

مطالعه آزمایشگاهی اثر انشعاب غیر مجاز بر خصوصیات موج فشاری جریان گذرا در خطوط لوله انتقال ویسکوالاستیک

احسان ابراهیمی^۱، محمود شفاعی بجهستان^{۲*} و بابک امین‌نژاد^۳

- ۱- گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
 - ۲- نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران و استاد مدعو گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
 - ۳- گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران و استاد مدعو گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
- تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱

چکیده

معضل هدر رفت آب و انرژی و در نتیجه کاهش کارآمدی سیستم‌های آبرسانی، وجود انشعاب غیرمجاز است. این پدیده هم در سیستم‌های آبرسانی شرب و هم کشاورزی اتفاق می‌افتد. در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر انشعاب غیر مجاز بر موج فشاری جریان گذرا در خطوط لوله ویسکوالاستیک پرداخته شده است. مدل آزمایشگاهی این تحقیق متشکل از یک لوله پلی اتیلنی ۲ اینچ به طول ۱۵۸ متر، و ضخامت ۶ میلی‌متر است. انشعاب‌های مورد استفاده نیز از جنس پلی اتیلن با طول‌ها، قطر‌ها، و مکان‌های مختلف‌اند. مقایسه اثر انشعاب‌ها با طول مختلف نشان داد که با افزایش طول انشعاب، بازتاب آن شدیدتر می‌شود و اثر آن بر پایین افتادگی سیگنال فشار مشهودتر است. وجود انشعاب باعث تغییر فاز سیگنال می‌شود و این تغییر فاز با گذشت زمان از شروع جریان گذرا بیشتر است. مقدار تغییر فاز در مکان نزدیک به شیر بین ۸ تا ۱۵ درصد و در مکان نزدیک به مخزن بین ۵ تا ۱۲ درصد تغییر می‌کند. مقایسه نوسان‌های فشار در حوزه زمان نشان داد که فعال بودن انشعاب، استهلاک بیشتری بر موج جریان گذرا اعمال می‌کند. با این همه، تغییر فاز محسوسی در سیگنال فشار ایجاد نمی‌شود. در پایان، اثر انشعاب غیر مجاز با سیستم لوله سالم و لوله با وجود نشت نیز مقایسه و رویکرد مدل‌سازی عددی انشعاب غیرمجاز ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: انشعاب غیرمجاز، ضربه قوچ، لوله‌های پلیمری، موج گذرا.

مقدمه

هدفمند مدیریتی در بخش منابع آب از طرف دیگر، معضلات فراوانی را پیش‌روی مدیریت منابع آب کشورها به وجود آورده است (Rahmanshahi et al., 2018). در میان مجموعه تلاش‌هایی که برای حل بحران آب در سرتاسر جهان صورت می‌پذیرد، لازم است تا سهم زیادی به کاهش هدررفت آب در

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها و بحران‌های پیش روی کشور در حال حاضر مسئله کمبود ذخایر آب است. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت، افزایش تقاضا و مصرف آب، محدودیت منابع آب شیرین از یک طرف و نبود برنامه‌های جامع و

2018; Al-Tofan *et al.*, 2020; Bin *et al.*, 2020; K; Wang *et al.*, 2020; Keramat & Duan, 2021; (Bin *et al.*, 2021) تقسیم می‌شوند.

منیکونی و همکاران (Meniconi *et al.*, 2009) در آزمایشگاه مهندسی آب (WEL) دانشگاه پروچیا ایتالیا، به آزمایش‌های گسترده‌ای با هدف آشکارسازی مکان و مشخصات انشعاب‌های غیرقانونی دست زدند. این محققان در تحقیقات خود آزمایش‌های گذرای سریع را به کار بستند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که شاخه‌های غیرمجاز، صرف‌نظر از فعال بودن یا نبودن آن، قابل تشخیص هستند. منیکونی و همکاران (Meniconi *et al.*, 2011) با استفاده از روش‌های مبتنی بر جریان گذرا به تعیین مکان و اندازه شاخه‌های غیر مجاز در سیستم‌های لوله پرداخته‌اند. در این تحقیق برای بهبود دقت مکان‌یابی و زمان رسیدن امواج فشار از تبدیل موجک استفاده شده است. اوانجلیستا و همکاران (Evangelista *et al.*, 2015) به بررسی آزمایشگاهی انتقال و انعکاس موج فشاری جریان گذرا در شبکه لوله شاخه‌ای ویسکوالاستیک پرداختند و برای این کار دو مدل آزمایشگاهی شبکه لوله‌ی شاخه‌ای Y شکل را با مشخصات مختلف ساختند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که امواج فشاری انتقالی و منعکس شده تا ۱۲ درصد با مقادیر تئوری فرض شده برای لوله‌های الاستیک متفاوت است. علاوه بر تغییرات سطح مقطع و سرعت موج فشاری، رفتار ژئولوژیکی اتصالات لوله‌ها بر ضریب انتقال و بازتاب تاثیر می‌گذارند. پارامترهای ویسکوالاستیک در این تحقیق با صرف‌نظر کردن از اصطکاک غیرماندگار کالیبره شدند. دووان و لی (Duan & Lee, 2016) با استفاده از تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس به تشخیص لوله انتها بسته در یک

سیستم‌های انتقال و توزیع آب، اختصاص یابد. دلیل این موضوع آن است که آب تزریق شده در تأسیسات آبرسانی، مستلزم صرف انرژی و هزینه قابل توجهی از مرحله تصفیه تا انتقال و توزیع بین مصرف‌کننده‌ها ست و روشن است که به ازای هدررفت حتی یک لیتر از این آب چه مقدار خسارت‌های اقتصادی و فنی به وجود خواهد آمد (AWWA, 1990). یکی از منابع هدر رفت آب در سیستم‌های لوله آبرسانی، وجود انشعاب غیرمجاز است.

در سیستم لوله‌های انتقال، وجود انشعاب‌های غیرقانونی می‌تواند منابع آب قابل توجهی را از بین ببرد؛ این نوع انشعاب‌ها غیرقانونی از نظر اقتصادی و فنی با آثار منفی همراه‌اند. این مسئله به ویژه در فصل‌های خشک می‌تواند مدیران را در موقعیت بحرانی قرار دهد. مشکلات تشخیص انشعاب‌های غیرمجاز با استفاده از اندازه‌گیری فشار به این دلیل است که انشعاب‌ها طبق برنامه زمان‌بندی منظمی فعال نیستند.

برای تشخیص نقص‌هایی مانند نشت، گرفتگی، زبری، و انشعاب غیرمجاز تاکنون روش‌های مختلفی استفاده شده است. این روش‌ها به صورت کلی به دو دسته روش‌های ایزاری (مانند موج صوتی، گاز ردیاب، و ربات) و مدلسازی بر پایه هیدرولیک سیستم (انتشار موج جریان گذرا، کالیبراسیون جریان ماندگار) طبقه‌بندی می‌شوند (Rahmanshahi *et al.*, 2018) روش‌های مبتنی بر تشخیص نقص بر پایه انتشار موج گذرا و تحلیل موج فشاری پاسخ سیستم نیز خود به دو دسته کلی مدلسازی در حوزه زمان (Covas, 2003; Vítkovský *et al.*, 2007; Sarkamaryan *et al.*, 2018; Keramat & Zanganeh, 2019; Keramat *et al.*, 2019) و مدلسازی در حوزه فرکانس (Kim,

روش‌های تشخیص انشعاب، خصوصاً در حوزه فرکانس در آینده باشد.

مواد و روش‌ها

مدل جریان گذرا این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد. در مدل آزمایشگاهی جریان گذرا مطابق شکل‌های ۱ و ۲ از یک مخزن آب استفاده شده است که وظیفه تأمین هد پیزومتریک بالادست را به‌عهده دارد. لوله مورد استفاده در این تحقیق از جنس پلی اتیلن با طول ۱۵۸ متر و قطر اسمی ۲ اینچ (۵/۰۵ سانتی‌متر) است. خطوط لوله در اطراف یک شاسی فلزی به صورت دورانی نصب شد. هدف از این کار، گیردار کردن خط لوله و جلوگیری از به وجود آمدن تأثیر ارتعاش خط لوله بر امواج است. در این مدل آزمایشگاهی، از دو شیر ربع‌گرد^۱ و شیر کروی^۲ استفاده شده است. از شیر ربع‌گرد به منظور ایجاد ضربه قوچ و از شیر کروی به منظور تنظیم میزان دبی جریان استفاده می‌شود. همان‌طور که پیش از این عنوان شد، از هدف‌های مهم ساخت این مدل تعیین محل و میزان انشعاب غیرمجاز است. به‌منظور شبیه‌سازی، از یک لوله به صورت انشعابی استفاده شده است که در دو مکان با قطر و طول‌های مختلف با دبی‌های ضربه قوچ متفاوت آزمایش شده است. به‌منظور اندازه‌گیری نوسان‌های فشار، از یک ترنس‌دیوسر^۳ درست در قبل شیر ایجاد ضربه قوچ، و به منظور تعیین میزان دبی خط لوله و انشعاب، از یک سطل مدرج استفاده شده است.

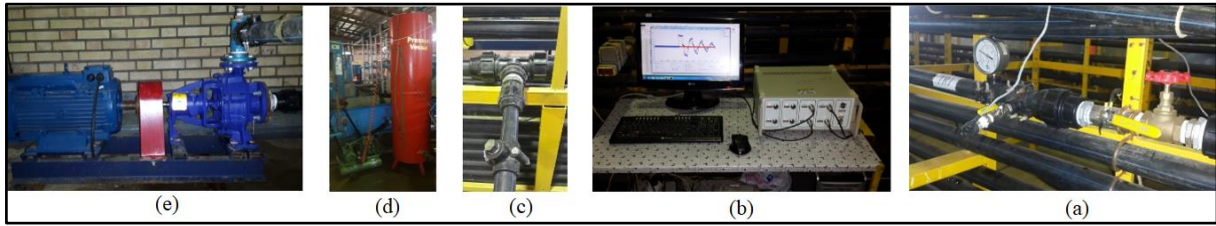
خط لوله فرضی الاستیک پرداختند. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi *at al.*, 2022) با استفاده از روش حل معکوس جریان گذرا به تشخیص انشعاب غیرمجاز در حوزه زمان پرداختند. مقدار خطای مکان و طول انشعاب در این تحقیق به ترتیب کمتر از ۳ و ۱۶ درصد به‌دست آمد.

بررسی منابع نشان می‌دهد که بیشتر تحقیقات در زمینه تشخیص نقص با استفاده از جریان گذرا در ارتباط با نشت و انسداد بوده است. تنها چند تحقیق در ارتباط با انشعاب‌های غیرمجاز دیده می‌شود که با هدف تشخیص انشعاب بوده است و تحلیل سیگنال فشار به صورت آزمایشگاهی اجرا نشده است. با توجه به توسعه روش‌های مبتنی بر تحلیل مفاهیم حوزه فرکانس و علم پردازش سیگنال، تحلیل جزییات پاسخ فشاری سیستم در شرایط مختلف می‌تواند در ادامه این تحقیقات در حوزه فرکانس راهگشا باشد. بنابراین، این تحقیق با هدف پوشش این زمینه از بحث انشعابات غیرمجاز به اجرا درآمده است.

در این تحقیق با ساخت یک مدل آزمایشگاهی از سیستم لوله پلیمری و اسکوالاستیک پلی اتیلن مناسب سعی شده است اثر وجود انشعاب غیرمجاز روی سیگنال فشار بررسی شود. با این هدف، انشعاب غیرمجاز با طول‌ها، قطر‌ها و در مکان‌های مختلف خط لوله مورد بررسی قرار گرفته است. اثر فعال یا غیرفعال بودن انشعاب نیز بررسی شده است. گفتنی است که نتایج این تحقیق می‌تواند نشان دهد که وجود انشعاب غیر مجاز تا چه اندازه می‌تواند سیگنال را تحت تأثیر قرار دهد. تغییر یافتن یا تغییر نیافتن فرکانس و استهلاک موج می‌تواند مبنای انتخاب

1- brass ball valve
3- Transducer

2- Globe valve

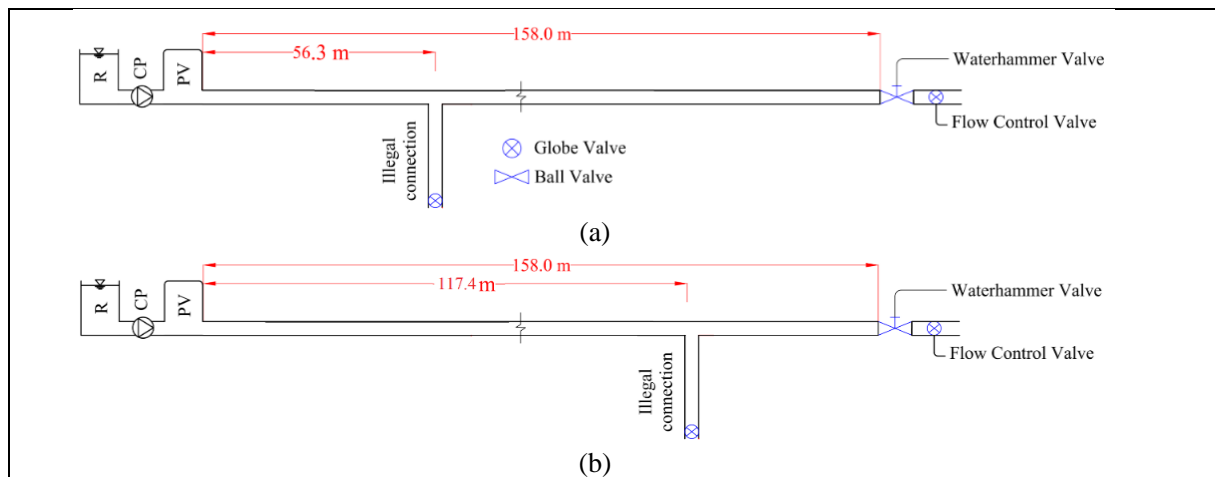


شکل ۱- تصویرهایی از مدل آزمایشگاهی ضربه قوچ، (a) شیرهای پایین دست، (b) سیستم برداشت اطلاعات، (c) محل انشعاب، (d) مخزن تحت فشار، (e) پمپ سانتریفیوژ تأمین آب

Fig. 1 Some photos of the transient experimental model, a) downstream valves, b) data collection system, c) branching point, d) pressurized tank, e) water supply centrifugal pump

برای سادگی نصب ابزار دقیق و اجرای آزمایش‌ها، سیستم لوله‌ها به صورت صعودی در بدنه خارجی یک قاب فلزی (۱/۵×۶، بر حسب متر) نصب شد. برای جلوگیری از تشکیل جریان ثانویه در پیچ‌های تند و افت‌های موضعی، دو انتهای قاب فلزی به شکل نیم‌دایره با قطر ۱/۵ متر اصلاح شد. برای مهار خط لوله از حرکت‌های طولی و جانبی، سیستم لوله با استفاده از بست‌های فلزی (با روکش پلاستیکی) به قاب فلزی مهار شده است. لوله‌های پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) (SDR11،)

با قطر اسمی (NP16، PE100) ۶۳، ۴۰ و ۳۲، با مشخصات مطابق جدول ۱ هستند. پمپ گریز از مرکز مورد استفاده با هد ثابت PUMPIRAN, EN40-200, n=2900 r.p.m, best) performance conditions $Q=26 \text{ m}^3/\text{h}$ and $H=52 \text{ m}$ است. جریان در انتهای مسیر به لوله زهکش با سطح آزاد وارد و پس از آن از طریق کانال به مخزن آزمایشگاه وارد می‌شود. مقدار جریان خط لوله در انتهای سیستم به صورت حجمی اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- شماتیک مدل آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق برای دو مکان مختلف انشعاب غیرمجاز (a) در فاصله ۵۶/۳ متر از بالادست، و (b) برای ۱۱۷/۴ متر از بالادست

Fig. 2 Schematic of the transient laboratory model of this research for two different illegal connection locations a) at 56.3 m from the upstream and b) at 117.4 m from the upstream

جدول ۱- مشخصات لوله‌های پلی اتیلنی مورد استفاده در این تحقیق

Table 1- characteristics of polyethylene pipes used in this study

ردیف	شاخص اندازه لوله	قطر داخلی (میلی‌متر)	قطر خارجی (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	طول (متر)	نسبت استاندارد ابعاد	فشار اسمی (بار)
Row	ϕ_i	D_i (mm)	D_o (mm)	e (mm)	L (m)	SDR	NP (bar)
1	ϕ_{63}	50.5	63	6.5	158	11	16
2	ϕ_{40}	30.25	40	5	50.168	11	16
3	ϕ_{32}	26	32	3.2	52	11	16

تأمین می‌کند. مقدار دقیق جریان عبوری از خط لوله در انتهای سیستم (پیش از ورود جریان به مخزن پایین دست) به صورت حجمی اندازه‌گیری می‌شود.

روند تحلیل نتایج آزمایشگاهی شامل مراحل مختلف، از جمله حذف نویز از سیگنال‌های آزمایشگاهی، محاسبه اضافه فشار در حوزه زمان و تولید پاسخ فرکانسی سیستم با استفاده از تبدیل فوریه سریع^۲ (FFT) است. برای حذف نویزهای موجود در فشارهای برداشت شده آزمایشگاهی، روش‌های مختلفی وجود دارد. با این همه، برای اجتناب از حذف اطلاعات مفید سیگنال فشار، با مقایسه روش‌های مختلف حذف نویز شامل میانگین متحرک، فیلتر فرکانسی و ...، بهترین روش برای جریان گذرا استفاده از فیلتر فرکانسی پایین‌گذر باترورث^۳ انتخاب شد. در این روش، با انتقال سیگنال فشار از حوزه زمان به حوزه فرکانس، فرکانس‌های بالای موج، که عمدتاً ناشی از شرایط محیطی هستند، حذف و فرکانس‌های پایین سیگنال حفظ می‌شوند (Malica et al., 2011).

بسته به فشار ماندگار خط لوله، شروع سیگنال گذرا می‌تواند از سطوح مختلف فشار باشد. بنابراین، با کم کردن فشار ماندگار (H_{steady}) از سیگنال فشار گذرا ($H_{unsteady}$) می‌توانیم مقایسه بهتری از

با توجه به مراحل چهارگانه ضربه‌فوج، اگر فشار ماندگار خط لوله پایین باشد، سیگنال فشار در مرحله سوم و پس از بازگشت از مخزن و رسیدن به محل شیر تولید جریان گذرا، وارد فشارهای کمتر از فشار بخار سیال می‌شود، و به دلیل جدایی ستون سیال^۱، جریان هوادار خواهد شد. این پدیده باعث کاهش قابلیت سیگنال فشار برای تشخیص دیگر اختلالات سیستم می‌شود. برای اجتناب از این مشکل، در مرز بالادست سیستم لوله از مخزن تحت فشار به عنوان شرط مرزی بالادست استفاده شد. در ابتدای هر آزمایش تقریباً نصف حجم مخزن با استفاده از کمپرسور هوا پر شده فشار آن به حدود ۴۵ متر آب می‌رسید. با این شرایط در حین جریان گذرا، فشار وارد فشارهای کمتر از فشار بخار نشده سیستم دچار جدایی ستون سیال نمی‌شود.

در مدل آزمایشگاهی ساخته شده، جریان آب توسط یک پمپ گریز از مرکز با هد ثابت وارد یک مخزن تحت فشار در انتهای بالادست می‌شود. جریان سیال از مخزن تحت فشار وارد خط لوله می‌شود و پس از عبور از دو شیر ربع‌گرد و کروی در انتهای پایین دست (به ترتیب برای تولید جریان گذرا و تنظیم جریان) وارد مخزن ذخیره پایین دست می‌شود. مخزن پایین دست به خط لوله مکش پمپ گریز از مرکز متصل است و جریان ورودی به پمپ را

1- Column separation

3- Lowpass Butterworth

2- Fast Fourier Transform

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N} \quad K = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

نتایج و بحث

در این بخش اثر متغیرهای مختلف انشعاب غیرمجاز شامل طول، قطر، مکان، شدت ضربه قوچ، و دبی انشعاب بر سیگنال فشار بررسی شده است. در پایان نیز سیگنال سیستم لوله سالم و لوله با وجود نشت مقایسه شده است.

اثر طول انشعاب

برای بررسی اثر طول انشعاب غیرمجاز بر سیگنال فشار جریان گذرا، دو طول ۲۳/۴۷ متر و ۴۰/۰۴ متر از لوله شماره ۴۰ به عنوان انشعاب در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های این تحقیق برای هر دو مکان ۵۶/۳ و ۱۱۷/۴ متر از بالادست سیستم لوله اجرا شده است.

در شکل ۳، نتایج این آزمایش‌ها ارائه شده است. در این شکل‌ها نتایج با خط لوله سالم (خط چین مشکی) مقایسه شده است. در شکل ۳a و ۳b، اثر طول انشعاب برای دبی ۱ لیتر بر ثانیه و انشعاب واقع در مکان ۵۶/۳ متر از بالادست خط لوله نمایش داده شده است. تغییرات فشار این دو سیگنال تقریباً بین ۲۰- تا ۲۰ متر است. وجود انشعاب باعث پایین افتادگی سیگنال فشار به اندازه حدود ۴/۸۶ متر نسبت به خط لوله سالم شده است. این کاهش فشار پس از آن با یک افزایش فشار همراه است. نتایج در حوزه زمان نشان دهنده تغییر فاز سیگنال نسبت به مدل بدون انشعاب است. مقایسه سیگنال‌ها در حوزه فرکانس نشان می‌دهد که تغییر فاز در سیگنال‌های با فرکانس بزرگ‌تر از ۱ مشهودتر است.

در شکل ۳c و ۳d، اثر طول انشعاب برای دبی ۱ لیتر بر ثانیه و انشعاب واقع در مکان ۱۱۷/۴ متر از

سیگنال‌های فشار داشته باشیم. در این زمینه، اختلاف فشار ایجاد شده ناشی از جریان گذرا به دست می‌آید. هدف از این کار، مقایسه راحت‌تر سیگنال‌های فشار از مبنای صفر است. از رابطه زیر برای محاسبه اضافه فشار (ΔH) استفاده شده است.

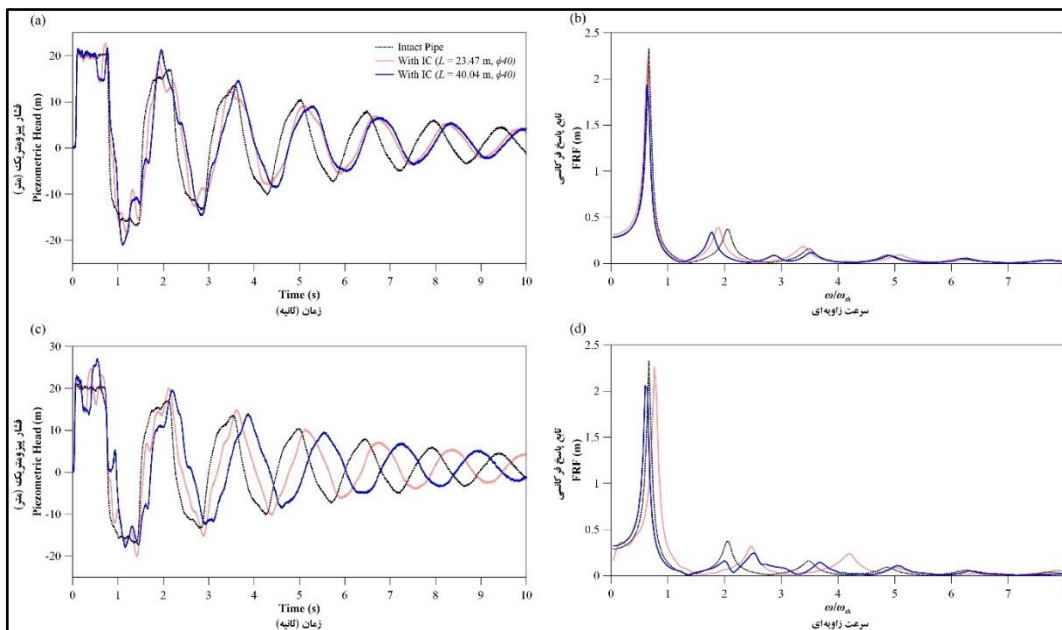
$$\Delta H = (H_{unsteady} - H_{Steady}) \quad (1)$$

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق بررسی حساسیت سیگنال فشار از انشعاب غیر مجاز است، این تحقیق می‌تواند مبنای روش‌های تشخیص نقص بر پایه مدلسازی عددی، مانند روش حل معکوس جریان گذرا، شود. در روش‌های مبتنی بر مدلسازی، معمولاً از سیکل‌های ابتدایی برای مدلسازی استفاده می‌کنند، زیرا با گذر زمان از شروع ضربه قوچ، به دلیل افت‌ها و اندرکنش‌های مختلف، سیگنال فشار به مرور تضعیف می‌شود. بنابراین هدف، در همه شکل‌ها تقریباً نصف زمان میرایی کامل (حدود ۱۰ ثانیه برای ۶ سیکل اول)، به عنوان مبنای مقایسه، انتخاب شده است.

مقدار استهلاک موج در حوزه زمان واضح است ولی اختلاف فاز وضوح بهتری در حوزه فرکانس دارد. (اختلاف فاز در حوزه زمان با تغییر محل برخورد با خط فشار صفر و در حوزه فرکانس با تغییر پیک‌های فرکانسی مشخص می‌شود). بنابراین، در این تحقیق بر مبنای یک کد، پاسخ فرکانسی سیگنال فشار حوزه زمان استخراج و مقایسه شده است. این کد در محیط برنامه‌نویس متلب نوشته شده است. مبنای محاسبه پاسخ سیستم در حوزه فرکانس استفاده از تبدیل فوریه سریع بوده است. با فرض اینکه x_0 تا x_{N-1} اعداد مختلط باشند. رابطه تبدیل فوریه گسسته به صورت زیر است (Bachman et al., 2000).

این در حالی است که در انشعاب با طول بیشتر این بازتاب به وضوح دیده نمی‌شود. در این حالت، تغییر فاز نسبت به مکان قبلی مشهودتر است و با افزایش طول انشعاب این تغییر فاز بیشتر می‌شود. این در حالی است که در مکان دورتر از شیر (۵۶/۳) مقدار تغییر فاز دو طول مختلف انشعاب تقریباً به هم نزدیک است. در این حالت بر خلاف دو حالت قبل، تغییر فازها در کل فرکانس‌ها دیده می‌شود.

بالادست خط لوله نمایش داده شده است. تغییرات فشار این دو سیگنال تقریباً بین ۲۰- تا ۲۵ متر است. وجود انشعاب باعث پایین افتادگی سیگنال فشار، به اندازه حدود ۶ متر نسبت به خط لوله سالم، شده است. این کاهش فشار سپس با یک افزایش فشار همراه است و به دلیل طول کوتاه انشعاب در انشعاب ۲۳/۴۷ متری تا رسیدن دوباره موج از مخزن، یک بازتاب دیگر در موج این انشعاب دیده می‌شود.



شکل ۳- اثر طول انشعاب بر سیگنال فشار در فاصله ۵۶/۳ متر در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس، و در فاصله ۱۱۷/۴ متر در حوزه (c) زمان و (d) فرکانس، برای دبی خط لوله ۱ لیتر بر ثانیه

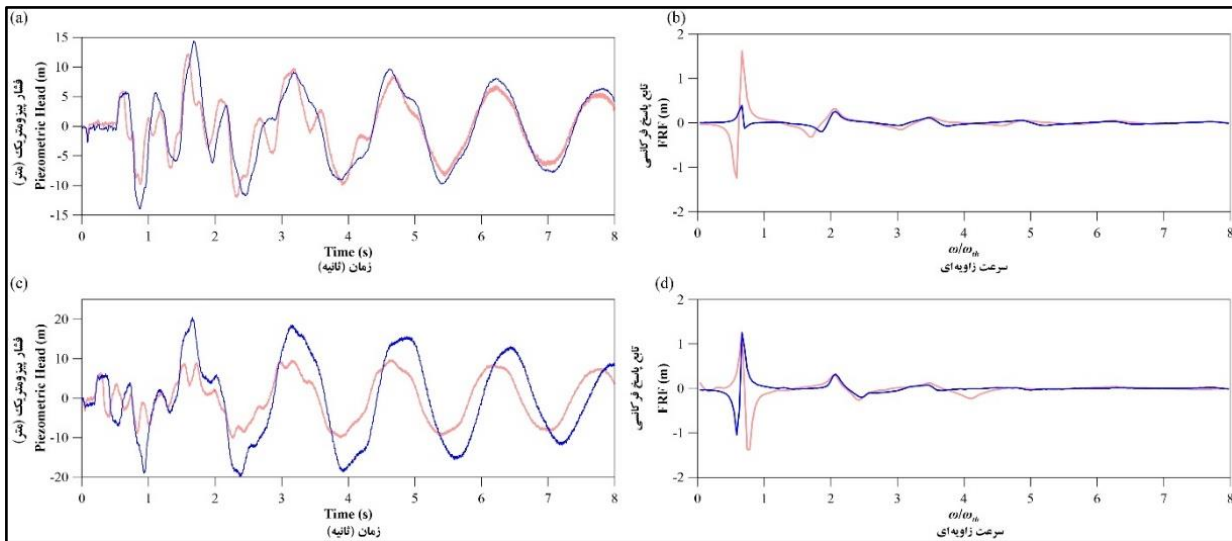
Fig. 3 The effect of illegal connection length on the pressure signal at a distance of 56.3 m in the domain of a) time and b) frequency, and at a distance of 117.4 m in the domain of c) time and d) frequency, for $Q = 1 \text{ L/s}$

خط لوله برابر $\pi a/2L$ سرعت موج فشاری لوله و طول خط لوله اصلی) است. مقدار این اختلاف بر اساس معیار آماری RMSE در حوزه زمان و فرکانس در جدول ۲ نمایش داده شده است. مقدار RMSE در حوزه زمان ۲۶/۵ و برای حوزه فرکانس ۰/۰۰۴۶ است. با توجه به اینکه مقدار تغییرات در حوزه فرکانس مربوط به فرکانس‌های کوچک‌تر است، بهتر

در شکل ۴، اختلاف سیگنال‌های فشار شکل ۳ در حوزه زمان و فرکانس نمایش داده شده است. در حوزه زمان سیگنال فشار نسبت به زمان رسم شده است. در حوزه فرکانس، مقدار دامنه سیگنال نسبت به فرکانس بدون بعد رسم شده است. در واقع، فرکانس بدون بعد نسبت فرکانس به فرکانس پایه سیستم لوله تعریف می‌شود. مقدار فرکانس پایه

خواهد بود در صورت مدلسازی در حوزه فرکانس از مقدار فرکانس‌های پایین استفاده شود و فرکانس‌های بالا لحاظ نشود. که در آن، $N =$ تعداد اندازه‌گیری‌ها که همان اندازه سیگنال فشار؛ $h^{NI} =$ فشار در خط لوله بدون انشعاب؛ و $h^{WI} =$ فشار در خط لوله با وجود انشعاب است.

$$RMSE = \sum_{i=0}^N \frac{h_i^{NI} - h_i^{WI}}{N} \quad (3)$$



شکل ۴- تفاوت سیگنال فشار لوله سالم و لوله با وجود انشعاب در فاصله ۵۶/۳ متر در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس، و در فاصله ۱۱۷/۴ متر در حوزه (c) زمان و (d) فرکانس، برای دبی خط لوله ۱ لیتر بر ثانیه

Fig. 4 The difference between the pressure signal of the intact pipe and pipe with illegal connection at a distance of 56.3 m in the domain of a) time and b) frequency and at a distance of 117.4 m in the domain of c) time and d) frequency, for $Q = 1 \text{ L/s}$

جدول ۲- مقادیر RMSE در آزمایش‌های اثر طول انشعاب غیر مجاز بر سیگنال فشار گذرا

Table 2- RMSE values in tests of the effect of the length of the illegal connection on the transient pressure signal

دبی (لیتر بر ثانیه) Q (L/s)	طول (متر) Length (m)	قطر (متر) Diameter (mm)	مکان (متر) Location (m)	RMSE	
				حوزه زمان Time domain	حوزه فرکانس Frequency domain
				1	23.47
1	40.04	40	56.3	62.1	0.0058
1	23.47	40	117.4	29.76	0.026
1	40.04	40	117.4	51.6	0.0046

۳۲ برای دبی‌های ۰/۵ و ۱ لیتر با هم مقایسه شده-

اند.

مطابق شکل ۵، که تغییرات فشار انشعاب ۴۰/۰۴ متر از لوله شماره ۴۰ است، میزان تغییرات سیگنال

اثر شدت جریان گذرا

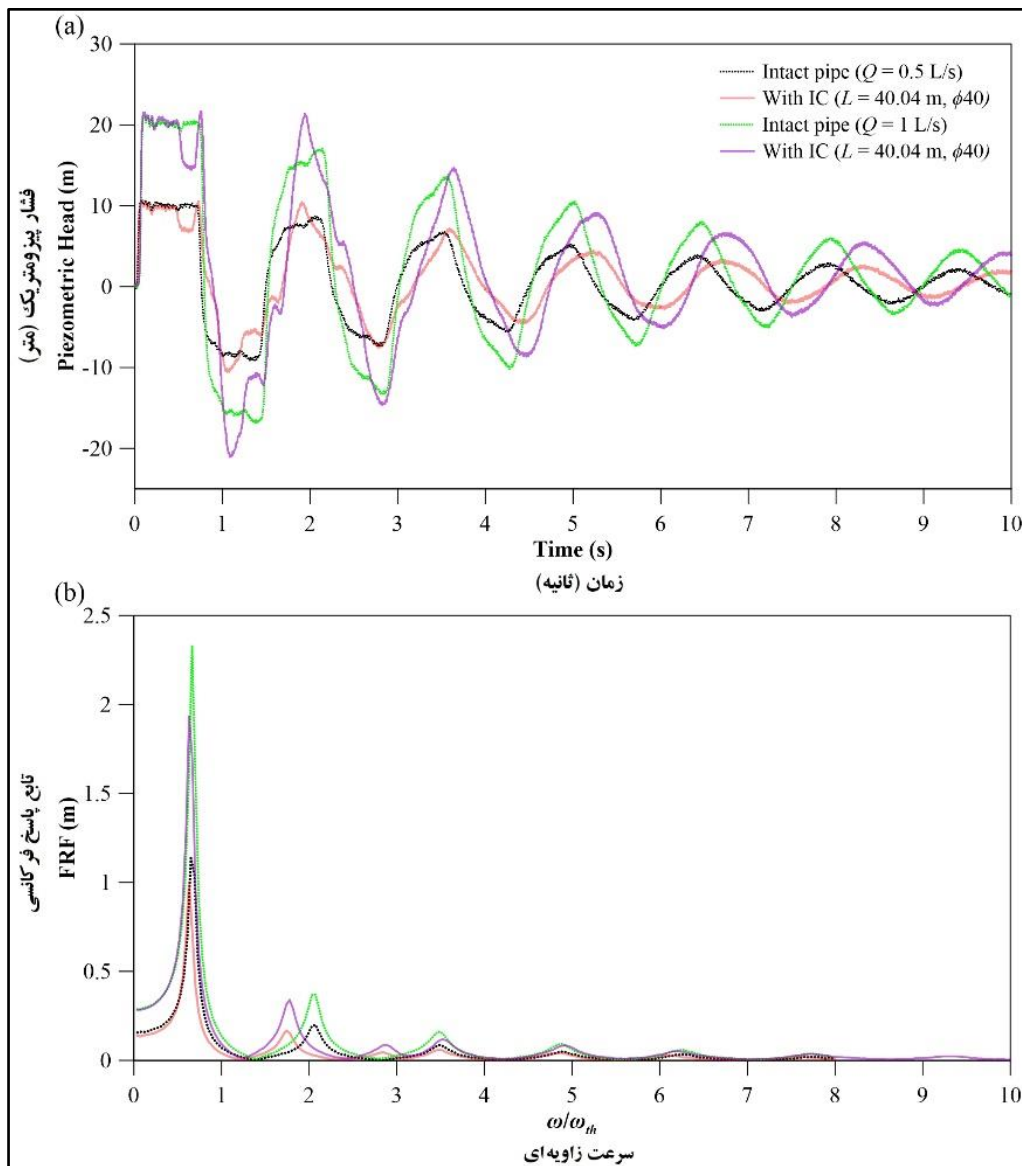
برای بررسی اثر انشعاب غیرمجاز بر سیگنال فشار

جریان گذرا در شدت‌های مختلف جریان گذرا، طول

۴۰/۰۴ متر از لوله شماره ۴۰ و ۲۵/۶۶ متر از لوله

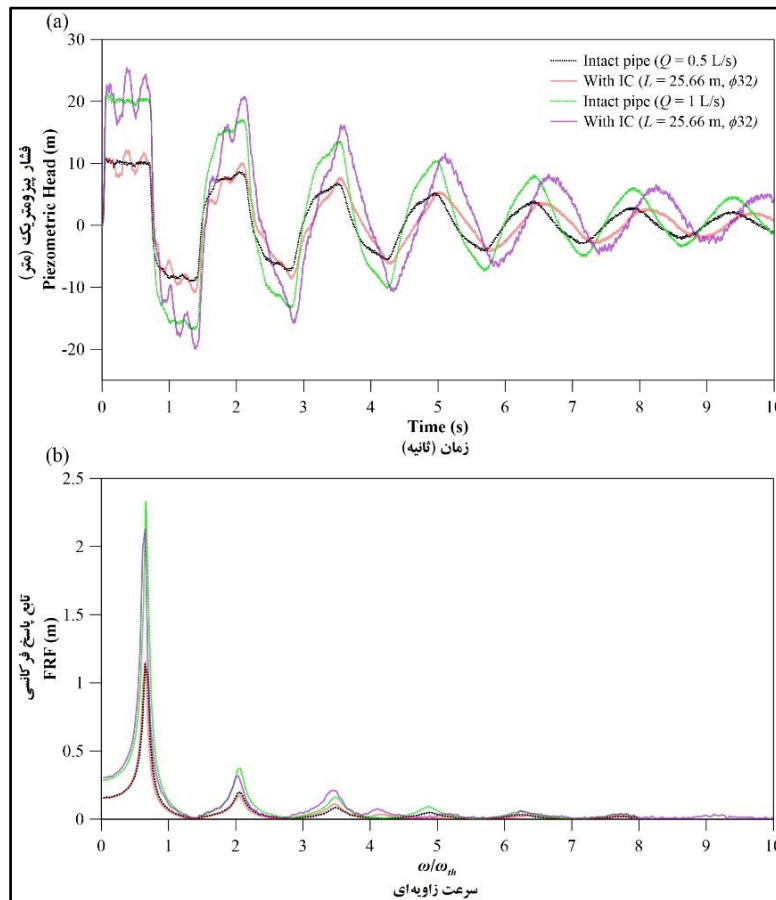
ثانیه در فاصله ۱۱۷/۴ متر از انتهای بالادست مقایسه شده است. میزان تغییرات فشار برای دبی ۱ لیتر بر ثانیه بین ۲۰- تا ۲۵ متر آب و برای دبی ۰/۵ لیتر بر ثانیه بین ۱۱- تا ۱۲ متر آب است. مطابق قسمت دوم شکل ۴-۱۴، که در آن تغییرات سیگنال در حوزه فرکانس مقایسه شده است، حداکثر تغییرات فاز سیگنال‌ها برای فرکانس‌های بیشتر از ۳ اتفاق افتاده است.

فشار در این آزمایش‌ها برای دبی ۱ لیتر بر ثانیه بین ۱۸- تا ۲۱ متر آب و برای دبی ۰/۵ لیتر بین ۱۰- تا ۱۰ است. دامنه فرکانس‌ها برای دبی ۱ لیتر کمتر از ۲/۵ و برای دبی ۰/۵ کمتر از ۱/۲ است و حداکثر تغییر فاز در سیگنال‌های با فرکانس بین ۱ تا ۳ اتفاق افتاده است. در شکل ۶، اثر انشعاب با طول ۲۵/۶۶ متر و لوله ۳۲ بر سیگنال فشار در دبی ۰/۵ و ۱ لیتر بر



شکل ۵- اثر شدت جریان گذرا بر سیگنال فشار در فاصله ۵۶/۳ متر در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس

Fig. 3 The effect of transient intensity on the pressure signal at a distance of 56.3 m in the domain of a) time and b) frequency



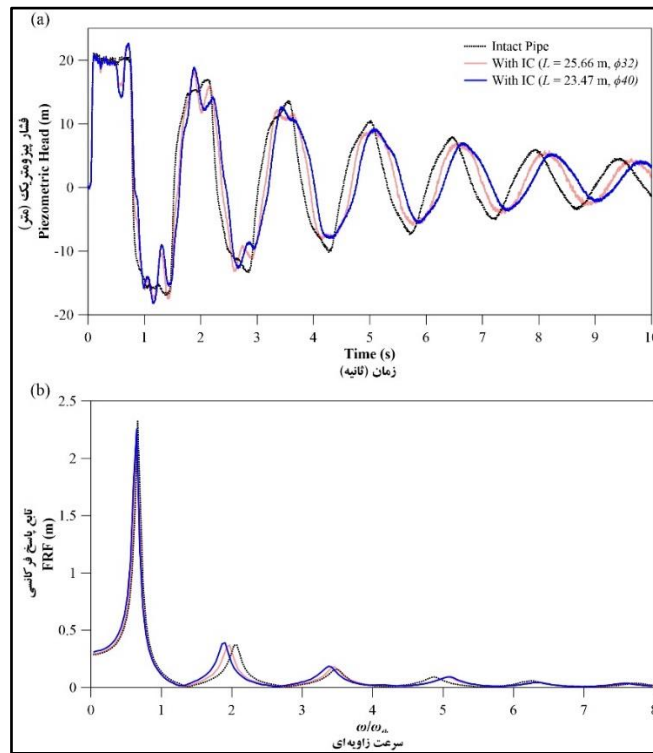
شکل ۶- اثر شدت جریان گذرا بر سیگنال فشار در فاصله ۱۱۷/۴ متر در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس

Fig. 6 The effect of transient intensity on the pressure signal at a distance of 117.4 m in the domain of a) time and b) frequency

اثر قطر انشعاب

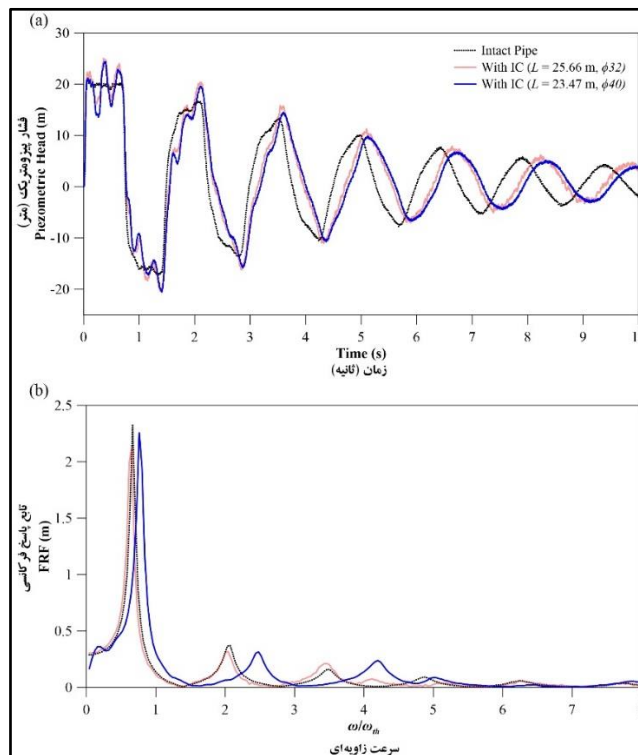
در شکل ۸، اثر قطر در مکان ۱۱۷/۴ بررسی شده است. این آزمایش در دبی ۱ لیتر بر ثانیه به انجام رسیده است. مقایسه تغییرات سیگنال در حوزه زمان نشان می‌دهد که در هر دو قطر وجود انشعاب باعث تغییر فاز شده است. هر چند تغییر فاز لوله با قطر ۴۰ مشهودتر است. این تغییر فاز خصوصاً در قسمت دوم شکل، که مقایسه در حوزه فرکانس بوده است، مشخص است. تغییرات این سیگنال‌ها با گذشت زمان، به دلیل تغییر فاز، بیشتر افزایش می‌یابد. میزان اختلاف لوله سالم و لوله با انشعاب در حوزه زمان بین ۱۰- تا ۱۰ متر آب و در حوزه فرکانس ۱/۲۵- تا ۱/۲۵ است.

یکی از متغیرهای این تحقیق، قطر انشعاب غیرمجاز است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۷ و ۸ مقایسه شده‌اند. برای تشخیص بهتر اثر قطر انشعاب، طول انشعاب تقریباً برابر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۷، میزان تغییرات در هر دو قطر نسبت به مدل بدون انشعاب تغییر فاز وجود دارد. با این همه، میزان تغییر فاز لوله با قطر ۴۰ بیشتر از میزان تغییر فاز لوله با قطر ۳۲ است. این میزان تغییر فاز با گذر زمان بیشتر شده است. مقایسه تغییرات در حوزه فرکانس در بخش دوم شکل نشان می‌دهد که برای فرکانس‌های بزرگ‌تر از ۱/۵ تغییر فاز مشهودتر است.



شکل ۷- اثر قطر انشعاب غیر مجاز بر سیگنال فشار در فاصله ۵۶/۳ متر در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس

Fig. 7 The effect of illegal connection diameters on the pressure signal at a distance of 56.3 m in the domain of a) time and b) frequency



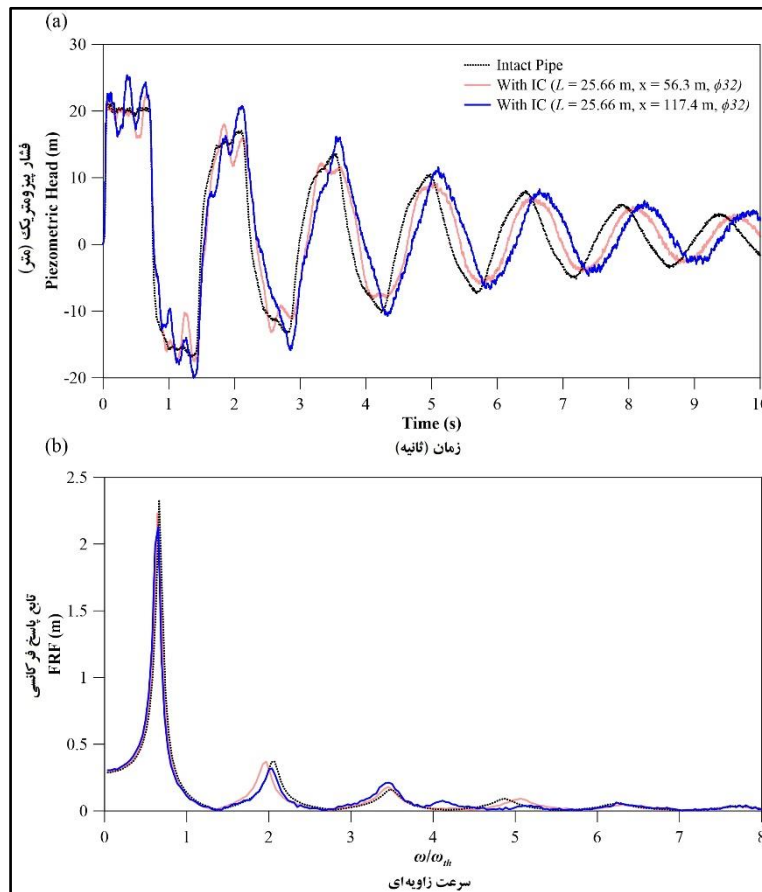
شکل ۸- اثر قطر انشعاب غیر مجاز بر سیگنال فشار در فاصله ۱۱۷/۴ متر در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس

Fig. 8 The effect of illegal connection diameters on the pressure signal at a distance of 117.4 meters in the domain of a) time and b) frequency

اثر مکان انشعاب

نوسان‌ها ناشی از بازتاب فشار بین انشعاب و شیر قبل از رسیدن موج برگشتی از مخزن است. این شکل‌ها همچنین نشان می‌دهند که مقدار استهلاک موج در مکان دورتر از شیر بیشتر است ولی مقدار اختلاف فاز در انشعاب نزدیک به شیر بیشتر است. این اختلاف فازها در فرکانس‌های بالاتر از ۱/۵ بیشتر است. در هر دو مکان، اختلاف سیگنال‌ها با لوله سالم با گذشت زمان بیشتر شده که این ناشی از افزایش اختلاف فاز است.

یکی دیگر از متغیرهای این تحقیق، اثر مکان انشعاب بر مشخصات سیگنال فشار جریان گذراست. برای این منظور، اثر انشعاب در دو مکان ۵۶/۳ و ۱۱۷/۴ متر از بالادست خط لوله بر مشخصات فشار با هم مقایسه شده است (شکل ۹). مقایسه نوسان‌های فشار در حوزه زمان نشان می‌دهد که سیگنال فشار برای انشعاب در فاصله نزدیک‌تر به شیر (فاصله ۱۱۷/۴ متر از بالادست) دارای دو نوسان است. این



شکل ۹- اثر قطر انشعاب غیر مجاز بر سیگنال فشار در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس

Fig. 9 The effect of illegal connection location on the pressure signal in the domain of a) time and b) frequency

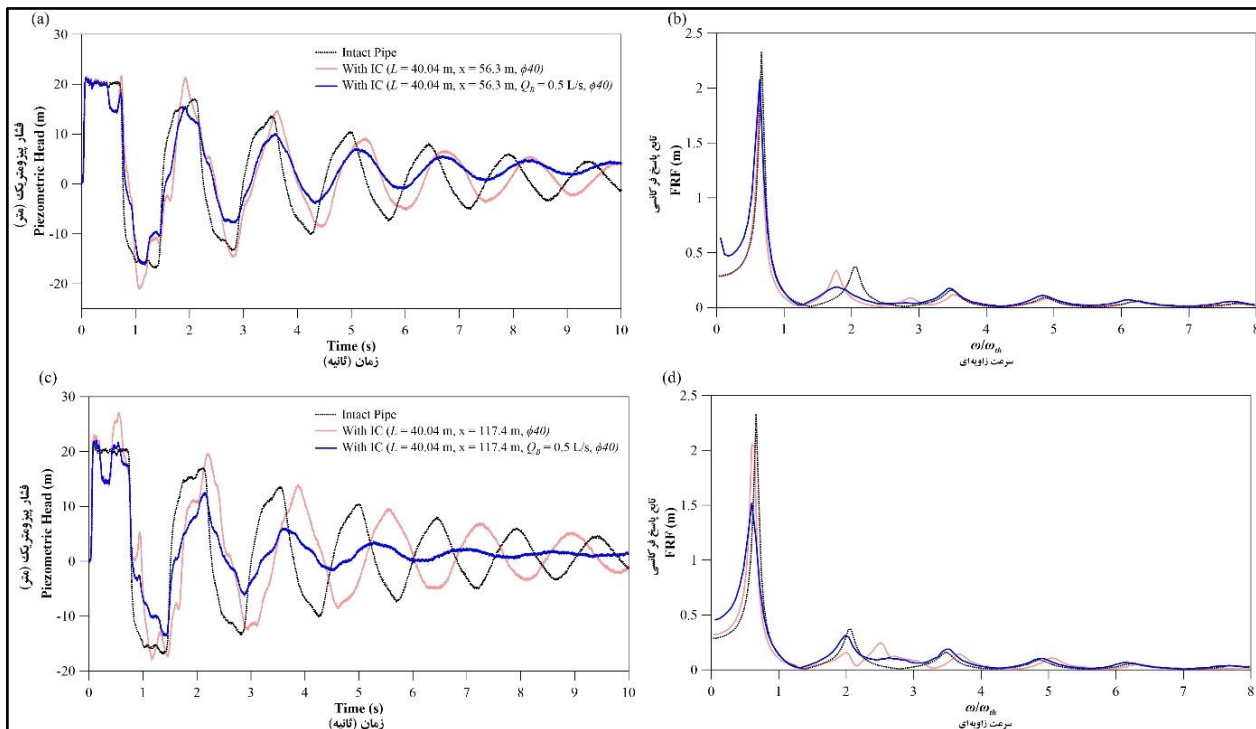
بودن انشعاب در لحظه اجرای تست جریان گذرا است. در شکل ۱۰، اثر انشعاب فعال برای دو مکان مختلف با سیگنال فشار لوله سالم مقایسه شده است.

اثر انشعاب فعال

یکی از مولفه‌های مورد بررسی در بحث انشعاب غیرمجاز، فعال بودن (با دبی خروجی) یا غیرفعال

در شکل ۱۱ نیز اثر اندازه دبی انشعاب برای مکان ۵۳/۳ متر نمایش داده شده است. مقایسه نوسان‌های فشار در حوزه زمان نشان می‌دهد که فعال بودن انشعاب باعث استهلاک بیشتر موج فشاری می‌شود. با وجود این، تغییر فاز محسوسی در سیگنال فشار ایجاد نمی‌شود. در شکل ۱۱، اثر اندازه دبی برای دو دبی ۰/۵ و ۱ لیتر بر ثانیه انشعاب فعال مقایسه شده‌اند. مقایسه نوسان‌ها در حوزه زمان و فرکانس نشان می‌دهد که افزایش دبی انشعاب باعث افزایش استهلاک موج می‌شود. همانطور که در شکل‌های قبلی بیان شد، فعال بودن انشعاب بر فاز سیگنال تاثیر نمی‌گذارد.

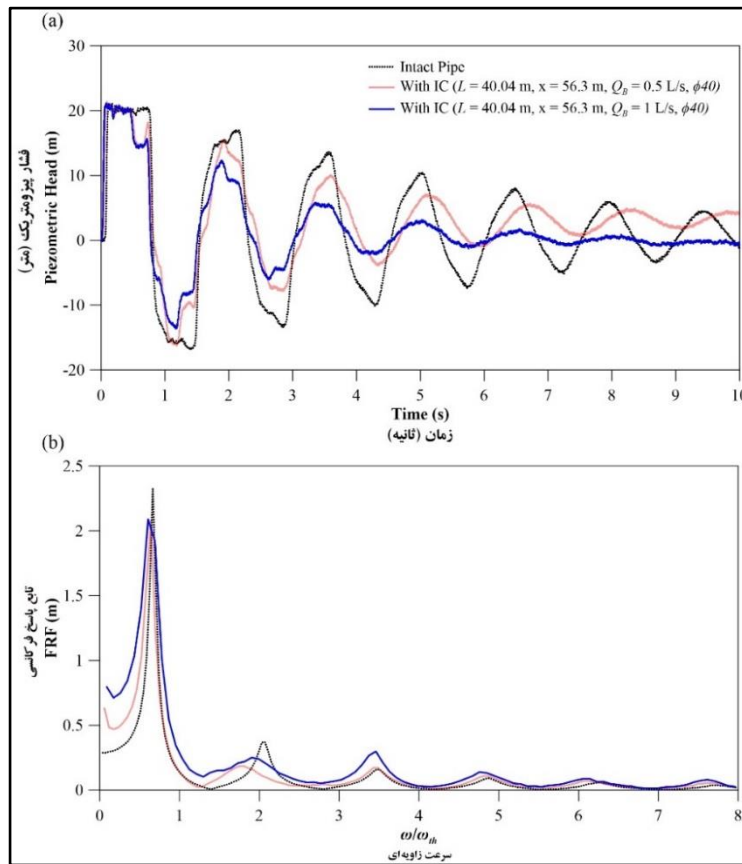
در شکل ۱۱ نیز اثر اندازه دبی انشعاب برای مکان ۵۳/۳ متر نمایش داده شده است. مقایسه نوسان‌های فشار در حوزه زمان نشان می‌دهد که فعال بودن انشعاب باعث استهلاک بیشتر موج فشاری می‌شود. با وجود این، تغییر فاز محسوسی در سیگنال فشار ایجاد نمی‌شود. در شکل



شکل ۱۰- اثر دبی انشعاب ۰/۵ لیتر بر ثانیه بر سیگنال فشار در فاصله ۵۶/۳ متر در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس، و در فاصله

۱۱۷/۴ متر در حوزه (c) زمان و (d) فرکانس، برای دبی خط لوله ۱ لیتر بر ثانیه

Fig. 10 The effect of illegal connection flow rate on the pressure signal at a flow rate of 0.5 liter per second at a distance of 56.3 m in the domain of a) time and b) frequency and at a distance of 117.4 m in the domain of c) time and d) frequency, for the flow rate of pipeline 1 liters per second

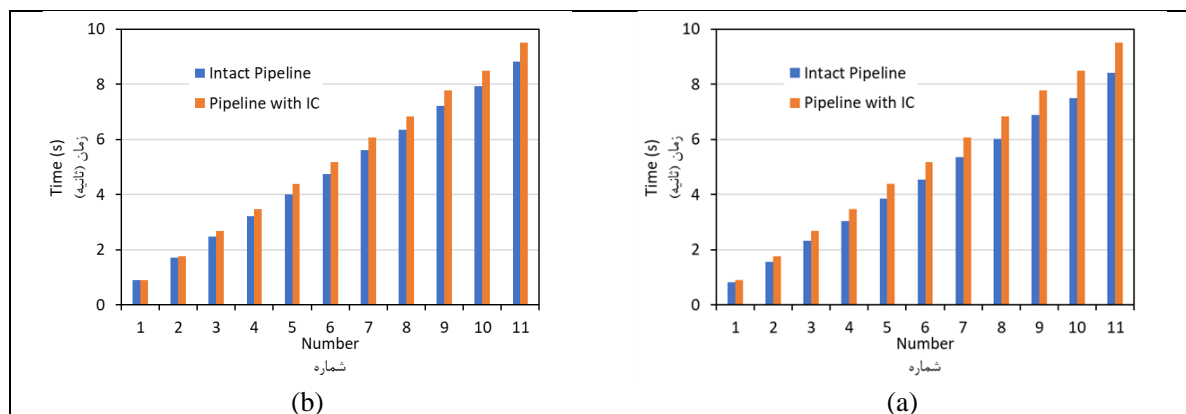


شکل ۱۱- اثر دبی انشعاب بر سیگنال فشار در دبی ۱ لیتر بر ثانیه در فاصله ۵۶/۳ متر برای دبی انشعاب ۰/۵ لیتر بر ثانیه و ۱ لیتر بر ثانیه در حوزه (a) زمان و (b) فرکانس

Fig. 11 The effect of illegal connection flow rate at a distance of 56.3 m on the pressure signal for $Q = 1$ L/s and illegal connection flow rate of 0.5 and 1 L/s in the a) time and b) frequency domains

زمان برخورد سیگنال با فشار صفر ارائه شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با نزدیک شدن انشعاب به شیر ضربه قوچ اثر آن بر تغییر فاز موج فشاری مشهودتر است و در انشعاب‌های دور از محل تولید ضربه قوچ تغییر فاز کم می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد با گذر زمان از شروع ضربه قوچ، درصد افزایش اختلاف فاز بیشتر می‌شود.

در شکل‌های ۱۲a و ۱۲b انشعاب غیر مجاز بر تغییر فاز سیگنال در دو مکان ۱۱۷/۴ و ۵۶/۳ متری از بالادست خط لوله برای دبی ضربه قوچ ۱ لیتر بر ثانیه نمایش داده شده است. در این شکل‌ها، در محور افقی ۱۱ محل برخورد متوالی به ترتیب از شروع ضربه قوچ برای خط لوله سالم (خطوط آبی-رنگ) و خط لوله با وجود انشعاب غیرمجاز (خطوط نارنجی رنگ) رسم شده است. در محور عمودی،



شکل ۱۲- اثر انشعاب غیرمجاز بر تغییر فاز سیگنال فشار در حوزه زمان (a) برای انشعاب در فاصله ۱۱۷/۴ متر از بالادست، و (b) برای انشعاب در فاصله ۵۶/۳ متر از بالادست

Fig. 12 The effect of illegal connection on the phase change of the pressure signal in the time domain a) for the illegal connection at a distance of 117.4 m from the upstream, and b) for the illegal connection at a distance of 56.3 m from the upstream

L1 و L2 نمایش داده شده است) و دو نشت همزمان با لوله سالم مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که وجود نشت نیز تأثیری بر فاز موج فشاری در لوله‌های ویسکوالاستیک ندارد.

برابر تحقیقات وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2020) و پان و همکاران (Pan *et al.*, 2020) از ثابت بودن این نقاط می‌توان برای محاسبه گام به گام مشخصات لوله شامل زبری و مشخصات ویسکوالاستیک استفاده کرد. در واقع، در یک رویکرد دو مرحله‌ای با توجه به مستقل بودن این نقاط برخورد با فشار صفر می‌توان بدون توجه به وجود نشت در سیستم ضرایب ویسکوالاستیک و سرعت موج فشاری را تخمین زد و در گام بعد با تعداد متغیرهای کمتری فقط مشخصات مجهول نقص یا زبری لوله را به عنوان متغیر تصمیم‌گیری بهینه‌سازی کرد. مقایسه رفتار سیستم لوله سالم و لوله با وجود نشت نشان داد که در مقایسه با این سیستم‌ها، لوله با وجود انشعاب رفتار پیچیده‌تری دارد و نمی‌توان آن را با رویکرد چند مرحله‌ای حل

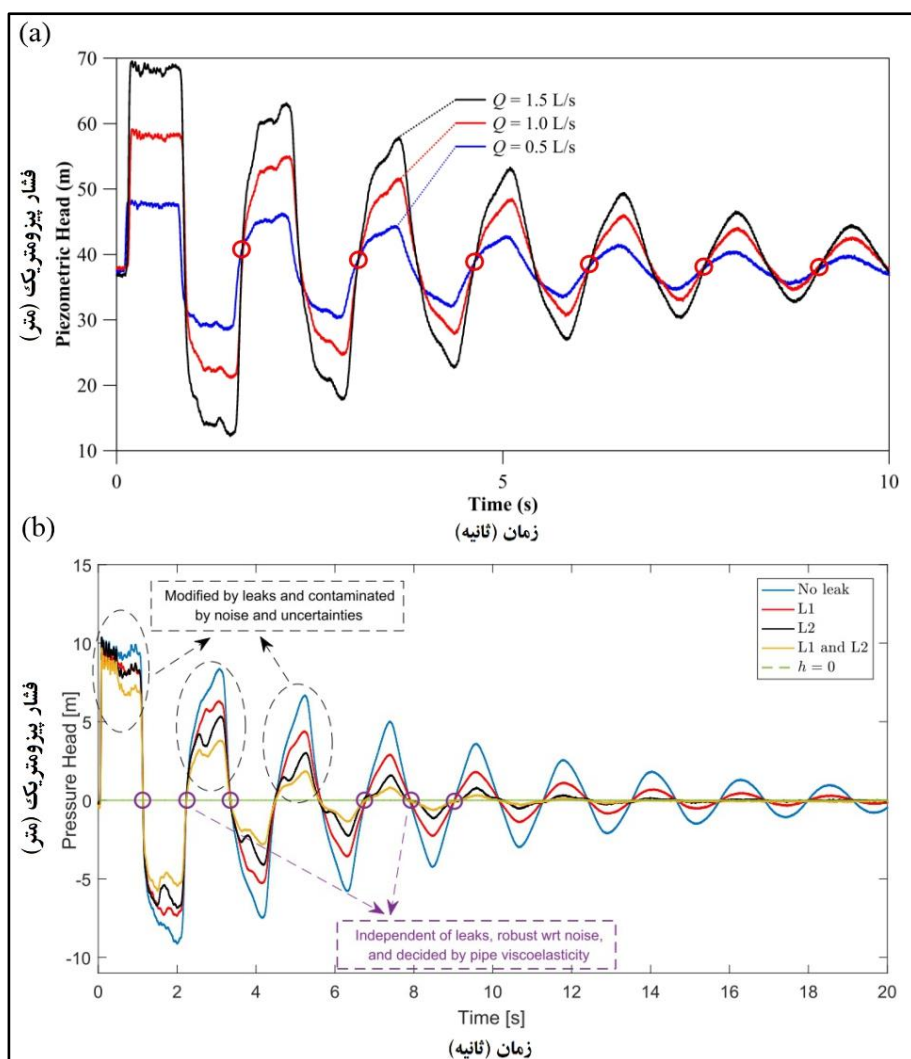
مقایسه سیگنال فشار در سیستم‌های مختلف لوله

در این قسمت، هدف عبارت است از بررسی تغییرات سیگنال فشار پشت شیر در سیستم لوله سالم در دبی‌های مختلف و اثر نشت بر مشخصات سیگنال. در واقع، هدف این قسمت ارزیابی سیستم لوله سالم و با نقص نشت در مقایسه با انشعاب غیرمجاز است.

در شکل ۱۳a اثر شدت جریان در سیستم لوله سالم ارائه شده است. در سیستم لوله سالم با تغییر دبی افت لوله تغییر می‌کند. این شکل نشان می‌دهد که افت لوله نمی‌تواند فاز سیگنال را تغییر دهد. بنابراین، همان‌طور که با دایره‌های قرمز کشیده شده است، در سیکل‌های مختلف سیگنال فشار از یک زمان مشخص عبور کرده و در واقع سیگنال فشار با تغییر دبی در لوله سالم تغییر فاز نمی‌دهد.

در شکل ۱۳b که برگرفته از تحقیق وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2020) است، اثر نشت بر سیگنال فشار ارائه شده است. در آزمایش‌های مختلف با یک نشت با اندازه متفاوت (در شکل با

کرد. در روش‌های نقص‌یابی بر پایه جریان گذرا برای نقص‌های با این رفتار که تغییر فاز در سیگنال ایجاد می‌کنند، ناگزیر باید همه متغیرهای تصمیم را با هم بهینه کرد یا دنبال رویکرد ریاضی دیگری برای حل این گونه مسائل بود. در واقع، شناخت رفتار لوله ویسکوالاستیک با انشعاب ویسکوالاستیک می‌تواند برای اتخاذ تصمیم برای ارائه راهکارهای جدید در حوزه فرکانس راهگشا باشد.



شکل ۱۳- (a) مقایسه سیگنال فشار در دبی‌های مختلف لوله سالم، (b) مقایسه اثر نشت بر مشخصات سیگنال فشار (Wang et al., 2020)

Fig. 13 (a) Comparison of the pressure signal at different flow rates of the intact pipe, (b) Comparison of the effect of leakage on the characteristics of the pressure signal (Wang et al., 2020)

رسیدن به هدف‌های این تحقیق سناریوهای مختلفی شامل اثر طول، قطر و مکان انشعاب، شدت جریان گذرا و فعال بودن یا غیرفعال بودن آن بررسی شد. مقایسه اثر انشعاب‌ها با طول مختلف

نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی اثر انشعاب غیرمجاز بر موج فشاری جریان گذرا در خطوط لوله انتقال ویسکوالاستیک است. برای

مقایسه نوسان‌های فشار در حوزه زمان نشان می‌دهد که فعال بودن انشعاب استهلاک بیشتر بر موج جریان گذرا اعمال می‌کند. با این همه، تغییر فاز محسوسی در سیگنال فشار ایجاد نمی‌شود. مقایسه نوسان‌ها در حوزه زمان نشان می‌دهد که افزایش دبی انشعاب باعث افزایش استهلاک موج می‌شود. فعال بودن انشعاب بر فاز سیگنال تاثیر نمی‌گذارد. این تحقیق می‌تواند مبنای روش‌های تشخیص انشعاب غیرمجاز بر پایه جریان گذرا در آینده باشد. در پایان مقایسه اثر انشعاب با لوله سالم و لوله با وجود نشت نشان می‌دهد که برخلاف کالیبراسیون لوله سالم و لوله با وجود نشت که می‌تواند به صورت دو مرحله‌ای باشد، برای مدلسازی انشعاب غیرمجاز، به دلیل اختلاط اثر ویسکوالاستیسیته و انشعاب، کالیبراسیون باید یک مرحله باشد. با این رویکرد همه متغیرهای تصمیم‌گیری باید به صورت همزمان کالیبره شوند.

نشان می‌دهد که با افزایش طول انشعاب، بازتاب آن شدیدتر و اثر آن بر پایین افتادگی موج فشار مشهودتر است. وجود انشعاب باعث تغییر فاز موج فشاری می‌شود و این تغییر فاز با گذر زمان بیشتر خواهد شد. به دلیل بازتاب موج، خصوصاً در پیک‌های ابتدایی، مقدار اضافه فشار ناشی از اضافه فشار لوله سالم بیشتر است. با افزایش طول لوله، مقدار تغییر فاز موج فشاری بیشتر می‌شود. با نزدیک شدن به شیر، اثر طول انشعاب بسیار مشهودتر و اختلاف فاز آن نسبت به لوله سالم زیاد می‌شود. مقایسه اثر شدت جریان گذرا بر پاسخ فشاری سیستم لوله با وجود انشعاب نشان می‌دهد که با افزایش شدت ضربه قوچ تنها اختلاف سیگنال‌ها بیشتر می‌شود که ناشی از بازتاب شدیدتر انشعاب است. با نزدیک شدن به شیر ضربه قوچ، میزان اختلاف فاز با گذر زمان از شروع جریان گذرا شدیدتر و اختلاف سیگنال‌ها زیاد می‌شود.

قدردانی

از دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل در اختیار گذاشتن امکانات مدلسازی آزمایشگاهی این تحقیق قدردانی می‌شود.

مراجع

- Al-Tofan, M., Elkholy, M., Khilqa, S., & Chaudhry, M. H. (2020). Leak detection in liquid pipelines using lower harmonics of pressure oscillations. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, (11) 4, 04020033.
- AWWA, Manual of water supply practices: Water audits and leak detection. 4th ed., USA, American Water Work Association, 1990.
- Bachman, G., Narici, L., & Beckenstein, E. (2000). *Fourier and wavelet analysis* (Vol. 586). New York: Springer.
- Covas, D. (2003). Inverse transient analysis for leak detection and calibration of water pipe systems modelling special dynamic effects (Ph. D. Thesis), Imperial College of Science. Technology and Medicine.
- Ebrahimi, E., Shafai Bejestan, M., & Aminnejad, B. (2022). Illegal connection detection in a viscoelastic pipeline using inverse transient analysis in the time domain. *Water Supply*, (22) 4, 4594-4605.
- Evangelista, S., Leopardi, A., Pignatelli, R., & de Marinis, G. (2015). Hydraulic transients in viscoelastic branched pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, (141) 8, 04015016.

- Keramat, A., & Duan, H. F. (2021). Spectral based pipeline leak detection using a single spatial measurement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (161), 107940.
- Keramat, A., & Zanganeh, R. (2019). Statistical performance analysis of transient-based extended blockage detection in a water supply pipeline. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, (68) 5, 346-357.
- Keramat, A., Duan, H. F., Pan, B., & Hou, Q. (2022). Gradient-based optimization for spectral-based multiple-leak identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (171), 108840.
- Keramat, A., Fathi-Moghadam, M., Zanganeh, R., Rahmanshahi, M., Tijsseling, A. S., & Jabbari, E. (2020). Experimental investigation of transients-induced fluid–structure interaction in a pipeline with multiple-axial supports. *Journal of Fluids and Structures*, (93), 102848.
- Kim, S. H. (2018). Development of multiple leakage detection method for a reservoir pipeline valve system. *Water Resources Management*, (32) 6, 2099-2112.
- Malica, T., Shekhar, S., & Ali, Z. (2011). Design and comparison of butterworth and Chebyshev type-1 low pass filter using Matlab. *Int. J. Eng. Sci*, 4, 423-438.
- MATLAB. (2022a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M., & Massari, C. (2009, July). Detection of illegal branches in pipe systems: A fast and reliable method. In *Proc., 10th Int. Conf. on Computing and Control for the Water Industry (CCWI)* (pp. 79-82).
- Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M., & Massari, C. (2011). *Transient tests for locating and sizing illegal branches in pipe systems. Journal of Hydroinformatics*, (13) 3, 334-345.
- Pan, B., Duan, H. F., Meniconi, S., & Brunone, B. (2021). FRF-based transient wave analysis for the viscoelastic parameter's identification and leak detection in water-filled plastic pipes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (146), 107056.
- Pan, B., Duan, H. F., Meniconi, S., Urbanowicz, K., Che, T. C., & Brunone, B. (2020). Multistage frequency-domain transient-based method for the analysis of viscoelastic parameters of plastic pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, (146) 3, 04019068.
- Rahmanshahi, M., Fathi-Moghadam, M., & Haghghi, A. (2018). Leak detection in viscoelastic pipeline using inverse transient analysis. *Journal of Water and Wastewater*, (29) 5, 85-97. (in Persian)
- Sarkamaryan, S., Haghghi, A., & Adib, A. (2018). Leakage detection and calibration of pipe networks by the inverse transient analysis modified by Gaussian functions for leakage simulation. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, (67) 4, 404-413.
- 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.
- Wang, X., Lin, J., Ghidaoui, M. S., Meniconi, S., & Brunone, B. (2020). Estimating viscoelasticity of pipes with unknown leaks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (143), 106821.

Extended Abstract**Experimental Investigation of the Illegal Connection Effect on Transient Pressure Wave Characteristics in Viscoelastic Transmission Pipelines****E. Ebrahimi, M. Shafai Bajestan*, and B. Aminnejad**

* Corresponding Author: Faculty of Water and Environmental Engineering Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran & visiting professor, Dept. Of Civil Engineering, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran. Email: m-shafaeibejestan@scu.ac.ir

Received: 19 November 2022, Accepted: 21 January 2023

Introduction

In recent years, due to the increase in population, demands, and water consumption, the limitation of freshwater resources on the one hand, and the lack of comprehensive and targeted management programs in the water resources sector, on the other hand, there are many problems facing water resources management. It has created countries. One of the sources of water wastage in water supply systems is the presence of illegal connections.

This research investigates the effect of illegal connections on the transient pressure signal in viscoelastic pipelines. This research can be the basis for detection methods of illegal connections based on transient flow analysis in the future. Most past research has been done numerically to detect illegal connections based on transient flow. More work has been done on the elastic pipe system than the laboratory research.

Methodology

In this research, building a laboratory model of a suitable viscoelastic polyethylene pipe system has been tried to investigate the effect of illegal connections on the pressure signal at Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz. The experimental program consisted of hydraulic transient tests with simulated illegal connections. The pipeline is made of HDPE with PE100 and NP16 bar. The pipeline's total length is about 158 meters, with built-in sloping rings upwards. The pipes are fixed to a metal structure to restrain them from axial movement.

The analysis includes removing noise from experimental signals, calculating overpressure in the time domain, and generating the system's frequency response using a Fast Fourier transform (FFT). There are different methods to remove the noises in the laboratory pressures. However, to avoid removing the valuable information of the pressure signal, by comparing different noise removal methods, including moving average, a frequency filter, etc., the best method for the transient was using the Butterworth low-pass frequency filter. In this method, by transferring the pressure signal from the time domain to the frequency domain, the high frequencies of the wave, which are mainly caused by environmental conditions, are removed, and the low frequencies of the signal are preserved.

Results and Discussion

Comparing the behavior of an intact pipe system and a pipe with a leak showed that compared to these systems, the pipe with an illegal connection has a more complex behavior and cannot be solved with a multi-step approach. In fault-finding methods based on transient with this behavior that causes a phase change in the signal, it is inevitable to optimize all the decision

variables together or look for another mathematical approach to solve such problems. Knowing the behavior of a viscoelastic pipe with an illegal viscoelastic connection can be a way to decide to provide new solutions in the frequency domain.

Conclusions

Comparing the effect of the illegal connection with different lengths shows that with the increase in the length of the branch, its reflection is more intense and its impact on lowering the pressure signal is more evident. In general, the illegal connection's presence causes the signal's phase change, which increases over time. The comparison of the effect of transient intensity on the pressure response of the pipe system with the presence of the illegal connection shows that with the increase in the transient intensity, only the signal difference increases, which is caused by the more substantial reflection of the illegal connection. Also, approaching the transient valve, the amount of phase difference becomes more intense with time and the contrast of signals increases. The comparison of pressure fluctuations in the time domain shows that the activation of the bifurcation exerts more attenuation on the transient flow wave. However, there is no noticeable phase change in the pressure signal.

Acknowledgment

The authors would like to express special gratitude to Shahid Chamran University of Ahvaz for giving them of opportunity and providing facilities to conduct this research.

Keywords: Transient wave, Waterhammer, polymer pipes, illegal connection