

## مدل سازی عددی جریان گذرا در شبکه آبرسانی ویسکوالاستیک

سجاد کیانی<sup>۱</sup>، منوچهر فتحی مقدم<sup>۲\*</sup>، احمد فتحی<sup>۳</sup>، علی حقیقی<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۳

## چکیده

پژوهش حاضر به معرفی و مدل سازی اثرات ویسکوالاستیک در جریان های گذرا در لوله های پلیمری رایج در شبکه های آبرسانی می پردازد. خواص ویسکوالاستیک سبب بروز ترم های جدیدی در معادلات سازگاری حاکم بر جریان های گذرا می شود که مدل ها موجود فاقد آن هستند. بر این اساس معادلات سازگاری برای خواص ویسکوالاستیک بازنویسی شده و با به کارگیری روش خطوط مشخصه در ترکیب با تفاضل محدود تحلیل می شوند. به منظور واسنجی پارامترهای مجهول نظیر ضرایب افت و خزش و صحت سنجی مدل عددی توسعه یافته، یک مدل آزمایشگاهی از شبکه آبرسانی ویسکوالاستیک در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران ساخته شد. شبکه آزمایشگاهی از شش حلقه مربعی که هر حلقه به صورت یک مربع  $3m \times 3m$  می باشد تشکیل شده است. لوله ها از نوع پلی اتیلن با قطر اسمی ۵۰ میلی متر و ضخامت ۵/۵ میلی متر است. در مدت زمان عبور جریان گذرا از شبکه لوله، نوسانات فشار دینامیکی توسط ترانسیدویسرهای فشار جمع آوری می شدند. با به کارگیری روش تحلیل معکوس جریان گذرا و استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، پارامترهای مجهول مسئله شامل ضرایب افت ناماندگار و ضرایب ویسکوالاستیک برای شرایط مختلف محاسبه می شوند. نتایج نشان می دهد که مدل کلاسیک ضربه قوچ به هیچ عنوان قادر به شبیه سازی نوسانات فشار در لوله های پلی اتیلن نمی باشد. در واقع مدل سازی دو اثر دینامیکی افت ناماندگار و ویسکوالاستیک برای این لوله ها بسیار ضروری است. همچنین نتیجه گرفته می شود که اثرات ویسکوالاستیک نقش بسیار پررنگ و مهم تری نسبت به افت ناماندگار در شکل گیری سیگنال های ضربه قوچ بازی می کنند تا جایی که در نظر گرفتن آن به تنهایی می تواند به پاسخ های قابل قبولی دست یافت.

کلمات کلیدی: افت غیرماندگار، تابع خزش، تحلیل معکوس، لوله پلی اتیلن، مدل کلون-ویت.

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشجوی دکترا، گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، (اصفهان - بلوار کشاورزی - محله چهل توت - کوچه شهید موسویان - پلاک ۱۳۰) شماره تلفن همراه: ۰۹۱۳۸۰۳۰۶۷۱، پست الکترونیک: sajad.kiani508@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد، گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، شماره تلفن: ۰۶۱-۳۳۷۳۸۳۵۹، پست الکترونیک: fathi49@gmail.com (\* نویسنده مسئول).

<sup>۳</sup> استادیار، گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، پست الکترونیک: a.fathi@scu.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، پست الکترونیک: ali77h@gmail.com

## مقدمه

فولادی، چدنی، بتنی و آزیست دارند روزبه‌روز بیشتر شده است. این موضوع لزوم شناخت رفتار سازه‌ای و عملکرد هیدرولیکی لوله‌های پلیمری را بیش از پیش ضروری می‌سازد. روش مدل‌سازی لوله‌های پلیمری جهت تحلیل جریان‌های گذرا چند تفاوت اساسی با لوله‌های غیرپلاستیکی نظیر فولادی، چدنی و یا بتنی دارد. این تفاوت‌ها عمدتاً به اندرکنش نوسانات سیال با مشخصات سازه‌ای جداره لوله مربوط می‌شوند. به طور کلی شدت ضربه قوچ به خصوصیات و سرعت سیال، مشخصات فیزیکی و مدول الاستیسیته لوله و شدت تغییر مومنتوم سیال بستگی دارد. در کنار شرایط فیزیکی و هیدرولیکی حاکم بر مسئله، خصوصیات مکانیکی لوله‌های مورد استفاده نیز تأثیر بسزایی در شدت فشارهای جریان گذرا دارند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد لوله‌هایی با مدول الاستیسیته کمتر، توانایی به مراتب بیشتری در دفع نیروی موج نسبت به لوله‌هایی با مدول الاستیسیته بیشتر دارا می‌باشند. برخلاف لوله‌های غیر پلیمری همچون فولادی، چدنی و بتنی که در مقابل بارهای وارد به صورت الاستیک عمل می‌کنند، پلیمرها به‌طور کلی رفتار مکانیکی ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند. به بیانی ساده، خواص ویسکوالاستیک مواد پلیمری در حین ضربه قوچ سبب ایجاد یک تنش پسماند در جداره لوله می‌شوند که به‌موجب آن، تغییر شکل‌های ایجاد شده دفعاتاً پس از باربرداری به حالت اولیه باز نمی‌گردند. این موضوع بر روی شدت، شکل‌گیری و میرایی نوسانات فشار در جریان‌های گذرا اثر می‌گذارد که بسته به خصوصیات پلیمر مورد استفاده و شدت نوسانات جریان، دامنه این اثرات متفاوت است.

نه تنها در محاسبات معمول و سرانگشتی ضربه قوچ، بلکه در نرم‌افزارها و مدل‌های تجاری پیشرفته همچون WaterHammer و Hytran نیز اثرات ویسکوالاستیک لوله‌های پلی‌اتیلن دیده نمی‌شود. بنابراین در طول چند سال گذشته، تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌های پلیمری بر جریان گذرا به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که موضوع اصلی این پژوهش را نیز تشکیل می‌دهد.

شناخت خصوصیات جریان گذرا از مهم‌ترین و اساسی‌ترین تحقیقات پایه در حوزه مکانیک سیالات است. پدیده هیدرولیکی جریان گذرا، شرایطی از جریان است که در آن تغییرات سرعت و فشار جریان با زمان بسیار سریع می‌باشد. در سیستم‌های خطوط لوله، هرگونه اغتشاش می‌تواند باعث تغییر شرایط حالت ماندگار و ایجاد جریان گذرا شود. معمولاً تغییراتی که در جریان گذرا در یک خط لوله پیش می‌آید به علت تغییرات در شرایط مرزی لوله است. از آن جمله می‌توان به باز کردن و بستن ناگهانی شیرها و از کار افتادن ناگهانی پمپ‌ها اشاره کرد که می‌تواند به تولید فشارهای بزرگی منجر شود. در نتیجه این امر، امواج فشاری در طول لوله‌ها شبکه منتشر شده و به‌طور دوره‌ای سبب افزایش و کاهش فشار در سیستم می‌شوند. بر اثر رفت و برگشت موج در لوله‌ها، سیگنال‌های نوسانات فشار در نقاط مختلف شبکه حاوی اطلاعات فراوانی از کل سیستم در هر دو حوزه زمان و مکان خواهند بود. این اطلاعات می‌توانند در ارزیابی شرایط موجود سیستم و تخمین پارامترهای اثرگذار دینامیکی مورد استفاده قرار گیرند. این مهم منوط به مدل‌سازی ریاضی با دقت بالای سیستم است. از مهم‌ترین پارامترهایی که نقش تعیین‌کننده در شکل‌گیری و میرایی نوسانات فشار در سیستم ایفا می‌کنند و ممکن است خطای قابل‌توجهی به نتایج وارد سازند می‌توان به زبری موجود در خطوط لوله، مدل تخمین افت غیرماندگار، ضرایب ویسکوالاستیک لوله‌های پلیمری و میزان سرعت انتشار موج فشاری اشاره نمود. بنابراین، مطالعه جریان‌های گذرا به منظور ارزیابی عملکرد یک شبکه آبرسانی و تخمین بیشینه و کمینه نوسانات فشار به کمک حل عددی معادلات غیرخطی سنت - ونانت در پروژه‌های مهندسی خط لوله و ایستگاه‌های پمپاژ از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند.

در سال‌های اخیر استفاده از لوله‌های پلیمری از جمله پلی‌اتیلن (PE) و پی‌وی‌سی (PVC) بنا به برتری‌های فنی و اقتصادی که نسبت به سایر لوله‌ها از جمله

تحت فشار گردید. به دلیل وجود اختلاف زیاد بین نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی، در ادامه مدل مشهور Brunone et al. (1991) برای شبیه‌سازی تنش برشی جریان گذرای سریع ارائه شد. دلیل موضوع، سادگی و توانایی آن در ایجاد هماهنگی منطقی با نتایج هد فشار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه است. این مدل با در نظر گرفتن ترم شتاب جابجایی به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$J_u = \frac{k}{g} \left( \frac{\partial V}{\partial t} - a \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (1)$$

در معادله بالا، که میزان افت غیر ماندگار  $J_u$  در واحد طول،  $k$  ضریب تجربی،  $g$  شتاب ثقل،  $V$  سرعت جریان و  $a$  سرعت موج فشاری در جریان گذرا می‌باشد.

Ghidaoui et al. (2002) به منظور ارزیابی اعتبار مدل‌های آشفتگی و افت غیرماندگار در جریان گذرا در یک سیستم، پارامتر بدون بعد ( $P$ ) ذیل را ارائه دادند:

$$P = \frac{2D/fV}{L/a} \quad (2)$$

به طوری که  $D$  قطر لوله،  $f$  ضریب افت دارسی-ویسباخ و  $L$  طول لوله است. آن‌ها بیان نمودند در صورتی که مقدار  $P$  در یک سیستم آبرسانی بزرگ‌تر از یک باشد آشفتگی ایجاد شده در جدار لوله، زمان بیشتری برای انتقال به مرکز لوله و تغییر پروفیل سرعت آن نیاز دارد بنابراین معادلات افت ارائه شده (با فرض شبه‌ماندگار بودن پروفیل سرعت جریان) برای تحلیل جریان گذرا در آن سیستم می‌تواند قابل قبول باشد. زمانی که مقدار  $P$  برابر با یک باشد آشفتگی و گردابه‌های به وجود آمده در نزدیکی جدار لوله به سمت مرکز لوله توسعه پیدا می‌کند از این‌رو از صحت کاربرد مدل‌های یک‌بعدی غیرماندگار موجود در جریان گذرا کاسته می‌شود. بنابراین نیاز است یک مدل افت غیرماندگار دقیق در مدل ویسکوالاستیک خطی لحاظ گردد.

در تحقیقات گذشته، جداره لوله از جنس مصالح فلزی و بتنی بوده و رفتار مکانیکی لوله الاستیک فرض می‌شد. در سال‌های اخیر استفاده روزافزون از لوله‌های پلاستیکی منجر به توسعه مدل‌های مکانیکی جریان

با نگاهی اجمالی به گذشته، چنین استنباط می‌شود که از دهه ۷۰ میلادی به بعد، بررسی جریان گذرا در طرح‌های انتقال آب، پروژه‌های مربوط به نیروگاه‌های آبی و سیستم‌های انتقال تحت فشار سیالات دیگر مورد توجه خاص قرار گرفت و به صورت گسترده‌ای در طرح‌ها مطرح گردید که در ادامه به اهم کارهای تجربی و آزمایشگاهی که توسط محققین انجام پذیرفته است اشاره می‌شود.

Holmboe and Rouleau (1967) آزمایش‌های

جریان گذرا را در یک لوله فلزی و یک لوله مسی مدفون در بتن انجام دادند. هنگامی که نتایج محاسباتی با نتایج اندازه‌گیری‌ها مقایسه شد، مغایرت‌های قابل-توجهی در جابجایی دوره نوسان نمودار فشار مشاهده گردید. این مغایرت‌ها عمدتاً ناشی از معکوس شدن پروفیل سرعت و اغتشاش جریان در جدار لوله (به دلیل مقاومت کمتر در مقابل موج فشاری عبوری) است به-طوری که فرض بر این بود که ارتباط تنش برشی جداره با سرعت متوسط در سطح مقطع لوله برای جریان پایدار، در حالت ناپایدار نیز صادق می‌باشد بدین معنا که روابط بیان‌کننده تنش برشی جداره مربوط به جریان پایدار برای هر گام زمانی از جریان گذرا نیز صادق می‌باشد. Zielke (1968) مدل تنش برشی غیرماندگار خود را بر پایه حل تحلیلی معادلات یک‌بعدی جریان آرام با استفاده از تبدیل لاپلاس ارائه داد. این مدل، مقدار افت غیر ماندگار در یک مقطع محاسباتی را به شتاب موضعی و یک تابع وزنی مرتبط می‌سازد. از آنجا که انتگرال‌گیری عددی از معادله Zielke نیازمند به حافظه بالا و یک کامپیوتر با C.P.U قوی می‌باشد محققینی همچون Trikha (1975)، Vardy et al. (1993) تلاش نمودند که علاوه بر ساده‌سازی تابع وزنی Zielke، معادله آن را برای جریان‌های توربولانت نیز بسط دهند. Daily et al. (1965) برای تخمین اصطکاک غیرماندگار سرعت متوسط لحظه‌ای و شتاب محلی جریان از یک ضریب تناسب تجربی بود استفاده کردند. مدلی که توسط آن‌ها ارائه شد، در واقع پایه بسیاری از مطالعات بعدی در خصوص شبیه‌سازی افت غیرماندگار در لوله‌ها

پریودهای اول و دوم موج فشاری، هر دو خاصیت تأثیر یکسانی بر افت هد موج فشاری دارند اما در پریودهای بعدی، سهم اثر خاصیت ویسکوالاستیک لوله روی میرایی موج فشار خیلی بیشتر از اثر اصطکاک ناماندگار است. همچنین آن‌ها بیان نمودند که با بزرگ‌تر شدن مقیاس شبکه، خاصیت ویسکوالاستیک تأثیر بیشتری بر میرای موج فشاری خواهد داشت.

همچنین Evangelista et al. (2015) مبادرت به شبیه‌سازی آزمایشگاهی جریان گذرا در یک شبکه شاخه‌ای ویسکوالاستیک Y-شکل نمودند. هدف از این آزمایش، بررسی درصد عبور موج فشاری جریان گذرا و میزان انعکاس آن در محل تقاطع لوله‌ها است. نتایج به دست آمده نشان می‌داد که زاویه قرارگیری لوله‌ها در محل انشعاب تأثیری بر مقدار ضرایب انتقال و انعکاس موج فشاری جریان گذرا ندارد. بعلاوه ضرایب بدست آمده در این آزمایش با مقادیری که از روابط کلاسیک در شبکه‌های الاستیک حاصل می‌شود متفاوت است.

در ادامه این مطالعات می‌توان به تلاش‌های Pezzinga et al., Apollonio et al. (2013) (2014) و Carriço et al. (2016) در زمینه مدل‌سازی رفتار ویسکوالاستیک در جریان میرا با استفاده از روش تفاضل محدود و حل معادلات دوبعدی جریان اشاره کرد.

بر اساس منابع موجود، تاکنون مطالعات آزمایشگاهی بسیار محدودی درباره واسنجی ضرایب ویسکوالاستیک، سرعت انتشار موج فشاری، افت ماندگار و غیرماندگار در خطوط لوله ویسکوالاستیک صورت گرفته است و اکثر تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه در مورد یک سیستم ساده مخزن-لوله-شیر بوده است و تحقیقات دیگر در زمینه واسنجی نیز صرفاً عددی بوده است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق، توسعه یک مدل آزمایشگاهی از شبکه لوله پلی‌اتیلنی و پیاده‌سازی یک مدل عددی جریان گذرا برای توصیف رویدادهای گذرا می‌باشد. در این پژوهش، روشی بر پایه تحلیل معکوس جریان گذرا (ITA) و بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA) جهت واسنجی هم‌زمان

گذرا با در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیکی این مصالح شده است.

Brunone et al. (1995) آزمایشاتی را در یک لوله پلی‌اتیلن ۳۵۰ متری انجام دادند. هدف از این آزمایش، تشریح استهلاک موج فشار توسط ضریب افت غیرماندگاری بود که در رابطه برونون (رابطه ۱) استفاده شده است. اما نتایج عددی تعیین شده در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی اختلاف قابل توجهی را ارائه کرد. دلیل این اختلاف، اثر دینامیکی ویسکوالاستیسیته دیواره لوله است که در روش برونون منظور نشده بود. این اختلاف زیاد افت در سیستم‌های ویسکوالاستیک با یک پارامتر  $k$  در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در صورت نادیده گرفتن اثرات ویسکوالاستیک، می‌توان از مقادیر زیاد و غیرواقعی  $k$  برای تخمین مقدار بیشینه فشار استفاده کرد ولی شکل و فاز سیگنال موج فشاری به‌خوبی بر نتایج آزمایشگاهی منطبق نمی‌شود.

تشریح روش مدل‌سازی رفتار ویسکوالاستیک دیواره لوله در معادلات حاکم بر جریان گذرا، با استفاده از روش خطوط مشخصه توسط Covas et al. (2004) (2005) ارائه گردید. در این کارها که جدیدترین پژوهش‌ها در زمینه ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک به شمار می‌روند، نتایج یک مدل خطی شده ویسکوالاستیک با نتایج آزمایشات همراه یا بدون اثر افت ناماندگار مطابقت داده شد. این مقایسه نشان می‌داد که سهم اثر کرنش‌های محیطی دیواره لوله روی میرایی موج فشار و دگرگونی سیگنال نوسان، خیلی بیشتر از اثر اصطکاک ناماندگار است. در تحقیق کامل‌تری توسط Keramat و Soares et al. (2008) و et al. (2009) اثر جدایی ستون مایع در لوله‌های ویسکوالاستیک به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شد.

Duan et al. (2010) به‌منظور تفکیک تأثیرات یکسان افت غیرماندگار و خاصیت ویسکوالاستیک در افت هد فشاری در خطوط لوله، معادلات شبه دوبعدی پیوستگی و مومنتوم را برای جریان بسط دادند. آن‌ها برای تعیین مقدار افت غیرماندگار از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استفاده نمودند. نتایج نشان داد که در

برهم‌نهی خطی بولتزمان برابر است با (Aklonis et al., 1972):

$$\varepsilon(t) = J_0 \sigma(t) + \int_0^t \sigma(t-t') \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt' \quad (7)$$

$J(t)$  تابع خزش تطابقی در زمان  $t'$  است که رفتار مصالح ویسکوالاستیک را بر اساس تغییرات زمانی کرنش  $\varepsilon(t)$  برای یک تنش ثابت  $\sigma_0$  تشریح می‌کند به طوری که این تابع که به ساختار مولکولی مواد، دما و تاریخچه تنش-زمان وابسته است و  $J_0$  نیز خزش تطابقی آنی لوله ویسکوالاستیک است.

به منظور مدل‌سازی مکانیکی رفتار ویسکوالاستیک مصالح (فرموله نمودن تابع خزش تطابقی)، ترکیبی از المان‌های فنر و میراگر بکار گرفته می‌شود. ساده‌ترین مدل مکانیکی، یک فنر هوک است که رفتار الاستیک خاص را توصیف می‌کند و با اعمال یک تنش آنی  $\square 0$  به این مدل، کرنش لحظه‌ای  $\square 0$  در آن ایجاد می‌شود. دیگر مدل مکانیکی پایه، المان میراگر خاص است. این مدل بر اساس حرکت یک پیستون درون سیلندر که با مایعی با ویسکوزیته  $\square$  پر شده است، یک رفتار لزج خطی را مدل‌سازی می‌کند. این المان از قانون نیوتن  $\sigma = \mu (\partial \varepsilon / \partial t)$  پیروی می‌کند. با اتصال المان‌های پایه به صورت سری یا موازی مدل‌های متفاوتی تشکیل می‌شود. بر اساس اینکه رفتار غالب یک سیستم چگونه باشد، المان‌های به صورت موازی یا به صورت سری ترکیب می‌شوند. تعداد و نوع المان‌های مورد استفاده مبتنی بر مقایسه بین دقت حل و زمان محاسباتی است. برای مدل‌سازی مواد ویسکوالاستیک تاکنون چندین مدل تعمیم‌یافته پیشنهاد شده‌اند. رفتار ویسکوالاستیک دیواره یک لوله پلیمری با مدل کلونین-ویت تعمیم‌یافته توصیف می‌شود. در این مدل، چند المان ویت (ترکیب موازی یک فنر و یک میراگر) به صورت سری به هم متصل شده و یک فنر  $\square 0$  برای واکنش الاستیک آنی مصالح لوله به مدل اضافه شده است (شکل ۱).

پارامترهای شبکه در جریان‌های غیرماندگار معرفی می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم

معادله‌های حاکم بر جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک شامل معادلات بقای جرم و مومنتم می‌باشد. این معادلات با فرض یک حجم کنترل و استفاده از قضیه انتقالی رینولدز برای یک جزء دیفرانسیل از حرکت سیال قابل استخراج هستند که به شکل ذیل بیان می‌گردد (Chaudhry, 2014; Soares et al., 2008):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA(J_s + J_u) = 0 \quad (4)$$

در روابط بالا،  $H$  هد پیزومتریک،  $Q$  دبی جریان،  $A$  سطح مقطع لوله و  $J_s$  افت اصطکاک در حالت ماندگار می‌باشد که برابر است:

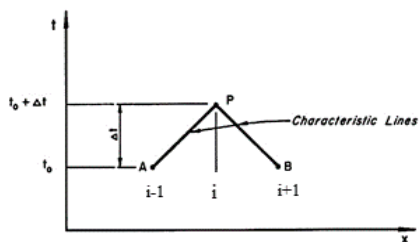
$$J_s = \frac{f}{D} \frac{Q|Q|}{2gA^2} \quad (5)$$

همچنین،  $\varepsilon_r$  کرنش تأخیری لوله‌های پلی‌اتیلنی می‌باشد که در ادامه توضیح داده شده است. لازم به ذکر است که  $Q$  به عنوان دومین متغیر بجای سرعت در معادلات بالا در نظر گرفته می‌شود ( $V = Q/A$ ).

همان‌گونه که اشاره شد لوله‌های پلی‌اتیلن به واسطه خاصیت ویسکوالاستیک دیواره آن‌ها، هنگامی که تحت یک تنش آنی مشخص قرار می‌گیرند، طبق قانون هوک به آن پاسخ نمی‌دهند. بنابراین عکس‌العمل لوله‌های پلاستیکی به یک تنش آنی  $\sigma_0$ ، به صورت ترکیبی از یک پاسخ سریع الاستیک ( $\varepsilon_0$ ) و یک پاسخ تأخیری ویسکو ( $\varepsilon_r$ ) بیان می‌شود:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_r \quad (6)$$

بنابراین، با اعمال یک تنش پیوسته  $\sigma(t)$  بر یک لوله پلاستیکی، میزان کل کرنش ( $\varepsilon(t)$ ) مطابق با اصل



شکل (۲) - خطوط مشخصه در صفحه  $x-t$

$$C^+ : Q_{i,t} = C_p - C_{a^+} H_{i,t} \quad (9)$$

$$C^- : Q_{i,t} = C_N + C_{a^-} H_{i,t} \quad (10)$$

به طوری که

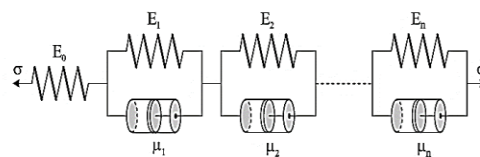
$$C_p = \frac{Q_{i-1,t-1} + BH_{i-1,t-1} + C'_{P1} + C''_{P1} + C'''_{P1}}{C'_{P2} + C''_{P2}} \quad (11)$$

$$C_N = \frac{Q_{i+1,t-1} - BH_{i+1,t-1} + C'_{N1} + C''_{N1} + C'''_{N1}}{C'_{N2} + C''_{N2}} \quad (12)$$

$$C_{a^+} = \frac{B + C'''_{P2}}{1 + C'_{P2} + C''_{P2}} \quad (13)$$

$$C_{a^-} = \frac{B + C'''_{N2}}{1 + C'_{N2} + C''_{N2}} \quad (14)$$

که در معادلات بالا B برابر  $gA/a$  و مقادیر CP1, CP2, CN1 و CN2 نیز مطابق جدول (۱) می-باشد. لازم به ذکر است که زیرنویس اول (i) شماره مقطع، زیرنویس دوم (t) گام زمانی و بالانویس های '، ' و ''' در معادلات فوق و در جدول (۱) به ترتیب افت در جریان ماندگار، افت غیرماندگار و خاصیت ویسکوالاستیک را نشان می-دهد.



شکل (۱): مدل کلونین-ویت تعمیم یافته

با استفاده از مدل مکانیکی کلونین-ویت تعمیم یافته، تابع خزش تطابقی با عبارت زیر تقریب زده می-شود (Aklonis et al., 1972):

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^n J_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (8)$$

در رابطه بالا،  $J_0$  خزش تطابقی فنر اول و  $J_k$  خزش تطابقی فنر المان کلونین-ویت  $k$  است و به ترتیب به صورت  $J_k = 1/E_k$  و  $J_0 = 1/E_0$  تعریف می-شوند.  $\tau_k$  (زمان تأخیر میراگر المان  $k$ ،  $\tau_k = \mu_k/E_k$ ) الاستیسیته فنر المان  $k$  و  $\mu_k$  ویسکوزیته میراگر المان  $k$  است.

روابط (۳) و (۴)، معادله های دیفرانسیل غیرخطی با متغیرهای جزئی هستند که جزء معادله های هذلولوی طبقه بندی می-شوند. این معادله ها حل تحلیلی ندارند لذا برای حل این معادله ها از روش های مختلف عددی استفاده می-شود. روش های مختلفی از قبیل روش خطوط مشخصه (MOC)، روش تفاضل های محدود و روش اجزای محدود، برای حل معادله های حاکم بر جریان گذرا به کار رفته اند (کوچک زاده و پرورش ریزی، ۱۳۹۲).

با ترکیبی از روش های خطوط مشخصه و تفاضل محدود، معادلات نهایی در امتداد خطوط مشخصه مثبت (C+) و منفی (C-) به ترتیب به شرح زیر می-باشد (شکل ۲):

جدول ۱: ضرایب  $C_{N2}$  و  $C_{N1}$ ،  $C_{P2}$ ،  $C_{P1}$ 

افت اصطکاک ماندگار [C']	
$C'_{p1} = C'_{p2} = 0$	$C'_{N1} = C'_{N2} = 0$
$C'_{p1} = -R\Delta t  Q_{i-1,t-1}   Q_{i-1,t-1} $	$C'_{N1} = -R\Delta t  Q_{i+1,t-1}   Q_{i+1,t-1} $
$C'_{p2} = 0$	$C'_{N2} = 0$
افت اصطکاک غیرماندگار [C'']	
$C''_{p1} = C''_{p2} = 0$	$C''_{N1} = C''_{N2} = 0$
بدون افت اصطکاک غیرماندگار	
رابطه Brunone et al. (1991)	
$C''_{N1} = k(\theta Q_{i,t-1} - (1-\theta)(Q_{i+1,t-1} - Q_{i+1,t-2}) - \text{Sign}(Q_{i+1,t-1}) Q_{i,t-1} - Q_{i+1,t-1} )$ $C''_{p1} = k(\theta Q_{i,t-1} - (1-\theta)(Q_{i-1,t-1} - Q_{i-1,t-2}) - \text{Sign}(Q_{i-1,t-1}) Q_{i,t-1} - Q_{i-1,t-1} )$ $C''_{p2} = C''_{N2} = k\theta$	
رفتار ویسکوالاستیک لوله [C''']	
$C'''_{p1} = C'''_{p2} = 0$	$C'''_{N1} = C'''_{N2} = 0$
الاستیک خطی	
ویسکوالاستیک خطی	
$C'''_{p1} = -C'''_{N1} = -2aA\Delta t \sum_{k=1}^{n_{KV}} \left[ \begin{array}{l} -C_0 \frac{J_k}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/\tau_k}) H_{i,t-1} + \\ C_0 \frac{J_k}{\Delta t} e^{-\Delta t/\tau_k} (H_{i,t-1} - H_{i,0}) - \frac{e^{-\Delta t/\tau_k}}{\tau_k} \varepsilon_{rk(i,t-1)} \end{array} \right]$ $C'''_{p2} = C'''_{N2} = 2aA\Delta t \sum_{k=1}^{n_{KV}} \left[ \frac{J_k}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/\tau_k}) \right]$ $C_0 = \frac{\alpha_0 D_0 \gamma}{2e_0}$	

ویسکوالاستیک و سرعت موج بدست می‌آیند. حل این نوع مسائل، بخصوص در مدلهایی با تعداد بالایی از پارامترهای غیرقطعی همچون شبکه‌های آبرسانی ویسکوالاستیک، به روش‌های عددی و الگوریتم‌های قوی بهینه‌سازی نیازمند است. فرایند بهینه‌سازی توسط یک تابع هدف هدایت می‌شود که در ساده‌ترین حالت می‌تواند به صورت متوسط حداقل مربعات خطا (LSE<sup>1</sup>) بین پارامترهای مشاهداتی و محاسباتی بیان شود که در این پژوهش از همین تابع هدف استفاده شده است:

$$\text{Min OF} = \sum_{k=1}^N (H_{k,Obs} - H_{k,Cal})^2 / N \quad (15)$$

در جدول (۱)،  $\Delta t$  گام زمانی محاسباتی،  $\gamma$  وزن مخصوص سیال،  $R = f/2DA$ ،  $\alpha$  یک پارامتر بدون بعد که به مقطع لوله و قیدهای محوری لوله بستگی داشته،  $e$  ضخامت لوله،  $n_{KV}$  تعداد المان‌های کلین ویت و زیرنویس 0 مقدار اولیه متغیر را در حالت ماندگار نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که  $\theta$  ضریب تعدیل بوده که مقدار آن در این پژوهش با توجه به توصیه (Karney and McInnis (1992) در مدل-سازی جریان گذرا، ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه ضرایب مجهول در این پژوهش، از روش تحلیل معکوس جریان گذرا (ITA) استفاده شده است به طوری که، با معلوم بودن مقادیر فشار و دبی جریان، پارامترهای مجهول همچون ضرایب

<sup>1</sup> Least square error

مهار شده‌اند. در این مدل فیزیکی، برای جلوگیری از تولید فشارهای منفی در سیستم و پدیده جدایی ستون سیال، از یک تانک تحت فشار به حجم ۷۰۰ لیتر به‌عنوان شرط مرزی بالادست شبکه استفاده شد. همچنین از یک شیر توپی برای ایجاد جریان گذرا در شبکه لوله و یک شیر سوپاپی<sup>۱</sup> که بعد از شیر توپی قرار داشته برای تنظیم دبی ورودی به شبکه استفاده شد.

در این تحقیق، برداشت داده‌های فشار از سه مکان (به ترتیب در پشت شیر خروجی، ابتدا شروع شبکه جریان و در مخزن تحت فشار) توسط مبدل‌های فشاری انجام می‌گیرد. مبدل‌های فشار مورد استفاده در این تحقیق، مدل Wika S-11 دارای دامنه اندازه‌گیری صفر تا ۱۶ بار و با خروجی ۴ تا ۲۰ میلی‌آمپر می‌باشد. همچنین جهت ثبت داده‌های مربوط به فشار در هنگام وقوع جریان میرا، یک دستگاه دیتالاگر طراحی شد. این دستگاه مجهز به هشت کانال مبدل آنالوگ به دیجیتال مجزا بوده و قابلیت برداشت ۱۰ هزار داده در ثانیه را دارد که در این آزمایش، فرکانس نمونه‌برداری متناسب با نیاز تحقیق و محدودیت‌های مبدل‌های فشار برابر ۵۰۰ داده در ثانیه بوده است. معمولاً سیگنال‌های فشار اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی به‌علت شرایط محیطی دارای مقداری نویز با فرکانس بالا می‌باشند. برای این منظور اطلاعات فشار اندازه‌گیری شده در ابتدا از فیلتر پایین‌گذر باترورت<sup>۲</sup> عبور داده شده و سپس در مدل حل معکوس فراخوانی می‌شوند. آزمایش در دبی اولیه ۱/۲۳ لیتر بر ثانیه با عدد رینولدز تقریبی ۴۰۰۰۰ انجام شده است.

مراحل انجام آزمایش‌ها بدین گونه است که پس از روشن نمودن پمپ و کمپرسور آزمایشگاه و تثبیت بار آبی مخزن تحت فشار، مقدار دبی ورودی به خط لوله توسط شیر سوپاپی و به روش حجمی تنظیم می‌گردد. سپس با ایجاد جریان گذرا به کمک شیر توپی، فشارهای ناشی از حالت گذرای در نقاطی از سیستم تحت عنوان مکان‌های اندازه‌گیری نمونه‌برداری می-

که در آن OF تابع هدف، HCal و HObs به ترتیب مقادیر محاسبه شده و مقادیر مشاهده شده هد فشار و N تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. بدیهی است که به‌منظور تعیین دقیق ضرایب مجهول باید مقدار تابع هدف کمینه شود یعنی مقادیر محاسبه شده توسط مدل ریاضی باید اختلاف ناچیزی با مقادیر برداشته شده از آزمایشگاه داشته باشند.

به منظور واسنجی و تعیین ضرایب تصحیح، حل تابع هدف بیان شده توسط الگوریتم ژنتیک انجام گرفته است. الگوریتم ژنتیک مورد استفاده از نوع پیوسته بوده و شامل مراحل استاندارد تولید جمعیت اولیه، محاسبه مقدار تابع هدف نظیر هر کروموزوم، انتخاب طبیعی والدین (به روش تورنومنت)، تبادل ژنی و تولید فرزندان (به روش یکنواخت) و جهش ژنی می‌شود. در روند بهینه‌سازی از ۱۰۰ کروموزوم به عنوان جمعیت اولیه و ۵۰ کروموزوم به عنوان جمعیت نسل-های تکاملی استفاده شده است. تبادل ژنی به صورت یکنواخت و جهش ژنی به صورت خطی از ۰/۰۵ در اولین نسل تا ۰/۰۲ در نسل انتهایی در نظر گرفته شده است.

### مدل فیزیکی

به‌منظور واسنجی هم‌زمان پارامترهای شبکه در حین وقوع جریان گذرا، تصمیم بر ساخت مدلی فیزیکی از یک شبکه آبرسانی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز گرفته شد تا ضمن واسنجی پارامترهای با اثرگذاری دینامیکی همچون ضرایب افت ماندگار و غیرماندگار، ضرایب خزش ویسکوالاستیک و سرعت موج فشاری در سیستم‌های پیچیده، از نتایج آن جهت ارزیابی روش پیشنهادی در شرایط گذرا استفاده گردد. شبکه آزمایشگاهی مطابق شکل (۳) از شش حلقه مربعی که هر حلقه به‌صورت یک مربع  $3\text{m} \times 3\text{m}$  می‌باشد تشکیل شده است. لوله‌ها از نوع پلی‌اتیلن (PE80) با قطر اسمی ۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۵/۵۵ میلی‌متر (SDR9) و با فشار مجاز اسمی ۱۶ بار است. جهت جلوگیری از حرکت طولی و عرضی لوله، خطوط لوله به فواصل یک متر به یک متر توسط بسط‌هایی به زمین

<sup>1</sup> Globe valve

<sup>2</sup> Butterworth Lowpass Filter

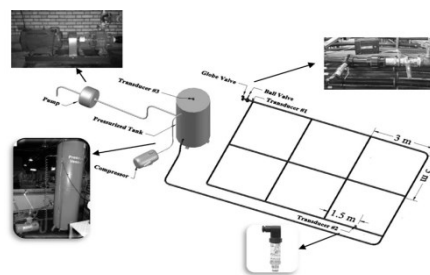


افت فشار گذرای ناشی از اصطکاک ماندگار، در مقایسه با میرایی مکانیکی حاصل از ویسکوالاستیک دیواره لوله (در لوله‌های پلاستیکی) و همچنین اصطکاک سیال و اثرات اینرسی ناشی از معکوس شدن پروفیل سرعت قابل اغماض است. بنابراین، ضریب اصطکاک ماندگار باید بر اساس شرایط ماندگار تخمین زده شود. می‌توان این مقادیر را برای جریان‌های ورقه-ای ( $Re < 2000$ ) توسط رابطه هیگن-پوازی (حل دقیق)، و برای جریان‌های آشفته ( $Re > 2000$ ) از رابطه کلبروک-وایت محاسبه کرد. Covas et al. (2004) با ایجاد جریان در خط لوله پلی‌اتیلن آزمایشگاه امپریال کالج، هد پیزومتریک را در چندین ایستگاه در طول خط لوله اندازه‌گیری کرده و با محاسبه مقدار افت هد در واحد طول و زبری لوله بر حسب دبی‌های مختلف، دریافت که مقدار ضریب افت محاسبه شده به عدد رینولدز وابسته است. به دلیل صیقلی بودن سطح داخلی لوله پلی‌اتیلن، افت جریان تقریباً مستقل از زبری لوله است و لزجت سیال تأثیر بیشتری در میزان افت انرژی دارد. بنابراین ضریب افت اصطکاک داری و ایسباخ  $f_s$  را می‌توان با معادله‌ای وابسته به مشخصات جریان و مستقل از زبری لوله تعریف کرد. بلاسیوس بر اساس رابطه پرانتل برای مقادیر  $10^5 < Re < 2000$ ، رابطه بین فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز را به صورت رابطه زیر ارائه داد (White, 1999):

$$f = 0.316 R_e^{-0.25} \quad (16)$$

به منظور کاهش خطا در مدل‌سازی شرایط مرزی مانند مانور شیر تولید جریان گذرا و فشار مخزن هوا، سیگنال‌های فشار در محل‌ها مورد اشاره به طور مستقیم اندازه‌گیری و در مدل عددی استفاده می‌شوند. برای تخمین و واسنجی پارامترهای با اثرات متداخل دینامیکی یعنی ضریب افت ناماندگار و ضرایب خزش، سه سناریو با استفاده از حل‌کننده معکوس جریان گذرا و نتایج آزمایشگاهی تعریف شده است. ابتدا در دو رویکرد مجزا، یکی از دو اثر دینامیکی افت ناماندگار یا ویسکوالاستیسیته دیواره لوله در مدل جریان گذرا در نظر گرفته می‌شود. در سناریوی سوم،

شوند و این مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان داده‌های شاهد در حل معکوس سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. سایت‌های اندازه‌گیری بهتر است در نقاطی که فشار بیشترین حساسیت را نسبت به پارامترهای مجهول دارد در نظر گرفته شوند.

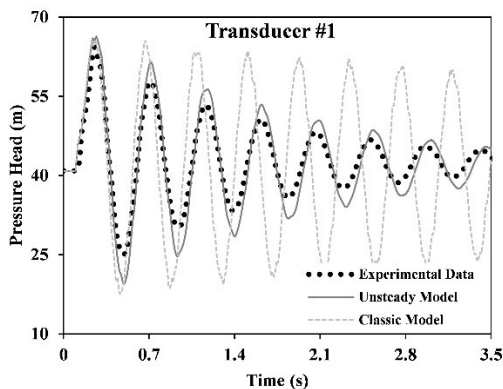


شکل (۳): نمای کلی تجهیزات آزمایشگاه

## نتایج و بحث

انجام آزمایشات جریان گذرا، نوسانات فشار به عنوان مشخصات جریان جمع‌آوری و ثبت شد. در حالت کلی برای واسنجی پارامترهای جریان گذرا شامل افت اصطکاک لوله‌ها، سرعت موج و شرایط مرزی به علاوه تابع خزش و ضرایب افت ناماندگار، از حل‌کننده معکوس جریان گذرا با ارتباط مدل ریاضی با یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌شود. روش ایده‌آل در واسنجی پارامترهای مجهول توسط حل معکوس این است که این پارامترها بر اساس داده‌های مسئله به صورت هم‌زمان تخمین زده شوند. اما برخی پارامتر در نحوه ایجاد؛ مقادیر و شکل نوسانات فشار گذرا دارای اثرات موازی و تداخلی هستند به عنوان مثال اصطکاک سیال و رفتار مکانیکی ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلی‌اتیلنی، به صورت هم‌زمان در استهلاک موج فشاری شرکت می‌کنند. همچنین حل‌کننده جریان گذرا حساسیت‌های مختلفی نسبت به هر پارامتر دارند به طوریکه از بین پارامترهای مورد اشاره، مبدل‌های فشاری بیشترین و کمترین حساسیت را به ضرایب ویسکوالاستیک و ضریب زبری دارند. بنابراین تعیین هم‌زمان همه پارامترهای با روش حل معکوس جریان گذرا منجر به تخمین غیر واقعی و نادرست پارامترها می‌شود.

است. با انجام عملیات واسنجی، مقدار ضریب افت واسنجی شده برابر با  $k=0/11$  به دست آمد که بسیار بیشتر از مقادیر معمول برای مدل‌های افت غیرماندگار در لوله‌های الاستیک (۴ برابر مقدار معمول) است. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان نمود که مدل بهینه‌ساز به‌منظور کمینه کردن تابع هدف در شبکه ویسکوالاستیک، مقادیر غیر واقعی برای ضریب افت غیرماندگار لحاظ می‌نماید. همچنین لازم به ذکر است که با مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی در این پژوهش و تحقیقات (Covas et al. (2004) بر خط لوله ویسکوالاستیک ۳۰۰ متری مشاهده می‌شود که با بزرگ شدن مقیاس مدل، تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک لوله بر استهلاك موج فشاری از اهمیت بیشتری برخوردار است به‌طوری‌که با مدل‌های افت غیرماندگار، فقط مقادیر بیشینه و کمینه فشار در دوره‌های اولیه نوسان با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد ولی از نظر شکل منحنی نوسانات و شدت فشار در دوره‌های بالاتر، تطابق مناسبی بین نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی دیده نمی‌شود (شکل ۵). مطابق با جدول (۲)، متوسط حداقل مربعات خطا در مدل‌سازی عددی جریان گذرا بر اساس افت ماندگار و غیرماندگار همچنان مقدار بزرگی می‌باشد. بنابراین بایستی اثرات دینامیکی دیگری از جمله خصوصیات ویسکوالاستیک دیواره لوله نیز به‌عنوان پدیده‌های مؤثر در شکل‌گیری و میرایی نوسانات فشار در این نوع لوله‌ها در فرایند مدل‌سازی لحاظ شوند.



تابع خزش و افت غیرماندگار به‌طور هم‌زمان واسنجی می‌شوند.

#### مدل‌سازی جریان گذرا بر اساس افت غیرماندگار

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، روابط پیشنهادی مختلفی برای تخمین افت ناماندگار در لوله‌های الاستیک وجود دارد و در این تحقیق، برای جریان آشفته از مدل پیشنهادی (Brunone et al. (1991) در مدل عددی جریان گذرا استفاده می‌شود.

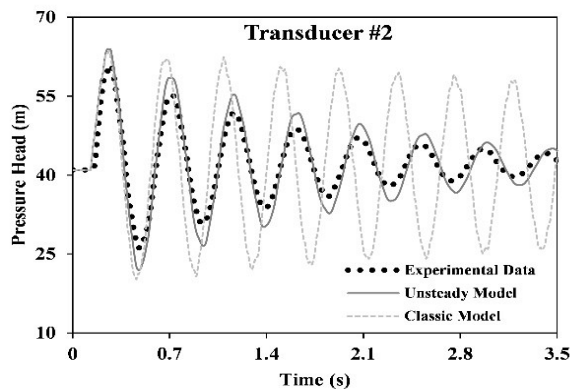
ضریب اصطکاک مدل (Brunone et al. (1991) را  $k$  می‌توان به روش سعی و خطا در آزمایشگاه یا به روش تحلیلی و با استفاده از ضریب استهلاك برشی معرفی شده توسط (Reddy et al. (2012) برای لوله‌های الاستیک تخمین زد:

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (17)$$

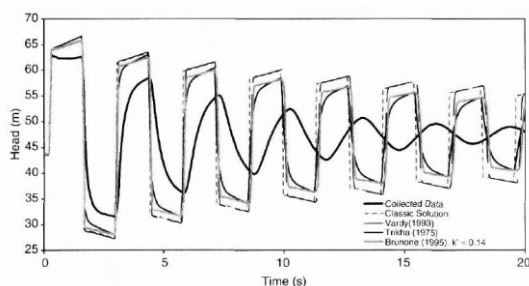
که در این معادله، ضریب استهلاك برشی برابر است با:

$$C^* = \begin{cases} 0.012 & R_e \leq 2000 \\ \frac{11.80}{R_e^{\log(15.29/(R_e^{0.087}))}} & R_e > 2000 \end{cases} \quad (18)$$

مطابق شکل (۴) حل کلاسیک ضربه قوچ (افت ماندگار) به وضوح دارای اختلافی چشمگیر با داده‌های آزمایشگاهی است و با گذشت زمان در دوره‌های بعدی نوسان، این اختلاف بیشتر نیز می‌شود. با لحاظ کردن اثر افت غیرماندگار در مدل عددی، نتایج بهبود یافته



شکل ۴: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در سناریو اول



شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های عددی غیرماندگار در دبی یک لیتر بر ثانیه (برگرفته از (Covas et al. (2004)

جدول ۲: متوسط حداقل مربعات خطا در مدل‌سازی بر اساس اصطکاک ماندگار و غیرماندگار

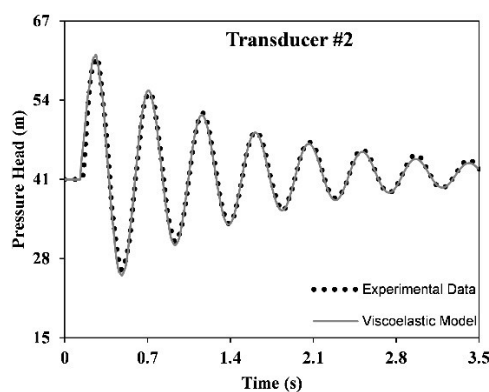
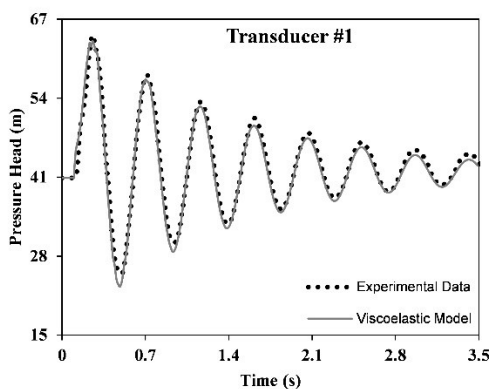
بر اساس حل کلاسیک	بر اساس افت غیرماندگار
۱۶۷/۶	۶/۸
LSE در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی (m <sup>2</sup> )	

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، برای بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک در ارتباط با مدل ریاضی استفاده می‌شود.

شکل (۶) نشان می‌دهد که با اضافه کردن یک المان کلویین-ویت برای لحاظ نمودن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله، مقادیر محاسباتی با دقت قابل قبولی به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک می‌شود. مقدار ضریب خزش بهینه و متوسط حداقل مربعات خطا (LSE) در این سناریو به ترتیب برابر  $J_1 = 1/5 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  و  $0/4 \text{ m}^2$  می‌باشد.

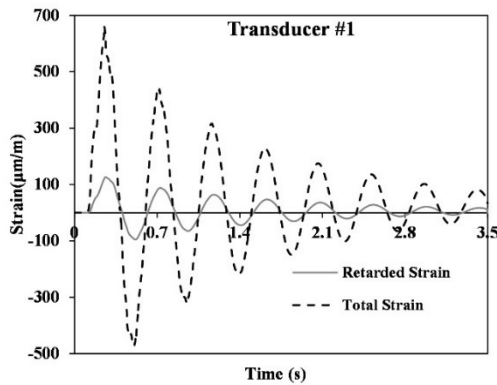
#### مدل‌سازی جریان گذرا با اثرات ویسکوالاستیک

در رویکردی که در این سناریو برای واسنجی تابع خزش دنبال می‌شود، اثرات اصطکاک غیرماندگار نادیده گرفته می‌شود. پارامترهای  $\tau k$  (زمان تأخیر) قبل از واسنجی و مطابق با پیشنهادات مطالعات پیشین مشخص می‌شود و پارامترهای  $Jk$  (ضرایب خزش تطابقی المان‌های کلویین-ویت) با کمینه کردن اختلاف مربعات بین هد پیزومتریک محاسباتی و اندازه‌گیری شده در محل‌های مورد اشاره تخمین زده می‌شود. در این تحقیق از یک المان کلویین-ویت استفاده شد و ضریب تأخیر زمانی برابر  $0/05$  در نظر گرفته شد.



شکل ۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در سناریو دوم

محل قرارگیری میدل فشاری شماره یک در مدت زمان ۳/۵ ثانیه آورده شده است.

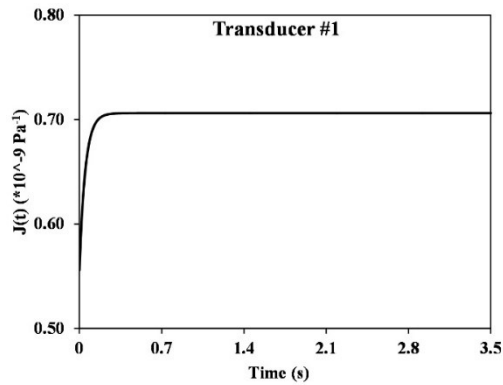


شکل ۷: تغییرات کرنش جانبی و تابع خزش با زمان در مدل جریان گذرا در سناریو دوم

با استفاده از ضرایب خزش و افت ناماندگار بدست آمده، جریان گذرا به کمک مدل ریاضی تحلیل شده و نتایج عددی تعیین شده در شکل (۸) ترسیم و ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج عددی بدست آمده با استفاده از ترکیب هر دو مدل، افت اصطکاکی ناماندگار و اثرات ویسکوالاستیسیته، مطابقت مطلوبی را با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد.

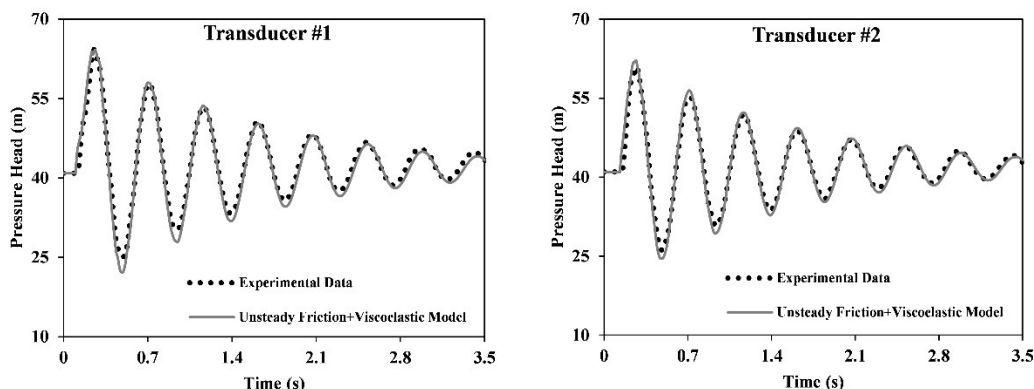
به منظور بررسی تغییرات تابع خزش تطابقی لوله ویسکوالاستیک در این سناریو، منحنی تابع خزش در شکل (۹) نمایش داده شده است. با مقایسه نتایج دو سناریو اخیر می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل اثرات موازی اصطکاک غیرماندگار سیال و رفتار مکانیکی ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلی‌اتیلنی در استهلاک موج فشاری، تابع تطابقی و ضریب خزش در این سناریو کمتر از مقادیر متناظر آن در سناریو دوم است.

در شکل (۷) نیز، تغییرات کرنش جانبی کل و تأخیری به همراه تغییرات تابع خزش تطابقی، محاسبه شده از رابطه (۸)، برای جریان گذرای عبوری از نقطه

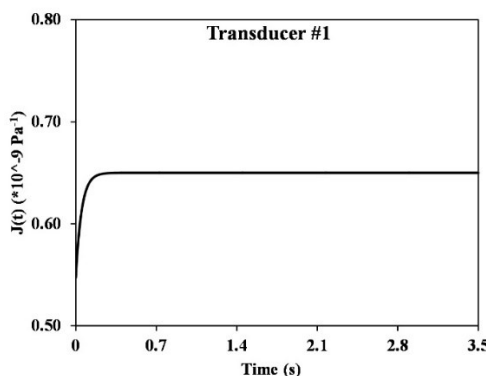


#### مدل‌سازی جریان گذرا بر اساس هر دو پدیده دینامیکی

در این بخش، برای واسنجی مدل عددی جریان گذرا تحت اثرات دینامیکی افت ناماندگار و ویسکوالاستیسیته دیواره لوله به صورت توأم، از مدل کلین-ویت با یک المان و با زمان تأخیر ۰/۰۵ ثانیه استفاده شد. با استفاده از این مدل، ضرایب خزش و ضریب افت ناماندگار در مدت زمان مدل‌سازی ۳/۵ ثانیه و جریان اولیه ۱/۲۳ لیتر بر ثانیه واسنجی شد. ضریب میرایی واسنجی شده  $k=0/035$  بدست آمد که در بازه مورد انتظار مقادیر برای جریان‌های تک فازی قرار دارد. همچنین مقدار ضریب خزش بهینه و متوسط حداقل مربعات خطا (LSE) در این سناریو به ترتیب برابر  $J_1 = 1/03 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  و  $0/5 \text{ m}^2$  می‌باشد.



شکل ۸: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در سناریو سوم



شکل ۹: تغییرات تابع خزش با زمان در مدل جریان گذرا در سناریو سوم

جهت کمینه کردن تابع هدف تعریف شده استفاده می-کند.

مقایسه نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی نشان داد که مدل‌های معمولی کلاسیک قادر به شبیه‌سازی ضربه کوچ در لوله‌های پلیمری نبوده و استفاده از این روابط برای مدلسازی این نوع از لوله‌ها با خطای زیادی همراه است. در خطوط لوله پلیمری، به دلیل کرنش تأخیری لوله، بیشینه و کمینه نوسانات فشار به سرعت تحلیل می‌رود و این پدیده نمی‌تواند فقط با اثر دینامیکی افت غیرماندگار توصیف شود که این موضوع ناشی از وجود خصوصیات ویسکوالاستیسیته پلیمر است.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای محاسبات جریان گذرا در خط لوله، یک مدل عددی شامل اثرات اصطکاکی و اینرسی سیال و ویسکوالاستیسیته خطی دیواره لوله، توسعه داده شد. این مدل، با تعریف جریان گذرای یک‌بعدی در مجرای بسته و شرایط مرزی، معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر آن را در بازه زمانی با روش خطوط مشخصه حل می‌کند. برای تخمین پارامترهای مجهول نظیر ضرایب افت غیرماندگار و خزش، یک حل‌کننده معکوس جریان گذرا توسعه داده شد. این حل‌کننده برای تخمین پارامترهای مجهول، از الگوریتم ژنتیک

## منابع

- کوچک‌زاده، ص. و ع. پرورش‌ریزی. ۱۳۹۲. مقدمه‌ای بر هیدرولیک جریان ناپایدار. انتشارات دانشگاه تهران.
- Aklonis, J. J., W. J. MacKnight and M. Shen. 1972. Introduction to Polymer Viscoelasticity. John Wiley & Sons, NewYork.
- Apollonio, C., D. I. C. Covas, G. de Marinis, A. Leopardi and H. M. Ramos. 2013. Creep functions for transients in HDPE pipes. Urban Water Journal, 11(2): 160-166.

- Brunone, B., U. M. Golia and M. Greco. 1991. Modelling of fast transients by numerical methods. In Proc. Int. Conf. on Hydraulic Transients with Water Column Separation, pp. 273-280.
- Brunone, B., U. M. Golia and M. Greco. 1995. Effects of two-dimensionality on pipe transients modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(12): 906-912.
- Carriço, N. J. G., A. K. Soares and D. I. C. Covas. 2016. Uncertainties of inverse transient modelling with unsteady friction and pipe-wall viscoelasticity. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 65(4): 342-353.
- Chaudhry, M. H. 2014. *Applied Hydraulic Transients*. Springer New York, pp. 503.
- Covas, D., I. Stoianov, J. Mano, H. Ramos, N. Graham and C. Maksimovic. 2004. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I—Experimental analysis and creep characterization. *Journal of Hydraulic Engineering*, 42(5): 516–530.
- Covas, D., I. Stoianov, J. Mano, H. Ramos, N. Graham and C. Maksimovic. 2005. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II— Model development, calibration and verification. *Journal of Hydraulic Engineering*, 43(1): 56–70.
- Daily, J. W., W. L. Hankey, R. W. Olive and J. M. Jordaan. 1956. Resistance Coefficients for Accelerated and Decelerated Flows through Smooth Tubes and Orifices. *Trans. ASME*, 78: 1071–1077.
- Duan, H. F., M. S. Ghidaoui, P. J. Lee and Y. K. Tung. 2010. Unsteady friction and viscoelasticity in pipe fluid transients. *Journal of Hydraulic Engineering*, 48(3): 354–362.
- Evangelista, S., A. Leopardi, R. Pignatelli and G. Marinis. 2015. Hydraulic Transients in Viscoelastic Branched Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 141(8): 1-9.
- Ghidaoui, M. S., S. G. S. Mansour and M. Zhao. 2002. Applicability of Quasi Steady and Axisymmetric Turbulence Models in Water Hammer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(10): 917–924.
- Holmboe, E. L. and W. T. Rouleau. 1967. The effect of viscous shear on transients in liquid lines. *Journal of Basic Engineering*, 89(1): 174-180.
- Karney, B. W. and D. McInnis. 1992. Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks. *Journal of hydraulic engineering*, 118(7): 1014-1030.
- Keramat, A., A. Ahmadi and A. Majd. 2009. Transient cavitating pipe flow due to a pump failure: Proceedings of the 3rd IAHR International Meeting of the Work Group on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Brno, Czech Republic.
- Pezzinga, G., B. Brunone, D. Cannizzaro, M. Ferrante, S. Meniconi and A. Berni. 2014. Two-Dimensional Features of Viscoelastic Models of Pipe Transients. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8):04014036.
- Reddy, H. P., W. F. Silva-Araya and M. H. Chaudhry. 2012. Estimation of Decay Coefficients for Unsteady Friction for Instantaneous, Acceleration-Based Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(3): 260-271.
- Soares, A. K., D. I. C., Covas and F. R. Reis. 2008. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(9): 1389-1394.
- Vardy, A. E., K. L. Hwang and J. M. B. Brown. 1993. A weighting function model of transient turbulent pipe friction. *Journal of Hydraulics Research*, 31: 533-544.
- White, F. M. 1999. *Fluid Mechanics (4th Edition)*. McGraw-Hill.
- Zielke, W. 1968. Frequency-dependent friction in transient pipe flow. *Journal of Fluids Engineering*, 90(1): 109-115.

## Numerical Modelling of Transient Flow in Viscoelastic Pipe Network

Sajad Kiani<sup>1</sup>, Manoochehr Fathi Moghadam<sup>\*2</sup>, Ahmad Fathi<sup>3</sup>, Ali Haghighi<sup>4</sup>

### Abstract

The present research deals with the introduction and simulation of viscoelastic effects in transient flows in polymeric pipes widely used in pipe network. The viscoelastic properties result in appearing new terms in transient flow governing equations which are generally absent in available models. In this study, the governing equations are rewritten and manipulated for considering the viscoelastic properties. The equations are then solved using the method of characteristics coupled with the finite difference method. In order to calibrate the unknown parameters including the unsteady friction and creep coefficients as well as to verify the model, a model of viscoelastic pipe network was made at the hydraulics laboratory of Water Sciences Engineering department of Shahid Chamran University. The configuration of the experimental set-up consists of a pipe network with six square loops, having each loop 3m×3m. The pipes are made of PE with 50 mm nominal diameter and 5.5 mm of wall thickness. The data of dynamic pressure oscillation during these transient events were collected by Pressure transducers. Applying the inverse transient analysis method and with the aid of a genetic algorithm, the friction and creep coefficients of the experimental pipe are determined. The results show that the classical water hammer solver cannot accurately analyze the transient flows in polyethylene pipes. In fact, modeling both dynamic effects of unsteady friction losses and viscoelasticity for such pipes is quite necessary. However, it is also found that the viscoelasticity is obviously more effective than the unsteady friction effects in formation and attenuation of transient signals so that, considering only viscoelastic effects would result in acceptable responses.

**Keyword: Creep Function, Inverse Analyses, Kelvin-Voigt Model, Polyethylene Pipe, Unsteady friction.**

<sup>1</sup> M.Sc. Graduate, PhD Student at Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Mobile: +98 913 803 0671, E-mail: sajad.kiani508@gmail.com

<sup>2</sup> Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Telephone: 061-33738359, E-mail: fathi49@gmail.com (\*Corresponding author)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, E-mail: a.fathi@scu.ac.ir

<sup>4</sup> Associate Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, E-mail: ali77h@gmail.com