

## بررسی عددی نشت از لوله‌های فولادی مستغرق در آب با استناد به نتایج آزمایشگاهی لوله‌های غیر مستغرق

سید احمد رضا شاهنگیان<sup>1</sup>، مسعود تابش<sup>2\*</sup>، محمد حسین میرآبی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مهندسی محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران  
2- استاد دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران  
3- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب- هیدرولیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز

\* mtabesh@ut.ac.ir

**چکیده** - تاکنون تحقیقات اندکی بر روی تأثیر شرایط محیطی بر دبی خروجی از محل نشت انجام شده است. برخی از این تحقیقات نشان می‌دهند که شرایط محیطی می‌توانند بر دبی نشت تأثیرگذار بوده و در مقابل برخی دیگر تأثیر این شرایط را کاملاً رد می‌کنند. در همین راستا با هدف بررسی تأثیر شرایط محیطی بر دبی نشت، آزمون‌هایی بر روی مجموعه آزمایشگاهی گردشی تحت فشار بالا ساخته شده در دانشکده فنی دانشگاه تهران، انجام شد. آزمون‌ها در حالت تخلیه به هوای آزاد، بر روی یک لوله فولادی به قطر 110 میلی‌متر و با منفذ نشت مدور، در محدوده وسیعی از فشارها تا فشار 50 متر انجام شد. در ادامه با استناد به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، مجموعه آزمایش در محیط نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی عددی شده و یک مدل ریاضی آشفتگی مناسب برای آن استخراج شد. سپس به کمک تحلیل عددی در حالت مستغرق در آب، به بررسی تأثیر شرایط محیطی بر روی دبی نشت پرداخته شد. نتایج حاصل از این تحقیق، نشان می‌دهد که وجود آب و نوسانات فشار در محل جت مستغرق، بر دبی خروجی از محل نشت تأثیرگذار بوده و مقدار آن را در مقایسه با نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد کاهش می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل، اثر این کاهش فشار در فشارهای حدود 5 متر، می‌تواند تا حدود 55 درصد بر دبی خروجی از محل نشت در حالت مستغرق نسبت به حالت نشت در هوای آزاد اثرگذار باشد؛ اما در فشارهای بالای 20 متر این اثر ناچیز بوده و به زیر 10 درصد کاهش می‌یابد. البته مقدار این کاهش به تراز ارتفاعی آب روی محل نشت و میزان فشار داخل لوله بستگی دارد. در نهایت رابطه‌ای بین دبی خروجی از محل نشت و فشار داخل مجموعه ارائه شده است.

**کلیدواژگان:** ANSYS، آزمایشگاهی، رابطه نشت - فشار، لوله فولادی، جت مستغرق.

### 1- مقدمه

بی‌رویه از منابع آبی از یک طرف و محدودیت منابع تأمین‌کننده آب از طرف دیگر، موجب شده تا آب به‌عنوان کلیدی‌ترین عنصر حیاتی انسان و محیط‌زیست، با بحرانی جدی در سراسر دنیا روبرو شود که تهدیدی برای توسعه پایدار<sup>1</sup> است. کشور ایران با متوسط بارش سالانه حدود 240 تا 250 میلی‌متر، در زمره مناطقی از جهان است که

در بین اجزای مختلف محیط‌زیست، آب ارتباط بیشتری با دیگر اجزا و انسان در چرخه حیات دارد و نسبت به فعالیت‌های انسان در تغییر کاربری زمین، آلودگی، مصارف صنعتی، کشاورزی و شهری تأثیرپذیرتر و آسیب‌پذیرتر می‌باشد. افزایش شهرنشینی، روند رو به رشد جمعیت و توسعه صنایع در دهه‌های اخیر و در نتیجه استحصال

<sup>1</sup> Sustainable Development

گفته می‌شود (تابش، 1394).

میزان آب بدون درآمد از شبکه‌های توزیع آب، در بسیاری از شهرهای دنیا به سطح هشدار رسیده است. مطالعات بانک جهانی<sup>3</sup> نشان می‌دهد، سالانه حدود 32 میلیارد مترمکعب آب از سیستم‌های توزیع آب از طریق نشت هدر می‌رود که ارزش این هدر رفت در سراسر جهان در حدود 81 میلیارد دلار در سال تخمین زده شده است (Kingdom et al., 2006). علاوه بر این بر طبق گزارش‌های ارائه‌شده، نشت بیشترین سهم را در تلفات آب به خود اختصاص داده است و گاهی بیش از 70 درصد از این تلفات را شامل می‌شود (WHO<sup>4</sup>, 2001). همچنین بر اساس آخرین آمار اعلام‌شده از سوی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، میزان هدررفت واقعی برابر 13/3 درصد، هدررفت ظاهری برابر 9/8 درصد و مصارف مجاز بدون درآمد 1/6 درصد و بنابراین شاخص آب بدون درآمد کشور 24/7 درصد گزارش شده است (شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، 1393).

مسئله نشت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات اجتناب‌ناپذیر شبکه‌های توزیع آب، همه‌ساله هزینه و نیروی انسانی زیادی را به دولت و شرکت‌های آب و فاضلاب تحمیل می‌کند. از این‌رو بررسی عوامل مؤثر در نشت و کنترل و کاهش آن در شبکه‌های توزیع آب، همراه با بازیابی بخشی از حجم آب هدررفته، نه تنها موجب حفظ و حراست از منابع تأمین‌کننده آب با استفاده بهینه از آن‌ها شده، بلکه موجب افزایش درآمد شرکت‌های تأمین‌کننده آب، بالا رفتن کیفیت خدمات آن‌ها و رشد و شکوفایی اقتصادی دولت‌ها با صرفه‌جویی در هزینه‌های تأمین، انتقال، تصفیه و توزیع آب گردیده و به آن‌ها اجازه سرمایه‌گذاری در سایر بخش‌ها، به‌خصوص بخش‌های اقتصادی را می‌دهد.

عوامل بسیاری در ایجاد و گسترش نشت از شبکه‌های توزیع آب نقش دارند که برخی از این عوامل عبارت‌اند از: فشار بالا در شبکه، افزایش سن لوله‌ها، خطای طراحی و اجرا، ضربه، بار ترافیکی. از بین این عوامل، وابستگی بین مقدار دبی خروجی از محل نشت و میزان فشار موجود در

از موهبت نزولات جوی به اندازه کافی بهره‌مند نبوده و قسمت عمده‌ای از مساحت آن را مناطق خشک و کم آب فراگرفته است. لذا از دیرباز، آب نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه اقتصادی این کشور داشته است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی نهاد ریاست جمهوری، 1391). طبق اعلام مطالعات سازمان ملل متحد<sup>1</sup>، کمبود آب مشکلی حاد در سراسر خاورمیانه است. پژوهش‌های صورت گرفته نیز حاکی از آن است که با توجه به قرار گرفتن کشور ایران در مناطقی که در آینده با بحران آب مواجه خواهند شد و نیز رشد سریع جمعیت، تا سال 2050 میلادی سهم سرانه آب هر نفر به کمتر از 1000 مترمکعب در سال برسد (بیران و هنر بخش، 1387).

سالانه هزینه‌های بسیار سنگینی برای ساخت تأسیسات و تجهیزات استحصال و ذخیره‌سازی آب، از جمله ایستگاه‌های پمپاژ، سد، خطوط انتقال آب، شبکه‌های توزیع آب، تصفیه‌خانه‌ها و سامانه‌های تصفیه و نیز عملیات تعمیر و نگهداری این تأسیسات انجام می‌پذیرد. شبکه‌های توزیع آب نیز به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی و تأثیرگذار در زیرساخت‌های شهری که وظیفه انتقال آب از منابع تأمین‌کننده به دست مصرف‌کنندگان با فشار کافی و کیفیت مناسب را دارند، متأسفانه در سطح جهانی در حال فرسوده‌شدن هستند؛ درحالی‌که تقاضا از این سامانه‌ها و در نتیجه تقاضا بر منابع آب طبیعی، همواره در حال افزایش است. بنابراین با در نظر داشتن محدودیت منابع آب و ضرورت وجود آن برای زندگی و توسعه اقتصادی، توجه بیش از پیش به منابع تأمین‌کننده آب و تأسیسات زیربنایی آن، به‌ویژه شبکه‌های توزیع آب و بهره‌گیری از این سامانه‌ها با بالاترین راندمان، یکی از مهم‌ترین راهکارهای جلوگیری از بحران آب در آینده است. یکی از مهم‌ترین اقداماتی که باید در جهت بهبود کیفیت مدیریت شبکه‌های توزیع آب و استفاده بهینه از این شبکه‌ها صورت گیرد، کنترل و کاهش آب بدون درآمد<sup>2</sup> است. آب بدون درآمد به تفاوت بین حجم آب شرب اندازه‌گیری‌شده که وارد شبکه می‌شود با مقدار آب اندازه‌گیری‌شده که در زمان مشخص از شبکه توزیع خارج و یا مصرف می‌شود،

<sup>3</sup> World Bank

<sup>4</sup> World Health Organization

<sup>1</sup> United Nations

<sup>2</sup> Non-Revenue Water

82% کاهش می‌یابد. چنین تفاوت قابل توجهی در مقدار کاهش نشت، برآورد مقدار دقیق توان فشار را برای تخمین میزان نشت یک شبکه الزامی می‌کند (Greyvenstein and van Zyl, 2007).

بنابراین تجزیه و تحلیل رابطه نشت- فشار، شناخت پارامترها و مکانیسم‌های تأثیرگذار بر آن و تأثیرپذیر از آن، بررسی چگونگی تأثیر فشار بر مواد لوله و شکل منافذ و درک اندرکنش نشت با شرایط محیطی اطراف آن، در فهم رابطه بین دبی خروجی از محل نشت و میزان فشار موجود در شبکه‌های توزیع آب، علی‌رغم تحقیقات اندک، همواره مورد توجه محققان قرار داشته است.

تاکنون تحقیقات اندکی بر روی شرایط محیطی اطراف محل نشت انجام شده که برخی از آنها (AWWA<sup>1</sup>, Guo؛ Walski et al., 2009؛ Coetzer et al., 2006؛ 1999؛ De Paola et al., 2014؛ et al., 2013) نشان می‌دهد که شرایط محیطی اطراف لوله می‌تواند بر روی دبی خروجی از محل نشت تأثیرگذار باشد و در مقابل برخی دیگر از تحقیقات (Franchini and Lanza, 2014) تأثیر شرایط محیطی بر دبی نشت را کاملاً رد می‌کنند.

همچنین تحقیقاتی نیز در مورد رفتار سطح مقطع نشت صورت گرفته است (Cassa؛ Cassa et al., 2006 & 2010؛ Ferrante et al., 2009 & van Zyl, 2008 & 2013؛ Massari et al., 2011؛ Massari, 2012؛ Ferrante, 2012؛ و al., 2012) که در تازه‌ترین این تحقیقات، می‌توان به تحقیق (Fox et al., 2016) اشاره نمود. این تحقیق در دو بعد آزمایشگاهی و عددی و با هدف بررسی تأثیر شرایط محیط متخلخل خارجی، تحت تعامل سه عامل نشت، رفتار سازه‌ای و هیدرولیک خاک، بر روی رفتار ترک طولی لوله پلی‌اتیلن انجام شد. نتیجه حاصل از این تحقیق نشان داد که وجود یک محیط متخلخل خارجی ایده‌آل بر روی رابطه نشت- فشار تأثیر مستقیم گذاشته و در محل نشت باعث افت فشار می‌شود که بایستی تأثیر این عامل را در رابطه لحاظ نمود. از طرفی افزایش بارگذاری از طریق افزایش فشار داخل لوله، بر روی سطح مقطع نشت تأثیر گذاشته و موجب افزایش سطح مقطع نشت می‌شود.

شبکه‌های توزیع آب امر شناخته‌شده‌ای می‌باشد و شاید بیشترین اثر را بر روی نشت داشته باشد (Tabesh, 1998). باوجود اهمیت فراوان رابطه بین نشت و فشار و چگونگی تعامل این دو عامل با یکدیگر، تاکنون رابطه جامعی برای بیان وابستگی بین نشت و فشار موجود در شبکه ارائه نشده است. مطالعات انجام‌شده در این زمینه نیز شامل یک سری روابط و نتایج آزمایشگاهی یا میدانی بوده و نتایج حاصل از آن‌ها بر روی شبکه‌های توزیع آب شهری دارای پراکندگی زیادی است. مبنای شکل‌گیری رابطه نشت- فشار، رابطه‌ای است که اولین بار توسط توریچلی (رابطه 1) ارائه شده است (Ferrante, 2012):

$$Q_l = C_d A_0 \sqrt{2gH} = kH^{0.5} \quad (1)$$

که  $Q_l$  دبی خروجی از محل نشت،  $C_d$  ضریب تخلیه دبی،  $A_0$  سطح مقطع نشت،  $g$  شتاب گرانش زمین  $k$  ضریب نشت برابر  $C_d A_0 \sqrt{2g}$  و  $H$  هد فشار داخل لوله است.

در ادامه تحقیقات، تئوری FAVAD، که در آن برای منافذ نشت دو سطح مقطع ثابت و متغیر در نظر گرفته شده و توان نشت ( $n$ ) در بازه‌ای بین 0/5 تا 2 پیش‌بینی می‌شود (Lambert, 1997) و نیز رابطه پیشنهادی (Thornton and Lambert, 2005) (رابطه 2)، به‌منظور اعمال رابطه (1) به نشت در لوله‌ها، مطرح گردید که مبنای بیشتر تحقیقات انجام شده تاکنون است:

$$Q_l = kH^n \quad (2)$$

که  $n$  توان فشار است.

تعدادی از مطالعات میدانی و آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی نشت، نشان می‌دهد که توان فشار می‌تواند به‌طور قابل توجهی بالاتر از مقدار تئوری 0/5 و به‌طور معمول بین 0/5 تا 2/79 با متوسط 1/15 باشد (Farley and Trow, 2003). چنین تفاوتی در توان فشار، نقش مهمی را در رفتار نشت از یک سیستم بازی می‌کند و در نتیجه پیامدهای مهمی را برای مدیریت فشار، انتخاب مواد و نگهداری از سامانه‌های موجود دارد. همچنین تحقیقات نشان داده که اگر فشار شبکه توزیع آب به نیمی از مقدار خود کاهش یابد، نرخ جریان خروجی از محل نشت برای توان‌های 0/5، 1/0 و 2/5، به ترتیب به میزان 29%، 50% و

<sup>1</sup> American Water Works Association

در ادامه این بخش به برخی از تحقیقات مهمی که نتایج آن با نتایج حاصل از این تحقیق مرتبط خواهد بود، اشاره می‌شود.

Coetzer et al. (2006) با هدف بررسی هیدرولیکی رفتار یک بازشدگی کوچک به صورت سوراخ، به بررسی آزمایشگاهی روی لوله‌های پلاستیکی کلاس 6 با قطر 110 میلی‌متر تنها برای جریان‌های آشفته (عدد رینولدز بیشتر از 4,000) پرداختند. آن‌ها میزان نشت را به ازای فشارهای مختلف اندازه‌گیری کرده و از داده‌های حاصل به منظور برآورد ضرایب و توان فشار استفاده کردند. متغیرهای مورد مطالعه در تحقیق ایشان عبارتند از: جنس لوله (UPVC و HDPE)، قطر سوراخ (1 و 2 میلی‌متر)، شرایط اطراف لوله (هوا، آب و Glass Bead (دانه‌های کوچک، گرد یا مهره‌های چندضلعی ساخته شده از شیشه شفاف یا رنگی)) و نوسانات فشار کوتاه‌مدت (وجود نوسان یا عدم وجود آن). نتایج حاصل از یافته‌های این محققین نشان می‌دهد که توان فشار در حالت تخلیه به هوای آزاد و تحت شرایط ایده‌آل بسیار به مقدار تئوری 0/5 نزدیک است. رفتار نشت در حالت مستغرق در آب و مدفون در Glass Bead، مشابه بوده ولی به طور قابل توجهی متفاوت از نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد است. همچنین توان فشار در حالت تخلیه نشت در آب و Glass Bead، به طور قابل توجهی کمتر از 0/5 است. همچنین نوسانات فشار هیچ اثر قابل توجهی بر رفتار نشت ندارد. با توجه به رفتار هیدرولیکی پیچیده نشت، اغلب اوقات تعیین یک ضریب تخلیه ثابت ممکن نبوده و معمولاً ضریب تخلیه به عنوان تابعی از عدد رینولدز بیان می‌شود. (Walski et al. 2009) لوله مورد آزمایش خود را داخل یک تانک حاوی آب تمیز مستغرق کرده و به طور مستقیم به لوله‌های تحت فشار متصل کردند. آن‌ها 40 آزمون بر روی لوله‌های PVC با قطرهای بین 25 تا 150 میلی‌متر و با ایجاد نشت مصنوعی به شکل ترک‌های طولی و محیطی انجام دادند. همچنین برای مقایسه لوله‌ها با جنس‌های مختلف، یک لوله مسی به قطر 31 میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. طیف وسیعی از فشارها از حدود 7 متر تا حدود 49 متر اعمال گردید. در نهایت با اندازه‌گیری دبی

نشت و فشار مقادیر ضریب نشت (k) و توان نشت (n) در رابطه (1) تعیین گردید که نتایج حاصل در جدول 1 آمده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، علی‌رغم اهمیت تأثیر شرایط محیطی اطراف لوله بر روی دبی خروجی از محل نشت، مطالعات بسیار اندکی در این زمینه انجام شده است. بنابراین در این تحقیق با رفتار سنجی و مطالعه بر روی رفتار جت هیدرولیکی آب بدون تأثیر شرایط مرزی دیواره بعد از بازشدگی و نوسانات فشار در هسته پتانسیل جت مستغرق و نواحی مجاور آن، به بررسی و تحلیل عددی رفتار نشت در حالت قرارگیری لوله به صورت مستغرق در آب پرداخته می‌شود. همچنین از جمله نقاط قوت این تحقیق می‌توان به انجام یک تحلیل عددی با استناد به نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی اشاره کرد.

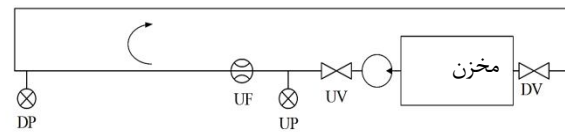
**جدول 1** نتایج داده‌های آزمایشگاهی برای توان n و ضریب k در تحقیق (Walski et al. 2009)

نوع منفذ	ضریب نشت (k)	توان فشار	منفذ نشت (mm)	قطر لوله (mm)
شکاف طولی	0/04	0/51	25	25
شکاف طولی	0/022	0/58	25	50
شکاف طولی	0/028	0/54	25	75
شکاف طولی	0/051	0/48	25	100
شکاف طولی	0/025	0/74	25	150
شکاف طولی	0/085	0/59	50	25
شکاف طولی	0/082	0/69	50	50
شکاف طولی	0/046	0/76	50	75
شکاف طولی	0/107	0/52	50	100
شکاف طولی	0/073	0/67	50	150
شکاف طولی (لوله مسی)	0/110	0/55	25	25
منفذ دایره‌ای	0/022	0/47	0/3	50
منفذ دایره‌ای	0/022	0/47	0/3	100
شکاف پیرامونی	0/190	0/54	58	37
شکاف پیرامونی	0/270	0/53	78	50

## 2- معرفی مجموعه آزمایشگاهی

پلان مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده همراه با جزئیات مربوطه در شکل 1 و نمایی از مجموعه آزمایشگاهی در

شکل 2 نشان داده شده است.



**شکل 1** پلان مجموعه آزمایشگاهی  
 UV (DV): شیر بالادست (پایین دست)، UP: فشارسنج  
 بالادست، UF (DF): فلومتر بالادست (پایین دست)



**شکل 2** نمایی از مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده

فولادی نیز با توجه به شکست معمولی است که عمدتاً برای این جنس لوله‌ها بر اثر خوردگی رخ می‌دهد که موجب شباهت هر چه بیشتر مدل آزمایشگاهی به آنچه که در واقعیت وجود دارد، می‌شود. نشت‌ها به صورت مصنوعی ایجاد شده‌اند و به همین منظور، برای ایجاد منفذ مدور در لوله فولادی از دریل و مته آهنی استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری دبی نشت، از روش حجمی استفاده شده است؛ به این ترتیب که ابتدا حجم نشت در مدت‌زمان مشخص داخل ظرفی جمع‌آوری و علامت‌گذاری شده و با استفاده از ترازوی دیجیتال کالیبره‌شده، وزن آب خروجی از محل نشت به دست آمده است. سپس با داشتن چگالی آب، حجم آب محاسبه و در نهایت با تقسیم حجم نشتی به مدت‌زمان آزمایش، دبی متوسط نشت محاسبه شده است. لازم به ذکر است که چگالی آب در ابتدا با استفاده از دو استوانه مدرج 100 و 1000 میلی‌لیتری و ترازوی دیجیتال محاسبه و برابر  $0/998 \text{ gr/cm}^3$  به دست آمده است.

### 3- معرفی مدل عددی

نرم‌افزار انسیس فلونت از قدرتمندترین نرم‌افزارها در مدل‌سازی جریان سیال است. این نرم‌افزار با به‌کارگیری روش حجم محدود در هندسه گسسته‌سازی شده محیط جریان، پارامترهای هیدرولیکی جریان آرام و آشفته را تخمین می‌زند. لذا با در نظر گرفتن معادلات پیوستگی، معادلات ناویر استوکس آشفته و مدل ریاضی آشفتگی مناسب برای مدل‌سازی جریان، پارامترهای هیدرولیکی مورد نظر محاسبه می‌شوند. هندسه جریان مدل‌شده در نرم‌افزار انسیس<sup>1</sup>، کاملاً مطابق با هندسه مجموعه آزمایشگاهی است که دلیل این امر دقت هرچه بیشتر پارامترهای هیدرولیکی جریان در مدل عددی و صحت‌سنجی مناسب‌تر نتایج بوده است. برای شبکه‌بندی هندسه جریان نیز از نرم‌افزار انسیس ICEM استفاده شد که در شکل 3 نشان داده شده است.

برخی نقاط از جمله محل فشارسنج‌ها در طول مجموعه آزمایشگاهی و محل نشت، که در مجموعه آزمایشگاهی

تمامی لوله‌های به‌کاررفته در ساخت این مجموعه آزمایشگاهی، ترکیبی از لوله‌های فولادی و پلی‌اتیلن فشارقوی با قطر اسمی 110 میلی‌متر است که در ساخت آن تمامی استانداردها و محدودیت‌های مربوط به تجهیزات اندازه‌گیری رعایت شده است. قرائت فشار داخل لوله با استفاده از دو فشارسنج کالیبره شده که در ابتدا و انتهای لوله آزمایش نصب شده بود، انجام شده است که علت استفاده از دو فشارسنج، محاسبه فشار متوسط در لوله آزمایش بوده است. برای اندازه‌گیری دبی ورودی به سیستم از یک فلومتر الکترومغناطیسی در ابتدای مجموعه آزمایش استفاده شده است. آزمون‌ها بر روی یک لوله فولادی قدیمی، به قطر 110 میلی‌متر و با نشت مصنوعی مدور انجام شده است. دلیل ساخت مجموعه با استفاده از لوله‌های با قطر 110 میلی‌متر، استفاده از این قطر لوله‌ها، به‌عنوان اندازه رایج مورد استفاده در شبکه‌های توزیع آب شهری است. نوع نشتی در نظر گرفته‌شده برای لوله

<sup>1</sup> ANSYS Geometry

آزمون‌های انجام شده در مجموعه آزمایشگاهی عبارت‌اند از:  
 - شرایط مرزی ورودی سرعت<sup>2</sup>: شامل مقدار کمیت سرعت ورودی، شکل پروفیل سرعت ورودی و تخمین پارامترهای انرژی جنبشی آشفته و نرخ استهلاک انرژی آشفته در ورودی.

- شرایط مرزی خروجی فشار<sup>3</sup>: شامل مقدار کمیت نسبی فشار در خروجی، تخمین احتمال بروز جریان برگشتی در خروجی و تخمین پارامترهای انرژی جنبشی آشفته و نرخ استهلاک انرژی آشفته ناشی از جریان برگشتی مذکور در خروجی.

- شرایط مرزی دیواره<sup>4</sup>: شامل تابع دیواره با شرایط استاندارد<sup>5</sup>، ضریب زبری دیواره و تخمین مقدار متوسط ارتفاع ناشی از زبری داخل لوله‌ها در مجموعه آزمایشگاهی.

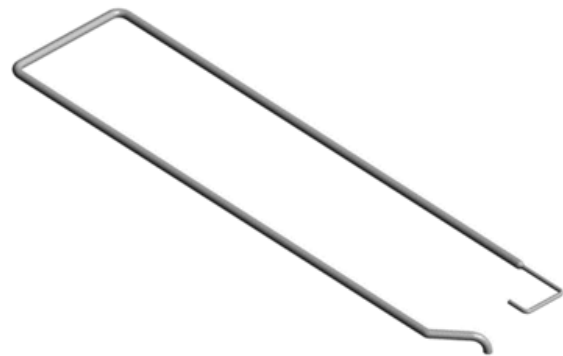
#### 4- نتایج

با توجه به پیچیدگی‌های اندرکنش سیال و محیط خاک در مدل عددی، می‌توان انتظار داشت که نشت در خاک با توجه به پارامترهای فیزیکی خاک اطراف لوله، رفتار متفاوتی داشته باشد. به‌طور مثال اگر دانه‌بندی خاک از نوع درشت‌دانه باشد، محتمل است هنگام نشت از لوله، سیال از طریق خاک درشت‌دانه زهکش شود. در طرف مقابل اگر دانه‌بندی خاک از نوع ریزدانه باشد، احتمال زهکشی آب کمتر بوده و لوله در محل نشت به حالت مستغرق در سیال درآید. در زمان انجام این تحقیق، با توجه به پیچیدگی‌های اندرکنش سیال و خاک و عدم وجود امکانات کافی، امکان مدل‌سازی آزمایشگاهی در حالت مدفون در خاک فراهم نشد. بنابراین در این تحقیق، برای بررسی تأثیر شرایط محیطی بر روی دبی نشت، یک حالت حدی با فرض اینکه بر اثر نشت از لوله خاک اطراف لوله اشباع و سپس کاملاً شسته شده و لوله به حالت مستغرق درآمده باشد، در نظر گرفته شده است.

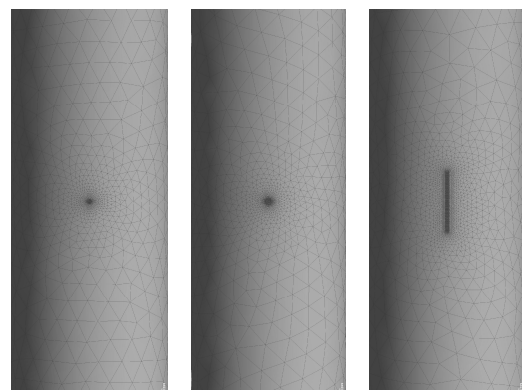
در این بخش با ذکر مقدماتی از مدل‌ها، نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی نشت در

گزارش‌گیری از آن نقاط انجام می‌شود، دارای شبکه‌بندی متراکم بوده و در سایر نقاط از شبکه‌بندی مناسب استفاده شده است. شکل 4 نمونه‌ای از شبکه‌بندی با تراکم مناسب در طول لوله و با تراکم بالا در اطراف محل ترک را نشان می‌دهد. در شبکه‌بندی هندسه جریان از سلول شش‌وجهی استفاده شد. یکی از مشخصه‌های اصلی کیفیت شبکه‌بندی، Orthogonal Quality بوده که هر چه به مقدار 1 نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده کیفیت مطلوب آن است. با توجه به شبکه‌بندی اعمال شده، متوسط کیفیت شبکه<sup>1</sup>، برابر 0/856 تولید شده است. سایر مشخصات به شرح زیر می‌باشند:

Maximum Aspect Ratio = 1.2  
 Number of Cells = 380000  
 Number of Cell Faces = 700000



شکل 3 هندسه جریان 3 بعدی مدل شده در محیط نرم‌افزار ANSYS Fluent



شکل 4 شبکه‌بندی بخشی از لوله با تراکم مناسب در طول لوله و تراکم بالا در محل نشت

شرایط مرزی در هندسه جریان ترسیم شده، با توجه به

<sup>2</sup> Velocity Inlet

<sup>3</sup> Pressure Outlet

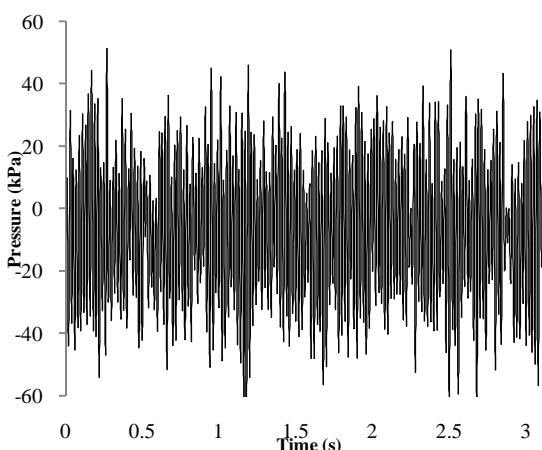
<sup>4</sup> Wall

<sup>5</sup> Standard Wall Function

<sup>1</sup> Mesh Orthogonal Quality

مدل‌های ریاضی آشفتگی<sup>1</sup> RANS، معیارهای مذکور باید برای صحت سنجی مدنظر قرار گیرند. شکل 5 نوسانات فشار استاتیکی در محل هسته پتانسیل جت مستغرق را نشان می‌دهد. به دلیل بالا بودن سرعت در محل هسته پتانسیل جت، مقادیر فشار متوسط نسبتاً کم هستند، اما به دلیل مستغرق بودن محل نشت و تشکیل لایه برشی آزاد در اثر حرکت جریان، نوسانات فشار استاتیکی زیاد است. عمده تغییرات فشار استاتیکی در محل‌های مختلف، تا چند کیلوهرتز نوسان دارند.

در شکل 5، به دلیل اینکه جت مستغرق پس از خروج از روزنه یا ترک، باعث تشکیل لایه برشی در مجاورت هسته پتانسیل جت می‌شود؛ لذا لایه مذکور با ایجاد ساختارهای چرخشی ثانویه کوچک و بزرگ (ادی‌ها با مقیاس‌های طولی گوناگون)، آشفتگی را تولید می‌نماید. آشفتگی ایجاد شده در مجاورت هسته پتانسیل، باعث ایجاد گرادیان‌های فشار در تمامی جهات شده و بخشی از انرژی جنبشی آشفته صرف ایجاد گرادیان‌های مذکور می‌شود. به دلیل تنوع جهات و مقادیر مختلف این گرادیان‌های فشار، نوسانات فشار و متعاقباً نوسانات سرعت ایجاد شده و شرایطی مانند نوسانات فشار رندوم را بر جریان حاکم می‌دارد. لذا در قسمت مجاور هسته پتانسیل جت به علت بروز آشفتگی بیشتر، دامنه نوسانات فشار در مثبت و منفی بیشتر بوده و فشار منفی نشان داده شده در شکل 5 ناشی از این موضوع است.



شکل 5 نمودار نوسانات فشار در محل هسته پتانسیل جت مستغرق با گذر زمان

حالت مستغرق در سیال آب ارائه شده است. در مدل آزمایشگاهی، از یک لوله فولادی با قطر 110 میلی‌متر و با منفذ نشتی به قطر 5 میلی‌متر استفاده شد. بازه وسیعی از فشارها بین حداقل حدود 5 متر تا حداکثر حدود 50 متر و هر بار به ازای افزایشی در حدود 5 متر به سیستم اعمال شد. برای اطمینان از صحت و دقت نتایج حاصل، هر یک از آزمایش‌ها به ازای هر فشار اعمالی به سیستم حداقل 3 بار و هر بار به مدت حدود 2 دقیقه تکرار شد. جریان خروجی از محل نشت کاملاً به هوای آزاد تخلیه شده و هیچ‌گونه مانعی در برابر جریان آب وجود نداشت. همچنین برای اطمینان از عملکرد مناسب مدل عددی منتج از داده‌های مدل آزمایشگاهی، علاوه بر اندازه‌گیری دبی خروجی از محل نشت، فشار موجود در سیستم در ابتدا و انتهای لوله مورد آزمایش با استفاده از دو فشارسنج پنوماتیک و همچنین سرعت جریان ورودی در ابتدای لوله آزمایش، با استفاده از یک فلومتر اندازه‌گیری شد.

مدل‌سازی عددی نیز در این حالت با مطالعه رفتار جت مستغرق آب، بررسی نوسانات فشار در محل بازشدگی و نشت مستغرق انجام شد. نتایج این مدل‌سازی نیز مشابه مدل آزمایشگاهی، تنها برای لوله فولادی با منفذ نشت به شکل سوراخ به قطر 5 میلی‌متر و به ازای ترازهای ارتفاع استاتیکی آب در مقادیر 1، 2 و 3/5 متر روی لوله ارائه شده است. در این مدل‌سازی برای بررسی نوسانات فشار در محل هسته پتانسیل جت مستغرق و مجاورت آن، ابتدا حرکت جت آب در یک مخزن با نسبت بازشدگی زیاد (عدم تأثیر شرایط مرزی دیواره مخزن بر دینامیک هسته جت در محل بازشدگی) مانند لایه برشی آزاد، به ازای ترازهای ارتفاع استاتیکی مختلف، مدل‌سازی شده تا تأثیر نوسانات فشار در محل هسته پتانسیل جت هنگام بازشدگی بررسی شود. هسته پتانسیل جت به بخشی از المان‌های سیال اطلاق می‌شود که تکانه خطی آن با تکانه خطی مرز ورودی جریان برابری می‌کند. بر اساس مطالعات انجام شده توسط (Albertson and Dai (1950، زاویه همگرایی داخلی هسته پتانسیل جت مستغرق بدون اثر شرایط مرزی دیواره می‌بایست در حدود 4 الی 7 درجه باشد و پروفیل سرعت در راستای جریان، باید از تابع احتمال نرمال پیروی نماید. لذا به دلیل استفاده از

<sup>1</sup> Reynolds Averaged Navier Stokes

در طی این فرآیند، با برهم‌کنش تانسور تنش رینولدز و تانسور گرادیان سرعت که شامل تانسور متقارن کرنش و پادمقارن چرخش است، نوسانات تشکیل می‌شوند.

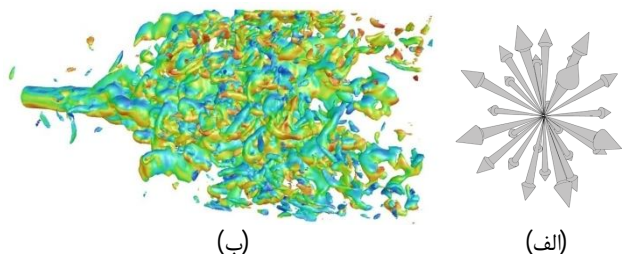
مطالعه و رفتار سنجی متوسط نوسانات فشار مذکور در محل نشت در محدوده هسته پتانسیل جت و نواحی مجاور آن، مقدار تخمینی فشار متوسط در محل نشت را پیش‌بینی می‌نماید. شکل 7 پروفیل متوسط سرعت در راستای جریان بر اساس فشار متوسط حاصل از نتایج مدل عددی در محل نشت و در حالت مستغرق در آب، در فواصل مختلف از محل نشت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است شکل پروفیل از نوع تابع احتمالی نرمال بوده و با دور شدن از محل نشت، نقطه اوج نمودار کاهش می‌یابد. هسته پتانسیل جت در شکل 7 به‌خوبی مشخص است؛ لذا نتایج تحلیل عددی با پیش‌بینی Albertson and Dai (1950) در مورد پروفیل سرعت کاملاً منطبق است.

در خصوص نحوه مدل‌سازی جریان آشفته، لازم به توضیح است که استفاده از مدل آشفتگی  $LES^2$  در درجه اول برای تخمین با دقت کافی، نیازمند به‌کارگیری شبکه‌بندی پرتراکم است. ثانیاً در صورت استفاده از مدل آشفتگی مذکور پس از استخراج پارامترهای هیدرولیکی نوسانی جریان نظیر سرعت و فشار، مانند شکل شماره 5، با عنایت به این موضوع که پارامتر هیدرولیکی، سری زمانی است و مقدار آن در هر لحظه تغییر می‌کند، می‌بایست تابع متوسط‌گیر مناسب در سری زمانی مذکور مورد استفاده قرار گیرد. به‌کارگیری مدل‌سازی  $DNS^3$  نیازمند شبکه بندی بسیار متراکم، در حد مقیاس‌های ریز کولموگوروف است. لذا با عنایت به حجم محاسبات و زمان مصرفی، استفاده از آن نیازمند ابرکامپیوترهای محاسباتی است که در حال حاضر در کشور موجود نیست. لازم به توضیح است تعداد المان‌ها در واحد حجم (تراکم شبکه‌بندی حجمی مدل)، حدوداً مساوی با عدد رینولدز به توان 9 به 4 (2/25) (در همان محدوده حجمی) است. این بدین معناست که در یک مدل آشفته نظیر نشت مجرای آب با سرعت 5 متر بر ثانیه، از یک ترک 5 سانتی‌متری در حالت مستغرق با عدد رینولدز  $25 \times 10^4$ ، می‌بایست در هر

لذا نهایتاً نتایج با آنچه توسط مدل‌های آشفتگی RANS تخمین زده می‌شود، بسیار نزدیک خواهد بود. RANS. اعمال عملگر متوسط‌گیر رینولدز در معادله ناویر استوکس است.

شکل 6- الف بیانگر کمیت نرده‌ای بزرگی چرخش<sup>1</sup> است. هر کدام از قسمت‌های مختلف مدل، دارای مقادیر مختلف چرخش هم در بزرگی و هم در راستا هستند. لذا با توجه به تراکم المان‌ها و تعدد جهات محور چرخش به‌دلیل وجود آشفتگی، نمی‌توان تمامی محورهای چرخش را در قالب یک شکل به نمایش درآورد. این بدین معنی است که بخش‌های مختلف از مدل که دارای چرخش هستند، در کل بی‌نهایت محور چرخش را اتخاذ نموده؛ لذا نمایش تمامی محورهای چرخش در یک عکس امکان‌پذیر نیست. به‌همین دلیل با توجه به نرده‌ای بودن کمیت بزرگی چرخش، می‌توان آن را با به‌کارگیری رنگ‌بندی در قالب یک تصویر به شکل 6- ب به نمایش درآورد.

همان‌طور که شکل 6 نشان می‌دهد، تشکیل ادی‌ها تأثیر به‌سزایی در تولید نوسانات دارد. ادی‌ها ساختارهای چرخش‌واری هستند که از لایه برشی تولید و نقش اصلی آن‌ها ایجاد آشفتگی در جریان است. آن‌ها با اخذ انرژی از متوسط جریان و تغییر در ابعادشان، انرژی جنبشی آشفته را جابه‌جا و مستهلک می‌کنند. با اخذ انرژی، ابعاد ادی‌ها بزرگ‌تر و سپس با واپاشی آن‌ها به اندازه‌های کوچک‌تر (ناپایداری به دلیل داشتن انرژی بالا)، استهلاک انرژی جریان آغاز می‌شود. لذا کاهش سرعت در فواصل دورتر از محل نشت کاملاً مشهود است.



شکل 6 ابعاد ادی‌های مدل شده در ناحیه کاملاً توسعه‌یافته جریان، بعد از جت مستغرق خارج شده از محل نشت (رنگ‌بندی، چرخش ادی‌ها در راستای محور عمود بر جهت جریان  $(s^{-1})$ )

<sup>2</sup> Large Eddy Simulation

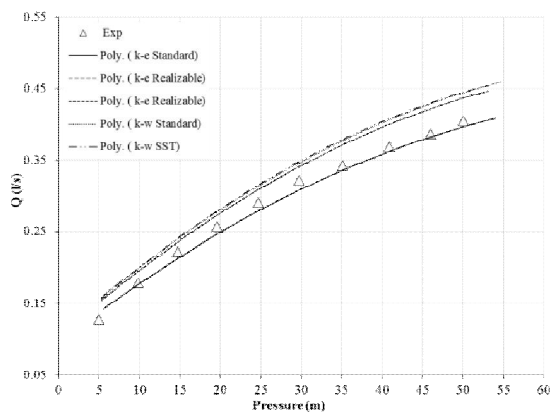
<sup>3</sup> Direct Numerical Simulation

<sup>1</sup> Vorticity Magnitude



**جدول 2** جدول ضرایب مدل‌های ریاضی آشفتگی مختلف

ضرایب	مدل آشفتگی
C <sub>μ</sub> = 0.09 C <sub>1ε</sub> = 1.44 C <sub>2ε</sub> = 1.92 TKE Prandtl Number = 1 TDR Prandtl Number = 1.3	مدل آشفتگی Standard k-ε
C <sub>μ</sub> = 0.0845 C <sub>1ε</sub> = 1.42 C <sub>2ε</sub> = 1.68	مدل آشفتگی RNG k-ε
C <sub>2ε</sub> = 1.9 TKE Prandtl Number = 1 TDR Prandtl Number = 1.2	مدل آشفتگی Realizable k-ε
Alpha* = 1 Alpha = 0.52 Beta* = 0.09 Beta = 0.072 TKE Prandtl Number = 2 SDR Prandtl Number = 2 Production Limiter Clip Factor = 10	مدل آشفتگی Standard k-ω
Alpha* = 1 Alpha = 0.52 Beta* = 0.09 a1 = 0.31 Beta (inner) = 0.075 Beta (outer) = 0.0828 TKE Inner Prandtl Number = 1.176 TKE Outer Prandtl Number = 1 SDR Inner Prandtl Number = 2 SDR Outer Prandtl Number = 1.168 Production Limiter Clip Factor = 10	مدل آشفتگی SST k-ω



**شکل 8** نمودار مقایسه نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج مدل‌سازی عددی در لوله فولادی برای معادلات آشفتگی مختلف

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نشان داد که مدل ریاضی آشفتگی Standard k-ε دارای نتایج مناسب‌تری نسبت سایر مدل‌های آشفتگی است که برای مدل‌سازی عددی در این تحقیق، از این مدل آشفتگی استفاده شده است. جدول 3، رتبه‌بندی دقت مدل‌های مختلف آشفتگی در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی

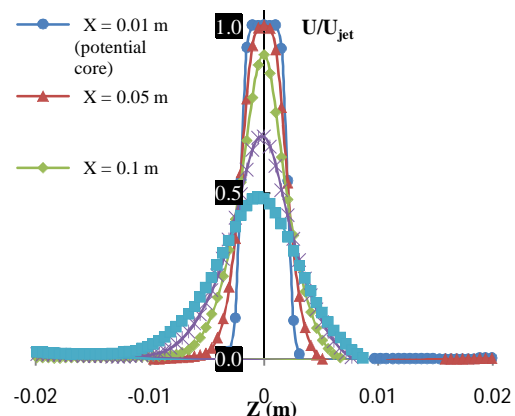
سانتی‌متر طول، حداقل 2236 المان یا حجم کنترل برقرار شود. DNS معادله ناویر استوکس را بدون به‌کارگیری مدل آشفتگی تحلیل می‌نماید. زیرا مقیاس‌های طولی حجم کنترل آن قدر کوچک هستند تا بتوانند ادی‌های مستهلک‌کننده انرژی را مستقیماً تحلیل نمایند (ریز مقیاس‌های کولموگروف).

برای تخمین هرچه دقیق‌تر پارامترهای هیدرولیکی جریان در منافذ نشت مدور، از پنج مدل آشفتگی دو معادله‌ای مختلف استفاده گردیده است. مدل‌های آشفتگی ریاضی مذکور به شرح زیر است:

- Standard k-ε
- RNG k-ε
- Realizable k-ε
- Standard k-ω
- SST k-ω

ضرایب به‌کار رفته در هر یک از مدل‌های آشفتگی، در جدول 2 آمده است.

با مقایسه نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از تحلیل عددی به کمک پنج مدل آشفتگی، مدلی که بیشترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد، برای مدل‌سازی و توسعه مدل عددی انتخاب می‌شود.



**شکل 7** نمودارهای پروفیل سرعت در قسمت فوقانی محل نشت

در شکل 8 نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج تحلیل عددی در لوله فولادی برای معادلات آشفتگی مختلف، نشان داده شده است (ترتیب نشان‌گرها برای خطوط برازش داده شده به داده‌ها، به ترتیب از پایین‌ترین خط در نمودار به سمت بالاترین خط است).

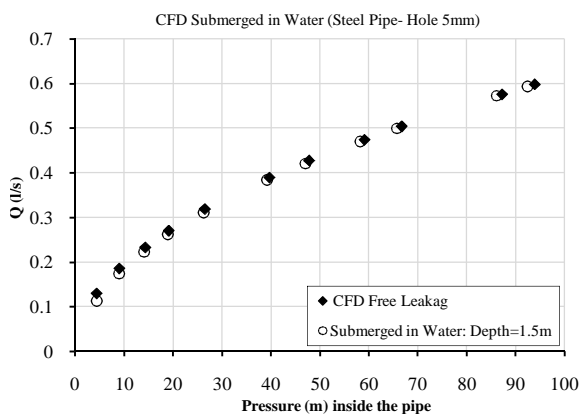
**جدول 3** جدول مقایسه و رتبه‌بندی مدل‌های ریاضی آشفتگی مختلف در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی جریان

رتبه مدل آشفتگی SST k- $\Omega$	رتبه مدل آشفتگی Standard k- $\Omega$	رتبه مدل آشفتگی Realizable k- $\epsilon$	رتبه مدل آشفتگی RNG k- $\epsilon$	رتبه مدل آشفتگی Standard k- $\epsilon$	ابعاد منفذ نشت
5	4	3	2	1	3/3 mm
5	4	3	2	1	5 mm
5	3	4	2	1	1/3×42 mm <sup>2</sup>
15	11	10	6	<u>3</u>	مجموع

به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 1 متر و شکل 10، نمودار نتایج مدل‌سازی عددی نشت در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 1 متر در مقابل نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد را نشان می‌دهد.

جدول 6، داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای نشت در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 2 متر و شکل 11، نمودار نتایج مدل‌سازی عددی نشت در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 2 متر در مقابل نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد را نشان می‌دهد.

جدول 7، داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای نشت در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 3/5 متر و شکل 12، نمودار نتایج مدل‌سازی عددی نشت در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 3/5 متر در مقابل نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد را نشان می‌دهد.

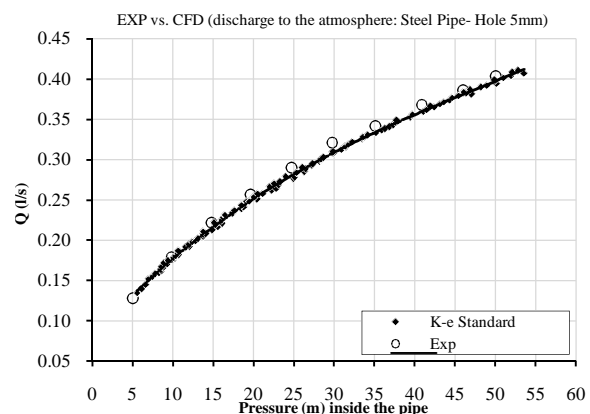


شکل 10 نمودار مقایسه نتایج مدل‌سازی نشت در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع 1 متر با نتایج مدل‌سازی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد برای سوراخ 5 میلی‌متری لوله فولادی

جریان، بر اساس نزدیک‌بودن مقادیر پیش‌بینی‌شده به مقادیر آزمایشگاهی را نشان می‌دهد (با توجه به نزدیک بودن هر کدام از مدل‌های ریاضی آشفتگی به مقادیر آزمایشگاهی در هر روزنه، به ترتیب امتیاز 1 الی 5 اختصاص یافته است).

همچنین لازم به توضیح است که در مدل‌سازی عددی برای بررسی اندرکنش بین سازه و سیال، از تلفیق روش حجم محدود و المان محدود دوطرفه استفاده شده است. به این ترتیب که بارگذاری ناشی از فشار سیال داخل لوله به‌دست آمده از تحلیل گذرا ANSYS Fluent، به روش FSI<sup>1</sup> وارد محیط گذرا ANSYS Structural می‌شود.

بنابراین برای مدل‌سازی از نتایج آزمایشگاهی و مدل آشفتگی Standard k- $\epsilon$  استفاده شد. جدول 4 داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی و شکل 9 نمودار مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی را برای سوراخ به قطر 5 میلی‌متر در لوله فولادی نشان می‌دهد. جدول 5، داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای نشت در حالت مستغرق در آب



شکل 9 نمودار مقایسه نتایج داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی برای سوراخ 5 میلی‌متری لوله فولادی

<sup>1</sup> Fluid-Structure Interaction

**جدول 4** داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای سوراخ 5 میلی‌متری لوله فولادی

شماره آزمون	دبی متوسط سیستم (lit/s)	فشار متوسط سیستم (bar)	فشار متوسط سیستم (m)	دبی نشت (lit/s)
1	8/97	0/430	4/390	0/129
2	12/86	0/881	8/999	0/185
3	16/13	1/403	14/334	0/232
4	18/74	1/870	19/098	0/270
5	22/04	2/593	26/486	0/318
6	26/96	3/887	39/699	0/389
7	29/59	4/679	47/793	0/427

**جدول 5** داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای سوراخ 5 میلی‌متری لوله فولادی در حالت مستغرق در آب به ازای

تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 1 متر

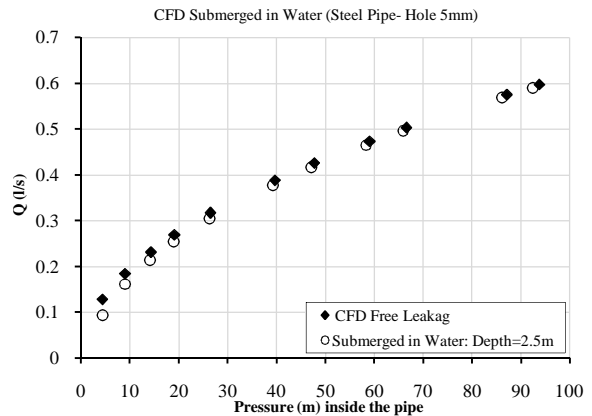
شماره آزمون	دبی متوسط سیستم (lit/s)	فشار متوسط سیستم (bar)	فشار متوسط سیستم (m)	دبی نشت (lit/s)
1	8/97	0/429	4/378	0/113
2	12/86	0/877	8/962	0/174
3	16/13	1/375	14/044	0/223
4	18/74	1/850	18/899	0/262
5	22/04	2/570	26/245	0/311
6	26/96	3/841	39/229	0/384
7	29/59	4/608	47/068	0/421
8	32/94	5/699	58/213	0/470
9	34/93	6/433	65/711	0/500
10	40/03	8/431	86/111	0/573

**جدول 6** داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای سوراخ 5 میلی‌متری لوله فولادی در حالت مستغرق در آب به ازای

تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 2 متر

شماره آزمون	دبی متوسط سیستم (lit/s)	فشار متوسط سیستم (bar)	فشار متوسط سیستم (m)	دبی نشت (lit/s)
1	8/97	0/431	4/401	0/094
2	12/86	0/881	8/996	0/162
3	16/13	1/381	14/101	0/214
4	18/74	1/860	18/994	0/255
5	22/04	2/572	26/273	0/305
6	26/96	3/848	39/302	0/378
7	29/59	4/614	47/131	0/417
8	32/94	5/715	58/339	0/465
9	34/93	6/455	65/935	0/496
10	40/03	8/431	86/119	0/569
11	41/47	9/053	92/466	0/590

آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، درصد کاهش دبی خروجی از محل نشت با افزایش تراز آب روی لوله و به ازای ترازهای ارتفاعی مختلف نشان داده شده است. با مقایسه جدول 8 با جدول 3 مشاهده می‌شود در دو حالت نشت در حالت مستغرق در آب و نشت در هوای آزاد شرایط ورودی به سیستم تغییری نکرده‌اند، یعنی دبی ورودی به سیستم در دو حالت یکسان بوده است. با مقایسه شکل‌های 10 تا 12 و جدول 8، می‌توان نتیجه گرفت که وجود ارتفاع استاتیکی سرپار آب در محل نشت و در نتیجه نوسانات فشار در محل هسته جت مستغرق (محل نشت)، بر روی دبی خروجی از محل نشت تأثیر گذاشته و مقدار آن را در مقایسه با نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد کاهش می‌دهد که مقدار این کاهش به تراز ارتفاعی استاتیکی آب روی لوله و میزان فشار داخل لوله بستگی دارد.



شکل 11 نمودار مقایسه نتایج مدل‌سازی نشت در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع 2 متر با نتایج مدل‌سازی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد برای سوراخ 5 میلی‌متری لوله فولادی

در جدول 8 با مقایسه نتایج حاصل از آزمون‌های

جدول 7 داده‌های حاصل از مدل‌سازی عددی برای سوراخ 5 میلی‌متری لوله فولادی در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع استاتیکی 3/5 متر

شماره آزمون	دبی متوسط سیستم (lit/s)	فشار متوسط سیستم (bar)	فشار متوسط سیستم (m)	دبی نشت (lit/s)
1	8/97	0/429	4/378	0/056
2	12/86	0/877	8/962	0/143
3	16/13	1/375	14/044	0/200
4	18/74	1/850	18/899	0/243
5	22/04	2/570	26/245	0/295
6	26/96	3/841	39/229	0/371
7	29/59	4/608	47/068	0/409
8	32/94	5/699	58/213	0/459
9	34/93	6/433	65/711	0/490
10	40/03	8/431	86/111	0/565

جدول 8 درصد کاهش دبی خروجی از محل نشت با افزایش تراز آب روی لوله و به ازای ترازهای ارتفاعی

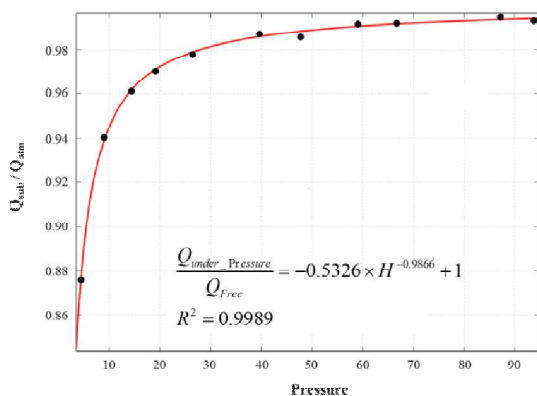
فشار سیستم (m)	نتایج آزمایشگاهی			نتایج مدل‌سازی به ازای ترازهای مختلف			
	دبی نشت (lit/s)	آزمایشگاهی	دبی نشت (lit/s)	درصد کاهش دبی خروجی	ارتفاع استاتیکی 1/0 متر	ارتفاع استاتیکی 2/0 متر	ارتفاع استاتیکی 3/5 متر
8/97	0/129	0/113	12/4	0/094	27/14	0/056	<b>56/59</b>
12/86	0/185	0/174	5/95	0/162	12/43	0/143	22/70
16/13	0/232	0/223	3/88	0/214	7/76	0/200	13/79
18/74	0/270	0/262	2/96	0/255	5/56	0/243	10/00
22/04	0/318	0/311	2/20	0/305	4/09	0/295	7/23
26/96	0/389	0/384	1/28	0/378	22/83	0/371	4/63
29/59	0/427	0/421	<b>1/27</b>	0/417	2/34	0/409	4/22

استاتیکی فشار است.

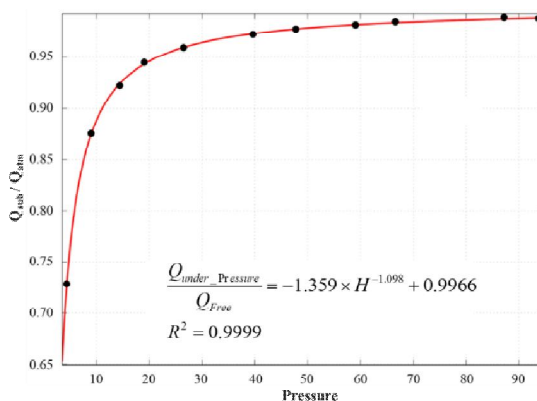
همچنین رابطه (3) را به صورت رابطه (4) نیز می توان نوشت.

$$Q_{Sub} = Q_{Atm} - \frac{D_s}{H^{n_s}} \times Q_{Atm} \quad (4)$$

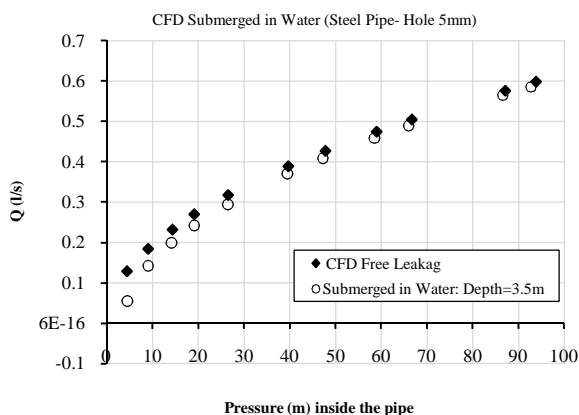
که عبارت اول سمت راست تساوی مقدار دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد و عبارت دوم سمت راست تساوی نسبتی از مقدار دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد است که مقدار آن با توجه به ارتفاع استاتیکی آب روی لوله و فشار داخل لوله تعیین می شود.



**شکل 13** نمودار نسبت دبی نشت در حالت مستغرق در آب برای تراز آب روی لوله به ارتفاع 1 متر به دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد در برابر فشار داخل لوله برای سوراخ 5 میلی متری لوله فولادی



**شکل 14** نمودار نسبت دبی نشت در حالت مستغرق در آب برای تراز آب روی لوله به ارتفاع 2 متر به دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد در برابر فشار داخل لوله برای سوراخ 5 میلی متری لوله فولادی



**شکل 12** نمودار مقایسه نتایج مدل سازی نشت در حالت مستغرق در آب به ازای تراز آب روی لوله به ارتفاع 3/5 متر با نتایج مدل سازی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد برای سوراخ 5 میلی متری لوله فولادی

هرچه تراز ارتفاعی استاتیکی آب روی محل نشت بیشتر باشد، تفاوت بیشتری بین دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد و حالت مستغرق در آب به وجود خواهد آمد.

هرچه فشار بالاتر رود به تدریج از این اختلاف کاسته شده تا جایی که در فشارهای بسیار بالا تقریباً بسیار ناچیز می شود. برای مقایسه ارتباط بین میزان نشت در حالت مستغرق به نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد، در شکل های 13 تا 15، نسبت دبی نشت در حالت مستغرق در آب به دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد در برابر فشار برای ترازهای ارتفاعی مختلف آب روی لوله ترسیم شده اند.

با توجه به شکل های 13 تا 15، مقایسه آنها با شکل های 10 تا 12 و نیز برازش های انجام شده، می توان فهمید که بین تراز ارتفاعی آب روی لوله، فشار در محل نشت (جت خروجی)، دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد و دبی نشت در حالت مستغرق، ارتباطی برقرار است که این ارتباط به صورت رابطه (3) ارائه شده است.

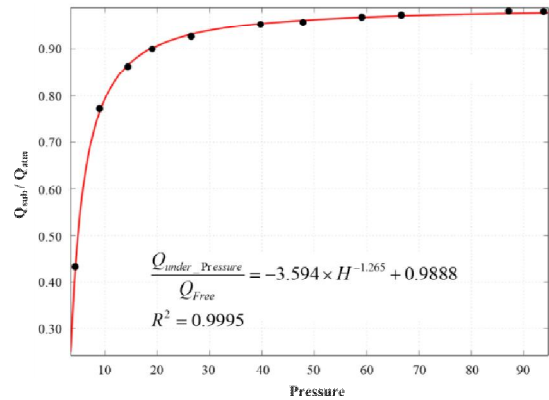
$$\frac{Q_{Sub}}{Q_{Atm}} = 1 - \frac{D_s}{H^{n_s}} \quad (3)$$

در رابطه (3)،  $Q_{Sub}$  دبی نشت در حالت مستغرق در آب،  $Q_{Atm}$  دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد،  $n_s$  توان نشت در حالت مستغرق در آب،  $D_s$  پارامتر وابسته به تراز ارتفاعی آب روی لوله (در واقع هرچه تراز ارتفاعی آب روی لوله بیشتر باشد، مقدار این پارامتر نیز بیشتر می شود که در شکل های 10 تا 12 به ازای ترازهای ارتفاعی استاتیکی 1، 2 و 3/5 متر، مقادیر آن به دست آمده است) و  $H$

روی محل نشت و میزان فشار داخل لوله بستگی دارد. هرچه تراز ارتفاع استاتیکی آب روی لوله بیشتر باشد، تفاوت بیشتری بین دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد و حالت مستغرق در آب به وجود خواهد آمد. همچنین هرچه فشار داخل لوله بالاتر رود به تدریج از این اختلاف کاسته شده تا جایی که در فشارهای بسیار بالا تقریباً به مقدار ناچیزی میل می‌کند. در نهایت با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل، ارتباطی بین فشار داخلی سیستم با نسبت دبی نشت در حالت مستغرق در آب به دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد مشاهده شد که رابطه

$$\frac{Q_{Sub}}{Q_{Atm}} = 1 - \frac{D_s}{H^{n_s}}$$

برای بیان این ارتباط ارائه شده است.



شکل 15 نمودار نسبت دبی نشت در حالت مستغرق در آب برای تراز آب روی لوله به ارتفاع 3/5 متر به دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد در برابر فشار داخل لوله برای سوراخ 5 میلی‌متری لوله فولادی

## 6- فهرست علائم

$A_o$	سطح مقطع نشت ( $m^2$ )
$C_d$	ضریب دبی
$D_s$	پارامتر وابسته به هد استاتیکی لوله (m)
$g$	شتاب گرانش زمین ( $m^2/s$ )
$H$	هد استاتیکی (m)
$k$	ضریب نشت
$n$	توان نشت
$n_s$	توان نشت در حالت مستغرق
$Q$	دبی ( $m^3/s$ )
$Q_{atm}$	دبی نشت آزاد به اتمسفر ( $m^3/s$ )
$Q_{Sub}$	دبی نشت مستغرق تحت فشار بار استاتیکی ( $m^3/s$ )
$U$	سرعت (m/s)
$U_{jet}$	سرعت جت خروجی از محل نشت (m/s)

## 7- سپاسگزاری

بدین وسیله از جناب آقای دکتر نوربخش ریاست محترم مؤسسه تحقیقاتی توربوماشین‌های آبی دانشکده مکانیک دانشگاه تهران و همکاران محترم ایشان صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نماید.

با توجه به اینکه فشار در مخرج کسر قرار دارد، عبارت دوم سمت راست تساوی با افزایش فشار کاهش می‌یابد و بنابراین مقدار دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد به دبی نشت در حالت مستغرق در آب نزدیک می‌شود. همچنین با افزایش تراز ارتفاع استاتیکی آب روی لوله مقدار پارامتر  $D_s$  افزایش می‌یابد که این افزایش موجب افزایش مقدار عبارت دوم می‌شود. در نتیجه دبی نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد از دبی نشت در حالت مستغرق در آب کمتر می‌شود.

## 5- نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی عددی نشت با استناد به نتایج آزمایشگاهی، در حالت مستغرق در آب با مطالعه روی جت مستغرق آب نشان می‌دهد که وجود آب و نوسانات فشار در نزدیکی محل جت مستغرق در محل بازشدگی، بر روی دبی خروجی از محل نشت تأثیرگذار بوده و مقدار آن را در مقایسه با نشت در حالت تخلیه به هوای آزاد کاهش می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل، اثر این کاهش فشار در فشارهای حدود 5 متر، می‌تواند تا حدود 55 درصد بر دبی خروجی از محل نشت در حالت مستغرق نسبت به حالت نشت در هوای آزاد اثرگذار باشد؛ اما در فشارهای بالای 20 متر این اثر ناچیز بوده و به زیر 10 درصد کاهش می‌یابد. البته مقدار این کاهش به تراز ارتفاع استاتیکی آب

U.S.A.

De Paola, F., Galdiero, E., Giugni, M., Papa, R., and Urciuoli, G. (2014). "Experimental investigation on a buried leaking pipe", *Procedia Engineering*, 89, 298-303.

Farley, M., and Trow, S. (Eds.), (2003). *Losses in water distribution networks: a practitioner's guide to assessment, monitoring and control*, IWA Publishing.

Ferrante, M., Massari, C., Cluni, F., Brunone, B., and Meniconi, S. (2009). "Leak discharge and strains in a polyethylene pipe", *Integrating Water Systems*, 203-208, Laiden, Netherlands.

Ferrante, M., Massari, C., Brunone, B., and Meniconi, S. (2011). "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. (2012). "Experimental investigation of the effects of pipe material on the leak head-discharge relationship", *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(8), 736-743.

Fox, S., Collins, R., and 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), 103-115.

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 Zyl, J. V., (2007). "An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes", *Aqua-Journal of Water Supply*, 56(2), 117-124.

Guo, S., Zhang, T. Q., Shao, W. Y., Zhu, D. Z., and Duan, Y. Y., (2013). "Two-dimensional pipe leakage through a line crack in water distribution systems", *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 14(5), 371-376.

Kingdom, B., Limberger, R. and Marin, P., (2006). "The challenge of reducing non-revenue water (nrw) in developing countries: how the private sector can help: a look at performance-based service contracting", *Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series*, 8, 1-52.

Lambert, A., (1997). "Pressure management / leakage relationships: theory, concepts and practical applications", *Proceeding of Minimizing Leakage in Water Supply / Distribution Systems*,

## 8- منابع

ببران، ص. و هنر بخش، ن. (1387). "بحران وضعیت آب در جهان و ایران"، فصلنامه راهبرد، سال شانزدهم، شماره 48، صص. 193-212.

تابش، م. (1395). *مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب*، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.

شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور. (1393). *شاخص آب بدون درآمد*، آدرس سایت <http://www.moe.gov.ir>

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی نهاد ریاست جمهوری. (1391). *راهنمای شناخت و بررسی عوامل مؤثر در آب به حساب نیامده و راهکارهای کاهش آن*، نشریه شماره 556، تهران، ایران.

Albertson, M. L., Dai, Y. B., Jensen, R. A., and Rouse, H., (1950). "Diffusion of submerged jets", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 115(1), 639-664.

American Water Works Association (AWWA), (1999). *Water conservation guide book No. 5, Water audits and leak detection*, American water works association (California-Nevada section) and Department of Water Resources Water Conservation Office.

Cassa, A. M., van Zyl, J. E., and Laubscher, R. F. (2006). "A numerical investigation into the behaviour of leak openings in UPVC pipes under pressure", In *WISA2006 the Water Institute of Southern Africa Biennial Conference and Exhibition*, South Africa.

Cassa, A. and van Zyl, J. (2008). "A numerical investigation into the behaviour of cracks in UPVC pipes under pressure", *10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference*, Kruger National Park, South Africa.

Cassa, A. M., van Zyl, J. E., and Laubscher, R. F. (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 head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations", *Journal of Water Supply: Research and Technology- AQUA*, 62(4), 214-223.

Coetzer, A. J., van Zyl, J. E., and Clayton, C. R. I., (2006). "An experimental investigation into the turbulent-flow hydraulics of small circular holes in plastic pipes", In *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Cincinnati, Ohio,

Department of Civil Engineering, University of Liverpool, England.

Thornton, J., and Lambert, A., (2005). "Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships", Paper to IWA Special Conference 'Leakage 2005', Halifax, Canada.

Walski, T., Whitman, B., Baron, M., and Gerloff, F., (2009). "Pressure vs. flow relationship for pipe leaks", World Environmental and Water Resources Congress, Kansas City, Missouri, U.S.A.

World Health Organization (WHO), (2001). *Leakage management and control- a best practice manual*, WHO, Geneva.

IQPC Seminar, London.

Massari, C. (2012). "Diagnosis and hydraulic characterization of pressurized pipe systems", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Perugia, Italy. 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.

Tabesh, M., (1998). "Implications of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modelling and reliability assessment of water distribution systems", Ph.D. Thesis,