



نشت یابی و مقایسه‌ی آزمایشگاهی و نظری خصوصیات جریان گذرا در لوله‌های انتقال پلی اتیلنی

مصطفی میرزایی جشنی^۱، منوچهر فتحی مقدم^{۲*}، علیرضا ثابت ایمانی^۳، اصغر اکبری^۴

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

^۴دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ مهر ۱۳۹۶

بازنگری: ۳ آذر ۱۳۹۶

پذیرش: ۲۹ آذر ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۰۶ اسفند ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

جریان گذرا

ویسکوالاستیک

سرعت موج فشاری

عدد رینولدز

اضافه فشار

چکیده: لوله‌های پلیمری به طور گسترده‌ای در سامانه‌های آبی تحت فشار استفاده می‌شوند. باید در طراحی و همچنین تفسیر سیگنال برداشت شده از ضربه قوچ برای اهداف تشخیصی، رفتار ویسکوالاستیک لوله‌های پلی اتیلنی را در نظر گرفت. هدف از مقاله‌ی حاضر نشت یابی، مقایسه‌ی آزمایشگاهی و نظری سرعت موج فشاری و اضافه فشار جریان گذرا در لوله‌های انتقال پلی اتیلنی در عدد رینولدزهای متفاوت می‌باشد. برای رسیدن به اهداف این مقاله مدلی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد و چندین آزمایش ضربه قوچ در دو حالت مدل بدون نشت و مدل با حضور نشت بر روی آن انجام گرفت. دقت نشت یابی در این مدل با افزایش عدد رینولدز افزایش یافت به طوری که بیشترین و کمترین درصد خطای نسبی مکان نشت محاسباتی و آزمایشگاهی $48/1$ و $2/02$ درصد به ترتیب برای آزمایش‌های با اعداد رینولدز 1283 و 12974 در قطر نشت 5 میلی متر بدست آمد. همچنین این تحقیق عدم دقت مناسب رابطه‌های تئوری سرعت موج فشاری و اضافه فشار را در لوله‌های انتقال پلی اتیلنی نشان می‌دهد، بطوری که سرعت موج فشاری بدست آمده از رابطه‌های تئوری کمتر از مقدار واقعی آن می‌باشد، همچنین درصد خطای نسبی میزان اضافه فشار در آزمایش‌های دارای نشت با افزایش عدد رینولدز بین مقدار آزمایشگاهی و تئوری افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

آب یکی از منابع محدود طبیعی است که بدون آن زندگی ممکن نمیباشد. امروزه با توجه به رشد جمعیت، رشد تقاضا و افزایش مصرف آب مشکلات بزرگی فراروی مدیران و تصمیم گیرندگان صنعت آب شهری در تمام کشورها وجود دارد. تلفات آب در سیستم‌های توزیع و انتقال یکی از مشکلات اصلی نه تنها در کشورهای در حال توسعه، بلکه در کل دنیا است که دلیل اصلی این موضوع، فرسودگی و سن بالای لوله‌های موجود در سیستم انتقال و توزیع است که با افزایش زمان و خیمتر نیز خواهند شد [۱]. تلفات آب به دلایل مختلفی همچون استهلاک اجزای شبکه، خوردگی لوله‌ها، قطع اتصالات، ایجاد انشعابات غیر مجاز بدست افراد غیر فنی، ضربه‌های ناشی از ساخت وسازها، وقوع پدیده ضربه قوچ، رانش‌ها و نشست‌های زمین و غیره به وقوع می‌پیوندد که اصطلاحاً به آن آب به حساب نیامده (UFW) میگویند [۲]. نشتهای ایجاد شده در یک سیستم علاوه بر تأثیر بر هدر رفت آب و انرژی در شبکه (به دلیل تلفات انرژی پمپاژ)، بر کیفیت آب، به دلیل تماس آن با آلاینده‌ها در شرایط کم فشار شبکه نیز اثر می‌گذارد [۳]. در بعضی از مواقع، نشت چه در سیستم‌های انتقال و چه در شبکه‌های توزیع میتواند همراه

با خروج جریان شدید آب همراه باشد که منجر به ایجاد خسارت در تأسیسات روزمینی و زیرزمینی از جمله، جاده‌ها، بناها، وسایل نقلیه و سایر زیرساخت‌ها میشود؛ بنابراین تعیین و کنترل نشت به دلیل تأثیرات منفی اقتصادی، زیست محیطی، ایمنی و اجتماعی آن، یکی از مباحث مهم و پیچیده در مهندسی سیستم‌های آبرسانی میباشد. تعاریف مختلفی از نشت ارائه شده که رایجترین آن عبارت است از میزان آبی که در اثر عوامل کنترل نشده از سیستم خارج میشود. لوله‌های پلاستیکی، به ویژه لوله‌های پلی اتیلنی به طور گسترده‌ای با توجه به ارزانی و سادگی نصب در سامانه‌های آب تحت فشار مانند توزیع آب آشامیدنی شهری و آب آبیاری استفاده می‌شوند. با این حال، اثر متقابل آب و سازه در جریان گذرا به طور کامل برای این نوع از لوله‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است. اگرچه برای یک طراحی مناسب از سامانه‌های لوله‌های تحت فشار باید تمهیداتی برای حفاظت از موج ضربه قوچ در نظر گرفت [۴]، همچنین در مرحله‌ی بهره‌برداری برای تشخیص نشت و یا انسداد لوله باید راهکارهای مناسب در نظر گرفته شود [۵].

کواس و همکاران (۲۰۰۴ و ۲۰۰۵) نشان دادند که رفتار مکانیکی و ویسکوالاستیسیته لوله‌های پلی اتیلنی باعث میرایی قابل توجهی از

فشار است که در اندک مدتی تمام سیستم انتقال جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این امر فقط به وسیله موجی که با سرعت زیاد حرکت می‌کند قابل توجیه می‌باشد، باید توجه داشت که فشار ناشی از ضربه قوچ تحت شرایط مختلف مکانی و زمانی متفاوت است. علل وقوع جریان میرا که منجر به ایجاد موج فشاری می‌شود متنوع بوده و از نقش وسایل کنترل یا نحوه بهره‌برداری از سیستم تحت فشار گرفته تا شکسته شدن ناگهانی لوله‌های جریان را شامل می‌شود. به طور کلی می‌توان سرعت موج فشاری را به صورت رابطه ۱ بیان کرد [۱۷]:

$$a = \sqrt{\frac{K_b/\rho}{1 + (K/E)(\alpha D/e)}} \quad (1)$$

که در آن e : ضخامت جدار لوله، K : مدول کشسانی حجمی سیال، D : قطر لوله، E : مدول الاستیسیته مجرا و α : ضریبی است که به چگونگی مهار لوله وابسته می‌باشد.

با توسعه معادله پیوستگی در کنار معادله تنش و کرنش (قانون هوک) در مقطع لوله، مقدار سرعت انتشار موج در لوله‌های با جداره نازک از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۷]:

$$a = \sqrt{\frac{K_b/\rho}{1 + (K/E)\psi}} \quad (2)$$

در این رابطه، یک پارامتر بدون بعد است و مقدار آن به خواص الاستیک لوله و رفتار سازه‌های آن وابسته است. این مقادیر در شرایط مختلف تعیین شده است و در مراجع مختلفی قابل استخراج است. به عنوان نمونه در لوله‌های الاستیک جدار نازک که در طول خود به خوبی مهار شده باشند از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\psi = \frac{D}{e}(1 - \nu^2) \quad (3)$$

که در آن U ضریب پواسون است و برای حالت‌های دیگر نیز روابطی مشابه در مراجع [۱۷] و [۱۸] داده شده است.

هدف از این تحقیق نشت‌یابی و مقایسه‌ی آزمایشگاهی و نظری سرعت موج فشاری و اضافه فشار جریان گذرا در لوله‌های انتقال پلی‌اتیلن در عدد رینولدزهای متفاوت به منظور کمک به درک پدیده‌ی جریان گذرا، تشخیص و یافتن نشت در خطوط لوله‌های انتقال پلی‌اتیلن می‌باشد.

۲- مدل فیزیکی

برای رسیدن به اهداف این مقاله یک مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده‌ی علوم و مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز احداث گردید. این مدل از یک مخزن تحت فشار با هد ۴۵ متر آب، شیر قطع و وصل جریان و لوله پلی‌اتیلن با مشخصات، قطر خارجی ۶۳ میلی‌متر، طول ۱۵۸ متر، ضخامت جداره ۶/۵ میلی‌متر،

نوسانات فشار جریان گذرا و افزایش پراکندگی امواج فشاری می‌شود [۶ و ۷]. همچنین سوارزو و همکاران (۲۰۰۸) این خاصیت را برای لوله‌های PVC تأیید کردند [۸].

ویتکوفسکی و همکاران^۲ (۲۰۰۷)، تحقیق آزمایشگاهی بسیار جامع و قابل توجهی با استفاده از یک لوله آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشت بر روی آن در باب قابلیت‌ها و محدودیت‌های روش تحلیل معکوس جریان گذرا (ITA) ارائه نمودند. از نتیجه‌گیری‌های مهم در این کار آزمایشگاهی، سرعت بستن شیر یا به عبارت دیگر شدت جریان گذرای تولید شده می‌باشد [۹].

الخمیرا^۳ (۲۰۰۸)، به ارزیابی روش تحلیل معکوس جریان گذرا (ITA) در یک تک لوله آزمایشگاهی نسبتاً طویل (حدود ۳۰۰ متر) پرداخت. مدل آزمایشگاهی در این کار به خوبی توانایی‌های روش تحلیل معکوس جریان گذرا را به عنوان یک تکنیک نشت‌یابی هم‌زمان با بهره‌برداری خطوط لوله نشان می‌دهد [۱۰].

فرانته و همکاران^۴ (۲۰۱۱) وجود اثر پسماند برای نشتی در لوله‌های پلاستیکی را نشان دادند [۱۱]. کرامت و همکاران (۲۰۱۲) اثر ارتعاشات لوله را در طول ضربه قوچ بررسی کردند [۱۲].

دوان و همکاران^۵ (۲۰۱۰) اهمیت رفتار ویسکوالاستیک لوله‌ها و اصطکاک غیرماندگار را بررسی کردند و نشان دادند که اثر ویسکوالاستیک بحرانی تر است اگر زمان عقب‌ماندگی کمتر از زمان رفت و برگشت موج در امتداد خط لوله باشد [۱۳]. لی و همکاران^۶ (۲۰۱۴) برهم‌کنش (اثر متقابل) سیال و سازه را با استفاده از تجزیه و تحلیل در حوزه‌ی فرکانس مطالعه کرده‌اند [۱۴]. تائبی و فتحی مقدم (۱۳۹۳) به بررسی هیدرولیک جریان میرا در خطوط لوله انشعابی پرداختند و روابطی برای پیش‌بینی فشارهای کمینه و بیشینه بعد از انشعاب ارائه دادند [۱۵].

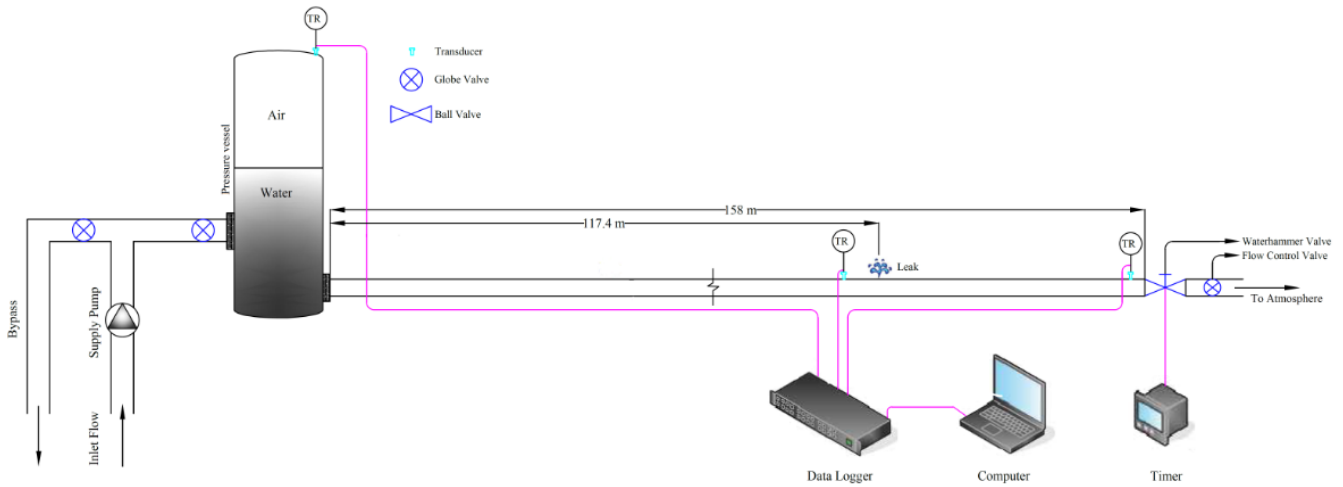
هانگ و همکاران^۸ (۲۰۱۵)، به منظور تعیین محل نشت در خطوط لوله و شبکه آب‌رسانی الاستیک، آزمایش‌های شبکه آب‌رسانی در ۳ سناریو مختلف انجام دادند به طوری که در هر سناریو، محل قرارگیری و میزان آن متفاوت بوده است و از روش بهینه‌سازی تبرید^۹ (SA) در شبیه‌سازی جریان گذرا استفاده کردند [۱۶].

از خصوصیات عمده پدیده ضربه قوچ، تغییرات فشار و حرکت موج

- 1 Soares et al.
- 2 Vitkovsky et al.
- 3 Al-Khomairi
- 4 Ferrante et al.
- 5 Duan et al.
- 6 retardation
- 7 Lee et al.
- 8 Huang et al.
- 9 Simulated annealing

با سه قطر ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر ایجاد شد. برای ایجاد جریان میرا یک شیر قطع و وصل جریان مجهز به زمان سنج برقی با توانایی بسته شدن در زمان ۰/۲ ثانیه به صورت خطی در انتهای لوله نصب شد.

مدول یانگ ۱/۴۳ گیگا پاسکال و نسبت پواسون ۰/۴۶ ساخته شد. برای ایجاد رینولدزهای متفاوت در سیستم، آزمایش‌ها در دبی‌های مختلف انجام پذیرفت. نشت لوله در فاصله ۱۱۷/۴ متری از مخزن آب و



شکل ۱. نمای از مدل ساخته شده در آزمایشگاه

Fig 1. An overview of the model made in the laboratory

جدول ۲. آزمایش‌های با سه قطر نشت متفاوت در ۵ رینولدزهای مختلف

Table 2. Experiments with three different leak diameters at 5 different Reynolds

آزمایش	دبی لوله (Lit/s)	هد مخزن بالادست (m)	دبی نشت (Lit/s)	قطر نشت (mm)	Re
A1	۰/۰۵	۴۵/۲۳	۰/۷۸	۷	۱۳۰۳
B1	۰/۰۴	۴۵/۲۴	۰/۵۸	۶	۱۱۲۴
C1	۰/۰۵	۴۵/۱۴	۰/۳۶	۵	۱۲۸۳
A2	۰/۲۹	۴۵/۲۳	۰/۷۹	۷	۷۲۳۷
B2	۰/۲۶	۴۵/۲۲	۰/۵۸	۶	۶۵۸۶
C2	۰/۲۶	۴۵/۱۶	۰/۳۵	۵	۶۴۳۷
A3	۰/۵۲	۴۵/۲۰	۰/۷۸	۷	۱۳۱۱۳
B3	۰/۵۲	۴۵/۲۶	۰/۵۸	۶	۱۳۰۱۵
C3	۰/۵۱	۴۵/۱۰	۰/۳۵	۵	۱۲۹۷۴
A4	۰/۷۴	۴۵/۱۸	۰/۷۷	۷	۱۸۷۷۲
B4	۰/۷۲	۴۵/۲۴	۰/۵۷	۶	۱۸۲۷۱
C4	۰/۶۶	۴۵/۰۷	۰/۳۵	۵	۱۶۷۴۷
A5	۰/۹۹	۴۵/۱۴	۰/۷۸	۷	۲۴۹۹۱
B5	۱/۰۰	۴۵/۱۷	۰/۵۷	۶	۲۵۲۴۱
C5	۰/۹۹	۴۵/۰۸	۰/۳۴	۵	۲۴۸۵۳

اندازه‌گیری فشار دینامیکی در پشت شیر با مبدل‌های فشاری با دامنه اندازه‌گیری ۱۶ بار و دقت ۰/۱ درصد در حالت بیشینه مقیاس و خروجی ۴ تا ۲ میلی‌امپر صورت پذیرفت. همچنین برای اندازه‌گیری دبی از دبی‌سنج آلتراسونیک و جهت ثبت داده‌های مربوط به فشار در هنگام ایجاد جریان میرا، از یک دستگاه دیتالاگرا استفاده شد. دستگاه دیتالاگرا دارای هشت کانال مجزا مبدل آنالوگ به دیجیتال بوده و قابلیت برداشت ۱۰ هزار داده در ثانیه را دارد. برای کاهش نویز داده‌های برداشت شده توسط دیتالاگرا آن‌ها را با استفاده از برنامه‌ی متلب فیلتر کرده و سپس مورد تحلیل و بررسی قرار داده شد. آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق به صورت آزمایش‌های شاهد و آزمایش‌هایی با قطر نشت ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر در پنج عدد رینولدز (Re) متفاوت و فاصله‌ی نشت ۱۱۷/۴ متر از مخزن بود که اطلاعات این آزمایش‌ها در جداول ۱ و ۲ آمده است. در هر جدول عدد رینولدز آزمایش‌ها تقریباً یکسان و یا در یک محدوده‌ی نزدیک به هم هستند.

جدول ۱: آزمایش‌های شاهد در دبی‌های متفاوت

Table 1. Control experiments at different

نام آزمایش	دبی لوله (Lit/s)	H, هد مخزن بالادست (m)	Re
1	0/05	45	1261
2	0/25	45	6306
3	0/5	45	12613
4	0/75	45	18919
5	1	45	25225

۳- نتایج و بحث

با توجه به این که برای اهداف تشخیصی (نشت یابی، گرفتگی و...) در خطوط لوله می توان از خصوصیات جریان گذرا استفاده کرد و جریان گذرا، گاهی باعث مشکلاتی اعم از ترکیب و خرابی تأسیسات در طول خط لوله می شود، در این مقاله برای یافتن نشت در خط لوله سعی بر این شد که با ایجاد رینولدزهای متفاوت (با توجه به این که سرعت طبق رابطه ی ژوکوفسکی $\Delta H = \pm \frac{\alpha \Delta V}{g}$ رابطه ی مستقیمی با اضافه فشار ایجاد شده در لوله دارد و با توجه به این که سرعت در عدد بدون بعد رینولدز اثر مستقیم دارد)، دقت نشت یابی را در رینولدزهای متفاوت با توجه به بزرگی جریان میرا ایجاد شده در خطوط لوله بررسی کردیم. با دانستن اینکه بیشترین و کمترین فشار هنگام ایجاد جریان میرا در نقاط نزدیک به شیر قطع و وصل جریان اتفاق می افتد فشار را در پشت شیر با استفاده از دیتالاگ برداشت کرده و سپس بررسی و مطالعه گردید که در ادامه مورد بحث قرار می گیرند.

نوسانات فشاری مربوط ایجاد شده بر اثر بستن شیر قطع و وصل جریان در مدت ۰/۲ ثانیه در پنج عدد رینولدز متفاوت در حضور سه نشت ۵، ۶ و ۷ میلی مترو پنج آزمایش شاهد اندازه گیری و سپس بررسی شد. نمودارها در پنج رینولدز تقریباً مساوی رسم شد که در شکل ۲ قابل مشاهده اند.

در شکل ۲ رینولدزهای پنج و یک به ترتیب بیشترین و کمترین اضافه فشار را دارا می باشند. این نتیجه با رابطه ژوکوفسکی $(\Delta H = \pm \frac{\alpha \Delta V}{g})$ همخوانی دارد (با توجه به ثابت بودن پارامترهای قطر لوله و لزوجت سینماتیک آب، طبق رابطه ی رینولدز هر چه رینولدز بیشتر باشد سرعت بیشتر است). در همه ی رینولدزها آزمایش شاهد دارای اضافه فشار بیشتری نسبت به آزمایش های دارای نشت می باشد و این اضافه فشار ناشی از این هست که دبی جریان خروجی از لوله به هنگام ایجاد جریان گذرا به دلیل بسته شدن شیر به صفر رسیده و با توجه به کاهش سرعت جریان افت فشار کاهش می یابد و فشار در طول لوله افزایش یافته و وقتی که اضافه فشار ناشی از ضربه قوچ در مجرا حرکت می کند و به محل نشت می رسد مقداری از فشار به دلیل وجود نشت با دبی زیادتری (طبق رابطه ی روزنه) نسبت به حالت ماندگار خارج می شود و اجازه ی ایجاد اضافه فشار بیشتری را نمی دهد که هر چه اندازه ی نشت بزرگتر باشد ایجاد اضافه فشار کمتری می کند. با توجه به شکل ۲ با افزایش قطر نشت کاهش فشار بیشتری در تاج موج فشاری دیده می شود، به طوری که در هر رینولدز، نشت با قطر ۷ میلی متر بیشترین کاهش فشار و نشت با قطر ۵ میلی متر کمترین کاهش فشار را دارا می باشند.

۱-۳- بدست آوردن فاصله ی نشت از انتهای لوله و مقایسه با مقدار آزمایشگاهی

سیگنال جریان گذرا در حالتی که در لوله نشت وجود دارد، اثر منحصر به فردی را از خود نشان میدهد که در لوله سالم وجود ندارد و این اثر مربوط به ورود سیگنال عکس العمل^۱ نشت در ایستگاه اندازه گیری می باشد. همچنین سیگنال های جریان گذرا در سیستم دارای نشت زودتر مستهلک خواهند شد. خصوصیات سیگنال عکس العمل و افزایش استهلاک جریان میرا میتواند به منظور پیدا کردن نشت مورد استفاده قرار بگیرد و روشی کلیدی در نشت یابی با استفاده از بررسی جریان میرا است. در شکل ۳ با داشتن زمان شروع نشت می توان با استفاده از رابطه ی $t = 2L/a$ فاصله ی نشت را تا محل اندازه گیری فشار (که در این تحقیق پشت شیر قطع و وصل جریان می باشد) به دست آورد. که در آن t زمان رفت و برگشت موج تا نقطه اثر نشت، L فاصله ی نشت و a سرعت موج فشاری می باشد. در هر آزمایش سرعت موج فشاری را با داشتن زمان رفت و برگشت موج و طول لوله از رابطه ی $t = 2L/a$ که در آن t زمان رفت و برگشت موج از پشت شیر تا مخزن است به دست می آید.

در جدول ۳ سرعت موج فشاری و فاصله ی نشت تا شیر قطع و وصل جریان با استفاده از رابطه های ذکر شده به دست آمد و سپس با فاصله ی واقعی که $40/6$ متر است مقایسه گردید و درصد خطای نسبی فاصله نشت محاسباتی و آزمایشگاهی به دست آمد. درصد خطای نسبی فاصله نشت محاسباتی و آزمایشگاهی عبارت است از:

$$\%Error = \left(\frac{Lr - Lc}{Lr} \right) * 100 \quad (4)$$

که در آن Lr فاصله ی واقعی (فاصله ای که نشت ایجاد شده روی لوله تا پشت شیر دارد) و Lc فاصله ی محاسباتی است. سپس قدرمطلق درصد خطای نسبی در مقابل عدد رینولدز رسم گردید (شکل ۴).

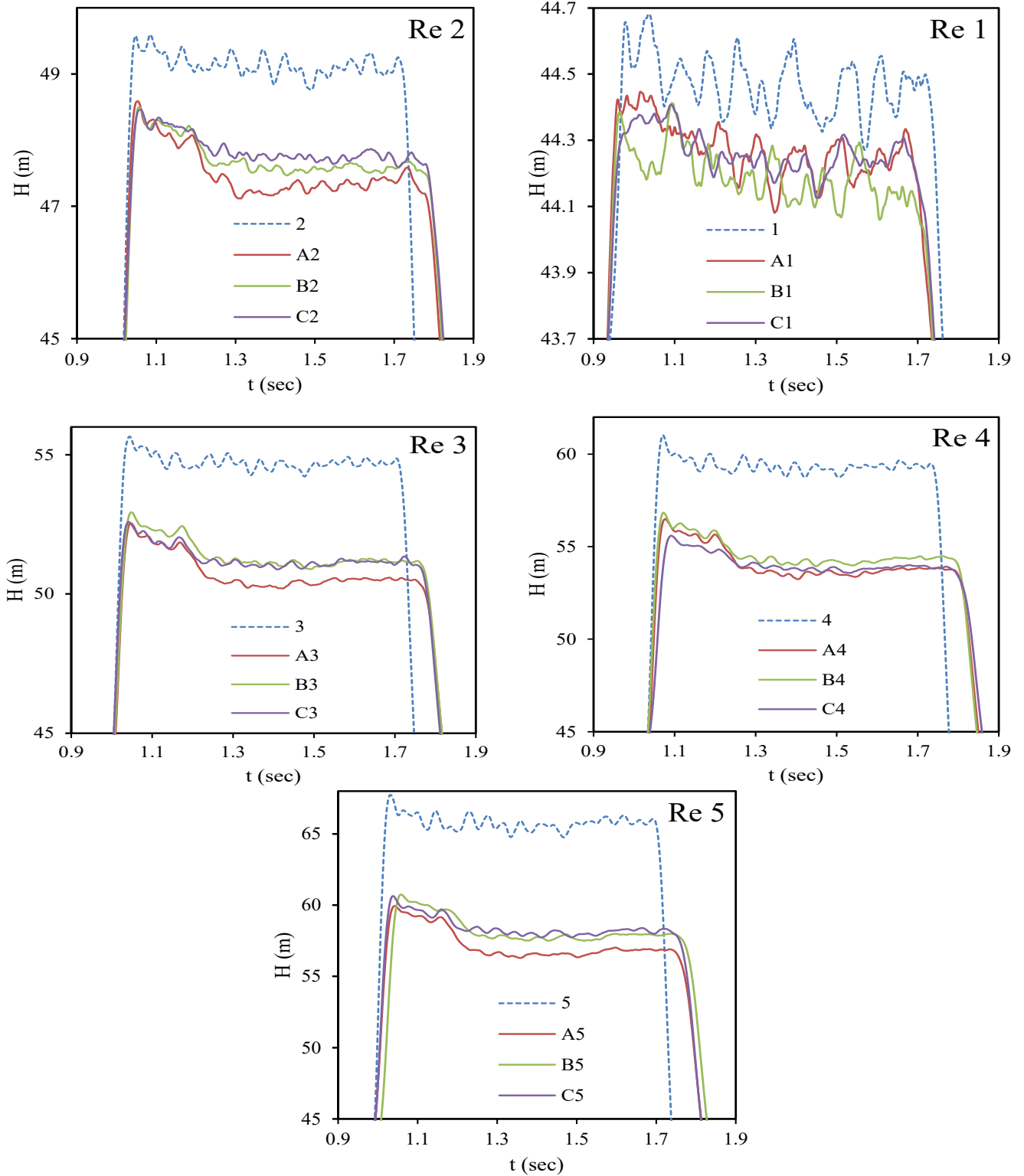
در جدول ۳ ماکزیمم درصد خطای نسبی مربوط به آزمایش ۱۳ می باشد که دارای قطر نشت ۵ میلی متر و در جریان آرام (دارای رینولدز ۱۲۸۳ است) با درصد خطای نسبی $48/8$ درصد اتفاق افتاده است؛ و ماکزیمم خطای نسبی مربوط به آزمایش ۳C که دارای مشخصات، قطر نشت ۵ میلی متر و رینولدز ۱۲۹۷۴ با درصد خطای نسبی $2/02$ درصد رخ داده است.

با توجه به شکل ۴ با افزایش عدد رینولدز در قطر نشت های مختلف درصد خطای نسبی محاسبه نشت کاهش یافته بدین صورت که در رینولدز کم درصد خطای نسبی زیاد و در رینولدزهای بالا درصد خطای

1 Leak-reflected signal

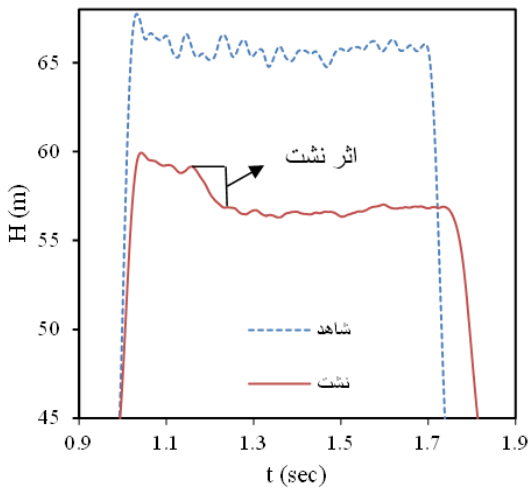
متفاوت اختلاف زیادی با هم دارند اما در عدد رینولدز پنج این اختلاف کم می‌شود. این امر نشان می‌دهد که در رینولدزهای بالا دقت یافتن نشت بالا بوده و این دقت کمتر تحت تأثیر قطر نشت می‌باشد.

نسبی کاهش می‌یابد. همچنین نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، خطای نسبی در قطر نشت‌های متفاوت همگرا می‌شود. به طوری که در رینولدز یک مقدار خطای نسبی در قطر نشت‌های



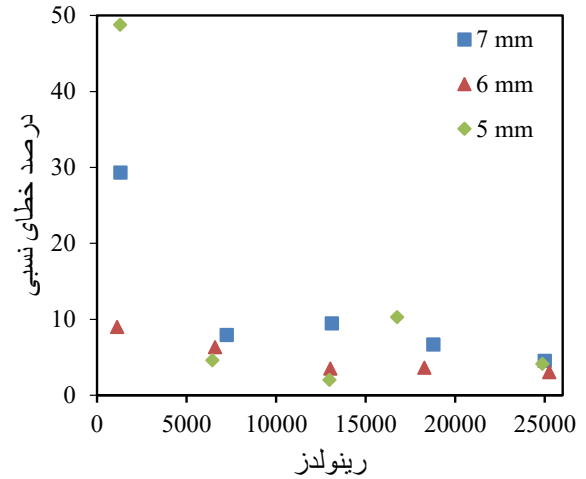
شکل ۲. نوسانات فشاری اندازه‌گیری شده پشت شیر در پنج عدد رینولدز متفاوت

Fig 2. Pressure fluctuations measured behind the valve at five different Reynolds numbers



شکل ۳. مقایسه سیگنال برداشتی جریان گذرا در خط لوله سالم و دارای نشست لوله‌های ویسکوالاستیک

Fig 3. Comparison of transient current harvest signal in healthy and viscoelastic pipe leakage



شکل ۴. درصد خطای نسبی فاصله‌ی نشست محاسباتی و آزمایشگاهی در رینولدزهای مختلف در سه نشست ۷ و ۶ و ۵ میلی‌متر

Fig 4. Percentage of relative error of computational and laboratory leakage intervals in different Reynolds at three leaks of 5, 6, 7 mm

جدول ۳. سرعت موج فشاری، فاصله‌ی محاسباتی نشست تا شیرو و درصد خطای نسبی فاصله نشست محاسباتی با آزمایشگاهی

Table 3. Compressive wave velocity, computational leak-to-milk computational distance and relative error of computational leakage computation percentage

نام آزمایش	فاصله محاسباتی نشست تا شیرو قطع و وصل (متر)	سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)	درصد خطای نسبی فاصله‌ی نشست محاسباتی و آزمایشگاهی
A1	28/69	441/3	29/34
B1	44/25	447/0	-8/99
C1	60/41	464/7	-48/80
A2	43/83	449/5	-7/95
B2	38/03	420/2	6/33
C2	42/47	440/1	-4/61
A3	44/44	444/4	-9/47
B3	42/03	422/5	-3/53
C3	39/78	447/0	2/02
A4	43/32	463/3	-6/71
B4	39/13	423/0	3/62
C4	44/78	459/3	-10/30
A5	42/44	444/4	-4/54
B5	41/84	445/1	-3/05
C5	42/28	445/1	-4/14

مقدار سرعت موج فشاری واقعی در هر آزمایش شاهد (جدول ۴) متفاوت به دست آمد. این ثابت می‌کند که رابطه‌ی نظری به اندازه‌ی کافی برای تخمین سرعت موج فشاری مناسب نیست؛ و اگر برای اهداف تشخیصی از آن استفاده شود مقدار خطای نسبی را افزایش می‌دهد.

۲-۳- مقایسه‌ی سرعت موج فشاری آزمایشگاهی با سرعت موج فشاری نظری:

سرعت موج فشاری نظری کلاسیک از رابطه‌ی ۲ و ۳ با توجه به مشخصات لوله و خصوصیات سیال ۴۵۹/۵ متر بر ثانیه بدست آمد.

فشار و فشار اولیه جریان در پشت شیر) محاسبه گردید. همان طور که در جدول ۵ مشاهده می شود بین مقدار اضافه فشار تئوری و آزمایشگاهی اختلاف وجود دارد. این اختلاف در آزمایش های شاهد کمتر از آزمایش های با حضور نشت است. در آزمایش های دارای نشت با افزایش عدد رینولدز درصد خطای نسبی این پارامتر بین مقدار آزمایشگاهی و تئوری افزایش می یابد. این امر نشان می دهد که رابطه تئوری اضافه فشار در لوله های ویسکوالاستیک از دقت کمی برخوردار بوده و در حضور نشت در مدل این واقعیت بیشتر به چشم می آید. هرچند که استفاده از رابطه تئوری اضافه فشار برای اهداف تشخیصی مناسب نمی باشد و باعث بروز خطای زیاد در تشخیص می شود اما برای تمهیدات ایمنی سیستم انتقال در جهت اطمینان می باشد.

جدول ۴. سرعت موج فشاری واقعی در هر آزمایش شاهد

Table 4. Real compressive wave velocity in each control experiment

نام آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)	۴۲۷/۰	۴۷۶/۶	۴۷۷/۳	۴۷۶/۶	۴۷۷/۳

۳-۳- مقایسه ی اضافه فشار آزمایشگاهی با مقدار تئوری آن

مقدار اضافه فشار نظری با استفاده از رابطه $\Delta H = \pm \frac{a \Delta V}{g}$ که در آن a سرعت موج فشاری تئوری، ΔV از اختلاف سرعت جریان ماندگار قبل ضربه قوچ و هم زمان ضربه قوچ (وقتی که شیر کاملاً بسته می شود و سرعت صفر می شود) و مقدار واقعی آن از آزمایش (اختلاف ماکزیمم

جدول ۵. مقدار اضافه فشار آزمایشگاهی و تئوری و درصد خطای نسبی بین آن ها

Table 5. The amount of laboratory overpressure and theory and the percentage of relative error between them

نام آزمایش	اضافه فشار تئوری (m)	اضافه فشار آزمایشگاهی (m)	درصد خطای نسبی اضافه فشار آزمایشگاهی و نظری
1	1/17	1/13	3/59
2	5/85	6/08	-3/93
3	11/70	11/54	1/34
4	17/55	17/16	2/22
5	23/40	24/09	-2/93
A1	1/21	1/12	7/31
B1	1/04	1/03	1/25
C1	1/19	0/90	24/36
A2	6/71	5/64	15/99
B2	6/11	5/00	18/16
C2	5/97	4/72	20/95
A3	12/16	9/95	18/20
B3	12/07	9/84	18/50
C3	12/03	9/66	19/73
A4	17/41	14/14	18/80
B4	16/95	13/83	18/40
C4	15/53	12/28	20/95
A5	23/18	17/95	22/57
B5	23/41	18/31	21/80
C5	23/05	18/17	21/18

۴- نتیجه‌گیری

با افزایش قطر نشت کاهش فشار بیشتری در تاج موج فشاری دیده می‌شود، به طوری که در همه رینولدزها، هر چه قطر نشت بزرگتر باشد کاهش فشار بیشتری ایجاد می‌کند. همچنین با افزایش عدد رینولدز، اضافه فشار افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز، درصد خطای نسبی مکان نشت در قطر نشت‌های متفاوت کاهش می‌یابد و همچنین درصد خطای نسبی با افزایش عدد رینولدز همگرا می‌گردد. این تحقیق نشان داد که سرعت موج فشاری نظری کمتر از مقدار واقعی به دست آمده از آزمایش‌ها می‌باشد. بین مقدار اضافه فشار تئوری و آزمایشگاهی اختلاف وجود دارد این اختلاف در آزمایش‌های شاهد کمتر از آزمایش‌های با حضور نشت است. در آزمایش‌های دارای نشت با افزایش عدد رینولدز درصد خطای نسبی این پارامتر بین مقدار آزمایشگاهی و تئوری افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که رابطه‌ی تئوری اضافه فشار در لوله‌های ویسکوالاستیک از دقت کمی برخوردار بوده و در حضور نشت در مدل این واقعیت بیشتر به چشم می‌آید. در مدل بدون نشت در همه رینولدزها میزان اضافه فشار تئوری و آزمایشگاهی نزدیک به هم می‌باشد در حالی که در حالتی که ما در سیستم نشت داریم با افزایش عدد رینولدز، درصد اتلاف اضافه فشار با افزایش می‌یابد و شیب نرخ تغییرات درصد اتلاف اضافه فشار با افزایش قطر نشت، افزایش می‌یابد و با افزایش عدد رینولدز درصد اتلاف اضافه فشار تقریباً مستقل از اندازه نشت می‌باشد، بطوری که میزان اتلاف اضافه فشار در هر سه قطر تقریباً نزدیک به هم می‌باشد.

مراجع

- [1] Misiunas, D. Vitkovsky', J. P. Olsson, G. Simpson, A. R. & Lambert, M. F. (2005). Pipeline break detection using pressure transient monitoring. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(4), 316-325.
- [2] Haghghi, a. (1388) Development of pipeline leakage and calibration methods based on reverse transient current modeling. Ph.D. Department of Civil Engineering, Khaje Nasir Din Tusi University of Technology. (in Persian)
- [3] Colombo, A.F. Karney, B.W. 2002. Energy and costs of leaks: toward a comprehensive picture. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE 128 (6), 441e450.
- [4] Streeter, V. L., and Wylie, E. B. (1978). *Fluid transients*, McGraw-Hill International Books, New York.
- [5] Brunone, B., and Ferrante, M. (2001). "Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients." *J. Hydraul. Res.*, 39(5), 539-547.

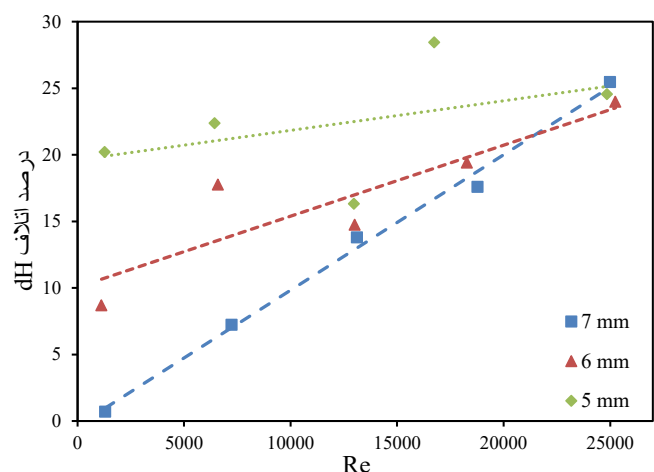
۴-۳- درصد اتلاف اضافه فشار در سیستم انتقال در حضور

نشت و شاهد

در شکل ۵ به درصد اتلاف اضافه فشار در سیستم‌های انتقال لوله‌های ویسکوالاستیک (پلی اتیلن) در مدل دارای نشت با قطر ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر و پنج رینولدز متفاوت نسبت به مدل بدون نشت پرداخته شد. درصد اتلاف اضافه فشار عبارت است از:

$$\text{درصد اتلاف} = ((\Delta Ht - \Delta Hl) / \Delta Ht) * 100 \quad (5)$$

که در آن ΔHt مقدار اضافه فشار در آزمایش شاهد و ΔHl مقدار اضافه فشار در آزمایش دارای نشت می‌باشد. در رابطه‌ی ۵ درصد اتلاف اضافه فشار بین آزمایش‌های دارای نشت و شاهدی که دارای یک عدد رینولدز (یا نزدیک به هم) بوده‌اند محاسبه و سپس این مقدار در مقابل عدد رینولدز رسم گردید. طبق شکل ۵، با افزایش عدد رینولدز درصد اتلاف اضافه فشار مدل در حضور نشت نسبت به مدل بدون نشت افزایش می‌یابد. درصد اتلاف اضافه فشار در نشت ۷ میلی‌متر با افزایش رینولدز بیشترین و در نشت ۵ میلی‌متر کمترین نرخ تغییرات را دارا می‌باشند؛ که نشان می‌دهد با افزایش قطر نشت نرخ تغییرات درصد اتلاف اضافه فشار، افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در این نمودار این است که در رینولدز یک اختلاف درصد اتلاف اضافه فشار بین نشت‌ها زیاد می‌باشد اما با افزایش رینولدز این اختلاف کمتر شده به طوری که در رینولدز پنج این اختلاف به کمترین مقدار خود می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز درصد اتلاف اضافه فشار کمتر به قطر نشت وابسته است.



شکل ۵. درصد اتلاف اضافه فشار نسبت به مدل بدون نشت

Fig 5. Percentage of overpressure loss compared to non-leakage models

- charge relationship for a leak in a polyethylene pipe.” J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000360, 775–780.
- [12] Keramat, A., Tijsseling, A. S., Hou, Q., and Ahmadi, A. (2012). “Fluid-structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer.” J. Fluid. Struct., 28, 434–455.
- [13] Duan, H., Ghidaoui, M., Lee, P. J., and Tung, Y. (2010). “Unsteady friction and visco-elasticity in pipe fluid transients.” J. Hydraul. Res., 48(3), 354–362.
- [14] Lee, P. J., Duan, H. F., Ghidaoui, M., and Karney, B. (2014). “Frequency domain analysis of pipe fluid transient behavior.” J. Hydraul. Res., 51(6), 609–622.
- [15] Taebei, H., Fathi-Moghadam, M. (1393). Hydrolic Flow Measurement in Split Pipelines. Journal of (in Persian) Science and Engineering. Volume 37, number 4, pp. 55-62. Irrigation
- [16] Huang, Y. C., Lin, C. C., & Yeh, H. D. (2015). An Optimization Approach to Leak Detection in Pipe Networks Using Simulated Annealing. Water Resources Management, 29(11), 4185-4201.
- [17] Chaudhry M.H (1987) Applied Hydraulic Transients: second edition Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- [18] Wylie E. Benjamin, Streeter Victor L, Suo Lisheng (1993) Fluid Transients in Systems: Prentice Hall
- [6] Covas, D. I. C., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H. M., Graham, N., and Maksimovic, C. (2004). “The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I—Experimental analysis and creep characterization.” J. Hydraul. Res., 42(5), 517–531.
- [7] Covas, D. I. C., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H. M., Graham, N., and Maksimovic, C. (2005). “The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II—Model development, calibration and verification.” J. Hydraul. Res., 43(1), 56–70.
- [8] Soares, A. K., Covas, D. I. C., and Reis, R. L. F. (2008). “Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer.” J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1389), 1389–1394.
- [9] Vítkovský, J. P., Lambert, M. F., Simpson, A. R., & Liggett, J. A. (2007). Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection. Journal of Water Resources Planning and Management, 133(6), 519-530.
- [10] Al-Khomairi A (2008) Leak detection in long pipelines using the least squares method. J Hydraul Res 46(3):392–401.
- [11] Ferrante, M., Massari, C., Brunone, B., and Meniconi, S. (2011). “Experimental evidence of hysteresis in the head dis-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Mirzaie-jeshni, M. Fathi-Moghadam, A. R. Sabet-imani, A. Akbari, Leak detection, experimental and theoretical comparison of characteristics of transient flow in polyethylene pipelines, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)547-556.

DOI: 10.22060/ceej.2017.13539.5438



