Journal of Water & Wastewater Science & Engineering (jwwse)
Winter 2017, Vol. 1, No. 1.
Doi: 10.22112/jwwse.2017.51053

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال اول، شماره ۱، زمستان ۱۳۹۵

A Review on Pressure-Burst Relationships in Water Networks

Iman Moslehi[1]* and Mohammad Reza Jalili Ghazizadeh[2]

1- PhD Student in Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water and Wastewater, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author, Email: immoslehi@gmail.com

Received: 12/6/2017
Revised: 22/8/2017
Accepted: 26/8/2017

Abstract

Besides reducing leakage and consumption, pressure management affects as well the occurrence of new bursts in water supply systems. Over the past two decades, several researchers throughout the world have studied the benefits of pressure management on reduction in the burst frequencies. During this period a wide assortment of empirical models have been developed to determine pressure-burst relationships including pressure-leakage relationships. This survey aimed to conduct a comprehensive review of these studies, relationships, and empirical models pertaining to the effects of pressure management on the burst rates of pipes in water supply systems. For this purpose, developed relationships and empirical models by various researchers over the last twenty years were discussed and the advantages and disadvantages of them were summarized. Based on the review a better unders tanding of the pressure- burst relationships could be founded and the results could be used in the analysis and evaluation of pressure management schemes in water supply systems.

Keywords: Average zone point, Maximum pressure, Pressure-burst relationship, Pressure management.

مروری بر روابط فشار- شکستگی در شبکه‌های آب‌رسانی

ایمان مصلحی[۱] و محمدرضا جلیلی قاضی زاده[۲]*

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

۲- استادیار، گروه آب و فاضلاب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* نویسنده مسئول، ایمیل: immoslehi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲۲
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۵/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۶

چکیده

مدیریت فشار علاوه بر کاهش نشت و مصرف بر وقوع شکستگی‌های جدید در شبکه‌های آب‌رسانی نیز تأثیر می‌گذارد. طی دو دهه اخیر مزایای مدیریت فشار بر کاهش تواتر شکستگی لوله‌ها توسط پژوهشگران مختلفی در سرتاسر جهان مورد بررسی قرار گرفته و روابط و مدل‌های گوناگونی به‌منظور تعیین روابط فشار- شکستگی نظیر روابط فشار- نشت توسعه داده شده است. هدف از ارائه این مقاله مروری کامل و جامع بر مطالعات، روابط و مدل‌های تجربی ارائه‌شده در ارتباط با تأثیر مدیریت فشار بر نرخ شکستگی لوله‌ها در شبکه‌های آب‌رسانی است. بدین منظور روابط و مدل‌های تجربی ارائه‌شده توسط پژوهشگران مختلف طی بیست سال اخیر مورد بحث و بررسی قرار گرفته و مزایا و معایب هریک از آن‌ها بیان شده است. بر اساس این مقاله می‌توان به درک و شناخت بهتری از روابط فشار - شکستگی دست یافت و نتایج آن می‌تواند در تحلیل و ارزیابی برنامه‌های مدیریت فشار در شبکه‌های آبرسانی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: مدیریت فشار، رابطه فشار-شکستگی لوله‌ها، شبکه‌های آب‌رسانی، نقطه میانگین ناحیه، فشار ماکزیمم.

۱- مقدمه

امروزه مدیریت فشار در شبکه‌های آبرسانی دستخوش تغییرات و پیشرفت‌های بسیاری شده، چرا که شرکت‌های آبرسانی مزایای فراوان حاصل از مدیریت فشار را به‌خوبی تشخیص داده‌اند. بیش از سی سال پیش تحقیقات انجام گرفته در ژاپن و انگلستان نشان داد که رابطه بین فشار و نرخ نشت در شبکه‌های آبرسانی به‌جای یک رابطه ریشه دوم، تقریباً به صورت خطی است. مدیریت فشار امروزه نه‌تنها برای کنترل نشت، بلکه به‌منظور مدیریت تقاضا[1]، حفاظت آب و مدیریت اجزاء[2] به کار می‌رود (Lambert and Fantozzi, 2010). مزایای اصلی مدیریت فشار شامل کاهش نشت، کاهش تواتر وقوع شکستگی‌های جدید و کاهش برخی مؤلفه‌های مصرف است. از دیگر مزایای مدیریت فشار می‌توان به تأخیر انداختن بازسازی و نوسازی لوله‌ها، افزایش عمر تأسیسات زیربنایی، کاهش هزینه‌های کنترل فعال نشت، کاهش انرژی مصرفی و بهبود خدمات‌رسانی به مشتریان از طریق قطع کمتر ساعات آبرسانی اشاره کرد (Lambert and Fantozzi, 2010).

همان‌گونه که بیان شد، یکی از مزایای اصلی مدیریت فشار، کاهش تواتر شکستگی‌های جدید در شبکه آبرسانی پس از اعمال مدیریت فشار است. هدف از ارائه این مقاله بررسی و ارزیابی روابط و مدل‌های تجربی- میدانی توسعه داده‌شده به‌منظور ارائه روابط فشار- شکستگی در شبکه‌های آب‌رسانی طی بیست سال اخیر است. بدین منظور مروری کلی و جامع بر مقالات مرتبط و به‌خصوص مقالات ارائه‌شده توسط گروه کاری هدررفت آب انجمن جهانی آب[3] شده که نتایج این تحقیقات و آخرین پیشرفت‌های صورت گرفته در این خصوص به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج این مقاله می‌تواند به درک بهتر از روابط فشار- شکستگی کمک کرده و در تحلیل و ارزیابی برنامه‌های مدیریت فشار و بررسی اثرات آن‌ها مورد استفاده قرار بگیرد.

۲- پیشینه تحقیقاتی مربوط به روابط فشار- شکستگی

۲-۱- مطالعات در انگلستان بین سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۳

اولین مطالعات در ارتباط با رابطه فشار- شکستگی در انگلستان به‌وسیله May (1994) و Lambert and Morrison (1995) تأثیر فشار بر تواتر شکستگی لوله‌ها را نشان داد. (Lambert, 2001) با بررسی داده‌های تعدادی ناحیه ایزوله شده[4] (DMA) و شبکه‌های آبرسانی در انگلستان، استرالیا، نیوزلند و برزیل اینگونه نتیجه گرفت که تواتر شکستگی لوله‌ها با افزایش و کاهش فشار رابطه مستقیم دارد. با توجه به نتایج مطالعات فوق، Farley and Trow (2003) پیشنهاد دادند که تغییر در شکستگی لوله‌ها می‌تواند با تغییر در فشار با یک مؤلفه توانی یعنی p^{N_2} مرتبط باشد. بنابراین رابطه فشار – شکستگی به صورت رابطه (۱) ارائه شد:

$$\frac{BF_1}{BF_0}=\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N_2} \qquad (۱)$$

که BF_0 و BF_1: به ترتیب تواتر شکستگی قبل و بعد از تغییر فشار و P_0 و P_1: مقدار فشار قبل و بعد از مدیریت فشار می‌باشند.

تحقیقات UK Water Industry Research (2003) روی یک مجموعه داده بزرگ در انگلستان مربوط به داده‌های مدیریت فشار و تواتر شکستگی‌ها به‌منظور تأیید رابطه (۱)، نشان داد که یک رابطه متقاعدکننده و منطقی بین فشار و تواتر تعمیر خطوط اصلی (یا همان شکستگی‌ها) وجود ندارد. بااین‌حال پس از مطالعه دقیق‌تر گزارش سال ۲۰۰۳ توسط اعضای گروه کاری مدیریت هدررفت آب انجمن بین‌المللی آب، آن‌ها بیان داشتند که یک رابطه ریشه دوم بین تواتر شکستگی‌ها و فشار مانند رابطه بین فشار و نشت از یک روزنه، می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌بینی سخت‌گیرانه (یعنی بدترین پیش‌بینی در مورد تأثیر مدیریت فشار بر شکستگی) در ارزیابی‌ها مورداستفاده قرار گیرد، با آگاهی از این موضوع که نتایج واقعی به علت تثبیت تأثیر مدیریت فشار پس از اجرای آن احتمالاً بهتر خواهد بود.

۲-۲- مطالعات گروه کاری هدررفت آب انجمن بین‌المللی آب (IWA) بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰

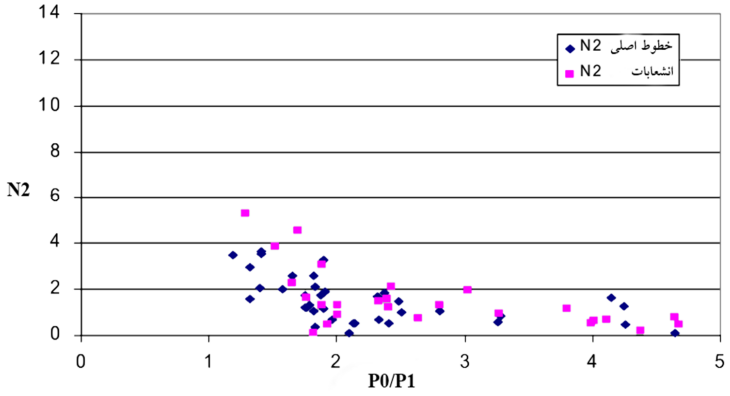
پس از ارائه نتایج تحقیقات سال ۲۰۰۳ به نظر می‌آمد که دیگر علاقه‌ای به مطالعات و تحقیقات بیشتر در مورد رابطه فشار- شکستگی بین محققان وجود نداشته باشد. اما گروه تازه تشکیل‌شده مدیریت فشار گروه کاری هدررفت آب IWA تعدادی برنامه‌های مدیریت فشار در شبکه‌های مختلف آب‌رسانی در سطح بین‌المللی را مورد بررسی و تحلیل قرار داد که مشخص شد در آن‌ها تواتر شکستگی خطوط اصلی و انشعابات بعد از اعمال مدیریت فشار به‌طور قابل توجهی کاهش

یافته بودند. بار دیگر پژوهشگران بر روی تعیین روابط فشار- شکستگی در شبکه‌های آبرسانی متمرکز شدند.

در یکی از اولین تحقیقات در این زمینه، Thornton and Lambert (2005) مطالعه‌ای روی یک سری داده محدود از کشورهای انگلستان، استرالیا و ایتالیا مربوط به تواتر شکستگی‌های جدید در خطوط اصلی و انشعابات قبل و بعد از مدیریت فشار با فرض در نظر گرفتن رابطه (۱) یعنی تغییر تواتر شکستگیهای جدید (BF) با فشار (P) به توان N_2 انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار N_2 بین ۰/۵ تا ۶/۵ متغیر بوده و این مقادیر کاهش قابل‌توجه در تواتر شکستگی‌های جدید پس از اجرای مدیریت فشار را نشان می‌داد. در این حال Pearson et al. (2005) به‌منظور انجام یک تحلیل دقیق‌تر از یک مجموعه داده بزرگ جمع‌آوری‌شده از کشورهای مختلف شامل انگلستان، برزیل، ایتالیا و استرالیا استفاده کردند. بررسی داده‌های این تحقیق به‌وضوح نشان داد که مدیریت فشار کاهش قابل‌توجهی در تواتر تعمیرات خطوط اصلی و انشعابات بسیاری مناطق ایزوله می‌گذارد. برای مثال نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های استرالیا تأیید کرد که پس از نصب شیرهای فشارشکن در سپتامبر ۲۰۰۳، تواتر شکستگی‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. ازاین‌رو آن‌ها تلاش کردند تا رابطه فشار- شکستگی را با استفاده رابطه (۱) و تعیین مقدار N_2 مدلسازی کنند. نتایج تحلیل و آنالیز داده‌ها که در شکل ۱ ارائه شده، نشان داد که مقدار N_2 بین ۰/۲ تا ۸/۵ برای شکستگی لوله‌های اصلی و بین ۰/۲ تا ۱۲ برای شکستگی انشعابات تغییر می‌کند. بنابراین چنین نتیجه‌گیری شد که تغییرات بالای N_2 می‌تواند به علت برخی فاکتورها نظیر جنس لوله، شرایط نصب لوله‌ها و شرایط زمین باشد. درنهایت Pearson et al. (2005) دریافتند که معادله پایه فشار- نشت برای نشان دادن رابطه فشار - شکستگی (رابطه (۱) یا همان رابطه توان N_2) برای تحلیل و پیش‌بینی روابط فشار- شکستگی مناسب نیست.

یکی از کاستی‌های مطالعات Thornton and Lambert (2005) و Pearson et al. (2005) عدم وجود داده‌های مربوط به شکستگی در دوره‌های زمانی به اندازه کافی بلندمدت با فشار تقریباً پایدار قبل و بعد از اجرای مدیریت فشار به‌منظور توسعه یک رابطه دقیق فشار- تواتر شکستگی بود. معمولاً پیشنهاد شده که داده‌های شکستگی مربوط به سه سال قبل و بعد از اجرای مدیریت فشار برای تخمین قابل اطمینان و دقیق شکستگی‌ها در آینده مورد نیاز است که در بسیاری از مناطق مورد تحلیل در مطالعات مذکور در دسترس نبود. علاوه بر این، Pearson et al. (2005) در مطالعه خود بحثی در مورد مفهوم پوش‌های شکست[۵] لوله و نقاط وظیفه[۶] ارائه دادند که ریشه پیشرفت‌های مفهومی و عملی برای پیش‌بینی شکست لوله‌ها در آینده شد.

آنالیز نتایج به‌دست‌آمده از دو مطالعه فوق نشان داد که اغلب مقادیر بزرگتر N_2 به درصد کمتری در کاهش فشار و مقادیر کوچکتر N_2 به درصد بیشتری در کاهش فشار مربوط می‌شود. با توجه به آنالیز فوق و با الهام از مفهوم پوش‌های شکست و نقاط وظیفه، Thornton and Lambert (2006, 2007) مطالعاتی با هدف اثبات آنکه کاهش فشار اضافی می‌تواند تأثیر قابل توجهی روی کاهش شکستگی‌ها داشته باشد و ارائه یک رویکرد مفهومی، با استفاده از داده‌های ۱۱۲ شبکه آبرسانی از ۱۲ کشور جهان، انجام دادند. آنالیز و تحلیل روی این داده‌ها به



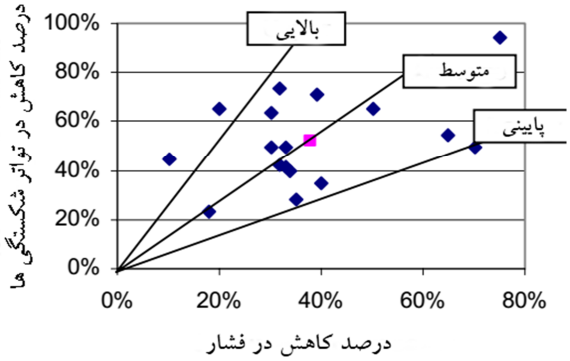
شکل ۱– مقادیر N_2 برای خطوط اصلی و انشعابات در مقابل تغییرات فشار (Pearson et al., 2005).

صورت شکل ۲ برای درصد کاهش فشار در مقابل درصد کاهش تواتر شکستگی برای خطوط اصلی و انشعابات رسم شد. یک تفسیر ساده برای آنالیز داده‌ها آن است که اینگونه فرض شود که درصد کاهش در شکستگی‌های جدید با ضرب فاکتور تواتر شکستگی[۷] (BFF) در درصد کاهش در فشار ماکزیمم در نقطه میانگین ناحیه[۸] (AZP_{max}) به دست می‌آید (رابطه ۲).

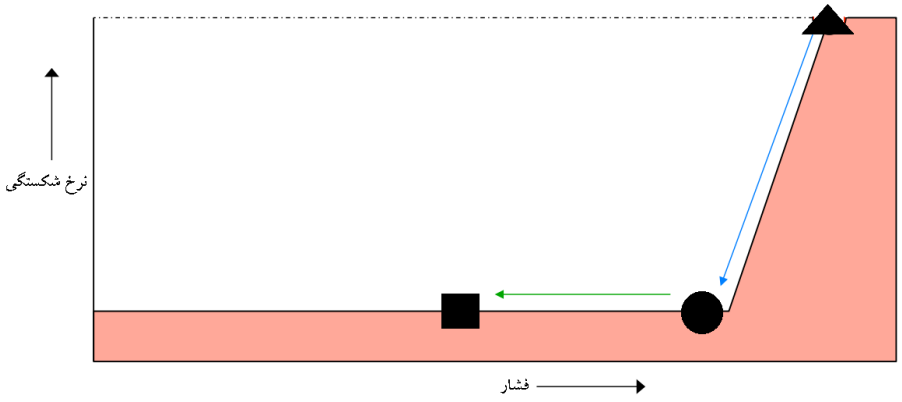
$$\%\ \text{Reduction in New Bursts} = \text{BFF} \times \%\ \text{Reduction in } P_{max} \quad (۲)$$

نتایج نشان داد که مقدار متوسط فاکتور تواتر شکستگی (BFF) یا ضریب شیب (S) برای خطوط اصلی و انشعابات ۱/۴ و مقدار کمینه و بیشینه آن به ترتیب ۰/۷ و ۲/۸ بود (Thornton and Lambert, 2007). رابطه (۲) بعداً به‌عنوان معادله پایه فشار- شکستگی ۲۰۰۶ شناخته شد. نتایج حاصل از مطالعه Thornton and Lambert (2006) دست‌مایه ارائه یک مدل مفهومی با عنوان STBTCB[۹] به‌منظور توضیح و تفسیر رابطه فشار- شکستگی (شکل ۲) شد که در شکل ۳ ارائه شده است. این مدل مفهومی برای توضیح اینکه چرا در برخی شبکه‌های آبرسانی، درصد بالای کاهش در تواتر شکستگی‌ها در خطوط اصلی و انشعابات با کاهش کوچکی در فشار رخ می‌دهد، اما در بقیه شبکه‌ها درصد کاهش در تواتر شکستگی‌ها با کاهش فشار کم و ناچیز است، به کار می‌رود.

با توجه به شکل ۳ چنانچه قبل از مدیریت فشار، مقدار تواتر شکستگی و نرخ شکست اولیه نسبتاً بالا در شبکه آبرسانی وجود داشته باشد (مثلث)، آنگاه یک کاهش نسبتاً کوچک در فشار می‌تواند باعث درصد کاهش بزرگی در تواتر شکستگی‌های جدید باشد (حرکت مثلث به دایره). اما اگر مقدار تواتر شکستگی و نرخ شکست قبل از مدیریت فشار پائین



شکل ۲- داده های مربوط به درصد کاهش در تواتر شکستگی در مقابل درصد کاهش در فشار برای خطوط اصلی و انشعابات (Thornton and Lambert, 2007).



شکل ۳- مدل مفهومی STBTCB برای تفسیر رابطه فشار- شکستگی (Thornton and Lambert, 2007).

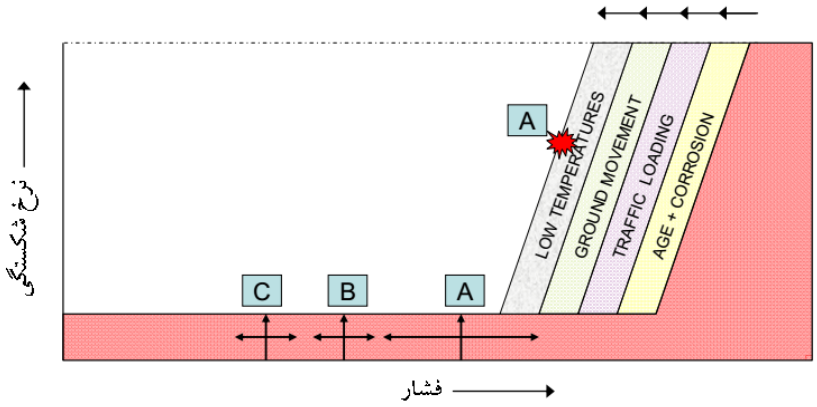
باشد (دایره)، آنگاه هر درصد کاهش در فشار، تأثیر کمی بر روی تواتر شکستگی‌های جدید خواهد داشت. در این حالت یک فاکتور اطمینان بزرگتر ایجاد شده و عمر باقی‌مانده لوله‌ها افزایش می‌یابد (حرکت از دایره به مربع).

در ادامه، مدل مفهومی STBTCB با معرفی شاخص تواتر شکستگی[10] (BFI) برای شناسایی مناطقی با پتانسیل بالای کاهش تواتر شکستگی‌ها بعد از اعمال مدیریت فشار تکمیل شد. بدین منظور Thornton and Lambert (2007) یک روش پیشنهادی ساده برای تفسیر مدل مفهومی STBTCB ارائه دادند که در آن از تواتر شکستگی‌ها در خطوط اصلی و انشعابات قبل از مدیریت فشار استفاده می‌شود تا نشان دهد آیا درصد کاهش در تواتر شکستگی‌ها احتمالاً نسبتاً پائین یا بالا است. بدین منظور از تواتر شکستگی‌های مورداستفاده در برآورد هدررفت واقعی اجتناب‌ناپذیر سالیانه[11] (فرمول UARL) برای مقایسه استفاده شد (Lambert, 2009). این مقدار برای فشار متوسط ۵۰ متر تعداد ۱۳ شکستگی در ۱۰۰ کیلومتر در سال برای خطوط اصلی و تعداد ۳ شکستگی در هر ۱۰۰۰ انشعاب در سال برای انشعابات است. بدین منظور شاخص تواتر شکستگی (BFI) به صورت نسبت تواتر شکستگی واقعی در شبکه آبرسانی قبل از اعمال مدیریت فشار به تواتر شکستگی پایه که برابر است با تواتر شکستگی‌های فرمول هدررفت واقعی سالیانه اجتناب‌ناپذیر (UARL)، معرفی شد (Lambert, 2009). با محاسبه شاخص تواتر شکستگی (BFI) برای لوله‌های اصلی و انشعابات به صورت جداگانه می‌توان به‌سرعت و به صورت کیفی تشخیص داد که آیا مدیریت فشار در هر ناحیه مدیریت فشار[12] (PMZ) می‌تواند کاهش قابل‌توجهی روی تواتر شکستگی خطوط اصلی انشعابات بگذارد یا خیر؟ ازاین‌رو پیشنهاد شد که با هدف‌گذاری و انتخاب مناطقی با شاخص تواتر شکستگی (BFI) بالا و استفاده از معادله پایه فشار- شکستگی ۲۰۰۶ با فاکتور تواتر شکستگی برابر ۱/۴، می‌توان بهصورت کمی کاهش متوسط در تعداد شکستگی‌های جدید خطوط اصلی و انشعابات را پیش‌بینی کرد.

بنابراین با توجه به مطالب فوق و شکل ۴ می‌توان اینگونه بیان کرد که اگر مقدار شاخص تواتر شکستگی (BFI) قبل از مدیریت فشار پائین و نزدیک به یک باشد، آنگاه درصد کاهش در شکستگی‌ها پس از اعمال مدیریت فشار کم یا نزدیک به صفر است، اما عمر مفید لوله‌ها افزایش می‌یابد (حرکت از B به C). اما اگر مقدار شاخص تواتر شکستگی (BFI) یا نرخ شکست اولیه بالا باشد، آنگاه کاهشی اندک در فشار ماکزیمم می‌تواند به کاهشی بزرگ در تواتر شکستگی‌ها منجر شود (حرکت از A به B). از طرفی طی سال‌های مختلف و یا به صورت فصلی، اندرکنش بین فشار و نرخ شکست به سمت چپ شکل ۴ حرکت می‌کند، که عمدتاً به دلیل افزایش سن لوله و خوردگی آن، حرکت زمین، وجود دماهای پائین و بارگذاری ترافیکی است (Thornton and Lambert, 2007).

۲-۳- مطالعات گروه کاری هدررفت آب انجمن بین‌المللی آب (IWA) بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳

به طورکلی حتی اگر فشار شبکه ثابت بوده و تغییر چندانی نداشته باشد، تواتر شکستگی‌ها در یک شبکه آبرسانی می‌تواند به صورت فصلی و یا از سالی به سال دیگر تغییر کند. این تغییرات به دنبال اثرات اقلیمی نظیر دماهای بالا یا پائین



شکل ۴- تأثیر مدیریت فشار روی تواتر شکستگی خطوط اصلی و انشعابات (Thornton and Lambert, 2006).

آب‌وهوا یا تغییرات در رطوبت خاک که منجر به رانش و حرکت زمین می‌شود، اتفاق می‌افتد. ازاین‌رو برخی از محققان بر این باورند که شکستگی‌های مربوط به افزایش نوسانات فصلی، وابسته به فشار نبوده و تحت تأثیر مدیریت فشار نخواهند بود.

اما مطالعه جدید توسط Thornton and Lambert (2011) بر روی یک مجموعه داده باکیفیت به‌منظور بررسی تأثیر فشار روی تغییرات و نوسانات فصلی و سالیانه طبیعی تواتر شکستگی‌ها نشان داد که افزایش نوسانات فصلی شکستگی‌ها با توجه به جنس لوله و نوع شکست می‌تواند تا حدودی وابسته به فشار باشد. بنابراین این گونه نتیجه‌گیری شد که رابطه پایه بین فشار و تواتر شکستگی (معادله پایه فشار-شکستگی ۲۰۰۶)، به‌منظور در نظر گرفتن تغییرات و نوسانات فصلی شکستگی‌ها به بازنگری مجدد و ارتقاء نیاز دارد. نتایج این مطالعه همچنین پیشنهاد داد که در ارتباط با تغییرات فصلی و طبیعی تواتر شکستگی‌ها در یک شبکه آبرسانی اولین گام قبل و بعد از آنالیز شکستگی‌ها در یک ناحیه مدیریت فشار (PMZ) در نظر گرفتن زمان اجرای مدیریت فشار است و درک بیشتر از روابط فشار-شکستگی برای هر جنس لوله از طریق آنالیز مناطق مدیریت فشار (PMZs) بزرگ با تعداد و تواتر شکستگی‌های اولیه بالا با یک نوع غالب از جنس لوله میسر می‌شود. در این مطالعه به طورکلی نیاز به بازنگری و بهبودهای بیشتر در روش‌های پیش‌بینی شکستگی‌ها با در نظر گرفتن تغییرات فصلی و تفاوت در جنس لوله با استفاده از روش‌های تحلیلی مورد تأکید قرار گرفت و پیشنهادات زیر برای آنالیز داده‌های فشار - شکستگی در شبکه‌های آب‌رسانی ارائه شد (Thornton and Lambert, 2011):

- تواتر و تعداد شکستگی به‌صورت ماهیانه یا سالیانه برای حداقل سه سال به صورت جداگانه برای خطوط اصلی و انشعابات موردنیاز است.

- میانگین متحرک (۳ و ۱۲ ماهه) به کاهش نویزهای آماری[۱۳] در داده‌ها کمک می‌کند.

- فشار ماکزیمم باید مقدار فشار استاتیکی ماکزیمم در نقطه میانگین ناحیه (AZP) به‌علاوه هرگونه نوسانات فشاری[۱۴] باشد.

با توجه به نتایج مطالعه فوق، Thornton and Lambert (2012) یک رویکرد عملی برای آنالیز داده‌های فشار - شکستگی و همچنین یک فرم کلی برای تعیین رابطه فشار- شکستگی در شبکه‌های آب‌رسانی ارائه دادند. در موردبررسی اولیه تواتر شکستگی‌ها در شبکه آبرسانی پیشنهاد شد که تغییرات ماهیانه تعداد و تواتر شکستگی‌ها برای کل شبکه آبرسانی مورد بررسی قرار گیرد. برای تفسیرهای معقول، این داده‌ها باید به صورت جداگانه برای خطوط اصلی به صورت تعداد شکستگی در ۱۰۰ کیلومتر در سال و برای انشعابات به صورت تعداد شکستگی در هر ۱۰۰۰ انشعاب در سال بیان شود. همچنین با محاسبه شاخص تواتر شکستگی (BFI) می‌توان یک ارزیابی سریع از گرایش نسبی شکستگی‌ها با در نظر گرفتن مدل مفهومی STBTCB داشت. برای انتخاب مناطق مناسب به‌منظور آنالیز روابط فشار-شکستگی، ضروری است که مناطقی با تعداد قابل‌توجهی شکستگی قبل از اجرای مدیریت فشار انتخاب شوند. مقادیر راهنمای پیشنهادیWater Services Association of Australia (2011) برای انتخاب چنین مناطقی برای آنالیز داده شامل موارد زیر است:

- انتخاب مناطقی با تعداد بیش از ۲۰ شکستگی خطوط اصلی در هر ۱۰۰ کیلومتر در سال و تعداد ۱۰ یا بیشتر شکستگی انشعابات در هر ۱۰۰۰ انشعاب در سال. چراکه نویزهای آماری تغییرپذیری سالیانه طبیعی در تعداد شکستگی‌های پائین می‌تواند به‌راحتی هر کاهشی که ناشی از مدیریت فشار بوده را پنهان کند.

- کاهش قابل‌توجه (بیش از ۲۰ درصد) در فشار ماکزیمم در نقطه میانگین ناحیه (AZP) و اندازه‌گیری پیوسته فشار در این نقطه.

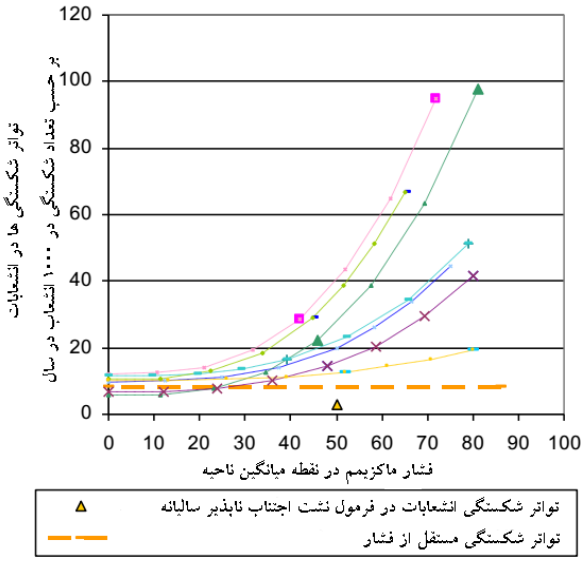
- تلاش برای انتخاب مناطقی با یک جنس لوله غالب برای خطوط اصلی و انشعابات با یک سن مشابه (برای مثال خطوط اصلی عمدتاً چدن و انشعابات عمدتاً پلی‌اتیلن باشد)، چراکه جنس لوله‌های متفاوت احتمالاً جواب‌های مختلفی با تغییر در فشار می‌دهند.

- حداقل داده‌های تعمیرات ماهیانه قابل‌اعتماد قبل از اجرای مدیریت فشار بهصورت جداگانه برای خطوط اصلی و انشعابات به مدت ۳ تا ۴ سال به‌منظور محاسبه تواتر شکستگی متوسط قبل از مدیریت فشار.

عموماً ترک‌های حلقه‌ای[۱۵] که در خطوط اصلی با قطر پائین و جنس چدن و آزبست سیمان اغلب در زمان رانش یا حرکت خاک تجربه می‌شوند، نشان‌دهنده افزایش نوسانات فصلی و طبیعی شکستگی‌ها بوده و عمدتاً مستقل از فشارند. از طرفی برای دیگر جنس‌ها و انواع ترک‌ها در لوله نظیر ترک‌های طولی[۱۶]، فشار ماکزیمم و ضخامت مؤثر دیواره لوله به‌عنوان پارامترهای کلیدی در شکستگی تشخیص داده شده‌اند. اما در

عمل کاهش قابل‌توجهی در تواتر شکستگی‌ها معمولاً بعد از مدیریت فشار در تمامی سیستم‌ها با شاخص تواتر شکستگی نسبتاً بالا و نوسانات فصلی زیاد، صرف‌نظر از جنس لوله‌ها رخ می‌دهد. در تفسیر این رویداد Thornton and Lambert (2012) بیان داشتند که در مدل مفهومی STBTCB می‌توان این گونه فرض کرد که فشار بالا معمولاً نقش یک فاکتور کمک‌کننده به شکست به‌جای یک فاکتور اصلی را دارد.

با استفاده از معیارهای انتخابی که در بالا ذکر شد، Thornton and Lambert (2012) پیشنهاد دادند که برای مناطق مدیریت فشار با لوله‌هایی از جنس یکسان و تعداد شکستگی بالا، می‌توان شکستگی‌ها را در مقابل مقادیر فشار ماکزیمم در نقطه میانگین ناحیه (AZP_{max}) برای هر ناحیه مجزا قبل و بعد از اجرای مدیریت فشار ترسیم نمود. به‌عنوان‌مثال شکل ۵-الف مقادیر فوق را برای انشعابات پلی‌اتیلن در هفت ناحیه در یک

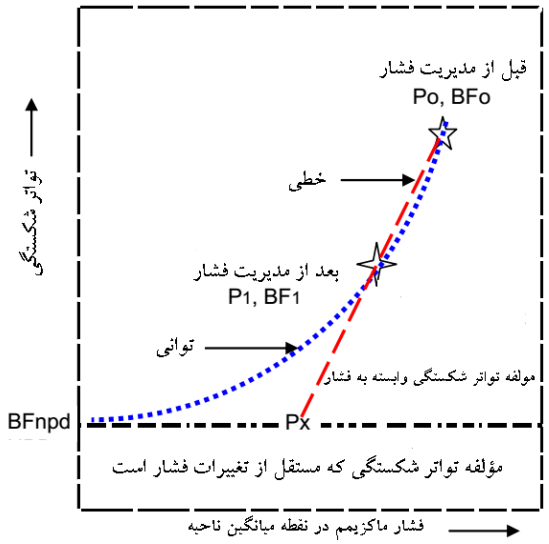


شکل ۵-الف- تأثیر مدیریت فشار بر تواتر شکستگی در انشعابات پلی‌اتیلن در تعدادی از مناطق مدیریت فشار یک شبکه آبرسانی در استرالیا (Thornton and Lambert, 2013).

شرکت آبرسانی در استرالیا را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵-الف مشخص است که تغییر ناگهانی در نرخ شکست لوله‌ها با تغییر فشار آن‌چنان‌که که در شکل ۳ ارائه‌شده رخ نمی‌دهد. بنابراین Thornton and Lambert (2012) با در نظر گرفتن نتایج مطالعه Thornton and Lambert (2011) و مدل مفهومی STBTCB و پس از آزمایش معادلات مختلف برازش منحنی با مجموعه‌های مختلفی از داده‌ها باکیفیت از ۲۲ ناحیه مدیریت فشار (PMZs) در انگلستان و همچنین ۱۱۰ مجموعه داده بین‌المللی، یک فرم پیشنهادی از رابطه کلی فشار - شکستگی (شکل ۵-ب) را به صورت رابطه (۳) ارائه دادند:

$$\text{Burst Frequency (BF)} = BF_{npd} + BF_{pd} = BF_{npd} + A \times AZP_{\max}^{N_2} \quad (۳)$$

که BF: تواتر شکستگی لوله‌ها بر حسب تعداد شکستگی در ۱۰۰ کیلومتر در سال برای خطوط اصلی یا تعداد شکستگی در هر ۱۰۰۰ انشعاب در سال برای خطوط انشعابات، BF_{npd}: مؤلفه مستقل از فشار تواتر شکستگی لوله‌ها و BF_{pd}: مؤلفه وابسته به فشار بوده که تابعی از فشار ماکزیمم در نقطه میانگین ناحیه (AZP_{max}) به توان N_2 است که مقدار N_2 با توجه به داده‌های



شکل ۵-ب- رابطه کلی بین تواتر شکستگی و ماکزیمم فشار در نقطه میانگین ناحیه (Thornton and Lambert, 2012).

میدانی جمع‌آوری‌شده نزدیک به ۳ است (یک رابطه درجه سه) و درنهایت A: ضریبی است که بر شیب بخش وابسته به فشار رابطه تأثیر می‌گذارد. همچنین می‌توان شیب منحنی شکل ۵-ب (S) یا همان فاکتور تواتر شکستگی (BFF) در هر بخش از منحنی را از رابطه (۴) به دست آورد. از طرفی رابطه بین درصد کاهش در تواتر شکستگی‌ها و AZP_{max} از رابطه (۵) قابل

حصول است (Thornton and Lambert, 2013):

$$S = (1 - BF_{npd} / BF_0) \times (1 - (P_1 / P_0)^{N_2}) / (1 - P_1 / P_0) \quad (۴)$$

$$\% \text{ Reduction in BF} = (1 - BF_{npd} / BF_0) \times (1 - (P_1 / P_0)^3) \quad (۵)$$

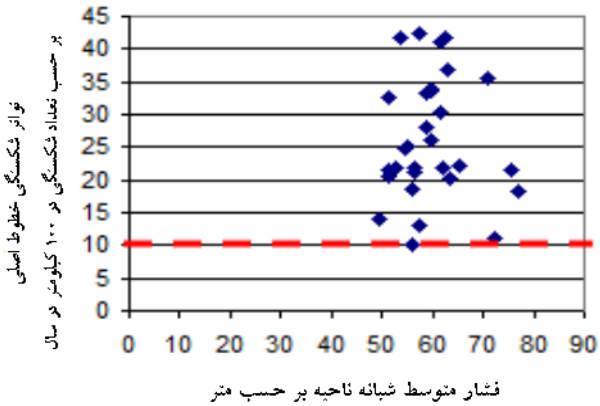
که S: شیب منحنی رابطه فشار- شکستگی، BF_0: تواتر شکستگی اولیه، قبل از اجرای مدیریت فشار و P_0 و P_1: مقادیر فشار حداکثر در نقطه متوسط ناحیه قبل و بعد از اجرای مدیریت فشار هستند. برای استفاده از آخرین رابطه فشار- شکستگی ۲۰۱۲ (رابطه ۳)، باید بتوان تخمینی از BF_{npd} داشت. این تخمین می‌تواند دو تا سه سال بعد از اعمال مدیریت فشار کنترل‌شده و اصلاح شود. Thornton and Lambert (2013) یک روش ساده برای تخمین BF_{npd} توسعه داده و آزمایش کردند که شامل موارد زیر است:

۱- گردآوردی داده‌های مربوط به تعمیر خطوط اصلی از مناطقی با بیش از ۱۰ تعمیر خط اصلی در سال، به‌منظور کمینه کردن نویز داده‌ها از مناطقی با تعمیرات کمتر (در صورت نیاز می‌توان داده‌ها از مناطق کوچک تر را جمع‌آوری کرد).

۲- ترسیم داده‌های مربوط به تواتر شکستگی‌ها در مقابل فشار متوسط شبانه ناحیه برای هر ناحیه.

۳- تخمین مرز پائین برای داده‌های ترسیم شده، که می‌تواند به‌عنوان تخمین اولیه BF_{npd} برای خطوط اصلی به کار رود.

۴- تکرار روند فوق برای داده‌های مربوط به انشعابات.

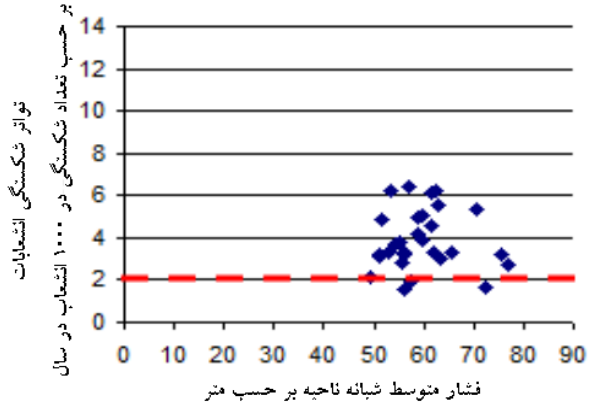


شکل ۶-الف- تخمین BFnpd اولیه برای خطوط اصلی (Thornton and Lambert, 2013).

مقادیر BF_{npd} برای مناطق مختلف متغیر بوده و متفاوت است. برای مثال این مقادیر برای شکل ۶-الف و ۶-ب که برای یک شبکه آبرسانی با شرایط زیربنایی خوب در یک کشور پیشرفته است، در حدود مقادیر تواتر شکستگی در فرمول UARL بوده و مقادیر آن برابر ۱۰ شکستگی خطوط اصلی در ۱۰۰ کیلومتر در سال و ۲ شکستگی انشعابات در هر ۱۰۰۰ انشعاب در سال است (Thornton and Lambert, 2013).

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری، نتایج مطالعات گروه کاری هدررفت آب انجمن بین‌المللی آب (IWA) در خصوص روابط فشار - شکستگی و آخرین پیشرفت‌ها در این حوزه مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعات به‌طورکلی نشان داد که رابطه فشار- شکستگی را نمی‌توان مانند رابطه فشار- نشت یا فشار - مصرف تنها با استفاده از یک مؤلفه توانی مدل سازی کرد. مطالعات بعدی به‌منظور توسعه یک رویکرد مفهومی در مورد رابطه فشار - شکستگی منجر به معرفی مدل مفهومی STBTCB و رابطه پایه فشار- شکستگی ۲۰۰۶ شد. پس از آن مطالعات بیشتر و بررسی تأثیر نوسانات فصلی و طبیعی بر نرخ شکستگی لوله‌ها نشان داد که می‌توان تواتر شکستگی لوله‌ها را به دو بخش کلی شامل بخش وابسته به فشار و بخش مستقل از فشار طبقه‌بندی کرد. با توجه به این رویکرد Thornton and Lambert (2012, 2013) یک فرم کلی معادله برای نشان دادن رابطه فشار - شکستگی ارائه دادند که در آن



شکل ۶-ب- تخمین BFnpd اولیه برای انشعابات (Thornton and Lambert, 2013)

وقوع شکستگی‌های جدید با استفاده از یک مؤلفه توانی فشار ماکزیمم در نقطه میانگین ناحیه و یک مؤلفه غیر وابسته به فشار قابل پیش‌بینی بود. صحت‌سنجی این رابطه با استفاده از داده‌های شبکه‌های آب رسانی در نقاط مختلف جهان نشان داد که رابطه مذکور به‌خوبی قابلیت مدلسازی رابطه فشار- شکستگی را برای شبکه‌های آبرسانی دارد. لیکن مطالعات و تحقیقات بیشتر در خصوص رابطه فشار - شکستگی و در نظر گرفتن دیگر پارامترها و مؤلفه‌های مؤثر بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

۴- پی نوشت ها

1- Demand Management
2- Asset Management
3- IWA-Water Loss Task Force (IWA-WLTF)
4- District Metered Area (DMA)
5- Failure Envelope
6- Duty Points
7- Burst Frequency Factor (BFF)
8- Average Zone Point
9- The Straw That Breaks The Camel's Back (STBTCB)
10- Burst Frequency Index
11- Unavoidable Annual Real Losses (UARL)
12- Pressure Management Zone (PMZ)
13- Statistical Noises
14- Pressure Transient
15- Ring Cracks
16- Longitudinal Split

۵- مراجع

Farley, M., and Trow, S., (2003), *Losses in water distribution networks – A Practitioner's guide to assessment, monitoring and control*, International Water Association Publishing, London.

Lambert, A., and Morrison, J.A.E., (1996), "Recent developments in application of bursts and background estimates concepts for leakage management", *Water and Environment Journal*, 10(2), 100-104.

Lambert, A., (2001), "What do we know about pressure: leakage relationships", *International Water Association Conference*, Brno, Czech Republic.

Lambert, A., (2009), "Ten years experience in using the UARL formula to calculate Infrastructure Leakage Index", *Proceedings of International Water Association Conference 'Water Loss 2009'*, Cap Town, South Africa.

Lambert, A., and Fantozzi, M., (2010), "Recent developments in pressure management", *International Water Association Conference 'Water Loss 2010'*, Sao Paolo, Brazil.

Lambert, A., and Thornton, J., (2011), "The relationships between pressure and bursts – A state-of-the-art update", *Water 21 Journal*, 37-38.

Lambert, A., and Thornton, J., (2012), "Pressure - burst relashanships: Influence of pipe materials, Validation of scheme results and implications of extended asset life", *Proceedings of International Water Association Conference 'Water Loss 2012'*, Manila, Philippines.

Lambert, A., Fantozzi, M., and Thornton, J., (2013), "Practical approches to modeling leakage and pressure management in distribution systems-progress since 2005", *12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, Prugia,Italy.

May, J., (1994), "Pressure dependent leakage", *World Water and Environmental Engineering*, 17(8), 10.

Pearson, D., Fantozzi, M., Soares, D., and Waldron, T., (2005), "Searching for N_2: How does pressure reduction reduce burst frequency?", *Proceedings of International Water Association Special Conference 'Leakage 2005'*, Halifax, Canada.

Thornton, J., and Lambert, A., (2005), "Progress in practical prediction of pressure-leakage, pressure-burst frequency and pressure-consumption Relationships", *Proceedings of International Water Association Special Conference 'Leakage 2005'*, Halifax, Canada.

Thornton, J., and Lambert, A., (2006), "Managing Pressure to reduce new breaks", *Water 21 Journal*, 21(8), 24-26.

Thornton, J., and Lambert, A., (2007), "Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs", *Proceedings of International Water Association Conference 'Water Loss 2007'*, Bucharest, Romania.

UK Water Industry Research, (2003), *Leakage index curve and the longer-term effects of pressure management*, Report Ref. No. 03/WM/08/29.

Water Services Association of Australia, (2011), *Framework for targeting leakage and pressure management, report for water services association of Australia*, By Wide Bay Water Corporation and Water Loss Research & Analysis Ltd, May 2011, as part of WSAA Asset Management Project PPS-3', Review of Leakage Reporting and Management Practices, Stage 3.