



# بررسی اثر لوله پلی اتیلنی موضعی در سیستم انتقال آب با خط لوله فولادی بر روی پدیده ضربه قوچ

محمد درویش دماوندی<sup>۱</sup>، حسن رحیمزاده<sup>۲\*</sup>، علیرضا ریاسی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران

۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، rahimzad@aut.ac.ir

**چکیده-** در این مقاله در سیستم‌های انتقال آب، با قرار دادن لوله پلی اتیلنی در بین خط لوله فولادی، جریان گذرای ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر مطالعه می‌شود. حل عددی معادلات هیدرولیکی جریان با استفاده از روش مشخصه‌ها و با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک برای لوله پلی اتیلنی، خاصیت الاستیک برای لوله فولادی و همچنین شرایط مرزی در محل تقاطع لوله‌ها، ارائه می‌شود. با تغییر طول، محل نصب لوله پلی اتیلنی موضعی و دبی جریان، تأثیر این پارامترها بر جریان گذرا درون خط لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد. با مقایسه جریان گذرا در سیستم خط لوله مرکب از لوله‌های فولادی و پلی اتیلنی با سیستمی که تنها از خط لوله پلی اتیلنی ساخته شده است، امکان‌سنجی استفاده از لوله‌های پلی اتیلنی به صورت موضعی از لحاظ ویژگی کاهندگی موج فشار، بررسی می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** تداخل امواج، جریان گذرا، لوله پلی اتیلنی، موج فشار، ویسکوالاستیک

## The influence of local polyethylene pipe in a steel pipeline system on water hammer phenomenon

M. Darvish Damavandi<sup>1</sup>, H. Rahimzadeh<sup>2\*</sup>, A. Riasi<sup>3</sup>

1. MSc. in Mech. Eng., Dept. of Mech. Eng., Amirkabir Univ. of Tech., Tehran, Iran

2. Prof. of Mech. Eng., Dept. of Mech. Eng., Amirkabir Univ. of Tech., Tehran, Iran

3. Assist. Prof. of Mech. Eng., Dept. of Mech. Eng., Tehran Univ., Tehran, Iran

\* P.O.B. 15875- 4413, Tehran, Iran. rahimzad@aut.ac.ir

**Abstract-** This note presents a theoretical analysis and numerical simulation of hydraulic transients in pressurized pipeline system made of a local polyethylene pipe-wall located at a steel pipeline system. The continuity and momentum equations are solved by the method of characteristic (MOC) taking into account the viscoelastic effect of the pipe-wall for polyethylene pipe. The polyethylene pipe length and location at the pipeline and the discharge flow rate are changed and their influence on transient flow is investigated. By comparing this pipeline system with one that is made of polyethylene pipe totally, the possibility of using local polyethylene pipe due to its effect on the pressure wave is investigated.

**Keywords:** Transient Flow, Polyethylene Pipe, Pressure Wave, Viscoelasticity, Wave Interaction.

ناگهانی شیر و یا انسداد ناگهانی خط لوله به هر دلیلی و یا از کار افتادن پمپ باشد. با وقوع پدیده ضربه قوچ، امواج فشاری در محل انسداد بوجود آمده و در سرتاسر خط لوله شروع به انتشار می‌کنند. این امواج فشاری اگر به گونه‌ای مهار نشوند، می‌توانند

### ۱- مقدمه

پدیده ضربه قوچ یا همان چکش‌آبی در خطوط لوله جریان تحت فشار به واسطه تغییر ناگهانی سرعت جریان آب اتفاق می‌افتد. این تغییر سرعت جریان می‌تواند به دلیل بسته شدن

کرامت [۱۱] با در نظر گرفتن اینکه خط لوله بتواند در هنگام پدیده ضربه قوچ به طور محوری جابه‌جا شود، ترکیب اثر پدیده تداخل سیال با جامد را با اثر ویسکوالاستیک لوله بررسی کرد. سوارس [۱۲] با در نظر گرفتن جریان گذرای سریع در لوله‌های با خاصیت ویسکوالاستیک، به بررسی پدیده کاویتاسیون در این لوله‌ها پرداخت.

در سیستم‌های انتقال آب خانگی و صنعتی در برخی موارد لازم است که در یک سیستم خط لوله فولادی برای اتصال دو بخش لوله، از یک تکه لوله پلی اتیلنی استفاده شود. در این مقاله اثر قرارگیری لوله پلی اتیلنی محلی در خط لوله فولادی بر روی جریان گذرای ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر، بررسی می‌شود.

## ۲- معادلات حاکم با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک لوله

لوله‌های پلی اتیلن رفتار ذاتی متفاوتی نسبت به لوله‌های فولادی دارند. هنگامی که این لوله‌ها تحت تأثیر تنش لحظه‌ای  $\sigma$  قرار می‌گیرند، رفتاری مطابق قانون هوک از خود نشان نمی‌دهند. لوله‌های ویسکوالاستیک در برابر نیروی خارجی دارای یک پاسخ الاستیک ناگهانی و یک پاسخ ویسکوز می‌باشند که پاسخ ویسکوز آنها تابعی از زمان می‌باشد. بنابراین کرنش لوله می‌تواند به دو کرنش لحظه‌ای الاستیک  $\epsilon_e$  و کرنش واماکنده  $\epsilon_r$  مطابق معادله (۱) تقسیم شود.

$$\epsilon(t) = \epsilon_e + \epsilon_r(t) \quad (1)$$

مطابق با قانون بر هم نهش بولتزمن برای کرنش‌های کوچک، هر کدام از تنش‌های وارد بر جسم می‌تواند به طور جداگانه بررسی شود و کرنش ناشی از هر کدام محاسبه شده و در نهایت مطابق معادله (۲) با هم جمع شوند.

$$\epsilon(t) = J_0 \sigma(t) + \int_0^t \sigma(t-t') \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt' \quad (2)$$

$J_0$  ضریب خزش لحظه‌ای و  $J(t')$  تابع خزش در زمان  $t'$  است.  $J_0$  در موادی با خاصیت الاستیک خطی برابر معکوس مدول الاستیسیته ماده می‌باشد. تابع  $J(t)$  که رفتار ویسکوالاستیک لوله را تعیین می‌کند از طریق روش‌های آزمایشگاهی قابل تعیین می‌باشد. به منظور ارائه یک رابطه تحلیلی برای تابع  $J(t)$ ، از مدل مکانیکی کلون-ویگت<sup>۱</sup>

موجب بوجود آمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیری شوند. بیشتر تحلیل‌هایی که بر روی جریان‌های گذرا انجام می‌شود با در نظر گرفتن نظریه الاستیک خطی برای تحلیل رفتار دیواره لوله می‌باشد. این نظریه معمولاً برای تحلیل رفتار لوله‌های فلزی و بتنی صحیح است. در لوله‌های پلیمری، به خصوص لوله‌های پلی اتیلنی که امروزه در صنایع توزیع آب استفاده زیادی از آنها می‌شود، رفتار جریان گذرا متفاوت از این رفتار در لوله‌های فلزی می‌باشد. رفتار ویسکوالاستیک این لوله‌ها سبب کم شدن نوسانات فشار و افزایش پراکندگی این نوسانات می‌شود. مطالعات و تحقیقات عددی و آزمایشگاهی نسبتاً زیادی به منظور تحلیل رفتار ویسکوالاستیک مواد پلیمری در جریان‌های گذرا انجام گرفته است. گالی [۱] و گونی [۲] با بکار بردن مدل مکانیکی کلون-ویگت، رفتار لوله‌های پلیمری را تحلیل کرده و نتایج عددی و آزمایشگاهی به دست آمده را مقایسه کردند. ریتورد [۳] با اعمال تبدیل لاپلاس-کارسون، روشی برای مطالعه جریان‌های آرام گذرا در لوله‌های با جنس ویسکوالاستیک خطی ارائه کرد.

پزینگا [۴] به منظور میرا کردن نوسانات فشار ناشی از بکار افتادن و از کار افتادن ناگهانی پمپ، لوله پلی اتیلنی به طول مشخص را در پایین دست یک پمپ قرار داد و با انجام آزمایش‌های مربوطه نتایج آن را با نتایج به دست آمده از محاسبات تئوری مقایسه کرد. کواس [۵،۶] به طور آزمایشگاهی و عددی به بررسی خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌های پلی اتیلنی پرداخت. او با بکار بردن نظریه الاستیک خطی و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از نظریه ویسکوالاستیک خطی دریافت که خاصیت ویسکوالاستیک سبب میرا شدن موج‌های فشار و پراکندگی آنها می‌شود. استیفنز [۷] با انجام آزمایش‌هایی بر روی لوله‌های فولادی و بتنی که در داخل خاک محصور شده‌اند، دریافت که به دلیل تداخل دینامیکی این لوله‌ها با خاک در این شرایط، از آنها خاصیت ویسکوالاستیک مشاهده می‌شود. دووان [۸] به منظور برطرف کردن برخی تناقضات که در نتایج کواس وجود داشت، یک مدل دو بعدی برای محاسبه اثر اصطکاک غیر دائم بین دیواره و سیال در جریان گذرا ارائه داد. پرک [۹،۱۰] انتشار امواج فشاری در خط لوله را به صورت تابعی از فرکانس‌های مختلف مورد مطالعه قرار داد و در این راستا از تئوری امواج ضربه‌ای و توابع انتقال استفاده کرد.

1. Kelvin-Voigt

### ۳- حل عددی معادلات

برای حل معادلات هیدرولیکی جریان گذرا، از روش مشخصه‌ها<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. با اعمال این روش حل، ترکیب معادلات پیوستگی و ممنتوم به ترتیب معادله (۶) و (۷) خواهد بود (کواس [۶]).

$$C^+ : \frac{dH}{dt} + \frac{a_0}{gS} \frac{dQ}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DS^2} \frac{a_0}{g} + \frac{2a_0^2}{g} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

$$C^- : \frac{dH}{dt} - \frac{a_0}{gS} \frac{dQ}{dt} - \frac{fQ|Q|}{2DS^2} \frac{a_0}{g} + \frac{2a_0^2}{g} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$C^+$  و  $C^-$  به ترتیب بیانگر خطوط مشخصه‌های  $dx/dt = a_0$  و  $dx/dt = -a_0$  بوده و هر کدام از معادلات (۶) و (۷) در راستای خطوط مشخصه مربوطه، معتبر می‌باشند. با انتگرال‌گیری از معادلات (۶) و (۷) در راستای خطوط مشخصه‌شان معادلات (۸) و (۹) به دست می‌آیند.

$$H_p - H_A + B(Q_p - Q_A) + RQ_A|Q_A| + \frac{2a_0^2}{g} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$H_p - H_B - B(Q_p - Q_B) - RQ_B|Q_B| + \frac{2a_0^2}{g} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

در واقع با استفاده از روش مشخصه‌ها به منظور حل عددی یک بعدی معادلات هیدرولیکی جریان، خط لوله به وسیله تعداد مشخصی از نقاط به بخش‌های مختلفی تقسیم‌بندی شده و برای به دست آوردن مقدار دبی و هد سیال در هر نقطه، معادلات (۸) و (۹) برای آن نقطه حل می‌شود.

کواس [۶] ترم  $\partial \varepsilon_r / \partial t$  را با استفاده از روش‌های عددی به صورت معادله (۱۰) محاسبه کرد.

$$\frac{\partial \varepsilon_r(x, t)}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial \varepsilon_{rk}(x, t)}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{J_k}{\tau_k} F(x, t) - \frac{\tilde{\varepsilon}_{rk}(x, t)}{\tau_k} \right] \quad (10)$$

که به بسط  $\tilde{\varepsilon}_{rk}(x, t)$  و  $F(x, t)$  در تحقیق (کواس [۶]) اشاره شده است.

استفاده می‌شود. این مدل مکانیکی در شکل ۱ نمایش داده شده است. مطابق این مدل برای توصیف خاصیت الاستیک مواد ویسکوالاستیک از فنرها و برای توصیف خاصیت ویسکوز آنها از دمپرها استفاده می‌شود. رابطه ریاضی برای توصیف خاصیت ویسکوالاستیک بر اساس مدل کلین-ویگت، معادله (۳) می‌باشد (اکلونیس [۱۳]).

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^N J_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (3)$$

در رابطه ۳ مقدار  $N$  بر اساس آزمایش‌های معینی (تست‌های مکانیکی) که بر روی نمونه پلی اتیلنی مورد نظر انجام می‌شود، تعیین می‌شود. کواس [۱۴] با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک لوله، رابطه (۴) را برای معادله پیوستگی به دست آورد.

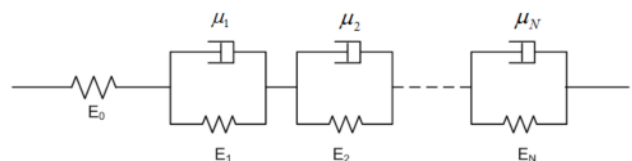
$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a_0^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a_0^2}{g} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

در این معادله ترم آخر بیانگر اثر وامانده دیواره لوله می‌باشد. همچنین  $a_0$  سرعت انتشار امواج،  $g$  شتاب گرانش،  $Q$  دبی،  $H$  هد سیال و  $S$  مساحت مقطع لوله است. کرنش الاستیک در فشار پیرومتریک و سرعت الاستیک صوت نهفته است. باید گفت خاصیت ویسکوالاستیک لوله در معادله مومنتم تأثیری ندارد. بنابراین معادله مومنتوم به شکل معادله (۵) به دست می‌آید. (چادری [۱۵]).

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gS} \frac{\partial Q}{\partial t} + h_{fs} + h_{fu} = 0 \quad (5)$$

در این معادله  $h_{fs}$  افت هد ناشی از اصطکاک دائم می‌باشد که با استفاده از رابطه داری ویسباخ ( $fV^2/2gD$ ) قابل محاسبه خواهد بود.

همچنین  $h_{fu}$  افت هد ناشی از اصطکاک غیر دائم است که در این مقاله به محاسبه آن پرداخته نمی‌شود. برای تخمین این نوع اصطکاک از روش‌های متفاوتی استفاده می‌شود که یکی از معتبرترین آنها توسط برونون [۱۶] ارائه شده است.



شکل ۱ مدل کلین-ویگت برای مدل‌سازی خاصیت ویسکوالاستیک

#### 1. Method of Characteristics

## ۴- شرایط مرزی

خط لوله در بالادست به مخزنی با هد ثابت متصل می‌باشد. به بیان دیگر سطح مقطع مخزن به میزان کافی بزرگ در نظر گرفته شده تا با باز شدن شیر پایین دست و جاری شدن آب در داخل خط لوله، تغییرات ارتفاع آب مخزن ناچیز فرض شود. لذا شرط مرزی بالادست جریان مطابق معادله (۱۳) است.

$$H_1 = H_{res} = cons. \quad (13)$$

که در آن  $H_1$  هد مربوط به نود متصل به مخزن است. در این صورت تنها دبی جریان در این نقطه مجهول خواهد بود که با استفاده از معادله (۹) به دست می‌آید. در پایین دست جریان، خط لوله به شیر تویی<sup>۱</sup> متصل می‌باشد. با بسته شدن ناگهانی این شیر جریان گذرا در خط لوله بوجود آمده و سرعت متوسط جریان در پشت شیر صفر می‌شود. بنابراین شرط مرزی پایین دست مطابق معادله (۱۴) است.

$$Q_n = 0 \quad (14)$$

که  $Q_n$  دبی مربوط به نود متصل به شیر می‌باشد. در این صورت تنها هد سیال در این نقطه مجهول خواهد بود که با استفاده از معادله (۸) به دست می‌آید.

قطعه لوله پلی اتیلنی در دو مکان به خط لوله فولادی متصل می‌شود که با در نظر گرفتن جریان یک بعدی، هر یک از محل تقاطع لوله‌ها را می‌توان به عنوان یک نقطه در نظر گرفت. این دو نقطه شرایط مرزی داخلی را برای مسأله مورد نظر بوجود می‌آورند. برای محاسبه دبی و هد سیال در این نقاط نیز مانند نقاط غیر مرزی، می‌توان معادلات (۸) و (۹) را برای آنها نوشت. با این تفاوت که برای نقاط غیر مرزی در هر دو طرف نقطه مورد نظر جنس لوله یکسان می‌باشد اما برای نقطه مرزی بین دو لوله، جنس لوله‌ها در دو طرف نقطه مورد نظر متفاوت می‌باشد. با توجه به شکل ۳ برای مفصل سمت راست که در سمت راست آن لوله فولادی و سمت چپ آن لوله پلی اتیلنی قرار دارد، معادله (۹) با صرف نظر از ترم ویسکوالاستیک (ترم آخر) و معادله (۸) با در نظر گرفتن این ترم نوشته می‌شود. همچنین برای مفصل سمت چپ، معادله (۹) با در نظر گرفتن ترم ویسکوالاستیک و معادله (۸) با صرف نظر از ترم ویسکوالاستیک نوشته می‌شود. علاوه بر این در هر کدام از این معادلات بسته به اینکه کدام جنس لوله در هر طرف نقطه

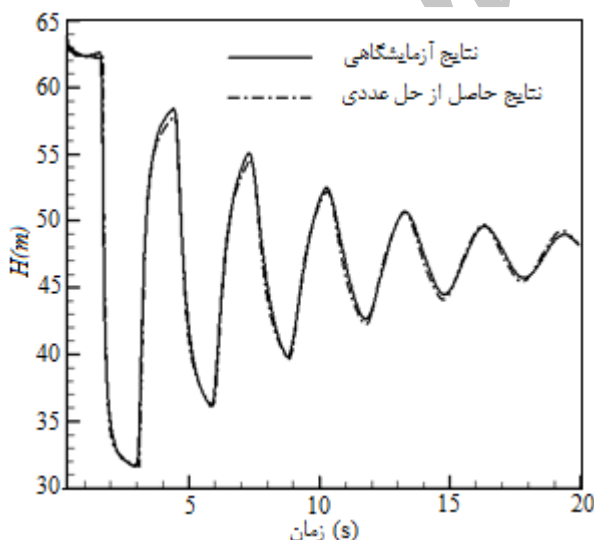
تقاطع قرار گرفته باشد، پارامتر  $B$  در معادلات (۸) و (۹) که وابسته به سرعت موج در لوله می‌باشد، مشخص می‌شود.

۵- اعتبارسنجی<sup>۲</sup>

نتایج عددی برای جریان گذرای ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر در خط لوله پلی اتیلنی با نتایج آزمایشگاهی کواس اعتبارسنجی شد. به این منظور نتایج به دست آمده با استفاده از کدهای استفاده شده در این مقاله و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط کواس برای هد فشاری در پایین دست جریان پشت شیر، در شکل ۲ نشان داده شده است.

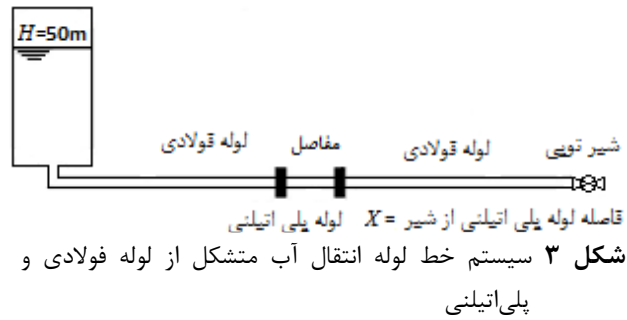
## ۶- بحث و نتایج

سیستم هیدرولیکی مورد مطالعه در این تحقیق (شکل ۳) شامل یک خط لوله فولادی می‌باشد که در بالادست به یک مخزن هد ثابت و در پایین دست جریان به یک شیر تویی متصل می‌باشد. بخشی از لوله فولادی از خط لوله جدا شده و به جای آن لوله پلی اتیلنی قرار داده می‌شود. با تغییر دادن طول لوله پلی اتیلنی و همچنین جابجایی در طول خط لوله، تأثیرات آن بر جریان گذرای ناشی از بستن ناگهانی شیر، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ویژگی‌های سیستم خط لوله و برخی پارامترهای محاسبه شده مربوطه در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی کواس و همکاران [۶] با نتایج حاصل از حل عددی معادلات جریان

اگرچه طول کل خط لوله ثابت در نظر گرفته می‌شود، اما طول لوله پلی اتیلنی در سه سیستم متفاوت خواهد بود. در این بخش برای هر سه حالت، فاصله لوله پلی اتیلنی از شیر ۱۰ متر و دبی جریان برابر ۰/۰۵۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۴ تا ۶ نتایج عددی به دست آمده مربوط به مقادیر فشار در پایین دست خط لوله را برای سه نمونه لوله پلی اتیلنی محلی با طول‌های متفاوت نمایش می‌دهد. هر چه طول تکه لوله پلی اتیلنی بیشتر باشد، سرعت موج در خط لوله کمتر شده و میرایی نوسانات فشار افزایش می‌یابد.



جدول ۱ مقادیر پارامترهای مختلف خط لوله سیستم

طول کل ضخامت لوله ضخامت لوله قطر لوله پلی قطر لوله هد مخزن	خط لوله پلی اتیلنی فولادی	لوله فولادی	پلی اتیلنی	قطر لوله فولادی	هد مخزن
$H_{res}$ (m)	$D_s$ (m)	$D_p$ (m)	$e_s$ (m)	$e_p$ (m)	$L_{tot}$ (m)
۵۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۲۲/۰۳

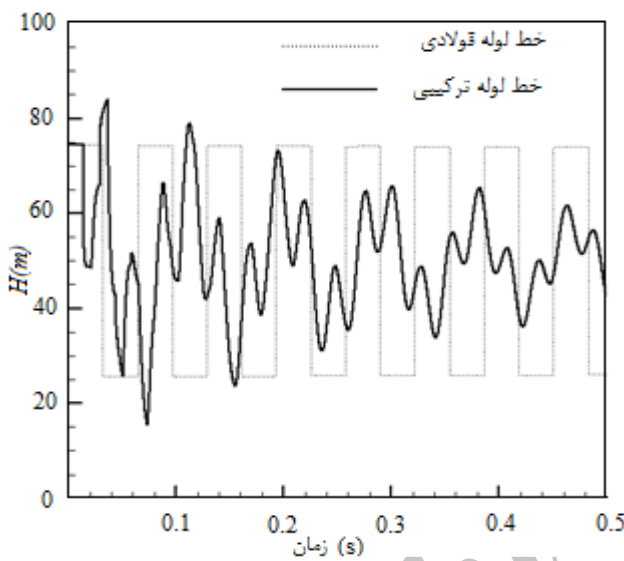
مقادیر موجود در جدول برای پارامترهای سیستم ۱ در حالت پایه می‌باشد. یعنی با تغییر پارامترهای مربوط به لوله پلی اتیلنی تأثیر آن بر جریان گذرا بررسی خواهد شد. از آنجا که ضرایب تابع خزش  $J_k$  که در معادله (۳) به آن اشاره شد تنها از طریق روش‌های آزمایشگاهی معین خواهد شد، در این مقاله از ضرایبی که توسط کواس [۶] به دست آمد استفاده می‌شود. این ضرایب در جدول ۲ آمده است.

### ۶-۱- تغییر طول لوله پلی اتیلنی

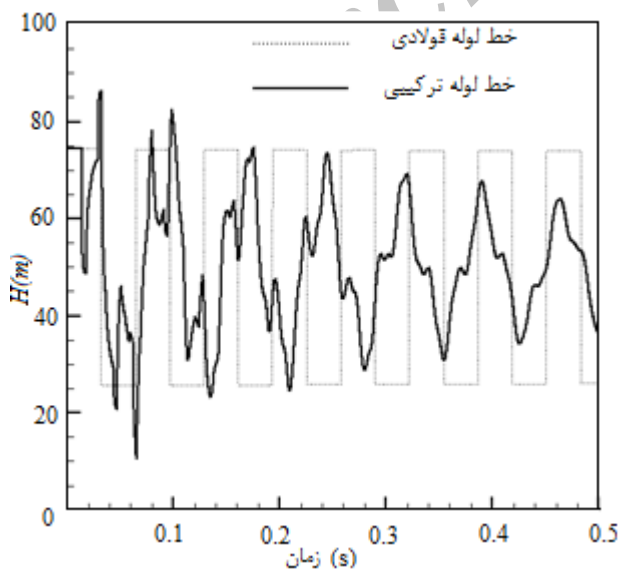
نسبت‌های متفاوت لوله پلی اتیلنی در یک سیستم خط لوله، موجب تغییر در الگوی موج فشار و سرعت انتشار آن می‌شود. از آنجا که لوله‌های پلی اتیلنی دارای خاصیت ویسکوز می‌باشند و تغییرات فشار ناگهانی را به سرعت میرا می‌کنند، استفاده از آنها به طور موضعی نیز سبب کاهش قابل توجه در سرعت و اندازه موج فشاری ناشی از جریان گذرا می‌شود. به منظور مشاهده اثر وجود لوله پلی اتیلنی و همچنین تغییر طول آن بر روی ضربه کوچ، سه سیستم با ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۱ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲ ضرایب تابع خزش کواس [۶]

$\tau_4 = 5s$	$\tau_3 = 1/5s$	$\tau_2 = 0/5s$	$\tau_1 = 0/05s$	ضرایب تابع خزش
۰/۰۲۶۱۷	۰/۰۹۰۵۱	۰/۱۰۵۴	۰/۱۰۵۷۰	$J_k (10^{-9} Pa^{-1})$



شکل ۴ هد فشار در پشت شیر در حالتی که طول لوله پلی اتیلنی موضعی ۲/۰۳ متر می‌باشد

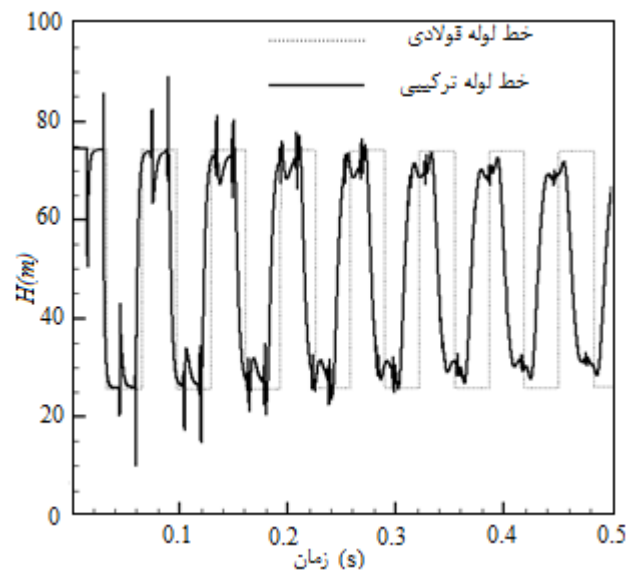


شکل ۵ هد فشار در پشت شیر در حالتی که طول لوله پلی اتیلنی موضعی ۱/۰۱۵ متر می‌باشد

فشار را به مقداری بیش از فشار متناظر با لوله فولادی می‌رساند. این جهش مربوط به بازگشت دوباره اغتشاش اول به محل تقاطع دو جنس لوله می‌باشد (این جهش‌ها ناشی از خطای محاسباتی نمی‌باشد). به بیان دیگر هنگامی که اغتشاش فشاری به محل تقاطع دو لوله باز می‌گردد، این بار دوباره لوله پلی اتیلنی به سرعت شروع به منقبض شدن می‌کند و در حین متراکم شدن فشار سیال را سریعاً افزایش می‌دهد. نکته مهم آنکه افت و خیزهای نشان داده شده در شکل‌های ۴ تا ۶ مربوط به لحظاتی است که اغتشاشات بوجود آمده در موج فشاری به پشت شیر پایین دست می‌رسند.

با توجه به شکل‌های ۴ تا ۶ مطلبی که بیان آن لازم به نظر می‌رسد تأثیرگذاری دو پارامتر تفاوت مدول الاستیسیته دو جنس لوله و خاصیت ویسکوالاستیک، در نمودار فشار حاصل از لوله‌های مرکب می‌باشد. تفاوت مدول الاستیسیته دو جنس لوله سبب ایجاد اغتشاشات در موج فشاری و افت و خیزهای ناگهانی در منحنی فشار شده که به آن اشاره شد. خاصیت ویسکوالاستیک لوله پلی اتیلنی علاوه بر میرا کردن نوسانات فشاری، تغییرات ایجاد شده به دلیل وجود اغتشاشات را آهسته می‌نماید. به بیان دیگر اگر از خاصیت ویسکوالاستیک لوله صرف نظر شود تغییرات فشار ناشی از اغتشاشات به صورت کاملاً تیز بوده و منحنی تغییرات به صورت جهش‌های مستطیلی خواهد بود.

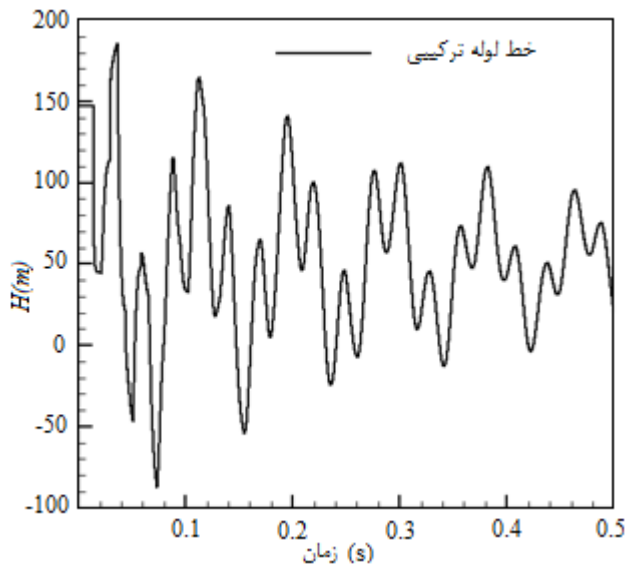
در شکل ۴ در دوره زمانی اول حرکت موج، به دلیل وجود جهش فشاری، حداکثر مقدار فشار در لوله ترکیبی بیش از حداکثر فشار در لوله فولادی شده است. البته به دلیل آنکه لوله پلی اتیلنی بکار رفته نسبت به لوله فولادی خیلی کوچک نیست، در دوره‌های تناوب بعدی هد فشاری به سرعت میرا شده و از مقدار متناظر آن در لوله‌های فولادی کمتر می‌شود. در شکل ۵ طول لوله پلی اتیلنی بکار رفته نصف مقدار مربوط به حالت قبل در نظر گرفته شده و مشاهده می‌شود که فاصله زمانی رسیدن دو اغتشاش ایجاد شده در محل‌های تقاطع دو جنس لوله به پشت شیر کاهش یافته و دره فشاری در بازه زمانی کمتری رخ داده است. همچنین فاصله زمانی بین بازگشت مجدد اغتشاش اول و موجی که از بالادست جریان به سوی پایین دست آن انعکاس داده شده است کاهش یافته و جهش دوم فشار نیز در بازه زمانی کمتری اتفاق افتاده است. در شکل ۶ به دلیل کوچک‌تر بودن لوله پلی اتیلنی بازه‌های زمانی



شکل ۶ هد فشار در پشت شیر در حالتی که طول لوله پلی اتیلنی موضعی ۰/۲۰۳ متر می‌باشد

اگرچه در خط لوله‌هایی که به‌طور کامل از لوله‌های پلی اتیلنی استفاده شده است، خاصیت ویسکوالاستیک این لوله‌ها بارهای فشاری ناشی از جریان گذرای ناگهانی بوجود آمده در سیستم را کاهش می‌دهد، اما مطابق شکل‌های ۴ تا ۶ استفاده از این لوله‌ها به‌طور محلی (موضعی) موجب ایجاد شوک‌های فشاری با فرکانس بسیار بالا می‌شود. تشکیل این شوک‌ها به دلیل تداخل دینامیکی بین جریان سیال و قابلیت انبساط دیواره لوله می‌باشد. در واقع هنگامی که موج فشار به محل تقاطع لوله فولادی با لوله پلی اتیلنی می‌رسد، به دلیل کمتر بودن مدول الاستیسیته لوله پلی اتیلنی نسبت به لوله فلزی و انبساط لحظه ای لوله پلی اتیلنی، یک کاهش ناگهانی با فرکانس بالا (دره فشار) در موج فشاری اتفاق می‌افتد. در این لحظه موج به حرکت در مسیر اولیه خود به سمت بالادست جریان ادامه می‌دهد، اما اغتشاش ایجاد شده در موج فشاری به سمت شیر پایین دست جریان منعکس می‌شود. موج در مسیر خود به سمت بالادست جریان به محل تقاطع دوم بین دو جنس مختلف لوله می‌رسد. در این هنگام به دلیل ورود موج از لوله پلی اتیلنی به لوله فولادی، اغتشاش جدیدی در موج که به صورت افزایش ناگهانی فشار می‌باشد، بوجود می‌آید. این اغتشاش جدید نیز از محل تقاطع دو لوله به سمت پایین دست جریان بازتاب داده می‌شود. با دقت در شکل‌های ۴ تا ۶ دو جهش پس از افت ناگهانی فشار مشاهده می‌شود. جهش دوم

مورد اشاره به میزان قابل توجهی کاهش یافته، طوری که قله فشار به صورت یک خط به نظر می‌رسد. همچنین خاصیت ویسکوالاستیک لوله به میزان کمتری خود را نشان داده و در پریودهای بعدی نوسانات، میرایی مربوط به خاصیت ویسکوالاستیک لوله اندک می‌باشد. بنابراین اگرچه خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌های پلی اتیلنی موج فشار ناشی از جریان گذرا را در خط لوله کاهش می‌دهد، اما بکار بردن این لوله‌ها به صورت موضعی به همراه لوله‌های فولادی جهش‌های ناگهانی در موج فشاری پدید آورده و امکان آسیب زدن به سیستم را افزایش می‌دهد.



شکل ۸ هد فشار در پشت شیر وقتی دبی جریان ۰/۲۲ لیتر بر ثانیه باشد

مقایسه نحوه تغییرات نمودارها نشان می‌دهد با تغییر دبی جریان، نحوه تغییر منحنی فشار تغییر خاصی نکرده است بلکه تنها مقدار آن بزرگتر شده است؛ به نحوی می‌توان گفت که با مقیاس مشخصی تنها تغییر اندازه داده است. پس تغییرات دبی جریان بر روی رفتار لوله پلی اتیلنی موضعی در ضربه قوچ، تأثیر قابل توجهی نمی‌گذارد بلکه تنها موج فشاری با مقیاس مشخصی تغییر اندازه می‌دهد.

#### ۲-۶- تغییر موقعیت لوله پلی اتیلنی

در این بخش اثر محل قرارگیری لوله پلی اتیلنی در سیستم خط لوله بررسی می‌شود. به بیان دیگر لوله پلی اتیلنی هر بار در یک فاصله مشخص از شیر پایین دست جریان به لوله فولادی متصل شده و اثر آن بر جریان گذرا بررسی می‌شود.

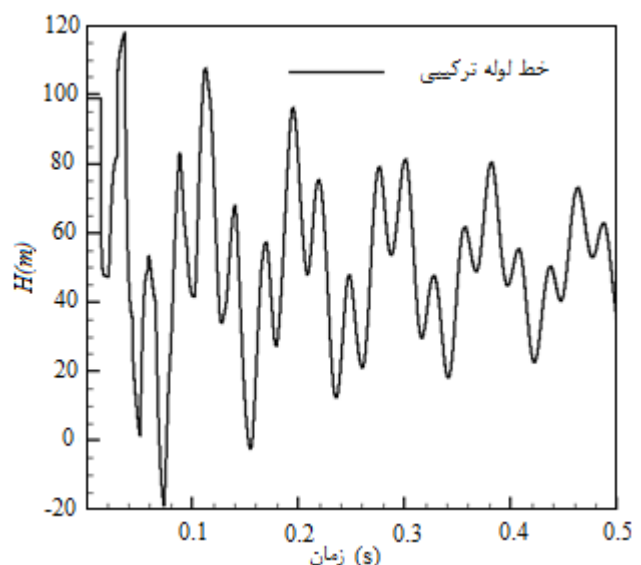
به این منظور سه سیستم با لوله پلی اتیلنی موضعی به طول ۲/۰۳ متر و دبی جریان برابر ۰/۰۵۵ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که در هر کدام از این سیستم‌ها، لوله پلی اتیلنی در فاصله مشخصی از شیر پایین دست جریان قرار دارد.

از آنجا که با هر بار عبور موج فشاری از محل‌های تقاطع دو جنس لوله ( فولادی و پلی اتیلنی) اغتشاش جدیدی در موج

در پدیده ضربه قوچ تغییرات هد ایجاد شده در خط لوله با تغییرات سرعت سیال نسبت مستقیم دارد. از این رو به هنگام بسته شدن ناگهانی شیر هر چه دبی جریان در شرایط دائم بیشتر باشد، موج فشار بوجود آمده بزرگ‌تر و مخرب‌تر خواهد بود. به منظور بررسی تغییر رفتار لوله موضعی پلی اتیلنی در پدیده ضربه قوچ در دبی‌های مختلف، سیستمی با لوله پلی اتیلنی موضعی به طول ۲/۰۳ متر و فاصله از شیر پایین دست برابر ۱۰ متر در نظر گرفته می‌شود. نتایج برای جریان با دبی‌های جدید در شکل‌های ۷ و ۸ ترسیم شده است.

#### ۲-۶- تغییر دبی جریان در حالت دائم

شکل ۷ هد فشار در پشت شیر وقتی دبی جریان ۰/۱۱ لیتر بر ثانیه باشد



شکل ۷ هد فشار در پشت شیر وقتی دبی جریان ۰/۱۱ لیتر بر ثانیه باشد

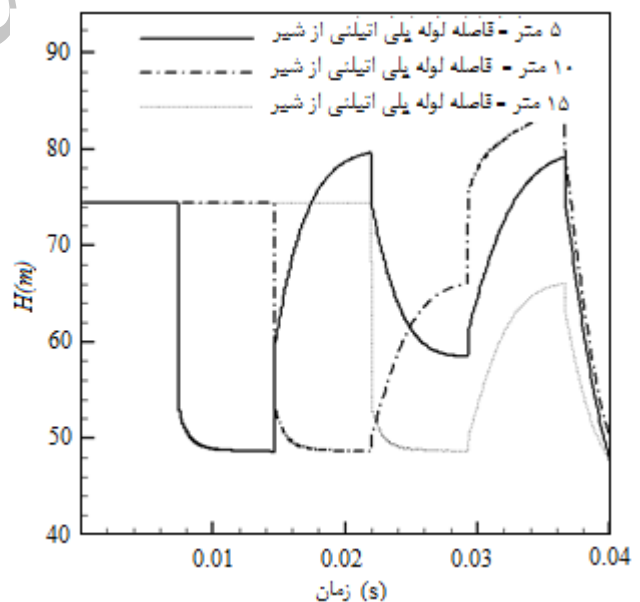
با مقایسه شکل‌های ۷، ۴ و ۸ که به ترتیب مربوط به دبی‌های

موج فشار و پراکندگی آن می‌شود، اما با اتصال این لوله به خط لوله فولادی، افت و خیزهای ناگهانی با فرکانس بالا در موج فشاری مشاهده می‌شود. علت بوجود آمدن این پدیده، انبساط و تراکم ناگهانی لوله پلی اتیلنی و همچنین تغییر سرعت موج هنگام رسیدن موج فشاری به محل تقاطع دو لوله است. بنابراین اگرچه استفاده از خط لوله‌هایی که به‌طور کامل از پلی اتیلن ساخته شده است، موج‌های فشاری ناشی از پدیده ضربه قوچ را می‌کند، اما بکار بردن آنها به‌صورت ترکیبی با لوله‌های فولادی، موجب بوجود آمدن افزایش فشار ناگهانی در سیستم شده و امکان آسیب رساندن به تاسیسات را بالا می‌برد. افزایش طول لوله پلی اتیلنی بکار رفته در سیستم خط لوله فولادی موجب افزایش تأثیرگذاری خاصیت ویسکوالاستیک آن بر جریان گذرا شده و میرایی بیشتری در موج فشار بوجود می‌آید. علاوه بر این در این مقاله نشان داده شد که تغییر دبی جریان در حالت دائم، بر روی رفتار لوله پلی اتیلنی محلی در جریان گذرای ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر، تأثیر ندارد. همچنین با قرار دادن لوله پلی اتیلنی در مکان‌های مختلف، تأثیر محل نصب تکه لوله پلی اتیلنی بر جریان گذرا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حل عددی معادلات نشان می‌دهد برهم‌نهی سازنده و یا غیر سازنده اغتشاشات بوجود آمده بواسطه عبور مکرر موج فشار از محل تقاطع لوله‌ها تأثیر بسزایی در میزان افت و خیزهای ناگهانی فشار در خط لوله دارد.

## ۸- مراجع

- [1] Gally M., Guney M.S., Rieutord E., "An Investigation of Pressure Transients in Viscoelastic Pipes", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 101, 1979, pp. 495-499.
- [2] Guney M.S., "Waterhammer in Viscoelastic Pipes Where Cross-Section Parameters Are Time Dependent", *4<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges*, England, 1983.
- [3] Rieutord E., "Transient Response of Fluid Viscoelastic Lines", *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 104, 1982, pp. 335-341.
- [4] Pezzinga G., "Unsteady Flow in Hydraulic Networks with Polymeric Additional Pipe", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 2, 2002, pp. 238-244
- [5] Covas D., Stoianov I., Mano J.F., Ramos H., Graham N., Maksimovic C., "The Dynamic Effect of Pipe-wall Viscoelasticity in Hydraulic

بوجود آمده و این اغتشاشات در طول لوله منتشر می‌شوند؛ تمایز این اغتشاشات پس از چندی بسیار مشکل و عملاً غیر ممکن است. از این رو نتایج عددی مربوط به مقادیر فشار در پایین‌دست جریان در اولین بازه زمانی حرکت موج از پایین‌دست به بالادست جریان، در شکل ۹ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که هر چه فاصله بین لوله پلی اتیلنی و شیر پایین‌دست جریان کمتر باشد، اغتشاش ایجاد شده در محل تقاطع دو لوله در مدت زمان کم‌تری به پایین‌دست جریان می‌رسد. علاوه بر این مشاهده می‌شود هنگامی که لوله پلی اتیلنی در وسط خط لوله قرار گرفته، حداکثر فشار ناشی از اغتشاش، نسبت به دو حالت دیگر بیشتر می‌باشد. این پدیده به دلیل برهم‌نهی سازنده دو اغتشاشی است که در دو محل تقاطع لوله پلی اتیلنی با لوله فولادی بوجود می‌آید. در نمونه‌ای که فاصله لوله پلی اتیلنی از شیر ۵ متر می‌باشد، دو قله فشار در این بازه زمانی وجود دارد که به دلیل برهم‌نهی غیر سازنده دو اغتشاش یاد شده، اندازه این دو قله از قله فشار مربوط به شرایطی که فاصله لوله پلی اتیلنی از شیر ۱۰ متر است، کمتر می‌باشد.



شکل ۹ هد فشار در پشت شیر در لحظات اولیه جریان گذرا، برای سه مکان مختلف نصب لوله پلی اتیلنی موضعی

## ۷- نتیجه‌گیری

اگرچه خاصیت ویسکوالاستیک لوله پلی اتیلنی سبب میرایی



- [11] Keramat A., Tijsseling A.S., Hou Q., Ahmadi A., "Fluid-structure Interaction with Pipe-wall Viscoelasticity During Water Hammer", *Journal of Fluids and Structure*, Vol. 28, 2012, pp. 434-455.
- [12] Soares A.K., Covas D., Ramos H., Reis L.F.R., "Unsteady Flow With Cavitation in Viscoelastic Pipes", *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 2, No. 4, 2009, pp. 269-277.
- [13] Aklonis J.J., Macknight W.J., Shen M., *Introduction to polymer viscoelasticity*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1972.
- [14] Covas D., *Inverse transient analysis for leak detection and calibration of water pipe systems- modelling special dynamic effects*, Phd Thesis, UK, London, University of London, Imperial College of science, Technology and Medicine, 2003.
- [15] Chaudhry M.H., *Applied Hydraulic Transients*, Second Ed., New York, Litton Educational Publishing Inc, 1987.
- [16] Brunone B., Karney B.W., Mecarelli M., Ferrante M., "Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 126, No. 4, 2000, pp. 236-244.
- Transients. Part I-Experimental Analysis and Creep Characterization", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 5, 2004, pp. 516-530.
- [6] Covas D., Stoianov I., Mano J.F., Ramos H., Graham N., Maksimovic C., "The Dynamic Effect of Pipe-wall Viscoelasticity in Hydraulic Transients. Part II-Model Development, Calibration and Verification", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 43, No. 1, 2005, pp. 56-70.
- [7] Stephens M., Simpson A.R., Lambert M.F., Vitkovsky J.P., "Field Measurements of Unsteady Friction Effects in a Trunk Transmission Pipeline", *7<sup>th</sup> Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis*, American Society of Civil Engineers, Alaska, USA, 2005.
- [8] Duan H.F., Ghidaoui M., Lee P.J., Tung Y.K., "Unsteady Friction and Viscoelasticity in Pipe Fluid Transients", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 3, 2010, pp. 354-362.
- [9] Prek M., "Wavelet Analysis of Sound Signal in Fluid-Filled Viscoelastic Pipes", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 19, 2004, pp. 63-72.
- [10] Prek M., "Analysis of Wave Propagation in Fluid-filled Viscoelastic Pipes", *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 21, 2007, pp. 1907-1916.

Archive of SID