

## تحلیل آزمایشگاهی سیستم لوله انتقال ویسکوالاستیک تحت جریان گذرا

ایرج رضاپور<sup>۱</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۲\*</sup> و بابک امین نژاد<sup>۳</sup>

۱- گروه عمران، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد واحد رودهن، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۱۰

نوع مقاله: علمی- پژوهشی

### چکیده

امروزه لوله‌های پلیمری به علت برتری‌های قابل توجه فنی و اقتصادی، نسبت به سایر لوله‌ها، با روند رو به رشدی در سیستم‌های آبرسانی عمومی و صنعتی و انتقال فاضلاب در سراسر دنیا استفاده می‌شوند. این موضوع لزوم شناخت رفتار سازه‌ای و عملکرد هیدرولیکی لوله‌های پلیمری و تأثیرات ویژگی‌های ویسکوالاستیک بر نحوه تشکیل و میرایی موج فشار را بیش از پیش ضروری می‌سازد که سبب ارائه طرح‌های بهینه از منظر اقتصادی و فنی خواهد شد. برای بررسی این موضوع از یک مدل آزمایشگاهی خطوط لوله انتقال پلی‌اتیلن در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد بلافاصله پس از بستن سریع شیر ضربه‌قوچ، یک پیک فشاری قابل توجه و به دنبال آن یک افت ناگهانی در سیگنال فشار قابل مشاهده است. چنانچه محاسبات بر اساس مدل الاستیسیته ارائه شده توسط کارخانه پی‌گرفته شود، حتی با فرض الاستیک بودن لوله، مقدار اضافه فشار حدود ۱۶/۶ تا ۳۷/۶۵ درصد کمتر از مقدار واقعی خواهد بود. به دلیل تغییر شکل‌های تأخیری دیواره لوله، امواج فشاری به سرعت میرا می‌شوند و با گذشت زمان از شروع جریان گذرا، تأخیر زمانی آن بیشتر می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

اضافه فشار، پاسخ فشاری، خطوط لوله، سرعت موج فشاری، ضربه‌قوچ

### مقدمه

می‌شود که به‌طور دوره‌ای سبب افزایش و کاهش و بروز جریان‌های گذرا در خطوط لوله خواهد شد و چنانچه شدت نوسان‌ها شدید باشد، به وقوع ضربه‌قوچ منجر می‌شود. با فرض نبودن اصطکاک و افت‌های موضعی در سیستم فوق، این شرایط به‌صورت دوره‌ای در بازه زمانی  $t = 4L/a$  ( $L$  طول لوله (متر) و  $a$  سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه) است) تکرار می‌شود که دوره تئوری خط لوله نام دارد. در سیستم‌های واقعی فیزیکی، موج فشار

جریان گذرا در هر سیستم لوله تحت فشار، جریان حالت میانی است که بین یک جریان ماندگار و جریان ماندگار دیگر پدید می‌آید. به بیان دیگر، هرگاه در اثر هرگونه اغتشاش هدفمند یا تصادفی، شرایط جریان از حالت ماندگار تغییر کند، جریان گذرا در خط لوله ایجاد می‌شود (Chaudhry, 2014). در اثر باز یا بسته‌شدن ناگهانی شیر یا توقف و راه‌اندازی پمپ، موجی فشاری در طول لوله منتشر

در بسیاری از تحقیقات گذشته مرتبط با تحلیل جریان‌های گذرا، جداره لوله از جنس مصالح فلزی و بتنی با رفتار مکانیکی الاستیک بوده است. در سال‌های اخیر استفاده روزافزون از لوله‌های پلاستیکی (مانند پلی‌اتیلن و پی‌وی‌سی)، منجر به توسعه مدل‌های مکانیکی جریان گذرا با در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک این مصالح شده است. اثر ویژگی‌های ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلیمری بر نوسان‌های جریان گذرا را به‌صورت آزمایشگاهی چندین محقق از جمله فاکس و استپنیوسکی (Fox & Stepnewski, 1974)، میبیر و فرانک (MeiBner & Franke, 1977)، ویلیامز (Williams, 1977)، میتوسک و روزکوسکی (Mitosek & Roszkowski, 1998) مشاهده کرده‌اند. این محققان تأیید می‌کنند در لوله‌های پلی‌اتیلنی، میرایی موج فشار هنگام جریان گذرا، حتی هنگامی که لوله مهار شده است، خیلی بیشتر از میرایی به‌علت اصطکاک سیال (افت ماندگار) و وارونگی پروفیل سرعت (افت غیرماندگار) است.

برونون و همکاران (Brunone *et al.*, 2000) آزمایش‌هایی را در یک لوله پلی‌اتیلن ۳۵۰ متری، با هدف تشریح استهلاک موج فشار توسط ضریب افت غیرماندگار ارائه‌شده در رابطه برونون (Brunone, 1999)، به‌اجرا گذاشتند و افت موج فشاری جذب‌شده را به افت اصطکاک غیرماندگار مربوط دانستند. کواس و همکاران (Covas *et al.*, 2005) و پزینگا (Pezzinga, 2002) نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی و تئوری برای لوله‌های پلی‌اتیلن را با منظور کردن آنالیز رفتار الاستیک خطی و ویسکوالاستیک مصالح لوله ارائه کردند. این پژوهشگر همچنین مدل‌های یک‌بعدی و شبه-دو بعدی را توسعه داد. نتایج عددی این مدل‌ها

به‌علت افت اصطکاک ناشی از انتشار موج در خط لوله میرا می‌شود و سیال پس از مدتی کوتاه به سکون می‌رسد. این پدیده یکی از جدی‌ترین عوامل ایجاد آسیب در خطوط لوله تحت فشار است. از دیگر عوامل ایجاد جریان گذرا در هر سیستم می‌توان به آغاز به کار توربین‌های هیدرولیکی و لرزش پره چرخنده یا تیغه پروانه سیستم پیشراشه اشاره کرد.

در طرح‌های آبرسانی و انتقال سیالات، ایجاد جریان گذرا و پدیده ضربه‌قوچ همواره بررسی و تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه شده است. ژوکوفسکی (Joukowsky, 1904) آزمایش‌های متعددی روی انواع لوله‌ها اجرا و گزارشی در مورد تئوری ضربه‌قوچ منتشر کرد. وی سرعت موج را با در نظر گرفتن خاصیت ارتجاعی دیواره لوله و تراکم‌پذیری سیال و نیز مشهورترین معادله تئوری جریان‌های غیرماندگار را ارائه داد. این رابطه به‌عنوان معادله اساسی ضربه‌قوچ شناخته می‌شود. این رابطه برای تعیین شدت موج ضربه‌قوچ به‌صورت رابطه زیر است:

$$\Delta H = \pm \frac{a \Delta V}{g} \quad (1)$$

که در آن،

$H$  ارتفاع پیزومتریک (متر)؛  $a$  = سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)؛ و  $V$  = سرعت متوسط سیال (متر بر ثانیه) در مقطع لوله.

نشانه مثبت و منفی در معادله ژوکوفسکی زمانی به کار می‌رود که موج ضربه‌قوچ به ترتیب به سمت بالادست و پایین‌دست حرکت کند. تحقیقات ژوکوفسکی درباره اثر سرعت بسته‌شدن شیر بر موج فشاری نشان می‌دهد اگر زمان بسته‌شدن شیر کمتر از  $2L/a$  باشد، بیشینه افزایش فشار اتفاق خواهد افتاد.

پدیده ضربه قوچ در خطوط انتقال ویسکوالاستیک پرداخت. این محقق برای این کار یک مدل آزمایشگاهی گسترده ساخت و علاوه بر بررسی اندرکنش سازه و سیال، نشت را در خطوط انتقال ساده و سری با استفاده از روش حل معکوس جریان گذرا تشخیص داد.

در تحقیقات ارائه شده به تحلیل عددی پدیده ضربه قوچ و مدل سازی اثرهای ویسکوالاستیک در حوزه زمان پرداخته شده است. از طرفی ماهیت نوسانی جریان گذرا در خطوط لوله، امکان تحلیل مسئله ضربه قوچ در حوزه فرکانس را نیز فراهم می آورد. این زمینه مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. چودری (Chaudhry, 2014) مفاهیم و اصول مدل سازی جریان های گذرا را در حوزه فرکانس معرفی کرد. در این دیدگاه، رابطه های هایپربولیک حاکم بر مسئله با استفاده از تبدیل های لاپلاس یا فوریه به حوزه فرکانس منتقل و پس از یک سری ساده سازی ها (معمولاً حذف یا خطی سازی ترم افت انرژی) به صورت تحلیلی بر حسب فرکانس (به جای زمان) حل می شوند. این روش نیز در خصوص اعمال اثرهای ویسکوالاستیک نتایج مثبتی به دنبال دارد که از آن دست می توان به کارهای سو همکاران (Suo et al., 1990)، برینسون و برینسون (Brinson & Brinson, 2008)، واینمن و راجاگوپال (Wineman & rajagopal, 2000) اشاره کرد.

در سال های اخیر استفاده از لوله های پلیمری از جمله پلی اتیلن (PE) و پی وی سی (PVC)، بنا به برتری های فنی و اقتصادی که نسبت به سایر لوله ها از جمله فولادی، چدنی، بتنی و آزیست دارند، روز به روز بیشتر شده است. این موضوع لزوم شناخت رفتار سازه ای و عملکرد هیدرولیکی لوله های پلیمری

نشان داد که مدل ویسکوالاستیک افت، موج فشار را در لوله های پلاستیکی بهتر تشریح می کند و مدل الاستیک با دقت کافی پیشینه و کمینه نوسان های ناشی از اولین پیک فشار را تخمین می زند. نتایج این تحقیقات نشان می دهد تفاوت مدل یک بعدی و دوبعدی چندان چشمگیر نیست. کواس و همکاران (Covas et al., 2004) رفتار ویسکوالاستیک دیواره لوله در معادلات حاکم بر جریان گذرا را با استفاده از روش خطوط مشخصه مدل کردند. در این تحقیقات نتایج یک مدل خطی شده ویسکوالاستیک با و بدون اثر افت غیرماندگار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که سهم اثر اصطکاک غیرماندگار روی میرایی موج فشاری نسبت به کرنش های محیطی دیواره لوله ناچیز است.

اوانجلیستا و همکاران (Evangelista et al., 2015) به بررسی آزمایشگاهی انتقال و انعکاس موج فشاری جریان گذرا در شبکه لوله شاخه ای ویسکوالاستیک پرداختند و برای این کار دو مدل آزمایشگاهی شبکه لوله شاخه ای Y شکل را با مشخصات مختلف ساختند. نتایج بررسی ها نشان داد که امواج فشاری انتقالی و منعکس شده تا ۱۲ درصد با مقادیر تئوری فرض شده برای لوله های الاستیک متفاوت است. همچنین، علاوه بر تغییرات سطح مقطع و سرعت موج فشاری، رفتار رئولوژیکی اتصالات لوله ها بر ضریب انتقال و بازتاب تأثیر می گذارند. پارامترهای ویسکوالاستیک در این تحقیق با صرف نظر کردن از اصطکاک غیرماندگار کالیبره شدند.

حقیقی پور و فتحی مقدم (Haghighipour & Fathimoghadam, 2013) به بررسی میرایی جریان گذرا در خطوط انتقال ویسکوالاستیک پرداختند. رحمانشاهی (Rahmanshahi, 2017) به بررسی

است. 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 شد. لوله پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) (SDR11, PE100, NP16) با طول ۱۵۸ متر، قطر داخلی ۵/۰۵ سانتی‌متر و ضخامت ۶/۵ میلی‌متر است. شماتیک کلی و قسمت‌های مختلف مدل آزمایشگاهی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

امکانات آزمایشگاهی شامل یک پمپ گریز از مرکز با هد ثابت (PUMPIRAN, EN40-200,  $n=2900$  r.p.m, best performance conditions  $Q=26$  m<sup>3</sup>/h and  $H=52$  m) یک مخزن تحت فشار با حجم ۶۰۰ لیتر در انتهای بالادست و دو شیر ربع‌گرد و سوپاپی در انتهای پایین‌دست، به ترتیب برای تولید جریان گذرا و تنظیم جریان هستند. جریان در انتهای مسیر به لوله زهکش با سطح آزاد وارد می‌شود و از طریق کانال به مخزن آزمایشگاه می‌ریزد. مقدار تقریبی جریان در ابتدای سیستم لوله (بعد از مخزن فشار) با استفاده از دبی‌سنج آلتراسونیک قرائت و مقدار دقیق آن در انتهای سیستم به صورت حجمی اندازه‌گیری می‌شود.

با توجه به مراحل چهارگانه ضربه‌قوچ، 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، جریان هوادار خواهد شد. این پدیده باعث کاهش قابلیت سیگنال فشار برای تشخیص دیگر اختلالات سیستم می‌شود.

را بیش‌ازپیش ضروری می‌سازد. روش مدل‌سازی لوله‌های پلیمری برای تحلیل جریان‌های گذرا، چند تفاوت اساسی با روش مدل‌سازی لوله‌های غیر پلیمری دارد. این تفاوت‌ها عمدتاً به اندرکنش نوسان‌های سیال با مشخصات سازه‌ای جداره لوله مربوط می‌شوند. پلیمرها به‌طور کلی رفتار مکانیکی ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند که روی شدت، شکل‌گیری و میرایی نوسان‌های فشار در جریان‌های گذرا اثر می‌گذارد. در رابطه‌های حاکم بر ضربه‌قوچ، معمولاً فرض می‌شود که دیواره لوله از مصالح بتنی و فلزی است و رفتار الاستیک خطی دارد. درحالی‌که لوله‌های پلیمری رفتاری غیرالاستیک دارند.

هدف تحقیق حاضر، بررسی آزمایشگاهی پاسخ فشاری خط لوله ویسکوالاستیک تحت جریان گذرا است. با این هدف، در ابتدا پیک اولیه سیگنال فشار و اثرهای line paking و پس از آن اثر زمان بستن شیر ضربه‌قوچ در دبی‌های مختلف بر سیگنال فشار بررسی شده است. یکی دیگر از موضوع‌های مهم در پدیده ضربه‌قوچ، اضافه فشار است. در این تحقیق مقادیر آزمایشگاهی اضافه فشار با مقادیر محاسبه شده تئوری مقایسه شده است.

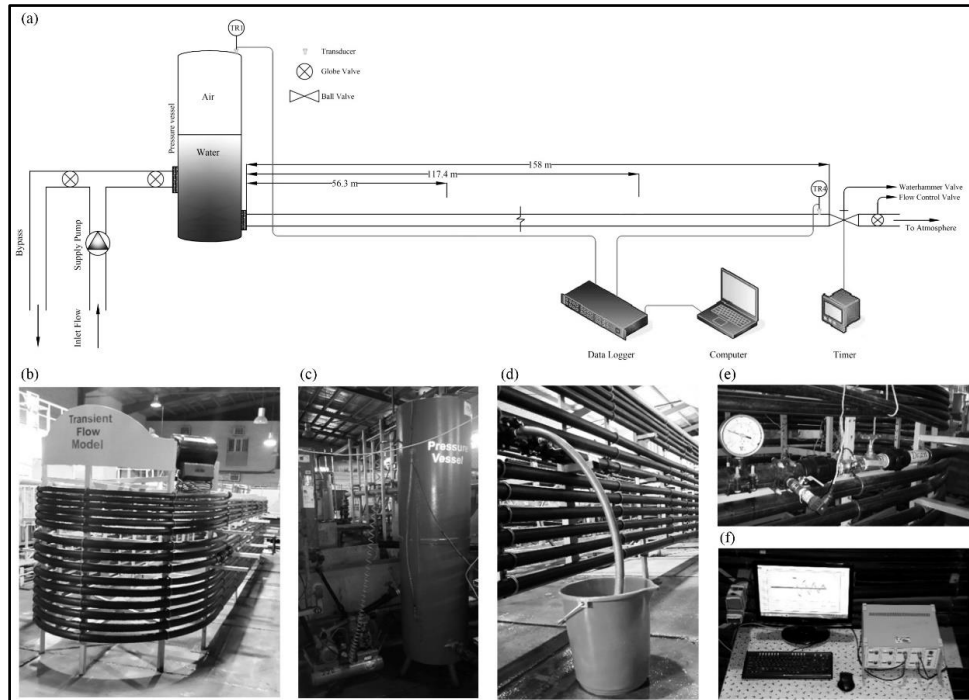
## مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، با هدف ارزیابی پاسخ سیستم خطوط لوله ویسکوالاستیک تحت جریان گذرا طراحی و ساخته شد. برای سادگی نصب ابزار دقیق و اجرای آزمایش‌ها، سیستم لوله‌ها به صورت صعودی در بدنه خارجی یک قاب فلزی (۶×۱/۵) نصب شد. اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای خط لوله ۰/۶۸ متر

تحلیل آزمایشگاهی سیستم لوله انتقال ویسکوالاستیک...

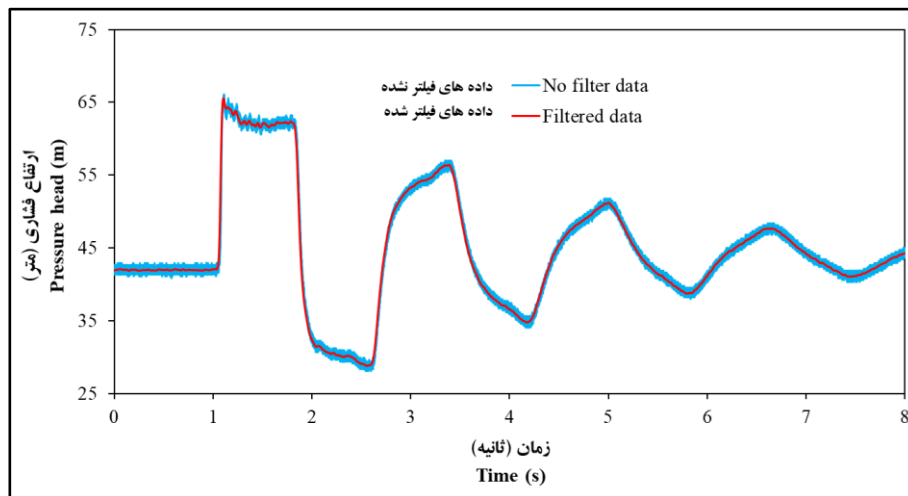
استفاده در این تحقیق از نوع WIKA با محدوده اندازه‌گیری صفر تا ۱۶ بار هستند.

برای اجتناب از این مشکل، در مرز بالادست سیستم لوله از مخزن تحت فشار به‌عنوان شرط مرزی بالادست استفاده شد. فشارسنج‌های مورد



شکل ۱- الف) نمای کلی مدل آزمایشگاهی جریان گذرا، ب) مدل آزمایشگاهی، ج) مخزن فشار، د) نشت مدلسازی شده، ه) شیرهای پایین دست، و) سیستم برداشت اطلاعات (مدل آزمایشگاهی دانشگاه شهید چمران اهواز)

Fig. 1- a) Overview of hydraulic transient experimental mode, b) experimental model, c) pressure vessel, d) simulated leak, e) downstream valves, f) data acquisition system (Experimental model of Shahid Chamran University of Ahvaz)



شکل ۲- حذف نویز از داده‌های آزمایشگاهی فشار با اعمال فیلتر پایین گذر باترورت

Fig. 2- Noise removal from pressure laboratory data by applying Butterworth low-pass filter

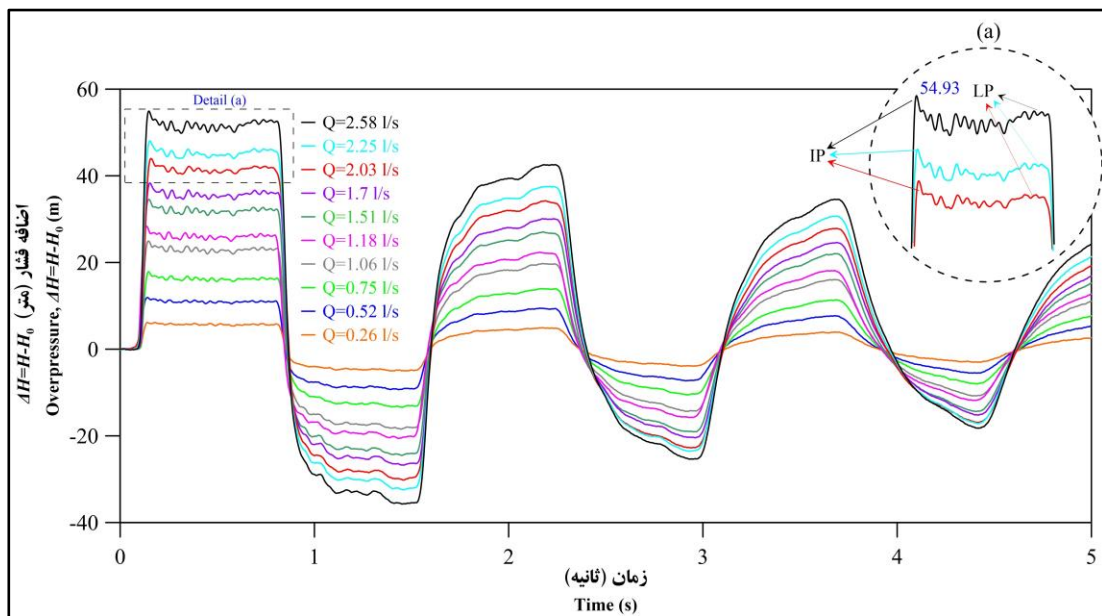
### نتایج و بحث

#### پیک فشار ابتدایی و افت ناگهانی فشار

جریان گذرا برداشت‌شده در فشارسنج TR4 برای دبی‌های مختلف ۰/۲۶ تا ۲/۵۸ لیتر بر ثانیه در شکل ۳ نمایش داده شده است. برای نمایش بهتر نتایج، مقدار اضافه‌فشار ( $\Delta H = H - H_0$ )، که در آن  $H$  ارتفاع پیزومتریک گذرا و  $H_0$  ارتفاع پیزومتریک جریان ماندگار است) این سیگنال‌ها ترسیم شده است. برای نمایش جزئیات تاج اول سیگنال فشار، این قسمت از سیگنال برای سه دبی بزرگ‌تر در قسمت (a) بزرگنمایی شد. مطابق شکل، پس از بسته‌شدن شیر تولید جریان گذرا، سیگنال فشار دارای یک پیک است که پس از آن به سرعت افت ناگهانی فشار رخ می‌دهد. اگرچه این پدیده در همه دبی‌ها قابل مشاهده است، مقدار آن برای دبی‌های بزرگ‌تر قابل توجه است.

در ابتدای هر آزمایش، تقریباً نصف حجم مخزن با استفاده از کمپرسور هوا پر شده شار آن به حدود ۴۵ متر آب می‌رسید. با این شرایط در حین جریان گذرا، فشار کمتر از فشار بخار درسیستم ایجاد نمی‌شود و سیستم نیز دچار جدایی ستون سیال نمی‌شود. همچنین به دلیل شرایط محیطی، سیگنال‌های آزمایشگاهی دیجیتالی همواره مقداری نویز اضافی دارند. در این تحقیق نویزهای با فرکانس بالا مطابق شکل ۲ با اعمال فیلتر پایین‌گذر باترورث از سیگنال فشار حذف شدند.

فیلتر استفاده شده از نوع فیلترهای فرکانسی است و با تعریف یک حد مشخص از فرکانس سیگنال، سیگنال‌های با فرکانس بالاتر از آن مقدار را حذف می‌کند (برای راهنمایی بیشتر به راهنمای برنامه MATLAB مراجعه شود) (MATLAB R2018b).



شکل ۳- اضافه‌فشار گذرا در پشت شیر تولید ضربه‌قوچ در دبی‌های مختلف

Fig. 3- Transient Over-pressure upstream of the transient valve at different flow rates

ابتدایی را تولید می‌کنند، پس از آن، به دلیل تغییر شکل‌های تأخیری، دیواره لوله سست‌تر می‌شود و به

زمانی که لوله‌های پلیمری تحت اثر بار آبی قرار می‌گیرند، سخت‌تر می‌شوند و یک پیک فشاری

(HDPE) بین ۰/۷ و ۱ گیگا پاسکال متغیر است (Janson, 1995). بنابراین، بر اساس رابطه سرعت موج فشاری در لوله‌های جداره ضخیم مهارشده (Wylie & Streeter, 1993)، مقدار سرعت متناظر با این مقادیر به ترتیب برابر ۲۹۴/۲۰ و ۳۴۸/۷۱ است. برای دبی ۲/۵۸ لیتر بر ثانیه، جریان گذرا سریع با این سرعت‌ها به ترتیب اضافه فشار ۳۸/۶۵ و ۴۵/۸۱ متر تولید می‌کند (بدون در نظر گرفتن اثرهای Line packing). در صورتی که حداکثر اضافه فشار مشاهداتی ۵۴/۹۳ است. در نظر گرفتن اثرهای Line packing این اختلاف را کاهش می‌دهد، به طوری که برای سرعت‌های بالا ۱۰ درصد حداکثر فشار را افزایش می‌دهد (Covas, 2003).

پیک ابتدایی فشار به علت اثر اصطکاک و اینرسی سیال و تغییر شکل‌های تأخیری دیواره لوله، در دوره اول موج فشاری ( $T = 4L/a$ ) کاملاً تضعیف شده است و در دوره‌های متوالی بعدی وجود ندارد. با توجه به اینکه لوله‌های پلی‌اتیلن تا سه برابر فشار اسمی در مقابل بارگذاری با سرعت سریع و در دوره زمانی کوتاه مقاومت می‌کنند (Janson, 1995; Marshal *et al.*, 1998)، این اضافه فشارها مشکلی برای خود لوله‌ها ایجاد نمی‌کند. با این همه، دیگر قسمت‌های سیستم از جمله شیرها و اتصالات مجاور محل تولید جریان گذرا، اگر به درستی و با لحاظ کردن این اضافه فشارها طراحی و مقاوم‌سازی نشوند، ممکن است استحکام و آب‌بندی سیستم را دچار مشکل کند، به تدریج شروع به نشت کند و به شکست جدی سیستم لوله بینجامد.

دنبال آن پیک اولیه به سرعت افت می‌کند. در لوله‌های الاستیک، پس از تولید جریان گذرا، تاج سیکل‌های فشاری به خصوص در محل تولید جریان گذرا به دلیل اثرهای line packing روندی صعودی دارد (این پدیده زمانی رخ می‌دهد که جریان در انتهای پایین دست به طور کامل متوقف شده است، با این حال این پدیده تنها در بخشی از خط لوله اتفاق افتاده است. به دنبال آن با گذشت زمان، حجم آب متوقف شده افزایش می‌یابد، دیواره لوله منبسط می‌شود، سیال فشرده می‌شود و فشار پس از افزایش ناگهانی ناشی از تولید جریان گذرا، شروع به افزایش می‌کند. این پدیده به خصوص در محلی ظاهر می‌شود که جریان گذرا تولید می‌شود (Wylie & Streeter, 1993, pp. 62-64)، این در حالی است که نتایج نشان می‌دهد که در سیستم‌های لوله ویسکو این روند در ابتدا نزولی است و اثرهای line packing تضعیف می‌شود. شکل کلی سیگنال فشار گذرا در سیستم‌های لوله ویسکو به همین شکل است، اگرچه پیک ابتدای سیگنال فشار فقط در جریان‌های گذرا سریع ظاهر می‌شود.

مطابق جدول ۱، اضافه فشار محاسباتی با استفاده از رابطه اساسی ضربه‌قوچ برای جریان گذرا سریع،  $\Delta H = aQ/gA$  (Joukowsky, 1904)، با استفاده از سرعت موج تخمین زده شده بر اساس جدول الاستیسیته استاتیک لوله، ۱۶/۶ تا ۳۷/۶۵ درصد کمتر از اضافه فشار مشاهداتی است. با توجه به مشخصاتی که کارخانه سازنده ارائه داده است، مدول الاستیسیته لوله‌های پلی‌اتیلن با دانسیته بالا

جدول ۱- تخمین اضافه‌فشار برای دبی‌های مختلف جریان گذرا

Table 1- Estimation of overpressure for different transient flow rates

دبی (لیتر بر ثانیه) Q (l/s)	عدد رینولدز Re (-)	اختلاف فشار (متر) $\Delta H$ (m)	سرعت موج (متر بر ثانیه) a* (m/s)	سرعت موج (متر بر ثانیه) a** (m/s)	اختلاف فشار (متر) $\Delta H^*$ (m)	اختلاف فشار (متر) $\Delta H^{**}$ (m)	خطا (-) Error*	خطا (-) Error**
0.26	6559	6.16	294.20	348.71	3.89	4.62	36.77	25.06
0.52	13117	11.92	294.20	348.71	7.79	9.23	34.65	22.54
0.75	18919	17.90	294.20	348.71	11.24	13.32	37.23	25.60
1.06	26739	24.95	294.20	348.71	15.88	18.82	36.36	24.56
1.18	29766	28.35	294.20	348.71	17.68	20.95	37.65	26.09
1.51	38090	34.56	294.20	348.71	22.62	26.81	34.55	22.42
1.71	43136	38.34	294.20	348.71	25.62	30.36	33.19	20.81
2.03	51208	43.99	294.20	348.71	30.41	36.04	30.87	18.06
2.25	56757	48.05	294.20	348.71	33.71	39.95	29.85	16.86
2.58	65082	54.93	294.20	348.71	38.65	45.81	29.64	16.60

مقادیر ستون سوم جدول ۱ اضافه‌فشار اندازه‌گیری شده، ستون چهارم و پنجم مقادیر سرعت موج محاسباتی از رابطه سرعت موج فشاری تئوری به ترتیب با  $E_0 = 1.0 \text{ Gpa}$  و  $E_0 = 0.7 \text{ Gpa}$ ، ستون ششم و هفتم اضافه‌فشار تخمین زده شده با استفاده از رابطه ژوکوفسکی  $\Delta H = aQ/gA$  و مقادیر ستون چهارم و پنجم، و دو ستون آخر مقدار خطای محاسبه اضافه‌فشار ( $Error = (\Delta H - \Delta H^{or**})/\Delta H$ ) از دو روش محاسبه شده در ستون ششم و هفتم است. بالانویس (\*) مربوط به مقادیر محاسبه شده مدول الاستیسیته ۰/۷ گیگا پاسکال و بالانویس (\*\*\*) برای مقادیر محاسبه شده با مدول الاستیسیته ۱ گیگا پاسکال می‌باشد.

هم افزایش می‌یابد، به‌طور قابل‌توجهی کمتر تخمین زده می‌شود. مطابق نتایج به‌دست آمده، اضافه‌فشار پیش‌بینی شده ۱۶/۶ تا ۳۷/۶۵ درصد کمتر از مقدار مشاهداتی آن است. تخمین کمتر فشارهای گذرا در هنگام استفاده از رابطه‌های ساده‌شده و شبیه‌سازهای الاستیک جریان گذرا، یک دلیل مهم برای لحاظ رفتار مکانیکی دیواره لوله در جریان گذرا است.

#### اثر زمان بستن شیر بر پیک فشار حداکثر

پیک حداکثر فشار مشاهداتی در لوله‌های پلی‌اتیلن در حین جریان گذرای سریع، اگرچه در ابتدا به نظر می‌رسد وابسته به سرعت بارگذاری باشد، به سرعت جریان و زمان بستن شیر نیز وابسته است. در همین زمینه، آزمایش‌هایی برای بررسی اثر زمان بستن شیر بر پیک ابتدایی موج اجرا شد. آزمایش‌های جریان گذرا در دبی ۱ لیتر بر ثانیه برای زمان‌های بستن ۰/۰۵، ۰/۱۶ و ۰/۲۷ ثانیه، که

در عمل کاربرد لوله در زیر خاک به دلیل افزایش نیروهای محیطی باعث افزایش سختی لوله، سرعت موج فشاری و در نتیجه اضافه‌فشار تولیدی می‌شود. همچنین اضافه‌فشار تولیدی در لوله‌های با جنس سخت‌تر مانند PVC، حادثتر است تا در لوله‌های پلی‌اتیلن (Larson & Jonsson, 1991; Watters et al., 1976). بنابراین در مرحله طراحی، افزایش سختی لوله‌ها ناشی از تکیه‌گاه‌های دیواره لوله و اصطکاک ناشی از خاک اطراف آن، با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته بالاتر باید لحاظ شود.

تحلیل سیگنال جریان گذرا نشان می‌دهد که روابط کلاسیک ضربه‌قوج قادر به پیش‌بینی حداکثر فشار گذرا مشاهداتی جریان گذرای سریع در لوله پلی‌اتیلن نیست. محاسبه سرعت موج در لوله‌های پلی‌اتیلن بر اساس مدول الاستیسیته استاتیک (۰/۷ تا ۱ گیگا پاسکال)، در مقایسه با مدول الاستیسیته دینامیک (که تا دو برابر مدول الاستیسیته دینامیکی

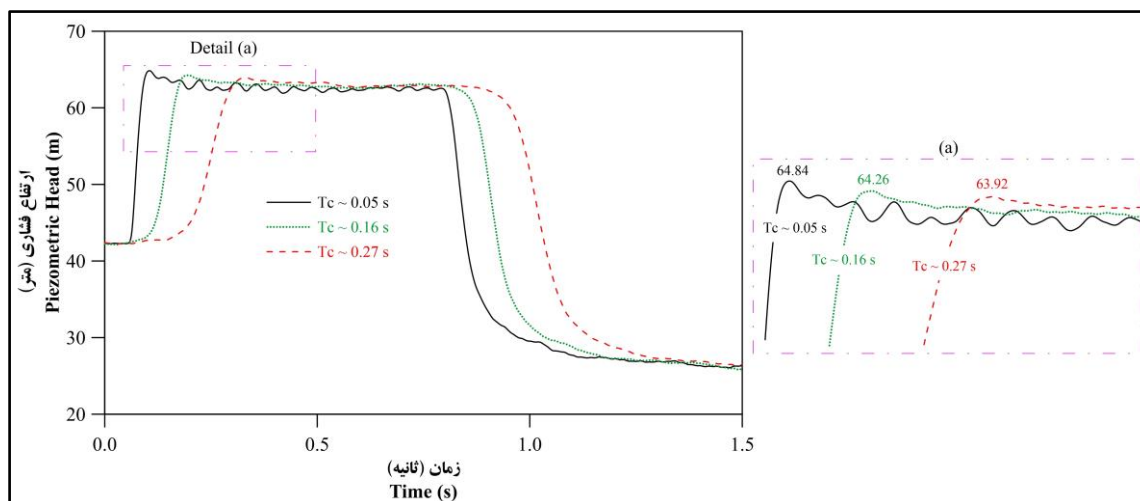


مدول الاستیسیته دینامیکی با افزایش زمان بستن شیر کاهش و خزش تطابقی افزایش می‌یابد. مدول الاستیسیته دینامیکی به دست آمده بیشتر از ۲ برابر مدول الاستیسیته استاتیکی ارائه شده توسط کارخانه سازنده (۰/۷ تا ۱ گیگا پاسکال) است. تغییرات  $E_0$  و  $J_0$  با زمان بستن شیر  $T_c$ ، روند معمول رفتار ویسکوالاستیک دیوار لوله است که برخلاف مواد الاستیک این پارامترها وابسته به زمان هستند. با توجه به نتایج تحقیقات کواس (Covas, 2003)، نوع شیر تولید ضربه قوچ و مقدار نویز سیگنال فشار بر مقدار پیک حداکثر فشار مؤثر است. همچنین در شرایط طبیعی و کاربرد سیستم لوله مشابه مدل آزمایشگاهی در زیر خاک، با توجه به افزایش سختی لوله، انتظار می‌رود مقادیر مدول الاستیسیته دینامیکی و خزش تطابقی به ترتیب مقادیری بیشتر و کمتر از مقادیر متناظر در مدل آزمایشگاهی باشند.

همگی در کلاس بستن سریع ( $T_c < 2L/a$ ) هستند، اجرا شد.

در شکل ۴، سیگنال‌های فشار در فشارسنج TR4 در زمان‌های مختلف بستن شیر ارائه شده است. ویژگی‌های پیک فشاری حداکثر شامل اضافه فشار، سرعت بارگذاری (سرعت بارگذاری یا سرعت افزایش فشار، نسبت بین اضافه‌فشار حداکثر  $\Delta H$  و زمان بستن شیر  $T_c$  است.)، سرعت موج، مدول الاستیسیته و خزش، در جدول ۲ ارائه شده است. با افزایش زمان بستن شیر، پیک‌های حداکثر فشار و شیب افت فشار آنها کاهش می‌یابد و این پیک به تدریج تضعیف می‌شود و از بین می‌رود. علاوه بر این، بسته به اختلاف زمانی بستن شیر، موج فشاری تأخیر زمانی خواهد داشت.

در جدول ۲ مقادیر سرعت موج با استفاده از پیک حداکثر فشار با استفاده از رابطه ژوکوفسکی  $\Delta H = aQ/gA$  محاسبه شده است. مقادیر متناظر



شکل ۴- سیگنال فشار برای زمان‌های مختلف بستن شیر در دبی ۱ لیتر بر ثانیه

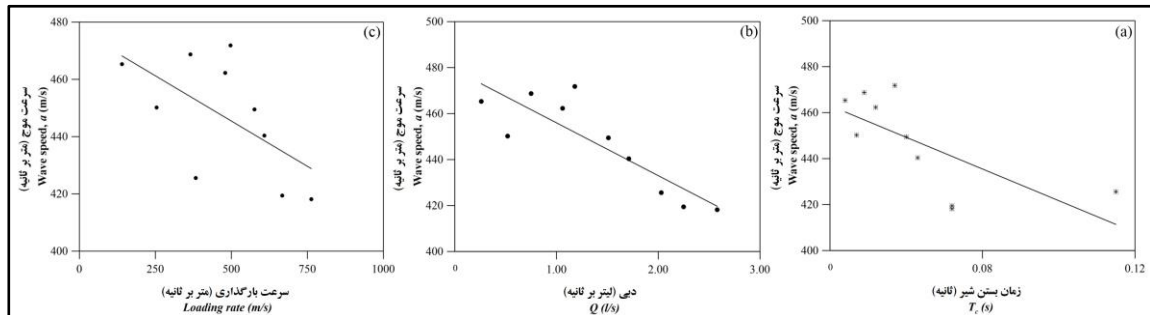
Fig. 4- Pressure signal for different valve closing times at  $Q=1$  l/s

جدول ۲- پارامترهای مرتبط با پیک فشاری حداکثر برای زمان‌های مختلف بستن شیر

زمان بستن شیر (ثانیه)	اختلاف فشار (متر)	سرعت بارگذاری (متر بر ثانیه)	سرعت موج (متر بر ثانیه)	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	خزش آنی (گیگا پاسکال/۱)
$T_c$	$\Delta H$ (m)	Loading rate(m/s)	$a$ (m/s)	$E_0$ (GPa)	$J_0$ (GPa <sup>-1</sup> )
0.05	22.55	451.0	442.87	1.67	0.60
0.16	22.05	137.8	433.05	1.59	0.63
0.27	21.64	80.1	425.00	1.53	0.65

نیست؛ با این حال، مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پیک فشار تابع سرعت جریان است، به این معنی که با توجه به اینکه شیر ضربه‌قوچ به صورت دستی بسته می‌شود، در دبی‌های بالا بستن سریع مشکل‌تر است و زمان بستن شیر افزایش و در نتیجه پیک فشاری کاهش می‌یابد.

خلاصه مشخصات مرتبط با پیک حداکثر برای دبی‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، رابطه بین شدت پیک فشاری (یعنی  $a$ ) و پارامترهای زمان بستن شیر  $T_c$ ، دبی  $Q$ ، و سرعت بارگذاری، در شکل ۵ نمایش داده شده است. پیک فشار به طور مستقیم تابع سرعت جریان و بارگذاری



شکل ۵- تغییرات سرعت موج تخمین زده شده از پیک فشار حداکثر در مکان TR4 نسبت به، (الف) زمان بستن شیر، (ب) دبی جریان، و (ج) سرعت بارگذاری

Fig. 5- Changes in the estimated wave velocity from the maximum pressure peak at location TR4 relative to (a) valve closing time, (b) flow rate, and (c) loading rate

به دلیل تنش پسماند دچار کرنش تأخیری می‌شود و در نتیجه فشار افت می‌کند. پس از آن، همان‌طور که قبلاً بیان شد، به دلیل اثرهای Line Packing، فشار شروع به افزایش می‌کند. این اثر خصوصاً در مکان پشت شیر (TR4) به وضوح دیده می‌شود. ولی این پدیده به شدت تحت تأثیر ویسکوالاستیک دیواره لوله است و نسبت به لوله‌های الاستیک تضعیف می‌شود و با افزایش زمان از شروع جریان گذرا و همچنین

استهلاک و تأخیر زمانی موج فشاری گذرا در شکل ۶، استهلاک و تغییر فاز سیگنال فشار در چهار فشارسنج در دبی ۱ لیتر بر ثانیه نمایش داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، افت فشار ناگهانی وجود دارد. مصالح این نوع لوله‌ها رفتار الاستیک خطی ندارند. این مشخصات رفتار ویسکوالاستیک دیواره لوله است که در زمان بارگذاری آنی (بستن شیر)، در ابتدا سخت‌تر و

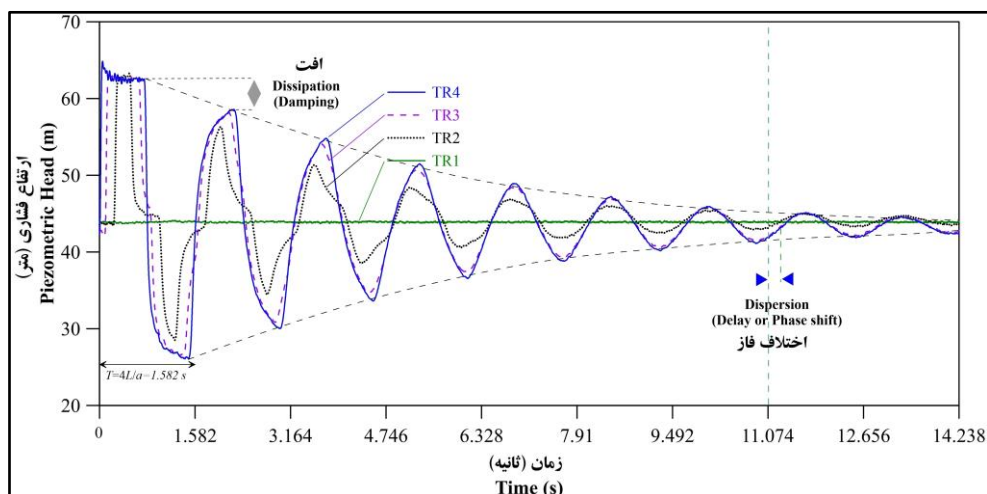
قابل توجه همراه با تغییر فاز<sup>۱</sup> در موج فشاری در همه مکان‌های اندازه‌گیری مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه این پدیده در لوله‌های فلزی به این شدت اتفاق نمی‌افتد، نمی‌توان آن را به‌طور کامل با استفاده از میرایی اصطکاکی<sup>۲</sup> توجیه کرد. این افت و تغییر فاز بیش از حد، عمدتاً ناشی از میرایی مکانیکی لوله است. این میرایی نتیجه انبساط/انقباض تأخیری مصالح لوله است، به‌طوری‌که بلافاصله به اعمال یک بار آبی پاسخ نمی‌دهد. این نوع پاسخ مکانیکی، پاسخ معمول در مصالح پلیمری خصوصاً پلی اتیلن است.

دور شدن از مکان تولید آن، بیشتر و بیشتر تضعیف می‌شود و اثری از آن در امواج فشار قابل مشاهده نیست. میرایی فشار قابل توجهی در دوره‌های متوالی موج فشار (در یک فشارسنج خاص) و همچنین در طول خط لوله (در فشارسنج‌های مختلف) دیده می‌شود. در دیگر فشارسنج‌ها در طول خط لوله (TR2 و TR3)، اثری از پیک ابتدایی دیده نمی‌شود. به دلیل تغییر شکل‌های تأخیری، نوسان‌های با فرکانس بالا، اثرهای FSI و پیک‌های شدید در طول خط لوله مستهلک می‌شوند. بررسی شکل ۶ نشان می‌دهد که یک افت انرژی

جدول ۳- پارامترهای مرتبط با پیک فشار حداکثر برای دبی‌های مختلف جریان

Table 3- Parameters related to the maximum pressure peak for different flow rates

دبی (لیتر بر ثانیه) Q (l/s)	زمان بستن شیر (ثانیه) T <sub>c</sub> (s)	اختلاف فشار (متر) ΔH (m)	سرعت بارگذاری (متر بر ثانیه) Loading rate (m/s)	سرعت موج (متر بر ثانیه) a (m/s)	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال) E <sub>0</sub> (GPa)	خزش آبی (گیگا پاسکال / J <sub>0</sub> (GPa <sup>-1</sup> )
0.26	0.044	6.16	140.00	465.29	1.86	0.54
0.52	0.047	11.92	253.62	450.19	1.73	0.58
0.75	0.049	17.90	365.31	468.72	1.9	0.53
1.06	0.052	24.95	479.81	462.26	1.84	0.54
1.18	0.057	28.35	497.37	471.84	1.92	0.52
1.51	0.06	34.56	576.00	449.49	1.73	0.58
1.71	0.063	38.34	608.57	440.33	1.65	0.61
2.03	0.155	43.99	382.52	425.58	1.53	0.65
2.25	0.072	48.05	667.36	419.40	1.49	0.67
2.58	0.072	54.93	762.92	418.13	1.48	0.68



شکل ۶- افت و تغییر فاز در سیگنال فشار در چهار فشارسنج در دبی ۱ لیتر بر ثانیه

Fig. 6- Head loss and and phase shift in pressure signal on four transducers at a flow rate of 1 l/s

1- Phase shift (Dispersion)

2- Frictional damping

## نتیجه‌گیری

کارخانه‌های سازنده، در مرحله طراحی است. به دلیل تغییر شکل‌های تأخیری دیواره لوله، سیگنال فشار به سرعت میرا می‌شود و با گذشت زمان از شروع جریان گذرا، تأخیر زمانی آن بیشتر خواهد شد. با توجه به اینکه این پدیده‌ها هرگز با این شدت در لوله‌های الاستیک دیده نمی‌شود، نمی‌توان گفت ناشی از اثرهای افت غیرماندگار هستند. علاوه بر این، منحنی فشار در مرحله بارگذاری و در مرحله باربرداری مشابه منحنی کرنش عمومی پلیمرها، به ترتیب محدب و مقعر شکل است. با توجه به وابستگی سیگنال فشار به تنش‌های محیطی پیشنهاد می‌شود این پژوهش برای سیستم‌های لوله واقعی مدفون تحت تنش محیطی خاک نیز اجرا شود.

بلافاصله پس از بستن سریع شیر ضربه‌قوچ، یک پیک فشاری قابل توجه و به دنبال آن یک افت ناگهانی در سیگنال فشار قابل مشاهده است. در یک دبی ثابت، فشار پیک اولیه با افزایش زمان بستن شیر کاهش می‌یابد. با فرض رفتار مکانیکی الاستیک خطی برای دیواره لوله، مقدار اضافه‌فشار پیک اول ناشی از جریان گذرای سریع، حدود ۱۶/۶ تا ۳۷/۶۵ درصد کمتر از مقدار واقعی آن است.

این موضوع یک دلیل مهم برای لحاظ کردن رفتار ویسکوالاستیک لوله‌های پلیمری توسط مدل‌های هیدرولیکی جریان گذرا دقیق یا در نظر گرفتن مدول الاستیسیته دینامیکی بعضاً تا ۲ برابر مدول الاستیسیته استاتیکی پیشنهاد شده توسط

## قدردانی

از دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی این تحقیق قدردانی می‌شود.

## مراجع

- Brinson, H.F., & Brinson, L.C. (2008). *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity, an Introduction*. Springer.
- Brunone, B. (1999). Transient test based technique for leak detection in outfall pipes. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 125 (5), 302-306.
- Brunone, B., Karney, B., Mercarelli, M., & Ferrante, M. (2000). Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 126(4), 236-244.
- Chaudhry, M.H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. Springer New York. (pp. 503).
- Covas, D. (2003). *Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems- Modelling Special Dynamic Effects*. PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, UK.
- Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N., & Maksimovic, C. (2004). The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients, Part I—Experimental analysis and creep characterization. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 42(5), 516–530.

- Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N., & Maksimovic, C. (2005). The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients, Part II—Model development, calibration and verification. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 43(1), 56–70.
- Evangelista, S.A., Leopardi, R., Pignatelli, G., & Marinis, G. (2015). Hydraulic transients in viscoelastic branched pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 141(8), 1-9.
- Fox, G.L.Jr., & Stepnewski, D. (1974). Pressure wave transmission in a fluid contained in a plastically deforming pipe. *Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME*, 96(4), 258-262.
- Haghighipoor, S., Fathimoghadam, M. (2013) Evaluation of Transient Hydraulic Flow in Flexible Pipe Line. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*. 36(4), 39-50. (in Persian)
- Jonsson, L. (1995). Leak Detection in Pipelines using Hydraulic Transients – Laboratory Measurements. University of Lund, Sweden, Lund.
- Joukowsky, N. (1904). Waterhammer (Mem. Imp. Acad. Soc. St. Petersburg, 1898) (translation by O. Simin). *Proceedings of American Water works Association*. 24, 341-424.
- Larson, M., & Jonsson, L. (1991). Elastic properties of pipe materials during hydraulic transients. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(10), 1317-1331.
- Marshall, G.P., Brogden, S., & Shepherd, M.A. (1998). Evaluation of surge and fatigue resistance of poly (vinyl chloride) and polyethylene material for use of the UK water industry. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Application*. 27(10), 483-488.
- MeiBner, E., & Franke, G. (1977). Influence of pipe material on the dampening of waterhammer. *Proceedings of the 17th Congress of the International Association for Hydraulic Research, Pub. IAHR*, Baden-Baden, F.R. Germany.
- Mitosek, M., & Roszkowski, A. (1998). Empirical study of waterhammer in plastic pipes. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*. 27(7), 436-439.
- Pezzinga, G. (2002). Unsteady flow in hydraulic networks with polymeric additional pipe. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(2), 238–244.
- Rahmanshahi, M. (2017) Leak detection in viscoelastic series pipeline in time domain. Ph.D. thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Suo, L., & Wylie, E.B. (1990). Complex wave speed and hydraulic transients in viscoelastic pipes. *Journal of Fluid Engineering, Trans. ASME*. 112, 496–500.
- Watters, G.Z., Jeppson, R.W., & Flammer, G.H. (1976). Waterhammer in polyvinyl chloride and reinforced plastic pipe. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE. HY7*, 831-843.
- Williams, D.J. (1977). Waterhammer in non-rigid pipes: precursor waves and mechanical dampening. *Journal of Mechanical Engineering, Trans. ASME*. 19(6), 237-242.

- Wineman, A.S., & Rajagopal, K.R. (2000). Mechanical Response of Polymers: an introduction. Cambridge University Press.
- Wylie, E.B., Streeter, V.L., & Suo, L. (1993). Fluid Transients in Systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. pp. 463.

## **Experimental Analysis of Viscoelastic Transmission Pipe System Under Transient Flow**

**I. Rezapour, M. Shafai Bajestan\* and B. Aminnejad**

\* Corresponding Author: Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: m\_shafai@yahoo.com

Received: 2 December 2020, Accepted: 29 January 2021

### **Extended Abstract**

#### **Introduction**

Transient flow in a pressurized pipe system is an intermediate state flow that arises between one constant flow and another. In other words, whenever the flow conditions change from a steady-state due to any deliberate or accidental disturbance, a transient flow is created in the pipeline (Chaudhry, 2014). This phenomenon is one of the most severe cases of damage in pressurized pipelines.

In many previous studies related to transient flow analysis, the pipe wall has been made of metal and concrete materials with elastic mechanical behavior. In recent years, the increasing use of plastic pipes (such as polyethylene and PVC) has led to the development of mechanical models of transient flow, taking into account the viscoelastic behavior of these materials.

In recent years, polymer pipes such as polyethylene and PVC, due to their technical and economic advantages over other pipes such as steel, cast iron, concrete, and asbestos, have increased day by day. This makes the need to understand the structural behavior and hydraulic performance of polymer pipes even more urgent. The modeling method of polymer pipes for transient flows analysis has several fundamental differences from non-polymer pipes. These differences are mainly related to the interaction of fluid fluctuations with the characteristics of pipe wall structures. Polymers generally exhibit viscoelastic mechanical behavior that affects the intensity, formation, and damping of pressure fluctuations in transient currents. In these equations, it is usually assumed that the pipe wall is made of concrete and metal and has a linear elastic behavior. In comparison, polymer pipes have inelastic behavior.

The present study aims to investigate the pressure response of viscoelastic pipeline under transient flow. For this purpose, first, the pressure signal's initial peak and the effects of line packing are investigated. The effect of the transient valve's closing time in different flows on the pressure signal is investigated in the following. Another important issue is the overpressure. In this research, laboratory values of overpressure are compared with the theoretically calculated values.

#### **Methodology**

The laboratory model of this research was designed and built in the hydraulic laboratory of the Faculty of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, to evaluate the response of the viscoelastic pipeline system under transient flow. The pipes are high-density polyethylene (HDPE) (SDR11, PE100, NP16) with a length of 158 meters, an inner diameter of 5.05 cm, and a thickness of 6.5 mm. According to the four stages of waterhammer, if the constant pressure of the pipeline is low, the pressure signal in the third

stage, after returning from the tank and reaching the transient flow valve, enters pressures less than the vapor pressure of the fluid, and due to the column separation. This phenomenon reduces the pressure signal capability to detect other system malfunctions. To avoid this problem, a pressurized reservoir was used as the upstream boundary condition at the pipe system's upper boundary.

### **Results and Discussion**

The initial peak pressure due to the effects of friction and fluid inertia and the delayed deformation of the pipe wall is completely weakened in the first period of the pressure wave and does not exist in subsequent periods. The transient flow signal analysis showed that the classical waterhammer equation could not predict the observed maximum transient pressure of fast transient in polyethylene pipe. The calculation of the wave speed in polyethylene pipes based on the modulus of static elasticity is significantly less than that of elasticity's dynamic modulus. As the valve's closing time increases, their maximum pressure peaks and pressure drop gradients decrease, and this peak gradually weakens and disappears. In addition, depending on the time difference between closing the valve, the pressure wave will have a time delay. The results showed that a significant energy drop with phase change in the pressure wave is observed in all measurement locations.

### **Conclusions**

After quickly closing the transient valve, a significant pressure peak is observed, followed by a sudden drop in the pressure signal. At a constant flow, the initial peak pressure decreases with increasing valve closing time. Suppose the calculations are based on the modulus of elasticity provided by the factory. Even if the elastic tube is assumed, the amount of overpressure is 16.6 to 37.65% less than the actual value. This is an important reason to consider polymer pipes' viscoelastic behavior by precision transient flow hydraulic models or to consider the dynamic modulus of elasticity, sometimes up to twice the static modulus of elasticity proposed by manufacturers, in the design phase.

### **Acknowledgment**

The authors would like to express special thanks of gratitude to the vice-chancellor of Shahid Chamran University of Ahvaz's research and technology for giving of opportunity and providing facilities to conduct this research.

**Keywords:** Overpressure, pipelines, Pressure response, pressure wave speed, waterhammer.