علوم و مهندسی آبیاری
جلد ٤١، شماره‌ی٤، زمستان ٩٧، ص. ٢١٦-٢٠١

مدل‌سازی عددی پدیده‌های دینامیکی افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک در خطوط لوله تحت جریان گذرا

مصطفی رحمانشاهی[1*]، منوچهر فتحی مقدم[2] و علی حقیقی[3]

۱*- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.
mostafarahmanshahi@gmail.com
۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی ، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

دریافت: ۹۶/۴/۲۴ بازنگری: ۹۶/۷/۲۹ پذیرش: ۹۶/۸/۲

چکیده

رفتار ویسکوالاستیک لوله‌های پلیمری در مرحله طراحی و هم‌چنین برای تحلیل سیگنال ضربه‌قوچ با اهداف تشخیصی، باید در نظر گرفته شود. تحقیق حاضر به معرفی و مدل‌سازی اثرات دینامیکی افت غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلیمری رایج در کارهای آبرسانی، در جریان‌های گذرا می‌پردازد. بر این اساس معادله‌های سازگاری بر اساس افت غیرماندگار و خواص ویسکوالاستیک دیواره لوله بازنویسی شده و با به‌کارگیری روش خطوط مشخصه در ترکیب با تفاضل محدود تحلیل می‌شوند. برای واسنجی پارامترهای مجهول نظیر ضرایب افت و خزش و صحت‌سنجی مدل عددی توسعه یافته، از داده‌های یک مدل آزمایشگاهی استفاده شد. با به‌کارگیری روش تحلیل معکوس جریان گذرا و استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای مجهول مسئله محاسبه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های کلاسیک ضربه قوچ قادر به شبیه‌سازی نوسانات فشار در لوله‌های پلیمری نمی‌باشند. هم‌چنین اثرات ویسکوالاستیک نقش بسیار مهم‌تری نسبت به افت غیرماندگار در شکل‌گیری سیگنال‌های ضربه قوچ بازی می‌کنند، تاجایی که در نظر گرفتن آن به‌تنهایی می‌تواند به پاسخ‌های قابل قبولی منتج شود.

کلید واژه‌ها: جریان گذرا، خطوط لوله ویسکوالاستیک، افت غیرماندگار، مدل عددی، حل معکوس.

مقدمه

در سیستم‌های خطوط لوله، هرگونه اغتشاش می‌تواند باعث تغییر شرایط حالت ماندگار و ایجاد جریان گذرا (Transient flow) شود. معمولاً تغییراتی که در جریان گذرا در یک خط لوله پیش می‌آید، به‌علت تغییرات در شرایط مرزی لوله مانند باز و بستن ناگهانی شیرها و از کار افتادن ناگهانی پمپ‌ها می‌باشد، که موجب انتشار یک موج فشاری در طول لوله می‌شوند. این پدیده به‌طور دوره‌ای سبب افزایش و کاهش فشار شده و چنانچه شدت نوسانات شدید باشد، به وقوع ضربه‌قوچ (Waterhammer) منتهی می‌گردد. این مهم، یکی از شایع‌ترین عوامل بروز آسیب در خطوط لوله است.

طراحی سیستم لوله‌ها و انتخاب جنس، کلاس فشاری و هم‌چنین مشخص کردن وسایل حفاظتی در مقابل امواج فشاری، نیازمند تحلیل جریان گذرا می‌باشد. عدم دقت در برآورد شدت موج فشاری ناشی از ضربه‌قوچ، آسیب‌ها و خسارات زیادی به سیستم خط لوله وارد می‌کند. تخمین شدت این فشارهای ناگهانی کار مشکلی است و به‌جز در موارد محدودی، هیچ‌گونه روش تحلیلی مناسبی برای محاسبه آن‌ها وجود ندارد. شبیه‌سازی جریان گذرا در خطوط لوله برای شرایط بحرانی بهره‌برداری، به طراح کمک می‌نماید تا با تعیین مقادیر بیشینه و کمینه فشارهای ضربه قوچ، نسبت به طراحی یک سیستم آبرسانی ایمن اقدام نماید. خواص ویسکوالاستیک لوله‌های پلیمری سبب بروز ترم‌های جدیدی در معادله‌های حاکم بر جریان‌های گذرا می‌گردد. از طرفی نه‌تنها در محاسبات معمول و سرانگشتی ضربه قوچ، بلکه در نرم‌افزارها و مدل‌های تجاری پیشرفته نیز اثرات دینامیکی ضربه‌قوچ دیده نمی‌شود. مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی و مکانیکی لوله‌های پلیمری با لحاظ کردن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله در نوسانات جریان گذرا، موجب تخمین قابل قبولی از فشارهای ضربه قوچ و ارائه طرح‌های بهینه از منظر اقتصادی و فنی خواهد شد.

افت‌های غیرماندگار در ۵۰ سال اخیر به‌صورت گسترده بررسی شده‌اند. این افت‌ها خصوصاً در لوله‌های الاستیک، از جنس مصالح با خاصیت الاستیک خطی، مانند بتن، فلز و سیمان آزبست، در جریان‌های گذرای سریع مشاهده شده است. در حالی که افت

غیرماندگار در جریان آرام به‌صورت قابل قبولی توصیف شده است (Trikha, 1975; Zielke, 1968)، تاکنون رابطه جامعی برای شرایط آشفته ارائه نشده است. در منابع پیشین چندین رابطه برای محاسبه افت غیرماندگار در شرایط آشفته ارائه شده است. در روابط مختلف، افت غیرماندگار وابسته به ۱- سرعت متوسط لحظه‌ای (Hino et al., 1976, 1977)، ۲- شتاب لحظه‌ای (Dailey et al., 1956; Crastens and Roller, 1959; Safwat and Polder, 1973; Shuy, 1996)، ۳- وزن‌های شتاب‌های محلی زمانی گذشته (Trikha, 1975; Zielke, 1968; Suzuki et al., 1991; Vardy, 1992; Vardy et al., 1993; Vardy and Brown, 1995, 1996)، ۴- شتاب‌های انتقالی و محلی (Brunone et al., 1991, 1995; Vitkovsky et al., 2000; Bergant et al., 2000)، ۵- پروفیل سرعت (Bratland, 1986; Vardy and Hwang, 1991; Eichinger and Lein, 1992; Silva-Araya and Chaudhry, 1987; Pezzinga, 1999, 2000)، فرض شده است.

Brunone et al. (1999) و (1995) آزمایش‌هایی را در یک لوله پلی اتیلن ۳۵۰ متری انجام دادند. هدف از این آزمایش، تشریح استهلاک موج فشار توسط ضریب افت غیرماندگاری بود، که در رابطه برونون استفاده شده است. آن‌ها افت موج فشاری جذب‌شده را به افت اصطکاکی غیرماندگار مربوط دانستند، اما نتایج عددی تعیین‌شده در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی (هم در شکل کلی و هم دامنه و فاز سیگنال فشار) اختلاف قابل توجهی را ارائه کرد. دلیل این اختلاف، اثر دینامیکی ویسکوالاستیسیته دیواره لوله است که در روش برونون منظور نشده بود.

اثر خواص ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلیمری بر نوسانات جریان گذرا به‌صورت آزمایشگاهی توسط چندین محقق از جمله Fox and Stepnewski (1974), MeiBner and Franke Williams (1977), Mitosek and Roszkowski (1977) (1998) مشاهده شده است. این محققان تایید کردند که در لوله‌های پلیمری، میرایی موج فشار هنگام جریان گذرا، حتی هنگامی که لوله نسبت به حرکت مقید شده است، خیلی بیشتر از میرایی به‌علت اصطکاک سیال (افت ماندگار) و وارونگی پروفیل سرعت (افت غیرماندگار) است.

Soares et al. (2009) و Keramat et al. (2009) اثر جدایی ستون مایع در لوله‌های ویسکوالاستیک را به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. Covas و Ramos (2010) به بررسی تشخیص مشخصات نشت در خطوط لوله ویسکوالاستیک با استفاده از حل معکوس جریان گذرا پرداختند. Evangelista et al. (2015) به بررسی جریان گذرا در خطوط لوله شاخه‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با اضافه کردن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله به مدل کلاسیک ضربه قوچ، نتایج عددی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و هم‌چنین می‌توان از اثرات افت غیرماندگار صرف‌نظر کرد.

در بسیاری از تحقیقات گذشته خصوصاً تحلیل جریان‌های گذرا، جداره لوله از جنس مصالح فلزی و بتنی بوده و با رفتار مکانیکی الاستیک فرض می‌شد. تحقیق حاضر به معرفی و مدل‌سازی اثرات دو پدیده دینامیکی افت غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله در لوله‌های پلیمری در شرایط جریان‌های گذرا می‌پردازد. بر این اساس معادله‌های حاکم بر پدیده ضربه‌قوچ با وجود ترم‌های اضافی افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله بازنویسی شده و با به‌کارگیری روش خطوط مشخصه در ترکیب با تفاضل محدود تحلیل خواهند شد. سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مدل عددی توسعه داده شده کالیبره و ارزیابی شد.

معادله‌های حاکم

معادله‌های حاکم بر جریان گذرا در مجاری بسته شامل معادله‌های بقای جرم و اندازه حرکت می‌باشند، که با فرض یک حجم کنترل و استفاده از قضیه انتقال رینولدز، برای یک جزء دیفرانسیل از حرکت سیال و هم‌چنین با در نظر گرفتن دو ترم دینامیکی افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله، به شکل دو معادله دیفرانسیل جزئی (۱) و (۲) قابل استخراج هستند (Evangelista et al., 2015; Soares et al., 2008).

$$\frac{dH}{dt}+\frac{a^2}{gA}\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{2a^2}{g}\frac{d\varepsilon_r}{dt}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{gA}\frac{dQ}{dt}+(h_{fs}+h_{fu})=0 \qquad (۲)$$

که در این معادله‌ها H ارتفاع پیزومتریک در هر لحظه، Q دبی لحظه‌ای، a سرعت موج فشاری، g شتاب ثقل، A مساحت مقطع لوله، ε_r مؤلفه تأخیری کرنش، h_{fs} افت اصطکاکی حالت ماندگار، h_{fu} افت اصطکاکی غیرماندگار، x مختصات در راستای محور لوله و t زمان می‌باشند. این دستگاه معادله‌های دیفرانسیل با استفاده از روش خطوط مشخصه حل شده و برای تکمیل محاسبات در هر گام زمانی، معادله‌های شرایط مرزی بالادست (مخزن با فشار ثابت) و پایین‌دست (شیر تولید ضربه‌قوچ) در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه افت ماندگار از رابطه (۳) به ترتیب برای شرایط جریان آشفته ($\mathrm{Re}>4000$) و آرام ($\mathrm{Re}<2000$) استفاده شده است.

$$h_{fs}=\frac{f_s}{2gD}\frac{Q|Q|^{n-1}}{A^n}\ ,\ h_{fs}=\frac{32\upsilon}{gD^2}\frac{Q}{A} \qquad (۳)$$

تاکنون روابط مختلفی برای تخمین افت غیرماندگار در منابع علمی پیشنهاد شده است. بر اساس نتایج محققان مدل پیشنهادی برنون بر دیگر روش‌ها برتری دارد. در رابطه (۴) مدل اصلاح شده آن توسط (Vitkovsky et al., 2000) ارائه شده است. در این مدل اثرات نوسانات افت اصطکاکی غیرماندگار بر اساس شتاب محلی لحظه‌ای و شتاب انتقالی لحظه‌ای شبیه‌سازی می‌شود.

$$h_{fu}=\frac{k'}{gA}\left(\frac{\partial Q}{\partial t}+a\,SGN(Q)\left|\frac{\partial Q}{\partial x}\right|\right) \qquad (۴)$$

که در آن k' ضریب کاهنده برنون و عملگر $SGN(Q)$ تابع علامت سرعت متوسط می‌باشد. در این معادله مشتق مکانی دبی با استفاده از طرح صریح مرتبه اول (First-order explicit scheme) و مشتق زمانی آن از طرح ضمنی مرتبه دوم (Second-order implicit scheme) مطابق روابط (۵) تا (۷) گسسته‌سازی می‌شوند.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}\Big|_{C\pm}=\theta\frac{Q(x,t)-Q(x,t-\Delta t)}{\Delta t}+(1-\theta)\frac{Q(x\mp\Delta x,t-\Delta t)-Q(x\mp\Delta x,t-2\Delta t)}{\Delta t} \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x}\Big|_{C\pm}=\theta\frac{Q(x,t-\Delta t)-Q(x\mp\Delta x,t-\Delta t)}{\Delta x} \qquad (۶)$$

$$SGN(Q)\big|_{\pm C}=SGN(Q(x\mp\Delta x,t-\Delta t)) \qquad (۷)$$

در مقایسه با لوله‌های الاستیک، لوله‌های پلیمری وقتی تحت یک تنش آنی σ_0، قرار می‌گیرند، پاسخی مطابق قانون هوک (Hook's law) نداشته و دارای یک پاسخ الاستیک آنی و یک پاسخ ویسکوز-تأخیری هستند. کرنش در این نوع مواد می‌تواند مطابق رابطه (۸) به دو قسمت کرنش الاستیک آنی، و کرنش ویسکوز-تأخیری تقسیم شود (شکل (۱) الف):

$$\varepsilon(t)=\varepsilon_e+\varepsilon_r(t) \qquad (۸)$$

مطابق اصل برهم‌نهی بولتزمن (Boltzmann superposition principle)، برای کرنش‌های کوچک، کرنش ناشی از ترکیب تنش‌هایی که به‌صورت مستقل روی سیستم عمل می‌کنند، می‌توانند به‌صورت خطی با هم جمع شوند (شکل (۱) ب). بنابراین، کرنش کل ناشی از اعمال پیوسته‌ی یک تنش $\sigma(t)$، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Aklonis et al., 1972):

$$\varepsilon(t)=J_0\,\sigma(t)+\int_0^t\sigma(t-t')\frac{\partial J(t')}{\partial t'}\,dt' \qquad (۹)$$

که در آن J_0 خزش تطابقی آنی و $J(t')$ تابع خزش در زمان t' می‌باشد. برای مصالح الاستیک خطی، خزش تطابقی J_0 معادل عکس مدول الاستیسیته است، $J_0=1/E_0$.

با فرض این‌که مصالح لوله همگن و هم‌سانگرد، دارای رفتار ویسکوالاستیک خطی برای کرنش‌های کوچک، نسبت پواسون υ ثابت به‌طوری‌که رفتار مکانیکی تنها وابسته به تابع خزش باشد، و تنش محیطی σ معادل $\sigma=\alpha\Delta pD/2e$، کرنش محیطی کل $\varepsilon=(D-D_0)/D_0$، به‌صورت زیر توصیف می‌شود.

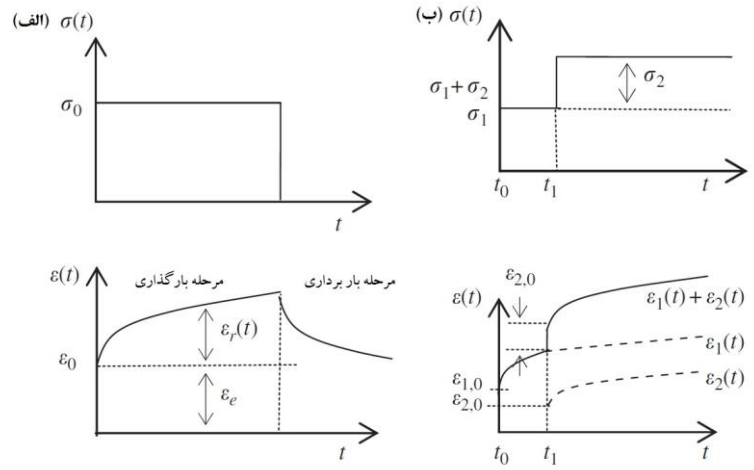
$$\varepsilon(t)=\frac{\alpha_0 D_0}{2e_0}\left[p(t)-p_0\right]J_0+\int_0^t\frac{\alpha(t-t')\,D(t-t')}{2e(t-t')}\left[p(t-t')-p_0\right]\frac{\partial J(t')}{\partial t'}dt' \qquad (۱۰)$$

در اینجا $p(t)$، $D(t)$، $e(t)$، و $\alpha(t)$، به‌ترتیب فشار، قطر، ضخامت دیواره و ضریب قید دیواره لوله، در زمان t و مقادیر اولیه این پارامترها با زیرنویس صفر می‌باشد. هم‌چنین $J(t)$ تابع خزش تطابقی و J_0 مقدار خزش آنی می‌باشد. ترم اول این معادله متناظر با کرنش الاستیک (ε_e) و ترم انتگرالی، کرنش تأخیری (ε_r) می‌باشد. قابل ذکر است که، مشتق زمانی ارتفاع پیزومتریک و سرعت موج الاستیک، کرنش الاستیک را در بر می‌گیرند.

دستگاه معادله‌های (۱) و (۲) پس از ساده‌سازی با استفاده از طرح عددی رابطه (۱۱)، با استفاده از روش خطوط مشخصه در امتداد خطوط $dx/dt=\pm a_0$ حل می‌شود. در این معادله‌های دو ترم مشتق زمانی کرنش تأخیری و شیب خط انرژی نیاز به گسسته‌سازی بیشتری دارند.

$$\left[H(x,t)-H(x\mp\Delta x,t-\Delta x)\right]\pm\frac{a_0}{gA}\left[Q(x,t)-Q(x\mp\Delta x,t-\Delta x)\right]+\frac{2a_0^2\Delta t}{g}\left(\frac{\partial\varepsilon_r}{\partial t}\right)\pm a_0\Delta t(h_{fs}+h_{fu})=0 \qquad (۱۱)$$

برای توصیف رفتار رئولوژیکی (Rheological) دیواره لوله، تابع خزش با استفاده از مدل مکانیکی تعمیم‌یافته کلوین-ویت (Generalized Kelvin-Voigt) (رابطه (۱۲)) جامد ویسکوالاستیک (شکل (۲)) تعریف می‌شود (Aklonis et al., 1972).



شکل ۱- الف) تنش و کرنش برای یکی بار ثابت آنی، ب) اصل برهم‌نهی بولتزمن برای دو تنش متوالی (Covas, 2003)

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^{N} J_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \qquad (۱۲)$$

که در اینجا J خزش تطابقی، J_0 خزش تطابقی فنر اول، که به‌صورت $J_0 = 1/E_0$ تعریف می‌شود و E مدول الاستیسیته دینامیکی دیواره لوله می‌باشد، برای هر المان kام مدل کلوین-ویت، J_k خزش فنر می‌باشد که به‌صورت $J_k = 1/E_k$ تعریف می‌شود و E_k مدول الاستیسیته فنر است، و $\tau_k = \eta_k / E_k$ زمان تأخیر میراگر با η_k به‌عنوان ویسکوزیته میراگر می‌باشد.

پارامترهای J_k و τ_k در عبارت خزش تطابقی به‌عنوان مجهولات مسئله، با استفاده از حل معکوس جریان گذرا به‌دست می‌آیند. مطابق این مدل ریاضی، ترم‌های $\partial\varepsilon_r/\partial t$ و ε_r به‌صورت مجموع این فاکتورها برای هر المان k کلوین-ویت محاسبه می‌شوند:

$$\varepsilon_r(x,t) = \sum_{k=1,\dots N} \varepsilon_{rk}(x,t) = \sum_{k=1,\dots N} \left\{ \frac{\alpha D}{2e} \gamma \int_0^t [H(x,t-t') - H_0(x)] \frac{J_k}{\tau_k} e^{-t'/\tau_k} dt' \right\} \qquad (۱۳)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_r(x,t)}{\partial t} = \sum_{k=1,\dots N} \frac{\partial \varepsilon_{rk}(x,t)}{\partial t} = \sum_{k=1,\dots N} \left\{ \frac{\alpha D}{2e} \frac{J_k}{\tau_k} \gamma [H(x,t) - H_0(x)] - \frac{\varepsilon_{rk}(x,t)}{\tau_k} \right\} \qquad (۱۴)$$

برای هر المان k کلوین-ویت داریم:

$$\varepsilon_{rk}(x,t) = \int_0^t F(x,t-t') \frac{J_k}{\tau_k} e^{-t'/\tau_k} dt' \qquad (۱۵)$$

که در آن $F(x,t)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(x,t) = \frac{\alpha D}{2e} \gamma [H(x,t) - H_0(x)] \qquad (۱۶)$$

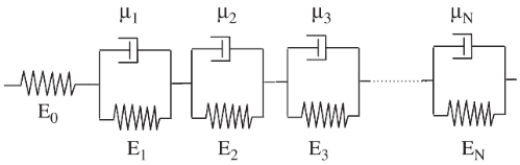
مطابق پیوست، برای $\partial\varepsilon_{rk}(x,t)/\partial t$ داریم:

$$\frac{\partial \varepsilon_{rk}(x,t)}{\partial t} = \frac{J_k}{\tau_k} F(x,t) - \frac{\tilde{\varepsilon}_{rk}(x,t)}{\tau_k} \qquad (۱۷)$$

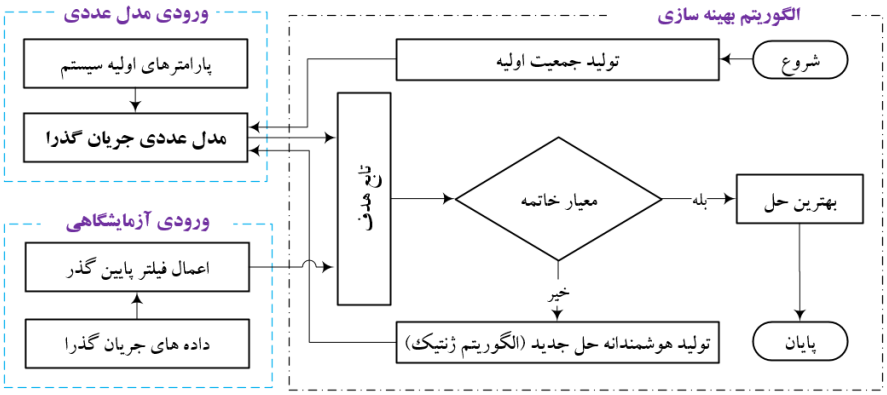
$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_{rk}(x,t) = {} & J_k F(x,t) - J_k e^{-\Delta t/\tau_k} F(x,t-\Delta t) \\ & - J_k \tau_k (1 - e^{-\Delta t/\tau_k}) \frac{F(x,t) - F(x,t-\Delta t)}{\Delta t} \\ & + e^{-\Delta t/\tau_k} \tilde{\varepsilon}_{rk}(x,t-\Delta t) \end{aligned} \qquad (۱۸)$$

حل معکوس جریان گذرا

در روش حل معکوس، با استفاده از اطلاعات فشار برداشت شده از جریان گذرا، به تخمین پارامترهای مجهول سیستم پرداخته شد. شناسائی پارامترهای مجهول یک مسئله بهینه‌سازی است که در آن رفتار سیستم با استفاده از یک مدل عددی جریان گذرا شبیه‌سازی شده، و تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی با استفاده از مدل بهینه‌ساز کمینه می‌شود. روندنمای کلی روش حل معکوس جریان گذرا مطابق شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۲- مدل تعمیم‌یافته کلوین- ویت (Keramat et al., 2009)



شکل ۳- روندنمای روش تحلیل معکوس جریان گذرا

روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) و تابع هدف مورد استفاده در مدل بهینه‌ساز، مطابق رابطه (۱۹) متوسط حداقل مجذور مربعات خطا (Average Least-Square Errors) می‌باشد.

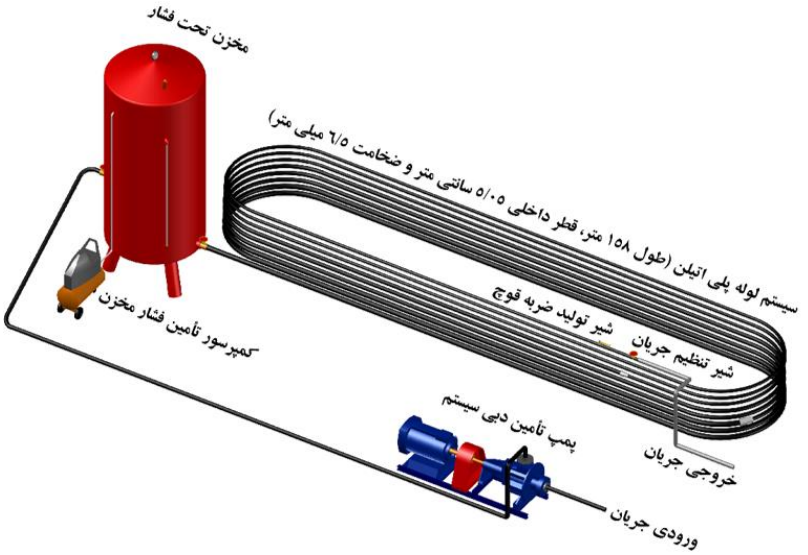
$$\underset{p}{Min}\ OF(p)=\frac{\sum_{i=1}^{M}\left[q_i^*-q_i(p)\right]^2}{M} \qquad (۱۹)$$

که در آن $OF(p)$ تابع هدف، p بردار پارامترها با N متغیر (N تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری)، $q(p)$ بردار نتایج مدل عددی به ازای بردار پارامترهای p، q^* نتایج مدل آزمایشگاهی، و M تعداد نمونه‌برداری فشار می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در مدل حل معکوس، مقادیر فشار در پشت شیر تولید ضربه‌قوچ و پارامترهای مجهول مسئله شامل ضریب افت اصطکاکی غیردائمی، و ضرایب خزش می‌باشند. الگوریتم ژنتیک مورد استفاده از نوع پیوسته بوده و شامل مراحل استاندارد تولید جمعیت اولیه، محاسبه مقدار تابع هدف نظیر هر کرومزوم، انتخاب طبیعی والدین (به روش تورنومنت)، تبادل ژنی و تولید فرزندان (به روش یکنواخت) و جهش ژنی می‌شود. در روند بهینه‌سازی از ۱۰۰ کرومزوم به‌عنوان جمعیت اولیه و ۸۰ کرومزوم به‌عنوان جمعیت نسل‌های تکاملی استفاده شده است. تبادل ژنی به‌صورت یکنواخت و جهش ژنی به صورت خطی از ۵ درصد در اولین نسل تا ۲ درصد در نسل انتهایی در نظر گرفته شده است. هم‌چنین معیار خاتمه ۷۰ گام انتخاب شد.

مدل‌سازی آزمایشگاهی ضربه قوچ

اکثر تحقیقات قبلی محققان به‌صورت عددی و یا در سیستم‌های لوله الاستیک صورت گرفته است. لذا با توجه به هدف این تحقیق برای کالیبراسیون ضرایب مجهول مدل از یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. مدل حاضر مرکب از یک مخزن تحت فشار، لوله‌های از جنس پلی‌اتیلن استاندارد PE100 با طول، قطر داخلی و ضخامت به‌ترتیب ۱۵۸ متر، ۵/۰۵ سانتی‌متر و ۶/۵ میلی‌متر و شیر تنظیم جریان و شیر تولید ضربه قوچ می‌باشد، که شماتیک کلی آن در شکل (۴) نمایش داده شده است.

در این سیستم برای سهولت نصب ابزار دقیق، خط لوله در طول مسیر خود بر روی پایه‌ای فلزی با ارتفاع از سطح زمین قرار دارند. برای جلوگیری از تولید فشارهای منفی در سیستم و پدیده جدایی ستون سیال، یک مخزن تحت فشار با فشار قابل تنظیم در حدود ۴۵ متر در بالادست سیستم تعبیه شد. این مخزن به‌عنوان شرط مرزی بالادست با فشار ثابت استفاده شده است. سیستم توسط یک پمپ تغذیه به مخزن آزمایشگاه متصل است که دبی مورد نیاز خط لوله را تأمین می‌کند. در این تحقیق با استفاده از فشارسنج‌های ۱۶ بار، سیگنال فشار جریان گذرا اندازه‌گیری شد.



المان	مکان (متر)
مخزن	۰
T1	۰
T2	۵۵/۸۵
T3	۱۱۹/۰۰
T4	۱۵۷/۸۰
شیر ضربه‌قوچ	۱۵۸/۰۰
شیر تنظیم جریان	۱۵۸/۱۰

شکل ٤- شماتیک مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

این فشارسنج‌ها توسط سیم‌های رابط به دستگاه مبدل آنالوگ به دیجیتال (دیتالاگر) و از آنجا به سیستم کامپیوتری متصل گردید. در این تحقیق برای تنظیم دبی از یک شیر کروی (Glob valve) نصب‌شده روی لوله خروجی استفاده شده است. هم‌چنین برای تولید جریان گذرا از یک شیر ربع‌گرد (Ball Valve) استفاده شده است. این نوع شیر مجهز به یک زمان‌سنج بوده که زمان بستن و باز شدن آن را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

در این قسمت مدل هیدرولیکی توسعه داده شده با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده‌ی مدل فیزیکی، کالیبره و صحت‌سنجی می‌شود. با این حال، زمانی که از اطلاعات فیزیکی استفاده می‌کنیم، برای این‌که هر پدیده کاملاً درک و توصیف شود، تنها روش عددی تخمین هر پارامتر، جدا کردن اثرات آن از دیگر پدیده‌ها می‌باشد. به‌صورت ایده‌آل این پارامترها با استفاده از اطلاعات جریان گذرا (حل معکوس) به‌صورت هم‌زمان تخمین زده خواهند شد.

ادعا شده است که این موضوع یکی از مزایای عمده روش تحلیل معکوس جریان گذرا می‌باشد (Liggett and Chen, 1994). این موضوع چند دلیل مختلف دارد. اولاً، اثرات چند پارامتر بر پاسخ فشاری جریان گذرا دارای هم‌پوشانی می‌باشند. یک مثال نمونه اصطکاک سیال و رفتار ویسکوالاستیک دیواره لوله می‌باشد که باعث میرایی و پخش (تغییر فاز) موج فشاری گذرا در لوله‌های پلاستیکی می‌شوند. دوماً، حل‌کننده جریان گذرا حساسیت‌های مختلفی نسبت به هر پارامتر دارد. در نهایت، وجود عدم قطعیت در فرضیات مدل ریاضی و هم‌چنین اطلاعات مدل فیزیکی، خصوصاً زمانی که در شرایط واقعی برداشت شده باشند.

در این تحقیق، ضرایب اصطکاک ماندگار بر اساس شرایط جریان ماندگار کالیبره شده‌اند. شرایط مرزی مانند مانور شیر تولید جریان گذرا و فشار مخزن هوا به‌طور مستقیم در سیگنال فشار اندازه‌گیری شده‌اند. چالش اصلی تمایز اثرات افت غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله در لوله‌های پلیمری است. این موضوع بر کالیبراسیون سرعت موج، تابع خزش و اصطکاک غیرماندگار تأثیر می‌گذارد. حل‌کننده معکوس جریان گذرا (ITS) با رویکردهای مختلفی برای تخمین این پارامترها به‌کار برده شده است.

در ابتدا ساده‌ترین پارامترها شامل اصطکاک ماندگار و شرایط مرزی، برآورد شدند. برای کالیبراسیون پارامترهای سرعت موج، اصطکاک غیرماندگار و خزش، که دارای هم‌پوشانی اثرات هستند، سه رویکرد مختلف استفاده شد. در دو روش اول مدل تنها با لحاظ کردن یکی از دو پدیده دینامیکیِ اصطکاک غیرماندگار یا اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله ارزیابی شد. در نهایت، مدل جریان گذرا با وجود هم‌زمان اصطکاک غیرماندگار در شرایط آشفته و اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله ارزیابی شد.

افت فشار گذرای ناشی از اصطکاک ماندگار، در مقایسه با میرایی مکانیکی حاصل از ویسکوالاستیک دیواره لوله (در لوله‌های پلاستیکی دارای اهمیت فراوان می‌باشد) و هم‌چنین اصطکاک سیال و اثرات اینرسی ناشی از معکوس‌شدن پروفیل سرعت قابل اغماض است. در نتیجه، برخلاف آن‌چه در ابتدا توسط Liggett and Chen (1994) پیشنهاد شده بود، حداقل بر اساس دانش، وسایل نرم‌افزاری و تجهیزات اندازه‌گیری فعلی، اصطکاک غیرماندگار را نمی‌توان

براساس جریان گذرا کالیبره کرد. بنابراین، ضریب اصطکاک ماندگار باید براساس شرایط ماندگار تخمین زده شود. می‌توان این مقادیر را برای جریان‌های آرام (Re < 2000) توسط رابطه هیگن-پوازی (Hagen-Poiseuille) (حل دقیق)، و برای جریان‌های آشفته (Re > 4000) از رابطه کلبروک-وایت (Colebrook-White) (یک حل تقریبی با دقت ۱۵٪±) محاسبه کرد (Streeter, 1971; White, 1999). در ناحیه بحرانی ($4000 \le \mathrm{Re} \le 2000$)، ضریب اصطکاک قابل اعتمادی وجود ندارد؛ بنابراین، برای پیوستگی تابع اصطکاک، یک رابطه خطی تعریف شده است (Axworthy, 1997).

اطلاعات جریان دائمی شامل دبی جریان Q و ارتفاع پیزومتریک H، برای تخمین فاکتور اصطکاک ماندگار f_s استفاده شد. افت ارتفاعی کل ΔH و افت ارتفاعی واحد طول h_{fs} (یعنی $\Delta H/L$)، بر اساس اطلاعات فشار پیزومتریک بین انتهای بالادست (فشارسنج T_1) و دیگر مکان‌های اندازه‌گیری (فشارسنج T_i)، در شکل (۵) ارائه شده است. با این فرض که افت‌های ارتفاعی موضعی حدود ۵ درصد افت‌های انرژی کل هستند، فاکتورهای اصطکاک برای همه‌ی دبی‌ها با استفاده از رابطه $f_s = 2h_{fs}DgA^2/Q^2$ محاسبه شد.

با توجه به این‌که دیواره لوله صاف است، رژیم جریان آشفته صاف می‌باشد. برای لوله‌های با دیواره صاف، جریان مستقل از زبری دیواره لوله بوده و لزجت سیال منبع اصلی افت‌های انرژی است. بلاسیوس بر اساس رابطه پرانتل برای مقادیر $4000 < \mathrm{Re} < 10^5$، رابطه بین فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز را به‌صورت رابطه (۲۰) ارائه داد (White, 1999).

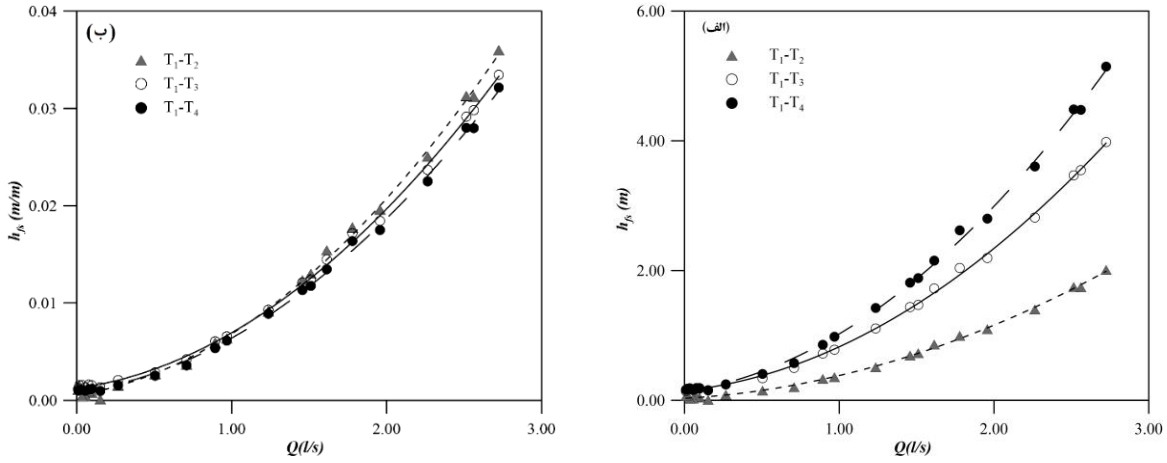
$$f_s = 0.316\,\mathrm{Re}^{-0.25} \qquad (۲۰)$$

در این روابط $\mathrm{Re} = VD/\upsilon$ عدد بدون بعد رینولدز، V سرعت متوسط جریان و υ ویسکوزیته سینماتیک سیال است.

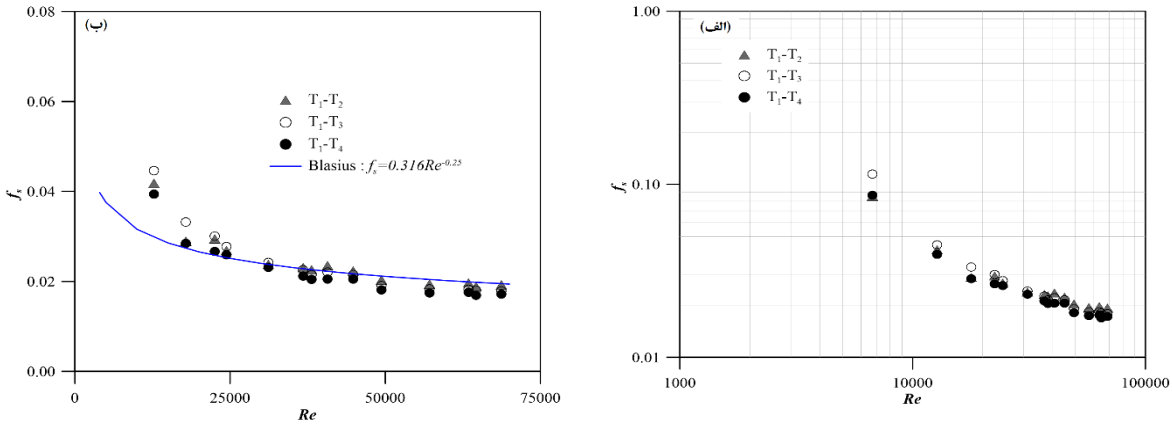
در شکل (۶) (الف) مقادیر فاکتور اصطکاک در مقابل عدد رینولدز در مقیاس لگاریتمی نمایش داده شده است. در مقیاس لگاریتمی تغییرات فاکتور اصطکاک با عدد رینولدز تقریباً خطی است. هم‌چنین در شکل (۶) (ب) این مقادیر با رابطه صریح بلاسیوس مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر فاکتور اصطکاک سازگاری خوبی با رابطه بلاسیوس داشته و مقادیر خطای موجود می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری در مقادیر آزمایشگاهی باشد. بنابراین، در این تحقیق اصطکاک در جریان آرام بر اساس رابطه هیگن-پوازی و در جریان آشفته صاف بر اساسی رابطه بلاسیوس با احتساب ۵ درصد افت موضعی، تخمین زده می‌شود. قابل ذکر است که هیچکدام از این روابط متغیری برای کالیبراسیون نداشته و باعث افزایش سرعت محاسبات مدل عددی جریان گذرا خواهند شد.

الف) مدل‌سازی بر اساس اصطکاک غیرماندگار

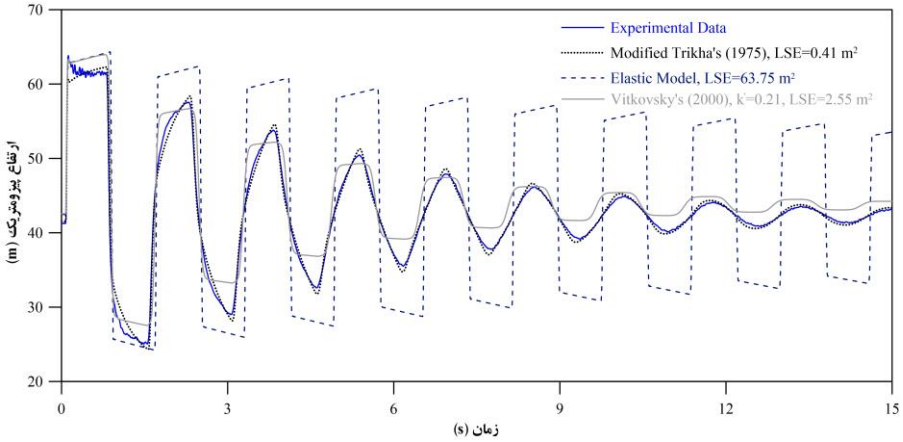
برای شناخت اثرات اینرسی سیال روی نوسانات فشار جریان گذرا و واسنجی ضریب افت اصطکاک غیرماندگار، ابتدا فرض می‌شود که صرفاً این عوامل بر روی افت فشار جریان گذرا نقش داشته و اثرات ویسکوالاستیسیته دیواره لوله نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین از مدل ریاضی جریان گذرای الاستیک خطی با مشارکت اثرات اصطکاک غیرماندگار استفاده می‌شود. روابط پیشنهادی مختلفی برای تخمین افت غیرماندگار وجود دارد و در این تحقیق، برای جریان آشفته از رابطه Vitkovsky بر اساس مدل پیشنهادی Brunone در مدل عددی جریان گذرا استفاده شد.



شکل ۵-الف) افت‌های ارتفاعی کل، و ب) افت‌های ارتفاعی واحد طول، بین بالادست و مکان‌های مختلف خط لوله



شکل ٦- الف) تغییرات فاکتور اصطکاک با عدد رینولدز در محدوده جریان آشفته، ب) مقایسه فاکتور اصطکاک با رابطه بلاسیوس



شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی با لحاظ افت غیرماندگار در مدل عددی

مطابق شکل (۷) 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 اندکی بهبود یافته است. با انجام عملیات واسنجی، مقدار ضریب افت واسنجی شده برابر با $k=0.19$ به‌دست آمد که بسیار بیشتر از مقادیر معمول برای مدل‌های افت غیرماندگار در لوله‌های الاستیک است. با بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی ملاحظه می‌شود که روابط افت غیرماندگار مورد استفاده در حل کننده‌های یک بعدی جریان گذرا، نمی‌توانند به درستی افت، پراکندگی و شکل امواج فشاری مشاهداتی را در لوله‌های ویسکوالاستیک توصیف کنند. 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.

ب) مدل‌سازی بر اساس اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله

در رویکردی که در این سناریو برای واسنجی تابع خزش دنبال می‌شود، اثرات اصطکاک غیرماندگار نادیده گرفته می‌شود. پارامترهای τ_k (زمان تاخیر) و J_k (ضرایب خزش المان‌های کلوین-ویت) با کمینه کردن اختلاف مربعات بین ارتفاع هد پیزومتریک محاسباتی و اندازه‌گیری‌شده در محل شیر پایین‌دست خط لوله، واسنجی و تخمین زده شد. در این تحقیق از سه المان کلویت-ویت استفاده شد. در جدول (۱) و شکل (۸) مقادیر ضرایب بهینه شده و مقدار دقت این مدل‌ها نمایش داده شده است. شکل (۹) نشان می‌دهد که با اضافه کردن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله، مقادیر محاسباتی با دقت قابل قبولی به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک می‌شود. هم‌چنین در شکل (۱۰) مقدار کرنش محیطی کلی و تأخیری دیواره لوله در پشت شیر نمایش داده شده است.

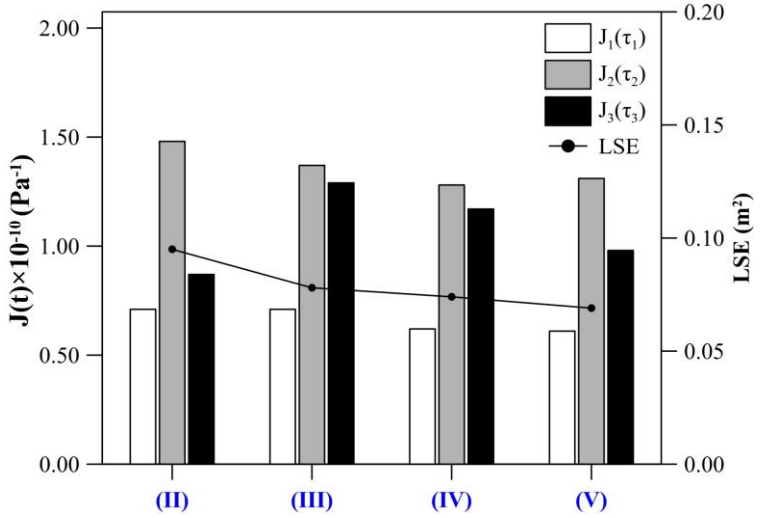
نتایج نشان می‌دهد، مشابه رفتار کلی پلیمرها در مرحله بارگذاری و باربرداری (شکل ۱)، منحنی فشار و کرنش در فاز

بارگذاری دارای تحدب و بر عکس آن در فاز بـاربرداری دارای تقعـر است (شکل‌های ۹ و۱۰). این رفتار با تضعیف نوسانات و تأخیر زمانی موج فشاری، به‌طور قابل توجهی بر پاسخ فشاری سیستم در جریـان گذرا، تأثیر می‌گذارد.

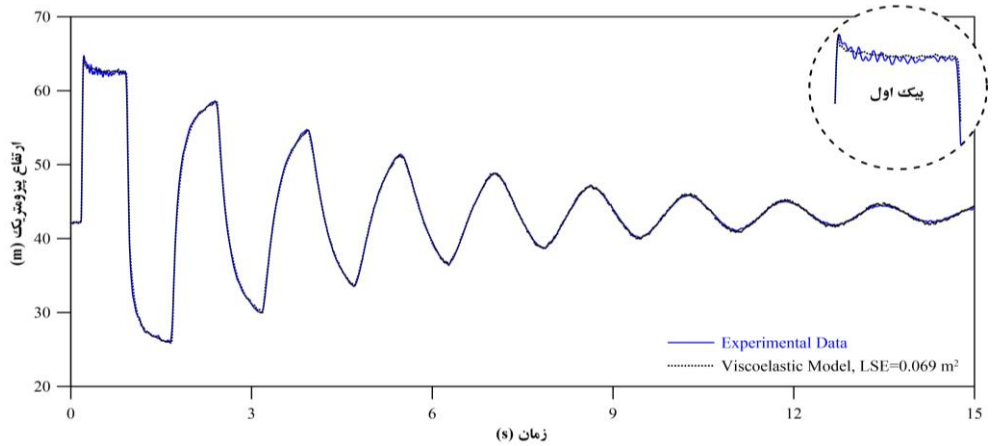
از طرفی مطابق شکل (۱۱) که در آن با استفاده از تبدیل فوریـه سریع (Fast Fourier Transform) پاسخ سیستم در حوزه فرکـانس استخراج شده است، اضافه کردن اثرات ویسکوالاستیک دیـواره لولـه به تنهایی قادر به شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های پلمیری بوده و دامنـه و فاز موج با این مدل با دقت مناسبی مدل‌سازی شده است.

جدول ۱- مقادیر ضرایب کالیبره شده زمان‌های تأخیر و ضرایب خزش

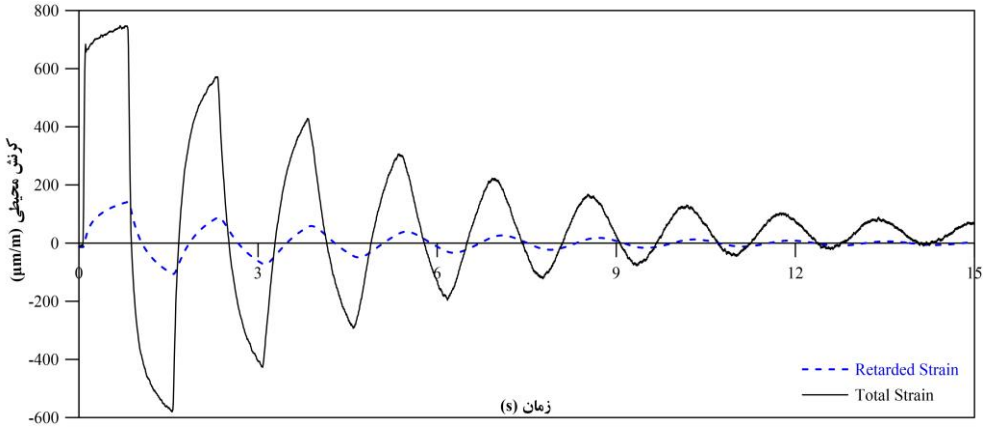
مدل	Q (L/s)	N_{KV} (-)	a (m/s)	زمان‌های تأخیر (s)			ضرایب خزش (Pa^{-1})			LSE
				τ_1	τ_2	τ_3	$J_1 \times 10^{-9}$	$J_2 \times 10^{-9}$	$J_3 \times 10^{-9}$	
I		–	۳۹۲/۰۹	مدل الاستیک						۶۳/۷۴۷
II		۳	۴۲۱/۷۴	۰/۰۵	۰/۵	۱۰	۰/۷۱	۱/۴۸	۰/۸۷	۰/۰۹۵
III	۱/۰۲	۳	۴۲۰/۰۵	۰/۰۶۷	۰/۵	۱۰	۰/۷۱	۱/۳۷	۱/۲۹	۰/۰۷۸
IV		۳	۴۱۹/۲۷	۰/۰۶۵	۰/۴۲۲	۸/۱۲۰	۰/۶۲	۱/۲۸	۱/۱۷	۰/۰۷۴
V		۳	۴۲۰/۵۲	۰/۰۵۷	۰/۴	۸	۰/۶۱	۱/۳۱	۰/۹۸	۰/۰۶۹



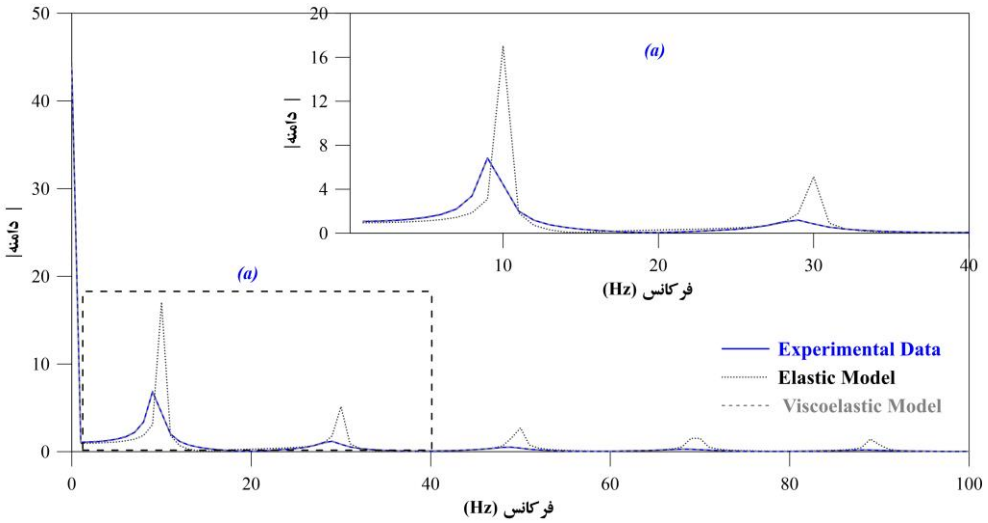
شکل ۸- نمایش مقادیر ضرایب خزش در مدل‌های مختلف



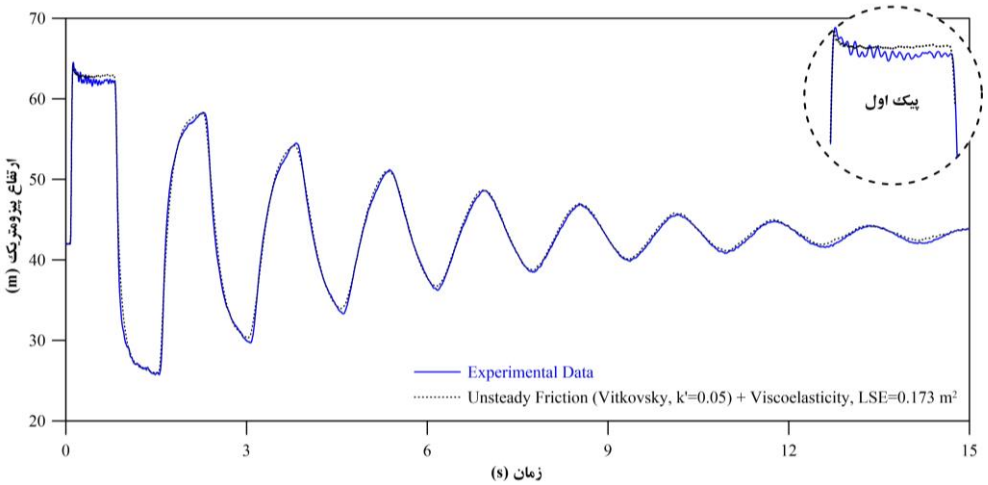
شکل ۹- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی با لحاظ اثر ویسکوالاستیک در مدل عددی



شکل ۱۰- تغییرات تابع خزش با زمان در مدل جریان گذرا با لحاظ اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله



شکل ۱۱- مقایسه پاسخ سیستم در مدل‌هایی هیدرولیکی مختلف در حوزه فرکانس



شکل ۱۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی با وجود افت غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله در مدل عددی

ج) مدل‌سازی بر اساس افت غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله

مطابق شکل (۱۲) با در نظر گرفتن هم‌زمان افت غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله، از دقت حل نسبت به سناریو (ب) اندکی کاسته شده است. نتایج حاوی این نکته است که برای مدل‌سازی خطوط ویسکوالاستیک می‌توان تنها از اثرات ویسکوالاستیک استفاده کرده و افت غیرماندگار را لحاظ نکرد. در این سناریو مقدار ضریب افت غیرماندگار واسنجی شده برابر با $k' = 0.082$ به‌دست آمد. هم‌چنین تعداد المان‌ها و ضرایب تأخیر زمانی مطابق سناریو قبل می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق 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 یک بعدی در مجرای بسته و شرایط مرزی، معادله‌های 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 برای کمینه‌کردن تابع هدف تعریف شده (اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و نتایج عددی) استفاده می‌کند. با توجه به افت شدید فشار ناشی از اثرات ویسکوالاستیسیته دیواره لوله، ضرایب افت ماندگار بر اساس شرایط ماندگار تخمین‌زده شد. هم‌چنین بررسی نتایج ضرایب افت ماندگار در شرایط آشفته نشان می‌دهد که رژیم جریان در لوله‌های پلی‌اتیلن، آشفته صاف بوده و برای افزایش سرعت کالیبراسیون، با دقت قابل قبولی می‌توان از رابطه صریح بلاسیوس استفاده کرد. مقایسه نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی نشان داد که مدل‌های معمولی کلاسیک قادر به شبیه‌سازی ضربه‌قوچ 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. هم‌چنین مقایسه نتایج مدل با وجود افت غیرماندگار و ویسکوالاستیسیته جداره لوله و اثر این دو پدیده به‌صورت هم‌زمان، نشان می‌دهد که اثرات ویسکوالاستیک جداره لوله عامل غالب بوده و تنها با همین اثر می‌توان نتایج رضایت‌بخشی به‌دست آورد.

منابع

1- Aklonis, J.J., MacKnight, W.J. and Shen, M., 1972. Introduction to Polymer Viscoelasticity. John Wiley & Sons, Inc., NewYork. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity. Part II 69.

2- Axworthy, D.H., 1997. Water Distribution Networks Modelling: from Steady-state to Waterhammer. PhD, *University of Toronto*, Toronto, Canada.

3- Bergant, A., Simpson, A.R. and Vitkovsky, J.P., 2001. Developments in Unsteady Pipe Flow Friction Modelling. *Journal of Hydraulic Research, IAHR, 39(3)*, pp.249–257.

4- Bratland, O., 1986. Frequency-Dependent Friction and Radial Kinetic Energy Variation in Transient Pipe Flows. *Proceedings of 5th International Conference on Pressure Surges. BHR Group Ltd., Hanover, Germany*, pp.95–101.

5- Brunone, B., 1999. Transient Test-Based Technique for Leak Detection in Outfall pipes. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 125(5)*, pp.302-306.

6- Brunone, B., Golia, U.M. and Greco, M., 1991. Some Remarks on the Momentum Equation for Fast Transients. *Proceeding of the International Conference on Hydraulic Transients with Water Column Separation (9th and Last Round Table of IAHR Group), Valencia, Spain*, pp.201–209.

7- Brunone, B., Golia, U.M. and Greco, M., 1995. Effects of Two-Dimensionality on Pipe Transients Modelling. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 121(12)*, pp.906-912.

8- Brunone, B., Karney, B. and Ferrante, M., 1999. Velocity Profiles, Unsteady Friction Losses and Transient Modelling. *26th Water Resources Planning and Management Conferenc*e, *ASCE, Tempe, Arizona.*

9- Brunone, B., Karney, B., Mercarelli, M. and Ferrante, M., 2000. Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE 126(4)*, pp.236–244.

10- Carstens, M.R. and Roller, J.E., 1959. Boundary-Shear Stress in Unsteady Turbulent Pipe Flow. *Journal of Hydraulic Deviation, ASCE, 85(HY2)*, pp.67–81.

11- Chaudhry, M.H., 1987. *Applied Hydraulic Transients*. Second edition Van Nostrand Reinhold Co., New York.

12- Covas, D. and Ramos, H., 2010. Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 136(2)*, pp.248-257.

13- Covas, D., 2003. Inverse Transient Analysis For leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems Modeling Special Dynamic Effects. PhD, *University of Imperial College*, Landon, UK.

14- Daily, J.W., Hankey, Jr.W.L., Olive, R.W. and Jordan, Jr.J.M., 1956. Resistance Coefficients for Accelerated and Decelerated Flows Through Smooth Tubes and Orifices. *Journal of Basic Engineering, Trans, ASME, Ser. D 78(7)*, pp.1071–1077.

15- Eichinger, P. and Lein, G., 1992. The Influence of Friction on Unsteady Pipe Flow. *Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Fluid Transients. Bettess & Watts, Balkema, Rotterdam*, pp.41–50

16- Evangelista, S., Leopardi, A., Pignatelli, R. and Marinis, G., 2015. Hydraulic Transients in Viscoelastic Branched Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 141(8)*, pp.1-9.

17- Fox, G.L.Jr. and Stepnewski, D., 1974. Pressure Wave Transmission in a Fluid Contained in a Plastically Deforming Pipe. *Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME*, pp.258-262.

18- Hino, M., Sawamoto, M. and Takasu, S., 1976. Experiments on Transition to Turbulence in an Oscillatory Pipe Flow. *Journal of Fluid Mechanics, 75(2)*, pp.193–207.

19- Hino, M., Sawamoto, M. and Takasu, S., 1977. Study on the Transition to Turbulence and Frictional Coefficient in an Oscillatory Pipe Flow. *Trans. JSCE* 9, pp.282–285.

20- Keramat, A., Ahmadi, A. and Majd, A., 2009. Transient caveating 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.*

21- Liggett, J.A. and Chen, L.C., 1994. Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 120(8)*, pp.934-955.

22- MeiBner, E. and 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.*

23- Mitosek, M. and Roszkowski, A., 1998. Empirical Study of waterhammer in plastic pipes. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, 27(7)*, pp.36-439.

24- Pezzinga, G., 1999. Quasi-2D Model for Unsteady Flow in Pipe Networks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(7)*, pp.676–685.

25- Pezzinga, G., 2000. Evaluation of Unsteady Flow Resistances by Quasi-2D and 1D Models. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 126(10)*, pp.778–785.

26- Safwat, H. and Polder, J., 1973. Friction-Frequency Dependence for Oscillatory Flows in Circular Pipes. *Journal of Hydraulic Deviation, ASCE, HY11, November*, pp.1933–1945.

27- Shuy, E.B., 1996. Wall Shear Stress in Accelerating and Decelerating Turbulent Pipe Flows. *Journal of Hydraulic Research, IAHR, 34(2)*, pp.173-183.

28- Silva-Araya, W.F. and Chaudhry, M.H., 1997. Computation of Energy Dissipation in Transient Flow. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(2)*, pp.108–115.

29- Soares, A.K., Covas, D. and Ramos, H., 2009. Transient flow in viscoelastic pipes with cavitation. *Proceedings of the 3rd IAHR International Meeting of the Work Group on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Brno, Czech Republic, October 2009.*

30- Soares, A.K., Covas, D. and Reis, F.R., 2008. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 134(9)*, pp.1389-1394.

31- Streeter, V.L., 1971. *Fluid Mechanics* (5th Edition). McGraw-Hill.

32- Suzuki, K., Taketomi, T. and Sato, S., 1991. Improving Zielke's Method of Simulating Frequency-Dependent Friction in Laminar Liquid Pipe Flow. *Journal of Fluid Engineering, Trans. ASME, 113(4)*, pp.569–573.

33- Trikha, A.K., 1975. An Efficient Method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow. *Journal of Fluid Engineering, Trans. ASME, 97(1)*, pp.97–105.

34- Vardy, A.E., 1992. Approximating Unsteady Friction at High Reynolds Numbers. In: Bettess and Watts (eds). *Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Fluid Transients. Balkema, Rotterdam, pp.21–29.*

35- Vardy, A.E. and Brown, J., 1995. Transient, Turbulent, Smooth Pipe Friction. *Journal of Hydraulic Research, IAHR, 33(4)*, pp.435–456.

36- Vardy, A.E. and Brown, J., 1996. On Turbulent, Unsteady, Smooth-Pipe Friction. *Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels. BHR Group Ltd., Harrogate, UK, pp. 289–311.*

37- Vardy, A.E. and Hwang, K.L., 1991. A Characteristic Model of Transient Friction in Pipes. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, *29(5)*, pp.669–684.

38- Vardy, A.E., Hwang, K.L. and Brown, J., 1993. A Weighting Function Model of Transient Turbulent Pipe Friction. *Journal of Hydraulic Research, IAHR, 31(4)*, pp.533–548.

39- Vitkovsky, J.P., Lambert, M.F. and Simpson, A.R., 2000. Advances in Unsteady Friction Modelling in Transient Pipe Flow. *Proceedings of the 8th International Conference on Pressure Surges. BHR Group Ltd., The Hague, The Netherlands, pp.471–498.*

40- White, F.M., 1999. Fluid mechanics, 4th edn, WCB.

41- Williams, D.J., 1977. Waterhammer in non-rigid pipes: precursor waves and mechanical damping. *Journal of Mechanical Engineering Science*, *19*(6), pp.237-242.

42- Zielke, W., 1968. Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow. *Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, Ser. D 90(1)*, pp.109–115.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE) **Vol. 41, No. 4, Winter 2019, p. 201-216**

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Simulation of Dynamic Phenomena of Unsteady Friction and Viscoelastic Effects in Pipeline under the Transient Flow

M. Rahmanshahi[1*], M. Fathi-Moghaddam[2] and A. Haghighi[3]

1*- Corresponding Author, PhD Graduated of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. *(mostafarahmanshahi@gmail.com)*

2- Professor of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3- Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 15 July 2017 Revised:21 October 2017 Accepted:24 October 2017

Keywords: Transient flow, Viscoelastic pipeline, Unsteady friction, Numerical model, Invers solution.

Introduction

Plastic pipes are widely used in pressurized water systems. The analysis of transient flow and estimation of maximum and minimum pressure wave propagation in pipeline and pipe networks is required for design and practice of piping systems, pumping stations, and dam water conveyance tunnels. The viscoelastic properties of the polyethylene pipes have significant effect on the estimation of pressure wave speed and attenuation in transient flow. The use of polymeric pipes such as polyethylene and polyvinyl chloride has recently increased due to their technical and economic advantages over steel and concrete pipes. Due to viscoelastic behavior, polymeric pipes have a significant impact on transient flows (Pezzinga, 2002). In a fast transient flow event like water hammer, viscoelastic properties of polymeric materials cause a residual stress in the pipe wall. These deformations will not return to their original state immediately after unloading (Covas, 2003). This viscoelastic behavior also affects the intensity, shape, and dampening of pressure oscillation in transient flows.

Covas (2003) developed a numerical model to simulate the viscoelastic behavior of the pipe wall in transient flow events. In this study, the results of a linear viscoelastic model were compared with experimental results in the presence and absence of unsteady friction loss. Soares et al., (2008) also considered transient flow in PVC pipes, and their results were in good agreement with those obtained by Ramos et al. (2004). Evangelista et al., (2015) studied water hammer phenomenon in a Y-shaped system both experimentally and numerically. According to their results, the linear viscoelastic model was able to simulate the water hammer phenomenon in this system.

The present research deals with the introduction and simulation of dynamic effects, including unsteady friction and pipe-wall viscoelastic in transient flows in polymeric pipes that widely used in water works. Accordingly, the governing equations are rewritten and manipulated for considering the unsteady friction and viscoelastic properties. The equations are then solved using the method of characteristics coupled with the finite difference method. Appling the inverse transient analysis method and with the aid of a genetic algorithm, the unknown parameters are determined. Steady state friction coefficients have to be estimated based on steady state data and other unknown parameters were calibrated based on the transient flow.

Methodology

Governing equations

In this study, a mathematical model was developed to calculate hydraulic transients in pressurized pipe systems. This hydraulic transient solver incorporates fluid frictional and inertial effects, pipe-wall linear viscoelasticity, and two boundary conditions include, waterhammer valve and a reservoir. Equations governing transient flow in viscoelastic pipes include continuity and momentum equations. For a viscoelastic pipe wall, these equations can be derived as follows (Chaudhry, 1987):

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{a^2}{gA}\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{2a^2}{g}\frac{\mathrm{d}\varepsilon_r}{\mathrm{d}t}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+gA\frac{\partial H}{\partial x}+gA(J_s+J_u)=0 \tag{2}$$

where H = pressure head, Q = flow rate, A= pipe cross-sectional area, x = distance along the pipe axis, t = time, a = pressure wave speed, ε_r = retarded strain, g = gravity acceleration, J_s and J_u are steady and unsteady friction losses per unit length, respectively.

Experimental setup

In order to calibrate the unknown parameters, including the unsteady friction and creep coefficients as well as to verify the developed model, the physical data collected in the laboratory transient flow that made to this purpose was used. Experimental tests have been carried out at the Hydraulic Laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. The pipe is fixed to a metal frame structure fixed to the ground (6 m×1.5 m with 180° bends of diameter 1.5 m) with metal brackets covered with plastic tube, about 1 m spaced, to restrain the pipe from any axial movement.
The experimental facility includes a centrifugal single head pump (n=2900 rpm), and a pressure tank with a total volume of 650 l at the upstream end. Pressure tank used to prevent column separation during negative pressure wave propagation, an air compressor was connected to the top of the tank to stabilize tank pressure and provide a constant initial pressure for the series pipeline system. There are two valves, at the downstream end, one to generate the transient event and the other to control the flow. The downstream end discharges to a free surface drainage pipe, and water is collected in a reservoir and reused. In this study a simple (reservoir-pipe-valve) pipe with 158 m length (the diameter and thickness are equal 5.05 cm and 6.3 mm, respectively), have been tested.

Results and Discussion

To evaluate viscoelasticity of pipe wall effect, it was assumed that the pressure damping in transient flow is only due to steady and unsteady losses and the rheological behavior of the pipe wall has no effect on the pressure damping. Hence, attempts were made to remove viscoelastic parameters from the developed model and define transient flow in the polyethylene pipeline based on the elastic effect. According to the experimental the model with elastic assumption is not able to account for damping and the pressure wave signal phase in polyethylene pipes during a transient event. Therefore, to account for viscoelastic effect, parameters of the generalized Kelvin-Voigt model were calibrated using inverse transient analysis and the experimental data.

To model pipe wall behavior in this study, the optimized number of Kelvin-Voigt is selected as three based on the suggestion made by Covas (2003) for large-scale viscoelastic pipelines. The generalized Kelvin-Voigt model is described by the parameters J_0, J_k, τ_k and n_{KV}. The parameter J_0 is equivalent to $1/E_0$ where E_0 is calculated from the measured wave speed.

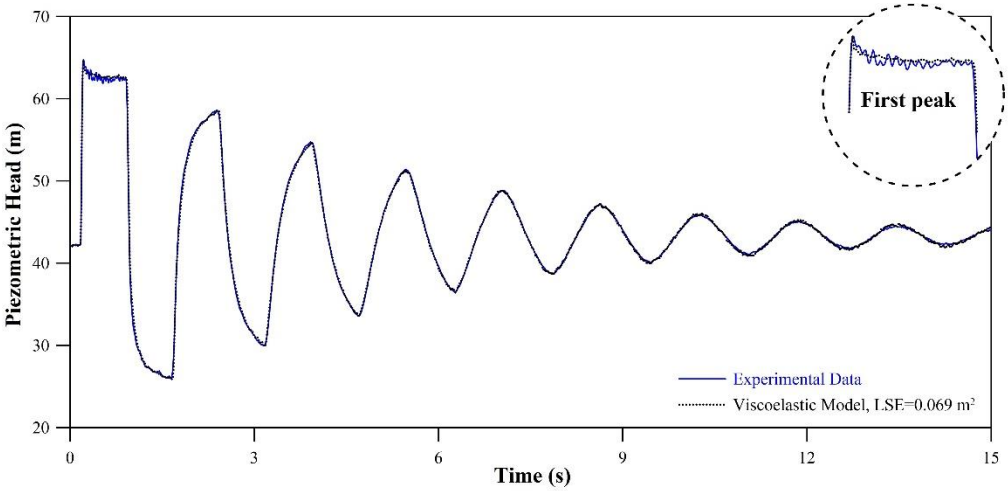


Figure 1- The numerical model results verses the experimental results

Figure(1) shows the experimental and numerical results of the calibration for the model with only viscoelastic effects. The figure confirms the linear viscoelastic model is capable of properly simulating the pressure wave shape, damping, and dispersion. This again confirms that for numerical simulation of the water hammer phenomenon and diagnostics such as leakage and blockage detection, the viscoelasticity of the pipe wall must be taken into account.

Conclusions

In this study the transient flow experiments were conducted in a polyethylene pipeline to calibrate a numerical model and evaluate pipe wall behavior. In the numerical model, effects of unsteady friction loss and viscoelastic behavior of pipe wall were compared and evaluated separately. The results show that the classical waterhammer solvers cannot accurately analyze the transient flows in polyethylene pipes. 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.

References

1- Chaudhry, M.H., 1987. *Applied Hydraulic Transients*. Second edition Van Nostrand Reinhold Co., New York.

2- Covas, D., 2003. Inverse Transient Analysis For leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems Modeling Special Dynamic Effects. PhD, *University of Imperial College*, Landon, UK.

3- Evangelista, S., Leopardi, A., Pignatelli, R. and Marinis, G., 2015. Hydraulic Transients in Viscoelastic Branched Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 141(8)*, pp.1-9.

4- Pezzinga, G., 2002. Unsteady Flow in Hydraulic Networks with Polymeric Additional Pipe. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(2)*, pp.238–244.

5- Ramos, H., Covas, D., Borga, A. and Loureiro, D., 2004. Surge damping analysis in pipe systems: modelling and experiments. *Journal of Hydraulic Research, IAHR, 42(4),* pp.413-425.

6- Soares, A.K., Covas, D. and Reis, F.R., 2008. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 134(9)*, pp.1389-1394.