

Numerical Analysis of the Effect of Non-Newtonian Properties of Fluids on Fluid-hammer Phenomenon in the Pipes

B. Norouzi 

Gorgani Institute of Higher Education, Gorgan, Iran

(Received: 2023/08/21, Revised: 2023/12/08, Accepted: 2024/01/17, Published: 2024/02/19)


DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1402.12.2.2.3>

ABSTRACT

In this paper, the behavior of a non-Newtonian polymer through fluid hammer phenomenon in the pipe inspects. Special properties of this fluid such as nonlinear relation between stress and strain, having relaxation time make the pressure wave resulting from this phenomenon to behave differently from a Newtonian fluid. The system under investigation is reservoir-pipe-valve system and the equations representing the conservation of mass and momentum govern the transitional flow in the pipes. In the modeling of the equations finite difference numerical method is used. After defining non-dimensional numbers of governing equations, the effect of Deborah and Reynolds numbers on pressure historic at critical points such as at valve and midpoint investigate. The modeling results show that about exploring sensitivity to the Reynolds number, the pressure wave produced by non-Newtonian polymer shows a sensitivity similar to that of Newtonian fluids. It was also found that an increase in the Deborah number, indicating the elasticity of the polymer, affects the reduction of tensions and increases the oscillation height and consequently attenuation time of the created transient flow to be longer. It has been observed that in similar conditions, the phenomenon of line packing in viscoelastic fluid is slightly higher than in Newtonian fluid. The reason for this is definitely related to the constant characteristic of the relaxation time, which is strongly inclined to maintain the incoming potential energy and resists the damping of the transfer flow, which causes a long damping time compared to the Newtonian fluid have more.

Keywords: Fluid hammer, Non-Newtonian Fluid, Reynolds Number, Deborah Number, Finite difference method, line packing

تحلیل عددی اثر خواص غیر نیوتنی سیالات بر پدیده ضربه قوچ در لوله‌ها

بنفشه نوروزی 

مؤسسه آموزش عالی لامعی گرگانی، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷؛ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

چکیده

در پژوهش حاضر، رفتار یک سیال غیر نیوتنی در شرایط رخداد پدیده ضربه قوچ، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. خواص غیر نیوتنی سیال نظیر رابطه غیر خطی تنش و کرنش و نیز دارا بودن ثابت زمانی رهایی از تنش و... باعث می‌گردد که موج فشاری حاصل از قطع ناگهانی جریان، در این حالت، رفتاری متفاوت با یک سیال نیوتنی نظیر آب داشته باشد. سیستم مورد بررسی از نوع شیر، لوله و مخزن و معادلات حاکم بر مسئله نیز معادلات پیوستگی و مومنتوم است. در مدل‌سازی معادلات، از روش عددی تفاضل محدود استفاده شده است. در ادامه، بی‌بعد سازی معادلات انجام شده و سپس، تاثیر اعداد دوبرا و رینولدز بر تاریخچه فشاری در نقاط بحرانی لوله نظیر پشت شیر و وسط لوله بررسی گردیده است. نتایج مدل‌سازی نشان داده است که افزایش عدد دوبرا که از شاخصهای سیال غیر نیوتنی است، باعث افزایش ارتفاع نوسانات موج فشاری در طول پدیده ضربه قوچ نسبت به سیال نیوتنی می‌شود. همچنین مشخص گردیده است که در یک رینولدز ثابت، در جریان آرام، پدیده لاین پکینگ در سیال غیر نیوتنی، نسبت به سیال نیوتنی کمی بیشتر است که دلیل آن به ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش ارتباط داده می‌شود که به شدت متمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارده بوده و در مقابل دمپینگ جریان انتقالی مقاومت می‌کند و باعث می‌شود که در مقایسه با سیال نیوتنی، زمان میرایی طولانی‌تری داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: ضربه قوچ، سیال غیر نیوتنی، عدد رینولدز، عدد دوبرا، روش عددی تفاضل محدود، لاین پکینگ

۱. استادیار: hatami1355@yahoo.com

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

فهرست علائم و اختصارات

۱- مقدمه

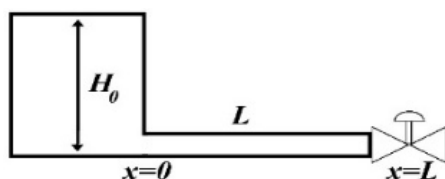
جریان انتقالی ناشی از ضربه قوچ در گروه جریانهای میرای غیردائمی طبقه‌بندی می‌شود. هیدرولیک جریانهای میرا برای اولین بار توسط نیوتن و لاگرانژ در قرن هفدهم با تحقیق درباره نحوه انتشار امواج صوتی در هوا و انتشار امواج در آبهای کم عمق، مورد مطالعه قرار گرفت. پس از آنها، مطالعات در این زمینه به‌طور گسترده ادامه یافت. در خلال ربع اول قرن بیستم، بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه ضربه قوچ، در قاره اروپا بوده است و بیشتر مفاهیمی که مورد بررسی قرار گرفت، مربوط به مبحث سرج بود که توسط ژوکوفسکی منتشر گردید. همچنین او قانون محاسبه مقدار فشار در اثر بستن آبی شیر را برای سیستم ساده شیر، لوله و مخزن به‌دست آورد [۱]. بر این اساس، تاکنون، مطالعات مختلفی با استفاده از روش‌های عددی گوناگون، پدیده ضربه قوچ را مورد بررسی قرار داده‌اند. در مدل‌های کلاسیک و معمول روابط ضربه قوچ جهت مدل‌سازی ترم اصطکاک، معمولاً از مقادیر ماندگار و شبه ماندگار ضریب اصطکاک استفاده می‌شود. این فرضیات، زمانی نتایج قابل قبول خواهند داشت که تغییرات جریان اندک باشد که در این حالت تنش‌های برشی دیوار، رفتاری شبه استاتیکی از خود بروز می‌دهد. از بارزترین تحقیقات انجام شده در زمینه اصطکاک غیرماندگار می‌توان به مقاله تحلیلی زیلک [۲] اشاره نمود. وی در این تحقیق برای جریانهای غیردائمی لایه‌ای در حالت تک بعدی روابطی تحلیلی بدست آورد که همچنان به‌عنوان مرجع برای مقایسه دیگر مسائل مشابه به‌کار می‌رود. یکی از مشکلات استفاده از این مدل، پیچیده بودن آن و نیاز به محاسبات قابل ملاحظه کامپیوتری است. در حقیقت، به علت وابسته بودن اصطکاک غیرماندگار به تاریخچه سرعت از شروع غیرماندگاری، لازم است که برای همه گامهای زمانی، محاسبات تکرار گردد، به‌همین سبب نیاز به پردازش قابل توجهی می‌باشد، که هزینه محاسباتی بالایی را در پی دارد. پس از آن، پژوهشهای متعددی در زمینه مدل‌سازی ضربه قوچ انجام گرفت که ضمن برخورداری از دقت محاسباتی مطلوب، هزینه محاسباتی مناسبی نیز برای کاربردهای عملی داشته باشند. تاپسلینگ [۳] روشی متفاوت را در محاسبات ضربه قوچ به کار برد. روش او بر

قطر لوله (m)	D
عدد دورا	De
مدول بالک ($kgm^{-1}s^{-2}$)	E
ضخامت لوله (m)	e
هد فشار (m)	H
عدد ماخ	M
تابع شکل	N
فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)	P
توابع پایه شعاعی	$R(r_{ij})$
فاصله شعاعی از مرکز لوله (m)	r
عدد رینولدز	Re
زمان (s)	t
مقدار تابع در یک نقطه گره‌ای	$U(x_j)$
سرعت متوسط جریان (ms^{-1})	\bar{v}
سرعت اولیه جریان (ms^{-1})	v_0
نقطه گره‌ای	x
علائم یونانی	
ضریب به‌کاررفته در فرمول مقدار تابع	α
ضخامت لایه مرزی (m)	δ
لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	η
ثابت زمانی رهایی از تنش یا آرامش (s)	λ
نسبت پواسون	ν
جرم مخصوص سیال (kgm^{-3})	ρ
تنش‌های برشی ($kgm^{-1}s^{-2}$)	τ
میانگین تنش‌های برشی ($kgm^{-1}s^{-2}$)	$\bar{\tau}$
بالانویس‌ها	
گام زمانی قبل	n
گام زمانی بعد	$n+1$
زیرنویس‌ها	
سیال	f
مختصات نقطه گره‌ای در راستای محور افقی	i
مختصات نقطه گره‌ای در راستای محور عمودی	j
مختصات نقطه مجهول در راستای دلخواه	k
مصالح لوله	p
راستای شعاعی لوله	r
راستای محور مرکزی لوله	z

با اعداد رینولدز در حالات جریان مختلف آرام، آشفتته و انتقالی مورد مقایسه قرار دادند و نشان دادند که مدل زیلک با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برازش مناسبتری نمایش می‌دهد. حالات خاص رخداد پدیده ضربه قوچ نیز در مطالعات اخیر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مقالات مرتبط با موضوع پژوهش حاضر، توسط وهبا [۶] صورت گرفته است. در این مقاله وی اثرات ناشی از بستن سریع شیر را بر جریان حاوی سیال قانون توانی در یک لوله با سطح مقطع دایره ای مورد بررسی قرار داده است. او از روش عددی تفاضل محدود شبه دو بعدی برای تحلیل نتایج استفاده نموده است، بدین ترتیب که برای عبارتهای مکانی از تفاضل مرکزی مرتبه دوم و برای انتگرالگیری زمانی از رانج کوتای مرتبه چهارم استفاده نموده و نتیجه گرفته است که جریان غیر ماندگار لایه‌ای به شدت تحت تاثیر اثرات غیر نیوتنی سیال، شامل رفتار نازک شدگی برش و ضخیم شدن برش، قرار می‌گیرد. همچنین اشاره کرده است که افزایش ضخیم شدن برش سیال، سبب میرایی شدیدی در جریان گذرا می‌شود. به طور کل، مطالعات صورت گرفته در زمینه ضربه قوچ سیال غیرنیوتنی به مراتب کمتر از سیال نیوتنی است. از طرفی سیالات ویسکوالاستیک گروه مهمی از سیالات غیر نیوتنی هستند که خواص ویسکوز و الاستیک را به صورت توأمان دارا می‌باشند، لذا این مواد دارای خواص همزمان جامد و سیال هستند. حل عددی جریان این گونه سیالات، باتوجه به پیچیده بودن معادلات حاکم بر آنها همواره چالش برانگیز بوده است. نوروزی و همکاران [۷]، در مطالعه‌ای به بررسی سه بعدی جریان ناپایای سیال ویسکوالاستیک حول کره در محیط بی-نهایت پرداختند و از مدل غیرخطی گزیکس به عنوان معادله متشکله سیال ویسکوالاستیک استفاده نمودند. حل معادلات مومنتم و معادلات متشکله سیال در این تحقیق، توسط کد عددی منبع باز این فوم که از روش حجم محدود، جهت مدل‌سازی معادلات حاکم بر جریان استفاده می‌کند، انجام گرفته است. نتایج مطالعات آنها نشان داد که در اعداد رینولدز بالا اثرات خواص الاستیک بر روی رژیم جریان ناچیز بوده و عدد رینولدز در ناپایداری گردابه‌های تولیدی سیال ویسکوالاستیک، در پشت کره نقش بارزتری ایفا می‌کند. مورا و مونا [۸] با

مبنای روش مشخصه پی‌ریزی شده بود با این تفاوت که در محاسبات او به یک شبکه عددی نیاز نبود و هر نقطه در نمودار $X-t$ می‌توانست جهت محاسبه جواب موضعی بدون اینکه به وضوح از جوابهای قبلی ذخیره شده استفاده شود، انتخاب گردد. محاسبات او بر روی مسیر امواج چرخشی برگشتی با یک برگشت خیلی ساده پی‌ریزی شده بود. در مطالعه او، جوابهای دقیق برای یک ضربه قوچ بدون اصطکاک به دست آورده شدند و نتایج حاصل از الگوریتم جدید ارائه شده با محاسبات ضربه قوچ متداول مقایسه شدند. علی محمدیان و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی عددی ساختار جریان و انتقال حرارت دوفاز در میکرو کانالهایی با قطرهای هیدرولیکی مختلف پرداختند. در پژوهش آنها از نرم افزار استفاده شده و برای مدل‌سازی تغییر فاز در این نرم افزار برنامه نویسی انجام گردیده است. نتایج مطالعه آنها در میکرو کانالها با اشکال مختلف نشان داد که میکرو کانالهای مربعی، دایروی و دوزنقه به ترتیب بیشترین ضریب انتقال را دارا هستند. مویدی و بیگدلو یک راهبرد شبیه‌سازی عددی مستقیم با استفاده از طرح عددی آراکاوا برای معادله جریان انتقالی در یک حوزه با فرض نیروی اجباری متکی بر باد با دو هسته در یک مدل یک لایه به کار گرفتند و نتیجه گرفتند که افزایش دو عدد رینولدز و راسبی منجر به اضمحلال برخی گردابه‌ها به دلیل کاهش استهلاک لازم برای بقای آشفتگی در گذر زمان خواهد شد. نوروزی و همکاران در مطالعه‌ای میزان تأثیرپذیری سیالات نیوتنی، فوق همرفتی ماکسول و نیز اولدروییدی را نسبت به تغییرات عدد رینولدز در شرایط رخداد ضربه قوچ جریان آرام در لوله مورد مدل‌سازی و مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که در شرایط رینولدز ثابت، سیال نیوتنی کمترین و سیال فوق همرفتی ماکسول، بیشترین هد نوسانات جریان انتقالی را به خود اختصاص می‌دهند. شاملو و همکاران [۴] در مطالعه‌ای به بررسی یک بعدی جریانهای انتقالی در لوله‌ها با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک غیر دائمی پرداختند. آنها در این مقاله یک مدل شبه دائمی و چهارف مدل اصطکاک غیر دائمی را برای جریان لوله ای انتقالی ارائه دادند و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده را با مدل اصطکاک شبه دو بعدی توسط زیلک و واردی و براون [۵] برای ضربه قوچ

بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در قالب نمودار، ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل (۱). نمایی از سیستم شیر - لوله و مخزن

۲- فرمولبندی مسئله

۱-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان‌های انتقالی، در حالت کلی، معادلات پیوستگی و تکانه هستند که در سیستم مختصات قطبی به صورت معادلات (۱) و (۲) تعریف می‌شوند [۱۲]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v_z \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{c^2}{g} \left(\frac{\partial(rv_r)}{r\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

$$+ \left[\frac{\partial(r\tau_{rz})}{r\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] = 0$$

$$c^2 = \frac{\frac{E_f}{\rho}}{1 + k \frac{E_f D}{e E_p}} \quad (3)$$

در معادلات فوق، هد فشار، زمان، سرعت محوری، سرعت شعاعی، و تنش‌های برشی در وجوه مختلف، محور مرکزی لوله، فاصله شعاعی از مرکز لوله، فشار، جرم مخصوص سیال و سرعت موج می‌باشد که به صورت معادله (۳) محاسبه می‌شود. که E_f مدول بالک سیال، E_p مدول الاستیک لوله، e ضخامت و D قطر لوله می‌باشد. همچنین k در معادله فوق، تابعی از نسبت پواسون مصالح لوله ν_p بوده که در مسائل ضربه قوچ، معادل 1 در نظر گرفته می‌شود [۶]. لازم به ذکر است که از ترمهای همرفتی صرف‌نظر شده و سرعت شعاعی جریان نیز در جداره لوله و محور مرکزی، صفر در نظر گرفته می‌شود [۱۳، ۱۴]. با انتگرالگیری از معادلات (۱) و (۲)، صورت کلی معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر ضربه قوچ ویسکوالاستیک، به فرم معادلات (۴) و (۵) محاسبه می‌شود:

در نظر گرفتن مدل ماکسول برای سیال ویسکوالاستیک جابجاکننده، تأثیر خاصیت الاستیک این نوع سیال را مورد بررسی قرار دادند. پول و همکاران [۹] جریان خزشی سیال ویسکوالاستیک را با دو مدل ماکسول بالادست و اولدروید-بی مورد مطالعه قرار دادند و سپس با استفاده از مدل ماکسول، تأثیر نسبت انبساط را بر روی الگوی جریان خزشی این سیالات، بررسی نمودند. شکری و همکاران [۱۰، ۱۱] با کمک مدل اولدروید-بیبه شبیه‌سازی جابجایی جریان نیوتنی توسط سیال ویسکوالاستیک در محیطی همسانگرد و ناهمسانگرد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که خاصیت الاستیک سیال ویسکوالاستیک می‌تواند موجب کاهش شدت ناپایداری گردد. بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته مشخص گردید که مدل‌سازی پدیده ضربه قوچ در شرایطی که یک سیال غیرنیوتنی در لوله در جریان باشد، به صورت جدی انجام نشده است. دلیل آن را می‌توان به ویژگی‌های خاص این سیالات نظیر رابطه غیرخطی بین تنش‌های برشی وارد بر سیال با تغییرات نرخ برش، وجود اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم در این سیالات و... ارتباط داد. در پژوهش حاضر، به مدل‌سازی جریان گروه خاصی از سیالات غیرنیوتنی به نام سیالات ویسکوالاستیک پرداخته شده است. این گروه از سیالات، موادی هستند که ویژگی‌های ویسکوز و الاستیک را به صورت توأمان دارا می‌باشند و لذا این مواد دارای خواص هم‌زمان جامد و سیال هستند. دارابودن ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش و نیز وجود اختلاف تنش‌های نرمال در سیالات ویسکوالاستیک سبب بروز رفتارهای عجیب و بعضاً متضاد در این سیالات نسبت به سایر سیالات می‌شود. مسئله مورد بررسی، یک سیستم کلاسیک شامل شیر - لوله و مخزن است که در اثر بسته‌شدن شیر انتهای لوله، مقادیر فشار و سرعت در طول لوله دچار نوسان می‌گردند (شکل ۱). در ابتدا معادلات جریان غیرماندگار در حالت کلی نوشته شده و سپس از روابط مدل فوق همرفتی ماکسول برای جای‌گذاری مقادیر تنش در معادله مومنتوم استفاده شده است. در ادامه، روش عددی دو گام زمانی لاکس - فردریش برای گسسته‌سازی معادلات، معرفی و پس از بی‌بُعد سازی معادلات، تأثیر اعداد بی‌بُعد بر تاریخچه فشاری و تنش‌های برشی در نقاط بحرانی لوله مورد

ترانهاده و قوانین ضرب تانسوری [۱۲]، نه معادله در سیستم مختصات قطبی برای محاسبه $\bar{\tau}$ استخراج می-شود که دو معادله آن $\bar{\tau}_{rz}$ و $\bar{\tau}_{zz}$ برای جایگذاری در معادله مومنتوم نیاز است. به منظور جایگذاری روابط تنش در معادله مومنتوم، پروفیل توزیع سرعت در جریانهای آرام باید در نظر گرفته شود:

$$v_z = \begin{cases} \bar{v} & r < R - \delta \\ \frac{\bar{v}}{\delta}(R - r) & R - \delta < r < R \end{cases} \quad (12)$$

که δ ضخامت لایه مرزی و r فاصله شعاعی از مرکز لوله می‌باشد. با جایگزینی مقادیر مناسب مشتقات سرعت در معادلات (۸ الی ۱۱) و انتگرالگیری از آنها، تنش‌های متوسط در جریانهای غیر دائمی محاسبه می‌شود. بنابراین، ۴ معادله اساسی حاکم بر جریان سیال ویسکوالاستیک در حالت رخداد ضربه قوچ در یک سیال ویسکوالاستیک به صورت معادلات (۱۳-۱۶) در نظر گرفته می‌شوند:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} \bar{\tau}_{rz} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{zz}}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

$$\bar{\tau}_{rz} + \lambda \frac{\partial \bar{\tau}_{rz}}{\partial t} = -\eta \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \quad (15)$$

$$z + \lambda \frac{\partial \bar{\tau}_{zz}}{\partial t} = 2\eta \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \quad (16)$$

لازم به ذکر است که معادلات حاکم بر ضربه قوچ کلاسیک که در آن، سیال نیوتنی در لوله جریان دارد، حالت خاصی از معادلات (۱۳ الی ۱۶) بوده که در آن، برای جایگذاری ترم تنش در معادله مومنتوم از روابط جریان پایدار استفاده شده، بنابراین، معادلات حاکم بر ضربه قوچ کلاسیک به صورت معادلات (۱۷) و (۱۸) تعریف می-شوند [۱].

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{f \bar{v} |\bar{v}|}{2D} = 0 \quad (18)$$

۲-۳- بی‌بعد سازی

متغیرها و پارامترهای بدون بعد به کاررفته عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} \bar{v}^* &= \frac{\bar{v}}{v_0} & H^* &= \frac{H}{c v_0 / g} & z^* &= \frac{z}{D} \\ t^* &= \frac{t}{D/c} & \bar{\tau}^* &= \frac{\bar{\tau}}{\rho c v_0} & Re &= \frac{\rho v_0 D}{\eta} \\ De &= \frac{\lambda}{D/v_0} & M &= \frac{v_0}{c} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} \bar{\tau}_{rz} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{zz}}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

که در معادلات (۴) و (۵)، R شعاع لوله، \bar{v} سرعت متوسط جریان، $\bar{\tau}_{rz}$ و $\bar{\tau}_{zz}$ میانگین تنش‌های برشی در وجوه مختلف می‌باشند که به صورت معادلات (۶) و (۷) تعریف می‌شوند:

$$\bar{v} = \frac{1}{A} \int v \, dA \quad (6)$$

$$\bar{\tau} = \frac{1}{A} \int \tau \, dA \quad (7)$$

۲-۲- معادلات ساختاری

معادله ساختاری معادله‌ای است که روابط بین تنش و برش یک ماده را مشخص می‌کند. به دلیل رفتار پیچیده و جالب گروهی از سیالات غیرنیوتنی به نام سیالات ویسکوالاستیک معادلات ساختاری بسیاری برای بیان روابط این سیالات پیشنهاد شده است. این مدل‌ها بر پایه تلفیق خواص جامد خطی و سیال نیوتنی بنا شده‌اند. یکی از اولین و معروف‌ترین مدل‌های ویسکوالاستیک مدل فوق همرفتی ماکسول است. در این مدل، قانون پایه بر اساس یک فنر و دمپر سری تعریف می‌شود [۱۵]. توزیع تنش پلیمری مدل سیال غیرنیوتنی به صورت معادله (۸) قابل توصیف است [۱۶].

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} \quad (8)$$

که η لزجت سیال ویسکوالاستیک است و $\dot{\gamma}$ تانسور نرخ کرنش بوده و به شکل معادله‌ی (۹) تعریف می‌شود.

$$\dot{\gamma} = (\nabla v) + (\nabla v)^T \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{\eta}{G} \quad (10)$$

همچنین زمان‌هایی از تنش است که نسبتی از لزجت سیال به مدول برشی می‌باشد.

و $\dot{\tau}$ مشتق رابطه‌ی توزیع تنش پلیمری است که از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است.

$$\dot{\tau} = \frac{\partial \tau}{\partial t} + v \cdot \nabla \tau - ((\nabla v)^T \cdot \tau + \tau \cdot (\nabla v)) \quad (11)$$

در این مدل، اگر مقدار زمان‌هایی از تنش به صفر میل کند، از ترم مشتق صرف‌نظر شده و معادله ساختاری سیال نیوتنی پدیدار می‌شود [۱۲]. با به‌کارگیری تعاریف پارامترهای موردنیاز برای گرادیان سرعت، گرادیان سرعت

۲-۵- شرایط مرزی

در رخداده پدیده ضربه قوچ، فرض می‌شود، خط لوله در بالادست، به مخزنی با هد ثابت، متصل است، در واقع در این مسائل، سطح مقطع مخزن، به میزان کافی، بزرگ در نظر گرفته شده که با باز شدن شیر پایین دست و جاری شدن آب در داخل لوله، تغییرات ارتفاع آب مخزن، ناچیز، باشد [۲۳]؛ لذا شرط مرزی بالادست جریان، مطابق معادله (۲۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$H_1 = H_{Res} = \text{const.} \quad (27)$$

که در آن، H_1 هد مربوط به گره متصل به مخزن، می‌باشد. از طرفی در پایین دست جریان که خط لوله به شیر متصل است، با بسته شدن ناگهانی شیر، جریان انتقالی در لوله به وجود آمده و سرعت متوسط جریان در پشت شیر، صفر می‌شود؛ بنابراین، شرط مرزی پایین دست، مطابق معادله (۲۸) لحاظ می‌گردد.

$$\bar{V}_n = 0 \quad (28)$$

که در آن، \bar{V}_n سرعت مربوط به گره متصل به شیر، می‌باشد.

۳- نتایج مدل سازی

در این بخش، محلول پلیمری که مشخصات ظاهری آن، باتوجه به بسپارهای جدول ۱ محاسبه شده است، به عنوان یک سیال ویسکوالاستیک، تحت پدیده ضربه قوچ در سیستم شیر، لوله و مخزن قرار گرفته و تغییرات زمانی هد فشار در نقاط بحرانی آن، نظیر پشت شیر و وسط لوله مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول (۱). محدوده ثابت زمان رهایی از تنش و ویسکوزیته [۱۵]

شماره پلیمر	ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)	زمان رهایی از تنش (s)
1	1.7328	1.6362e-04
2	2.7690	0.0148
3	6.0020	0.0280
4	8.6953	4.1824
نمونه	$\bar{\eta} = 0.08918$	$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} = 1.9$

لازم به ذکر است که از آنجاکه اطلاعات آزمایشگاهی معتبری در مورد به کارگیری سیال ویسکوالاستیک در شرایط رخداده ضربه قوچ در لوله، در دسترس نیست، نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش هولم بو و رولیو [۲۲] که با یک سیال نیوتنی انجام شده مقایسه می-

که v_0 سرعت اولیه جریان، De عدد دیورا، M عدد ماخ و Re عدد رینولدز می‌باشد. باتوجه به پارامترهای معرفی شده در روابط (۱۹) فرم بی‌بعد معادلات به صورت معادلات (۲۰-۲۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial \bar{V}^*}{\partial z^*} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \bar{V}^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} - 4\bar{\tau}_{rz}^* - \frac{\partial \bar{\tau}_{zz}^*}{\partial z^*} = 0 \quad (21)$$

$$\bar{\tau}_{rz}^* + \frac{De \partial \bar{\tau}_{rz}^*}{M \partial t^*} = -8M \frac{\bar{V}^*}{Re} \quad (22)$$

$$\bar{\tau}_{zz}^* + \frac{De \partial \bar{\tau}_{zz}^*}{M \partial t^*} = 2 \frac{M \partial \bar{V}^*}{Re \partial z^*} \quad (23)$$

۲-۴ روش عددی

در این تحقیق، از روش دو گام زمانی لاکس - فردریش استفاده می‌شود. به طور کلی، در روش‌های چند گام زمانی، از معادلات تفاضل محدود با مراحل زمانی مختلف استفاده می‌شود [۲۲]. در این روش‌ها، از شبکه جابه‌جاشده استفاده می‌شود. نقاط شبکه جابه‌جاشده را می‌توان به هر دو شکل زیر تعریف نمود:

$$x_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(x_{i+1} + x_i) \quad (24)$$

$$x_{i+\frac{1}{2}} = x_i + \frac{1}{2} \Delta x \quad i=1, 2, \dots, M-1$$

در روش‌های چند گامی، اولین گام در نقطه میانی $i + \frac{1}{2}$ اعمال می‌شود. گسسته سازی در راستای بعد زمانی نیز در محدوده $[0, t_{\max}]$ توسط گام‌های زمانی تا رسیدن به گام نهایی صورت می‌پذیرد:

$$t^0 = 0, t^{n+1} = t^n + \Delta t \quad n=1, 2, \dots, N-1 \quad (25)$$

روش‌های چند گامی از معادلات تفاضل محدود با مراحل زمانی مختلف استفاده می‌کند. روش به کاررفته در این تحقیق، دو گام زمانی است، یعنی هر گام زمانی به دو نیم گام زمانی تقسیم می‌شود:

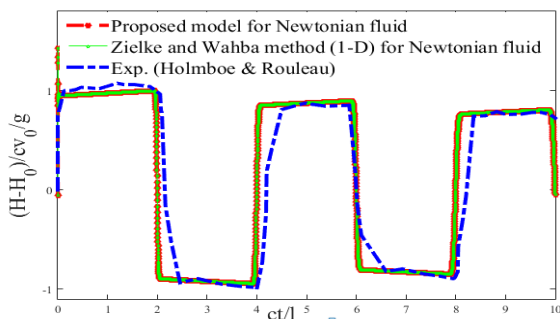
$$t^{n+\frac{1}{2}} = t^n + \frac{1}{2} \Delta t \quad (26)$$

در این روش‌ها علی‌رغم اینکه محاسبات کمی پیچیده می‌شود و زمان عملیات نیز تا حدودی افزایش می‌یابد، اما نتایج به دست آمده از همگرایی و دقت مناسب‌تری برخوردار می‌شود.

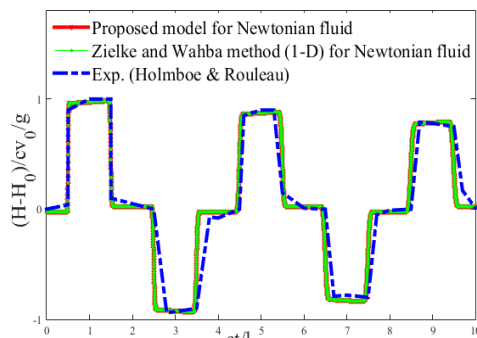
غیرنیوتنی، نظیر دارابودن ثابت زمانی رهایی از تنش، باعث می‌شود که شوک ناگهانی وارد بر جریان در اثر بسته شدن سریع شیر، به طور آنی بر جریان، وارد نشود؛ بلکه پس از گذشت زمانی معادل زمان رهایی از تنش سیال ویسکوالاستیک که بسته به جنس آنها متفاوت است، بر جریان وارد می‌شود، بنابراین استهلاک موج ایجاد شده با سرعت و قدرت کمتری اتفاق می‌افتد. جهت بررسی دقیق‌تر رفتار موج فشاری، مدل‌سازی عددی برای محلول‌های پلیمری دیگری که دارای غلظت و وزن مولکولی کمتر و در نتیجه زمان رهایی از تنش کمتر از پلیمر موردنظر هستند، نیز انجام گرفته و مورد تفسیر قرار گرفته است. لازم به ذکر است که عدد ماخ در پدیده ضربه قوچ، بسیار کم $M \ll 1$ است [۱۴]، به همین علت از بررسی اثرات آن، صرفنظر شده است.

۴- اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

جهت اعتبارسنجی نتایج مدل پیشنهادی با نتایج دو روش عددی بر اساس اطلاعات آزمایش هولمبو و رولئو که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه گردیده است، مورد مقایسه قرار می‌گیرد:



الف- پشت شیر



ب- وسط لوله

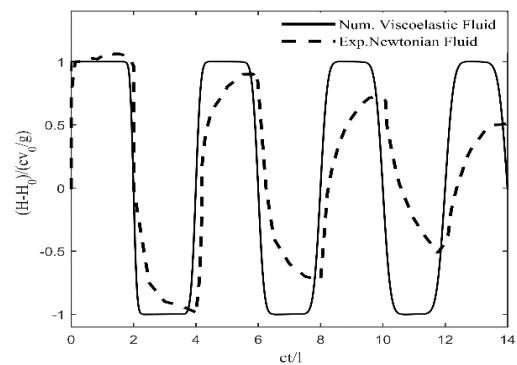
شکل (۳). اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

گردد، به همین دلیل به‌غیراز جنس سیالات ویسکوالاستیک، سایر مشخصات فیزیکی آزمایش، نظیر قطر، طول لوله، سرعت موج و.. مشابه اطلاعات آزمایش ذکر شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است.

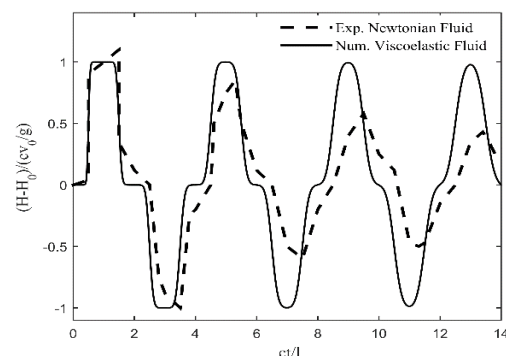
جدول (۲). مشخصات سیال و لوله [۲۲]

مقادیر	مشخصات آزمایش
36.09	طول لوله (m)
0.13	سرعت متوسط (m/s)
1324	سرعت موج (m/s)
0.0254	قطر داخلی لوله (m)
0.03483	ویسکوزیته دینامیکی (pa.s)
878	جرم مخصوص سیال kg/m ³
81.76	عدد رینولدز

با توجه با اطلاعات مندرج در جدول ۲، مقایسه‌ای بین رفتار پلیمر مورد بررسی با سیال نیوتنی آزمایش هولمبو و رولئو [۲۲] صورت گرفته است.



الف - پشت شیر



ب- وسط لوله

شکل (۲). مقایسه تاریخچه فشاری در سیال نیوتنی و

غیرنیوتنی در طول پدیده ضربه قوچ

باتوجه به شکل‌های "الف-۲" و "ب-۲"، در مقایسه صورت گرفته بین سیال نیوتنی و سیال غیرنیوتنی، زمان میرایی موج ناشی از سیال غیرنیوتنی طولانی‌تر است، در واقع، ویژگی‌های متفاوت سیال ویسکوالاستیک

شکل (۴) تأثیر عدد دوبرا بر تاریخچه فشار

باتوجه به شکل ۴، با افزایش عدد دوبرا زمان میرایی موج حاصل از جریان انتقالی ناشی از ضربه قوچ، افزایش می‌یابد. در دوبراهای بسیار پایین، رفتار موج ایجاد شده مشابه حالت نیوتنی است. در سیال نیوتنی، وقتی که شیر به طور ناگهانی بسته می‌شود، سرعت سیال مجاور آن با ضربه‌ی ناشی از فشار بیشتری که در سطح شیر توسعه داده شده، سریعاً از مقدار اولیه به صفر کاهش می‌یابد. به محض توقف لایه اول سیال، به طور مشابه، لایه بعدی نیز متوقف می‌شود. به این طریق یک موج ضربه‌ای با فشار بالا با سرعت موج نزدیک به سرعت صوت و در یک فشار کافی به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند تا حرکت سیال را در طول لوله متوقف کند، موج حاصله پس از طی مسیر رفت و برگشتی در طول لوله به تدریج میرا می‌شود [۱]. اما در سیالات ویسکوالاستیک بر خلاف سیالات نیوتنی، سرعت جریان پس از بسته شدن ناگهانی شیر به طور آنی صفر نمی‌شود، بلکه این کاهش سرعت، در یک بازه زمانی معادل زمان رهایی از تنش سیال ویسکوالاستیک رخ می‌دهد [۲۴-۲۵]؛ بنابراین، انتظار می‌رود که زمان میرایی موج حاصله به دلیل عدم تأثیر آنی شوک ناشی از بسته شدن شیر، کمی طولانی‌تر شود. از طرفی بنا بر معادلات مدل ماکسول، معادلات (۱۶ و ۱۷)، تغییرات زمان رهایی از تنش، بر تنش‌های برشی در وجوه مختلف نیز تأثیرگذار است که اگر نمودار تنش‌های برشی کل در این حالت، نسبت به تنش‌های وارده در حالت کلاسیک، ترسیم گردد، تأثیر این تغییرات بر میزان تنش‌های وارده، قابل مشاهده است [۲۶-۲۷]. لازم به ذکر است که در ضربه قوچ کلاسیک جهت محاسبه تنش وارد بر لوله از روابط جریان پایدار استفاده می‌شود و فرض بر آن است که سرعت جریان، معادل سرعت اولیه در طول لوله است، در حالی که در محاسبه تنش‌های ضربه قوچ در مطالعه حاضر، از روابط سیال غیرنیوتنی استفاده شده است. تنش‌های موجود در معادلات (۱۶ و ۱۷) در وجوه مختلف Z و r در راستای محوری بر لوله اعمال می‌شوند که در ادامه نمودار تغییرات مجموع این تنش‌ها نسبت به تنش حالت ضربه قوچ کلاسیک در

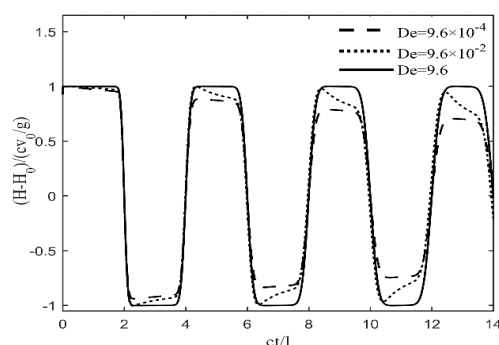
بادقت در شکل شماره ۳، دو نکته قابل بررسی است. نخست اینکه، مدل پیشنهادی برای تحلیل رفتار سیالات غیرنیوتنی، بدون لحاظ ویژگی‌های ویسکوالاستیکی سیال، بر نتایج روش‌های عددی معتبری مانند روش زلیک در حالت ویسکوزیته ثابت و همچنین، روش عددی وهبا منطبق است که دقت و اعتبار مدل پیشنهادی برای تحلیل رفتار سیال در طی رخداد ضربه قوچ را نشان می‌دهد و از طرفی همانگونه که در مطالعات زلیک و وهبا [۲ و ۶] اشاره شده است، علت عدم انطباق کامل مدل‌سازی عددی بر نتایج آزمایشگاهی در برخی نقاط، مدل‌سازی یک بعدی مسئله [۶] و در نظر گرفتن ویسکوزیته در حالت جریان دائمی [۲] می‌باشد.

۵- بحث و نتایج

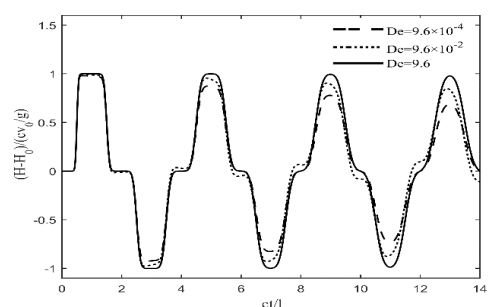
باتوجه به نتایج مدل‌سازی تأثیر اعداد بی بعد حاصل از معادلات در طول پدیده ضربه قوچ سیال غیرنیوتنی به تفکیک بررسی می‌گردد.

۵-۱- بررسی تأثیر عدد دوبرا

جهت بررسی تأثیر عدد دوبرا بر تاریخچه فشار ضربه قوچ ویسکوالاستیک، محلول‌های پلیمری رقیق‌تر با زمان‌های رهایی از تنش کمتر از ۱.۹ که به دوبراهای کمتر از ۹.۶ می‌انجامد، مدل‌سازی و نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته است.

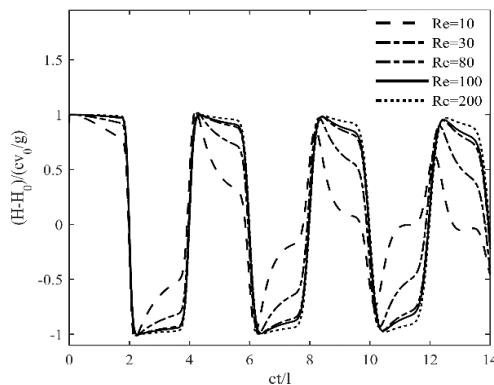


الف - پشت شیر

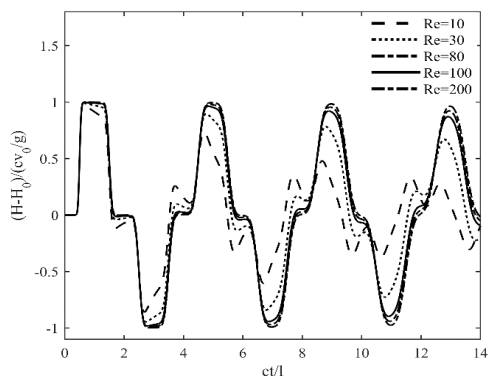


ب- وسط لوله

مرحله به ازای دبوراهای ثابت، با اعداد رینولدز مختلف مورد مدل سازی قرار گرفته است. در واقع، در پژوهش حاضر، تلاش بر این است که تاثیر گروه‌های بی‌بعد در معادلات حاکم، در محدوده عملی مورد مطالعه قرار گیرد. لازم به ذکر است که ضربه قوچ مورد بررسی در پژوهش حاضر، در حالت جریان آرام در لوله بوده و تغییرات عدد رینولدز می‌بایست در این محدوده اعمال گردد. در ادامه، تاثیر عدد رینولدز بر رفتار موج فشاری ناشی از ضربه قوچ در یکی از محلولهای رقیق پلیمری با $De = 0.1$ نشان داده شده است.



الف - پشت شیر

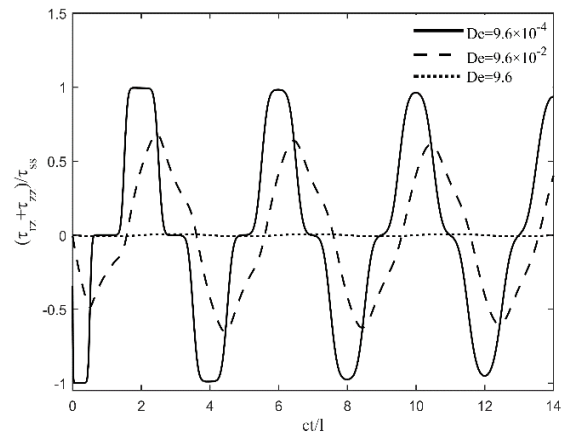


ب-وسط لوله

شکل (۶). تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشار در سیال غیرنیوتنی

باتوجه به شکل ۶ در رینولدزهای پایین، میزان حساسیت بیشتری نسبت به تغییر رینولدز در رفتار موج فشاری پلیمر مشاهده می‌شود که علت آن، می‌تواند به قوت ویسکوزیته در آن حالات جریان و وابستگی بیشترش به عدد رینولدز ارتباط داده شود. لازم به ذکر است که در ضربه قوچ کلاسیک با سیالات نیوتنی نیز

محلولهای پلیمری مذکور در محل وسط لوله ترسیم گردیده است:



شکل (۵). تنش‌های برشی ناشی از ضربه قوچ در سیال غیر

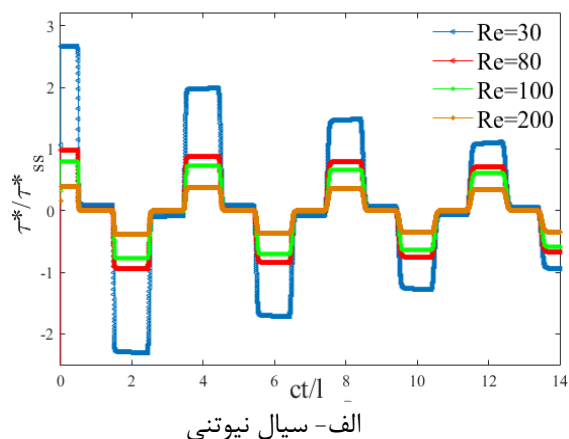
نیوتنی در وسط لوله

همان‌طور که در "شکل ۵" مشاهده می‌شود، در این حالت، نیز رفتار سیال غیرنیوتنی در دبوراهای پایین، کمی مشابه سیال نیوتنی است، در مورد یک سیال نیوتنی به دلیل به‌کارگیری روابط جریان پایدار در محاسبه میزان تنش وارد شده بر لوله در رخداد ضربه قوچ، معمولاً تنش نسبتاً بزرگی از محاسبات، حاصل می‌شود که نشانگر میزان خسارات وارد شده بر لوله می‌باشد. از سویی در دبورای بسیار پایین، میزان تنش‌های به دست آمده به مراتب بیشتر از دو حالت دیگر است. در واقع، با افزایش عدد دبورای که ناشی از افزایش زمان رهایی از تنش می‌باشد، زمان میرایی موج فشاری ناشی از قطع ناگهانی جریان طولانی‌تر و استهلاک آن با قدرت تخریبی کمتری اتفاق می‌افتد، این مسئله نشان می‌دهد که به‌کارگیری افزودنیهای ویسکوالاستیک، می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارات ناشی از تنش وارد بر لوله در رخداد ضربه قوچ داشته باشد.

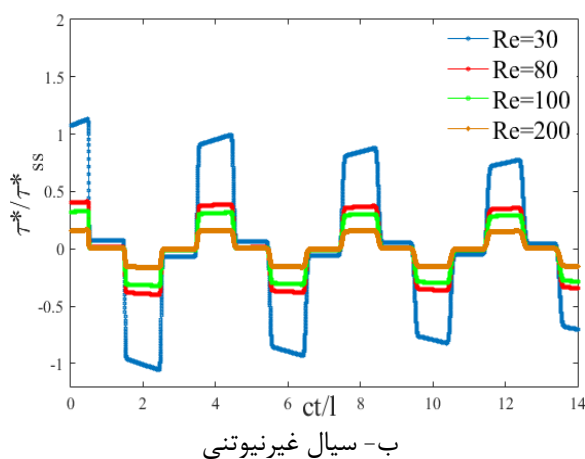
۵-۲- بررسی تاثیر عدد رینولدز

جهت بررسی تاثیر عدد رینولدز در شرایط برقراری سیال ویسکوالاستیک در لوله، محلول پلیمری مذکور و محلول‌های پلیمری دیگری که دارای غلظت و وزن مولکولی کمتر و در نتیجه زمان رهایی از تنش کمتر از ۱.۹ ثانیه هستند، به عنوان سیال ویسکوالاستیک در لوله، تحت رخداد ضربه قوچ قرار داده شده و در چندین

تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور بررسی میزان تأثیرپذیری تنش‌های برشی از تغییرات عدد رینولدز در محدوده جریان‌های آرام، مقایسه‌ای بین تنش‌های برشی با تغییرات عدد رینولدز در طول رخداد ضربه قوچ کلاسیک در نقطه بحرانی وسط لوله انجام گردید.



الف- سیال نیوتنی



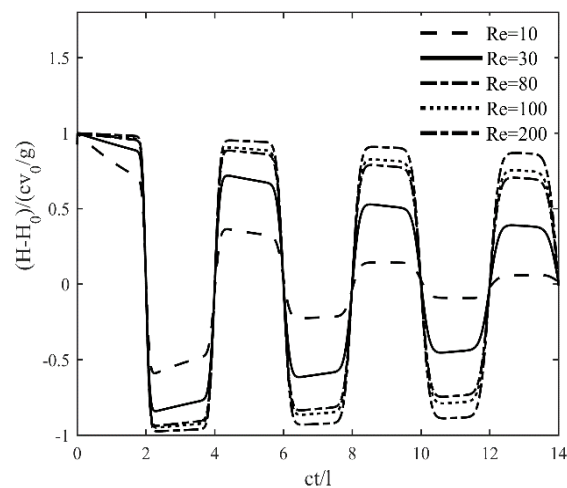
ب- سیال غیرنیوتنی

شکل ۸). مقایسه تنش‌های برشی سیالات در محدوده

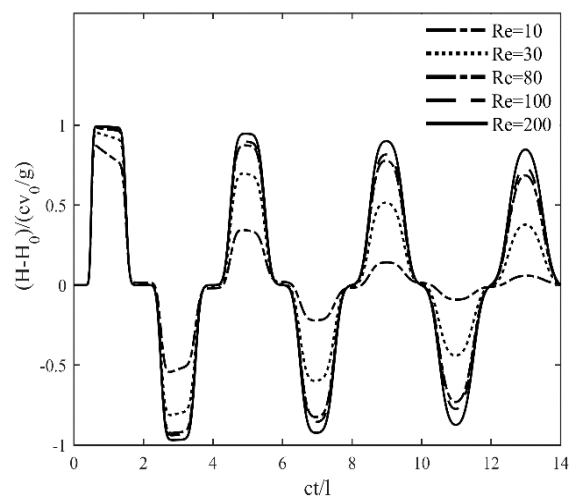
جریان آرام در نقطه وسط لوله

شکل ۸ نشان می‌دهد که ماکزیمم تنش‌های برشی ناشی از ضربه قوچ در اعداد رینولدز پایین رخ می‌دهد که دلیل آن به‌طور قطع، به قوت ویسکوزیته جریان در این حالت ارتباط داده می‌شود که این مسئله شدیداً جداره لوله را تحت تأثیر قرار داده و افزایش تنش‌های برشی وارد بر جداره لوله را در پی دارد. به طوری که بیشترین تنش در محدوده جریان با $Re=30$ و کمترین تنش در حالت $Re=200$ ایجاد می‌گردد، در نمودار فوق، محور عمودی نسبت تنش‌های برشی به تنش‌های برشی وارد بر جداره لوله در حالت جریان دائمی می‌باشد.

تغییرات عدد رینولدز تأثیرات قابل‌ملاحظه‌ای بر رفتار موج فشاری از خود نشان می‌دهد.



الف- پشت شیر



ب- وسط لوله

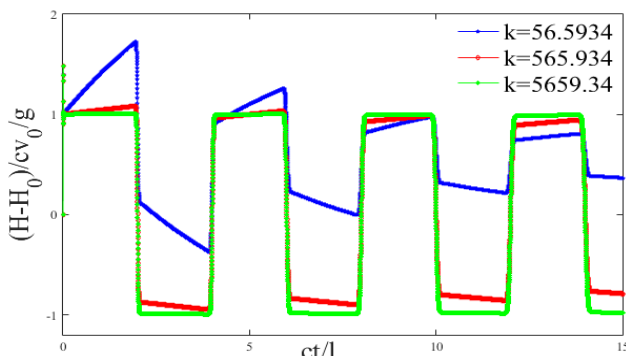
شکل ۷). تأثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشار در سیال

نیوتنی

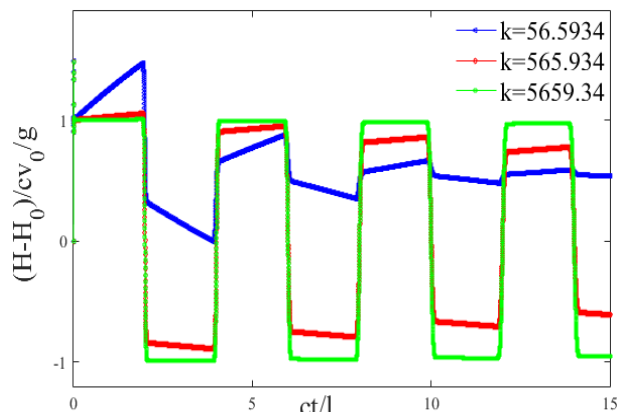
همان‌طور که در شکل ۷، مشاهده می‌شود، در ضربه قوچ کلاسیک، با افزایش عدد رینولدز در محدوده جریان آرام، نوسانات موج فشاری بیشتر و به تبع آن، زمان میرایی جریان انتقالی بیشتر می‌شود که در ضربه قوچ ویسکوالاستیک با مدل غیرنیوتنی نیز همین روند با حساسیت نسبتاً کمتری مشاهده می‌گردد.

۵-۳- مقایسه تنش‌های برشی در طول لوله

یکی از ویژگی‌های مهم جریان‌های آرام، ویسکوزیته بالای سیال در این نوع جریان‌ها است که این مسئله به‌طور قطع، تنش‌های برشی وارد بر جداره لوله را



الف - سیال غیرنیوتنی



ب - سیال نیوتنی

شکل (۹). مقایسه پدیده لاین پکینگ در سیالات در پشت شیر باتوجه به شکل (۹) با کاهش ضربه لاین پکینگ ضمن افزایش دمپینگ جریان انتقالی، پدیده لاین پکینگ یا میزان تجاوز فشار اولیه در محل پشت شیر از فشار ژوکوفسکی با وضوح بیشتری در مورد هر دو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی اتفاق می‌افتد. از طرفی، در مقایسه رفتاری بین این دو سیال، مشاهده گردید که در شرایط مشابه، میزان تجاوز فشار اولیه از فشار ژوکوفسکی در محل پشت شیر، در سیال غیرنیوتنی، نسبت به سیال نیوتنی کمی بیشتر است که دلیل آن به‌طورقطع، به ویژگی الاستیکی این سیال نظیر ثابت زمان رهایی از تنش ارتباط داده می‌شود که به‌شدت متمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارده بوده و در مقابل دمپینگ جریان انتقالی مقاومت می‌کند. همین مسئله باعث می‌شود که در مقایسه با سیال نیوتنی، زمان میرایی طولانی‌تری داشته باشند.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی رابطه‌ای بین معادلات حاکم بر ضربه قوچ و مشخصات و ویژگی‌های سیال غیرنیوتنی است که با استفاده از مدل فوق همرفتی

۴-۵- پدیده لاین پکینگ

پدیده لاین پکینگ که در واقع، میزان تجاوز از فشار ژوکوفسکی در پشت شیر است، به تأثیرات اصطکاکی ایجاد شده ناشی از ویسکوزیته سیال در جریان آرام در طول لوله ارتباط داده می‌شود و متأثر از تغییرات یک پارامتر بی‌بعد است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۶].

$$k = \frac{F_J}{F_v} = \frac{\rho c v_0 D^2}{D \eta l v_0 / D} = \frac{\rho c D^2}{\eta l} = \frac{c D^2}{\nu l} \quad (29)$$

بنا بر تعریف، این پارامتر بی‌بعد که از نسبت تقسیم نیروی ژوکوفسکی به نیروی ویسکوز حاصل می‌شود، تابعی از جرم مخصوص، سرعت موج فشاری، قطر و طول لوله و همچنین ویسکوزیته سیال است. مدل‌سازی وهبا [۶] در مورد سیالات نیوتنی در طول پدیده ضربه قوچ نشان داد که با افزایش این پارامتر، تغییرات فشار نسبت به فشار ژوکوفسکی بسیار کم و با کاهش این پارامتر، تغییرات فشار نسبت به فشار ژوکوفسکی (تقریباً ۶۰ درصد بیشتر) می‌شود. در مدل‌سازی مطالعه حاضر که بر اساس جدول شماره (۲) انجام شده است، مقدار عددی این پارامتر به‌صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\begin{cases} \rho = 2200 \text{ kg/m}^3 \\ c = 1324.7 \text{ m/s} \\ D = 0.0253 \text{ m} \\ \eta = 0.08918 \text{ Pa.s} \\ l = 36.09 \text{ m} \end{cases} \Rightarrow k = \frac{\rho c D^2}{\eta l} = 56.5934 \quad (30)$$

جهت بررسی مقایسه میزان تأثیرپذیری رفتار سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی از تغییرات این پارامتر بی‌بعد در جریان آرام، سه حالت در مورد هر سیال بررسی قرار گرفت:

جدول ۳- مشخصات حالات مختلف مدل‌سازی در

هر یک از سیالات

شماره حالت‌ها	$k = \frac{\rho c D^2}{\eta l}$
۱	۵۶,۵۹۳۴
۲	۵۶۵,۹۳۴
۳	۵۶۵۹,۳۴

- Proceedings of The Second National Conference on Applied Research in Science and Technology, Faculty of Science, Cumhuriyet University, 2015; 36 (3): DOI 10.1016/j.jnnfm.2013.04.007.
- [5] Vardy A., Brown J. Efficient approximation of unsteady friction weighting functions, *Hydraulic Engineering*. 2004;130(11). DOI 10.1061/(ASCE)0733-9429.
- [6] Wahba E.M. Non-Newtonian fluid hammer in elastic circular pipes: Shear-thinning and shear-thickening effects, *Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2013;198(10). DOI 10.1016/j.jnnfm.2013.04.007.
- [7] Norouzi M., Anaraki Haji Bagheri A., Sedaghat M. H., Shahmardan M. M. Numerical study of three dimensional instability of nonlinear viscoelastic fluid flow around a sphere, *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(12) DOI 20.1001.1.23223278.1402.12.1.4.3. (in Persian).
- [8] Mora S., Manna M. From viscous fingering to elastic instabilities, *Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2012;173(12) DOI 10.1016/j.jnnfm.2012.01.010
- [9] Poole R. J., Alves M. A., Oliveira P. J., Pinho F. T. Plane sudden expansion flows of viscoelastic liquids, *Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2007;146(12) DOI 10.1016/j.jnnfm.2006.11.001
- [10] Shokri H., Kayhani M., Norouzi M., Nonlinear simulation and linear stability analysis of viscous fingering instability of viscoelastic liquids, *Physics of Fluids*. 2017;29(3) DOI 20.1001.1.23223278.1401.11.2.2.6.
- [11] Shokri H., Kayhani M., Norouzi M. Nonlinear simulation of viscoelastic fingering instability, *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(8) DOI 20.1001.1.23223278.1402.12.1.4.3 , (in Persian).
- [12] Bird R. B., Armstrong R., and Hassager O. *Dynamics of Polymeric Liquids*. 1987;1(12).
- [13] Wahba E.M., Runge-Kutta time-stepping schemes with TVD central differencing for the water hammer equations, *Numerical Methods in Fluids*. 2006;52(5) DOI 10.1016/j.jnnfm.2013.04.007.
- [14] Ghidaoui M.S., Zhao M., McInnis D.A. and Axworthy D.H. A review of water hammer theory and practice, *Applied Mechanics Reviews*. 2005;58(49) DOI 10.1115/1.1828050.
- [15] Mandani S., Norouzi M. and Shahmardan

ماکسول، مورد مدل‌سازی قرار گرفته است. معادلات حاکم بر مسئله، نظیر ضربه قوچ کلاسیک، معادلات پیوستگی و مومنتوم بوده و روش عددی مورد استفاده روش عددی تفاضل محدود لاکس فردریش در حالت دو گام زمانی است. در این روش، معادلات پیوستگی و مومنتوم جهت محاسبه مجهولات با استفاده از داده‌های گام زمانی قبلی، به طور هم‌زمان محاسبه می‌شوند. در ادامه تأثیر اعداد دوبرا و رینولدز در نقاط بحرانی لوله نظیر پشت شیر و وسط لوله در قالب نمودار ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پس از مقایسه نتایج به دست آمده با حالت کلاسیک، مشخص گردید که ثابت زمانی رهایی از تنش که از ویژگی‌های مهم سیال ویسکوالاستیک است، ضمن تأثیر بر کاهش تنش‌های برشی وارده، نقش مهمی در افزایش زمان میرایی موج حاصل از ضربه قوچ و در نتیجه طولانی‌تر شدن جریان انتقالی دارد. از طرفی، در مقایسه رفتاری بین سیال نیوتنی و سیال ویسکوالاستیک، مشاهده گردید که در شرایط مشابه، پدیده لاین پکینگ در سیال غیرنیوتنی، نسبت به سیال نیوتنی کمی بیشتر است که دلیل آن به‌طور قطع، به ویژگی الاستیکی این سیال نظیر ثابت زمان رهایی از تنش ارتباط داده می‌شود که به شدت متمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارده بوده و در مقابل دمپینگ جریان انتقالی مقاومت می‌کند. همین مسئله باعث می‌شود که در مقایسه با سیال نیوتنی، زمان میرایی طولانی‌تری داشته باشند.

۷-مراجع

- [1] Streeter V.L., Lai C., *Waterhammer Analysis Including Fluid Friction*, Second Edition. 1993;128(1): DOI 10.1061/TACEAT.0008734.
- [2] Zielke W, *Frequency- Dependent Friction in Transient Pipe flow*, *Basic Engineering*. 1968; 90 (1): DOI 10.1115/1.3605049.
- [3] Tijsseling S., Bergant A. Meshless computation of water hammer, *Proceedings of 2nd IAHR International meeting of the workgroup on cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems*. Timisoara, Romania, 2007; 25 (66): DOI 10.1016/j.jnnfm.2013.04.007.
- [4] Shamlou H., Norooz R. and Mousavifard M. A review of one-dimensional unsteady friction models for transient pipe flow,

- 1402.12.1.4.3
- [22] Holmboe E.L., Rouleau W.T. The effect of viscous shear on transients in liquid lines, *Basic Engineering*. 1967;89(1) DOI 10.1115/1.3609549
- [23] Ghahremani A., Keshavarz A. Implementation of an adaptive thermodynamic fault model to compensate the gas turbine degradation”, *Scientific Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2024;12(1) DOI 20.1001.1.23223278.1402.12.1.9.8. (in Persian).
- [24] Norouzi B., Ahmadi A., Norouzi M. & Lashkarbolouk M., Numerical modeling of the fluid hammer phenomenon of viscoelastic flow in pipes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Springer. 2019;41(543) DOI 10.1007/s40430-019-2046-7.
- [25] Norouzi B., Ahmadi A., Norouzi M. & Lashkarbolouk M. "Investigating the Effect of Reynolds Number on Non-Newtonian Fluid-Hammer in Laminar Flow”, *Scientific Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*. (in Persian).2020;8(2)DOR: 20.1001.1.23223278.1402.12.1.4.3
- [26] Norouzi B., Ahmadi A., Norouzi M. & Lashkarbolouk M. Fluid-Structure Interaction During Viscoelastic Fluid Hammer Phenomenon in the Pipes. *AUT Journal of Mechanical Engineering*. 2023;6(1) DOI 10.22060/ajme.2021.20217.5994.
- [27] Norouzi B., Ahmadi A., Norouzi M. & Lashkarbolouk M. Modeling of an Upper-Convected-Maxwell Fluid Hammer Phenomenon in Pipe System". *AUT Journal of Mechanical Engineering*. 2020;4(1) DOI 10.22060/AJME.2019.15527.5778
- M.M. An experimental investigation on impact process of Boger drops onto solid surfaces *Korea-Australia Rheology*. 2018;30(12) DOI 10.1007/s13367-018-0011-0
- [16] Maxwell J. C. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, CUP Archive, Cambridge, Cambridge university press, 1990. DOI 10.1017/S0007087405337538.
- [17] Belytschko T., Krongauz Y., Organ D. and Fleming M. Meshless methods: an overview and recent developments, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1996;139(12) DOI 10.1016/S0045-7825(96)01078-X.
- [18] Afshar M.H., Lashkarbolouk M. Collocated discrete least-squares (CDLS) meshless method: Error estimate and adaptive refinement, *Numerical Methods in Fluids*. 2008;56(10) DOI 10.1016/j.scient.2012.09.004.
- [19] Norouzi B., Ahmadi A., Lashkarbolouk M. & Norouzi M. Numerical solution of water hammer phenomenon by Collocated Discrete Least Squares method. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2018;25(3) DOI 10.22069/jwsc.2018.14532.2936.
- [20] S.Alimohammadian, M.Hashemabadi, S. Ghasemlooy, H. Parhizkar & J. Pirkandi, Investigation of effect of geometric, *Scientific Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*.2023;11(2)(in Persian).DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.2.2.6>
- [21] Moayyedi M.K., Bigdeloo F., Direct Numerical Simulation of Single Layer Quasi-Geostrophic Ocean Circulation, *Scientific Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2024;12(1) (in Persian).DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278>.