



فصلنامه علوم محیطی، دوره شانزدهم، شماره ۰۱، بهار ۱۳۹۷

۱۴۰-۱۲۷

یک روش داده‌محور برای تعیین رابطه فشار و شکستگی در شبکه‌های توزیع آب شهری

یاسمن تاج‌آبادی^۱، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده^{۱*} و ایمان مصلحی^۲

^۱ گروه آب و فاضلاب و مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۷

تاج‌آبادی، ی.، م. جلیلی قاضی‌زاده و ا. مصلحی. ۱۳۹۷. یک روش داده‌محور برای تعیین رابطه فشار و شکستگی در شبکه‌های توزیع آب شهری. فصلنامه علوم محیطی. ۱۶ (۱): ۱۲۷-۱۴۰.

سابقه و هدف: یکی از چالش‌های شرکت‌های آب و فاضلاب در سرتاسر جهان، هدررفت آب از شبکه‌های آبرسانی به‌صورت شکستگی و نشت است که هزینه‌های بالای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را بر این شرکت‌ها تحمیل می‌کنند. هر سال بخش زیادی از بودجه شرکت‌های آب و فاضلاب در بخش تعمیر و بازسازی لوله‌های شبکه ناشی از شکستگی‌ها هزینه می‌شود. از این رو آگاهی از میزان تواتر شکستگی‌ها به برآورد میزان نشت شبکه و انتخاب استراتژی‌های مناسب برای مدیریت نشت کمک شایانی خواهد کرد. عوامل مختلفی بر شکستگی لوله‌های شبکه آبرسانی تأثیر می‌گذارد که یکی از مهمترین این عوامل، فشار آب است. بنابراین توسعه مدل‌هایی که از عهده پیش‌بینی دقیق تواتر شکستگی لوله‌ها بر حسب عوامل تأثیرگذار برآیند، برای مدیریت بهینه نشت در شبکه‌های آبرسانی ضروری خواهد بود.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق با استفاده از یک مدل توسعه داده شده و تحلیل داده‌های میدانی فشار و شکستگی در شبکه توزیع آب شهری در ناحیه‌ای از شهر تهران، رابطه فشار و شکستگی برای این ناحیه تعیین شد. ناحیه مورد بررسی دارای ۵۱۶ کیلومتر خط لوله اصلی از جنس‌های پلی‌اتیلن، چدن داکتیل، فولادی، پی‌وی‌سی و آزیست‌سیمان است که دو جنس پلی‌اتیلن و چدن داکتیل با توجه به کاربرد تقریباً ۹۳ درصدی‌شان در طول شبکه، برای بررسی انتخاب شدند. پس از جمع‌آوری و پایش آمار و اطلاعات مربوط به حوادث و فشارهای ثبت‌شده طی سالیان ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵، محاسبه نقطه میانگین ناحیه و محاسبه شاخص‌های فشار در این نقطه و انتساب آن به کل ناحیه رابطه فشار-شکستگی برای هر جنس لوله به صورت مجزا استخراج شد. مدل پیش‌بینی حادثه از دو بخش مستقل از فشار و وابسته به فشار تشکیل شده که در آن فشار از طریق یک مؤلفه توانی به تواتر شکستگی‌ها مرتبط شده است. در این پژوهش از فشار حداکثر روزانه در نقطه میانگین ناحیه، به‌عنوان شاخص فشار در رابطه فشار-شکستگی استفاده شد.

*Corresponding Author. E-mail Address: m_jalily@sbu.ac.ir

نتایج و بحث: روابط فشار-شکستگی برای هر یک از دو جنس پلی‌اتیلن و چدن داکتیل به تفکیک ارائه شد که بر حسب شاخص فشار حداکثر روزانه است. در روابط به‌دست‌آمده برای مقایسه، از دو شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه و حداکثر فشار حداکثر روزانه استفاده شد و نتایج نشان داد که در بخش وابسته به فشار، شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه نتایج دقیق‌تری در مقایسه با شاخص حداکثر فشار حداکثر روزانه ارائه داده و دارای ضریب همبستگی بالاتری است. علت نامناسب بودن شاخص حداکثر فشار حداکثر روزانه می‌تواند به علت ایجاد نوسانات شدید فشاری به طور موقت و زودگذر در یک یا چند روز از سال باشد. به‌طوری‌که ممکن است واقعاً باعث رخداد حادثه نشده ولی در محاسبات دخیل شده است؛ بنابراین، این شاخص، پیش‌بینی صحیحی از حوادث ندارد. همچنین روابط برای دو حالتی که توان ترم فشار برابر با ۳ و حالتی که مجهول است به دست آمد که حاکی از آن است که در حالت توان مجهول ضرایب همبستگی بزرگتری حاصل می‌شود به‌طوری‌که برای پلی‌اتیلن توان برابر با ۳ و $0/97 =$ ضریب همبستگی و برای چدن داکتیل توان برابر با $2/7$ و $0/99 =$ ضریب همبستگی به دست آمد.

نتیجه‌گیری: با توجه به روابط به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که مدل فشار-شکستگی دو بخشی به خوبی توانست تعداد شکستگی لوله‌های اصلی در شبکه‌های آب‌رسانی را پیش‌بینی کند. نتایج همچنین نشان داد که تغییرات فشار بر میزان حوادث در جنس پلی‌اتیلن تاثیرگذارتر از جنس چدن داکتیل بوده و توان ترم فشار در پلی‌اتیلن بزرگتر از چدن داکتیل است و نیز شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه شاخص دقیق‌تری در پیش‌بینی حوادث است. با آگاهی از این امر می‌توان در برنامه‌های مدیریت فشار و در امور نوسازی و به‌سازی شبکه، گام‌های مهمی برداشت تا به نتایج مطلوب‌تری در راستای کاهش حوادث دست یافت. با مدیریت صحیح فشار و با توجه به جنس لوله به‌کار رفته و اینکه تا چه میزان مستعد حادثه هستند؛ می‌توان از وقوع حوادث و به تبع آن از هدررفت آب و خسارات دیگر جلوگیری کرد.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب، تواتر شکستگی، تحلیل داده‌های میدانی، مدیریت فشار.

مقدمه

روش برتر برای مدیریت فشار از نظر کارشناسان معرفی شده است (Farley and Trow, 2003). با جانمایی بهینه شیرهای فشارشکن و تنظیمات مناسب آنها، علاوه بر کاهش هزینه‌های انرژی و تأمین رضایت مشتریان، از افزایش نشت و شکستگی‌ها جلوگیری می‌شود (Covelli *et al.*, 2016). به‌طور کلی فشار شبکه با نشت، مؤلفه‌هایی از مصرف مشترکان، تعداد حوادث، رضایت مشترکان، هزینه‌های بازسازی و نوسازی و رفع خسارت‌ها ارتباط دارد و محققان بسیاری رابطه فشار با مؤلفه‌های فوق را بررسی کرده‌اند (Lambert and Fantozzi, 2010; Gomes *et al.*, 2011; Martinez-Codina *et al.*, 2015). از این رو اهمیت مدیریت فشار چندجانبه بوده و بررسی آن و دست یافتن به برنامه‌ای که تا حد امکان به کاهش مضرات ناشی از عدم مدیریت صحیح بپردازد، مورد توجه است. در تحقیق پیش رو رابطه فشار و شکستگی، بررسی و تعیین می‌شود. زیرا شکستگی موضوعاتی چون نوسازی و بازسازی شبکه، هزینه‌های صرف‌شده برای تعمیرات و

امروزه هدررفت آب در شبکه‌های آب شهری در اقصی نقاط جهان مسئله‌ای جدی و حائز اهمیت است. شرکت‌های آب‌رسانی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با این مشکل در ارتباط هستند، همواره دنبال راه‌حل‌ها و راهکارهایی برای کاهش هدررفت ماده بارزش آب هستند. استراتژی‌های اصلی برای کاهش هدررفت آب در شبکه‌های آب‌رسانی شامل چهار استراتژی مدیریت فشار، مدیریت فعال نشت، بهبود سرعت و کیفیت تعمیرات و مدیریت دارایی نظیر بازسازی و نوسازی شبکه است (Tabesh and Karimi, 2006). عموماً کارآمدترین و کم‌هزینه‌ترین استراتژی در مدیریت هدررفت آب در شبکه آب‌رسانی که منجر به کاهش تلفات واقعی آب می‌شود، مدیریت فشار یا کاهش فشار اضافی در شبکه است که معمولاً از طریق نصب مخازن و یا شیرآلات انجام می‌شود (Tabesh and Vaseti, 2006). در صورت استفاده از شیرهای فشارشکن، پارامتر کنترلی میزان فشار خروجی است. استفاده از شیرهای فشارشکن به‌عنوان

انشعابات است. در بخشی از این تحقیق که در استرالیا انجام شد، نتایج نشان داد که با نصب شیرهای کنترل فشار از سال ۲۰۰۳ کاهش ۷۱ درصدی شکستگی در خطوط اصلی و کاهش ۷۵ درصدی در انشعابات اتفاق می‌افتد. (Thornton and Lambert (2007) داده‌های ۱۱۲ سامانه آب‌رسانی مربوط به ۱۰ کشور که توسط تیم مدیریت فشار گروه هدررفت آب انجمن بین‌المللی آب جمع‌آوری شده بود، را بررسی کردند و نتایج نشان داد که فشار قبل از مدیریت فشار بین ۲۳ تا ۱۹۹ متر و متوسط آن ۷۱ متر بوده است، به طوری که درصد کاهش فشار در بازه ۱۰٪ تا ۷۵٪ متغیر و دارای مقدار متوسط ۳۸٪ است و درصد کاهش شکستگی بین ۲۳٪ تا ۹۴٪ تغییر می‌کند و مقدار متوسط آن ۵۲/۵٪ است. تفاوت محسوسی بین درصد کاهش شکستگی در خطوط اصلی و انشعابات وجود ندارد. تفسیر ساده از نتایج فوق مطابق رابطه ۲ است.

$$\% \Delta BF = BFF \times \% \Delta P_{\max} \quad (2)$$

که ΔBF تغییرات تواتر شکستگی، BFF فاکتور تواتر شکست و ΔP_{\max} تغییرات فشار حداکثر شامل حداکثر فشار استاتیک در نقطه میانگین ناحیه^۲ به علاوه نوسانات فشار است (Lambert and Thornton, 2011). سپس مدل مفهومی STBTCB^۲ برای تفهیم این مساله که چرا با درصد یکسان کاهش فشار حداکثر، گاهی درصد کاهش تواتر شکستگی قابل ملاحظه است و گاهی ناچیز و قابل چشم‌پوشی، ارائه شد. مدل مفهومی این‌طور بیان می‌کند که با گذشت زمان عوامل مخربی همچون سن که دربرگیرنده خوردگی است به تدریج آستانه فشار منتج به شکست لوله‌ها را کاهش می‌دهد. زمانی که اثرات عوامل محلی چون بار ترافیک، رانش زمین و کاهش دما (که از شبکه‌ای به شبکه دیگر متغیر است) با حداکثر فشار اعمالی در لوله‌ها تجمیع شود، تواتر شکست شروع به افزایش می‌کند و این حالت در سامانه‌های با فشار ناپایدار یا تحت فشار در مقایسه با شبکه ثقلی زودتر اتفاق می‌افتد. در صورت وجود فشار اضافه (بسیار بیشتر از حداقل

میزان نارضایتی مشترکان در پی نابسامانی‌های دوران تعمیرات را به دنبال دارد. بنابراین تعیین رابطه فشار-شکستگی و بررسی تأثیر مدیریت فشار بر تواتر شکستگی‌ها در برنامه‌ریزی و اولویت‌های شرکت‌های آب‌رسانی در مدیریت نشت شبکه، مهم و تأثیرگذار است و با آگاهی از نحوه تغییرات حوادث و ارتباط آن با فشار می‌توان تبعات نامبرده فوق را به حداقل رساند.

عمده تحقیقات درباره تعیین روابط فشار-شکستگی توسط گروه کاری هدررفت آب انجمن بین‌المللی آب^۱ انجام شد که آن را می‌توان به سه گروه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ تقسیم‌بندی کرد (Moslehi and Jalili Ghazizade, 2017). Lambert (2001) با بررسی داده‌های شبکه آب‌رسانی انگلستان، نیوزیلند، استرالیا و برزیل به ارتباط فشار و نشت و حوادث پرداخت و نتیجه گرفت کاهش فشار اضافه، منجر به کاهش حوادث و نشت می‌شود. Farley and Trow (2003) به این نتیجه رسیدند که تغییرات شکست با تغییرات فشار مطابق رابطه ۱ با توان N_2 در ارتباط است.

$$\frac{BF_1}{BF_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N_2} \quad (1)$$

در این رابطه BF تواتر شکستگی و P فشار و اندیس‌های ۱ و ۰ به ترتیب مربوط به زمان بعد و قبل از مدیریت فشار هستند (Farley and Trow, 2003; Lambert, 2001). در تحقیق انجام شده توسط Thornton and Lambert (2005) که داده‌های فشار و شکستگی انگلستان، استرالیا و ایتالیا جمع‌آوری شده بود توان N_2 در بازه ۰/۵ تا ۶/۵ متغیر بود که بیانگر تأثیرات قابل توجه بر کاهش حوادث جدید و هزینه تعمیرات سالیانه است.

در بررسی‌هایی که توسط Pearson et al. (2005) در انگلستان، برزیل، ایتالیا و استرالیا انجام شد نتیجه‌گیری شد که توان N_2 در خطوط اصلی بین ۰/۲ تا ۸/۵ و در انشعابات بین ۰/۲ تا ۱۲ متغیر است و دارای مقادیر متوسط ۲/۴۷ برای خطوط اصلی و ۲/۳۶ برای

تفکیک جنس در جدول شماره ۱ گزارش شده است. با توجه به نتایج جدول ۱، حدود ۹۳ درصد طول شبکه به دو جنس چدن داکتیل و پلی‌اتیلن تعلق دارد. بنابراین بررسی حوادث در لوله‌های با این جنس ضروری است. این پژوهش روی لوله‌های اصلی با قطرهای بزرگتر از ۶۰ میلی‌متر که آمار حوادث خطوط اصلی از ازدیاد وقوع حوادث در مورد این دو جنس خبر می‌دهد، انجام شد. به دو دلیل ذکر شده، جنس‌های چدن داکتیل و پلی‌اتیلن برای بررسی انتخاب شدند و روابط فشار-شکستگی برای هر کدام از این جنس‌ها ارائه شده است. ثبت فشار شیرهای فشارشکن که دارای مقادیر ورودی و خروجی و تنظیمی هستند، توسط لاگرها در بازه زمانی ۱۵ دقیقه انجام شد.

جدول ۱- تقسیم‌بندی لوله‌ها به تفکیک جنس و درصد کارگذاری

Table 1. Pipe classification based on material and percentage of installation

درصد هر جنس Percentage of material (%)	طول (کیلومتر) Length (km)	جنس Material
75.96	391.9	چدن داکتیل Ductile Iron
17.1	88.22	پلی‌اتیلن Polyethylene
1.5	7.69	فولاد Steel
1.2	6.21	پی‌وی‌سی PVC
1.08	5.6	آزبست سیمان Asbestos Cement
3.16	16.32	جنس مشخص نشده Undefined material
100	515.95	کل طول لوله‌ها Total lengths of pipe

مواد و روش‌ها

روش تحقیق بر اساس تحلیل داده‌های میدانی فشار و شکستگی و مدل پیش‌بینی دو بخشی فشار است. در بررسی‌های انجام شده برای یافتن معادله شکستگی-فشار، داده‌های شکست و فشار قبل و بعد از اعمال مدیریت فشار در مناطق تحت مدیریت فشار مجزایی که دارای یک جنس

استاندارد مورد نیاز برای جلب رضایت مشترکین) در نقاط بحرانی، کاهش دائمی فشار با استفاده از مدیریت فشار (شیر فشارشکن، تقسیم ناحیه به قسمت‌های کوچکتر و...) باعث می‌شود تغییرات فشار کنونی بسیار کمتر از بازه تغییرات فشار پیشین شود (Thornton and Lambert, 2007).

در بررسی‌های انجام شده توسط Lambert and Thornton (2012) و Lambert et al. (2013) برای یافتن رابطه فشار با شکستگی معادله‌ای ارائه داده شد که حاوی دو ترم بود؛ یک ترم مربوط به قسمتی از شکستگی که مستقل از فشار است و ترم دوم مربوط به بخشی از حوادث که تابعی از فشار است.

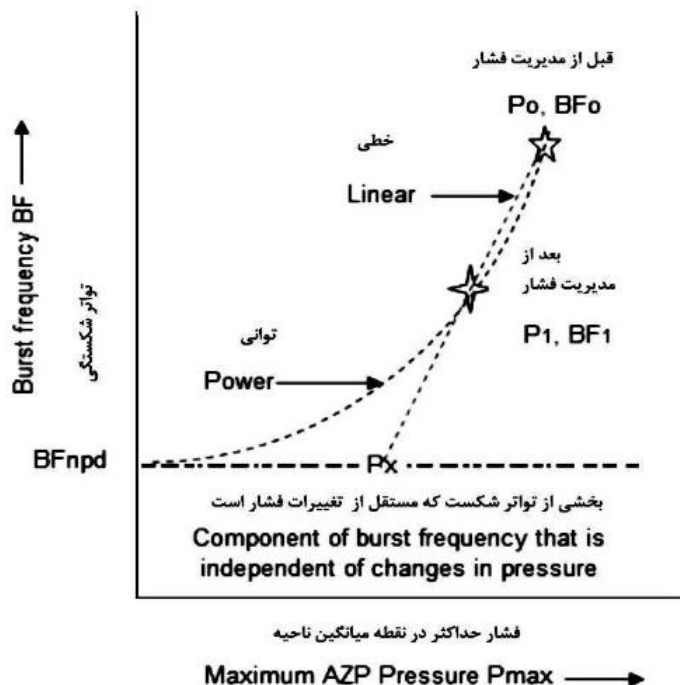
به دلیل اهمیت فشار و اثرات آن بر میزان حوادث و شکستگی‌ها و به تبع آن تلفات آب و هزینه‌های صرف شده برای تعمیرات، این تحقیق به تعیین ارتباط بین فشار و شکستگی در ناحیه‌ای از شبکه آب‌رسانی شهر تهران برای جنس‌های پلی‌اتیلن و چدن داکتیل با استفاده از معادله دو جزئی فشار-شکستگی می‌پردازد. با استفاده از نتایج این مطالعه می‌توان به محدوده‌ای از فشار که منجر به حوادث کمتری می‌شود پی برد و در راستای اعمال محدوده فشار مناسب با استفاده از مدیریت فشار گام برداشت. همچنین می‌توان با شناسایی جنس لوله‌ای که در فشار یکسان دارای شکست بیشتری است، در راستای استفاده هرچه کمتر از آن جنس اقدام کرد تا در سال‌های آتی کاهش حوادث مشهود باشد.

معرفی منطقه مورد بررسی

ناحیه مورد بررسی در یکی از مناطق شرکت آب و فاضلاب شهر تهران قرار داشته و دارای اختلاف ارتفاع ۵۶۰ متر و ۵۱۶ کیلومتر خط لوله و شبکه ثقلی و دارای شیر فشارشکن است. در این ناحیه لوله‌هایی از جنس‌های پلی‌اتیلن، چدن داکتیل، آزبست سیمان، پی‌وی‌سی و فولاد وجود دارد که درصد تشکیل‌دهنده هر یک به

شرایط اولیه (قبل مدیریت فشار) به شرایط ثانویه (بعد از مدیریت فشار) به دو صورت خطی یا توانی می‌تواند برازش داده شود. در شکل ۱ این دو حالت نمایش داده شده است.

لوله بودند و تواتر شکست بالایی داشتند، جمع‌آوری شد. ترسیم داده‌های مربوطه به صورت منحنی‌هایی ظاهر شد که چگونگی تغییرات ناشی از مدیریت فشار، انتقال از



شکل ۱- حالات گوناگون ارتباط فشار-شکستگی (Lambert and Thornton, 2012)

Fig. 1- Several options for pressure-burst relationships

سال بعد از شروع مدیریت فشار اصلاح و تعیین کرد؛ زیرا با گذشت زمان از شروع مدیریت فشار اگر روند حوادث کاهش‌ی باشد حداقل آنها به‌عنوان BF_{npd} در نظر گرفته می‌شود. مقادیر BF_{npd} برای تأسیسات زیربنایی با شرایط خوب در کشوری با درآمد بالا، با مقدار تواتر شکست فرمول نشت اجتناب‌ناپذیر (UARL) در فشار ۵۰ متر (۱۳ عدد در ۱۰۰ کیلومتر در سال برای خطوط اصلی و ۳ عدد در ۱۰۰۰ انشعاب در سال برای انشعابات) برابر (یا حتی اندکی کمتر) است. روش ساده‌ای برای تخمین سریع BF_{npd} ارائه شد، که شامل گام‌های زیر است (Lambert et al., 2013):

جمع‌آوری داده‌های مربوط به تعمیرات خطوط اصلی (جز تعمیر شیرها و شیرهای آتش‌نشانی) از مناطقی با بیش از ۱۰ تعمیر در سال

بعد از آزمایش‌های بسیار درباره برازش منحنی مناسب به داده‌های فوق و داده‌های با کیفیت ۲۲ منطقه مدیریت فشار شده و همچنین ۱۱۰ مجموعه داده‌های بین‌المللی، فرم پیشنهادی کلی تغییرات تواتر شکست بعد از مدیریت فشار به صورت معادله ۳ ارائه شد (Lambert et al., 2013; Lambert and Thornton, 2012):

$$(3)$$

$$BF = BF_{npd} + BF_{pd} = BF_{npd} + A \times AZP_{max}^{N_2}$$

BF_{npd} بخشی از شکستگی که مستقل از فشار بوده، BF_{pd} بخشی از شکست که وابسته به فشار و A ضریب رابطه است. مقدار BF_{npd} برای شبکه‌ها و لوله با جنس‌های مختلف متفاوت است.

برای استفاده از رابطه پیش‌بینی شکستگی (رابطه ۳) باید BF_{npd} را تخمین زد. این مقدار را می‌توان تا سه

افزودن اختلاف تراز قرارگیری (۷/۸۷ متر) مقدار نهایی فشار در نقطه میانگین ناحیه به دست آمد.

جمع‌آوری داده‌های فشار و شکستگی

برای ترسیم منحنی فشار-شکستگی داده‌های قبل و بعد از مدیریت فشار لازم است. بنابراین به ترتیب سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ به‌عنوان زمان قبل از مدیریت فشار و سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ به‌عنوان زمان بعد از مدیریت فشار در نظر گرفته شد. مشخصه‌های لازم برای هر سال میزان تواتر شکستگی و فشار حداکثر در نقطه میانگین ناحیه است. ابتدا تواتر شکستگی برای جنس‌های چدن داکتیل و پلی‌اتیلن که بخش بیشتری از شبکه را شامل می‌شدند، به دست آمد. بدین صورت که تعداد شکستگی در هر سال بر ۱۰۰ کیلومتر طول لوله تقسیم شد، تا نرخ شکست به دست آید. برای محاسبه فشار پس از آنکه شیر فشارشکن شماره ۳۵ به‌عنوان نقطه میانگین ناحیه در نظر گرفته شد، با استفاده از اعداد فشار که در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه ثبت شده بود شاخص‌های فشار متوسط ساعتی، متوسط روزانه و حداکثر روزانه محاسبه شد. به منظور به دست آوردن شاخص فشار مورد نیاز در رابطه (۳) از حداکثر فشارهای حداکثر روزانه و همچنین از متوسط فشارهای حداکثر روزانه در طول یک سال استفاده شد که در اینجا به ترتیب به‌عنوان روش اول و روش دوم نامگذاری می‌شود.

نتایج تواتر شکستگی و فشار حداکثر در نقطه‌ی میانگین ناحیه حاصل از دو روش نامبرده در بالا، برای دو جنس پلی‌اتیلن و چدن داکتیل مربوط به سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ در جداول شماره ۲ و ۳ نشان داده شده است.

نتایج جدول ۲ و ۳ نشان می‌دهد که جنس پلی‌اتیلن دارای تواتر شکستگی بیشتری نسبت به چدن داکتیل است.

ترسیم داده‌های تواتر شکستگی در مقابل فشار متوسط شبانه منطقه^۵ مربوط به هر ناحیه تخمین حد پایینی نقاط رسم شده که می‌توان به‌عنوان تخمین اولیه از BF_{npd} برای خطوط اصلی در نظر گرفت.

تکرار مراحل ۱ تا ۳ برای انشعابات

برای محاسبه مؤلفه وابسته به فشار تواتر شکستگی‌ها، باید فشار حداکثر در نقطه میانگین ناحیه (AZP_{max}) تعیین شود. تعیین نقطه میانگین ناحیه برای محاسبه شاخص فشار مورد نیاز در این نقطه و انتساب آن به کل ناحیه ضروری است. محاسبات نقطه میانگین ناحیه (AZP) برای ناحیه مورد بررسی انجام شده که جزئیات آن در مرجع *Tajabadi et al. (2017)* آمده است. پس از تعیین ارتفاع نقطه میانگین با توجه به اختلاف ارتفاع زیاد و توپوگرافی ناهمگون ناحیه مورد بررسی، از فشارهای ثبت‌شده مربوط به شیرهای فشارشکن که در تراز ارتفاعی گوناگون قرار دارند، استفاده شد. بنابراین برای دستیابی به شاخص فشاری، که معرف فشار ناحیه باشد باید از داده‌های فشار نزدیک‌ترین شیر فشارشکن به تراز ارتفاعی نقطه میانگین ناحیه (AZP) استفاده شود و سپس با لحاظ کردن اختلاف ارتفاع قرارگیری شیر مذکور با تراز نقطه میانگین ناحیه به مقادیر صحیح فشار دست یافت.

شیر فشارشکن انتخاب‌شده به‌عنوان نقطه میانگین ناحیه با تراز ارتفاعی ۱/۱۵۵۳ متر است. ولی با توجه به اینکه با تراز نقطه میانگین ناحیه که ۲۳/۱۵۴۵ متر محاسبه شده، ۷/۸۷ متر اختلاف دارد، این اختلاف ارتفاع در داده‌های ثبت‌شده از شیرفشارشکن انتخابی اعمال شد (*Tajabadi et al., 2017*). فشارهای ثبت‌شده توسط لاگرها بر حسب بار بوده، با محاسبه شاخص فشار حداکثر حاصل از داده‌های شیر منتخب و تبدیل آن به واحد متر آب و

جدول ۲- داده‌های شکست و فشار برای جنس پلی‌اتیلن

Table 2. Pressure and burst frequency data for polyethylene

فشار حداکثر در نقطه میانگین ناحیه (متر) Maximum pressure at average zone point (m)		تواتر شکست (تعداد/ ۱۰۰ کیلومتر در سال) Burst frequency (N/100km.year)	طول لوله (کیلومتر) Length of pipes (km)	تعداد شکست Number of break (N)	سال Year
روش دوم Second method	روش اول First method				
69.53	98.31	128.08	88.22	113	1386
69.26	77.91	112.21	88.22	99	1387
41.13	46.59	37.4	88.22	33	1394
41.47	44.47	51.01	88.22	45	1395

جدول ۳- داده‌های شکست و فشار برای جنس چدن داکتیل

Table 3. Pressure and burst frequency data for ductile iron

فشار حداکثر در نقطه میانگین ناحیه (متر) Maximum pressure at average zone point (m)		تواتر شکست (تعداد/ ۱۰۰ کیلومتر در سال) Burst frequency (N/100km.year)	طول لوله (کیلومتر) Length of pipes (km)	تعداد شکست Number of break (N)	سال Year
روش دوم Second method	روش اول First method				
69.53	98.31	9.95	391.9	39	1386
69.26	77.91	9.44	391.9	37	1387
41.13	46.59	3.57	391.9	14	1394
41.47	44.47	3.06	391.9	12	1395

نتایج و بحث

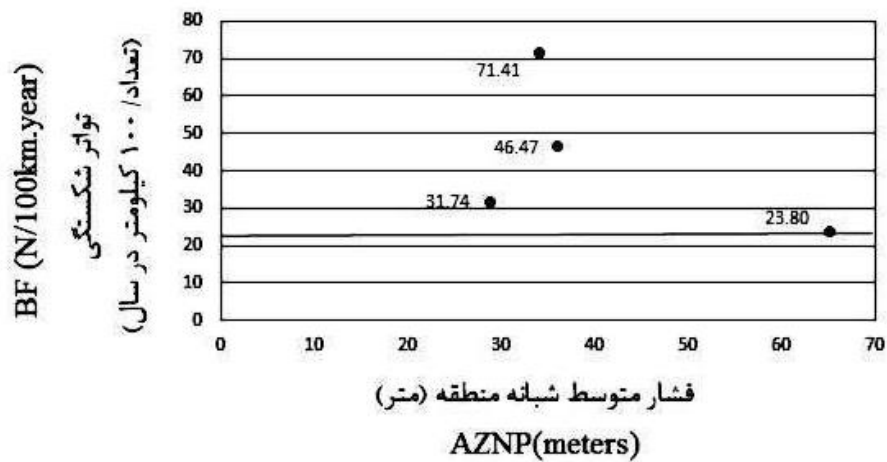
نتایج مربوط به BF_{npd} بر حسب تعداد شکستگی در ۱۰۰ کیلومتر در سال، برای پلی‌اتیلن تقریباً $23/8$ و برای چدن داکتیل $1/28$ به دست آمد که به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.

بعد از محاسبه BF_{npd} ، نتایج نمودارهای برازش داده شده به هر یک از دو جنس لوله تحت فشار برابر با ۳ و توان مجهول، حاصل از دو شاخص فشار (روش اول و روش دوم) در زیر ارائه شده است. نمودارهای ۴ و ۵ برای هر یک از دو جنس و دو شاخص فشار با توان N_2 برابر ۳، مطابق با فرم معادله پیشنهادی Lambert and Thornton (2012) به منظور آگاهی یافتن از میزان تطابق داده‌های مورد بررسی با نتایج تحقیقات وی ترسیم شده است و نتایج آن در جدول شماره ۴ گزارش شده است. در مقابل نمودارهای ۶ و ۷ با توان N_2 مجهول برای جنس‌های پلی‌اتیلن و چدن داکتیل ترسیم شده که نتایج منحنی‌های برازش داده شده در جدول ۵ آورده شده است. در روابط ارائه شده فشار بر حسب بار است.

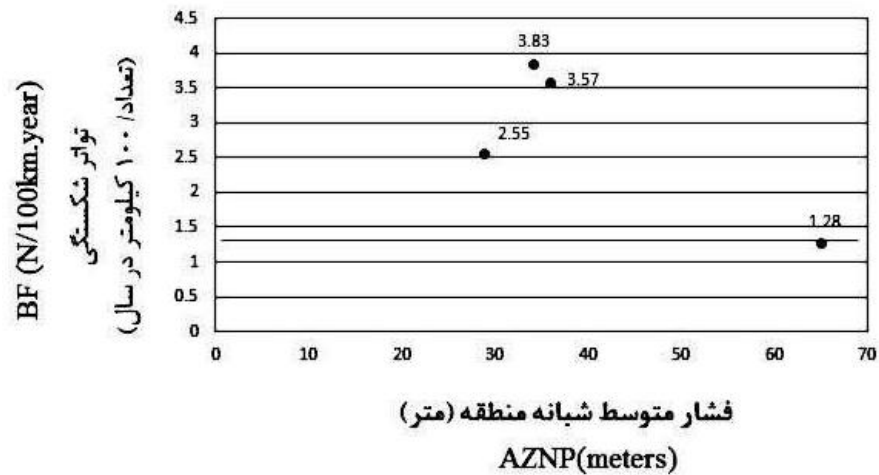
تعیین رابطه فشار-شکستگی

برای محاسبه تواتر شکستگی مستقل از فشار (BF_{npd}) تواتر شکستگی چهار سال گذشته برای هر یک از جنس‌های پلی‌اتیلن و چدن داکتیل به دست آمد و فشار متوسط شبانه ناحیه (AZNP) که عبارت است از متوسط حداکثر روزانه بین ساعات ۲ تا ۵ بامداد محاسبه و حداقل تواتر عنوان BF_{npd} لحاظ شد.

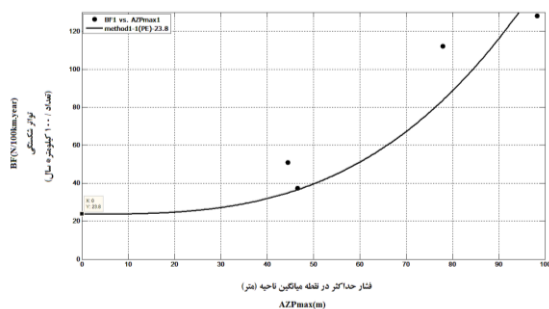
برای به دست آوردن رابطه فشار-شکستگی برای دو جنس لوله تحت بررسی، از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. بدین منظور از چهار نقطه با تواتر شکستگی‌ها و فشارهای محاسبه شده برای سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ استفاده شد. مقدار تواتر شکستگی مستقل از فشار به صورت یک مجانب افقی لحاظ شد و منحنی‌ها برازش داده شدند. برای هر یک از دو روش مذکور به دست آوردن فشار، نمودارها به صورت مجزا ترسیم شد. همچنین برای هر یک از جنس‌ها در دو حالت N_2 معلوم و N_2 مجهول، منحنی‌ها برازش داده شدند.



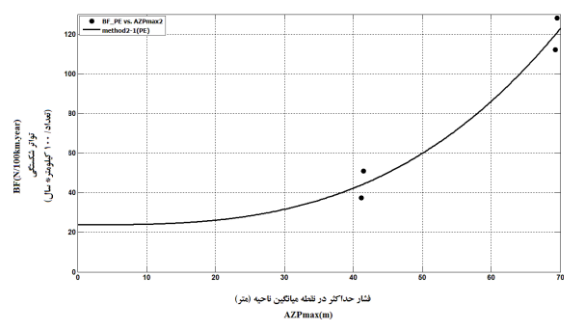
شکل ۲- تخمین BF_{npd} برای پلی اتیلن
Fig. 2- BF_{npd} estimation for Polyethylene



شکل ۳- تخمین BF_{npd} برای چدن داکتیل
Fig. 3- BF_{npd} estimation for ductile iron

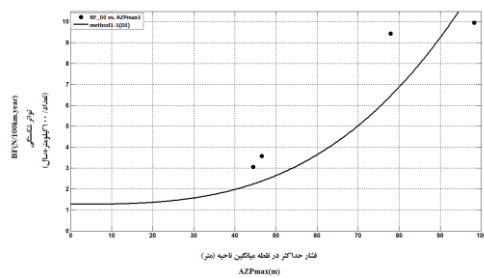


شکل ۱-۴
Fig 4-1

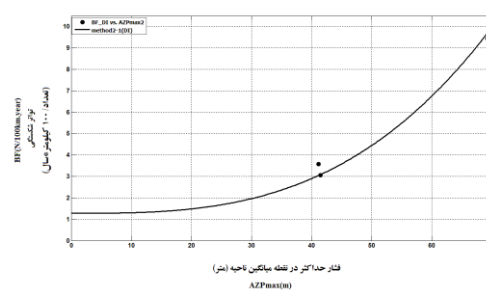


شکل ۲-۴
Fig 4-2

شکل ۴- منحنی فشار-شکستگی پلی اتیلن با توان $N_2=3$
(شکل ۴-۱: داده‌های فشار روش اول و شکل ۴-۲: داده‌های فشار روش دوم)
Fig. 4- Pressure-Burst curves of polyethylene for $N_2=3$
(Fig. 4-1-Pressure data from first method, Fig4-2- Pressure data from second method)



شکل ۱-۵
Fig 5-1



شکل ۲-۵
Fig 5-2

شکل ۵- منحنی فشار-شکستگی چدن داکتیل با توان $N_2=3$
(شکل ۱-۵: داده‌های فشار روش اول و شکل ۲-۵: داده‌های فشار روش دوم)

Fig. 5- Pressure-Burst curves of ductile iron for $N_2=3$
(Fig 5-1-Pressure data from first method, Fig 5-2- Pressure data from second method)

جدول ۴- نتایج منحنی برازش داده‌شده برای پلی‌اتیلن و چدن داکتیل با توان N_2 معلوم

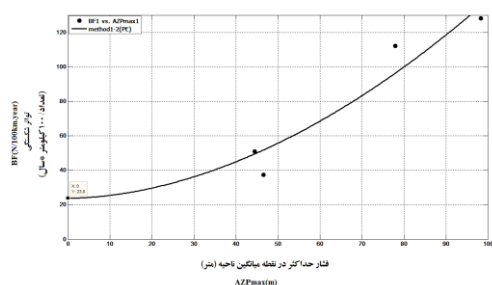
Table 4. Result of fitted curves for polyethylene and ductile iron with $N_2=3$

توان $N_2=3$ Exponent $N_2=3$				
ضریب همبستگی (R^2) The correlation coefficient (R^2)	ضریب "a" "a" Coefficient	رابطه تواتر شکستگی-فشار Pressure - burst frequency relationship	روش استخراج فشار Pressure calculation method	جنس material
0.7778	0.134	$BF= 23.8+a \times (AZP_{max})^3$	روش اول First method	پلی‌اتیلن
0.9675	0.305	$BF= 23.8+a \times (AZP_{max})^3$	روش دوم Second method	Polyethylene
0.6585	0.011	$BF= 1.28+a \times (AZP_{max})^3$	روش اول First method	چدن داکتیل
0.9909	0.027	$BF= 1.28+a \times (AZP_{max})^3$	روش دوم Second method	Ductile iron

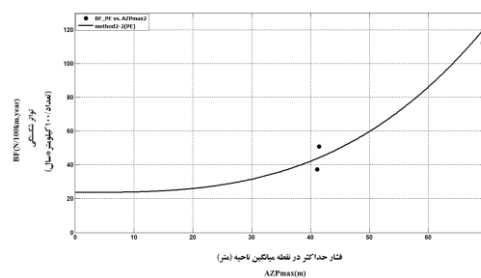
می‌تواند ایجاد نوسانات شدید فشاری به‌طور موقت و زودگذر در یک یا چند روز از سال باشد به‌طوری‌که ممکن است واقعاً باعث رخداد حادثه نشده ولی در محاسبات دخیل شده باشد؛ بنابراین این شاخص، پیش‌بینی صحیحی از حوادث ندارد.

در ادامه رابطه تواتر شکستگی-فشار برای حالتی که توان N_2 مجهول باشد به دست آورده شد تا مدلی که ارائه‌دهنده بهترین پیش‌بینی باشد، به دست آید. منحنی‌های برازش داده‌شده مربوط به دو جنس لوله در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است و نتایج به‌دست‌آمده برای N_2 و ضریب a و نیز ضریب همبستگی در جدول ۵ آورده شده است.

نمودارهای حاصل از شاخص حداکثر فشار حداکثر روزانه برای هر دو جنس ضریب همبستگی کوچکی دارند و برای پلی‌اتیلن و چدن داکتیل به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۶۶ هستند و بیانگر اختلاف زیاد بین مقادیر واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده است. بنابراین می‌توان گفت که مدل، پیش‌بینی خوبی از حوادث ندارد. در مقابل، منحنی‌های حاصل از شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه دارای ضریب همبستگی (R^2) مناسبی بوده و برای پلی‌اتیلن و چدن داکتیل به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۹۹ است و می‌توان نتیجه گرفت شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه شاخص بهتری برای پیش‌بینی حوادث است. علت نامناسب بودن شاخص حداکثر فشار حداکثر روزانه



شکل ۱-۶
Fig 6-1

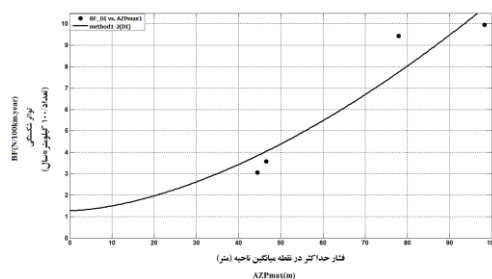


شکل ۲-۶
Fig 6-2

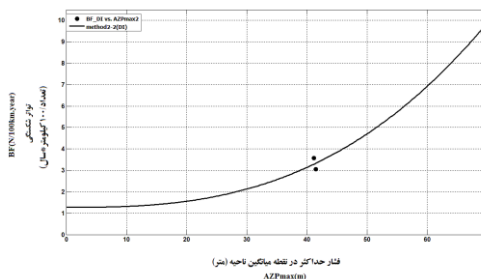
شکل ۶- منحنی فشار-شکستگی پلی اتیلن با توان N_2 مجهول

(شکل ۱-۶: داده‌های فشار روش اول و شکل ۲-۶: داده‌های فشار روش دوم)

Fig. 6- Pressure-Burst curve of polyethylene for unknown N_2
(Fig 6-1-Pressure data from first method, Fig 6-2- Pressure data from second method)



شکل ۱-۷
Fig 7-1



شکل ۲-۷
Fig 7-2

شکل ۷- منحنی فشار-شکستگی چدن داکتیل با توان N_2 مجهول

(شکل ۱-۷: داده‌های فشار روش اول و شکل ۲-۷: داده‌های فشار روش دوم)

Fig. 7- Pressure-Burst curve of ductile iron for unknown N_2
(Fig 7-1-Pressure data from first method, Fig 7-2- Pressure data from second method)

جدول ۵- نتایج منحنی برازش داده شده برای پلی اتیلن و چدن داکتیل با توان N_2 مجهول

Table 5. Result of fitted curves for polyethylene and ductile iron with unknown N_2

توان N_2 مجهول Unknown Exponent N_2						
ضریب همبستگی (R^2) The correlation coefficient (R^2)	توان N_2 Exponent N_2	ضریب "a" Coefficient "a"	رابطه تواتر شکستگی-فشار Pressure - burst frequency relationship	روش استخراج فشار Pressure calculation method	جنس Material	
0.914	1.85	1.678	$BF = 23.8 + a \times (AZP_{max})^{N_2}$	روش اول First method	پلی اتیلن Polyethylene	
0.9675	3.002	0.303	$BF = 23.8 + a \times (AZP_{max})^{N_2}$	روش دوم Second method		
0.893	1.65	0.225	$BF = 1.28 + a \times (AZP_{max})^{N_2}$	روش اول First method	چدن داکتیل Ductile iron	
0.9941	2.737	0.044	$BF = 1.28 + a \times (AZP_{max})^{N_2}$	روش دوم Second method		

حوادث در لوله‌هایی با جنس پلی‌اتیلن است. مدل‌های پیش‌بینی شکست در حالت استفاده از شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه نتایج بهتری در مقایسه با شاخص حداکثر فشار حداکثر روزانه ارائه کرد؛ علت این امر می‌تواند تأثیر نوسانات شدید فشار در یک یا چند روز از سال باشد که ممکن است زودگذر بوده و به دفعات ناچیز در سال رخ داده و تأثیر چندانی بر وقوع حوادث نداشته باشد.

همچنین با توجه به برازش منحنی به داده‌های شکستگی و فشار در لوله‌های پلی‌اتیلن و چدن داکتیل نتیجه‌گیری شد که توان N_2 به جنس لوله وابسته است و مقدار آن با شاخص متوسط فشار حداکثر برای پلی‌اتیلن ۳ اما برای چدن داکتیل ۲/۷۴ است. ضریب همبستگی منحنی‌هایی که توان N_2 مجهول است در مقایسه با حالتی که توان برابر با ۳ است، مقادیر بزرگتر و نزدیک به ۱ دارند که نشان‌دهنده پیش‌بینی صحیح‌تری از وقوع حوادث است. از نتایج این مقاله می‌توان در مدل‌های بهینه‌سازی برنامه‌ریزی نوسازی و بازسازی لوله‌ها استفاده کرد.

پی‌نوشت‌ها

¹ International water association water loss task force (IWA-WLTF)

² Average Zone Point (AZP)

³ straw that breaks the camel's back

⁴ Non Pressure Dependent Burst Frequency (BF_{npd})

⁵ Average Zone Night Pressure (AZNP)

با توجه به نتایج جدول ۵ می‌توان مشاهده کرد که روش دوم ضریب همبستگی بزرگتری نسبت به روش اول دارد و نسبت به جدول ۴ اختلاف دو روش در این حالت که توان N_2 مجهول بود، کمتر است. بنابراین می‌توان گفت که برازش منحنی با N_2 کمتر از ۳، نتایج نزدیک‌تری به مقادیر واقعی به دست می‌دهد و مدل پیش‌بینی دقیق‌تری دارد. در صورت استفاده از شاخص متوسط فشار حداکثر روزانه، توان بزرگتری حاصل می‌شود که حاکی از اثرگذاری بیشتر این شاخص بر میزان حوادث است و ضریب همبستگی (R^2) برای پلی‌اتیلن و چدن داکتیل به ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۰/۹۹ است. از طرفی می‌توان نتیجه گرفت که N_2 به جنس لوله بستگی داشته و برای جنس پلی‌اتیلن مقدار آن بزرگتر از چدن داکتیل است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مدل ارائه‌شده توسط انجمن بین‌المللی آب و بر مبنای تحلیل میدانی داده‌های فشار و شکستگی خطوط اصلی شبکه آب‌رسانی رابطه فشار-شکستگی برای دو جنس پلی‌اتیلن و چدن داکتیل تعیین شد. نخست تواتر شکستگی مستقل از فشار (BF_{npd}) در هر صد کیلومتر لوله اصلی در سال برای هر دو جنس محاسبه شد که به ترتیب برای پلی‌اتیلن ۲۳/۸ و برای چدن داکتیل ۱/۲۸ بود که نشان‌دهنده نرخ بالای

منابع

Covelli, C., Cozzolino, L., Cimorelli, L., Della Morte, R. and Pianese, D., 2016. Optimal location and setting of PRVs in WDS for leakage minimization. *Water Resources Management Journal*. 30(5), 1803-1817.

Farley, M. and Trow, S., 2003. *Losses in Water Distribution Networks, A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control*, IWA Publishing, London.

Gomes, R., Sá Marques, A. and Sousa, J., 2011. Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water Journal*. 8(2), 65-77.

Lambert, A., 2001. What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems? In *Proceedings of IWA Conference 'System approach to leakage control and water distribution systems management'*, Brno, Czech Republic.

- Lambert, A. and Fantozzi, M., 2010. Recent developments in pressure management. In Proceedings of IWA Conference 'Water Loss 2010', 6th-9th June, Sao Paolo, Brazil.
- Lambert, A., Fantozzi, M. and Thornton, J., 2013. Practical approaches to modeling leakage and pressure management in distribution systems-progress since 2005, In Proceedings of the 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, 2th-4th September, Perugia, Italy.
- Lambert, A. and Thornton, J., 2011. The relationships between pressure and bursts -a 'state-of-the-art'update, IWA Water 21 Journal .
- Lambert, A. and Thornton, J., 2012. Pressure: Bursts Relationships: Influence of Pipe Materials Validation of Scheme Results, and Implications of Extended Asset Life. In Proceedings of IWA Specialised Conference 'Water Loss 2012', 26th-29th February, Manila, Philippines.
- Martínez-Codina, Á., Castillo, M., González-Zeas, D. and Garrote, L., 2015. Pressure as a predictor of occurrence of pipe breaks in water distribution networks. Urban Water Journal. 13(7), 676-686.
- Moslehi, I. and Jalili Ghazizade, M.R., 2017. A review of pressure- failure rate relationship in water distribution system. Iran water and wastewater science engineering congress, 14th-15th February, Tehran, Iran.
- Pearson, D., Fantozzi, M., Soares, D. and Waldron, T., 2005. Searching for N2: How does pressure reduction reduce burst frequency?. In Proceedings of IWA Special Conference 'Leakage 2005', 12th-14th September Halifax, Canada.
- Tabesh, M. and Karimi, K., 2006. Determine the time of leakage detection and rehabilitation of urban water distribution networks using failure Information Analysis. Journal of the College of Engineering. 40(5), 597-610.(In Persian with English abstract).
- Tabesh, M. and Vaseti, M.M., 2006. Leakage Reduction in Water Distribution Networks By Minimizing the Excess Pressure. Journal of Iran-Water Resources Research. 2(2), 53-66. (In Persian with English abstract).
- Taj Abadi, y., Jalili Ghazizade, M.R. and Moslehi, I., 2017. Calculation of average zone point in Water Distribution Systems. In Proceedings of the 4th International Conference on Environmental Planing and Management, 23th-24th May, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract).
- Thornton, J. and Lambert, A., 2005. Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: Burst frequency and pressure: Consumption relationships. In Proceedings of IWA Special Conference 'Leakage 2005', 12th-14th September, Halifax, Canada.
- Thornton, J. and Lambert, A., 2007. Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs. In Proceedings of IWA Conference Water Loss 2007, 23th-26th September, Bucharest, Romania.





Environmental Sciences Vol.16 / No.1 / Spring 2018

127-140

A field data-based method to determine the pressure-burst relationships in urban water distribution networks

Yasaman Taj Abadi,¹ Mohamadreza Jalili Ghazizadeh* and Iman Moslehi²

¹ Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Department of Water Resources Engineering, Faculty of civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2017.07.29

Accepted: 2018.02.07

Taj Abadi, Y., Jalili Ghazizadeh, M. and Moslehi, I., 2018. A field data-based method to determine the pressure-burst relationships in urban water distribution networks. *Environmental Sciences*. 16 (1), 127-140.

Introduction: One of the challenges facing water and wastewater companies around the world is water loss from water distribution networks following burst pipes and leakage, which imposes high economic, social and environmental costs on these companies. So, every year a large part of the budget of water and wastewater companies is allocated for the repair and rehabilitation of the pipe network. Therefore, knowing the frequency of burst pipes will help in estimating network leakages and selecting appropriate management strategies for dealing with these. Various factors affect the failure of water distribution pipes, one of the most important being water pressure. Therefore, the development of models to predict failure based on effective factors precisely is necessary to achieve optimal leakage management in water distribution networks.

Materials and methods: In the present study, using a developed model and analysis of pressure and burst field data in the urban water distribution network, the relationship between pressure and burst rate has been determined for a district of Tehran. The study area has 516 km of mains pipelines that include many types of material such as polyethylene, ductile iron, steel, PVC and asbestos cement. Both polyethylene and ductile iron pipes were selected for the investigation because they comprise 93 percent of the network length. After collecting and revising the statistics and information about the bursts and pressures recorded during the years 1386 to 1395, we have calculated the average zone point and the pressure index at this point and assigned it to the whole area. Finally, the pressure-burst relationship was presented individually for each material in the pipes. The prediction model of the failure consists of two parts, namely independent and dependent parts, through which the pressure parameter is linked through a power component to the failure rates. In this study, the maximum daily pressure at the average zone point was used as a pressure index in the pressure-burst relationship.

*Corresponding Author. *E-mail Address:* m_jalily@sbu.ac.ir

Results and discussion: The pressure-burst relationship for polyethylene and ductile iron based on maximum the daily pressure index is presented separately. In the relationships obtained for comparison, both the average of maximum daily pressure and the maximum of maximum daily pressure values were used. The results of this study showed that, in the dependent pressure part, the average of the maximum daily pressure index presents a more accurate result compared with the maximum value of the maximum daily pressure index and has a higher correlation coefficient. The reason for the inappropriateness of the maximum value of the maximum daily pressure can be temporary and non-permanent overload in one or more days of the year. As it may not really have caused a failure but has been involved in the calculation, this index does not have an accurate prediction of burst. Also, the relations are obtained for two conditions with a power pressure of 3 and an unknown situation, which indicates that, in the case of unknown power, higher correlation coefficients are obtained. Thus, for polyethylene the power is equal to 3 and the correlation coefficient = 0.97, while for ductile iron, the power was equal to 2.7 and the correlation coefficient = 0.99.

Conclusion: According to the relationships obtained, it can be concluded that the pressure-burst model could predict the number of failure of main pipes in the water distribution networks well. The results also showed that pressure variations more often affect burst frequency in the polyethylene than the ductile iron pipes. The exponent of pressure in the failure prediction model also depends on the pipe material and is larger for polyethylene in comparison with ductile iron material, and the average for the maximum daily pressure index was a more accurate indicator in the failure prediction model. According to the results of this paper, we can improve pressure management and rehabilitation strategies for the reduction in burst frequency. By applying accurate pressure management and awareness of material susceptibility to burst, it is possible to reduce failure rate and, consequently, water loss.

Keywords: Burst frequency, field-data analysis, pressure management, water distribution system.