

مطالعه آزمایشگاهی و عددی نشت در روزنه‌های لوله‌های پلی اتیلن

سید علی صدرالساداتی^۱

محمد رضا جلیلی قاضی زاده^{۲*}

m_jalili@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۲۴

چکیده

زمینه و هدف: یکی از مؤثرترین روش‌های مقابله با نشت در شبکه‌های توزیع آب، مدیریت فشار می‌باشد و لذا درک صحیح از رفتار نشت و رابطه آن با تغییرات فشار می‌تواند نقش بسزایی در کنترل تلفات داشته باشد. استفاده از لوله‌های پلی اتیلن چگالی بالا (HDPE) در سال‌های اخیر در شبکه‌های توزیع آب بسیار افزایش یافته و در برخی روستاها و شهرهای کوچک به صورت کامل از این نوع لوله‌ها استفاده شده است. هدف از این مطالعه شناخت رفتار نشت از روزنه‌ها در لوله‌های پلی اتیلن می‌باشد.

روش بررسی: در مطالعه حاضر رفتار نشت روزنه‌ای در لوله‌های پلی اتیلن به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. در این مطالعه تأثیر پارامتر دما به عنوان یکی از عوامل اصلی بر رفتار نشت مورد مطالعه قرار گرفته است.

یافته‌ها: نتایج به دست آمده نشان داد استفاده از رابطه کلاسیک توریچلی برای روزنه کاربرد دارد و مقدار توان نشت برای روزنه‌ها تقریباً ۰/۵ می‌باشد. در این مطالعه همچنین نشان داده شد ضریب تخلیه جریان خروجی از روزنه به عواملی نظیر عدد رینولدز، ضخامت جداره لوله، قطر روزنه، محیط پیرامونی و تغییر شکل روزنه وابسته است.

بحث و نتیجه‌گیری: با افزایش فشار، فرض عدم تغییر شکل برای روزنه در لوله‌های پلی اتیلن به خصوص در دمای بالا الزاماً صادق نیست. روزنه در لوله‌هایی با الاستیسیته پایین با توجه به نوع توزیع تنش در محل بازشدگی و همچنین تأثیر ضریب پواسون با افزایش فشار از حالت تقارن خارج شده و در نتیجه باعث کاهش ضریب تخلیه می‌گردد.

کلمات کلیدی: نشت، لوله پلی اتیلن چگالی بالا، روزنه، رابطه نشت-فشار، شبکه توزیع آب

۱ - دانش‌آموخته دکتری، مهندسی محیط زیست-آب و فاضلاب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

۲ - دانشیار دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

Experimental and Numerical Study on Leakage in Orifices of High-Density Polyethylene Pipe

Seyed Ali Sadr-Al-Sadati¹

Mohammadreza Jalili Ghazizadeh^{2*}

m_jalili@sbu.ac.ir

Accepted: 2017.12.11

Received: 2017.10.16

Abstract

Background and Objective: One of the most effective methods of coping with leakage in water distribution networks is pressure management. Therefore, a proper understanding of leakage behavior and its relationship with pressure variations can play a significant role in water loss control. The use of high-density polyethylene (HDPE) pipes has increased in recent years in water distribution networks so that in some rural area and small cities, these pipes have been utilized only. The aim of this study is to investigate the leakage behavior of orifices in HDPE pipes.

Method: In the present study, the leakage behavior of polyethylene pipes has been investigated numerically and experimentally. In this study, the effect of temperature as one of the main factors on leakage behavior has been considered.

Findings: The results showed that the Torricelli's classic relationship for the orifices can be used and the amount of leakage exponent for the orifices is approximately 0.5. This study shows that the discharge coefficient of the outflow from the orifices is dependent on some parameters such as Reynolds number, the thickness of pipe wall, orifice diameter, surrounding environment and orifice deformation.

Discussion and Conclusion: The assumption of no deformation for the orifices in HDPE pipes with increasing pressure, particularly at high temperatures, is not necessary true. The symmetry state of the orifices in low-elastic pipes is removed with the pressure increase, due to the distribution of stress at the opening and also the effect of the Poisson coefficient, thereby reducing the discharge coefficient.

Keyword: Leakage, High-Density Polyethylene Pipe (HDPE), Orifice, Leakage-Pressure Relationship, Water Distribution Network

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

2 - Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran **(Corresponding Author)*

مقدمه

کاهش نشت با استفاده از مدیریت فشار یک روش معمول در شبکه‌های توزیع می‌باشد. با این وجود عدم شناخت کافی و جامع در مورد مکانیسم نشت در لوله‌ها سبب شده تا تأثیر تغییرات فشار بر روی نشت کاملاً مشخص نباشد. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی نشت در لوله‌های پلاستیکی به سبب کاربرد گسترده آن‌ها در شبکه‌های توزیع آب صورت گرفته است. لوله‌های پلاستیکی از نظر صرفه اقتصادی، سهولت ساخت، نصب و تعمیرات کاربرد فراوانی یافته‌اند و در بعضی از روستاها و حتی شهرهای کوچک ایران تا صد در صد جنس لوله‌های استفاده شده در شبکه توزیع از جنس پلی‌اتیلن می‌باشد. هرچند بسیاری از محققین با استفاده از رابطه پیشنهادی توریچلی (رابطه ۱) برای دبی خروجی از یک اورفیس نسبت به توضیح رفتار نشت اقدام کرده‌اند اما در تحقیقات میدانی مشاهده شد که میزان نشت بیش از مقدار پیش‌بینی در رابطه توریچلی است [۱].

$$Q = C_d \times A \times \sqrt{2g} \times H^{0.5} \quad (1)$$

که Q : دبی خروجی از اورفیس، C_d : ضریب تخلیه، A : سطح مقطع اورفیس، g : شتاب ثقل و H : فشار در مرکز ثقل اورفیس می‌باشد. با پذیرش رابطه بقای انرژی و وجود اختلاف توان نشت در مطالعات میدانی و آزمایشگاهی با میزان تئوری، می‌توان دریافت که عوامل دیگری نیز به تغییرات فشار وابسته هستند. با توجه به رابطه (۱) می‌توان دریافت که متغیرهای این رابطه، ضریب تخلیه و مساحت موضع نشت می‌باشند. برای توجیه تفاوت توان نشت در مشاهدات میدانی، می^۱ در تحقیقات خود نشان داد، میزان نشت در مورد لوله‌های صلب و انعطاف‌پذیر متفاوت است و براساس میزان فشار توان نشت، می‌تواند بین ۰/۵ تا ۱/۵ متغیر باشد [۲]. این نظریه به تئوری نشت از مقاطع ثابت و متغیر (FAVAD) مشهور شده است. در برخی از مطالعات میدانی میزان توان نشت بیش از ۲ و به

طور متوسط ۱ مشاهده شده است [۳]. لذا رابطه (۱) با در نظر گرفتن مشاهدات میدانی به شکل رابطه (۲) توسعه داده شد:

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

$$C = \sqrt{2g} \times C_d \times A \quad (3)$$

که C : ضریب نشت و N : توان نشت می‌باشد. در تئوری FAVAD اگر نشت از لوله‌های صلب صورت گیرد توان نشت به ۰/۵ نزدیک شده و در صورتی که لوله‌های کاملاً انعطاف‌پذیر باشد، توان نشت به ۱/۵ نزدیک می‌گردد. تحقیقات دیگری با استفاده از این تئوری انجام شد و این روش را توسعه داد. در تحقیقی که توسط ونزیل^۲ و همکاران [۴] به صورت تحلیلی-آزمایشگاهی صورت گرفت، با توجه به افزایش تمرکز تنش در اطراف محل بازشدگی، میزان توان نشت بر اثر فشار تا ۲/۵ برآورد شده است. همچنین در تحقیقی که به روش عددی (المان محدود) توسط کاسا^۳ و همکاران [۵] انجام شد رابطه تغییر مساحت موضع نشت نسبت به فشار در محدوده الاستیک به صورت خطی مشاهده شد که با توجه به خواص لوله و شکل ترک، شیب تغییرات سطح مقطع می‌تواند متفاوت باشد. میزان توان نشت در اورفیس با توجه به مقدار بسیار کم شیب تغییر شکل، عموماً در تحقیقات معادل ($N=0.5$) گزارش شده است [۶-۸].

تحقیقاتی بر روی نشت از روزنه برای لوله UPVC انجام شده است و در این نوع لوله نیز میزان توان نشت تقریباً ($N=0.5$) گزارش شده است [۶، ۷ و ۹]. همچنین در مورد میزان نشت لوله پلی‌اتیلن نشان داده شد که توان نشت برای روزنه تقریباً معادل ضریب پیشنهادی در رابطه کلاسیک توریچلی ($N=0.5$) است [۹ و ۱۰].

در رابطه (۱) با توجه به اینکه جریان خروجی از اورفیس در شرایط معمول شبکه‌های توزیع آب، کاملاً آشفته است و عدد رینولدز مقدار بسیار بالایی دارد، ضریب تخلیه معمولاً در

دما نقش قابل توجهی بر میزان الاستیسیته لوله‌های پلی‌اتیلن داشته و افزایش دما سبب کاهش الاستیسیته و تنش تسلیم لوله‌های پلی‌اتیلن می‌شود [۱۸ و ۱۹] اما تحقیقی در مورد تأثیر دما بر میزان نشست در لوله‌های پلی‌اتیلن گزارش نشده است.

در تحقیق حاضر با استفاده از مطالعه عددی و بررسی آزمایشگاهی، تغییرات ضریب تخلیه نسبت به تغییرات فشار در ترک روزنه‌ای لوله پلی‌اتیلن بررسی شده و برای نخستین بار تأثیر پارامتر دما در رفتار نشست مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

رابطه بین دبی نشست و فشار برای ترک روزنه‌ای در لوله پلی‌اتیلن به دو روش عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. در روش عددی با استفاده از روش المان محدود مساحت موضع نشست و همچنین نحوه تغییر شکل آن بررسی شده است. در روش آزمایشگاهی نشست از نمونه‌های لوله پلی‌اتیلن دارای روزنه مورد مطالعه قرار گرفته است.

بررسی آزمایشگاهی

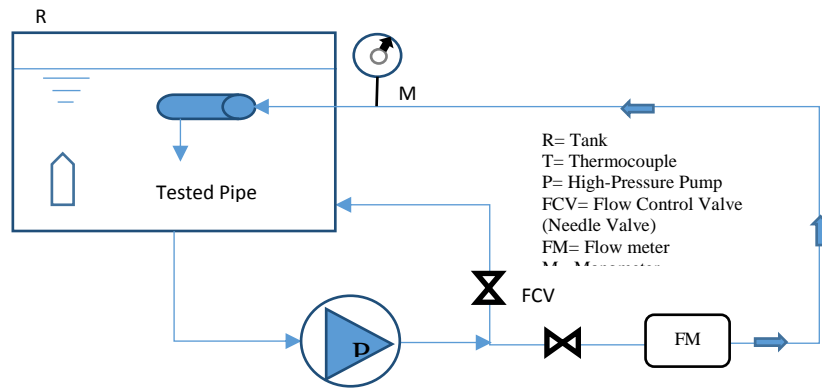
در بررسی آزمایشگاهی نشست از روزنه در پایلوتی با چیدمان نشان داده شده در شکل (۱) مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق شکل آب در یک سیکل بسته در جریان بوده و برای تنظیم فشار از شیرهای سوزنی استفاده شد. با توجه به منحنی عملکرد پمپ برای اعمال فشارهای پایین لازم بود تا شیر کنارگذر باز شده تا میزان دبی پمپ شده افزایش یافته و فشار خروجی پمپ کاهش یابد.

تحقیقات ثابت فرض شده است [۱۱ و ۱۲]. با این حال کاهش توان نشست از میزان تئوریک ۰/۵ با وجود افزایش فشار در بعضی تحقیقات می‌تواند نشان دهنده تغییرات ضریب تخلیه بر اثر افزایش فشار باشد [۱۳]. ضریب تخلیه به عوامل متعددی نظیر شکل ترک، تقارن بازشدگی، انحناء و زاویه لبه‌های ترک به سبب تأثیر بر میزان افت و جریان‌های چرخشی (ورتکس) وابستگی دارد [۱۴]. همچنین ضخامت لوله نسبت به قطر ترک می‌تواند شرایط اورفیس را از حالت جدار نازک خارج کرده و با چسبیدن مجدد بردار جریان به دیواره‌های ترک باعث افزایش ضریب تخلیه گردد [۱۵]. این موضوع در لوله‌های پلاستیکی که ضخامت جدار نسبتاً بالاتری در مقایسه با لوله‌های فلزی دارند، اهمیت بیشتری می‌یابد. همچنین محیط پیرامونی نشست نیز می‌تواند هم در میزان و هم در نوسانات و هم در تغییرات ضریب تخلیه مؤثر باشد [۵، ۱۰، ۱۵ و ۱۶].

تحقیقات زیادی در مورد میزان ضریب تخلیه صورت گرفته است [۱۲] ولی برای استخراج توان نشست و تأثیر تغییر شکل موضع نشست، ونزیل و همکاران مساحت مؤثر را با در نظر گرفتن ضریب تخلیه توسعه دادند و روشی را برای تخمین میزان نفوذ آب از طریق یک شکاف به لوله را پیشنهاد نمودند [۱۷]. در این روش مساحت مؤثر به شکل زیر تعریف شده است:

$$A_E = A'_{E_0} + m'h \quad (4)$$

که A_E : مساحت مؤثر بعد از تغییر شکل، A'_{E_0} : مساحت اولیه مؤثر، m' : شیب تغییرات مساحت موضع نشست نسبت به فشار با در نظر گرفتن ضریب تخلیه و h : فشار آب در داخل لوله می‌باشد.



شکل ۱- طرح شماتیک مجموعه آزمایشگاهی

Fig 1-Schematic design of the laboratory setup

جریان نشت، در تمام آزمایش‌ها به صورت عمود بر راستای لوله و به سمت پایین بود. پس از اعمال فشار به لوله، زمان کافی به موضع نشت داده شد تا تغییرات احتمالی در مساحت اورفیس انجام شده و مقدار دبی و فشار ثابت گردد. آزمایش‌های حاضر بر روی لوله‌های نو، با مشخصات درج شده در جدول (۱) صورت گرفت.

در طول انجام آزمایش‌ها، فشار به صورت تدریجی افزایش یافته و کارکرد پمپ منجر به افزایش تدریجی دمای آب گردید. دمای لحظه‌ای آب در تمام طول مدت آزمایش اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. برای اندازه‌گیری جریان از یک کنتور الکترومغناطیس استفاده شد که میزان دقت آن $\pm 1\%$ می‌باشد. طول لوله‌های مورد آزمایش ۱۲۰ سانتیمتر بوده و روزنه به صورت مصنوعی توسط مته در وسط لوله ایجاد شد. جهت جت

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و هندسی لوله‌های آزمایش شده

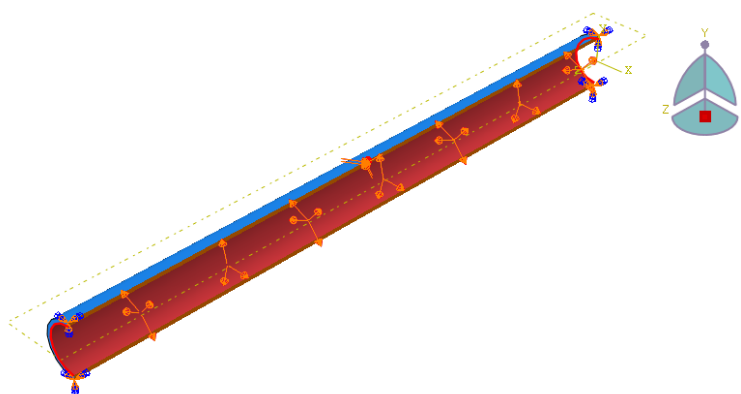
Table 1- Mechanical and geometric characteristics of the tested pipes

مقادیر	مشخصات	
۰/۴	ضریب پواسون	لوله پلی اتیلن
HDPE 100	جنس مواد اولیه	
۱۰۰۰	مدول یانگ (MPa) در ۲۳ درجه سانتی‌گراد	
۱۱۰	قطر خارجی (میلی‌متر)	
۹۳	قطر داخلی (میلی‌متر)	
۸/۲	ضخامت دیواره (میلی‌متر)	
۱۲۰۰	طول لوله (میلی‌متر)	روزنه‌ای ترک
۱۰	کلاس کاری (بار)	
۱/۲۵	ضریب اطمینان	
۸ و ۵	قطر (میلی‌متر)	روزنه‌ای ترک
آب و هوا	محیط پیرامونی	

بررسی عددی

فشار داخلی به صورت تدریجی به لوله وارد گردید. مدل اولیه با مشخصات درج شده در جدول (۱) مدل سازی شد و پس از تحلیل حساسیت نتایج ساخته شد. دو سر لوله گیردار لحاظ شده و بازشدگی در وسط لوله قرار دارد. در شکل (۲) لوله و ترک مدل شده، بارهای وارده و همچنین شرایط مرزی نشان داده شده است.

با استفاده از مدل سازی عددی به روش المان محدود رفتار موضع نشت در قبال تغییرات فشار محاسبه شده و براساس نتایج حاصله از داده های آزمایشگاهی هیدرولیک نشت مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور ترک های روزنه ای در محیط نرم افزار ABAQUS مدل سازی شد. مدل سازی صورت گرفته از طریق ماژول استاندارد و در حالت استاتیک بوده و



شکل ۲- نمای از لوله و ترک مدل شده، بارهای وارده و شرایط مرزی

Fig 2- A view of modeled pipe and crack, loads and boundary conditions

$$E = k \times E_0 \quad (4)$$

که E : الاستیسیته، k : ضریب تصحیح و E_0 : الاستیسیته مبنا است. ضرایب تصحیح برای لوله های پلی اتیلن در دماهای مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است.

ضریب الاستیسیته لوله با توجه به تغییرات دما ثابت نبوده و با افزایش دما کاهش می یابد لذا برای اعمال این موضوع در مدل و برای اصلاح ضریب الاستیسیته HDPE، از ضریب تصحیح استفاده شده است.

جدول ۲- ضرایب تصحیح الاستیسیته براساس تغییرات دما [۲۰]

Table 2- Elasticity correction factor based on temperature variation

ضریب تصحیح (k)	دما (درجه سانتی گراد)
۱	۲۳
۰/۹۳	۲۷
۰/۸۲	۳۲
۰/۷۳	۳۸
۰/۶۴	۴۳

ارائه نتایج و بحث

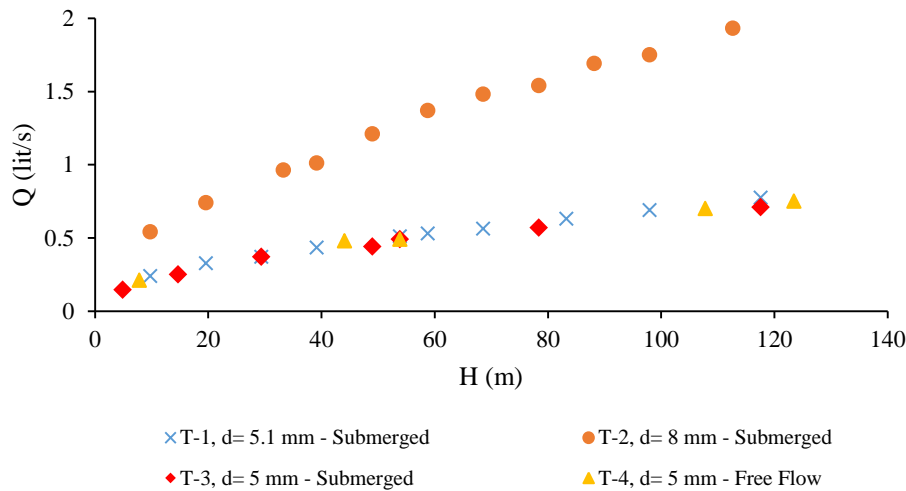
برای بررسی تغییرات رفتار روزنه در لوله‌های پلی‌اتیلن، آزمایش‌ها روی ۴ نمونه روزنه در لوله پلی‌اتیلن PE100 با قطر ۱۱۰ و ضخامت ۸/۲ میلی‌متر انجام شد. مشخصات لوله و نمونه‌های مورد بررسی در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- مشخصات نمونه‌های مورد بررسی روزنه

Table 3- Test specifications for orifice

شماره نمونه	فشار (متر)	قطر روزنه (میلی‌متر)	دما (درجه سانتی‌گراد)	محیط پیرامونی
T-1	۵-۱۲۰	۵/۱	۲۸-۴۰	آب
T-2	۱۰-۱۱۵	۸	۲۸-۳۹	آب
T-3	۵-۱۲۰	۵	۳۱-۳۹	آب
T-4	۸-۱۲۶	۵	۳۱-۳۶	هوا

در شکل (۳) تغییرات دبی نشت را در اورفیس لوله‌های پلی‌اتیلن نسبت به افزایش فشار برای آزمایش‌های حاضر نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات دبی نشت نسبت به افزایش فشار برای روزنه‌های لوله پلی‌اتیلن

Fig 3- Leakage variation vs. pressure for orifices in HDPE pipes

استخراج گردید. نتایج مطابق جدول (۴) به صورت زیر خلاصه شده است.

داده‌های نشان داده شده در شکل (۳) با استفاده از شکل رابطه (۲) برازش داده شد و ضریب تخلیه براساس رابطه (۳)

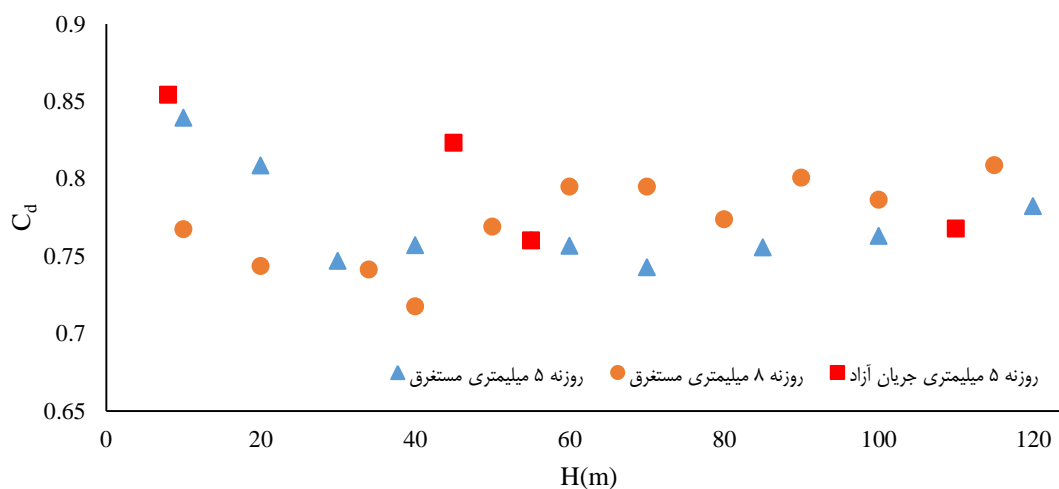
جدول ۴- خلاصه نتایج آزمایش بر روی روزنه‌های لوله‌های پلی‌اتیلن

Table 4- Summary of test results for orifices in HDPE pipes

نمونه	قطر روزنه (mm)	توان نشت (N)	ضریب تخلیه (C _d)	محیط پیرامونی	R ²
T-1	۵/۱	۰/۴۷	۰/۸۹	آب	۰/۹۹۴
T-2	۸	۰/۵۳	۰/۷۰	آب	۰/۹۹۴
T-3	۵	۰/۵	۰/۷۶	آب	۰/۹۹۸
T-4	۵	۰/۴۴	۰/۹۴	هوا	۱

مقطع روزنه، ضریب تخلیه (C_d) در جدول (۴) محاسبه شده است. در شکل (۴) مقدار ضریب تخلیه با فرض عدم تغییر شکل و براساس رابطه (۱) برای هر فشار به صورت مجزا محاسبه و نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌گردد، توان نشت برای اورفیس لوله‌های پلی‌اتیلن در آزمایش‌های حاضر به عدد نزدیک می‌باشد که با نتایج دیگر محققین در مورد لوله‌های پلاستیکی تطابق دارد [۶ و ۱۰]. با در نظر گرفتن رابطه (۱) (N = 0.5) و با فرض عدم تغییر سطح



شکل ۴- رابطه فشار و ضریب تخلیه اورفیس در لوله‌های پلی‌اتیلن

Fig 4- Pressure and discharge coefficient relation for orifices in HDPE pipes

مطالعه حاضر نشان می‌دهد که جریان نشت در حالی که محیط پیرامونی لوله هوا می‌باشد (Free Flow) در مقایسه با حالت مستغرق، ضریب تخلیه بزرگ‌تر و نوسان بیشتری دارد و هرچه فشار افزایش می‌یابد، ضریب تخلیه برای هر دو حالت به یکدیگر نزدیک می‌شوند که با نتایج مطالعات دیگر محققین

نتایج شکل (۴) نشان می‌دهد که ضریب دبی برای آزمایش‌های حاضر برای روزنه‌ها در لوله‌های پلی‌اتیلن در محدوده (۰/۷۲ ≤ C_d ≤ ۰/۸۵) قرار می‌گیرد. برای نشت خروجی از روزنه در لوله‌های پلی‌اتیلن و UPVC ضریب تخلیه در محدوده (۰/۷ ≤ C_d ≤ ۰/۹) گزارش شده است [۲۱]. همچنین نتایج

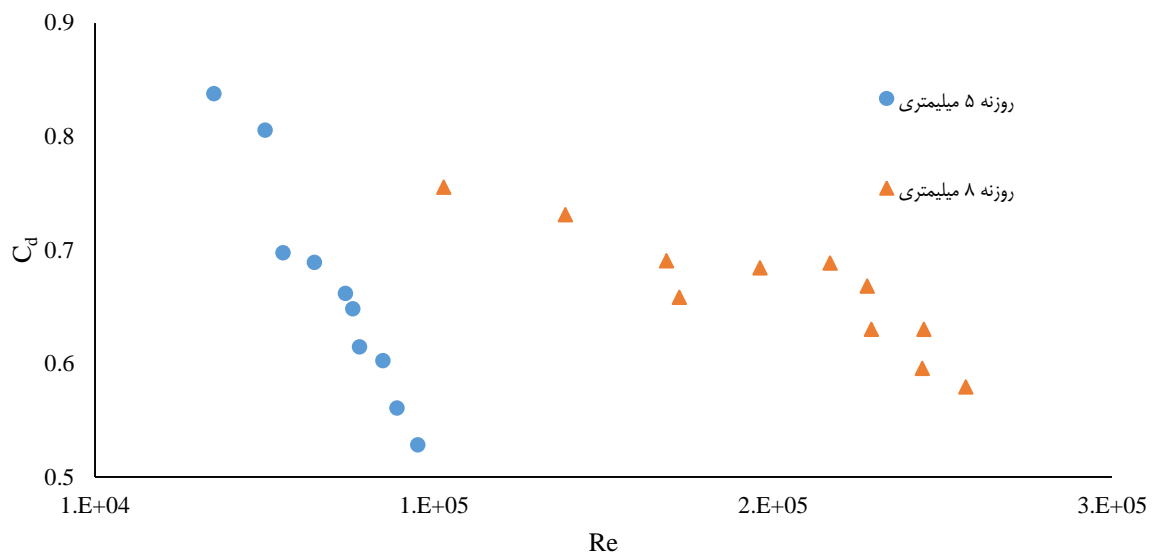
$$Re = \frac{\sqrt{2gH \times d}}{\nu} \quad (۶)$$

که g : شتاب ثقل، H : فشار لوله، d : قطر روزنه و ν : لزجت سینماتیکی می‌باشد. نتایج بدست آمده برای روزنه نشان می‌دهد که ضریب تخلیه با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد و با افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب تخلیه به یک حد ثابت، میل می‌کند. نتایج آزمایش‌های حاضر نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز، ضریب تخلیه به شکل قابل توجهی کاهش یافته است. تغییرات ضریب تخلیه نسبت به تغییرات عدد رینولدز برای جریان خروجی از روزنه در لوله پلی‌اتیلن در حالت مستغرق در شکل (۵) نشان داده شده است.

همخوانی دارد [۱۵]. همچنین از نتایج شکل (۴) می‌توان مشاهده نمود که مقدار ضریب تخلیه با افزایش فشار تا ۶ بار با کاهش همراه بوده و پس از آن افزایش می‌یابد که علت این موضوع در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت. میزان ضریب تخلیه برای روزنه در لوله برای فشارهای تا حدود ۱۲۵ متر تاکنون گزارش نشده است اما آیدلچیک^۱ مقدار ضریب تخلیه را بر حسب عدد رینولدز برای روزنه به صورت زیر ارائه کرده است [۱۲].

$$C_d \cong 0.59 + \frac{5.5}{\sqrt{Re}} \quad (۵)$$

که در رابطه بالا Re عدد رینولدز بوده و به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

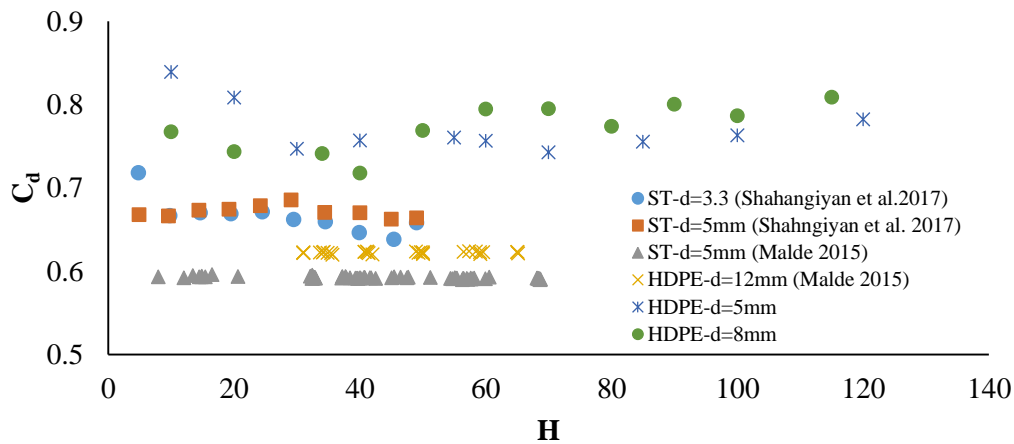


شکل ۵- تغییرات ضریب تخلیه در برابر تغییرات عدد رینولدز

Fig 5- Discharge coefficient variation vs. Reynolds number

کمتر می‌باشد. جهت بررسی بیشتر همچنین در شکل (۶) ضریب تخلیه برای روزنه‌های با قطرهای متفاوت برای لوله‌های فولادی و پلی‌اتیلن نیز ارائه و با یکدیگر مقایسه شده است.

همان‌طور که شکل (۵) نشان می‌دهد، ضریب تخلیه علاوه بر عدد رینولدز به قطر روزنه نیز وابسته است و هرچه قطر (مساحت) روزنه بزرگ‌تر باشد، ضریب تخلیه و تغییرات آن



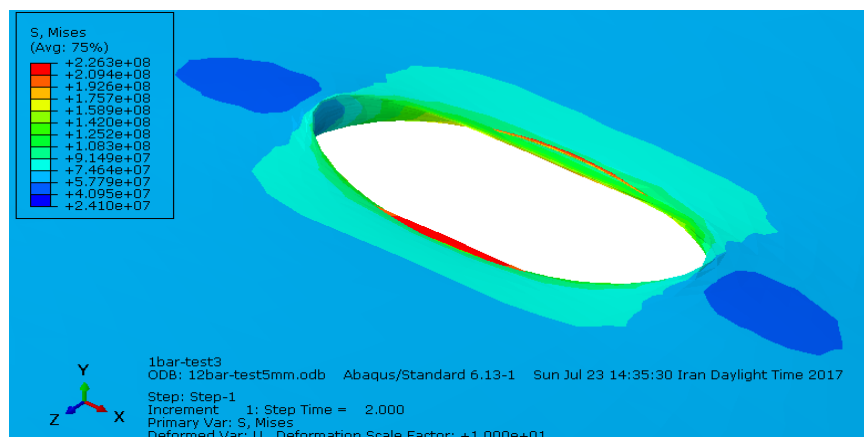
شکل ۶- تغییرات ضریب تخلیه نسبت به فشار برای روزنه‌های فولادی (نتایج مطالعات پیشین)

Fig 6- Discharge Coefficient variation vs. pressure for orifices in steel pipes (result of the previous studies)

جدار نازک است.

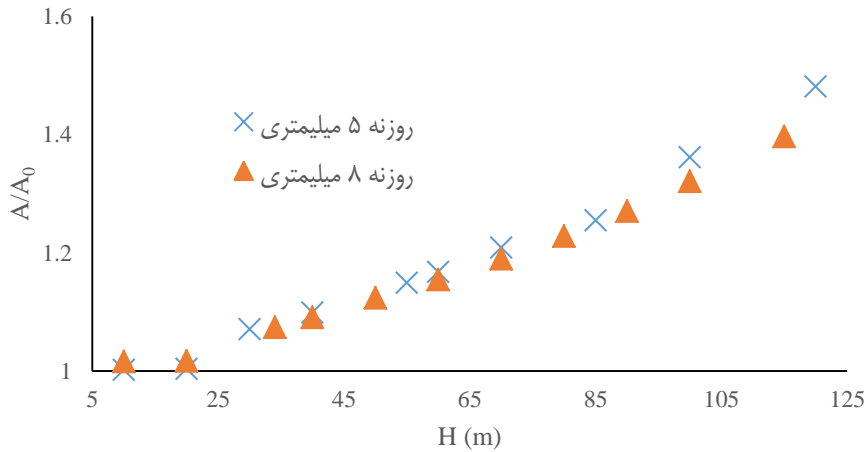
با استفاده از مدل‌سازی عددی می‌توان مساحت موضع نشت را در فشارهای مختلف محاسبه نمود. به سبب نوع شکل اورفیس، تمرکز تنش در اطراف روزنه بسیار کمتر از شکاف‌های دیگر نظیر شکاف طولی می‌باشد و در نتیجه میزان تغییر شکل به نسبت دیگر انواع شکاف کمتر است. شکل (۷) توزیع تنش را در اطراف اورفیس نشان می‌دهد. در شکل (۸) تغییرات مساحت روزنه را نسبت به تغییرات فشارهای مختلف مشاهده می‌گردد.

ضریب تخلیه در روزنه‌های لوله‌های پلی‌اتیلن نسبت به روزنه‌های دیواره مخزن و لوله‌های فولادی که معمولاً ضخامت کمی (نسبت ضخامت لوله به قطر روزنه) دارند، بیشتر است. دلیل این موضوع می‌تواند به سبب بالا بودن نسبت ضخامت لوله به قطر اورفیس باشد. در این حالت جهت جریان خروجی از اورفیس پس از انقباض مجدداً کل مساحت موضع نشت را پر کرده و به دیواره‌های اورفیس خواهد چسبید و باعث افزایش میزان مساحت عبور جریان خواهد شد [۱۵ و ۲۲]. در نتیجه با افزایش عدد رینولدز تغییرات در آن‌ها بیشتر از دیواره‌های



شکل ۷- توزیع تنش و تغییر شکل روزنه برای ترک ۵ میلی‌متر در فشار ۱۲۵ متر با بزرگنمایی ۱۰

Fig 7- Distribution of stress and deformation of the 5mm orifice at a pressure of 125 m with a magnification of 10

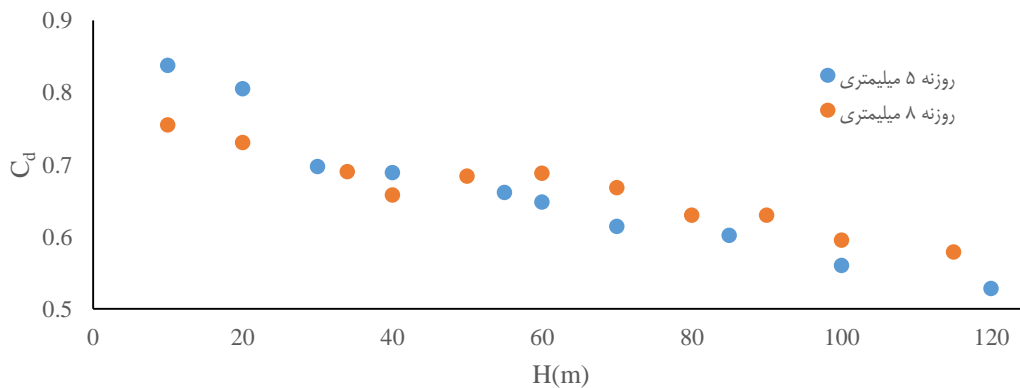


شکل ۸- تغییرات مساحت روزنه نسبت به تغییرات فشار با استفاده از مدل‌سازی عددی آزمایش‌های صورت گرفته

Fig 8- Variation of orifices area vs pressure using the numerical models of the laboratory tests

به سبب بالا بودن عدد رینولدز، قطر بالای روزنه و ضخامت کم جدار لوله‌های مورد آزمایش، میزان کاهش ضریب تخلیه بسیار ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر کردن است. نتایج تحقیق شاهنگیان و مالده در مورد روزنه در لوله‌های فولادی در شکل (۶) نشان داده شده است [۲۳ و ۱۳]. چنانچه داده‌های بدست آمده از مدل‌سازی عددی در رابطه (۱) برای داده‌های آزمایشگاهی به کار برده شود، می‌توان ضریب تخلیه را در روزنه برای فشارهای متفاوت استخراج نمود. شکل (۹) ضریب تخلیه محاسبه شده با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. ضریب تخلیه با افزایش فشار از میزان ۰/۸۵ به ۰/۵ کاهش پیدا کرده است.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود بالاتر بودن تنش شعاعی نسبت به تنش طولی در لوله تحت فشار و همچنین میزان ضریب پواسون سبب می‌شود تا روزنه از حالت تقارن خارج شده و از شکل دایره به بیضی تغییر شکل دهد. بدیهی است این تغییر شکل در مواد با الاستیسیته بالاتر مانند UPVC و فولاد بسیار کمتر و ناچیز است. در لوله‌هایی که ضریب الاستیسیته بالاتری دارند، تغییر مساحت روزنه بسیار کمتر بوده و در نتیجه شیب تغییرات مساحت مؤثر با توجه به کاهش ضریب تخلیه منفی می‌باشد. این موضوع در تحقیقات مالده^۱ که شیب تغییر مساحت مؤثر را برای لوله‌های UPVC و فولادی محاسبه کرده است، قابل مشاهده است [۱۳]. هرچند

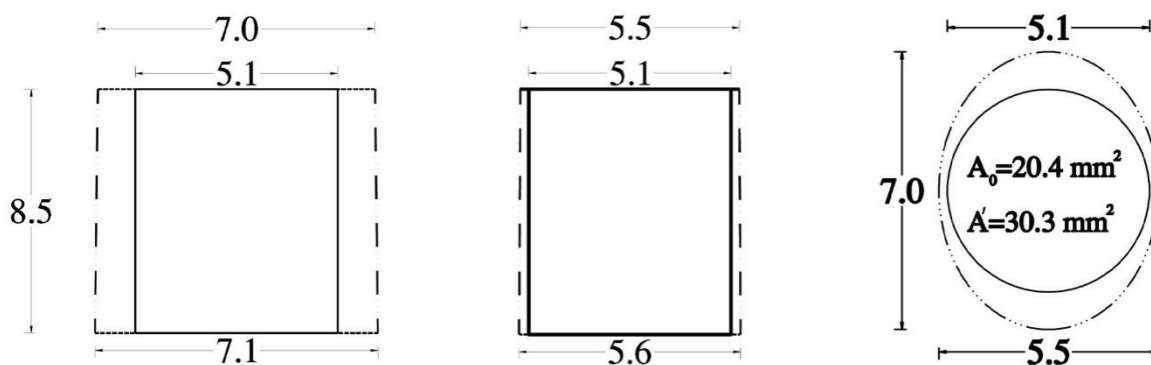


شکل ۹- ضریب تخلیه محاسبه شده با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی

Fig 9- Calculated discharge coefficient using results of the numerical modeling

۳۹ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. هرچند با توجه به ضخامت لوله و توزیع فشار، قطر روزنه در جدار داخلی بیشتر تغییر کرده و روزنه به شکل مخروط ناقص تبدیل شده است و این مورد باعث کاهش میزان افت انرژی و در نتیجه افزایش ضریب تخلیه خواهد گردید، اما زاویه تغییر شکل بسیار ناچیز بوده و می‌توان از آن در این مطالعات صرف‌نظر نمود.

با مدل‌سازی عددی و بررسی شکل تغییر یافته روزنه در لوله پلی‌اتیلن می‌توان علاوه بر قطر روزنه، ضخامت جدار لوله و عدد رینولدز، خارج شدن روزنه از حالت تقارن و تبدیل شدن دایره به بیضی را از دلایل عمده کاهش ضریب تخلیه دانست. شکل (۱۰) نمای شماتیک از وضعیت تغییر شکل یافته روزنه ۵٫۱ میلی‌متری را با استفاده از مدل‌سازی در فشار ۱۲۵ متر و دمای

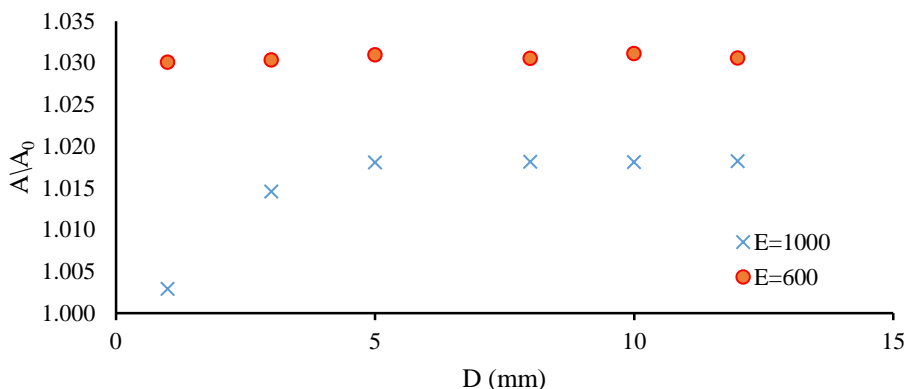


شکل ۱۰- نمای شماتیک از وضعیت تغییر شکل یافته روزنه ۵٫۱ میلی‌متری را در فشار ۱۲۵ متر

Fig 10- A schematic view of the deformed 5.1mm orifice at 125 m pressure

الاستیسیته لوله پلی‌اتیلن انجام شده است. همان‌طور که شکل (۱۱) نشان می‌دهد، شیب تغییر مساحت تقریباً از قطر روزنه ۵ میلی‌متر به بعد ثابت می‌باشد. هرچند میزان تغییر شکل روزنه در الاستیسیته مختلف، متفاوت می‌باشد اما به سبب توزیع تنش نسبت تغییر شکل در اقطار بالا تابعی از قطر روزنه نیست.

با توجه به الاستیسیته پلی‌اتیلن تغییرات مساحت نسبت به تغییرات فشار برای اقطار مختلف روزنه در لوله مورد اشاره در جدول (۱) برای فشار ۱۰ بار مدل‌سازی شده است. مدل اولیه ارائه شده در جدول (۱) تحت فشار ۱۰ بار قرار گرفته و شبیه‌سازی در اقطار مختلف روزنه برای حد بالا و پایین

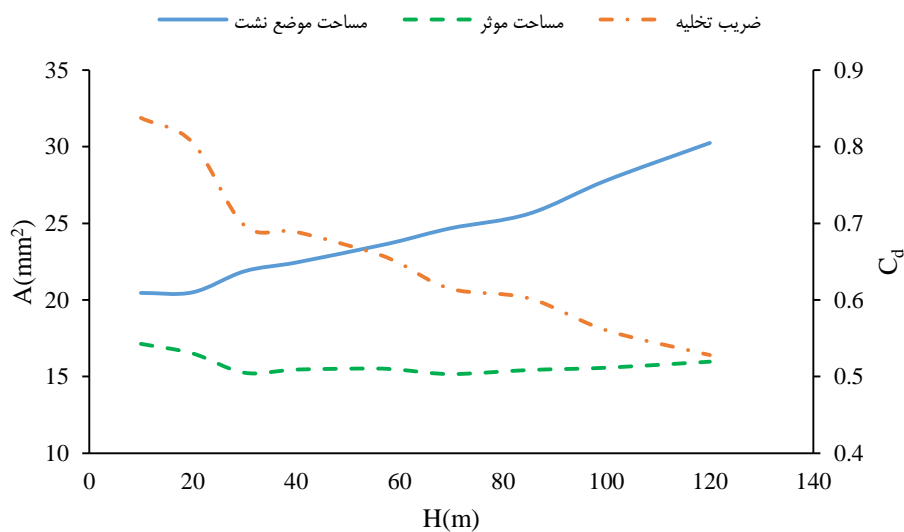


شکل ۱۰- تغییرات مساحت نسبت به قطر روزنه در فشار ۱۰ بار برای لوله پلی‌اتیلن

Fig 10- Area variation vs. diameter of the orifice at 10 bar pressure

به طور معمول از جنس PE80 و یا PE100 هستند و الاستیسیته این لوله‌ها بین ۱۲۰۰ تا ۸۰۰ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت در مورد لوله‌های پلی‌اتیلن تنها عامل آشفتگی و عدد رینولدز در مورد ضریب تخلیه مؤثر نبوده و عواملی نظیر ضخامت جداره لوله، قطر روزنه و تغییر شکل ترک نیز مؤثر می‌باشد. در تحقیق حاضر با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی می‌توان مساحت مؤثر را به صورت شکل (۱۱) ترسیم نمود.

نکته قابل توجه تأثیر دما بر روی میزان اولیه الاستیسیته می‌باشد و حساسیت الاستیسیته پلی‌اتیلن باعث می‌شود تا عدم قطعیت در میزان نشت پلی‌اتیلن افزایش یابد. همچنین با توجه به تنوع مواد در ساخت لوله‌های پلی‌اتیلن الاستیسیته رنج وسیعی بین ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ را در برمی‌گیرد که با افزایش دما این میزان نیز کاهش می‌یابد. جنس پلیمر استفاده شده برای ساخت لوله‌های پلی‌اتیلن مورد استفاده در شبکه‌های توزیع آب



شکل ۱۱- تغییرات مساحت مؤثر با تغییرات فشار در روزنه

Fig 11- Variation of the orifice effective area vs. pressure

نتیجه‌گیری

نشت از روزنه در لوله‌های پلی‌اتیلن با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته تقریباً مطابق با رابطه توریچلی می‌باشد و توان نشت برابر با میزان تئوری است. در تحقیق حاضر نشت از روزنه در لوله‌های پلی‌اتیلن به دو روش عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شده ضریب تخلیه وابسته به عدد رینولدز، قطر روزنه، ضخامت جداره لوله، محیط پیرامونی موضع نشت و شکل تغییر یافته روزنه می‌باشد. کمتر بودن میزان توان نشت برای روزنه در لوله‌های صلب مانند فولاد، می‌تواند به سبب کاهش ضریب تخلیه به علت افزایش عدد

با توجه به شکل بالا می‌توان نتیجه گرفت، هرچند روزنه در مورد لوله‌های پلی‌اتیلن به کار رفته در شبکه‌های توزیع آب بر اثر فشار تغییر شکل می‌دهد اما به سبب کاهش ضریب تخلیه می‌توان مساحت مؤثر را ثابت فرض نمود و به همین سبب در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته میزان توان نشت ۰/۵ فرض شده و براساس آن میزان ضریب تخلیه و مساحت روزنه ثابت در نظر گرفته شده است. در صورت کاهش الاستیسیته نرخ افزایش مساحت بیش از نرخ کاهش ضریب تخلیه شده و توان نشت بیش از میزان تئوری ۰/۵ خواهد شد.

4. Van Zyl J, Clayton C. 2007. The effect of pressure on leakage in water distribution systems. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management: Thomas Telford Ltd.
5. Cassa A, Van Zyl J, Laubscher R. 2010. A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. Urban Water Journal. 7(2):109-20.
6. Walski T, Whitman B, Baron M, Gerloff F, 2009. Pressure vs. flow relationship for pipe leaks. World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers.
7. Greyvenstein B, 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):117-24.
8. Hiki S. 1981. Relationship between leakage and pressure. Journal of Japan Waterworks Association. 1(982):5.
9. Van Zyl J, Malde R. 2017. Evaluating the pressure-leakage behaviour of leaks in water pipes. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua. jws2017136.
10. Coetzer A, Van Zyl J, Clayton C, 2006. An experimental investigation into the turbulent-flow hydraulics of small circular holes in plastic pipes. Water Distribution Systems Analysis Symposium.
11. Schwaller J, van Zyl J. 2014. Modeling the pressure-leakage response of water distribution systems based on individual leak behavior.

رینولدز ناشی از ازدیاد فشار باشد. همچنین مقدار ضریب تخلیه وابسته به قطر روزنه است و هرچه قطر روزنه بزرگتر و میزان عدد رینولدز بالاتر باشد، میزان و تغییرات ضریب تخلیه کمتر است. ضخامت جدار لوله در لوله‌های پلاستیکی بیشتر بوده و همین امر سبب می‌شود تا بردار جریان به دیواره لوله اوریفیس بعد از انقباض مجدداً بچسبد و ضریب تخلیه افزایش یابد؛ هرچند با افزایش عدد رینولدز این امکان کاهش می‌یابد. مساحت روزنه در لوله‌های پلی‌اتیلن با توجه به الاستیسیته کم، نسبت به افزایش فشار می‌تواند افزایش یافته و تغییر شکل دهد. مطالعات حاضر نشان می‌دهد با افزایش دما تغییر شکل موضع و نرخ نشت افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش مساحت موضع نشت در لوله پلی‌اتیلن و کاهش ضریب تخلیه، مساحت مؤثر تقریباً ثابت و میزان نشت تقریباً مطابق با تئوری تورپچلی رفتار می‌کند. کاهش ضریب تخلیه به سبب خروج از حالت تقارن و تبدیل شدن روزنه به بیضی در کنار دیگر عوامل باعث کاهش ضریب تخلیه می‌گردد. با این وجود در تمامی موارد مقدار ضریب تخلیه با افزایش جریان خروجی کاهش یافته و به یک مقدار خاص میل می‌کند. افزایش مساحت موضع نشت در روزنه می‌تواند سبب افزایش توان نشت گردد.

منابع

1. Lambert A. 1997. Pressure management/leakage relationships: Theory, concepts and practical applications. proceeding of minimizing leakage in water supply/distribution systems, IQPC Seminar, London.
2. May J. 1994. Pressure dependent leakage. World Water and Environmental Engineering.
3. Lambert A. 2001. What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems. IWA Conf n Systems approach to leakage control and water distribution system management; Citeseer.

- Geotextiles and Geomembranes.40:69-77.
19. Sadr-Al-Sadati, Syed Ali, and Mohammadreza Jalili Ghazizadeh. "The experimental and numerical study of water leakage from High-Density Polyethylene pipes at elevated temperatures." *Polymer Testing* 74 (2019): 274-280.
 20. The Plastics Pipe Institute(PPI). 2008. *The Plastics Pipe Institute Handbook of Polyethylene Pipe Second Edition*: Irving, Texas.
 21. Coetzer AJ, Van Zyl J, Clayton C.2006. Experimental study of the hydraulics of small circular holes in water pipes. *Proceedings of the 8th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Cincinnati, Ohio.
 22. Franchini M, Lanza L. Leakages in pipes: generalizing Torricelli's equation to deal with different elastic materials, diameters and orifice shape and dimensions. *Urban Water Journal*. 2014;11(8):678-95.
 23. Shahangian S.A.R, Tabesh M, Mirabi M.H. Numerical study of leakage from submerged steel pipes based on laboratory results of non-submerged pipes. *Journal of Hydraulics*. 2017; 11 (4): 44-29(In Persian).
 - Journal of Hydraulic Engineering.141(5):04014089.
 12. Idelchik, I., *Handbook of hydraulic resistance*. Hemisphere, New York. 1986. 640.
 13. Malde R. 2015. *An analysis of leakage parameters of individual leaks on a pressure pipeline through the development and application of a standard procedure*: University of Cape Town.
 14. Novak P, Moffat A, Nalluri C, Narayanan R. 2007. *Hydraulic structures*: CRC Press.
 15. Thomas JT. 1986. *Orifice Plates for Furrow Flow Measurement: Part I - Calibration*.
 16. Fox S, Collins R, Boxall J. 2016. Physical investigation into the significance of ground conditions on dynamic leakage behaviour. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua.*;65(2):103-15.
 17. Van Zyl J, Lambert A, Collins R. 2017. Realistic Modeling of Leakage and Intrusion Flows through Leak Openings in Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*.143(9):04017030.
 18. Krushelnitzky R, Brachman R. 2013. Buried high-density polyethylene pipe deflections at elevated temperatures.