

سامانه‌های بزرگ توزیع آب با جنس لوله‌های متفاوت، مقدار  $N$  بین ۱ تا ۱/۱۵ است. با این حال، مقدار  $N$  از شبکه‌ای ایزوله به شبکه مجاور بسیار متفاوت است (Fanner et al., 2007). در جدول ۱ تعدادی از نتایج

جدول ۱. مقادیر گزارش شده  $N$  (Schwaller and van Zyl, 2014)

$N$		تعداد DMA مورد بررسی	کشور، سال
متوسط	محدوده		
۱/۱۳	۱/۶۸-۰/۶۳	۱۷	انگلستان، ۱۹۷۷
۱/۱۵	۲/۱۲-۰/۶۳	۸	ژاپن، ۱۹۷۹
۱/۱۵	۲/۷۹-۰/۵۲	۱۳	برزیل، ۱۹۹۸
۱/۰۱	۲/۹۵-۰/۳۶	۷۵	انگلستان، ۲۰۰۳
۱/۴۷	۲/۸۳-۰/۶۴	۷۵	قبرس، ۲۰۰۵
۰/۹۲	۱/۵-۰/۴۹	۱۷	مالزی

مقدار ۲۰٪ درصد کاهش داد (Dimitrov et al., 2011). کاربرد مدیریت فشار در پایلوتی از شهر کبک کانادا توانست سالانه ۱۲۰,۰۰۰ مترمکعب از تلفات نشت شبکه توزیع را کم کند (Laneville, 2015).

در مقاله حاضر، ابتدا روشی تحلیلی برای محاسبه مقدار  $N$  ارائه و نتایج آن با استفاده از بررسی میدانی انجام شده بحث شده است. در ادامه، تأثیر انجام عملیات مدیریت فشار در پایلوت مورد مطالعه ارائه و روابطی برای تخمین آثار کاهش فشار بر میزان کاهش جریان شبانه، دبی ورودی به شبکه و مصرف مشترکان مطرح شده است.

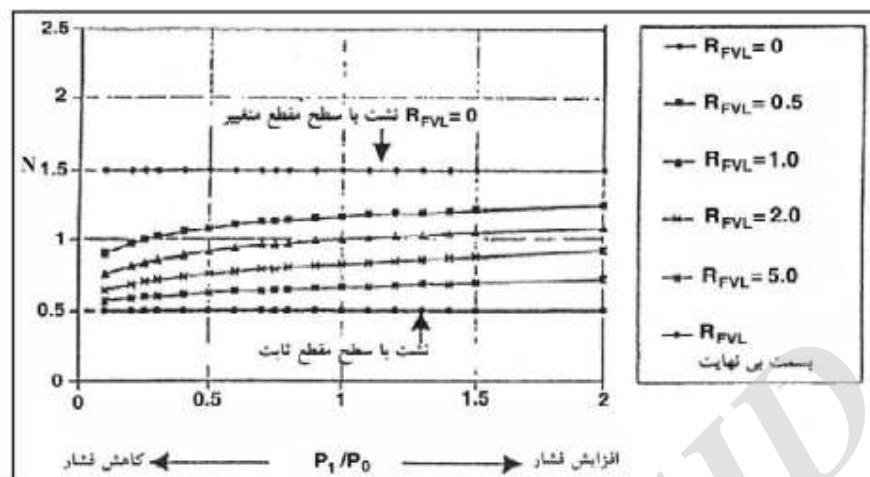
## ۲. محاسبه توان $N$

برای محاسبه مقدار  $N$  روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در ادامه، دو روش از روش‌های موجود، همچنین روش پیشنهاد شده در این مقاله در برآورد مقدار  $N$  ارائه می‌شود.

### ۱.۲ روش منافذ نشت با سطح مقطع ثابت و متغیر

در این روش با استفاده از شکل ۱ مقدار  $N$  تعیین می‌شود (Lambert, 1997).

شاهنگیان و تابش (۱۳۹۳) تحقیقات صورت گرفته درباره رابطه نشت-فشار را به سه دسته کلی تقسیم کردند: الف) تحقیقات میدانی، ب) آزمایشگاهی (شکست‌های واقعی یا نشت مصنوعی) و ج) عددی و تحلیلی. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این روش‌ها در شبکه‌های مختلف دارای پراکندگی زیادی است و مبنای اکثر آن‌ها فرمول اریفیس و نظریه FAVAD بوده است. طیف وسیعی از توان‌های  $N$  در شرایط مختلف و برای لوله‌های یکسان ارائه شده است. در زمینه نظری مدیریت فشار تحقیقات دیگری در موضوعات مختلف انجام شده است، از جمله تابش و هومر (۱۳۸۶)، کارآموز و همکاران (۱۳۸۵)، جلیلی قاضی‌زاده و صالحی (۱۳۸۶)، Walski و همکاران (۲۰۰۶)، Marunga و همکاران (۲۰۰۶)، Lambert (۲۰۰۳)، Perez و همکاران (۲۰۱۱). در زمینه تجربیات عملی و میدانی، به‌کارگیری مدیریت فشار و کاهش مقادیر مصارف یا نشت نیز گزارش‌های مختلفی ثبت شده است. در پروژه‌ای در ملبورن استرالیا، مدیریت فشار باعث صرفه‌جویی ۲۰٪ تا ۵۵٪ آب شرب مصرفی مجموعه شد (Burn et al., 2002). عملیات مدیریت فشار در پروژه‌ای در شهر بورگاس بلغارستان میزان نشت را به



شکل ۱. رابطه بین نسبت فشار و مقدار  $N$  در نظریه FAVAD (نشریه ۵۵۶، ۱۳۹۱)

اندیس  $n$  نشان‌دهنده زمان‌های مختلف است. با تغییر فشار شبکه در مراحل مختلف، مقادیر  $N$  در هر مرحله محاسبه و معمولاً متوسط آن، مقدار نهایی  $N$  در شبکه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود. در این محاسبات مقدار متوسط فشار شبکه در هر مرحله است. اما، از آنجا که مقدار  $L_n$  (نشست شبکه در هر مرحله) قابل اندازه‌گیری و مقدار دقیق آن معلوم نیست، معمولاً از مقدار حداقل جریان شبانه اندازه‌گیری شده به جای آن استفاده و گاهی نیز، با کسر مصرف تخمینی و شبانه مشترکان (برای مثال Fanner et al., ۲۰۰۷) لیترو ساعت برای هر نفر (۰/۷ برابر کل جریان شبانه، سعی در برآورد دبی نشست می‌شود. از محدودیت‌های این روش، عدم اطلاع از مقدار مصرف مشترکان است که نتایج را با خطا مواجه می‌کند.

### ۳.۲. روش پیشنهادی

رابطه فشار-نشست (رابطه ۳) را به صورت زیر در نظر بگیرید.

$$\left(\frac{L_n}{L_0}\right) = \left(\frac{P_n}{P_0}\right)^N \quad (۴)$$

در این روابط  $P_0$  و  $L_0$  مقادیر فشار و دبی نشست از شبکه توزیع در مرحله اول و  $P_n$  و  $L_n$  مقادیر فشارهای متوسط و نشست‌های متناظر آن، در مراحل بعدی (که فشار

در شکل ۱ شاخص کلیدی  $R_{FVL}$  از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$R_{FVL} = \frac{\text{تعداد منافذ نشست با سطح مقطع ثابت}}{\text{تعداد منافذ نشست با سطح مقطع متغیر}} \quad (۲)$$

تعداد منافذ نشست با سطح مقطع ثابت (مانند سوراخ‌ها) و متغیر (مانند ترک و گردبرها) با استفاده از اطلاعات میدانی ثبت و پردازش شده مربوط به حوادث در شبکه‌های توزیع آب در طول مدت زمانی کافی به دست می‌آید. زمان کافی برای ثبت داده‌ها حداقل شش ماه است (نشریه ۵۵۶، ۱۳۹۱). از محدودیت‌های این روش نیاز به ثبت اطلاعات طولانی‌مدت حوادث است. همچنین، در این روش، حداکثر مقدار  $N$  برابر ۱/۵ پیشنهاد شده است، در صورتی که در بسیاری از مراجع مقادیر بزرگ‌تر از ۱/۵ نیز گزارش شده است (Schwaller and van Zyl, 2014; Lambert, 1997).

### ۲.۲. روش گام‌به‌گام

در این روش برای محاسبه مقدار  $N$ ، رابطه (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود (Fanner et al., 2007).

$$N = \frac{\log\left(\frac{L_n}{L_0}\right)}{\log\left(\frac{P_n}{P_0}\right)} \quad (۳)$$

از آنجا که مقدار واقعی عدد  $X$  تقریباً ثابت است، اگر مقدار  $N$  صحیح حدس زده شده باشد، مقادیر  $X$  محاسبه شده از رابطه (۱۰) در شرایط فشارهای مختلف شبکه باید ثابت یا به یکدیگر نزدیک باشد و اگر مقدار  $N$  صحیح حدس زده نشود، مقادیر  $X$  های محاسبه شده با یکدیگر تفاوت بیشتری خواهد داشت. در آخرین مرحله، مقادیر انحراف معیار  $X$  های محاسبه شده تعیین و مقدار  $N$  حدس زده شده است. مقدار انحراف معیار متناظر آن، حداقل است و مقدار نهایی توان رابطه نشت-فشار در شبکه مورد مطالعه معرفی خواهد شد. نمونه محاسبات روش پیشنهادی برای یک پایلوت مطالعاتی انجام شده است که نتایج آن در بخش های بعدی تشریح خواهد شد. قبل از ارائه نمونه محاسبات، در ادامه مشخصات پایلوت مورد مطالعه و نتایج اندازه گیری جریان شبانه ارائه خواهد شد.

### ۳. مشخصات پایلوت مورد مطالعه

محدوده آب و فاضلاب ناحیه ۲ از منطقه ۱ (شمیرانات تهران) شامل خیابان های شهید خداوردی و زینعلی و تغذیه شده با مخزن ۲۹ تهران برای مطالعه پایلوتی انتخاب شد. منطقه مورد مطالعه مسکونی است که عکس ماهواره ای آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

بعد از مجزاسازی شبکه آب ناحیه مورد نظر از لوله های اطراف، در محل ورود جریان به ایزوله، علاوه بر شیر فشارشکن، کنترل گری برای اعمال تغییر فشار، روی شیر فشارشکن نصب شد (شکل ۲). از لاگر و دبی سنج التراسونیک به ترتیب برای ثبت فشار و اندازه گیری جریان استفاده شد. دبی سنج مقادیر دبی ورودی به ایزوله را در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه ثبت کرد. برخی خصوصیات پایلوت مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است.

شبکه تغییر می کند) است. مقدار حداقل جریان شبانه ( $M$ ) برابر مقدار نشت به علاوه مصرف شبانه است؛ یعنی،

$$M = L + C \quad (5)$$

که  $C$  مقدار مصرف شبانه است.

با توجه به مقادیر کم مصارف شبانه طی زمان اندازه گیری حداقل جریان شبانه و مقادیر ناچیز تغییرات آن با فشار، در روش پیشنهادی فرض می شود که مقدار مصرف مشترکان، در زمان وقوع جریان شبانه، ثابت و مستقل از فشار شبکه است. لذا،

$$M_0 = L_0 + C, \quad M_n = L_n + C \quad (6)$$

و با جایگذاری روابط (۶) در رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$\left(\frac{M_0 - C}{M_n - C}\right) = \left(\frac{P_0}{P_n}\right)^N \quad (7)$$

مقدار ثابت مصرف شبانه برابر کسری از حداقل جریان شبانه و اولیه  $M_0$  است. لذا،

$$C = XM_0 \quad (8)$$

که در آن  $X$  ضریب ثابتی است که مقدار آن بین صفر تا ۱ است. با جایگذاری رابطه (۸) در (۷) داریم:

$$\left(\frac{M_0(1-X)}{M_n - XM_0}\right) = \left(\frac{P_0}{P_n}\right)^N \quad (9)$$

با استخراج  $X$  از رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$X = \frac{M_n - \left(\frac{P_n}{P_0}\right)^N M_0}{1 - \left(\frac{P_n}{P_0}\right)^N} \quad (10)$$

نحوه تعیین توان  $N$  در روش پیشنهادی بدین ترتیب است که ابتدا برای شرایط متفاوت فشارهای تنظیمی شبکه، مقادیر فشار متوسط و حداقل جریان شبانه اندازه گیری می شود. سپس، مقداری برای توان  $N$  حدس زده و برای هر فشار تنظیمی مقدار  $X$  از رابطه (۱۰) محاسبه می شود.



شکل ۲. مشخصات منطقه مورد مطالعه. خطوط نازک معرف شبکه توزیع، خطوط ضخیم معرف محدوده ناحیه

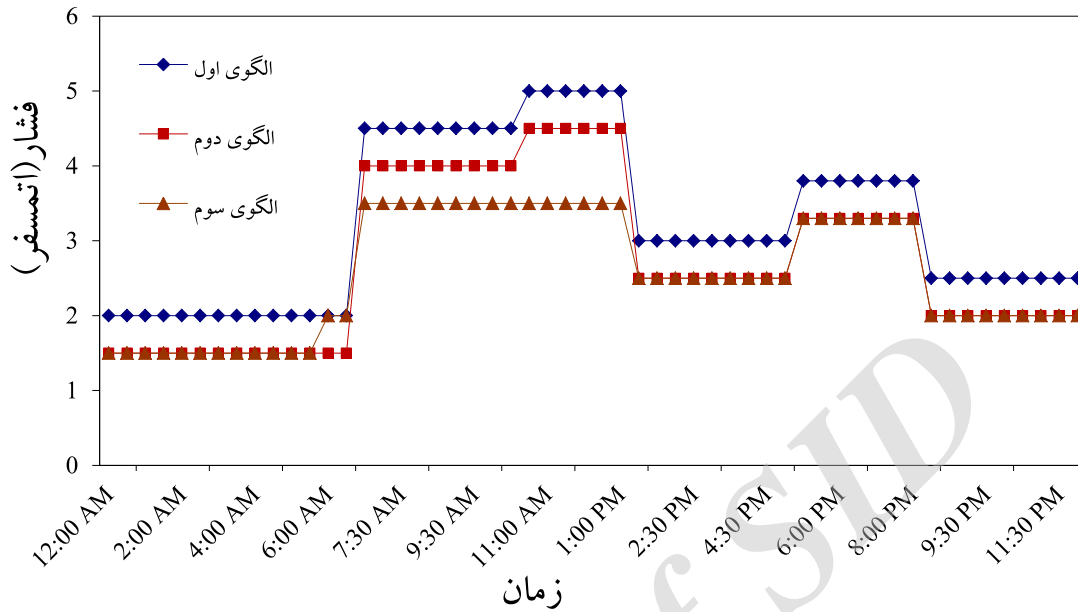
جدول ۲. مشخصات پایلوت مورد مطالعه

۲۸۰	تعداد انشعاب
۳۶۰۰	طول خطوط آبرسانی (متر)
۸۰	اختلاف ارتفاع ناحیه (متر)
پلی اتیلن و چدن	جنس لوله‌ها

فشار، متناسب با الگوی مصرف تنظیم شد، به صورتی که ضمن کاهش فشار در ساعات مصرف غیرپیک، همه مشترکان در تمامی ساعات شبانه‌روز، فشار کافی و استاندارد داشته باشد. سه الگوی زمانی تنظیم فشار مذکور، در شکل ۳ نشان داده شده است.

مراحل و شرایط مختلف هشت هفته اندازه‌گیری در جدول ۳ آمده است. برای مقایسه بهتر الگوهای ذکر شده (شکل ۳)، مقدار میانگین فشار اعمالی در طول ۲۴ ساعت برای هر الگو نیز در جدول ذکر شده است.

بعد از تکمیل و آماده‌سازی ایزوله و نصب تجهیزات، اندازه‌گیری دبی ورودی و قرائت مصرف مشترکان در فشارهای مختلف انجام گرفت. در هر مرحله خروجی شیر فشارشکن روی فشار مورد نظر تنظیم و دبی ورودی به شبکه در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه ثبت شد. برای هر مرحله، عملیات اندازه‌گیری حداقل به مدت یک هفته ادامه داشت. لازم به ذکر است که فشار خروجی شیر فشارشکن در دو حالت خروجی ثابت و متغیر (به‌صورت الگوی زمانی) تنظیم می‌شد. علاوه بر فشارهای ثابت، سه الگوی متغیر فشار در طول سه هفته بررسی شد. الگوهای تنظیم زمانی



شکل ۳. الگوهای تنظیم فشار خروجی شیر فشارشکن

جدول ۳. شرایط مختلف فشار خروجی شیر فشارشکن

هدف	شماره هفته	فشار خروجی شیر فشارشکن	ملاحظات
	۱	۳۰ متر ثابت	ماه رمضان
	۲	۵۰ متر ثابت	ماه رمضان
اندازه‌گیری حداقل جریان شبانه، دبی ورودی و مصرف	۳	۵۰ متر ثابت	-
	۴	الگوی اول (میانگین ۳۲ متر)	-
	۵	الگوی دوم (میانگین ۲۷ متر)	-
	۶	۴۰ متر ثابت	-
اندازه‌گیری حداقل جریان شبانه	۷	۳۳ متر ثابت	-
	۸	الگوی سوم (میانگین ۲۵ متر)	-

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۱.۴. تغییرات حداقل جریان شبانه

در هفته‌های مختلف اندازه‌گیری نشان داده شده است. در این جدول میزان فشار خروجی شیر فشارشکن در زمان جریان شبانه، همچنین مقدار حداقل دبی شبانه در طول هفته نیز نشان داده شده است.

حداقل جریان شبانه که از مجموع نشت‌های شبکه و مصارف شبانه مشترکان تشکیل شده است در ساعت‌های نیمه شب و معمولاً بین ساعات ۱۲ شب تا ۵ صبح اتفاق می‌افتد. در جدول ۴ نتایج اندازه‌گیری حداقل جریان شبانه

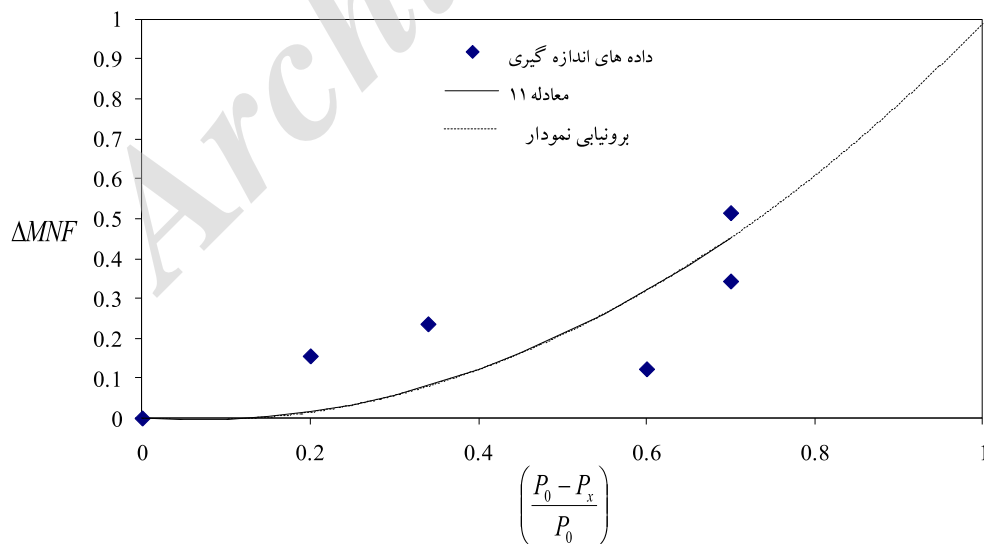
جدول ۴. تغییرات حداقل جریان شبانه با فشار برای ایزوله مورد مطالعه

شماره هفته	فشار خروجی شیر فشارشکن در زمان جریان شبانه (متر)	حداقل جریان شبانه (مترمکعب بر ساعت)
۳	۵۰	۲۱/۹۶
۴	۲۰	۱۹/۲۶
۵	۱۵	۱۰/۶۹
۶	۴۰	۱۸/۵۵
۷	۳۳	۱۶/۷۹
۸	۱۵	۱۴/۴۴

تغییرات جریان شبانه در این ماه، از تحلیل حذف شده است.

در شکل ۴، نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده توسط منحنی برازش نشان داده شده است. مطابق شکل می‌توان برای شبکه‌ای با فشار مبنای ۵۰ متر، رابطه (۱۱) را برای تعیین مقدار نسبی کاهش حداقل جریان شبانه با کاهش فشار شبانه شبکه پیشنهاد داد.

چنانچه نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد، با کاهش فشار خروجی شیر فشارشکن میزان حداقل جریان شبانه کاهش می‌یابد. در شکل ۴، تغییرات درصد کاهش حداقل جریان شبانه در مقابل درصد کاهش فشارهای متوسط شبکه در هفته‌های مختلف اندازه‌گیری نشان داده شده است. مبنای مقایسه در این شکل، مقدار خروجی شیر فشارشکن در حالت هفته سوم (۵۰ متر) بوده است. اندازه‌گیری‌های هفته‌های اول و دوم که مربوط به ماه رمضان است به علت



شکل ۴. تغییرات نسبی حداقل جریان شبانه در برابر فشار خروجی شیر فشارشکن



۲.۴. محاسبه توان  $N$  در پایلوت مورد مطالعه

(۱۱)

برای محاسبه توان  $N$  بر اساس روش پیشنهادی، ابتدا با استفاده از رابطه (۱۰) مقادیر ضریب  $X$  با توجه به داده‌های فشار و حداقل جریان شبانه در مراحل مختلف محاسبه شد (جدول ۵). در این جدول  $X_1$ ،  $X_2$  و  $X_3$  مقادیر محاسبه شده  $X$  از رابطه (۱۰) به ترتیب مربوط به فشارهای متوسط ۱۵، ۴۰ و ۳۳ متر و مقادیر حداقل جریان‌های شبانه متناظر با آنهاست. در این محاسبات مقادیر  $P_0$  و  $L_0$  مربوط به هفته ۳ است (جدول ۴). انحراف معیار مقادیر  $X$ ها در ردیف آخر جدول ۵ نمایش داده شده است.

نمودار مربوط به مقادیر مختلف توان پیشنهادی  $N$  و انحراف معیارهای متناظر آن در شکل ۵ رسم شده است. مطابق این نمودار، حداقل انحراف معیار مربوط به حالت  $N = 1.15$  است. با توجه به جنس لوله‌های پایلوت مورد مطالعه، که ترکیبی از لوله‌های چدنی و پلی‌اتیلن است، نتیجه به دست آمده برای مقدار  $N$  (۱/۱۵) منطقی به نظر می‌رسد.

$$\Delta MNF = 1.2 \left( \frac{P_0 - P_x}{P_0} \right)^2 - 0.2 \left( \frac{P_0 - P_x}{P_0} \right)$$

که در آن  $\Delta MNF$  نسبت کاهش حداقل جریان شبانه،  $P_0 = 50$  و  $P_x$  مقدار فشار تقلیل یافته (بر حسب متر) است. از ویژگی‌های این رابطه پیشنهادی این است که در آن شرایط مرزی در نظر گرفته شده است، به صورتی که هنگامی که فشار  $P_x$  برابر  $P_0$  و صفر باشد مقدار  $\Delta MNF$  به ترتیب برابر صفر و ۱ خواهد شد. مقدار ضریب همبستگی داده‌ها با رابطه (۱۱) به دست می‌آید ( $r^2=0.94$ ).

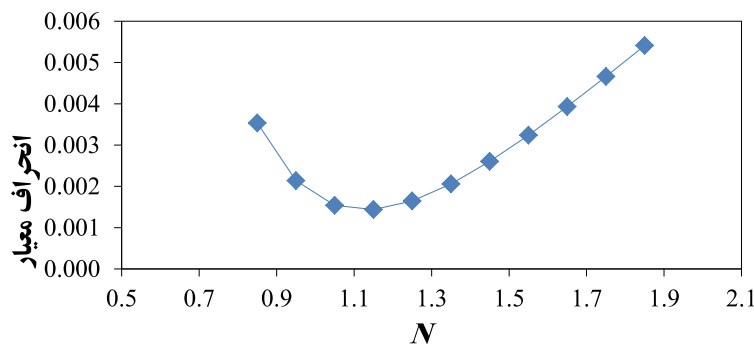
در نشریه ۵۵۶ (۱۳۹۱) به نقل از  $^{2WRC}$  بین جریان خالص شبانه  $(MNF)^3$  و فشار متوسط شبانه در منطقه  $(AZNP)^4$  رابطه (۱۳) به شکل زیر ذکر شده است.

$$MNF = 0.007(AZNP)^2 + 0.5(AZNP) \quad (12)$$

که شکل کلی آن به رابطه (۱۱) شباهت دارد و نشان می‌دهد بین مقدار فشار و جریان شبانه رابطه درجه دوم وجود دارد.

جدول ۵. ضرایب  $X$  و انحراف معیار آن در هفته‌های ۵، ۶ و ۷ به ازای مقادیر مختلف  $N$ 

$N$	۱/۸۵	۱/۷۵	۱/۶۵	۱/۵۵	۱/۴۵	۱/۳۵	۱/۲۵	۱/۱۵	۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۸۵
$X_1$	۰/۴۲۴۸	۰/۴۱۵۷	۰/۴۰۵۲	۰/۳۹۲۹	۰/۳۷۸۳	۰/۳۶۱۰	۰/۳۴۰۳	۰/۳۱۵۳	۰/۲۸۶۸	۰/۲۴۶۸	۰/۱۹۸۹
$X_2$	۰/۵۴۰۹	۰/۵۱۹۷	۰/۴۹۵۹	۰/۴۶۸۹	۰/۴۳۸۳	۰/۴۰۳۰	۰/۳۶۲۰	۰/۳۱۳۹	۰/۲۵۶۶	۰/۱۸۷۱	۰/۱۰۱۲
$X_3$	۰/۵۶۱۱	۰/۵۴۴۴	۰/۵۲۵۵	۰/۵۰۴۲	۰/۴۷۹۸	۰/۴۵۱۶	۰/۴۱۸۹	۰/۳۸۰۳	۰/۳۳۴۱	۰/۲۷۸۱	۰/۲۰۸۸
انحراف معیار	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۳۵

شکل ۵. تغییرات مقادیر انحراف معیار و  $N$  در پایلوت مورد مطالعه

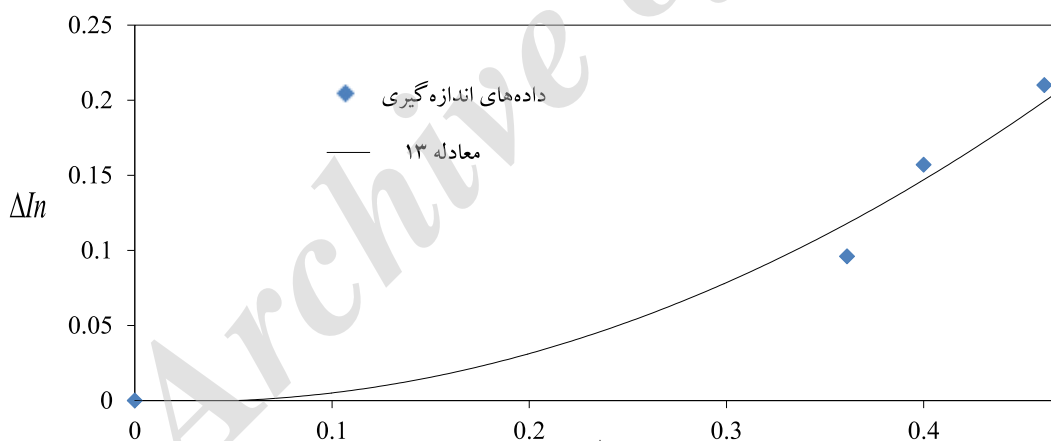
مدت انجام اندازه گيرى ها ثبت شد. نتايج درصد تغييرات ديبى ورودى به شبكه در اثر تغييرات فشار در جدول ۶ آمده است.

### ۳.۴. تأثير تغييرات فشار بر ميزان جريان ورودى به ايزوله

در بررسى تأثير تغييرات مقدار فشار بر ميزان جريان ورودى، مقادير جريان ورودى به ايزوله با عدد ديبى سنج التراسونيكب كه در بالادست شير فشارشكن نصب بود در

جدول ۶. درصد کاهش ديبى ورودى به شبكه در نتيجه کاهش فشار

هفته	فشار خروجى شير فشارشكن (متر)	متوسط ديبى روزانه ورودى به شبكه در هفته مورد مطالعه (مترمكعب در روز)	كاهش ديبى ورودى به شبكه (%)
۱	۳۰ (ثابت)	۹۱۰/۴۲	۱۵/۷
۲	۵۰ (ثابت)	۱۰۷۹/۳۱	۰
۳	۵۰ (ثابت)	۹۹۹/۹۷	۰
۴	الگوى اول (ميانگين ۳۲)	۹۰۴/۱	۹/۶
۵	الگوى دوم (ميانگين ۲۷)	۷۹۰/۳	۲۱



شكل ۶. تغييرات نسبى کاهش ديبى ورودى به ايزوله و فشار خروجى شير فشارشكن

در ماه رمضان و هفته‌هاى ۳، ۴ و ۵ خارج از ماه رمضان بوده است. در شكل ۶ تغييرات نسبى کاهش ديبى ورودى به شبكه بر حسب نسبت کاهش فشار خروجى شير فشارشكن نشان داده شده است. همچنين، در اين شكل روند تغييرات به صورت منحنى، با نتايج به دست آمده برازش داده شده است.

در جدول ۶، ميزان درصد کاهش ديبى ورودى روزانه به شبكه، نسبت به ميزان ديبى ورودى به شبكه در حالت فشار خروجى شير فشارشكن برابر ۵۰ متر محاسبه شده است. در اين محاسبات، مقدار درصد کاهش ديبى ورودى هفته دوم، نسبت به هفته اول و هفته‌هاى چهارم و پنجم نسبت به هفته سوم سنجيده شده است، زيرا هفته‌هاى ۱ و

علت کاهش فشار است. نمودار رابطه (۱۳) در شکل ۶ نمایش داده شده است. مقدار ضریب همبستگی داده‌ها با رابطه (۱۳) به دست می‌آید ( $r^2=0.99$ ).

#### ۴.۴. تأثیر کاهش فشار شبکه بر میزان مصرف مشترکان

در بررسی تأثیر مدیریت فشار بر میزان کاهش مصرف مشترکان، کنتور مشترکان داخل پایلوت هم‌زمان با تغییرات فشار در خروجی شیر فشارشکن به صورت هفتگی قرائت شد. نتایج تغییرات مصرف مشترکان با تغییرات خروجی شیر فشارشکن در هفته‌های ۳ و ۴ و ۵ در جدول ۷ آمده است.

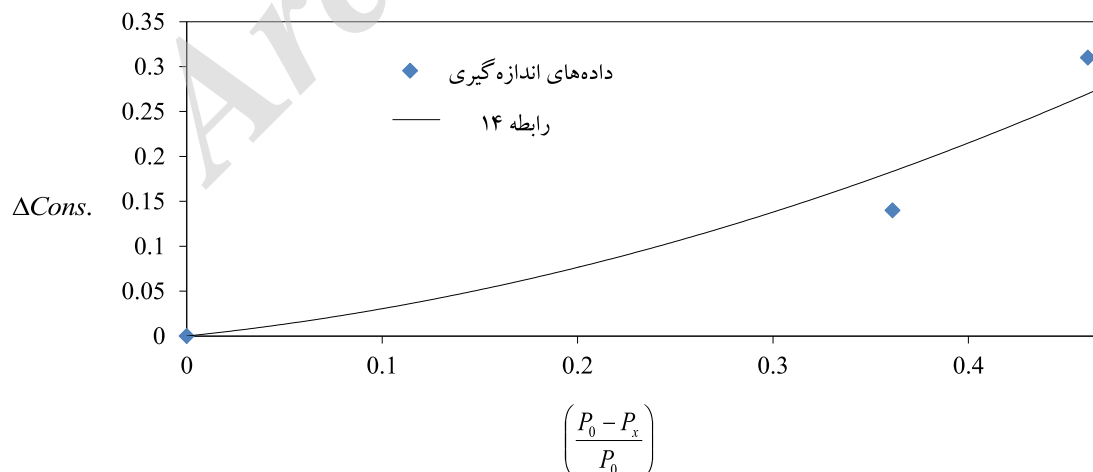
نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که با کاهش حداکثری فشار خروجی شیر فشارشکن، بدون نارضایتی مشترکان، دبی ورودی به شبکه تا بیش از ۲۰٪ کاهش یافته است. کاهش دبی ورودی به شبکه به علت کاهش مصرف مشترکان به علاوه کاهش نشت شبکه است. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان برای شبکه‌ای با فشار مبنای ۵۰ متر، رابطه (۱۳) را در تعیین درصد کاهش دبی ورودی به شبکه با کاهش فشار پیشنهاد داد.

$$\Delta In = 1.056 \left( \frac{P_0 - P_x}{P_0} \right)^2 - 0.056 \left( \frac{P_0 - P_x}{P_0} \right)$$

که در آن  $\Delta In$  نسبت کاهش دبی ورودی به شبکه به

جدول ۷. تغییرات مصرف مشترکان و فشار خروجی شیر فشارشکن

شماره هفته	فشار (متر)	میزان مصرف هفتگی مشترکان (مترمکعب)	کاهش مصرف (%)
۳	۵۰ (ثابت)	۱۴۱۹	۰
۴	الگوی اول (میانگین ۳۲)	۱۲۲۲	۱۴
۵	الگوی دوم (میانگین ۲۷)	۹۸۵	۳۱



شکل ۷. تغییرات نسبی کاهش مصرف مشترکان در مقابل فشار خروجی شیر فشارشکن

در تحقیق حاضر مدیریت فشار نیز در شبکه مورد مطالعه اجرا و نتایج تأثیر آن در طول چند هفته اندازه‌گیری شد. در این پایلوت، پیاده‌سازی مدیریت فشار توانست بدون ناراضی مشتریان، میزان جریان شبانه، دبی ورودی به شبکه و مصرف مشتریان را به ترتیب تا ۵۰٪، ۲۱٪ و ۳۰٪ کاهش دهد.

همچنین، با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق، سه رابطه جدید غیرخطی برای برآورد میزان کاهش، جریان شبانه، جریان ورودی به شبکه و مصرف مشتریان با کاهش فشار ارائه شد. از مزایای معادلات جدید، رعایت شرایط مرزی فشار، همچنین لحاظ کردن مقدار فشار اولیه ( $P_0$ ) است.

با توجه به متنوع بودن شرایط شبکه‌های توزیع آب از نظر جنس لوله‌ها و مقادیر فشار شبکه، مطالعات بیشتر در زمینه تأثیر مدیریت فشار بر مقادیر نشت و مصرف مشتریان لازم است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از مدیر عامل، معاون بهره‌برداری و کارشناسان محترم وقت شرکت آب و فاضلاب منطقه ۱ شهر تهران برای همکاری در انجام این تحقیق قدردانی می‌کنند.

### یادداشت‌ها

1. Bursts and Background Estimates
2. Water Research Centre
3. Minimum Night Flow
4. Average Zone Night Pressure

در شکل ۷، تغییرات نسبت کاهش مصرف هفتگی مشتریان در مقابل فشار خروجی شیر فشارشکن نمایش داده شده است. بر اساس این نتایج، با انجام مدیریت فشار، مصرف مشتریان کاهش یافته است، بدون اینکه ناراضی مشتریان گزارش شده باشد.

مطابق شکل ۷، می‌توان برای شبکه‌ای با فشار اولیه ۵۰ متر، رابطه (۱۴) را در تعیین میزان کاهش مصرف مشتریان با کاهش فشار پیشنهاد داد.

$$\Delta Cons. = 0.8 \left( \frac{P_0 - P_x}{P_0} \right)^2 + 0.2 \left( \frac{P_0 - P_x}{P_0} \right)$$

که در آن  $\Delta Cons.$  نسبت کاهش مصرف مشتریان است.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدید تحلیلی در محاسبه توان ( $N$ ) در رابطه FAVAD ارائه شد. از جمله مزایای روش پیشنهادی، عدم نیاز به اندازه‌گیری تعداد منافذ نشت با سطح مقطع ثابت و متغیر، همچنین عدم نیاز به داشتن مقدار دقیق مصرف شبانه است. فرض مورد استفاده در این روش، مستقل بودن مصرف شبانه از فشار شبکه است. با استفاده از روش پیشنهادی، مقدار  $N$  در پایلوت مورد مطالعه عدد ۱/۱۵ به دست آمد که با توجه به جنس لوله‌های پایلوت (ترکیب لوله‌های پلی‌اتیلنی و چدنی) و نتایج دیگر مطالعات، عدد به دست آمده منطقی است.

### منابع

- تابش، م. هومهر، س. ۱۳۸۶. مدیریت نشت در شبکه‌های آبرسانی به وسیله بهینه‌سازی تنظیم شیرهای فشارشکن با استفاده از الگوریتم ژنتیک، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- جلیلی قاضی‌زاده، م. ر. ۱۳۸۸. مبانی و کاربرد مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع آب، نشریه علمی، فنی، اجتماعی و فرهنگی آب و محیط‌زیست، ۶۶-۵۳: ۷۵.
- جلیلی قاضی‌زاده، م. ر. صالحی، س. ۱۳۸۶. مدیریت فشار در شبکه‌های شاخه‌ای با استفاده از لوله‌های موازی، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران.

کارآموز، م. تابش، م. نظیف، س. مریدی، ع. ۱۳۸۵. مدل مدیریت فشار در شبکه توزیع آب شهری، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

شاهنگیان، س.ا. تابش، م. ۱۳۹۳. مروری بر پیشینه تحقیقات صورت‌گرفته بر روی رابطه نشت فشار، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک / ایران، تبریز، دانشگاه تبریز.

نشریه ۵۵۶. ۱۳۹۱. راهنمای شناخت و بررسی عوامل مؤثر در آب به‌حساب نیامده و راهکارهای کاهش آن، وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا.

Burn, L.S. Silva, D. De. Shipton, R.J. 2002. Effect of demand management and system operation on potable water infrastructure coasts. *Sciencedirect, Urban Water*. 4(3).

Chowdhury, M.A.I. Ahmed, M.F. Bhuiyan, M.A. Rahman, M.H. 1997. Unaccounted-for water management states in Bangladesh. *Journal of water supply-AQUA*. 46.

Dimitrov, G. Tenev, G. Krustev T. 2011. Regulation of the water pressure in the water supply network in the residential area of burgas. *Water Utility Journal*. 1: 49-55.

Fanner, P.V. Sturm R. Thornton, J. Liemberger, R. 2007. Leakage management technologies, EPA, by Awwa Research Foundation. 6666 West Quincy Avenue, Denver, CO 80235-3098 USA, P 303.347.6100.

Guo, S. Zhang, T. Shao, W. Zhu, D.Z. Duan Y. 2013. Two-dimensional pipe leakage through a line crack in water distribution systems. *Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics & Engineering)*, 14(5): 371-376.

IWA. 2001. Water losses management and techniques, International report, presented at the IWA Congress in Berlin.

Lambert, A. 1997. Pressure management / Leakage relationships: theory, concepts and practical applications, Minimizing Leakage in Water Supply / Distribution Systems, IQPC Seminar, London.

Lambert, A. 2003. What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems?, IWA Conference.

Lambert, A. Brown, T.G. Takizawa, M. Weirner, D. 1999. A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *AQUA*. 48(6): 227-237.

Lambert, A. McKenzie, R. 2002. Practical experience in using the infrastructure leakage index, International Water Date Comparisons Ltd, UK and Global Water Resources Ltd, Republic of South Africa. .

Laneville, M. 2015. Pressure management in water distribution networks for water and infrastructure sustainable use. *Journal of Vecteur Environment*: 44-50.

Marunga, A. Hoko, Z. Kaseke E. 2006. Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: the case study of the city of Mutare, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*. Elsevier, 31: 763-770.

May, J. 1994. *Pressure dependent leakage*, World Water and Environmental Engineering management.

McKenzie, R. Seago, C. 2005. Assessment of real losses in potable water distribution systems: some recent developments. *Water Science and Technology: Water Supply*. 5(1): 33-40, IWA Publishing.

Pereza, R. Puiga, V. Pascuala, J. Quevedoa, J. Landerosc, E. Peraltad, A. 2011. Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks. *Journal of Control Engineering Practice*. 19(10): 1157-1167.

Schwaller, J. van Zyl, J.E. 2014. Modeling the pressure-leakage response of water distribution systems based on individual leak behavior. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. No. 04014089: 1-8.

Thorton, J. Lambert, A. 2006. Managing pressure to reduce new breaks, water 21, Issue DEC.

Walski, T. Bezts, W. Posluszny, E.T. Weir, M. Whitman, B.E. 2006. Modeling leakage reduction through pressure control. *Journal - American Water Works Association*. 98(4): 147-155.