

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

مصطفی رحمانشاهی^۱، منوچهر فتحی مقدم^۲ و علی حقیقی^۳

^۱ - نویسنده مسئول، دانش آموخته 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.

پذیرش: ۹۶/۸/۲

بازنگری: ۹۶/۷/۲۹

دریافت: ۹۶/۴/۲۴

چکیده

رفتار ویسکوالاستیک لوله‌های پلیمری در مرحله طراحی و هم‌چنین برای تحلیل سیگنال ضربه قوچ 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 آریست، در جریان‌های گذرای سریع مشاهده شده است. در حالی که افت

نتایج آزمایشگاهی دارد و همچنین می توان از اثرات افت غیرماندگار صرف نظر کرد.

در بسیاری از تحقیقات گذشته خصوصاً تحلیل جریان های گذرا، جداره لوله از جنس مصالح فلزی و بتنی بوده و با رفتار مکانیکی الاستیک فرض می شد. تحقیق حاضر به معرفی و مدل سازی اثرات دو پدیده دینامیکی افت غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله در لوله های پلیمری در شرایط جریان های گذرا می پردازد. بر این اساس معادله های حاکم بر پدیده ضربه قوچ با وجود ترم های اضافی افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله بازنویسی شده و با به کارگیری روش خطوط مشخصه در ترکیب با تفاضل محدود تحلیل خواهند شد. سپس با استفاده از داده های آزمایشگاهی، مدل عددی توسعه داده شده کالیبره و ارزیابی شد.

معادله های حاکم

معادله های حاکم بر جریان گذرا در مجاری بسته شامل معادله های بقای جرم و اندازه حرکت می باشند، 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).

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{dQ}{dt} + (h_{fs} + h_{fu}) = 0 \quad (2)$$

که در این معادله ها H ارتفاع پیزومتریک در هر لحظه، Q دبی لحظه ای، 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 می باشند. این دستگاه معادله های دیفرانسیل با استفاده از روش خطوط مشخصه حل شده و برای تکمیل محاسبات در هر گام زمانی، معادله های شرایط مرزی بالادست (مخزن با فشار ثابت) و پایین دست (شیر تولید ضربه قوچ) در نظر گرفته شده است. برای محاسبه افت ماندگار از رابطه (۳) به ترتیب برای شرایط جریان آشفته ($Re > 4000$) و آرام ($Re < 2000$) استفاده شده است.

غیرماندگار در جریان آرام به صورت 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 لحظه ای (Dailey et al., 1956; Crastens and Roller, 1959; Safwat and Polder, 1973; Shuy, 1996)، ۲- شتاب لحظه ای (Hino et al., 1976, 1977)، ۳- وزن های شتاب های محلی (Zielke, 1968; Suzuki et al., 1991; Vardy, 1992; Vardy et al., 1993; Vardy and Brown, 1995, 1996)، ۴- شتاب های انتقالی و محلی (Brunone et al., 1991, 1995; Vitkovsky et al., 2000; Bratland, 2000)، ۵- پروفیل سرعت (Bergant et al., 2000) و ۶- پروفیل سرعت (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) آزمایش هایی را در یک لوله پلی اتیلن ۳۵۰ متری انجام دادند. هدف از این آزمایش، تشریح استهلاك موج فشار توسط ضربه افت غیرماندگاری بود، که در رابطه برونون استفاده شده است. آن ها افت موج فشاری جذب شده را به افت اصطکاکی غیرماندگار مربوط دانستند، اما نتایج عددی تعیین شده در مقایسه با داده های 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 لوله های پلیمری بر نوسانات جریان گذرا به صورت 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 لوله های پلیمری، میرایی موج فشار هنگام جریان گذرا، حتی هنگامی که لوله نسبت به حرکت مقید شده است، خیلی بیشتر از میرایی به علت 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 لوله های ویسکوالاستیک را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. Ramos و Covas (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 شاخه ای پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که با اضافه کردن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله به مدل کلاسیک ضربه قوچ، نتایج عددی مطابقت خوبی با

$$\varepsilon(t) = J_0 \sigma(t) + \int_0^t \sigma(t-t') \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt' \quad (9)$$

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 این که مصالح لوله همگن و هم‌سانگرد، دارای رفتار ویسکوالاستیک خطی برای کرنش‌های کوچک، نسبت پواسون ν ثابت به طوری که رفتار مکانیکی تنها وابسته به تابع خزش باشد، و تنش محیطی σ معادل $\sigma = \alpha \Delta p D / 2e$ ، کرنش محیطی کل $\varepsilon = (D - D_0) / D_0$ ، به صورت زیر توصیف می‌شود.

$$\varepsilon(t) = \frac{\alpha_0 D_0}{2e_0} [p(t) - p_0] J_0 + \int_0^t \frac{\alpha(t-t') D(t-t')}{2e(t-t')} [p(t-t') - p_0] \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt' \quad (10)$$

در اینجا $q(t)$ ، $D(t)$ ، $e(t)$ و $\alpha(t)$ ، به ترتیب 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 پیژومتریک 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.

$$[H(x, t) - H(x \mp \Delta x, t - \Delta x)] \pm \frac{a_0}{gA} [Q(x, t) - Q(x \mp \Delta x, t - \Delta x)] + \frac{2a_0^2 \Delta t}{g} \left(\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right) \pm a_0 \Delta t (h_{fs} + h_{fu}) = 0 \quad (11)$$

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

$$h_{fs} = \frac{f_s}{2gD} \frac{Q|Q|^{n-1}}{A^n}, \quad h_{fu} = \frac{32\nu}{gD^2} \frac{Q}{A} \quad (3)$$

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.

$$h_{fu} = \frac{k'}{gA} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + a \operatorname{SGN}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (4)$$

که در آن k' ضریب کاهشده برنون و عملگر $\operatorname{SGN}(Q)$ 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.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \Big|_{c_{\pm}} = \theta \frac{Q(x, t) - Q(x, t - \Delta t)}{\Delta t} + (1 - \theta) \frac{Q(x \mp \Delta x, t - \Delta t) - Q(x \mp \Delta x, t - 2\Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

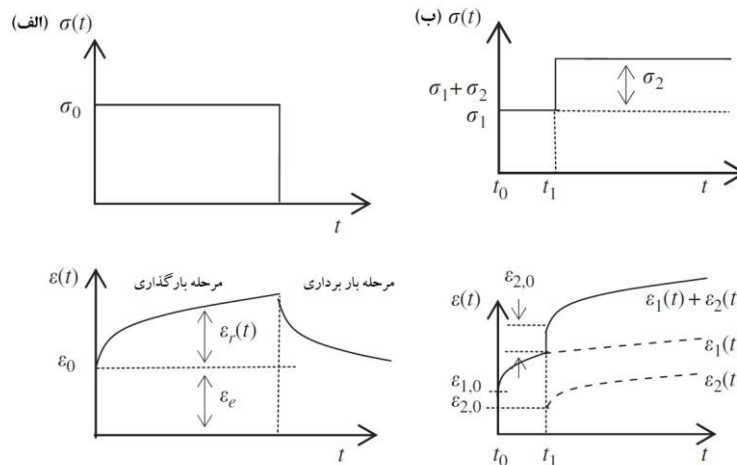
$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Big|_{c_{\pm}} = \theta \frac{Q(x, t - \Delta t) - Q(x \mp \Delta x, t - \Delta t)}{\Delta x} \quad (6)$$

$$\operatorname{SGN}(Q) \Big|_{\pm c} = \operatorname{SGN}(Q(x \mp \Delta x, t - \Delta t)) \quad (7)$$

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):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_r(t) \quad (8)$$

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



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

$$\varepsilon_{rk}(x, t) = \int_0^t F(x, t-t') \frac{J_k}{\tau_k} e^{-t'/\tau_k} dt' \quad (15)$$

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^N J_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (12)$$

که در آن $F(x, t)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$F(x, t) = \frac{\alpha D}{2e} \gamma [H(x, t) - H_0(x)] \quad (16)$$

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

$$\frac{\partial \varepsilon_{rk}(x, t)}{\partial t} = \frac{J_k}{\tau_k} F(x, t) - \frac{\tilde{\varepsilon}_{rk}(x, t)}{\tau_k} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_{rk}(x, t) = & J_k F(x, t) - J_k e^{-\Delta t / \tau_k} F(x, t - \Delta t) \\ & - J_k \tau_k (1 - e^{-\Delta t / \tau_k}) \frac{F(x, t) - F(x, t - \Delta t)}{\Delta t} \\ & + e^{-\Delta t / \tau_k} \tilde{\varepsilon}_{rk}(x, t - \Delta t) \end{aligned} \quad (18)$$

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. شناسایی پارامترهای مجهول یک مسئله بهینه سازی است که در آن رفتار سیستم با استفاده از یک مدل عددی جریان گذرا شبیه سازی شده، و تفاوت بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسباتی با استفاده از مدل بهینه ساز کمینه می شود. روندنمای کلی روش حل معکوس جریان گذرا مطابق شکل (۳) می باشد.

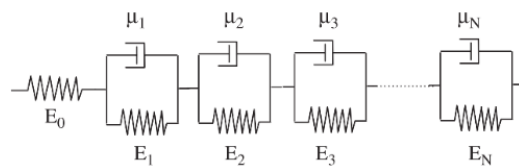
که در اینجا J خزش تطابقی، J_0 خزش تطابقی فنر اول، که به صورت $J_0 = 1/E_0$ تعریف می شود و E مدول الاستیسیته دینامیکی دیواره لوله می باشد، برای هر المان k ام مدل کلونین-ویت، $J_k = 1/E_k$ به صورت که به صورت $J_k = 1/E_k$ تعریف می شود و E_k مدول الاستیسیته فنر است، و $\tau_k = \eta_k/E_k$ زمان تأخیر میراگر با η_k به عنوان ویسکوزیته میراگر می باشد.

پارامترهای J_k و τ_k در عبارت خزش تطابقی به عنوان مجهولات مسئله، با استفاده از حل معکوس جریان گذرا به دست می آیند. مطابق این مدل ریاضی، ترم های $\partial \varepsilon_r / \partial t$ و ε_r به صورت مجموع این فاکتورها برای هر المان k کلونین-ویت محاسبه می شوند:

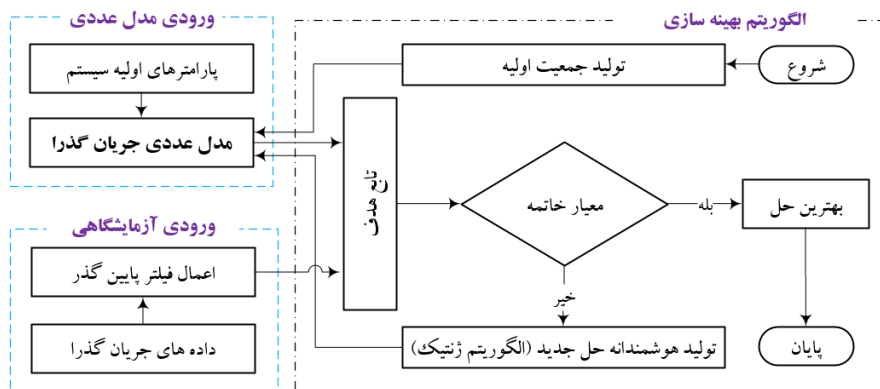
$$\begin{aligned} \varepsilon_r(x, t) = & \sum_{k=1, \dots, N} \varepsilon_{rk}(x, t) \\ = & \sum_{k=1, \dots, N} \left\{ \frac{\alpha D}{2e} \gamma \int_0^t [H(x, t-t') - H_0(x)] \frac{J_k}{\tau_k} e^{-t'/\tau_k} dt' \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_r(x, t)}{\partial t} = & \sum_{k=1, \dots, N} \frac{\partial \varepsilon_{rk}(x, t)}{\partial t} \\ = & \sum_{k=1, \dots, N} \left\{ \frac{\alpha D}{2e} \frac{J_k}{\tau_k} \gamma [H(x, t) - H_0(x)] - \frac{\varepsilon_{rk}(x, t)}{\tau_k} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

برای هر المان k کلونین-ویت داریم:



شکل ۲- مدل تعمیم یافته کلونین - ویت (Keramat et al., 2009)



شکل ۳- روندنمای روش تحلیل معکوس جریان گذرا

اولین نسل تا ۲ درصد در نسل انتهایی در نظر گرفته شده است. هم‌چنین معیار خاتمه ۷۰ گام انتخاب شد.

مدل سازی آزمایشگاهی ضربه قوچ

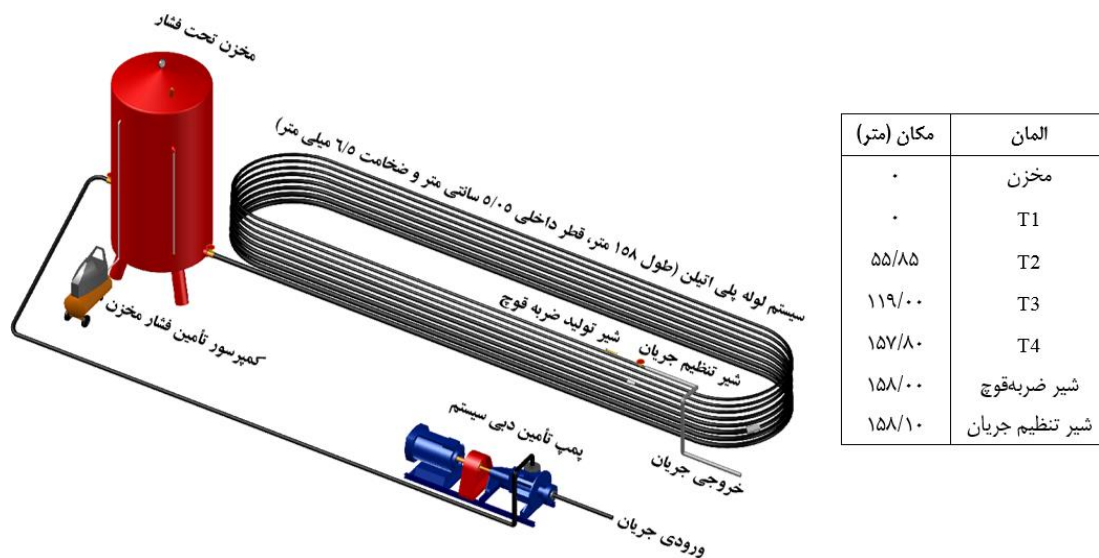
اکثر تحقیقات قبلی محققان به صورت عددی و یا در سیستم‌های لوله الاستیک صورت گرفته است. لذا با توجه به هدف این تحقیق برای کالیبراسیون ضرایب مجهول مدل از یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. مدل حاضر مرکب از یک مخزن تحت فشار، لوله‌های از جنس پلی اتیلن استاندارد PE100 با طول، قطر داخلی و ضخامت به ترتیب 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.

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

$$Min_p OF(p) = \frac{\sum_{i=1}^M [q_i^* - q_i(p)]^2}{M} \quad (19)$$

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 نمونه برداری فشار می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در مدل حل معکوس، مقادیر فشار در پشت شیر تولید ضربه قوچ 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 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 به‌عنوان جمعیت اولیه و ۸۰ کروموزوم به‌عنوان جمعیت نسل‌های تکاملی استفاده شده است. تبادل ژنی به صورت یکنواخت و جهش ژنی به صورت خطی از ۵ درصد در



شکل ۴- شماتیک مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

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 شده اند. شرایط مرزی مانند مانور شیر تولید جریان گذرا و فشار مخزن هوا به طور مستقیم در سیگنال فشار اندازه گیری شده اند. چالش اصلی تمایز اثرات افت غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله در لوله های پلیمری است. این موضوع بر کالیبراسیون سرعت موج، تابع خزش و اصطکاک غیرماندگار تأثیر می گذارد. حل کننده معکوس جریان گذرا (ITS) با رویکردهای مختلفی برای تخمین این پارامترها به کار برده شده است.

در ابتدا ساده ترین پارامترها شامل اصطکاک ماندگار و شرایط مرزی، برآورد شدند. برای کالیبراسیون پارامترهای سرعت موج، اصطکاک غیرماندگار و خزش، که دارای هم پوشانی اثرات هستند، سه رویکرد مختلف استفاده شد. در دو روش اول مدل تنها با لحاظ کردن یکی از دو پدیده دینامیکی اصطکاک غیرماندگار یا اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله ارزیابی شد. در نهایت، مدل جریان گذرا با وجود هم زمان 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 لوله های پلاستیکی دارای اهمیت فراوان می باشد) و همچنین اصطکاک سیال و اثرات اینرسی ناشی از معکوس شدن پروفیل سرعت قابل اغماض است. در نتیجه، برخلاف آن چه در ابتدا توسط Liggett and Chen (1994) پیشنهاد شده بود، حداقل بر اساس دانش، وسایل نرم افزاری و تجهیزات اندازه گیری فعلی، اصطکاک غیرماندگار را نمی توان

این فشارسنجها توسط سیم های 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) نصب شده روی لوله خروجی استفاده شده است. همچنین برای تولید جریان گذرا از یک شیر ربع گرد (Ball Valve) استفاده شده است. این نوع شیر مجهز به یک زمان سنج بوده که زمان بستن و باز شدن آن را نشان می دهد.

نتایج و بحث

در این قسمت مدل هیدرولیکی توسعه داده شده با استفاده از اطلاعات اندازه گیری شده ی مدل فیزیکی، کالیبره و صحت سنجی می شود. با این حال، زمانی که از اطلاعات فیزیکی استفاده می کنیم، برای این که هر پدیده کاملاً درک و توصیف شود، تنها روش عددی تخمین هر پارامتر، جدا کردن اثرات آن از دیگر پدیده ها می باشد. به صورت ایده آل این پارامترها با استفاده از اطلاعات جریان گذرا (حل معکوس) به صورت هم زمان تخمین زده خواهند شد.

ادعا شده است که این موضوع یکی از مزایای عمده روش تحلیل معکوس جریان گذرا می باشد (Liggett and Chen, 1994). این موضوع چند دلیل مختلف دارد. اولاً، اثرات چند پارامتر بر پاسخ فشاری جریان گذرا دارای هم پوشانی می باشند. یک مثال نمونه اصطکاک سیال و رفتار ویسکوالاستیک دیواره لوله می باشد که باعث میرایی و پخش (تغییر فاز) موج فشاری گذرا در لوله های پلاستیکی می شوند. دوماً، حل کننده جریان گذرا حساسیت های مختلفی نسبت به هر پارامتر دارد. در نهایت، وجود عدم قطعیت در فرضیات مدل

در این روابط $Re = VD/\nu$ عدد بدون بعد رینولدز، V سرعت متوسط جریان و ν 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 گذارا خواهند شد.

الف) مدل سازی بر اساس اصطکاک غیرماندگار

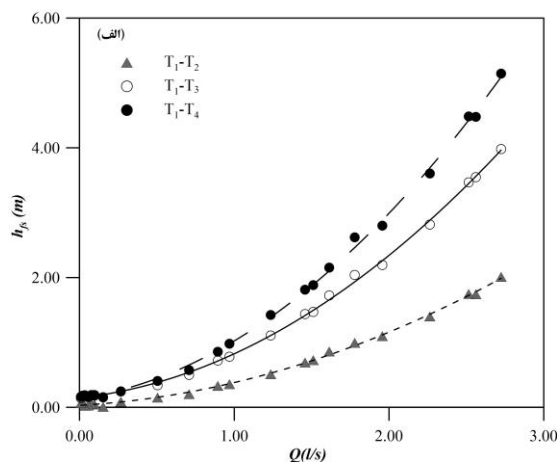
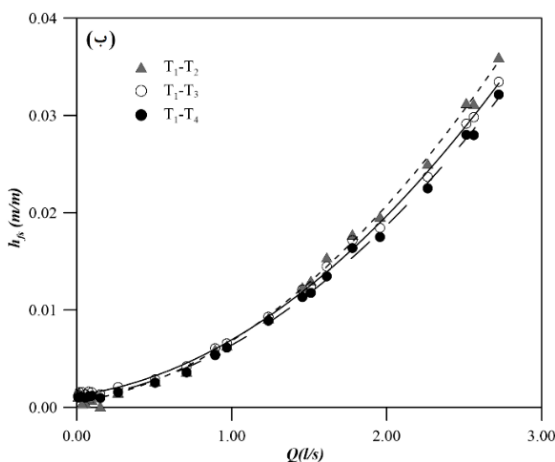
برای شناخت اثرات اینرسی سیال روی نوسانات فشار جریان گذرا و استنحی ضریب افت اصطکاک غیرماندگار، ابتدا فرض می‌شود که صرفاً این عوامل بر روی افت فشار جریان گذرا نقش داشته و اثرات ویسکوالاستیسیته دیواره لوله نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین از مدل ریاضی جریان گذرای الاستیک خطی با مشارکت اثرات اصطکاک غیرماندگار 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.

بر اساس جریان گذرا کالیبره کرد. بنابراین، ضریب اصطکاک ماندگار باید بر اساس 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 $\pm 15\%$) محاسبه کرد (Streeter, 1971; White, 1999). در ناحیه بحرانی ($2000 \leq Re \leq 4000$)، ضریب اصطکاک قابل اعتمادی وجود ندارد؛ بنابراین، برای پیوستگی تابع اصطکاک، یک رابطه خطی تعریف شده است (Axworthy, 1997).

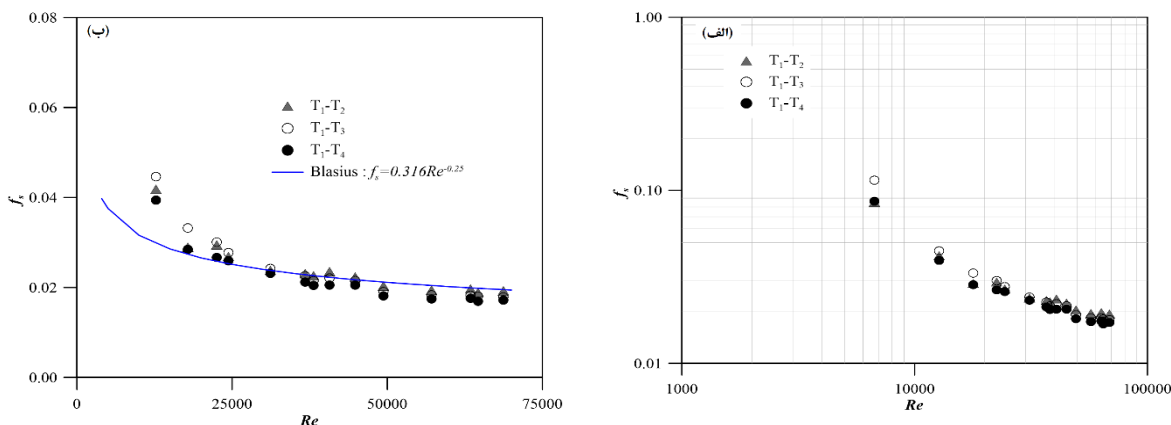
اطلاعات جریان دائمی شامل دبی جریان Q و ارتفاع پیرومتریکی H ، برای تخمین فاکتور اصطکاک ماندگار f_s استفاده شد. افت ارتفاعی کل ΔH و افت ارتفاعی واحد طول h_{fs} (یعنی $\Delta H/L$)، بر اساس اطلاعات فشار پیرومتریکی بین انتهای بالادست (فشارسنج T_1) و دیگر مکان‌های اندازه‌گیری (فشارسنج T_i)، در شکل (۵) ارائه 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 این که 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 $4000 < Re < 10^5$ ، رابطه بین فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز را به صورت رابطه (۲۰) ارائه داد (White, 1999).

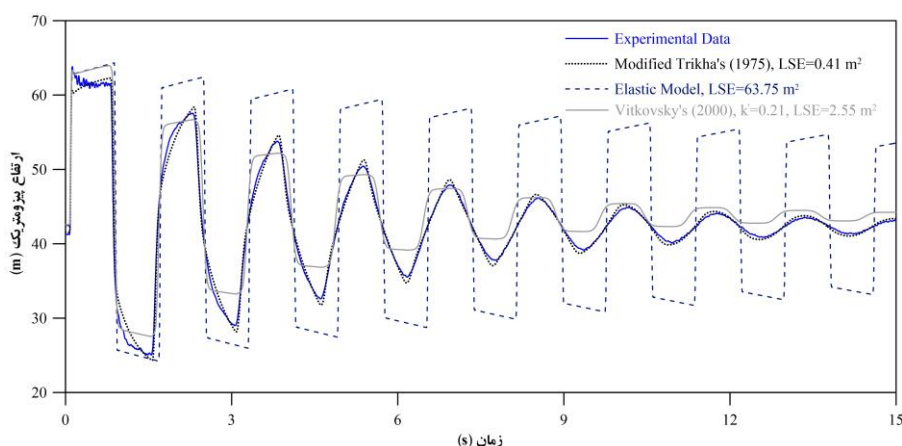
$$f_s = 0.316Re^{-0.25} \quad (20)$$



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



شکل ۶- 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

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 کلون-ویت) با کمینه کردن اختلاف مربعات بین ارتفاع هد پیزومتریک محاسباتی و اندازه‌گیری شده 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

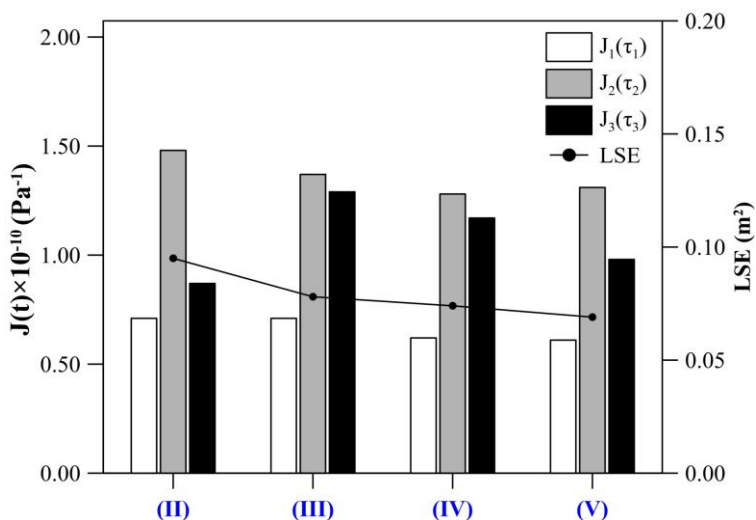
مطابق شکل (۷) حل کلاسیک ضربه قوچ (افت ماندگار) به وضوح دارای اختلافی چشمگیر با داده‌های آزمایشگاهی است و با گذشت زمان در دوره‌های بعدی نوسان، این اختلاف بیشتر نیز می‌شود. با لحاظ کردن اثر افت غیرماندگار در مدل عددی، نتایج اندکی بهبود یافته است. با انجام عملیات واسنجی، مقدار ضریب افت واسنجی شده برابر با $k = 0.19$ به دست 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 حل‌کننده‌های 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.

از طرفی مطابق شکل (۱۱) که در آن با استفاده از تبدیل فوریه سریع (Fast Fourier Transform) پاسخ سیستم در حوزه فرکانس استخراج شده است، اضافه کردن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله به تنهایی قادر به شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های پلیمری بوده و دامنه و فاز موج با این مدل با دقت مناسبی مدل‌سازی شده است.

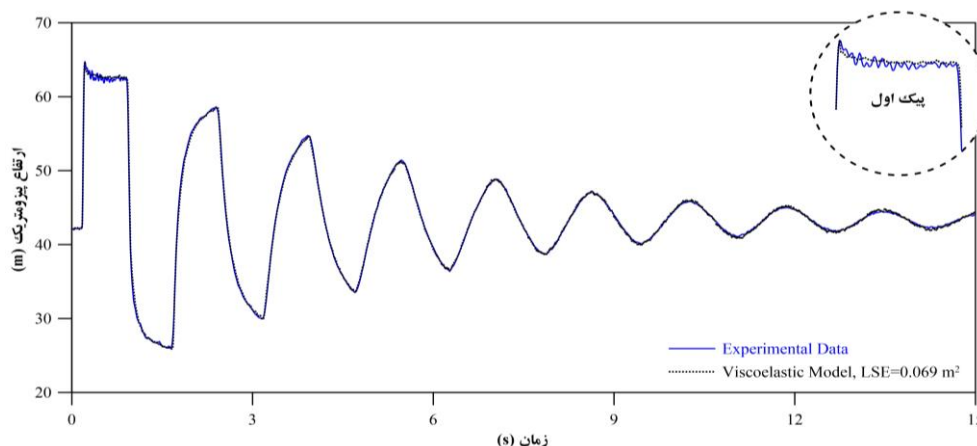
بارگذاری دارای تحذب و بر عکس آن در فاز باربرداری دارای تععر است (شکل‌های ۹ و ۱۰). این رفتار با تضعیف نوسانات و تأخیر زمانی موج فشاری، به‌طور قابل توجهی بر پاسخ فشاری سیستم در جریان گذرا، تأثیر می‌گذارد.

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

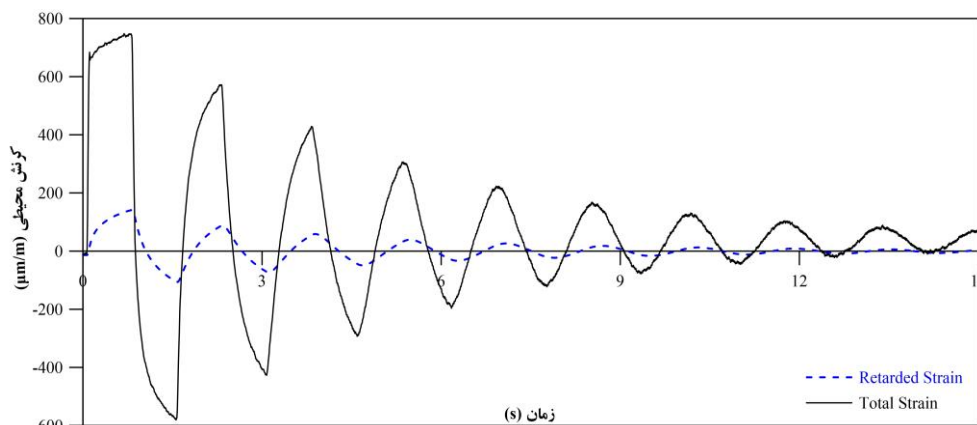
LSE	ضرایب خزش (Pa^{-1})			زمان‌های تأخیر (s)			a (m/s)	N_{KV} (-)	Q (L/s)	مدل
	$J_3 \times 10^{-9}$	$J_2 \times 10^{-9}$	$J_1 \times 10^{-9}$	τ_3	τ_2	τ_1				
۶۳/۷۴۷			مدل الاستیک				۳۹۲/۰۹	-		I
۰/۰۹۵	۰/۸۷	۱/۴۸	۰/۷۱	۱۰	۰/۵	۰/۰۵	۴۲۱/۷۴	۳		II
۰/۰۷۸	۱/۴۹	۱/۳۷	۰/۷۱	۱۰	۰/۵	۰/۰۶۷	۴۲۰/۰۵	۳	۱/۰۲	III
۰/۰۷۴	۱/۱۷	۱/۲۸	۰/۶۲	۸/۱۲۰	۰/۴۲۲	۰/۰۶۵	۴۱۹/۲۷	۳		IV
۰/۰۶۹	۰/۹۸	۱/۳۱	۰/۶۱	۸	۰/۴	۰/۰۵۷	۴۲۰/۵۲	۳		V



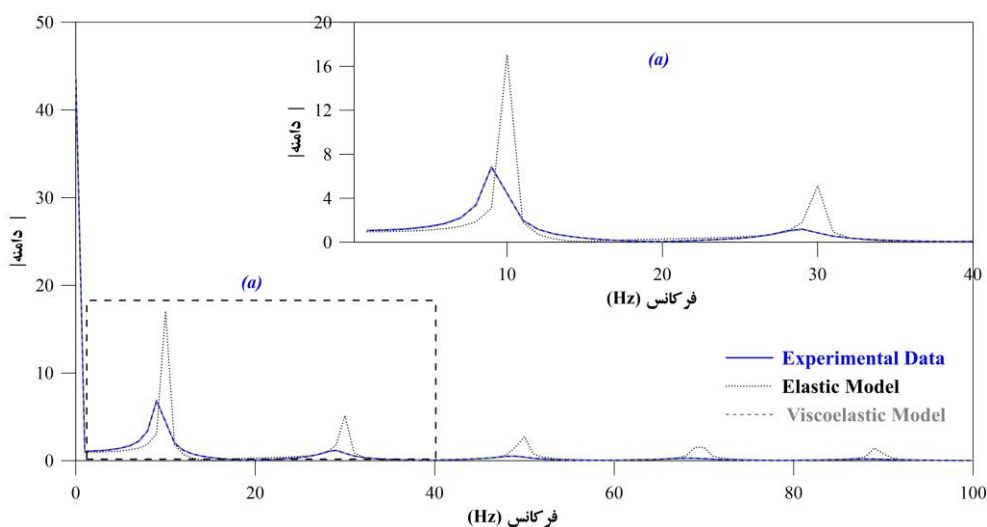
شکل ۸- نمایش مقادیر ضرایب خزش در مدل‌های مختلف



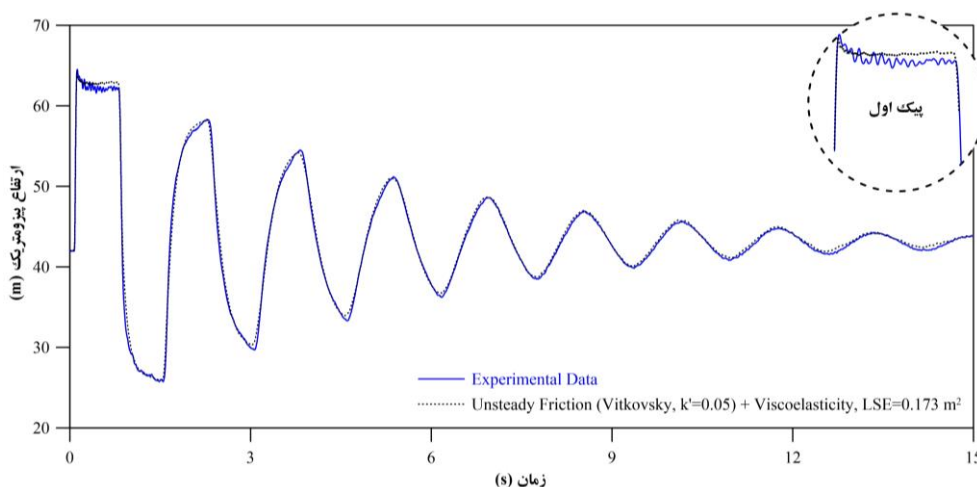
شکل ۹- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی با لحاظ اثر ویسکوالاستیک در مدل عددی



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



شکل ۱۱- مقایسه پاسخ سیستم در مدل هایی هیدرولیکی مختلف در حوزه فرکانس



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

ژنتیک برای کمینه کردن 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 تخمین زده 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 به صورت هم‌زمان، نشان می‌دهد که اثرات ویسکوالاستیک جداره لوله عامل غالب بوده و تنها با همین اثر می‌توان نتایج رضایت‌بخشی به دست آورد.

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 $k' = 0.082$ به دست 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

منابع

- 1- Aklonis, J.J., MacKnight, W.J. and Shen, M., 1972. Introduction to Polymer Viscoelasticity. John Wiley & Sons, Inc., New York. 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 Conference, 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 Division, 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 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*.
- 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 Division, 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.