

بررسی تأثیر عدد رینولدز بر ضربه قوچ سیالات غیر نیوتنی در جریان آرام

محسن لشکر بلوک^۴
دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه گلستان

احمد احمدی^۲
دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه صنعتی شاهرود
محمود نوروزی^۳
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی شاهرود
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۱۶)

بنفشه نوروزی^۱
مهندسی عمران
موسسه آموزش عالی لامعی گرگانی

چکیده

در پژوهش حاضر، حساسیت رفتار دو گروه از سیالات ویسکوالاستیک غیر نیوتنی نسبت به تغییرات عدد رینولدز، با یک سیال نیوتنی مورد مقایسه قرار گرفته است. سیالات غیر نیوتنی مورد نظر، یک پلیمر فوق همرفتی ماکسول و یک محلول اولدروید-بی را شامل می‌شود که در شرایط رخداد پدیده ضربه قوچ، در لوله در جریان هستند. این مقایسه در شرایط رخداد پدیده ضربه قوچ، در لوله در جریان آرام صورت می‌گیرد. معادلات حاکم بر مساله را معادلات ناویر-استوکس و معادلات رئولوژی سیالات ویسکوالاستیک تشکیل می‌دهد. بی‌بعد سازی معادلات، نشان می‌دهد که عددهای رینولدز و ماخ، پارامترهای بی‌بعد مشترک در معادلات سه نوع سیال ذکر شده هستند. ویسکوزیته سیالات به‌عنوان یک عامل اصطکاکی، سبب می‌شود که عدد رینولدز و تغییرات آن، نقش مهمی در نوسانات و زمان میرایی موج حاصل از جریان گذرای ضربه قوچ داشته باشد. در مدل‌سازی معادلات، از روش عددی دو گام زمانی لاکس-فردریشک (LxF) استفاده می‌شود. جهت اعتبار سنجی مدل، از نتایج آزمایش صورت گرفته توسط هولمبو و رولتو برای یک سیال نیوتنی استفاده و مشخص گردید که جواب‌های مدل پیشنهادی با دقت بالای ۹۹ درصد بر نتایج مدل عددی زلیک و وهبا منطبق است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که ویژگی‌های ویسکوالاستیک سیالات، نظیر رابطه غیرخطی تنش و کرنش، دارا بودن ثابت زمانی رهایی از تنش و ... باعث کاهش تأثیرپذیری آنها در مقایسه با سیالات نیوتنی می‌شود، به نحوی که بیشترین میزان حساسیت در برابر تغییرات رینولدز در سیال نیوتنی و کمترین میزان، در سیال فوق همرفتی ماکسول که ویژگی‌های ویسکوالاستیک قوی‌تری در معادلات آن، دخالت دارد، مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ضربه قوچ، سیال ویسکوالاستیک، مدل فوق همرفتی ماکسول، اولدروید-بی، روش عددی دو گام زمانی لاکس-فردریشک

Investigating the Effect of Reynolds Number on Non-Newtonian Fluid-Hammer in Laminar Flow

B. Norouzi
Civil Eng.,
Lamei Gorgani higher Edu.
Inst.

A. Ahmadi
Faculty of Civil eng.,
Shahrood univ. of tech.

M. Norouzi
Faculty of Mechanical
Eng.,
Shahrood univ. of tech.

M. lashkarblook
Faculty of Civil
Eng.,
Golestan university

(Received: 24/July/2019 ; Accepted:07/November/2019)

Abstract

In the present study, the sensitivity of the behavior of an Upper-Convected-Maxwell polymer and an Oldroyd-B fluid are compared to a Newtonian fluid. The governing equations are the Navier - Stokes equations and viscoelastic fluid equations. These equations are non-dimensionalized and it is found that Reynolds and Mach numbers are only the dimensionless parameters that exists in all three mentioned fluids. The viscosity of fluids as a friction factor causes that Reynolds number and its changes play an important role in the oscillations and also the attenuation of the fluid transient during Fluid hammer phenomenon. The numerical method used is a two-step variant of the Lax-Friedrichs (LxF) method. The results show that the viscoelastic properties of fluids, such as the non-linear relationship of stress and strain, relaxation time and ..., reduce their variability compared to Newtonian fluid. Finally, the maximum sensitivity to Reynolds variations in Newtonian fluid and the minimum amount is observed in the Upper-Convected-Maxwell polymer that there are strong viscoelastic properties in its equations.

Keywords: Fluid Hammer Phenomenon, Viscoelastic Fluid, Upper-Convected-Maxwell Polymer, Oldroyd-B Fluid, Two-Step Variant Of The Lax-Friedrichs (Lxf)

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): norouzi@lameigorgani.ac.ir

۲- دانشیار: a.ahmadi@shahroodut.ac.ir

۳- دانشیار: m.norouzi@shahroodut.ac.ir

۴- استادیار: mlblook@iust.ac.ir

فهرست علائم

علائم انگلیسی

De	عدد دبرا
E	مدول بالک ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
e	ضخامت لوله (m)
H	هد فشار (m)
M	عدد ماخ
r	فاصله شعاعی از مرکز لوله (m)
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
\bar{v}	سرعت متوسط جریان (ms^{-1})
v	سرعت اولیه جریان (ms^{-1})
r	راستای شعاعی لوله
z	راستای محور مرکزی لوله

علائم یونانی

η	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
λ	ثابت زمانی رهایی از تنش یا آرامش (s)
ν	نسبت پواسون
ρ	جرم مخصوص سیال (kgm^{-3})
τ	تنش‌های برشی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

بالانویس‌ها

n	گام زمانی قبل
$n+1$	گام زمانی بعد

زیرنویس‌ها

f	سیال
p	پلیمر حل‌شونده
s	حلال نیوتنی

۱- مقدمه

کاربرد گسترده سیالات ویسکوالاستیک در علوم مهندسی، صنایع شیمیایی، پلیمر و. باعث شده که این گروه مهم از سیالات غیرنیوتنی از جنبه‌های مختلف، مورد تحقیق و بررسی قرار گیرند. در مقاله حاضر، تغییرات رفتار سیالات فوق همرفتی ماکسول و سیالات اولدروید- بی که نوع خاصی از سیالات ویسکوالاستیک هستند، در شرایطی مورد مقایسه قرار می‌گیرد که در حین جریان داشتن در طول لوله، به دلایلی نظیر قطع جریان برق، بسته شدن شیر، خرابی پمپ و یا هر عامل پیش‌بینی‌نشده‌ای به‌طور ناگهانی متوقف شوند. جریان گذرای ایجادشده در اثر توقف ناگهانی جریان، در این مقاله، در حالت به‌کارگیری سیال فوق

همرفتی ماکسول "ضربه قوچ سیال ماکسولی" و در حالت به‌کارگیری سیال اولدرویدی "ضربه قوچ سیال اولدروید- بی" نامیده می‌شود. در واقع، در پژوهش حاضر می‌بایست، رابطه‌ای بین دو حوزه جریان‌های گذرا در لوله و نیز معادلات رئولوژی سیالات ویسکوالاستیک غیرنیوتنی برقرار گردد. بر این اساس، موضوع مورد نظر، از هر دو منظر باید مورد بررسی قرار گیرد. به‌طور کلی سیالات ویسکوالاستیک، گروهی از سیالات غیرنیوتنی هستند که به‌طور توأمان خواص ویسکوز و الاستیک را دارا می‌باشند. از آنجا که در سیالات، تنش تابعی از نرخ برش و در جامدات تابعی از خود برش است، لذا این گروه از سیالات، دارای خواص هم‌زمان جامد و سیال هستند. رفتار دوگانه این سیالات، به‌دلیل برداشتن ویژگی‌های ویسکوز (مایع گونه) و الاستیک (جامدگونه) به‌طور هم‌زمان، باعث شده که تاکنون از جنبه‌های مختلفی مورد مطالعه قرار گیرند. مارا و مورا و مونا [۱] با در نظر گرفتن مدل ماکسول^۱ برای سیال ویسکوالاستیک جابه‌جاکننده، تأثیر خاصیت الاستیک این نوع سیال را مورد بررسی قرار دادند. پول و همکاران [۲] 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. خون به‌عنوان یکی از سیالات غیر نیوتنی شناخته می‌شود که در گروه سیالات ویسکوالاستیک طبقه‌بندی می‌شود. عباس نژاد و همکاران [۳] در مطالعه‌ای به بررسی عددی اندرکنش جریان ضربانی خون با شریان ویسکوالاستیک پرداختند. آنها برای مدل‌سازی سیال خون و دیواره شریان، به‌ترتیب از مدل‌های غیرنیوتنی کاریو و رئولوژیکی ماکسول تعمیم‌یافته استفاده نمودند. در تحقیق آنها، اثرات شدت گرفتگی روی پروفیل سرعت، توزیع فشار، تنش برشی و جابه‌جایی دیواره در شریان ویسکوالاستیک بررسی شده و با شریان الاستیک مقایسه گردید. از نتایج آنها می‌توان به این مورد اشاره نمود که افزایش شدت گرفتگی منجر به زیاد شدن طول گردابه‌ها، تنش برشی دیواره و شیب پروفیل سرعت در نواحی بعد از گرفتگی می‌شود. جلالی و همکاران [۴] با استفاده از معادله متشکله گزیکس به مدل‌سازی سه‌بعدی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در حال توسعه

به کار گرفته شده است. تاپسلینگ [۱۳] روشی متفاوت را در محاسبات ضربه قوچ به کار برد. روش او بر 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. 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.

شاملو و همکاران [۱۴] در مطالعه‌ای به بررسی یک‌بعدی جریان‌های انتقالی در لوله‌ها با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک غیردائمی پرداختند. آنها در این مقاله یک مدل شبه دائمی و ۴ مدل اصطکاک غیردائمی را برای جریان لوله ای انتقالی ارائه دادند و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده را با مدل اصطکاک شبه دویعدی توسط زیلک [۱۵] و واردی و براون [۱۶] برای ضربه قوچ با اعداد رینولدز در حالات جریان مختلف آرام، آشفته و انتقالی مورد مقایسه قرار دادند و نشان دادند که مدل زیلک با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برازش مناسب‌تری نمایش می‌دهد. آنچه در همه مطالعات انجام شده، مشهود است، تمایل پژوهشگران به ایجاد تغییر در شرایط سازه و بررسی رفتار موج فشاری پس از اعمال این تغییرات، در نقاط مختلف لوله نظیر پشت شیر و یا نقطه وسط لوله است، در واقع، به نظر می‌رسد، مدل‌سازی پدیده ضربه قوچ از دیدگاه تغییر در شرایط نوع سیال، تا حد زیادی مغفول مانده است. این، در حالی است که علم رئولوژی سیالات، رفتارهای متفاوت و گاهی پیچیده‌ای را از انواع سیالات غیر نیوتنی نشان می‌دهد. با توجه به کاربرد گسترده این سیالات، بررسی احتمال وقوع پدیده ضربه قوچ در لوله در شرایطی که این سیالات در لوله در جریان هستند، ضروری به نظر می‌رسد. جستجوهای صورت گرفته در این خصوص، نشان می‌دهد که بررسی این موضوع، به مطالعات کمی محدود می‌شود که در آنها اثرات سیال غیرنیوتنی در طول پدیده ضربه قوچ در طول لوله مورد توجه قرار گرفته است. وهبا در مطالعه خود، از یک سیال غیرنیوتنی از نوع پاورلاو در لوله استفاده نمود و تأثیر

در کانال‌های مستطیلی پرداختند. در مطالعه آنها، گسسته سازی معادلات حاکمه روی یک شبکه جابه‌جا شده و با استفاده از روش تفاضل محدود صورت پذیرفته است. جهت حل معادلات نیز، روش تراکم‌پذیری مصنوعی که در نهایت منجر به حل صریح معادلات می‌شود به کار گرفته شده است. نتایج به دست آمده توسط آنها نشان داد که در مدل‌سازی عددی جریان آرام سیال ویسکوالاستیک در یک کانال مستطیلی ناحیه توسعه‌یافته از هماهنگی خوبی با دیگر نتایج گزارش شده در این زمینه برخوردار می‌باشد کیهان پور و قاسمی [۵] در مطالعه‌ای به تحلیل عددی نانوذرات جریان غیرنیوتنی خون پرداختند. معادلات حاکم در تحقیق آنها را معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی، ماکسول و غلظت برای سیال غیرنیوتنی تشکیل می‌داد. در مطالعه آنها، رگ به صورت سه‌بعدی و با دیواره صلب در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از پژوهش آنها نشان داد که غلظت نانوذرات سیال غیر نیوتنی خون در دیواره بالایی مویرگ در زمان‌های بالا به یک مقدار پایا می‌رسد. همچنین در تحلیل نتایج، مشخص گردید که فرض غیرنیوتنی بودن سیال خون تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج به دست آمده دارد. اما آنچه در مقاله حاضر به آن پرداخته می‌شود، به کارگیری این گروه سیالات در شرایط رخداد جریان انتقالی ناشی از ضربه قوچ است. این جریان‌ها که در گروه جریان‌های میرای غیردائمی طبقه‌بندی می‌شوند، 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 گرفتند. از آن پس، مطالعات متعددی با محوریت پدیده ضربه قوچ توسط پژوهشگران انجام گرفت که از این میان، می‌توان به مواردی نظیر بررسی اثرات اصطکاک غیرماندگار در طول لوله [۶]، اثرات وجود روزه در لوله و نشت جریان [۷]، تأثیر جنس لوله بر میرایی جریان انتقالی [۸]، بررسی کاویتاسیون و امکان جدایی ستون سیال [۹]، مدل‌سازی اثرات اندرکنش سیال - سازه [۱۰]، ارتعاش سنجی جداره لوله در کوپلینگ‌های مختلف [۱۱]، مدل‌سازی شبه دویعدی معادلات حاکم [۱۲] و... طی وقوع این پدیده اشاره نمود که وجه اشتراک همه مطالعات فوق، جریان داشتن سیال نیوتنی آب درون لوله و مدل‌سازی پدیده ضربه قوچ (چکش آبی) در حالات مختلف آن می‌باشد. روش‌های عددی مختلفی نیز برای تحلیل این نوع جریان انتقالی در لوله

$$\rho \left[\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r \tau_{rz})}{\partial r} \right] = 0 \quad (2)$$

در معادلات فوق، H هد فشار، t زمان، v_z سرعت محوری، v_r سرعت شعاعی، τ_{rz} تنش برشی، z محور مرکزی لوله، r فاصله شعاعی از مرکز لوله، p فشار و ρ جرم مخصوص سیال و C سرعت موج است که به صورت معادله (۳) محاسبه می‌شود.

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

که E_f مدول بالک سیال، E_p مدول الاستیک لوله، e ضخامت و D قطر لوله هستند. لازم به ذکر است که در مسائل ضربه قوچ، از ترم‌های همرفتی به دلیل کوچکی مقدار عددی صرف نظر شده و سرعت شعاعی جریان نیز در جداره لوله و محور مرکزی، صفر در نظر گرفته می‌شود [۲۰-۲۱]. با انتگرال‌گیری از معادلات (۱) و (۲)، صورت کلی معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر ضربه قوچ ویسکوالاستیک در حالت یک‌بعدی حاصل می‌گردد:

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

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} \tau_{rz} \Big|_{r=R} = 0 \quad (5)$$

که در معادلات (۴) و (۵)، H هد فشاری متوسط، C سرعت موج، R شعاع لوله و $\tau_{rz} \Big|_{r=R}$ میانگین تنش‌های برشی محوری وارد بر جداره لوله هستند. \bar{V} سرعت متوسط جریان در لوله و H هد فشاری متوسط هستند که به صورت معادله (۶) تعریف می‌شود:

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int v_z dA \quad (6)$$

$$H = \frac{1}{A} \int h dA$$

که در معادلات فوق، \bar{V} سرعت متوسط جریان، v_z سرعت محوری، h هد فشاری و H هد فشاری متوسط تعریف می‌شوند.

بسته شدن ناگهانی شیر را بر تاریخچه فشار و پروفیل سرعت در نقاط پشت شیر و نقطه وسط لوله بررسی نمود و این پدیده را "ضربه قوچ سیال غیرنیوتنی" نامید و نتیجه گرفت که جریان غیر ماندگار لایه‌ای به شدت تحت تأثیر اثرات غیرنیوتنی سیال، شامل رفتار نازک شدگی برش و ضخیم شدن برش، قرار می‌گیرد [۱۷].

مجد در مطالعه‌ای به مدل‌سازی جریان غیردائمی حاوی سیال غیرنیوتنی پرداخت و نتیجه گرفت که به‌کارگیری سیال غیرنیوتنی تأثیرات قابل توجهی در تغییرات تاریخچه زمانی فشار و همچنین توزیع پروفیل سرعت سیال می‌گذارد، از آن جمله می‌توان به اثر افزایش فشار و لاین پکینگ در اثر افزایش نازک شدگی برش اشاره نمود [۱۸]. اما در هیچ یک از این مطالعات نیز به بررسی تأثیر عدد رینولدز بر جریان سیال غیر نیوتنی و تفاوت آن با حالت نیوتنی پرداخته نشده است. از این‌رو در پژوهش حاضر، برای نخستین بار دو گروه مهم از خانواده این سیالات، انتخاب و میزان تأثیرپذیری آنها از تغییرات رینولدز با سیالات نیوتنی مورد مقایسه قرار گرفته است. در ابتدا معادلات جریان غیرماندگار در حالت کلی نوشته شده و سپس از روابط مدل اولدرودیدی و نیز مدل فوق همرفتی ماکسول برای جایگذاری مقادیر تنش در معادله مومنتوم استفاده می‌شود. در ادامه، روش عددی تفاضل محدود لاکس-فردریشک برای گسسته سازی معادلات، معرفی و پس از بی‌بعد سازی معادلات، تأثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در نقاط بحرانی لوله برای سیالات ذکر شده بررسی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در قالب نمودار، ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- فرمول‌بندی مساله

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان‌های انتقالی، در حالت کلی، معادلات پیوستگی و مومنتوم هستند که در سیستم مختصات استوانه‌ای به صورت معادلات (۱) و (۲) تعریف می‌شوند [۱۹]:

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

۲-۲- معادلات ساختاری

$$\eta = \eta_s + \eta_p \quad (11a)$$

$$\theta = \frac{\eta_s}{\eta_s + \eta_p} \lambda = (1 - \beta) \lambda \quad (11b)$$

که β نسبت ویسکوزیته حل شونده به محلول است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\beta = \eta_p / \eta \quad (12)$$

با در نظر گرفتن معادلات (۱۰)، تنش های حلال نیوتنی و حل شونده پلیمری در سیال اولدروید- بی به صورت روابط زیر ساده می شود:

$$\tau_{rz}|_{r=R} = \tau_{srz}|_{r=R} + \tau_{prz}|_{r=R} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tau_{srz}|_{r=R} &= \eta_s (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)_{rz} \\ &= \eta_s \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \Big|_{r=R} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\tau_{prz}|_{r=R} + \lambda \tau_{prz}^{\nabla} \Big|_{r=R} = \eta_p \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \Big|_{r=R} \quad (15)$$

در معادلات فوق، τ_{rz} نمایانگر تنش های برشی محوری وارد بر جداره لوله، τ_{srz} ، تنش های برشی در بخش حلال نیوتنی، τ_{prz} ، تنش های برشی در بخش حل شونده پلیمری v_z سرعت محوری، λ ثابت زمانی رهایی از تنش، η ویسکوزیته سیال و R شعاع لوله می باشند. با در نظر گرفتن پروفیل سرعت پوازی برای جریان آرام در لوله [۲۲] و جایگذاری مقادیر مناسب در معادلات (۱۴) و (۱۵) تنش برشی $\tau_{rz}|_{r=R}$ به دست آورده می شود. بنابراین، معادلات حاکم بر ضربه قوچ سیال اولدروید-بی به صورت زیر استخراج می شود:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} (\tau_{srz}|_{r=R} + \tau_{prz}|_{r=R}) = 0 \quad (17)$$

$$\tau_{srz}|_{r=R} = -\eta_s \cdot \frac{4\bar{V}}{R} \quad (18)$$

معادله ساختاری معادله ای است که روابط بین تنش و برش یک ماده را مشخص می کند. یکی از معروف ترین روش های تبیین رفتار سیالات ویسکوالاستیک، خانواده مدل های اولدروید است. اصولاً این مدل، یک بسط خطی از تانسور تنش است که حاوی ترم های کوادراتیک گرادیان سرعت است. مدل اولدروید بر اساس یک فرض خاص از کرنل رفتار ویسکوالاستیک به دست آمده و یک مدل تجربی محسوب می شود. این مدل، برای مدل سازی محلول های پلیمری دایلو^۱ و به ویژه سیالات با گر^۲ مناسب است. فرم کلی مدل اولدروید- بی به صورت زیر تعریف می شود [۱۹]:

$$\tau + \lambda \tau^{\nabla} = \eta \left(\dot{\gamma} + \theta \dot{\gamma}^{\nabla} \right) \quad (7)$$

که τ تانسور تنش، η ویسکوزیته، λ زمان آسودگی از تنش، θ زمان تأخیر و ∇ اپراتور مشتق فوق همرفتی است که در حالت کلی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{A}^{\nabla} = \frac{\mathbf{DA}}{\mathbf{Dt}} - \left((\nabla \mathbf{v})^T \cdot \mathbf{A} + \mathbf{A} \cdot (\nabla \mathbf{v}) \right). \quad (8)$$

در رابطه فوق، A یک تانسور دلخواه است. همچنین در معادله (۷)، $\dot{\gamma}$ نرخ کرنش است که معادل رابطه زیر است:

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

مدل اولدروید- بی معمولاً برای محلول های پلیمری که در آن حل شونده هایی از مدل فوق همرفتی ماکسول با حلال های نیوتنی ترکیب می شوند، به کار برده می شود؛ بنابراین، تنش محلول در مدل اولدروید-بی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\tau = \tau_p + \tau_s \quad (10a)$$

$$\tau_p + \lambda \tau_p^{\nabla} = \eta_p \dot{\gamma} \quad (10b)$$

$$\tau_s = \eta_s \dot{\gamma} \quad (10c)$$

در روابط فوق، اندیس های s و p به ترتیب به حلال نیوتنی و حل شونده پلیمری نسبت داده می شود؛ بنابراین، معادله (۷)، با در نظر گرفتن روابط زیر تکمیل می شود:

می‌شود که در آن، پارامتر نسبت ویسکوزیته $\beta=1$ است و چنانچه از اثر پلیمر حل‌شونده ویسکوالاستیک صرف‌نظر شود، اثر اعداد دبوراً و نسبت ویسکوزیته به‌طور هم‌زمان حذف و معادلات ضربه قوچ کلاسیک سیال نیوتنی به دست می‌آید که تنها متأثر از اعداد ماخ و رینولدز هستند که دز ذیل نوشته شده است:

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} + \frac{32}{\text{Re}} M.V^* = 0 \quad (27)$$

بنابراین، در یک محلول نیوتنی، تنها اعداد تأثیرگذار بر معادلات، عدد ماخ و عدد رینولدز هستند که در شرایط نظر گرفتن اصطکاک ناشی از تنش، در معادله مومنتوم ظاهر می‌شوند. مقایسه معادلات بی‌بعد حاکم بر هر سه نوع سیال اولدروید-بی، فوق همرفتی ماکسول و نیوتنی نشان می‌دهد که تنها پارامترهای بی‌بعد مشترک در این معادلات، عددهای رینولدز و ماخ هستند که معمولاً در محاسبات، از بررسی تأثیر عدد ماخ به‌دلیل کوچکی بیش از حد (کمتر از ۰/۰۰۰۱) صرف‌نظر می‌شود اما بررسی تأثیر عدد رینولدز به‌دلیل دخالت ویسکوزیته سیالات به‌عنوان یک عامل اصطکاکی و نقش آن بر میرایی جریان انتقالی و نیز نوسانات موج فشاری حاصل از رخداد ضربه قوچ حائز اهمیت است. در مورد عدد دبوراً که در برگیرنده ویژگی زمان رهایی از تنش یک سیال ویسکوالاستیک است، لازم به ذکر است که این عدد، به‌صورت نسبت زمان رهایی از تنش به زمان مشخصه یک پدیده تعریف می‌شود، زمان مشخصه معمولاً از حاصل تقسیم یک مشخصه طولی به سرعت جریان محاسبه می‌گردد.

$$De = \frac{\lambda}{D/v_0} \quad (28)$$

که v_0 سرعت جریان در حالت دائمی، D قطر لوله و λ زمان رهایی از تنش سیال ویسکوالاستیک است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{\eta}{G} \quad (29)$$

در رابطه فوق، η ویسکوزیته و G مدول صلبیت یک ماده تعریف می‌شود. زمان رهایی از تنش برای گازها و مایعات نیوتنی عددی بسیار کوچک (کوچک‌تر از ۰/۰۰۰۱)

$$\tau_{prz} \Big|_{r=R} + \lambda \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial t} = -\eta_p \frac{4\bar{V}}{R} \quad (19)$$

در روابط فوق، چنانچه از بخش سیال نیوتنی به‌عنوان حلال صرف‌نظر شود، روابط سیال فوق همرفتی ماکسول و چنانچه از بخش حل‌شونده پلیمری صرف‌نظر شود، روابط سیال نیوتنی به دست می‌آید.

۲-۳- بی‌بعد سازی معادلات

متغیرها و پارامترهای بدون بعد به‌کار رفته جهت بی‌بعد سازی معادلات عبارت‌اند از:

$$V^* = \frac{V}{v_0}, H^* = \frac{H}{cv_0/g}, z^* = \frac{z}{D}, \quad (20)$$

$$t^* = \frac{t}{D/c}, \tau^* = \frac{\tau}{\rho cv_0}$$

$$De = \frac{\lambda}{D/v_0}, \beta = \frac{\eta_p}{\eta_p + \eta_s}, \quad (21)$$

$$M = \frac{v_0}{c}, \text{Re} = \frac{\rho v_0 D}{\eta_p + \eta_s}$$

که v_0 سرعت جریان در حالت دائمی، c سرعت صوت، D قطر لوله، H هد موج فشار جریان، τ تنش برشی، ρ جرم مخصوص سیال، λ زمان رهایی از تنش، η_p ویسکوزیته حل‌شونده، η_s ویسکوزیته حلال، De عدد دبوراً، β عدد نسبت ویسکوزیته، M عدد ماخ و Re عدد رینولدز هستند. بنابراین، معادلات بی‌بعد حاکم بر ضربه قوچ سیال اولدروید-بی را می‌توان به‌صورت زیر معرفی نمود:

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} - 4(\tau_{sz}^* \Big|_{r=R} + \tau_{prz}^* \Big|_{r=R}) = 0 \quad (23)$$

$$\tau_{sz}^* \Big|_{r=R} = \frac{-8}{\text{Re}} M.V^*.(1-\beta) \quad (24)$$

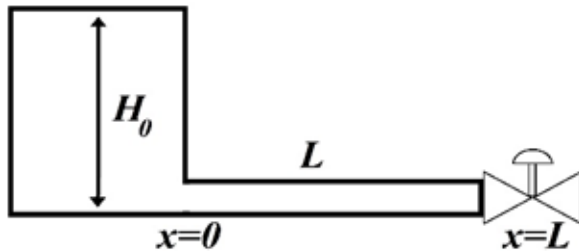
$$\tau_{prz}^* \Big|_{r=R} + \frac{De}{M} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} = -8B \cdot \frac{V^*}{\text{Re}} M \quad (25)$$

در معادلات بی‌بعد فوق، چنانچه اثر حلال نیوتنی حذف گردد، معادلات بی‌بعد سیال فوق همرفتی ماکسول ظاهر

پایداری این روش نیز به صورت $\frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1$ تعریف می شود که c سرعت موج است.

۲-۵- شرایط مرزی

در شکل ۱، نمایی از سیستم مورد بررسی نشان داده می شود.



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

شکل ۱ یک سیستم کلاسیک شامل شیر-لوله و مخزن را نشان می دهد که در اثر بسته شدن آنی شیر انتهای لوله، مقادیر فشار و سرعت در طول لوله دچار نوسان می گردند. در رخداد پدیده ضربه قوچ، فرض می شود، 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 پائین دست و جاری شدن آب در داخل لوله، تغییرات ارتفاع آب مخزن، ناچیز، باشد. لذا شرط مرزی بالادست جریان، مطابق معادله (۳۳) در نظر گرفته می شود.

$$h_1 = H_0 \quad (33)$$

که در آن، h_1 ، هد مربوط به گره متصل به مخزن، می باشد. 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 می شود. بنابراین، شرط مرزی پایین دست، در مورد فشار و سرعت، مطابق معادله (۳۴) لحاظ می گردد.

$$v_n = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (34)$$

که در آن، v_n و h به ترتیب، سرعت و هد فشار مربوط به گره متصل به شیر می باشند.

و برای جامدات الاستیک عدد بزرگی (بزرگتر از ۱۰۰ ثانیه) است. سیالات خانواده ویسکوالاستیک (سیال فوق همرفتی ماکسول و سیال اولدریود-بی) در واقع، حد واسطی بین جامدات و سیالات محسوب می شوند. هرچه ویسکوزیته یک ماده کمتر و مدول صلبیت آن بیشتر باشد، چون زمان رهایی از تنش در آنها کمتر می شود، آن ماده رفتاری شبیه به رفتار سیال دارد و برعکس.

۲-۴- روش عددی

در این تحقیق، از روش دو گام زمانی لکس-فردریشک استفاده می شود. به طور کلی، در روش های چندگام زمانی، از معادلات تفاضل محدود با مراحل زمانی مختلف استفاده می شود [۲۳]. در این روش ها، از شبکه جابه جا شده استفاده می شود. نقاط شبکه جابه جا شده را می توان به هر دو شکل زیر تعریف نمود:

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

$$x_{i+\frac{1}{2}} = x_i + \frac{1}{2}\Delta x \quad i=1, 2, \dots, M-1 \quad (30)$$

در روش های چندگامی، اولین گام در نقطه میانی اعمال می شود. گسسته سازی در راستای بعد زمانی نیز در محدوده $[0, t_{max}]$ توسط گام های زمانی تا رسیدن به گام نهایی صورت می پذیرد:

$$t^0 = 0, t^{n+1} = t^n + \Delta t \quad n=1, 2, \dots, N-1 \quad (31)$$

روش های چندگامی از معادلات تفاضل محدود با مراحل زمانی مختلف استفاده می کند. روش به کاررفته در این تحقیق، دو گام زمانی می باشد، یعنی هرگام زمانی به دو نیم گام زمانی تقسیم می شود:

$$t^{n+\frac{1}{2}} = t^n + \frac{1}{2}\Delta t \quad (32)$$

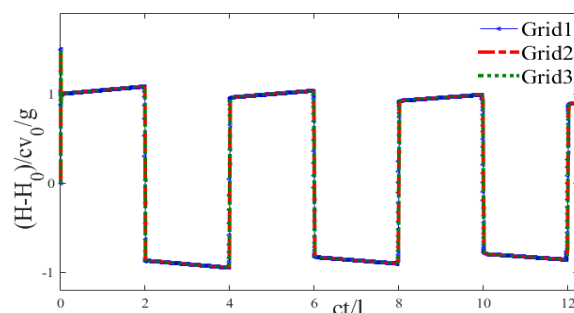
در این روش ها علیرغم اینکه محاسبات کمی پیچیده می شود و زمان عملیات نیز تا حدودی افزایش می یابد، اما نتایج به دست آمده از همگرایی و دقت مناسب تری برخوردار می شود. جهت بررسی جزئیات گسسته سازی معادلات حاکم با این روش می توان به مرجع [۲۳]. مراجعه نمود. به طور کلی، در روش دو گام زمانی لکس فردریشک، محاسبات در گام زمانی اول روی مش شطرنجی انجام می شود و با برداشتن گام زمانی دوم، مقدار تابع در گام زمانی بعد روی مش اصلی محاسبه می گردد [۲۴]. شرط

۶-۲- مشخصات شبکه محاسباتی

در مدل‌سازی یک‌بعدی مطالعه حاضر، بهترین حالت پایداری به ازای عدد کورانت ۰/۹۹ حاصل گردید. در جدول ۱ اندازه گام‌های مکانی برای سه شبکه‌بندی مختلف به صورت بی‌بعد نشان داده می‌شود.

جدول (۱): اندازه گام‌های مکانی بی‌بعد برای سه شبکه‌بندی

شماره شبکه بندی	تعداد سلول‌ها در شبکه	$\frac{\Delta x}{l}$	زمان اجرا (GHz.s) $cpu \times t$
۱	۱۰۰۰	۰/۰۰۱	۱۲/۵
۲	۲۰۰۰	۰/۰۰۰۵	۲۰
۳	۳۰۳۰	۰/۰۰۰۳۳	۲۷/۵



شکل (۲) تاریخچه زمانی فشار در شبکه‌بندی‌های مختلف در نقطه پشت شیر

شکل ۲ تاریخچه زمانی فشار در پشت شیر را برای سه شبکه‌بندی مختلف را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نتایج شبکه‌بندی بسیار به هم نزدیک است. با در نظر گرفتن cpu کامپیوتر استفاده شده که معادل ۲/۵ گیگاهرتز است و زمان اجرای هر شبکه‌بندی، یک معیار زمانی برای اجرای هر شبکه به دست می‌آید. به‌طور معمول در چنین مواردی، جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی و نیز حفظ دقت محاسبات، از شبکه‌بندی متوسط استفاده می‌شود. بنابراین شبکه‌بندی دوم در جدول ۱ در مدل‌سازی مورد نظر به کار گرفته می‌شود که بر اساس آن، طول لوله به ۲۰۰۰ قسمت، تقسیم می‌شود.

۷-۲- اعتبارسنجی مدل

فقدان اطلاعات آزمایشگاهی در زمینه به‌کارگیری سیالات ویسکوالاستیک در شرایط رخداد ضربه قوچ در سیستم لوله، سبب شد که به‌منظور اعتبارسنجی مدل و روش پیشنهادی، نتایج حاصل از اجرای مدل بدون دخالت ویژگی‌های ویسکوالاستیک که معادل به‌کارگیری سیال نیوتنی در لوله می‌باشد، با نتایج عددی وهبا (یک‌بعدی) [۲۰] و همچنین روش عددی زیلیک [۱۵] در حالت اصطکاک ثابت^۱ که بر اساس آزمایش معتبر هولمبو و رولنو [۲۵] انجام شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. اطلاعات آزمایش در جدول ۲ ثبت گردیده است.

شکل ۳، نشان می‌دهد که بین نتایج مدل پیشنهادی برای تحلیل رفتار سیالات غیر نیوتنی مورد بحث، در حالی که از ویژگی‌های غیرنیوتنی سیال صرف‌نظر گردد و همچنین نتایج روش‌های عددی معتبری مانند روش زیلیک و روش عددی وهبا، برازش مطلوبی مشاهده می‌شود. جهت برآورد دقیق میزان برازش و تحلیل خطای محاسباتی، از معیار مجموع مربعات خطا استفاده و مشخص گردید که نتایج جواب‌های مدل پیشنهادی با دقت بالای ۹۹ درصد بر نتایج مدل عددی زیلیک و وهبا منطبق است.

۸-۲- مدل‌سازی عددی

جهت حصول به شرایط فیزیکی، از محلول پلیمری که مشخصات ظاهری آن، از جدول ۳، اقتباس گردیده است، در مدل‌سازی عددی ضربه قوچ در سیستم شیر لوله و مخزن استفاده می‌شود.

جدول (۲): مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله [۲۴]

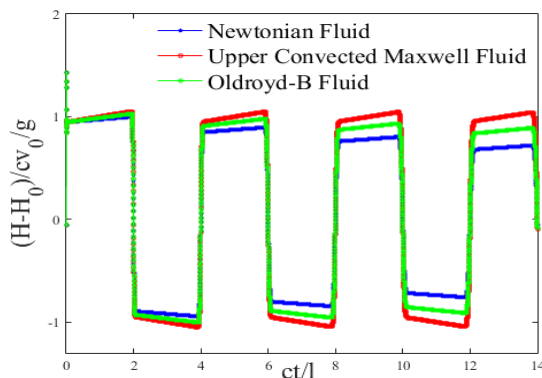
۳۶/۰۹	طول لوله (m)
۰/۱۳	سرعت متوسط (m/s)
۱۳۲۴	سرعت موج (m/s)
۰/۰۲۵۴	قطر داخلی لوله (m)
۰/۰۳۴۸۳	ویسکوزیته دینامیکی (pa.s)
۸۷۸	جرم مخصوص سیال (kg/m^3)
۸۰	عدد رینولدز

۳- نتایج مدل سازی

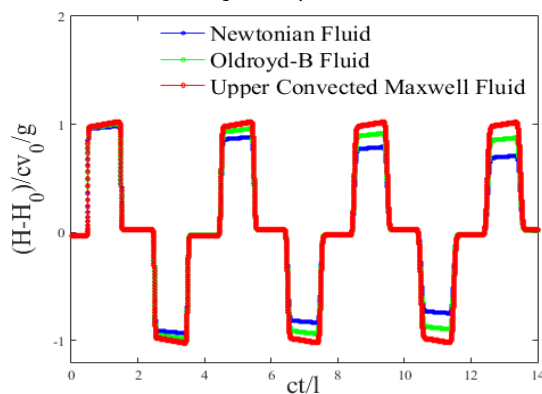
نتایج مدل سازی ضربه قوچ در سیالات نیوتنی، فوق همرفتی ماکسول و نیز اولدرویید-بی با در نظر گرفتن رینلدز ثابت و متغیر و بررسی میزان تأثیرپذیری رفتار سیالات مذکور از این تغییرات، در دو بخش ارائه می گردد.

۳-۱- مقایسه رفتار موج فشاری ناشی از ضربه قوچ جریان آرام در سیالات مختلف در رینلدز ثابت

پلیمر انتخابی در شرایط رخداد ضربه قوچ در سیستم شیر-لوله و مخزن، قرار می گیرد و رفتار آن در سه حالت اولدرویید-بی ($De=9/6, \beta=0/6$)، فوق همرفتی ماکسول ($De=9/6, \beta=1$) و نیوتنی ($De=0, \beta=0$) در شرایط جریان آرام در لوله و رینلدز ثابت معادل $Re=80$ مورد مدل سازی قرار می گیرد.



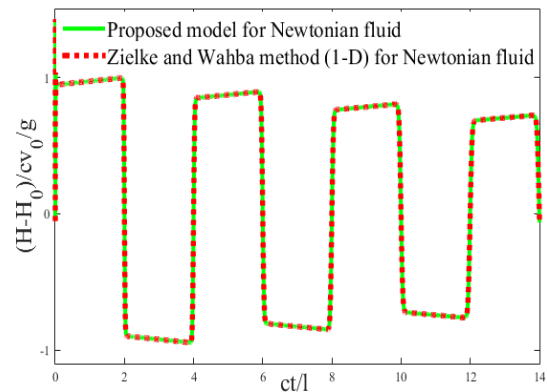
الف- پشت شیر



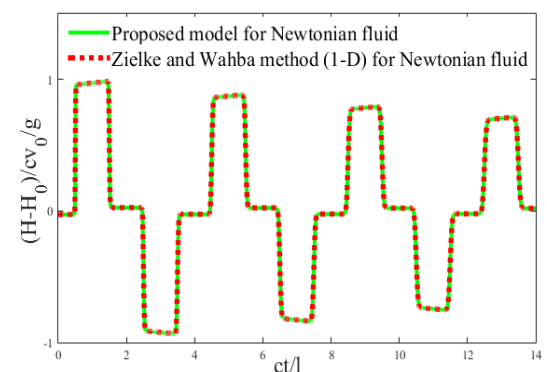
ب- وسط لوله

شکل (۴): مقایسه رفتار موج فشاری ناشی از ضربه قوچ جریان آرام در سیالات مختلف در $Re=80$

با توجه به شکل ۴ روند کلی تغییرات جریان انتقالی در طول زمان، در پشت شیر و نقطه وسط لوله در هر سه نوع سیال تقریباً مشابه است و جریان ایجاد شده ناشی از بسته



الف- پشت شیر



ب- وسط لوله

شکل (۳): اعتبارسنجی مدل پیشنهادی برای سیال نیوتنی

جدول (۳): محدوده ثابت زمان رهایی از تنش [۲۵]

شماره پلیمر	ویسکوزیته دینامیکی ($pa.s$)	زمان رهایی از تنش (s)
۱	۰/۰۳۱۹	۰
۲	۰/۰۶۲۵	۰/۰۰۰۷۸۸
۳	۰/۰۱۳۱	۰/۲۴۶۹
۴	۰/۰۰۲۵	۱۰/۲۱۱۷
نمونه	$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \bar{\lambda} = 1/9s$	

بنابراین، پلیمری با ویسکوزیته ای معادل $0/08919$ پاسکال ثانیه و جرم مخصوص 2200 کیلوگرم بر متر مکعب و زمان آسودگی از تنش معادل $1/9$ ثانیه انتخاب می گردد، سایر مشخصات فیزیکی آزمایش، نظیر قطر، طول لوله، سرعت موج و. مشابه اطلاعات جدول ۱ می باشد. بر این اساس، عدد دבורا معادل $9/6$ محاسبه می شود، عدد نسبت ویسکوزیته β نیز در مورد سیال اولدرویید-بی معادل $0/6$ در محاسبات، لحاظ می گردد.

۳-۲- مقایسه رفتار موج فشاری ناشی از ضربه قوچ

جریان آرام در سیالات مختلف با تغییر رینولدز

در این بخش، رفتار هر یک از سیالات نیوتنی، اولدروید-بی و فوق همرفتی ماکسول طی رخداد ضربه قوچ با تغییرات رینولدز در محدوده جریان آرام در لوله، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جداول ۴ و ۵ نمونه‌ای از نتایج کمی تاریخچه فشار در پشت شیر و وسط لوله به‌ازای $Re=80$ در بازه‌های زمانی مختلف، گردآوری شده است

جدول (۴): نتایج کمی تاریخچه فشار در پشت شیر به ازای

$$Re=80$$

سیال نیوتنی	سیال فوق همرفتی ماکسول	سیال اولدروید-بی	ct/ I
$\frac{(h-h_0)}{(cv_0/g)}$	$\frac{(h-h_0)}{(cv_0/g)}$	$\frac{(h-h_0)}{(cv_0/g)}$	
۰/۰۰۰۰۴۸۳۳۲۵	۰/۰۰۰۰۴۸۳۳۲۵	۰/۰۰۰۰۴۸۳۳۲	۰
۰/۰۶۹۸۵۵۷۰۲	۰/۰۶۹۷۰۴۲۴۱	۰/۰۶۸۳۶۷	۲
۰/۰۶۶۷۳۷۹۲	۰/۰۷۱۱۱۲۰۵۲	۰/۰۷۱۴۳۹	۴
۰/۰۲۶۴۲۶۴۷۲	۰/۰۱۷۴۰۳۰۲۴	۰/۰۱۷۸۱۷	۶
۰/۰۹۴۸۱۰۱۲۶	۰/۱۱۰۵۱۷۰۱۱	۰/۱۰۷۷۴۴	۸
۰/۰۰۶۴۰۶۲۵۲	-۰/۰۱۵۶۹۴۸۵	-۰/۰۱۱۱۳	۱۰
۰/۱۰۹۵۷۴۱۸۸	۰/۱۳۹۶۵۸۴۹۲	۰/۱۳۱۸۴۲	۱۲
-۰/۰۰۴۵۸۴۷۵	-۰/۰۴۲۰۴۷۱۷	-۰/۰۳۱۶۷	۱۴

جدول (۵): نتایج کمی تاریخچه فشار در وسط لوله به ازای

$$Re=80$$

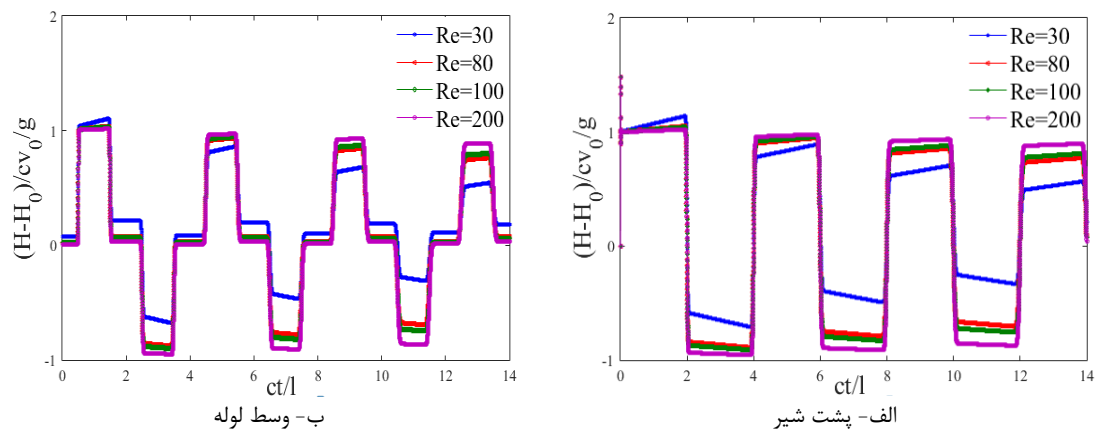
سیال نیوتنی	سیال فوق همرفتی ماکسول	سیال اولدروید-بی	ct/ I
$\frac{(h-h_0)}{(cv_0/g)}$	$\frac{(h-h_0)}{(cv_0/g)}$	$\frac{(h-h_0)}{(cv_0/g)}$	
۰/۰۲۷۴۹	۰/۰۲۷۶۲۲	۰/۰۲۷۴۹	۰
۰/۰۸۱۰۸۸	۰/۰۸۲۱۹۷	۰/۰۸۱۱۳۸	۲
۰/۰۲۹۶۵۳	۰/۰۲۸۳۸۸	۰/۰۲۹۶۵۳	۴
۰/۰۷۹۰۰۴	۰/۰۸۱۴۲۸	۰/۰۷۸۹۶۶	۶
۰/۰۳۱۶۶	۰/۰۲۹۱۵۶	۰/۰۳۱۷۳۹	۸
۰/۰۷۷۰۶۹	۰/۰۸۰۶۶	۰/۰۷۶۹۴۴	۱۰
۰/۰۳۳۵۲۴	۰/۰۲۹۹۲۴	۰/۰۳۳۶۹۱	۱۲
۰/۰۷۵۲۷۷	۰/۰۷۹۸۹۲	۰/۰۷۵۰۵۷	۱۴

شدن سریع شیر پس از مدتی طی نمودن مسیر رفت و برگشتی در طول لوله به میرایی می‌رسد. همچنین در مقایسه رفتار سیالات، مشخص می‌شود که سیال نیوتنی کمترین و سیال فوق همرفتی ماکسول، بیشترین هد نوسانات جریان انتقالی را به خود اختصاص می‌دهند. با توجه به اینکه همه مشخصات سیالات به‌کار رفته در مدل‌سازی نظیر ویسکوزیته، جرم مخصوص و یکسان در نظر گرفته شده است، تفاوت رفتاری مشاهده شده در دمپینگ جریان انتقالی این سه سیال، به‌طور قطع، باید به ویژگی‌های ویسکوالاستیک سیال، نظیر ثابت زمان رهایی از تنش، ارتباط داده شود. در واقع، در یک سیال نیوتنی، پس از تحمیل انرژی پتانسیل ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر، ویژگی ویسکوز مایع، تمایل به دمپینگ موج فشاری را دارد، تا جایی که جریان انتقالی ایجاد شده پس از مدتی میرا می‌شود. در یک سیال از خانواده سیالات ویسکوالاستیک نظیر سیال فوق همرفتی ماکسول و سیال اولدروید-بی، ویژگی‌های مایع و جامد به‌طور هم‌زمان در برابر این انرژی پتانسیل ناگهانی وارد شده از خود واکنش نشان می‌دهند. بخش جامد گونه که خاصیت الاستیک سیال را تقویت می‌کند، باعث می‌شود که سیال، متمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارد شده باشد و به این ترتیب از دمپینگ جریان انتقالی ایجاد شده تا حدی کاسته می‌شود. به‌طور هم‌زمان، بخش مایع گونه دو سیال خانواده ویسکوالاستیک که خاصیت ویسکوز سیال را تقویت می‌کند، تمایل به هدردهی انرژی وارده در سیال ایجاد کرده که منجر به دمپینگ جریان انتقالی می‌شود. در نهایت، این کنش‌های متفاوت در یک سیال ویسکوالاستیک، باعث می‌شود که زمان میرایی جریان انتقالی ناشی از بسته شدن سریع شیر در این حالت، در مقایسه با سیالات نیوتنی طولانی‌تر باشد. بدیهی است، هرچه ویژگی‌های ایجادکننده خواص ویسکوالاستیک، نظیر ثابت زمان رهایی از تنش در یک سیال، بیشتر باشد، این انتظار می‌رود که به‌دلیل بیشتر شدن خاصیت الاستیکی در سیال، زمان میرایی جریان انتقالی طولانی‌تر شود. در مدل‌های اولدروید-بی به‌دلیل وجود حلال نیوتنی در کنار پلیمر حل‌شونده ویسکوالاستیک، تا حدی از ویژگی‌های ویسکوالاستیکی سیال، در مقایسه با سیال فوق همرفتی ماکسول که هیچ حلال نیوتنی در ترکیب آن وجود ندارد، کاسته می‌شود. به همین دلیل، سیال فوق همرفتی ماکسول، بیشترین هد نوسانات جریان انتقالی را به خود اختصاص می‌دهد.

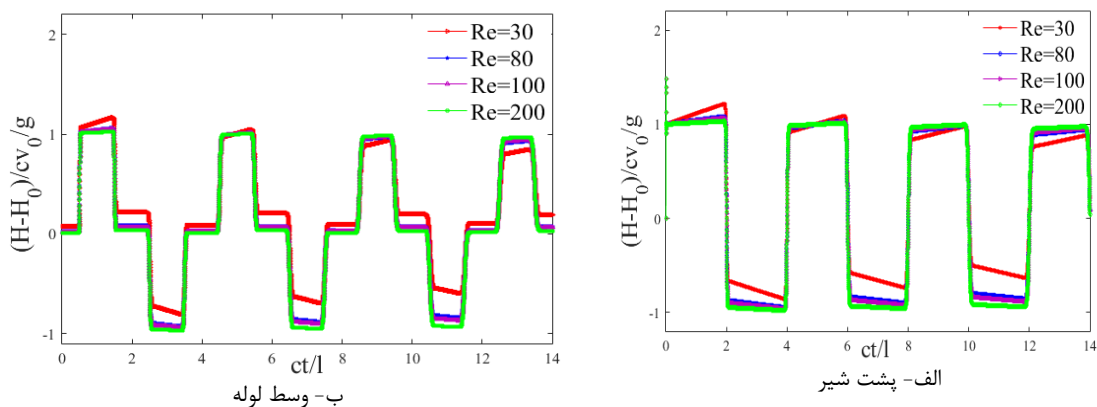
علاوه بر ویسکوزیته ناشی از اصطکاک، بر میرایی جریان انتقالی نظیر ویژگی‌های ویسکوالاستیکی سیال ارتباط داده می‌شود.

در واقع، دخالت این ویژگی‌های نظیر ثابت زمانی رهایی از تنش و نیز ترکیب نمودن حلال نیوتنی و حل‌شونده ویسکوالاستیک که به ظهور اعداد دبورا و بتا به‌عنوان اعداد بی‌بعد در معادلات حاکم بر ضربه قوچ در سیالات ماکسول و اولدرویید-بی در کنار عدد رینولدز می‌انجامد، منجر به کاهش تأثیرپذیری جریان این سیالات از تغییرات رینولدز می‌شود به نحوی که بر اساس شکل‌های ۵ الی ۷ بیشترین میزان حساسیت در برابر تغییرات رینولدز در سیال نیوتنی و کمترین میزان، در سیال فوق همرفتی ماکسول که ویژگی‌های ویسکوالاستیک قوی‌تری در معادلات آن، دخالت دارد، مشاهده می‌شود.

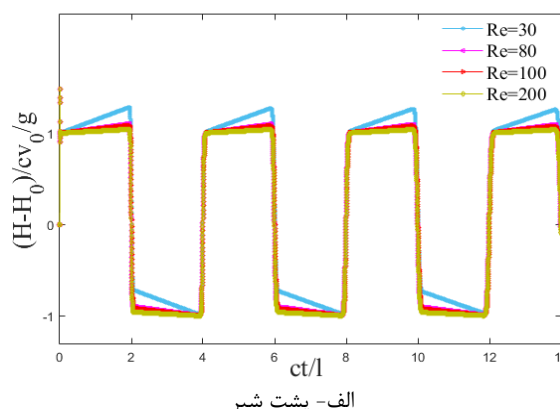
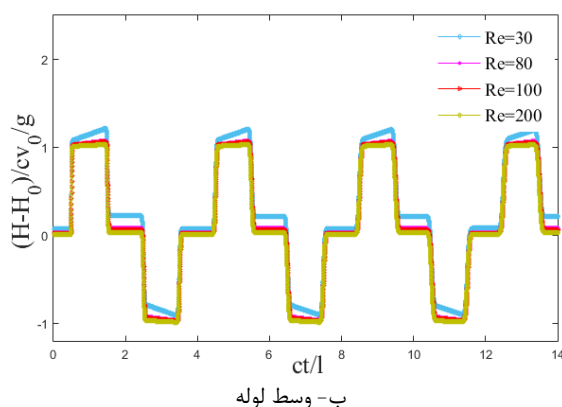
در ادامه جهت بررسی میزان تأثیرپذیری رفتار سیالات مختلف از تغییرات عدد رینولدز، در نمودارهای تاریخچه فشاری سیالات مورد بحث با تغییرات این عدد، در محدوده جریان آرام، مورد بررسی قرار می‌گیرد. دقت در شکل‌های ۵ الی ۷ نشان می‌دهد که روند کلی نوسان‌های موج فشاری ناشی از ضربه قوچ جریان آرام با تغییرات رینولدز در هر سه نوع سیال، تقریباً مشابه است، به این صورت، که با کاهش عدد رینولدز که افزایش ویسکوزیته سیال را به‌عنوان یک عامل اصطکاکی در پی دارد، هد ارتفاعی نوسانات موج فشاری، کاهش یافته و جریان انتقالی در زمان کوتاه‌تری به میرایی می‌رسد که این نکته در مدل فوق همرفتی ماکسول که فقط شامل پلیمر مذاب ویسکوالاستیک است، در مقایسه با سیالات نیوتنی و اولدرویید-بی با حساسیت کمتری مشاهده می‌شود که علت آن، به‌طور قطع، به تأثیر هم‌زمان پارامترهای دیگری



شکل (۵): تأثیر عدد رینولدز بر ضربه قوچ سیال نیوتنی ($\beta=0, De=0, M=9/66e-5$)



شکل (۶): تأثیر رینولدز بر ضربه قوچ سیال اولدرویید-بی ($\beta=0/6, De=9/6, M=9/66e-5$)



شکل (۷): تأثیر رینولدز بر ضربه قوچ سیال فوق همرفتی ماکسول ($\beta=1, De=9/6, M=9/66e-5$)

شده در زمان طولانی‌تری نسبت به سیالات نیوتنی میرا گردد. همچنین، مشخص گردید که با تغییرات رینولدز، روند کلی نوسان‌های موج فشاری ناشی از ضربه قوچ جریان آرام در هر سه نوع سیال، تقریباً مشابه است، به این صورت، که با افزایش ویسکوزیته سیال به‌عنوان یک عامل اصطکاکی که کاهش عدد رینولدز جریان را در پی دارد، هد ارتفافی نوسانات موج فشاری، کاهش یافته و جریان انتقالی در زمان کوتاه‌تری به میرایی می‌رسد. در سیالات اولدروید-بی و فوق همرفتی ماکسول به‌دلیل دخالت ویژگی‌های ویسکوالاستیک نظیر ثابت زمانی رهایی از تنش و نیز ترکیب نمودن حلال نیوتنی و حل‌شونده ویسکوالاستیک که به ظهور اعداد دوبرا و بتا به‌عنوان اعداد بی‌بعد در کنار عدد رینولدز در معادلات حاکم بر آنها می‌انجامد، میزان تأثیرپذیری جریان این سیالات از تغییرات رینولدز کمی کمتر می‌شود به نحوی که بر اساس نتایج، بیشترین میزان حساسیت در برابر تغییرات رینولدز در سیال نیوتنی و کمترین میزان، در سیال فوق همرفتی ماکسول که ویژگی‌های ویسکوالاستیک قوی‌تری در معادلات آن، دخالت دارد، مشاهده می‌شود.

۵- مراجع

1. Mora, S., Manna, M. "From viscous fingering to elastic instabilities", *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 173, pp. 30-39, 2012.
2. Poole, R. J., Alves, M. A., Oliveira, P. J., and Pinho, F. T. "Plane sudden expansion flows of viscoelastic liquids", *Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 146, pp. 79-91, 2007.
3. Abbas Nejad, A., Norouzi, M., and Talebi, Z. "Investigation of Pulsatile Blood Flow

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، میزان تأثیرپذیری سیالات نیوتنی، فوق همرفتی ماکسول و نیز اولدروید-بی نسبت به تغییرات رینولدز در شرایط رخداد ضربه قوچ جریان آرام در لوله مورد مدل‌سازی و مقایسه قرار گرفته است. معادلات حاکم بر مساله نیز معادلات ناویر-استوکس و معادلات رئولوژی سیالات ویسکوالاستیک می‌باشد. در مدل‌سازی معادلات، از روش عددی تفاضل محدود لکس-فردریشک (ixF) و جهت اعتبار سنجی مدل، از نتایج تجربی آزمایش معتبر صورت گرفته توسط هولمبو و رولنو با یک سیال نیوتنی استفاده گردیده است. بی‌بعد سازی معادلات، نشان داد که عدد رینولدز، تنها عدد مشترک مؤثر در بین اعداد بی‌بعد حاکم بر معادلات ضربه قوچ در هر سه نوع سیال مورد بحث می‌باشد. در ادامه، نمودار نوسانات موج فشاری برای هر سه نوع سیال در دو بخش، به ازای رینولدز ثابت و متغیر در نقاط بحرانی لوله نظیر پشت شیر و نقطه وسط لوله ترسیم گردید.

نتایج مدل‌سازی نشان داد که در مقایسه رفتار سیالات، در شرایط رینولدز ثابت، سیال نیوتنی کمترین و سیال فوق همرفتی ماکسول، بیشترین هد نوسانات جریان انتقالی را به خود اختصاص می‌دهند و علت آن به ویژگی‌های ویسکوالاستیکی این سیالات نظیر دارا بودن ثابت زمان رهایی از تنش ارتباط داده می‌شود که باعث می‌شود، سیال، متمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارد شده باشد و به این ترتیب از دمپینگ جریان انتقالی ایجاد شده تا حدی کاسته شود و در نتیجه، جریان‌ات انتقالی ایجاد

- machinery and systems, Timisoara, Romania, 2007.
14. Shamloo, H., Norooz, R. and Mousavifard, M. "A review of one-dimensional unsteady friction models for transient pipe flow", Proc. The Second National Conference on Applied Research in Science and Technology, Faculty of Science, Cumhuriyet University, 2015.
 15. Zielke, W. "Frequency- Dependent Friction in Transient Pipe flow", Basic Engineering, Vol. 90, No. 1, pp. 109-1338, 1968.
 16. Vardy, A. and Brown, J. "Efficient approximation of unsteady friction weighting functions", Hydraulic Engineering, Vol. 130, No. 11, pp. 1097-1107, 2004.
 17. Wahba, E.M. "Non-Newtonian fluid hammer in elastic circular pipes: Shear-thinning and shear-thickening effects", Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 198, No. 10, pp. 24-30, 2013.
 18. Majd, A., and Ahmadi, A. "Investigation of non-Newtonian fluid effects during transient flows in a pipeline", Journal of Mechanical Engineering, Vol. 62, No. 2, pp. 105-115, 2016.
 19. Bird, R. B., Armstrong, R. and Hassager, O. "Dynamics of Polymeric Liquids". Vol. 1: Fluid Mechanics, Wiley, 1987.
 20. Wahba, E.M. "Runge-Kutta time-stepping schemes with TVD central differencing for the water hammer equations", Numerical Methods in Fluids, Vol. 52, No. 5, pp.571-590, 2006.
 21. Ghidaoui, M.S., Zhao, M., McInnis, D.A. and Axworthy, D.H. "A review of water hammer theory and practice", Applied Mechanics, Vol. 58, No. 49, pp. 49-76, 2005.
 22. Streeter, V.L., and Lai, C. "Waterhammer Analysis Including Fluid Friction", Second Edition, American Society of Civil Engineers, 1993.
 23. Shampine, L.F. "Two-step Lax-Friedrichs method", Applied Mathematics Letters, Vol. 18, No. 10, pp. 1134-1136.
 24. Khalighi, F., Ahmadi, A. and Keramat, A. "Investigation of Fluid-Structure Interaction by Explicit Central Finite Difference Methods", International Journal of Engineering journal, Vol. 29, No. 5, pp. 590-598, 2016.
 25. Holmboe, E.L., Rouleau, W.T. "The effect of viscous shear on transients in liquid lines", Basic Engineering, Vol. 89, No. 1, pp. 174-180, 1967.
 26. Mandani, S., Norouzi, M. and Shahmardan, M.M. "An experimental investigation on impact process of Boger drops onto solid surfaces", Korea-Australia Rheology J., Vol. 30, No. 2, pp. 99-108, 2018.
 - Interaction with a Viscoelastic Artery and Its Effect on Atherosclerosis", Fluid Mechanics and Aerodynamics Journal, Imam Hossein University, Vol. 3, No. 4, pp. 1-16, 2015.
 4. Jalali, A. and Kayhani, M.H. "Numerical Simulation of Viscoelastic Developing Flow and Heat Transfer in a Rectangular Duct", Fluid Mechanics and Aerodynamics Journal, Imam Hossein University, Vol. 1, No. 2, pp. 41-54, 2012.
 5. Keyhanpour, M. and Ghasemi, M. "Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer of Magnetic Nanoparticles in a Non-Newtonian Blood Flow under Influence of Magnetic Field", Fluid Mechanics and Aerodynamics Journal, Imam Hossein University, Vol. 7, No. 1, pp. 19-31, 2017.
 6. Keramat, A., Tijsseling, A. S. "Waterhammer with column separation, fluid-structure interaction and unsteady friction in a viscoelastic pipe". In: International Conference on Pressure Surges, Lisbon, Portugal, (2012).
 7. Hadj-Taïeb, L., Hadj-Taïeb, E. "Numerical simulation of transient flows in viscoelastic pipes with vapor cavitation", International Journal of Modelling and Simulation, Vol. 29, No. 2, pp. 206-213, 2009.
 8. Keramat, A., Tijsseling, A.S., Hou, Q. and Ahmadi, A. "Fluid-structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer", Journal of Fluids and Structures, Vol. 28, No. 5, pp. 434-455, 2012.
 9. Wiggert, D. and Tijsseling, A. S. "Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping", Applied Mechanics Reviews, Vol. 54, No. 5, pp. 455-481, 2001.
 10. Tijsseling, A.S. and Vardy, A.E. "Time scales and FSI in oscillatory liquid-filled pipe flow". BHR Group, Proc. of the 10th Int. Conf. on Pressure Surges (Editor S Hunt), P553, Edinburgh, United Kingdom, (2008).
 11. Ahmadi, A., and Keramat, A. "Investigation of fluid-structure interaction with various types of Junction coupling", Journal of Fluid and Structures, Vol. 26, No. 7-8, pp. 1123-1141, 2010.
 12. Korbar, R., Virag, Z., and Šavar, M. "Truncated Method of Characteristics for Quasi-Two-Dimensional Water Hammer Model", J. Hydraul. Eng., Vol. 140, No. 6, pp. 04014013-1: 04014013-7, 2015.
 13. Tijsseling, S. and Bergant, A. "Meshless computation of water hammer", Proc. 2nd IAHR International meeting of the workgroup on cavitation and dynamic problems in hydraulic

