



فصلنامه علوم محیطی، دوره شانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷

۲۲۹-۲۴۸

مطالعه آزمایشگاهی نشت آب از ترک‌های طولی لوله‌های پلی‌اتیلن

سید علی صدرالساداتی و محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده *

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۰

صدرالساداتی، س.ع. و م.ر. جلیلی قاضی‌زاده. ۱۳۹۷. مطالعه آزمایشگاهی نشت آب از ترک‌های طولی لوله‌های پلی‌اتیلن. فصلنامه علوم محیطی. ۱۶(۴): ۲۲۹-۲۴۸.

سابقه و هدف: نشت در شبکه‌های آبرسانی سبب هدر رفتن آب و انرژی می‌شود. میزان نشت در شبکه‌های آبرسانی از میزان فشار حاکم بر شبکه تأثیر می‌پذیرد و تصمیم‌گیری بهینه در مورد استراتژی‌های کنترل نشت، به درک عمیق رابطه نشت-فشار نیاز دارد. در دهه‌های اخیر از لوله‌های پلی‌اتیلن چگالی بالا بصورت گسترده در شبکه‌های توزیع آب استفاده می‌شود در صورتی که رفتار نشت در این نوع لوله‌ها هنوز بطور کامل مشخص نیست. هدف از انجام این مطالعه درک بهتر رفتار نشت از ترک طولی لوله‌های پلی‌اتیلن و پارامترهای مؤثر بر رفتار الاستیک آن‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش یک مدل نیمه صنعتی آزمایشگاهی ساخته شد. براساس بررسی‌های اولیه، پارامترهای مؤثر، تعیین و با در نظر گرفتن پارامترهای قطر لوله، ضخامت لوله، ابعاد ترک و دما، بیش از ۶۵ آزمایش بر روی لوله‌های پلی‌اتیلن انجام شد. سپس نمونه‌ها توسط یک پمپ فشار قوی تحت فشار قرار داده شدند و با تنظیم فشار، میزان دبی خروجی از ترک طولی و دمای محیط اندازه‌گیری و سپس نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش تحلیل ابعادی مطالعه شد.

نتایج و بحث: در ترک‌های طولی لوله‌های پلی‌اتیلن، مقدار دبی نشت تابعی از تغییرات مساحت موضع نشت است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میزان تغییر در مساحت مؤثر موضع نشت با فشار در حالت الاستیک، رابطه کمابیش خطی دارد. همچنین نرخ تغییرپذیری مساحت مؤثر موضع نشت نسبت به فشار به پارامترهایی نظیر ابعاد ترک، قطر و ضخامت لوله و دمای محیط بستگی دارد. از میان این پارامترها تأثیر طول ترک و دمای محیط نسبت به دیگر پارامترها برجسته بوده و تأثیر بیشتری بر میزان نشت در ترک طولی دارد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه‌ای برای تخمین تغییر مساحت مؤثر موضع نشت در ترک‌های طولی لوله‌های پلی‌اتیلن پیشنهاد شد. با استفاده از این رابطه، دبی نشت در فشارهای مختلف قابل محاسبه است. در تحقیق حاضر نشت برای ترک‌های طولی لوله پلی‌اتیلن در محدوده ۰/۴۴ تا ۱/۴۴ محاسبه شده است. توان نشت تابعی از تغییرپذیری سطح مقطع موضع نشت می‌باشد، در این مقاله‌نشان داده شده است که توان نشت برای لوله‌های اعطاف پذیر مانند پلی‌اتیلن در حالت الاستیک تا ۱/۵ نیز می‌تواند افزایش یابد.

با توجه به مشخص نبودن ابعاد ترک‌ها در شبکه‌های توزیع آب، برای توان نشت، تنها یک عدد را نمی‌توان بیان کرد ولی میانگین توان نشت در آزمایش‌های صورت گرفته کمابیش معادل یک بود. همچنین در آزمایش دیگری اثر دما بر میزان نشت بطور مستقل در فشار ۵ بار بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش دما می‌تواند سبب افزایش نشت در لوله‌های پلی‌اتیلن شود. در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد موضع نشت

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

از حالت الاستیک خارج شده و نرخ تغییرپذیری آن نسبت به فشار به شدت افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: میزان میانگین توان نشت برای آزمایش‌های حاضر برابر یک به‌دست آمد که این میزان با میزان پیشنهادی توسط محققان قبلی مطابقت دارد. در مطالعه حاضر رابطه‌ای برای تخمین میزان تغییر مساحت موضع و دبی نشت برحسب جنس و شکل لوله، شکل ترک، فشار و دما پیشنهاد شد. برای اولین بار است که پارامتر دما در روابط مذکور در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تأثیر نشان داده شده دما، پیشنهاد می‌شود در منطقه‌های گرمسیری از رابطه جدید پیشنهاد شده برای تخمین میزان نشت و تحلیل مدیریت فشار استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: ترک طولی در لوله پلی‌اتیلن، رابطه نشت و فشار، دما، شبکه‌های توزیع آب.

مقدمه

به‌دلیل انشعاب‌گیری، بارهای خارجی یا نوسان دما می‌تواند اتفاق بیافتد (Farshad, 2006). کاهش مقاومت لوله ناشی از واکنش با آب کلردار، پدیده خستگی، افزایش سن لوله و... می‌تواند باشد. به دلیل رایج بودن (درصد بالا) ترک طولی در لوله‌های پلی‌اتیلنی در شبکه‌های توزیع آب (Farshad, 2006) و همچنین حساسیت بیشتر تغییرپذیری مساحت ترک آن‌ها به فشار (Cassa et al., 2010) در تحقیق حاضر این نوع ترک مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای تخمین میزان نشت عموماً از رابطه توریچلی استفاده شده است. رابطه توریچلی که از رابطه برنولی بدست آمده به صورت زیر است:

$$Q = C_d \times A \times \sqrt{2g \times H} \quad (1)$$

که در آن Q دبی نشت، C_d ضریب تخلیه، A سطح مقطع موضع نشت، g شتاب ثقل و H فشار در مرکز ثقل موضع نشت می‌باشد. بسیاری از محققان از رابطه توریچلی برای تخمین میزان نشت استفاده کرده‌اند اما در مطالعات بسیاری مشاهده شد، که میزان توان فشار در رابطه توریچلی بیش از ۰/۵ است (Lambert, 2001). این اختلاف در تحقیق‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی بیشتر مشاهده می‌شود به نحوی که در تحقیق گسترده‌ای که بر روی شبکه‌های توزیع آب کشورهای مختلف صورت گرفته است، میزان توان فشار تا ۲/۷۹ نیز تخمین زده شده است (Farley and Trow 2003). دلیل تفاوت در مشاهده‌های میدانی با میزان پیش‌بینی شده در رابطه (۱)، می‌تواند

برای دستیابی به توسعه پایدار در تأمین آب، کنترل و کاهش میزان هدر رفت در شبکه‌های توزیع آب اجباری است (Xu et al., 2014). نشت یکی از رخداد‌های معمول در شبکه‌های توزیع آب است که بطور معمول در خطوط لوله رخ می‌دهد. میزان نشت آب از شبکه‌های توزیع رنج وسیعی را از ۳ تا ۵۰ درصد آب تولیدی در بر می‌گیرد (Puust et al., 2010). سیاست‌های کنترل نشت، شامل دو استراتژی عمده مهار نشت و مدیریت فشار را می‌باشد (Tabesh et al., 2009, Ferrante et al., 2014). انتخاب و تصمیم‌گیری بهینه برای کاهش میزان نشت نیاز به درک صحیح از رفتار نشت در لوله‌ها دارد. لوله‌های پلی‌اتیلن چگالی بالا (HDPE)^۱ بطور گسترده در شبکه‌های توزیع استفاده می‌شوند. قیمت به‌نسبت پایین، اجرای سریع و راحت، سرعت تعمیر و آسانی انشعاب‌گیری از دلیل‌های عمده‌ای هستند که سبب استفاده رو به افزایش این نوع لوله‌ها شده است (Kim and Lee, 2015). از سوی دیگر، افزایش فشار در لوله‌های پلاستیکی نسبت به دیگر لوله‌ها، میزان نشت را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد (Ferrante et al., 2013, Franchini and Lanza, 2014). به همین سبب شناخت رفتار نشت در لوله‌های پلاستیکی بویژه لوله‌های پلی‌اتیلن می‌تواند سهم عمده‌ای در کاهش میزان نشت در شبکه‌های توزیع آب داشته باشد. نشت در لوله‌های پلی‌اتیلن بطور عموم به سبب کاهش مقاومت لوله و افزایش فشار از ترک‌های طولی رخ می‌دهد هرچند انواع دیگر ترک، مانند ترک‌های روزنه‌ای و محیطی نیز

al. 2010, de Miranda *et al.* 2011, Van Zyl and Lambert 2001, Ardakanian) و میدانی (Cassa 2013 and Ghazali 2003, Al-Ghamdi 2011, Schwaller and van Zyl 2014, Mazzolani *et al.* 2017 رفتار نشت هنوز بطور کامل شناخته شده نیست (Fox *et al.*, 2018). همچنین با وجود بررسی‌های گسترده در مورد نشت در لوله‌ها، تحقیق‌های محدودی در مورد لوله‌های پلاستیکی و بویژه لوله‌های پلی‌اتیلن صورت گرفته است. عمده لوله‌های پلی‌اتیلن مورد استفاده در شبکه توزیع از مواد اولیه HDPE ساخته شده‌اند که تحقیق حاضر نیز بر روی این نوع لوله‌ها صورت گرفته است.

میزان توان نشت (N) در ترک‌های روزنه‌ای با توجه به میزان بسیار کم نرخ تغییر شکل نسبت به فشار، عموماً در تحقیق‌ها ۰/۵ گزارش شده است (Hiki, 1981, Walski *et al.*, 2006, Greyvenstein and Van Zyl, 2009, Walski *et al.*, 2007). تحقیق‌هایی که بر روی نشت از روزنه برای لوله‌های UPVC و HDPE انجام شده است، میزان توان نشت را کمابیش برابر ۰/۵ گزارش داده‌اند (Greyvenstein and Van Zyl, 2007, Walski *et al.*, 2009, Coetzer *et al.*, 2008, Van Zyl and Malde, 2017). در مورد ترک‌های طولی، توان نشت محدوده گسترده‌ای را در بر می‌گیرد ($0.48 \leq N \leq 1.97$) و جنس لوله تأثیر قابل توجهی بر میزان N دارد و مقدار بیشتری در مورد لوله‌های پلاستیکی نسبت دیگر جنس لوله‌ها مشاهده شده است (Lambert, 2001, Greyvenstein and Van Zyl, 2007, Walski *et al.*, 2009, Paola and Giugni, 2012). بالاتر بودن توان نشت در ترک طولی لوله‌های HDPE نیز در تحقیق‌های (Ferrante *et al.*, 2010, Massari *et al.*, 2012, Van Zyl and Malde, 2017) گزارش گردیده است. رفتار نشت برای ترک طولی لوله پلی‌اتیلن با قطر ۱۱۰ میلیمتر و ضخامت ۵/۳ میلیمتر بصورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است (Shahangiyani and Tabesh, 2015).

اختلاف در برآورد میزان مساحت موضع نشت (A) باشد. از این رو تئوری FAVAD برای توجیه نشت در لوله‌های صلب و انعطاف پذیر مطرح شد (May, 1994). همچنین برای تخمین میزان نشت بر اثر تغییر فشار رابطه عمومی توانی زیر پیشنهاد گردید:

$$Q = C \times H^N \quad (2)$$

که در آن C ضریب نشت و N توان نشت می‌باشد. براساس رابطه مذکور هرچه لوله انعطاف‌پذیرتر باشد، مقدار توان نشت بیشتر خواهد بود (Lambert, 1997). برای تخمین میزان نشت براساس جنس لوله و تمرکز تنش، یک رابطه کلی بیان شد که براساس آن توان نشت می‌تواند بسته به شرایط از ۰/۵ تا ۲/۵ متغیر باشد (Van Zyl and Clayton, 2007). همچنین با استفاده از شبیه‌سازی عددی مشاهده شد که بین تغییر بازشدگی انواع ترک و فشار، رابطه خطی وجود دارد که براساس آن، رابطه زیر پیشنهاد شد (Cassa *et al.*, 2010).

$$Q = C_d \sqrt{2g} (A_0 H^{0.5} + m H^{1.5}) \quad (3)$$

در رابطه بالا A_0 مساحت اولیه ترک و m شیب تغییر شکل بر اثر تغییر فشار می‌باشد. در بیشتر تحقیق‌ها ضریب تخلیه بعنوان یک عدد ثابت فرض شده که وابسته به شکل ترک می‌باشد (Van Zyl and Clayton, 2007). از آنجایی که جریان خروجی نشت با توجه به فشارهای متداول در شبکه‌های آبرسانی بطور عموم حالت کاملاً آشفته دارد بنابراین می‌توان از اثر تغییر فشار و سرعت بر میزان ضریب تخلیه صرف‌نظر نمود (Schwaller and Van Zyl, 2014). میزان ضریب تخلیه بطور متوسط برای روزنه‌های دایره‌ای ۰/۸ و برای ترک‌ها ۰/۶ برآورد شده است (Romano *et al.* 1999).

با وجود تحقیق‌های گسترده انجام شده به روش‌های آزمایشگاهی (Coetzer *et al.* 2008, Brunone *et al.* 2014, Franchini and Lanza 2014, Ulanicki *et al.* 2015, De Marchis *et al.* 2016, Fox *et al.* 2016a, Fox *et al.* 2016b) و عددی (Ssozi *et al.*, iménez *et al.* 2015).

مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر شکل عمومی رابطه توریچلی برای نشت مبنای تحلیل قرار گرفت. جهت بررسی تغییر میزان نشت لازم است تاثیر تغییر مساحت موضع نشت (بر اثر تغییر فشار آب) در نظر گرفته شود. تغییر شکل موضع نشت در لوله‌های پلاستیکی تحت فشار، به عامل‌های بسیاری نظیر قطر، ضخامت و جنس لوله و شکل موضع نشت بستگی دارد (Franchini and Lanza, 2014). با تغییر مساحت موضع و سرعت نشت، میزان دبی نشت تغییر می‌کند بنابراین می‌توان نوشت:

$$A_1 = A_0 + \Delta A \quad (4)$$

در نتیجه با ترکیب روابط ۱ و ۴ خواهیم داشت:

$$Q_1 = C_d \times (A_0 + \Delta A) \sqrt{2gH_1} \quad (5)$$

که در روابط (۴ و ۵) اندیس "۰" برای حالت اولیه و اندیس "۱" برای حالت پس از اعمال فشار می‌باشد. با توجه به اینکه نوع جریان نشت در آزمایش‌های حاضر در حالت آشفته هستند، می‌توان فرض کرد که ضریب تخلیه در حالت اولیه و پس از اعمال فشار تغییر نمی‌کند (Schwaller and Van Zyl, 2014). بنابراین می‌توان مساحت مؤثر نشت (A_E) را به شکل زیر تعریف کرد.

$$A_E = C_d \times A \quad (6)$$

همچنین با در نظر گرفتن رابطه (۱) با اندازه‌گیری میزان دبی نشت و فشار می‌توان میزان مساحت مؤثر را به شکل رابطه زیر محاسبه نمود:

$$A_E = \frac{Q}{\sqrt{2gH}} \quad (7)$$

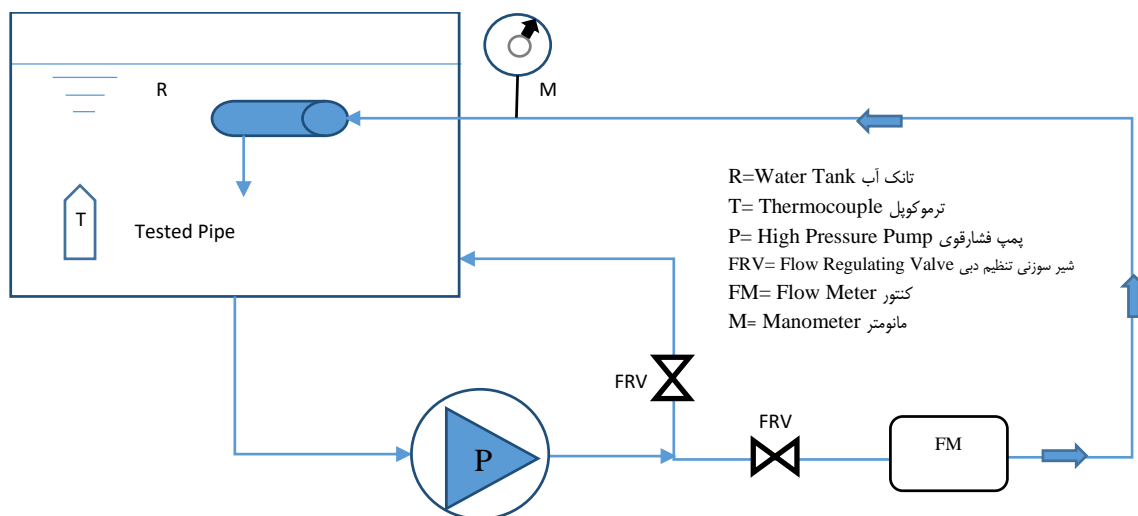
در تحقیق حاضر به دلیل امکان تغییر دمای محیط و تأثیر آن بر الاستیسیته اولیه، پارامتر دما نیز در بررسی میزان نشت در لوله‌های پلی‌اتیلن لحاظ شده است. در نتیجه میزان نشت از ترک در لوله‌های پلی‌اتیلن را با استفاده از رابطه (۱) مطابق معادله زیر می‌توان نوشت.

$$Q = \varphi(H, D, e, E, L, W, A_0) \sqrt{2gH} \quad (8)$$

در این تحقیق میزان توان نشت ۰/۶ و ضریب تخلیه ($C_d=0.47$) برآورد گردید. طول ترک در نمونه مورد بررسی ۴۲ و عرض آن ۱/۳ میلی‌متر و بیشترین فشار اعمال شده در آزمایش‌ها ۵ بار بود. بررسی رفتار ویسکوالاستیک ترک‌های طولی لوله‌های پلی‌اتیلن بصورت آزمایشگاهی روی سه نمونه لوله پلی‌اتیلن به قطر ۶۳ میلی‌متر با فشار کمابیش ثابت انجام شد (Fox et al., 2016a). همچنین محققان با شبیه‌سازی عددی نشان دادند نشت برای ترک طولی لوله پلی‌اتیلن در حالت مستغرق در فشارهای پایین کمتر از حالت جریان آزاد می‌باشد اما در فشارهای بالا این دو به یکدیگر نزدیک می‌شوند (Shahangiyan et al., 2017). دما پارامتر مؤثر دیگری است که بر روی میزان نشت لوله‌های پلی‌اتیلن تأثیرگذار است. دما بر میزان الاستیسیته لوله‌های پلی‌اتیلن اثر داشته و افزایش آن سبب تغییر در تنش تسلیم و الگوی رفتاری لوله‌های پلی‌اتیلن می‌شود (Krushelnitzky and Brachman, 2013, Sadr-Al-Sadati and Jalili Ghazizadeh, 2019). در تحقیقی که بر روی خاصیت ویسکوالاستیک لوله پلی‌اتیلن انجام شده، به امکان تأثیر تغییر دما بر روی میزان نشت اشاره شده است (Fox et al., 2016b) ولی تاکنون تحقیقی در مورد تأثیر دما بر میزان نشت گزارش نشده است. افزایش دما در لوله‌های شبکه‌های توزیع آب به سبب دمای محیط پیرامونی لوله و همچنین دمای آب جریان یافته در داخل لوله‌ها می‌تواند اتفاق بیافتد.

استفاده وسیع از لوله‌های پلی‌اتیلن و اهمیت نشت و همچنین حساسیت بالای نشت در این نوع لوله‌ها سبب شده تا شناخت رفتار نشت در برابر تغییر فشار و پارامترهای مؤثر بر آن اهمیت دوچندان یابد. در تحقیق حاضر رابطه بین نشت و فشار در ترک طولی لوله‌های پلی‌اتیلن به روش آزمایشگاهی برای ابعاد مختلف ترک طولی، اقطار و ضخامت‌های لوله در فشارهای بالا بررسی شده و برای نخستین بار تأثیر پارامتر دما در رفتار نشت

باشد. برای بررسی نشت خروجی از ترک در لوله پلی‌اتیلن، روی نمونه لوله‌ها، ترک‌های مصنوعی با ابعاد متفاوت ایجاد شد. برای ایجاد ترک مصنوعی بر روی لوله‌های پلی‌اتیلن ابتدا توسط دریل محل ترک، سوراخکاری شده و سپس توسط تیغ اره، ترک مورد نظر ایجاد شد (Fox et al., 2016a). روش‌های دیگری نیز برای ایجاد ترک مانند استفاده از دستگاه CNC و یا کاتر مورد استفاده قرار گرفت اما ترک‌های مصنوعی ایجاد شده مناسب نبود. در مدل آزمایشگاهی آب از طریق یکی از سرپوش‌ها^۲ وارد لوله شده و از ترک مصنوعی ایجاد شده از لوله‌های پلی‌اتیلن خارج می‌شد. فشار آب از طریق یک پمپ فشار قوی تأمین و با تنظیم شیرهای ورودی و کنارگذر، میزان فشار اعمال شده به لوله تنظیم می‌شد. میزان فشار توسط مانومتر نصب شده بر روی سرپوش ورودی خوانده می‌شد.



شکل ۱- طرح شماتیک مجموعه آزمایشگاهی
Fig. 1- Schematic design of the laboratory setup

کنتور الکترومغناطیس استفاده شد که میزان دقت آن $\pm 1\%$ می‌باشد. طول لوله‌های مورد آزمایش ۱۲۰ سانتی متر و ترک‌ها بصورت مصنوعی در وسط لوله ایجاد شد. پیش از شروع هر آزمایش، میزان قطر و ضخامت لوله و ابعاد ترک، با استفاده از کولیس با دقت $\pm 0.1\%$ اندازه

که در رابطه (۸)، D قطر داخلی، e ضخامت و E الاستیسیته لوله، L طول و W عرض ترک می‌باشد. با فرض ثابت بودن میزان الاستیسیته اولیه در دمای مبنا و در نظر گرفتن تغییر آن نسبت به دما، با بکارگیری تئوری پی-باکینگهام و بی بعدسازی پارامترها نسبت A_E به مساحت اولیه را به صورت کلی رابطه (۹) می‌توان نوشت:

$$\frac{A_E}{A_0} = \phi' \left(\frac{e}{W}, \frac{h}{e}, \frac{L}{e}, \frac{L}{W}, \frac{D}{e}, t \right) \quad (9)$$

در رابطه بالا t درجه حرارت بر حسب درجه سانتی گراد می‌باشد.

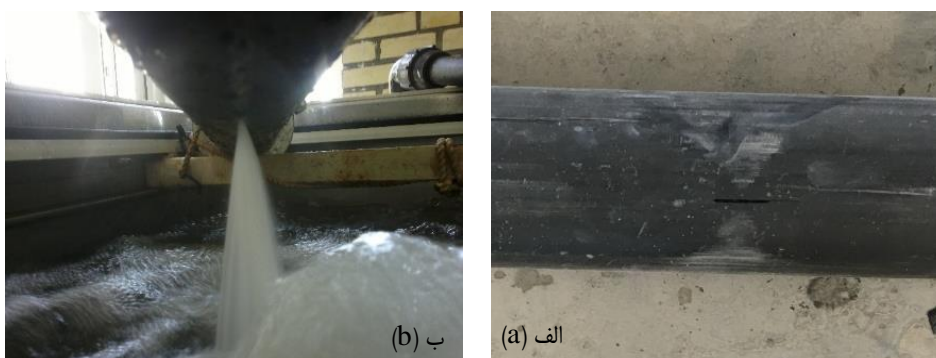
معرفی مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده و اجزاء آن در شکل شماره (۱) نشان داده شده است. لوله‌های مورد آزمایش در تانکی قرار داده شد که محیط اطراف آن می‌تواند نشت بصورت مستغرق و یا در تماس با هوا

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است آب در یک سیکل بسته در جریان است. برای تنظیم دقیق فشار از شیرهای سوزنی استفاده شده است. سرپوش‌ها در ۴ سایز مختلف ساخته شد تا امکان تست لوله‌ها با اقطار مختلف وجود داشته باشد. برای اندازه‌گیری جریان از یک

گیری و ثبت شد. همچنین ساختار تانک آب به شکلی بود که امکان تنظیم دما وجود داشت و با توجه به عایق‌های قرار داده شده در بدنه تانک، میزان انتقال حرارت به کمترین حد ممکن کاهش یافت. با استفاده از ترموکوپل تعبیه شده در بدنه جعبه، دمای آب تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد می‌توانست افزایش یابد. شکل (۲) نمونه ساخته شده برای آزمایش و جت خروجی از ترک طولی را در جریان آزاد نشان می‌دهد.

گیری شد. جهت قرارگیری جت، جریان نشت در همه آزمایش‌ها بصورت عمود بر راستای لوله و به سمت پایین بود. در آزمایش‌ها فشار به صورت تدریجی افزایش یافته و با استفاده از گیج روغنی کالیبره، فشار با دقت ± 1 متر اندازه گیری می‌شد. در هنگام انجام آزمایش‌ها مشاهده شد که به سبب کارکرد پمپ و مدت زمان زیاد هر آزمایش، دمای آب به تدریج افزایش می‌یافت. بنابراین دمای لحظه‌ای آب در تمام طول مدت آزمایش، اندازه



شکل ۲- تصویر الف) نمونه‌ای از لوله و ترک مورد آزمایش ب) جت خروجی از ترک طولی
Fig. 2- a. A sample of studied pipe and slit b. Output jet from the longitudinal slit

افزایش فشار با در نظر گرفتن ضریب تخلیه برای ترک‌های طولی معادل $0/6$ ، مساحت مؤثر نشت در هر فشار با استفاده از رابطه (۷) ترسیم شده است. نمونه‌ها تا حد رفتار الاستیک ترک‌ها تحت فشار قرار گرفته‌اند. محدوده دمایی برای آزمایش‌های جدول (۱) بین ۲۳ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

با توجه به تأثیر زمان و شرایط محیطی بر رفتار لوله پلی‌اتیلن، پس از اعمال فشار به لوله، زمان کافی به موضع نشت داده شده تا تغییر در مساحت ترک و میزان دبی و فشار آب ثابت شود. سپس مقادیر فشار و دبی خوانده می‌شد.

نتایج و بحث

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نمونه‌ها رفتار بسیار متفاوتی نسبت به فشار از خود نشان می‌دهند و نرخ تغییر آن‌ها بسیار متفاوت است. پراکندگی داده‌ها نشان می‌دهد که میزان نشت افزون بر فشار به پارامترهای دیگری نیز بستگی دارد. همچنین در آزمایش صورت گرفته در حالت جریان آزاد (L9)، میزان نشت در فشارهای پایین اندکی بیش از حالت مستغرق بوده و با افزایش فشار، میزان نشت به حالت مستغرق نزدیک می‌شود که با نتایج شبیه سازی عددی در مورد نشت از

آزمایش‌ها بر روی ترک طولی برای ۹ نمونه آزمایشگاهی در حالت جریان مستغرق و آزاد انجام شد که ویژگی‌های آن‌ها در جدول (۱) آمده است. آزمایش‌های انجام شده محدوده قطرهای رایج در شبکه‌های توزیع آب از ۶۳ تا ۲۵۰ میلیمتر با فشار کاری متفاوت ۴ تا ۲۰ بار را در بر می‌گیرد. که در این قسمت در مجموع تعداد ۵۵ آزمایش انجام شد (جدول ۱).

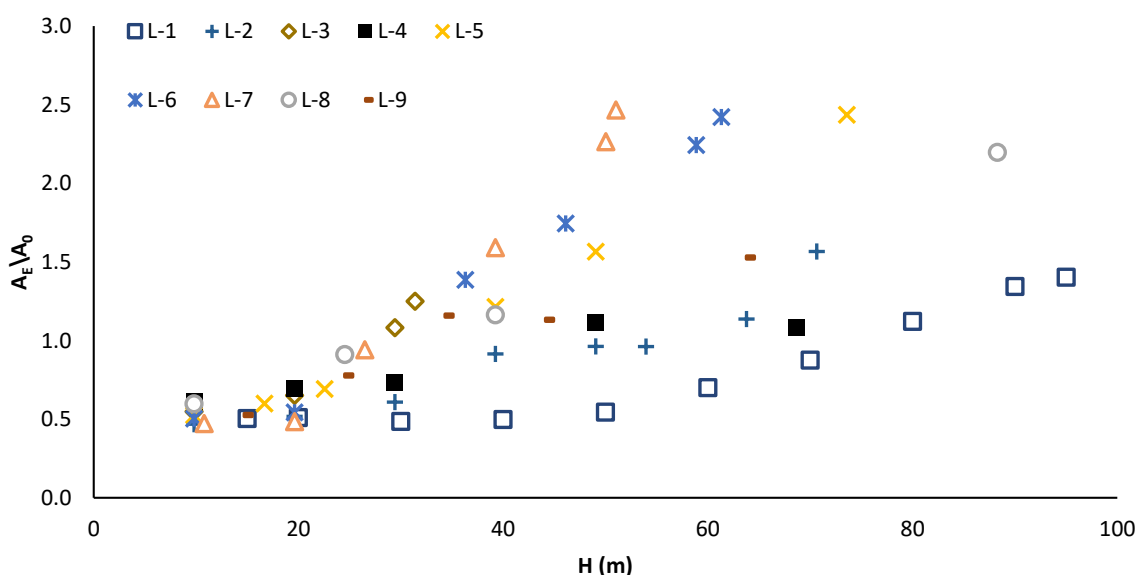
برای بررسی بهتر تغییر موضع نشت در قبال

روزنه‌های لوله‌های فولادی نیز مطابقت دارد (Shahangiyan et al., 2017). همچنین همانطور که از شکل (۳) مشخص است، با افزایش فشار، میزان نسبت مساحت مؤثر به مساحت اولیه موضع نشت به مقدار بیش از یک می‌رسد که ناشی از تغییر مساحت موضع نشت (رابطه ۶) می‌باشد.

جدول ۱- ویژگی‌های آزمایش‌های انجام شده

Table 1. Specifications of the tests

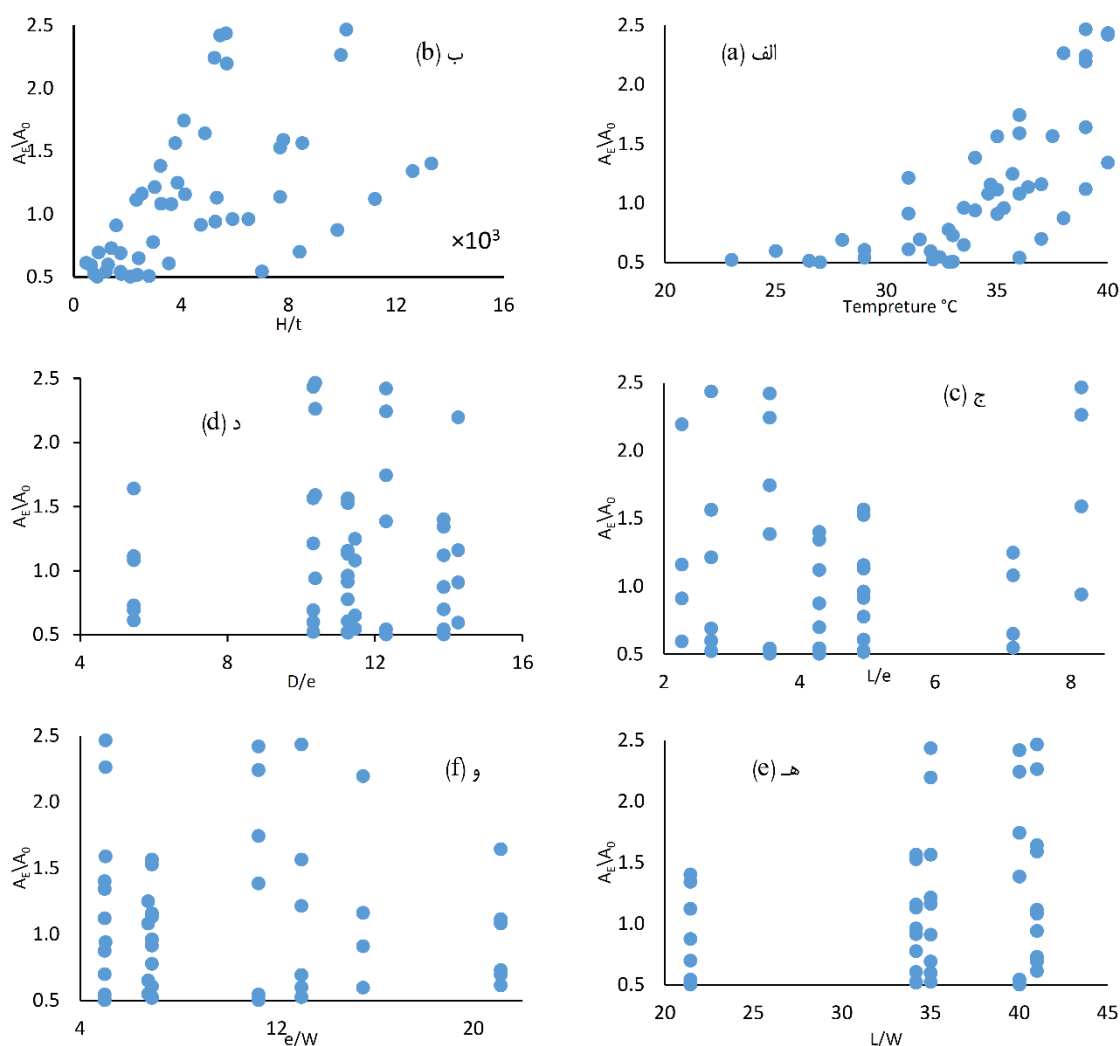
محیط پیرامونی Surroundings environment	دما (سانتی‌گراد) Temperature (°C)	عرض ترک (میلیمتر) Slit width (mm)	طول ترک (میلیمتر) Slit length (mm)	ضخامت لوله (میلیمتر) Pipe thickness (mm)	قطر نامی لوله (میلیمتر) Nominal Pipe diameter (mm)	هد فشار (متر) Pressure head (m)	تعداد آزمایش Test No.	نام نمونه‌ها Sample name
آب Water	32-40	1.4	30	7	110	15-95	10	L1
آب Water	24-38	1.2	41	8.3	110	10-72	8	L2
آب Water	24-38	1.2	41	8.3	110	10-72	4	L3
آب Water	31-39	1	41	21.1	160	10-105	6	L4
آب Water	32-36	1.2	58	8.1	160	10-32	6	L5
آب Water	27-40	1	40	11.3	160	10-63	6	L6
آب Water	31-39	1	41	21.1	63	10-105	6	L7
آب Water	32-39	1	35	15.5	250	10-90	4	L8
هوا Air	23-40	1	35	13	110	10-75	5	L9



شکل ۳- تغییر نسبت مساحت مؤثر به مساحت اولیه موضع نشت نسبت به فشار
Fig. 3 - Variation of the effective to the initial leakage area ratio versus pressure

به مساحت اولیه را به ترتیب برای پارامترهای دما، نسبت‌های فشار به ضخامت لوله، طول ترک به ضخامت لوله، قطر به ضخامت لوله، طول به عرض ترک و ضخامت به عرض ترک نشان می‌دهد.

برای بررسی تأثیر هر یک از پارامترها، ابتدا نسبت به بی‌بعدسازی آن‌ها اقدام شد و سپس تأثیر هر یک از آن‌ها بر تغییر نسبت مساحت مؤثر به مساحت اولیه ترسیم شد. شکل ۴ تغییرپذیری مساحت مؤثر موضع نشت نسبت



شکل ۴- تغییرپذیری مساحت مؤثر موضع نشت به مساحت اولیه با (الف) دما (ب) فشار به ضخامت لوله (ج) طول ترک به ضخامت لوله (د) قطر به ضخامت لوله (ه) طول به عرض ترک (و) ضخامت به عرض ترک

Fig. 4- Variation in A_E/A_0 in relation to a) different temperatures b) pressure to pipe thickness c) length of slit to pipe thickness d) diameter to thickness of pipe e) length to width of slit f) pipe thickness to slit width

ولی در دماهای بیشتر افزایش مساحت به شکل تصاعدی زیاد می‌شود. نتایج شکل (۴-ب) نشان می‌دهد با افزایش نسبت فشار به ضخامت لوله میزان مساحت مؤثر موضع نشت افزایش می‌یابد که

همانطور که در شکل (۴-الف) نشان داده شده است، تغییر مساحت با افزایش درجه حرارت محیط پیرامونی لوله بصورت صعودی بوده و تا دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، با شیب ملایمی افزایش می‌یابد

رابطه زیر برای تغییر مساحت موضع نشست (ΔA) در ترک‌های طولی لوله‌های پلی‌اتیلنی پیشنهاد می‌شود.

$$\Delta A = \left[\frac{1.28 \times 10^{-13} \times L^{2.11} \times D^{1.02} \times \left(\frac{t}{20}\right)^{3.6}}{e^{1.06} \times W^{2.08}} \times H \right] \quad (11)$$

میزان ضریب همبستگی رابطه (۱۱)، ($R^2=0.92$) و میزان متوسط خطای نسبی بین رابطه پیشنهادی (۱۱) و نتایج آزمایش‌ها برای داده‌های مطالعه حاضر معادل ۲۰ درصد می‌باشد. با جایگذاری رابطه زیر در رابطه (۳) می‌توان نوشت:

$$Q = (C_d) \times \left[A_0 + \frac{1.28 \times 10^{-13} \times L^{2.11} \times D^{1.02} \times \left(\frac{t}{20}\right)^{3.6}}{e^{1.06} \times W^{2.08}} \times H \right] \times \sqrt{2gH} \quad (12)$$

در شکل (۵) مقایسه نتایج رابطه (۱۲) با داده‌های مطالعه حاضر و همچنین محدوده $\pm 20\%$ خطا نمایش داده شده است. در این شکل نتایج آزمایشگاهی با مطالعه (Shahangiyan and Tabesh, 2015) نیز جهت مقایسه با رابطه پیشنهادی (رابطه ۱۲) بیان شده است که نشان می‌دهد رابطه پیشنهادی با داده‌های آزمایش‌های گفته شده نیز تطابق خوبی دارد.

چنانکه رابطه (۱۲) نشان می‌دهد میزان افزایش مساحت موضع نشست رابطه تصاعدی با افزایش دما دارد و این ویژگی می‌تواند به دلیل حساسیت بالای الاستیسیته لوله‌های پلی‌اتیلن نسبت به تغییر دما باشد بنابراین با توجه به تواتر این نوع ترک در لوله‌های پلی‌اتیلن استفاده از این نوع لوله‌ها در منطقه‌های بسیار گرم سبب افزایش نشست می‌تواند شود. همچنین طول ترک در مقایسه با دیگر پارامترها تأثیر قابل توجهی بر میزان نشست دارد.

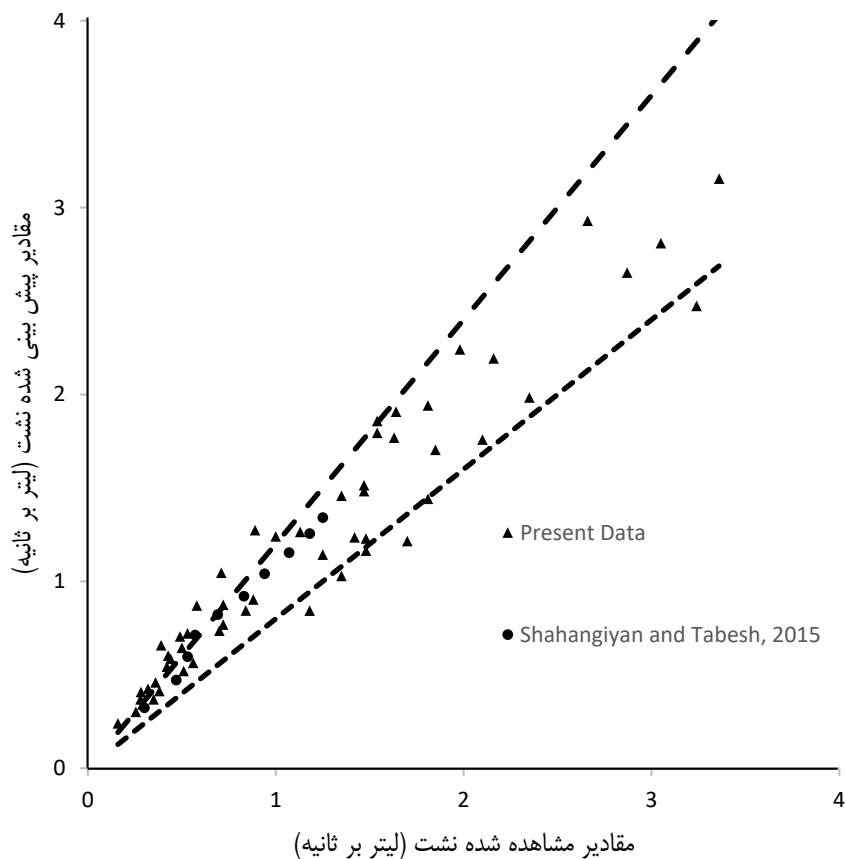
دلیل آن افزایش تنش شعاعی می‌تواند باشد. براساس نتایج شکل (۴-ج) براساس پراکندگی داده‌ها رابطه ویژه‌ای بین نسبت طول ترک به ضخامت لوله و مساحت موثر موضع نشست مشاهده نمی‌شود. نتایج شکل (۴-د) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله، میزان مساحت موثر موضع نشست افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش تنش شعاعی و در نتیجه افزایش کرنش در راستای عمود بر ترک طولی است. از شکل (۴-ه) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت طول به عرض ترک مساحت موثر موضع نشست افزایش یافته ولی با افزایش این میزان، نرخ تغییرپذیری موضع نشست، کاهش می‌یابد. با توجه به پراکندگی داده‌ها در شکل (۴-و) روند ویژه‌ای بین نسبت ضخامت لوله به عرض ترک و تغییر مساحت موثر موضع نشست مشاهده نمی‌شود.

میزان دبی نشست

با در نظر گرفتن رابطه (۵) برای تغییر شکل موضع نشست بر اثر افزایش فشار می‌توان میزان تغییر شکل را از رابطه (۳) به شکل زیر استخراج نمود:

$$\Delta A = \frac{Q}{(C_d) \times \sqrt{2gH}} - A_0 \quad (10)$$

در این تحقیق با اعمال فشار بر روی ۹ نمونه حاضر، ۵۵ آزمایش صورت گرفت (جدول ۱) و مقادیر دبی خروجی از موضع نشست و دیگر پارامترهای رابطه (۱۰) اندازه‌گیری و میزان ΔA برای هر آزمایش محاسبه شد. افزایش سطح موضع نشست می‌تواند تابع پارامترهای مختلفی از جمله فشار، جنس لوله، هندسه لوله و ترک و درجه حرارت باشد. در مطالعه حاضر پس از بررسی گسترده پارامترهای بیان شده (شکل ۴) و با استفاده از روش تحلیل ابعادی،



شکل ۵- مقایسه میزان اندازه‌گیری شده نشت و برآورد رابطه پیشنهادی (رابطه ۱۲)
 Fig. 5- Comparison between measured and estimated (eq. 12) leakage

تعیین توان نشت

برای ارزیابی تأثیر مدیریت فشار لازم است تأثیر کاهش فشار شبکه بر مقدار کاهش نشت آن شبکه برآورد شود. تحقیق‌های محققان قبلی محدوده وسیعی ($0.47 \leq N$) را برای توان نشت در شبکه‌های توزیع آب و ترک‌های طولی پیش‌بینی کرده‌اند (Lambert, 2001, Farley and Trow, 2003, Greyvenstein and Van Zyl, 2007, Walski et al., 2009). در مطالعه حاضر داده‌های آزمایشگاهی با شکل رابطه توانی بیان شده در رابطه (۲) ترسیم گردید و میزان توان نشت برای هر نمونه بصورت مستقل محاسبه شد. نتایج نشان داد که میزان توان نشت برای آزمایش‌های حاضر در محدوده ۰/۴۴ الی ۱/۴۴ بوده و میانگین توان نشت در این آزمایش‌ها تقریباً برابر یک می‌باشد. با در نظر گرفتن رابطه (۱۲)، در صورت افزایش

فشار، توان نشت به سمت ۱/۵ میل می‌کند.

با تقسیم دبی ثانویه بر حالت اولیه نشت و استفاده از رابطه (۵) می‌توان نوشت:

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{C_d \times (A_0 + \Delta A) \sqrt{2gH_1}}{C_d \times (A_0) \sqrt{2gH_0}} = \left(1 + \frac{\Delta A}{A_0}\right) \times \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{0.5} \quad (13)$$

و همچنین با استفاده از رابطه (۲) نیز می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{N1} \quad (14)$$

با مساوی قرار دادن روابط (۱۳) و (۱۴)، میزان توان نشت از رابطه زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$N = \frac{\ln\left[\left(1 + \frac{\Delta A}{A_0}\right) \times \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{0.5}\right]}{\ln\left(\frac{H_1}{H_0}\right)} \quad (15)$$

پلی اتیلن، آزمایش بر روی یک نمونه لوله انجام شد. در این آزمایش با ثابت نگه داشتن فشار به میزان ۵ بار، دمای آب اطراف لوله با استفاده از دستگاه ترموکوپل موجود تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. ویژگی‌های نمونه آزمایش شده در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل (۶) تغییر نسبت مساحت موثر موضع نشت به مساحت اولیه با درجه حرارت آب نشان داده شده است.

با توجه به اینکه با تغییر فشار میزان ΔA نیز تغییر می‌کند بنابراین مقدار N تابعی از فشار شبکه بوده و به ازای مقادیر مختلف فشار مقدار N ثابت نیست. ضمن اینکه مقدار ΔA تابعی از شرایط هندسی ترک نیز می‌باشد که در رابطه (۱۱) نشان داده شده است.

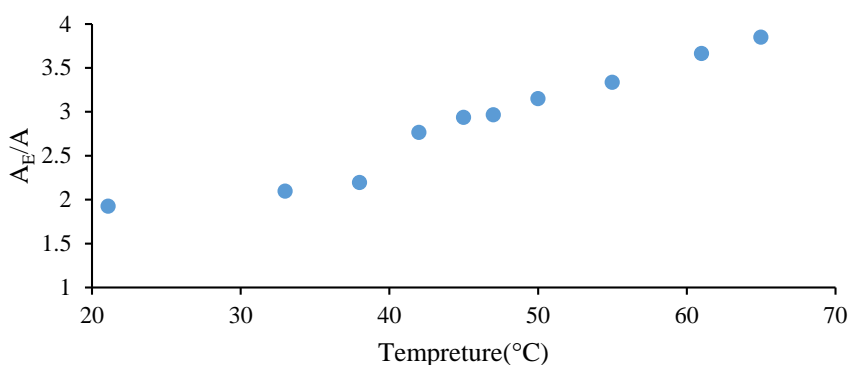
تأثیر دما بر روی میزان نشت

برای بررسی تأثیر دما بر میزان نشت در لوله‌های

جدول ۲- ویژگی‌های نمونه آزمایش شده برای بررسی تأثیر تغییر دما بر میزان نشت

Table 2. Characteristics of the test specimen used to investigate the effect of temperature on the leakage from the

محیط پیرامونی Surroundings environment	دما (سانتی‌گراد) Temperature (°C)	عرض ترک (میلیمتر) Slit width (mm)	طول ترک (میلیمتر) Slit length (mm)	ضخامت لوله (میلیمتر) Pipe thickness (mm)	قطر نامی لوله (میلیمتر) Nominal pipe diameter (mm)	فشار (متر) Pressure head (m)	تعداد آزمایش Test No.	نام نمونه Sample name
آب Water	21-65	1.2	41	8.3	110	50	10	L10



شکل ۶- تغییر مساحت موثر موضع نشت به مساحت اولیه با درجه حرارت برای ترک طولی

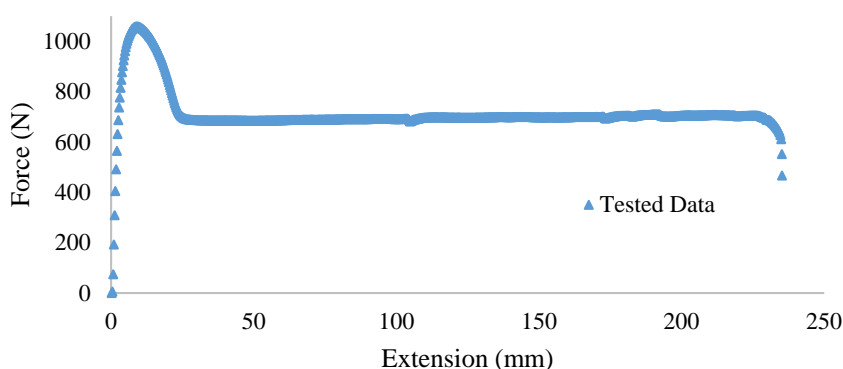
Fig. 6- Variation of A_E/A versus temperatures for the longitudinal slit

از حالت الاستیک به پلاستیک می‌تواند باشد (Sadr-Al-Sadati and Jalili Ghazizadeh, 2019). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، برای نمونه مورد نظر در حدود دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد رفتار موضع نشت از حالت الاستیک به حالت پلاستیک تغییر کرده است. همچنین شکل (۶) نشان می‌دهد که نرخ افزایش مساحت موضع نشت (و بطور متناسب نرخ افزایش نشت) در محدوده الاستیک، نسبت به محدوده پلاستیک بسیار کمتر است.

با افزایش دما به دلیل کاهش الاستیسیته (Boiko et al., 1995, Krushelnitzky and Brachman, 2013)، مساحت موضع نشت افزایش و در نتیجه مقدار نشت افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود شیب افزایش دبی نشت از نزدیکی دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به بعد متفاوت شده و بصورت تصاعدی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش ناگهانی، افزایش ناگهانی سطح مقطع ترک بوده و این موضوع به سبب تغییر رفتار موضع نشت

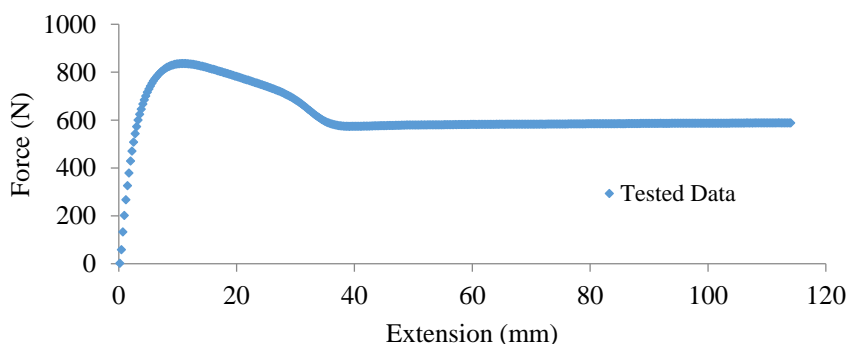
آزمایش برای هر دما ۵ نمونه جدا شد و با استفاده از قالب استاندارد، نمونه به طول ۲۰ و عرض ۱۰ سانتی‌متر بریده شد. سپس نمونه در داخل دستگاه کشش آزمایشگاه پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران قرار گرفت و با نرخ ۱۰۰ میلی‌متر در دقیقه بارگذاری و میزان نیروی وارد شده اندازه‌گیری شد. در شکل ۷ و ۸ تغییر طول نمونه بر اثر افزایش نیروی وارد شده، به ترتیب برای دمای ۲۳ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است.

با افزایش دما، تغییرپذیری‌های زیادی در پیوند بین پلیمرها و مورفولوژی مواد بکار رفته در ساختار لوله‌های پلی‌اتیلن رخ می‌دهد (Sun *et al.*, 2014). با توجه به یافته‌های محققان قبلی مبنی بر کاهش الاستیسیته لوله پلی‌اتیلن با افزایش دما (Boiko *et al.*, 1995, Krushelnitzky and Brachman, 2013) و برای تعیین مقدار دقیق الاستیسیته لوله مورد آزمایش، در تحقیق حاضر آزمایش‌های کشش استاندارد بر روی نمونه‌های لوله انجام شد. از لوله مورد



شکل ۷- آزمون کشش استاندارد برای نمونه لوله پلی‌اتیلن (دما ۲۳ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 7- The standard tensile test for polyethylene pipe sample ($t=23^{\circ}\text{C}$)



شکل ۸- آزمون کشش استاندارد برای نمونه لوله پلی‌اتیلن (دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد)

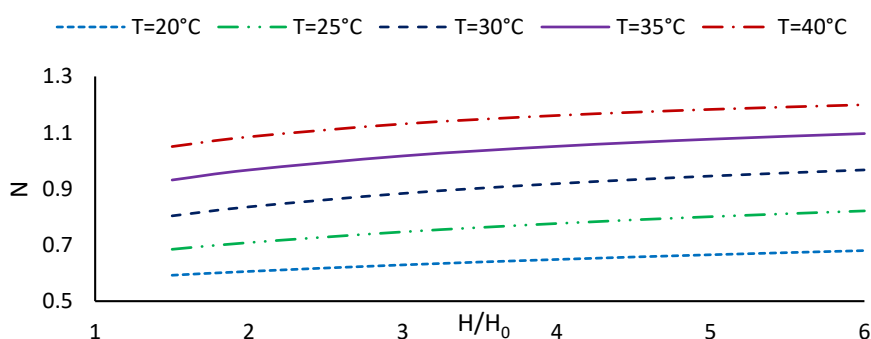
Fig. 8- The standard tensile test for polyethylene pipe sample ($t=40^{\circ}\text{C}$)

یافته است. به عبارت دیگر افزایش دما سبب کاهش مدول الاستیسیته شده است. میزان مدول الاستیسیته برای دو نمونه مورد آزمایش ۲۳ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۵۵۰ و ۳۴۰ مگاپاسکال و مقدار تنش تسلیم متناظر آن‌ها به ترتیب ۲۲ و ۱۸ مگاپاسکال محاسبه

مقایسه شکل شماره ۷ و ۸ نشان می‌دهد قبل از رسیدن شرایط نمونه به تنش تسلیم (نقطه حداکثر منحنی) که نمونه در حالت رفتار الاستیک می‌باشد با افزایش دما از ۲۳ به ۴۰ درجه سانتی‌گراد شیب شاخه الاستیک که همان مدول الاستیسیته می‌باشد کاهش

می‌توان گفت که از لوله‌های پلی‌اتیلن در منطقه‌های گرمسیری موجب افزایش نشت می‌شود. در شکل ۹ تغییر توان نشت با افزایش فشار نسبی در دماهای متفاوت برای لوله پلی‌اتیلن به قطر نامی ۱۱۰ میلی‌متر و فشار کاری ۱۰ بار براساس استاندارد (ISIRI4427, 2012) و با مساحت موضع نشت معادل ۶۰ میلی‌متر مربع (۶۰×۱) ترسیم شده است. مساحت موضع نشت از رابطه ۱۲ و توان نشت از رابطه ۱۵ استخراج شده است.

شد. افزایش دما سبب کاهش مدول الاستیسیته شده و در نتیجه در یک فشار ثابت موضع نشت به دلیل کاهش الاستیسیته تغییر شکل (بازشدگی) بیشتری را تجربه می‌کند بنابراین مقدار نشت با افزایش دما زیاد می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که افزون بر تغییر فشار در شبانه روز، تغییر دما نیز سبب تأثیر بر رفتار لوله می‌شود. اختلاف دمای محیط و آب جریان یافته در لوله پلی‌اتیلن نیز عامل دیگری در تشدید نشت می‌تواند باشد. براساس نتایج به‌دست آمده استفاده



شکل ۹- تأثیر تغییر دما بر توان نشت برای لوله پلی‌اتیلن
Fig. 9- The effect of different temperatures on leakage exponent of HDPE pipes

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار نشت از ترک طولی لوله‌های پلی‌اتیلن (HDPE) به روش آزمایشگاهی بررسی شد که نتایج زیر به‌دست آمده است:

تاریخچه فشار در میزان نشت تأثیرگذار است به نحوی که در آزمایش‌های حاضر، بعد از برداشتن فشار از روی نمونه‌های مورد مطالعه، حدود ۱۲ ساعت طول کشید تا عرض ترک به حالت اولیه بازگردد.

برای برآورد دبی نشت از ترک‌های طولی لوله پلی‌اتیلن لازم است مساحت موضع نشت نیز تعیین شود. در مطالعه حاضر برای اولین بار یک رابطه جدید برای برآورد میزان مساحت متغییر موضع نشت (ΔA) در حالت الاستیک، براساس پارامتر دما در کنار پارامترهای دیگر نظیر قطر و ضخامت لوله، عرض و طول ترک و فشار بیان

با توجه به رابطه ۱۵ و نتایج تأثیر دما بر روی میزان نشت لوله پلی‌اتیلن رابطه جامع زیر براساس فرم کلی رابطه FAVAD برای شبکه‌های با لوله‌های پلی‌اتیلن پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^{N1} \times \left(\frac{t_1}{t_0}\right)^{N2} \times \left(\frac{t_1}{20}\right)^{N3} \quad (16)$$

که در آن درجه حرارت مینا ۲۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده است. مقادیر $N1$ ، $N2$ و $N3$ را می‌توان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی یا میدانی می‌توان تعیین کرد. در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود (۵۵ آزمایش) در محدوده دمای ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر $N1$ ، $N2$ و $N3$ به ترتیب ۰/۸۷، ۱/۲۷ و ۰/۴۲ حاصل شد.

بویژه در منطقه‌های گرمسیر می‌توان استفاده کرد.

سیاسگزاری

مجموعه آزمایش‌های انجام شده تحقیق حاضر در آزمایشگاه شرکت لوله‌سازی ماناپلیمر البرز صورت گرفته است. نویسندگان این مقاله از همکاری و مساعدت این شرکت قدردانی می‌کنند.

پی‌نوشت‌ها

1 High Density Polyethylene
2 Cap

Al-Ghamdi, A.S., 2011. Leakage-pressure relationship and leakage detection in intermittent water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 60 (3), 178-183.

Ardakanian, R. and Ghazali, A.A., 2003. Pressure-leakage relation in urban water distribution systems. *Pipeline Engineering and Construction International Conference 2003*. July 13-16, 2003. Baltimore, Maryland, United States.

Boiko, Y.M., Brostow, W., Goldman, A.Y. and Ramamurthy, A., 1995. Tensile, stress relaxation and dynamic mechanical behavior of polyethylene crystallized from highly deformed melts. *Polymer*. 36 (7), 1383-1392.

Cassa, A., Van Zyl, J. and Laubscher, R., 2010. A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water Journal*. 7 (2), 109-120.

Cassa, A.M. and Van Zyl, J.E., 2013. Predicting the Leakage Exponents of Elastically Deforming Cracks in Pipe. In *Proceedings 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, 2-4 September, Perugia, Italy. P. 302-310.

شد. رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققان تطابق دارد.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که میزان نشت (N) برای تغییر شکل الاستیک لوله‌های پلی‌اتیلن با دانسیته بالا در محدوده ۰/۴۴ تا ۱/۴۴ و مقدار حدودی میانگین آن معادل ۱ می‌باشد.

رابطه دیگری برای برآورد میزان نشت در لوله‌های پلی‌اتیلن در قالب رابطه FAVAD توسعه داده شد که در آن برای اولین بار پارامتر دما نیز لحاظ شده است. از این رابطه برای تخمین میزان نشت و تاثیر مدیریت فشار

منابع

Coetzer, A., Van Zyl, J. and Clayton, C., 2006. An Experimental Investigation into the Turbulent-Flow Hydraulics of Small Circular Holes in Plastic Pipes. *Eighth Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA)*. August 27-30, Cincinnati, Ohio, United States.

De Marchis, M., Fontanazza, C.M., Freni, G., Notaro, V. and Puleo, V., 2016. Experimental evidence of leaks in elastic pipes. *Water Resources Management*. 30 (6), 2005-2019.

De Miranda, S., Molari, L., Scalet, G. and Ubertini, F., 2011. Simple beam model to estimate leakage in longitudinally cracked pressurized pipes. *Journal of Structural Engineering*. 138 (8), 1065-1074.

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

Farshad, M., 2006. *Plastic Pipe Systems*. Plastic Pipe Systems. Oxford: Elsevier Science.

Ferrante, M., Massari, C., Brunone, B. and Meniconi, S., 2010. Experimental evidence of

- hysteresis in the head-discharge relationship for a leak in a polyethylene pipe. *Journal of Hydraulic Engineering*. 137 (7), 775-780.
- Ferrante, M., Massari, C., Brunone, B. and Meniconi, S., 2013. Leak behavior in pressurized PVC pipes. *Water Science and Technology: Water Supply*. 13 (4), 987-992.
- Ferrante, M., Meniconi, S. and Brunone, B., 2014. Local and global leak laws. *Water Resources Management*. 28 (11), 3761-3782.
- Fox, S., Collins, R. and Boxall, J., 2016a. Experimental study exploring the Interaction of structural and leakage dynamics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(2).04016080-1-12
- Fox, S., Collins, R. and Boxall, J., 2016b. Physical investigation into the significance of ground conditions on dynamic leakage behavior. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 65 (2), 103-115.
- Fox, S., Boxall, J. and Collins, R., 2018. Derivation and validation of a leakage model for longitudinal slits in polyethylene pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*. 144(7). 04018034-1-11
- Franchini, M. and Lanza, L., 2014. Leakages in pipes: Generalizing torricelli's equation to deal with different elastic materials, diameters and orifice shape and dimensions. *Urban Water Journal*. 11 (8), 678-695.
- Greyvenstein, B. and Van Zyl, J., 2007. An Experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*. 56 (2), 117-124.
- Hiki, S., 1981. Relationship between leakage and pressure. *Journal of Japan Waterworks Association*. 1 (982), 5.
- Iménez, P.A.L., Rodríguez, J.M., Mares, F.J.G. and Miquel, V.S.F., 2010. 3d Computational Model of External Intrusion in a Pipe across Defected. *International Environmental Modelling And Software Society (Iemss) 2010 International Congress On Environmental Modelling And Software Modelling For Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada*.
- ISIR14427, 2012. Standard of Plastics- Piping Systems for Water Supply, and For Drainage and Sewerage under Pressure - Polyethylene (PE). Iranian National Standardization Organization. Iran.
- Kim, S. and Lee, K., 2015. Field Performance of Recycled Plastic Foundation for Pipeline. *Materials*. 8, 2673-2687.
- Krushelnitzky, R. and Brachman, R., 2013. Buried high-density polyethylene pipe deflections at elevated temperatures. *Geotextiles and Geomembranes*. 40, 69-77.
- Lambert, A., 1997. Pressure Management/Leakage Relationships: Theory, Concepts and Practical Applications. *Proceeding Of Minimizing Leakage In Water Supply/Distribution Systems, IQPC Seminar. London*.
- Lambert, A., 2001. What Do We Know About Pressure-Leakage Relationships in Distribution Systems?. *Proceedings of the IWA Specialized Conference System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management. Brno, Czech Republic. May 16-18. 89-96*
- Massari, C., Ferrante, M., Brunone, B. and Meniconi, S., 2012. Is the leak head-discharge relationship in polyethylene pipes a bijective function? *Journal of Hydraulic Research*. 50 (4), 409-417.
- Mazzolani, G., Berardi, L., Laucelli, D., Simone,

- A., Martino, R. and Giustolisi, O., 2017. Estimating leakages in water distribution networks based only on inlet flow data. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 143 (6), 04017014.
- Paola, F.D. and Giugni, M., 2012. Leakages and pressure relation: An experimental research. *Drinking Water Engineering and Science*. 5 (1), 59-65.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D.A. and Koppel, T., 2010. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*. 7 (1), 25-45.
- Romano, J., Sears, L., Tatayon, S., Todd, D., Utic, P., Vandekar, D. and Wheadon, D. *Water Audit and Leak Detection Guide Book: American Water Works Association (California-Nevada Section) and Department Of Water Resources Water Conservation Office, Water Conservation Guide Book No 5*. 1999. American Water Works Association (AWWA) Research Report. USA.
- Sadr-Al-Sadati, S.A. & Ghazizadeh, M.J., 2019. The experimental and numerical study of water leakage from high-density polyethylene pipes at elevated temperatures. *Polymer Testing*, 74, 274-280.
- Schwaller, J. and Van Zyl, J., 2014. Modeling the pressure-leakage response of water distribution systems based on individual leak behavior. *Journal of Hydraulic Engineering*. 141 (5), 04014089.
- Shahangiyan, S.A.R, Tabesh, M. and Mirabi, M.H., 2017. Numerical study of leakage of submerged steel pipes in water based on laboratory results of non-submerged pipes. *Iranian Hydraulic Journal*. 11 (4), 29-44. (In Persian with English abstract).
- Shahangiyan, S.A.R. and Tabesh, M., 2015. Laboratory Study of Pressure-Leakage Relationship in Polyethylene Pipes. 1st International Conference on New Achievements in Civil, Architectural, Environmental and Urban Management, Tehran. Jun 15. (In Persian with English abstract).
- Ssozi, E., Reddy, B. and Van Zyl, J., 2015. The behavior of leaks in plastic pipes displaying viscoelastic deformation. *World Environmental and Water Resources Congress*. Austin, TX. May 17–21. 863-870.
- Sun, N., Wenzel, M. and Adams, A., 2014. Morphology of high-density polyethylene pipes stored under hydrostatic pressure at elevated temperature. *Polymer*. 55 (16), 3792-3800.
- Tabesh, M., Yekta, A.A. and Burrows, R., 2009. An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. *Water Resources Management*. 23 (3), 477-492.
- Ulanicki, B., Kapelan, Z., Boxall, J., Latchoomun, L., King, R.T.F.A., Busawon, K., Mawooa, D. and Kaully, R.G., 2015. Computing and control for the water industry (Ccw2015) sharing the best practice in water management laboratory investigation of the leakage characteristics of unburied HDPE pipes. *Procedia Engineering*. 119, 91-100.
- Van Zyl, J. and Cassa, A., 2013. Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140 (2), 182-189.
- Van Zyl, J. and Clayton, C., 2007. The effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. May 25. 109-114. <https://doi.org/10.1680/wama.2007.160.2.109>.
- Walski, T., Bezts, W., Posluszny, E.T., Weir, M.

and Whitman, B.E., 2006. Modeling leakage reduction through pressure control. *Journal (American Water Works Association)*. 98 (4), 147-155.

Walski, T., Whitman, B., Baron, M. and Gerloff, F., 2009. Pressure vs. Flow Relationship for Pipe Leaks. *World Environmental and Water Resources Congress*. May 17-21, Kansas City, Missouri, United States.

Xu, Q., Chen, Q., Ma, J., Blanckaert, K. and Wan, Z., 2014. Water saving and energy reduction through pressure management in urban water distribution networks. *Water Resources Management*. 28 (11), 3715-3726.





Environmental Sciences Vol.16 / No.4 / Winter 2019

209-228

An experimental investigation of leakage from the longitudinal slits of polyethylene pipes

Seyed Ali Sadr-Al-Sadati and Mohammad Reza Jalili Ghazizadeh*

Department of Water and Wastewater, Faculty of Civil, Water and Environmental Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2018.03.14

Accepted: 2018.08.11

Sadr-Al-Sadati, S.A. and Jalili Ghazizadeh, M.R., 2019. An experimental investigation of leakage from the longitudinal slits of polyethylene pipes. *Environmental Sciences*. 16(4): 209-228.

Introduction: Leakage in water distribution networks (WDN) causes loss of water and energy resources. The amount of leakage in WDNs is influenced by pressure. Leakage prediction and optimal decision making on leakage control strategies require a deep understanding of the leakage-pressure relationship. High-density polyethylene pipes (HDPE) have been used extensively in water distribution networks in recent decades, and leakage behavior in this material is still debatable. The purpose of this study was to better understand the leakage behavior of the longitudinal slits of the high-density polyethylene pipes and the effective parameters in their elastic phase.

Material and methods: To achieve the objectives of this research, a semi-industrial laboratory model was developed. Based on the preliminary studies and literature review, effective parameters were extracted and then 10 samples were prepared by considering the parameters of diameter and thickness of pipes, dimensions of slits, and temperature. Then, the samples were pressurized by a high-pressure pump and by setting the pressure, the leakage discharge of the longitudinal slits and also the temperature were measured for each pressure during the test. Using the dimensional analysis method, the results were analyzed.

Results and discussion: In the longitudinal slit of HDPE pipes, the leakage flow was a function of changes in the area of the leak. Our results showed that there is a relatively linear relation between the change in the effective area of the leak position and the pressure in the elastic state. Also, the rate of changes in the area relative to pressure variations depends on the parameters such as the dimensions of slits, pipe diameter and thickness, and temperature. Among these parameters, the effect of the slits' length and the temperature had a greater effect on the amount of leakage in longitudinal slits. Using experimental results and dimensional analysis, a relationship was developed to estimate the effective area change of the leak in the longitudinal slits

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

in the HDPE pipes. Using this relationship, leakage can be calculated at different pressures. In the present study, the leakage exponent for longitudinal slits in the HDPE pipe was calculated in the range of 0.44 to 1.44 and was consistent with the proposed relationship. In the elastic state, if any of the effective parameters such as slits' length or pressure increased, the leakage power approached 1.5. Given the uncertainty about the size of the slits in the water distribution networks, an exact number cannot be proposed for the leakage power, but the average leakage power in our experiment was equal to one. In another experiment, the effect of temperature on leakage was investigated independently at a pressure of 5 bar and showed that an increase in temperature could increase the leakage in HDPE pipes. Also, at 40 °C, it exited from the elastic state, and the slope of the changes increased significantly.

Conclusion: The mean value of the leakage power for the current experiment was equal to one, which corresponds to the previously reported amount that was used to estimate the leakage rate of WDNs. According to this study, a relationship was used to estimate the variation in the area of the leak in terms of the shape and material of the pipe, the shape of the slits and the temperature relative to the pressure. For the first time, the temperature parameter was also investigated in relation to the variation in the area of a slit and discharge leakage. Considering the significant effect of temperature, it is suggested a new relationship to be used in the tropics to estimate the amount of leakage.

Keyword: Longitudinal slit, HDPE pipes, Leakage-pressure relation, Temperature, Water distribution network (WDN).

