

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

بررسی اثر سیال غیرنیوتنی اولدروید-بی در جریان غیر دائمی در سیستم لوله ها

دانشجو :

شقایق خلیلی

اساتید راهنما

دکتر احمد احمدی

دکتر بنفشه نوروزی

زمستان ۱۳۹۹

تقدیر و تشکر

هر نفسی که فرو می رود ممد حیات است و چون برون می آید مفرح ذات، پس در هر نفس

دو نعمت موجود است و بر هر نعمت شکری واجب

اول خدای را سپاس که لطف و بخشایش او نصیب این بنده حقیر گشت تا بتوانم این مجموعه را به تحریر درآورم.

همچنین از تمامی کسانی که من را در تهیه این تحقیق یاری کردند، قدردانی می‌نمایم: استاد راهنمای عزیزم، جناب آقای دکتر احمد احمدی، به خاطر آموزشها و رهنمودها، در تمام دوران دانشجویی کارشناسی ارشدم.

و همچنین، استاد راهنمای عزیزم، خانم دکتر بنفشه نوروزی که به خاطر حمایت‌های پیوسته، تشویق‌ها و دلگرمی‌هایشان در تمام دوران انجام این تحقیق از رهنمودهای علمی ایشان سود بردم.

همچنین از پدر، مادر، همسر و خواهر عزیزم که همواره حامی و مشوق بنده بودند، تشکر می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب شقایق خلیلی عباس آبادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی اثر سیال غیرنیوتنی الدروید-بی در جریان غیر دائمی در سیستم لوله ها تحت راهنمایی دکتر احمد احمدی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

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 تحقیق حاضر، رفتار این سیالات، در شرایطی مورد تحلیل و مدلسازی 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 پیش بینی نشده ای به طور ناگهانی متوقف شوند. جریان میرای غیردائمی ایجاد شده در اثر توقف ناگهانی جریان، در این تحقیق، اصطلاحاً "ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک" و یا "چکش سیال ویسکوالاستیک" نامیده می‌شود. در واقع، هدف اصلی از تحقیق حاضر، ایجاد ارتباط بین دو حوزه جریانهای انتقالی در لوله و مباحث سیالات ویسکوالاستیک می‌باشد. آشنایی با ویژگیها و معادلات رئولوژی سیال ویسکوالاستیک و به موازات آن، بازنویسی معادلات حاکم بر ضربه قوچ در حالت کلی و ایجاد رابطه ای بین معادلات مذکور، مراحل اولیه مطالعه حاضر را تشکیل می‌دهد. سیستم مورد بررسی در تحقیق حاضر، از نوع شیر، لوله و مخزن در نظر گرفته می‌شود و در بخش ویسکوالاستیک، از معادلات رئولوژی غیرخطی اولدریوید بی به عنوان معادلات ساختاری تبیین کننده رابطه تنشها استفاده می‌شود، همچنین، روش عددی خطوط مشخصه MOC جهت گسسته سازی معادلات به کار گرفته می‌شود. بررسی معادلات مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، نشان داد که رفتار سیال تحت رخداد این پدیده متأثر از اعداد بی بعد دبور، رینولدز، ماخ و نسبت ویسکوزیته (بتا) می‌باشد که تاثیر هر یک از این اعداد بر تاریخچه ارتفاع فشاری و تنشهای برشی ناشی از پدیده ضربه قوچ در نقاط بحرانی لوله ارزیابی گردید. جهت بررسی دقیق تر تاثیر سیال ویسکوالاستیک بر اتفاقات ضربه قوچ، در همه موارد، رفتار سیال ویسکوالاستیک با سیال ایده آل (بدون ویسکوزیته) و سیال نیوتنی (با ویسکوزیته مشابه سیال ویسکوالاستیک) مقایسه و نتایج حاصله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک نشان داد که در این گروه سیالات، پیک نوسانات موج فشاری، در مقایسه با جریان سیالات نیوتنی کمی بیشتر و زمان میرایی جریان کندتر می‌شود که دلیل آن، به ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش این سیالات ارتباط داده می‌شود. این ویژگی

که به بخش جامد گونه سیالات ویسکوالاستیک مرتبط می شود، با تقویت خاصیت الاستیک سیال، تمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارد شده را افزایش داده و باعث می شود، از میزان دمپینگ جریان انتقالی تا حدی کاسته شود.

واژگان کلیدی: چکش سیال ویسکوالاستیک، مدل اولدروید-بی، روش خطوط مشخصه.

فهرست مطالب

فصل اول کلیات.....	۱
۱-۱ - مقدمه	۲
۲-۱ - فرضیات.....	۳
۳-۱ - اهداف	۴
۴-۱ - فصل بندی.....	۵
فصل دوم تاریخچه خواص سیالات ویسکوالاستیک.....	۷
۱-۲ - کلیاتی درباره سیالات غیرنیوتنی.....	۸
۱-۱-۲ - طبقه بندی سیالات غیرنیوتنی.....	۹
۱-۱-۱-۲ - سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان.....	۹
۲-۱-۱-۲ - سیالات غیرنیوتنی تابع زمان.....	۱۱
۳-۱-۱-۲ - سیالات ویسکوالاستیک.....	۱۲
۱-۳-۱-۱-۲ - ویژگیهای سیالات ویسکوالاستیک.....	۱۲
۲-۳-۱-۱-۲ - پارامترهای مهم در جریان سیالات ویسکوالاستیک.....	۱۶
۳-۳-۱-۱-۲ - مدلهای رئولوژی.....	۱۸
۲-۲ - پدیده ضربه قوچ (چکش آبی).....	۱۹
۳-۲ - تاریخچه مطالعات جریانهای میرا.....	۲۱
فصل سوم معادلات حاکم بر ضربه قوچ و سیال ویسکوالاستیک.....	۲۵
۱-۳ - معادلات کلی حاکم بر ضربه قوچ.....	۲۶
۱-۱-۳ - معادله پیوستگی.....	۲۶
۱-۱-۱-۳ - کاربرد معادله حالت در معادله پیوستگی.....	۲۷
۲-۱-۱-۳ - معادله کامل سرعت موج در جریانهای انتقالی.....	۲۸
۲-۱-۳ - معادله مومنوم.....	۲۹

۳۲.....	۲-۳- خانواده مدل های اولدروید.....
۳۳.....	۱-۲-۳- روابط تنش حاکم بر بخش حلال یک محلول پلیمری ویسکوالاستیک.....
۳۴.....	۲-۲-۲- روابط تنش حاکم بر بخش حل شونده یک محلول پلیمری ویسکوالاستیک.....
۳۵.....	۳-۳- معادلات اصلی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک.....
۳۹.....	۴-۳- آنالیز ابعادی و بی بعد سازی معادلات حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک.....
۴۳.....	فصل چهارم حل عددی.....
۴۴.....	۱-۴- معرفی روش عددی خطوط مشخصه (MOC).....
۴۴.....	۲-۴- تحلیل معادلات جریان غیردائمی به روش MOC.....
۴۸.....	۳-۴- شرایط اولیه و مرزی.....
۴۹.....	۴-۴- شبکه بندی خطوط مشخصه برای گره.....
۵۱.....	فصل پنجم مدلسازی عددی با روش MOC.....
۵۲.....	۱-۵- اعتبار سنجی مدل.....
۵۴.....	۲-۵- مدلسازی عددی.....
۵۶.....	۱-۲-۵- مقایسه رفتار سیال در حالات مختلف در طول پدیده ضربه قوچ.....
۵۹.....	۳-۵- بررسی تاثیر اعداد بی بعد بر اتفاقات ضربه قوچ.....
۵۹.....	۱-۳-۵- بررسی تاثیر عدد دبور.....
۶۱.....	۲-۳-۵- بررسی تاثیر عدد بتا (نسبت ویسکوزیته).....
۶۲.....	۳-۳-۵- بررسی تاثیر عدد رینولدز.....
۶۵.....	فصل ششم خلاصه، نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۶۶.....	۱-۶- خلاصه.....
۶۸.....	۲-۶- نتایج کلی مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک (چکش سیال ویسکوالاستیک).....
۶۸.....	۱-۲-۶- فرمولاسیون.....
۶۸.....	۲-۲-۶- زمان میرایی و دمپینگ جریان انتقالی.....

۶۸.....۳-۲-۶- تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در لوله.

۶۹.....۵-۵- پیشنهادات.

۷۱.....منابع فارسی.

۷۱.....منابع انگلیسی.

فهرست جداول

جدول ۵-۱- مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله ۵۳

جدول ۵-۲- محدوده ثابت زمان رهایی از تنش و ویسکوزیته ۵۵

جدول ۵-۳- مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله ۵۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- منحنی‌های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات مستقل از زمان..... ۱۰
- شکل ۲-۲- طرح شماتیک جریان برشی ساده (جریان کوئت)..... ۱۳
- شکل ۳-۲- اعمال چرخش به دو سیال نیوتنی (N) و ویسکوالاستیک (V)..... ۱۴
- شکل ۴-۲- بازگشت فنری یک سیال ویسکوالاستیک..... ۱۵
- شکل ۵-۲- سیفون بدون لوله سیالات ویسکوالاستیک..... ۱۵
- شکل ۶-۲- زمان اعمال تغییر شکل در مواد گوناگون تحت بارگذاریهای مختلف..... ۱۶
- شکل ۷-۲- توقف لحظه‌ای سیال بدون اصطکاک در لوله افقی..... ۱۹
- شکل ۸-۲- مراحل رخداد ضربه قوچ..... ۲۱
- شکل ۱-۳- شماتیک تنشهای برشی وارد بر وجوه المانی از جریان..... ۳۰
- شکل ۴-۱: خطوط مشخصه در صفحه Z-t..... ۴۷
- شکل ۴-۲- نمایی از سیستم شیر- لوله و مخزن..... ۴۸
- شکل ۴-۳- وضعیت خطوط مشخصه برای گره..... ۴۹
- شکل ۵-۱- اعتبار سنجی مدل پیشنهادی برای سیال نیوتنی با روش‌های عددی زیلیک و روش وهبا و روش آزمایشگاهی..... ۵۴
- شکل ۵-۲- نمایی از سیستم شیر- لوله و مخزن..... ۵۴
- شکل ۵-۳- مقایسه تاریخچه فشاری در سیالات مختلف..... ۵۶
- شکل ۵-۴- مقایسه تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محلولهای نیوتنی و ویسکوالاستیک در نقطه وسط..... ۵۸
- شکل ۵-۵- تاثیر عدد دوبرا بر تاریخچه فشاری $Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}$ ۵۹
- شکل ۵-۶- تاثیر عدد دوبرا بر تنشهای برشی در وسط لوله $Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}$ ۶۰
- شکل ۵-۷- تاثیر نسبت ویسکوزیته β بر تاریخچه فشاری $Re = 80, De = 10, M = 10^{-4}$ ۶۱
- شکل ۵-۸- تاثیر نسبت ویسکوزیته β بر تنشهای برشی در وسط لوله $Re = 80, De = 10, M = 10^{-4}$ ۶۲
- شکل ۵-۹- تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در ضربه قوچ نیوتنی $\beta = 0, De = 0, M = 10^{-4}$ ۶۲
- شکل ۵-۱۰- تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک $\beta = 0.6, De = 10, M = 10^{-4}$ ۶۳

شکل ۵-۱۱- مقایسه تنشهای برشی ناشی از ضربه قوچ با رینولدزهای مختلف در نقطه وسط لوله..... ۶۴

فصل اول

کلیات

- مقدمه
- فرضیات پایان نامه
- اهداف پایان نامه
- فصل بندی پایان نامه

در مباحث مربوط به سیالات، جریان غیردائمی به گونه‌ای از جریانها اطلاق می‌گردد که خصوصیات آن در هر نقطه با زمان تغییر کند. زمانی که جریان از یک حالت ماندگار به حالت ماندگار دیگری تغییر شرایط دهد، جریان غیر ماندگار ما بین، جریان میرا یا گذرا نامیده می‌شود. ضربه قوچ، جریان میرایی است که در اثر تغییر ناگهانی در سرعت سیال، مانند بستن سریع شیر یا توقف ناگهانی پمپ یا توربین رخ می‌دهد. توقف ناگهانی جریان، موجب افزایش قابل توجه فشار در سیستم لوله می‌شود و معمولاً با تغییرشکلهای شعاعی و محوری در سازه لوله همراه است. در این وضعیت، دائماً بین سیال و سازه اندرکنشی وجود خواهد داشت که می‌تواند، باعث بروز خرابیهای مختلف در سیستم، مانند پارگی در لوله، جداشدن لوله از اتصالات جانبی و نیز ایجاد تنشهای زیاد در تکیه‌گاهها شود. مطالعه این جریانها از اواخر قرن نوزدهم میلادی آغاز گردید و بسیاری از مباحث بنیادی آن در قرن بیستم شناسایی و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت [Wylie & Streeter 1993]. اما مطالعات مختلفی که تاکنون، با تمرکز بر زوایای مختلف این جریانهای میرا انجام شده، نشان می‌دهد که مدلسازی رفتار سیال در طول این پدیده، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. از این میان، می‌توان به مواردی نظیر بررسی اثرات اصطکاک غیرماندگار در طول لوله و مدلسازی شبه دو بعدی معادلات حاکم، اثرات ارتعاش سازه لوله، تاثیر جنس جداره لوله و نیز تکیه‌گاهها بر میرایی جریان انتقالی، اثرات وجود روزنه در لوله، بررسی کاویتاسیون و امکان جدایی ستون سیال در طی وقوع این پدیده و... اشاره نمود.

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 می‌باشد، در واقع، به نظر می‌رسد، مدلسازی پدیده ضربه قوچ از دیدگاه تغییر در شرایط نوع سیال، تا حد زیادی مغفول مانده است. در سالهای اخیر، تاثیر به‌کارگیری سیال غیر نیوتنی در طول پدیده ضربه قوچ، مورد توجه قرار گرفته است اما مطالعات صورت گرفته در این زمینه بدون در نظر گرفتن اثرات ارتعاش جداره لوله، تنها به لحاظ مشخصات کلی یک سیال غیر نیوتنی نظیر ویسکوزیته متغیر در معادلات ضربه قوچ

محدود شدند. این، در حالی است که علم رئولوژی سیالات، رفتارهای متفاوت و بعضا پیچیده‌ای را از انواع سیالات غیر نیوتنی نشان می‌دهد که قطعا با قرارگیری این سیالات در شرایط رخداد ضربه قوچ، نتایج مهمی به دست آورده می‌شود. یکی از این گروه سیالات، سیالات ویسکوالاستیک می‌باشند. این سیالات که در گروه سیالات غیرنیوتنی طبقه بندی می‌شوند، دارای رفتار دوگانه هستند، به این معنا که در تحلیل رفتار آنها، هم رفتار ویسکوز یک سیال ایده‌آل و هم رفتار ارتجاعی یک جامد قابل مشاهده است. این دسته از سیالات، بعد از اعمال تغییر شکل و سپس رهاسازی، مقداری حالت ارتجاعی را از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل به سیالات ویسکوالاستیک معروف هستند. رفتار سیالات ویسکوالاستیک ناشی از ساختار مولکولی این دسته از سیالات است که از خود، رفتار کشسان هم نشان می‌دهند. این رفتار کشسان معمولا ناشی از زنجیره طویل مولکولهاست که در اثر کنشها بر یکدیگر بروز می‌کند. این سیالات معمولا از وزن مولکولی بالایی برخوردارند [Phan-Thien 2002].

از آنجا که توقف ناگهانی جریان سیال در طول لوله، در اثر قطع جریان برق و یا خرابی پمپ، امری محتمل است، با توجه به کاربرد گسترده سیالات ویسکوالاستیک در علوم مهندسی نظیر صنایع غذایی، پلیمر، داروسازی، صنایع شیمیایی و... بررسی امکان رخداد پدیده ضربه قوچ در سیستم لوله‌های حاوی این سیالات و نیز در نظر گرفتن اثرات ارتعاش جداره لوله در این حالت، ضروری به نظر می‌رسد.

حال، پرسشهای زیر مطرح می‌شود که :

- آیا می‌توان به نحوی معادلات حاکم بر ضربه قوچ کلاسیک را به معادلات سیال ویسکوالاستیک ارتباط داد؟
- آیا معادله ساختاری برای مدلسازی رفتار دوگانه سیال ویسکوالاستیک وجود دارد؟
- چه تفاوت‌هایی بین هد موج فشاری و تنشهای برشی ناشی از ضربه قوچ یک سیال نیوتنی و ضربه قوچ حاصل از سیال ویسکوالاستیک وجود دارد؟
- در تحقیق حاضر، تلاش می‌شود که به همه این پرسشها به تفصیل، پاسخ داده شود.

۲-۱- فرضیات

۱- در کلیه تحلیل های هیدرولیکی تحقیق حاضر، لوله به صورت جداره نازک فرض می شود که از مواد الاستیک تهیه شده است.

۲- سیستم مورد بررسی در این مطالعه از نوع کلاسیک شیر، لوله- مخزن می باشد.

۳- مدلسازی مساله با انتگرالگیری از معادلات در راستای شعاع سطح مقطع لوله، به صورت یک بعدی در نظر گرفته می شود.

۴- در تحلیل پدیده ضربه قوچ به عنوان یک جریان میرای ناماندگار، فرض تقارن محوری در طول لوله برقرار بوده و بنابراین از زاویه و تغییرات زاویه ای صرف نظر می گردد.

۵- سیال موجود در لوله تراکم ناپذیر، غیرنیوتنی و از نوع ویسکوالاستیک در نظر گرفته می شود.

۶- در مدلسازی رفتار سیال ویسکوالاستیک، از معادلات ساختاری اولدروید بی استفاده می شود.

۷- از اثرات خمشی، اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی عرضی صرف نظر می شود که این فرضیات با عنوان امواج با طول موج های بلندشناخته می شود.

۸- مدل ارائه شده در تحقیق، برای لوله هایی با مقطع گرد که در فضای آزاد در معرض فشار هوای جو هستند، معتبر می باشد.

۳-۱- اهداف

در تحقیق حاضر، سعی شده تا با از میان برداشتن فرض پایه ای سیال نیوتنی در لوله، ارتباطی بین دو حوزه جریانهای میرای غیر دائمی در لوله و مباحث سیالات ویسکوالاستیک برقرار نمود تا با توجه به ویژگیهای خاص این نوع سیالات، بتوان از قابلیت های آنها در علوم مهندسی و ایجاد طرح های نو در مباحث علمی و صنعتی بهره جست. به این منظور، ضمن بازنویسی مجدد معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر ضربه قوچ کلاسیک، از فرض برقراری تنش معادل تنش جریان دائمی در پدیده ضربه قوچ، صرف نظر شده و از معادلات ساختاری

مدل اولدروید بی در تحلیل تنشهای غیر دائمی ناشی از این پدیده استفاده می‌گردد. معادلات مورد نظر پس از بی‌بعد سازی با استفاده از روش عددی خطوط مشخصه (MOC) تحلیل گردیده و سپس، هد موج فشاری و تنشهای برشی ایجاد شده ناشی از ضربه قوچ، در نقاط بحرانی لوله ترسیم می‌گردند.

هدف از این تحلیل، بررسی این مساله است که در اثر بسته شدن ناگهانی شیر، چه تفاوتی در رفتار یک سیال ایده آل بدون اصطکاک، سیال نیوتنی و سیال ویسکوالاستیک در نقاط مختلف لوله نظیر پشت شیر و نقطه وسط لوله مشاهده می‌گردد؟ و دیگر اینکه اعداد بی‌بعد حاکم بر معادلات به دست آمده چه تاثیری بر رفتار موج فشاری در سیالات مختلف، در طی رخداد ضربه قوچ در لوله دارند؟

۴-۱- فصل بندی

در فصل اول چنانچه گذشت، کلیات، فرضیات و اهداف مطالعه مطرح گردید. فصل دوم در دو بخش ارائه شده است، بخش اول مروری بر پدیده ضربه قوچ و سپس، مروری بر مطالعات گذشته سایر محققین در رابطه با جریان های میرا صورت می‌گیرد. در بخش دوم کلیاتی در رابطه با سیالات نیوتونی و سپس توضیحاتی در رابطه با سیالات ویسکوالاستیک و خواص آنها مطرح شده است.

فصل سوم به معادلات حاکم اختصاص داده می‌شود. در بخش اول، معادلات حاکم بر ضربه قوچ در حالت کلی اثبات و بازنویسی می‌شود و در بخش دوم برای تکمیل معادلات، خانواده مدلهای اولدروید-بی، معرفی می‌گردد و پس از انجام مراحل محاسبه معادلات با استفاده از قوانین تانسورها و مفاهیم هیدرودینامیکی در بخش سوم، معادلات اصلی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک به دست آورده می‌شود.

در فصل چهارم، روش عددی خطوط مشخصه MOC معرفی می‌شود و سپس معادلات جریان غیر دائمی با استفاده از این روش تحلیل می‌گردد و در انتها به بررسی شرایط اولیه و مرزی و همچنین شبکه بندی خطوط مشخصه می‌پردازد.

در فصل پنجم، معادلات به دست آمده از فصل سوم با استفاده از روش خطوط مشخصه تحلیل می‌شوند، در انتهای این فصل، نتایج مدلسازی جریان غیر دائمی سیال ویسکوالاستیک مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد و همچنین تاثیر اعداد بی‌بعد بر جریان غیردائمی سیال ویسکوالاستیک مشاهده می‌شود.

در فصل ششم و انتهای خلاصه‌ای از مطالعات و تحقیقات انجام شده در این پژوهش گنجانده می‌شود و در نهایت نتایج کلی تحقیق و پیشنهادات برای تحقیقات بیشتر ارائه می‌گردد.

فصل دوم

تاریخچه و خواص سیالات ویسکوالاستیک

بخش اول:

- کلیاتی در رابطه با سیالات غیر نیوتونی
- مروری بر سیالات ویسکوالاستیک و خواص آنها

بخش دوم:

- مروری بر پدیده ضربه قوچ
- تاریخچه مطالعات جریان های میرا

در این فصل ابتدا به جهت شناخت سیالات ویسکوالاستیک در مکانیک سیالات، مرور کوتاهی بر انواع سیالات غیر نیوتونی انجام می شود. و همچنین سیالات ویسکوالاستیک و خواص آن ها مورد بررسی قرار می گردد. سپس پیشینه مطالعات صورت گرفته در زمینه جریان گذرا و پدیده ضربه قوچ تشریح می گردد.

❖ بخش اول

۱-۲- کلیاتی درباره سیالات غیر نیوتنی

سیالات را می توان در یک دیدگاه کلی از دو نظر تقسیم بندی نمود. دیدگاه اول پاسخ سیال در برابر فشارهای وارد به سیال (تنشهای نرمال) و دیگری نحوه تاثیر پذیری سیال در برابر تنشهای برشی اعمال شده به سیال می باشد. دیدگاه اول، منجر به این تقسیم بندی خواهد شد که آیا المانهای سیال در برابر فشار تغییر حجم می دهند یا خیر، که در نتیجه تعاریف تراکم پذیری و تراکم ناپذیری شکل می گیرند. دیدگاه دوم که سبب تقسیم بندی دیگری می شود، رفتار سیال در مقابل تنشهای برشی است. چنانچه رفتار سیال به گونه ای باشد که رابطه تنشهای برشی وارد بر سیال با تغییرات نرخ برش، به صورت خطی باشد، آن سیال به عنوان سیال نیوتنی شناخته می شود، در غیر این صورت چنانچه رابطه از نوع غیرخطی باشد یا اثرات کشسانی در سیال آشکار شود و یا ویژگیهای سیال با زمان تغییر کند، آن سیال، در گروه سیالات غیر نیوتنی طبقه بندی می شود [Bird et al. 1987].

محدوده سیالات غیر نیوتنی بسیار گسترده است. در محدوده سیالات غیر نیوتنی موجود در طبیعت می توان به موارد بسیاری اشاره نمود از جمله شیر درختان و گیاهان، بسیاری از مواد خوراکی مانند عسل، بسیاری از مواد موجود در بدن مانند مخاطها و به ویژه خون که به دلیل ارائه رفتار متفاوت در شرایط مختلف، دست مایه بسیاری از تحقیقات و مطالعات شده است، به گونه ای که علاوه بر اینکه مقالات بسیاری در این زمینه منتشر شده کتب بسیاری نیز در ارتباط با دینامیک خون، بیومکانیک و موارد مشابه با محوریت غیر نیوتنی بودن سیالات و مدل سازی آنها نگاشته شده است [Chen & Barbieri 2013]. در صنعت نیز می توان به مباحث پلیمرها، رنگها و جوهرها، صنایع دارویی، صنایع غذایی، صنایع آرایشی و بهداشتی و صنایع نظامی

اشاره نمود که تحلیل و طراحی بهینه هریک، مستلزم شناخت کامل پدیده‌های فیزیکی مرتبط با آنها در شرایط مختلف می‌باشد.

۲-۱-۱ - طبقه بندی سیالات غیرنیوتنی

به‌طور کلی سیالات غیرنیوتنی به خانواده‌های متعددی دسته‌بندی می‌شوند. این خانواده‌ها عبارتند از:

۱. سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان

۲. سیالات غیرنیوتنی وابسته به زمان

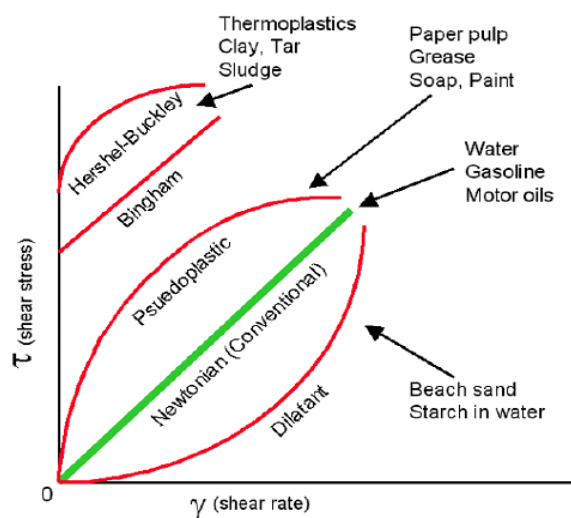
۳. سیالات ویسکوالاستیک

در ادامه هریک از این خانواده‌ها معرفی شده و در مورد خواص این سیالات مختصری بحث می‌شود.

۲-۱-۱-۱ - سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان

سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان، سیالاتی هستند که در آنها تنش برشی تنها تابعی غیر خطی از نرخ برش است. به عبارت دیگر در این سیالات، ویسکوزیته تابعی از نرخ برش می‌باشد. مطابق شکل (۱-۲) خود این سیالات به دو دسته کلی سیالاتی دارا و فاقد تنش تسلیم تقسیم می‌شوند. در موادی که دارای تنش تسلیم هستند شرط جریان ماده، رسیدن تنش به حد مشخصی برای شروع سیلان آن است. برای مثال، خمیر دندان مثال بسیار مناسبی برای این مواد است به نحوی که تا زمانی که میزان فشردگی پوسته آن به حد مشخصی نرسد، خمیر دندان از آن خارج نمی‌شود. علت این رفتار فیزیکی معمولاً به ساختمان سه بعدی ماده نسبت داده می‌شود. ساختمان این مواد قادر است که تنش برشی کمتر از حد تسلیم را بدون ایجاد جریان تحمل نماید ولی پس از آن، ساختمان داخلی شکسته شده و ماده، اجازه حرکت برشی را پیدا می‌کند. تصور می‌شود که ساختمان داخلی ماده پس از کاهش تنش به مقدار کمتر از تسلیم، دوباره ترمیم می‌شود. معروف‌ترین این دسته از مواد، پلاستیک بینگهام است. در واقع، پلاستیک بینگهام یک سیال نیوتنی دارای تنش تسلیم به‌شمار می‌رود که ویسکوزیته آن ثابت است. نمونه‌هایی از سیالات دارای تنش تسلیم عبارتند از برخی پلاستیکهای مذاب، گل حفاری چاه نفت، مخلوط آب و شن، دوغ آبهای گچ و ماسه، شکلات مایع، کرم های طبی، خمیر دندان، بتن تازه، مارگارین و گریسها [شیخی نارانی ۱۳۷۱]. سیالاتی که

فاقد تنش تسلیم هستند، به دو دسته سیالات شبه پلاستیک و سیالات دایلاتنت تقسیم می‌شوند. این سیالات به صورت سیالات نیوتنی تعمیم یافته نیز نامیده می‌شوند. [شیخی نارانی ۱۳۷۱]. در سیالات شبه پلاستیک، ویسکوزیته در نرخهای برش کوچک و بسیار زیاد، تقریباً خطی است. شیب منحنی تنش در برابر نرخ کرنش در شدتهای برش زیاد، به ویسکوزیته در برش بینهایت η_{∞} و در شدتهای برش کم به ویسکوزیته در برش صفر η_0 موسوم است. در این مواد، نرخ افزایش تنش در برابر شدت برش، مقداری منفی است (ویسکوزیته تابعی نزولی از شدت برش است). [Bird et al. 1987]. سیالات شبه پلاستیک عموماً در بین مواد زیر یافت می‌شوند. بسیاری از مواد با وزن مولکولی بالا، بسیاری از سوسپانسیونهای دارای غلظت متوسط، محلولهای لاستیک طبیعی و مصنوعی، چسبها، سوسپانسیونهای آهار، استات سلولز، محلولهای مورد استفاده برای ساخت رایون، مایونز، بعضی مرکبهای چاپ و رنگها. در شکل ۱-۲، منحنیهای تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات مستقل از زمان نشان داده می‌شود.



شکل ۱-۲- منحنیهای تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات مستقل از زمان [Malkin 1994]

همانطور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، در سیالات دایلاتنت برخلاف سیالات شبه پلاستیک با افزایش شدت برش، ویسکوزیته سیال افزایش می‌یابد. در بین مواد زیر رفتار سیال دایلاتنت مشاهده شده است. برخی سوسپانسیونهای آبی اکسید تیتانیوم، برخی محلولهای پودر ذرت-شکر، برخی محلولهای بوراکس-صمغ عربی، نشاسته، سیلیکات پتاسیوم، شن مرطوب ساحل و بعضی رنگها [شیخی نارانی ۱۳۷۱].

۲-۱-۱-۲- سیالات غیرنیوتنی تابع زمان

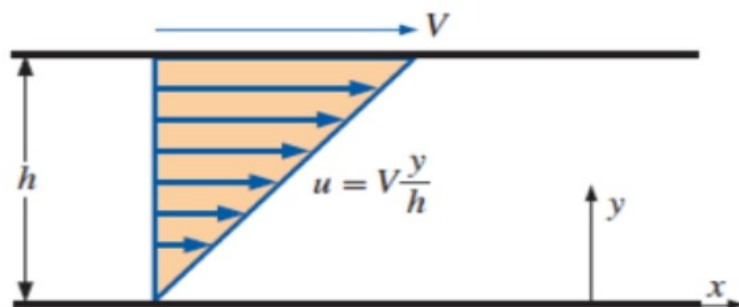
در بعضی از سیالات غیرنیوتنی، علاوه بر اینکه ویسکوزیته تابعی از نرخ برش است، تابعی از زمان نیز می-باشد. به عبارت دیگر در این سیالات، در حین یک نرخ برش ثابت، ساختمان مولکولی ماده به طور مداوم در حال تغییر است و لذا مقدار ویسکوزیته و تنش برشی نیز تابعی از زمان خواهد بود. به طور کلی این مواد به دو دسته سیالات تیکسوتروپیک و سیالات رئوپکتیک و آنتی تیکسوتروپیک تقسیم می-شوند. در سیالات تیکسوتروپیک، چنانچه ماده در معرض یک شدت برش ثابت و دمای معین قرار داده شود، تنش برشی یک کاهش برگشت پذیر نسبت به زمان پیدا می-کند. البته در نهایت، ویسکوزیته به سمت یک مقدار حدی میل خواهد کرد. از دیدگاه مولکولی چنانچه یک سیال تیکسوتروپیک تحت یک برش ثابت قرار گیرد، به تدریج ساختمان مولکولهای آن شروع به شکستن می-کند و لذا با افزایش زمان، ویسکوزیته سیال کاهش می-یابد. مولکولهای شکسته شده در صورت برخورد، در جهت مناسب امکان بازگشت به ساختار اولیه خود را دارند و از آنجا که با گذشت زمان، بر تعداد مولکولهای شکسته شده افزوده می-شود، بنابراین امکان برخورد مولکولها و فعالتر شدن مکانیزم ترمیم افزایش می-یابد. به همین دلیل، پس از گذشت مدت زمان مشخصی تعادلی بین فرآیندهای شکست و ترمیم به وجود می-آید و ویسکوزیته به سمت مقدار ثابتی میل می-کند. به عنوان نمونه برخی پلیمرهای درشت مولکول و محلولهای مواد غذایی دارای این رفتار هستند. سیالات رئوپکتیک، مواد بسیار نادری هستند که رفتار آنها کاملاً بر عکس مواد تیکسوتروپیک است. از دیدگاه مولکولی، این مواد ساختار مولکولی اولیه ای ندارند ولی با ایجاد برش و برخورد مولکولها به یکدیگر، شانس تشکیل یک ساختار را پیدا می-کنند. بنابراین تحت برش ثابت و در شرایط ایزوترمال، یک افزایش برگشت پذیر در تنش برشی و ویسکوزیته آنها مشاهده می-شود. در بعضی سیالات نظیر سوسپانسیونهای رسی بنتونیت، سوسپانسیونهای وانادیوم پنتا اکسید، خمیر گچ و سوسپانسیونهای رقیق اولئات آمونیوم رفتار رئوپکتیک مشاهده شده است [شیخی نارانی ۱۳۷۱].

۲-۱-۱-۳- سیالات ویسکوالاستیک

واژه ویسکوالاستیک از ترکیب واژگان ویسکوز و الاستیک تشکیل شده است. ویسکوزیته یا لزجت، خاصیتی از سیال است که نشاندهنده مقاومت سیال در برابر جاری شدن، می‌باشد. از سوی دیگر، الاستیسیته یکی از خواص مواد جامد محسوب می‌شود. در واقع، سیالات ویسکوالاستیک موادی هستند که ویژگیهای ویسکوز و الاستیک را به صورت توأمان دارا می‌باشند و لذا این مواد دارای خواص همزمان جامد و سیال هستند [Phan-Thien 2002]. جریان بسیاری از سیالات در علوم مهندسی، رفتاری ویسکوالاستیک دارند. حل عددی جریان اینگونه سیالات با توجه به پیچیده بودن معادلات حاکم بر آنها، همواره چالش برانگیز بوده است. از جمله کسانی که برای اولین بار رفتار ویسکوالاستیک مواد را مشاهده کرد، ویلیام وبر بود. وی در سال ۱۸۳۵ با انجام آزمایش بر روی الیاف ابریشم مشاهده نمود که این الیاف کاملاً الاستیک نبوده و با اعمال یک کشش در آنها یک تغییر طول فوری مشاهده می‌شود و پس از آن در یک نیروی ثابت، تغییر طول با زمان، ادامه می‌یابد. با حذف بار نیز پس از یک انقباض فوری کاهش طول تا رسیدن به طول اولیه مشاهده شد. در واقع او با یک ماده شبه جامد برخورد کرده رفتار آن، تنها با قانون هوک قابل توضیح نبود و بخشهایی از جریان بیشتر شبیه پاسخ مایع به چنین نیرویی بود. این مساله شروع شناخت موادی با رفتار مایع- جامد گونه و به عبارت بهتر ویسکوز و الاستیک بود که آنها را ویسکوالاستیک نامیدند [Bird et al. 1987].

۲-۱-۱-۳- ویژگیهای سیالات ویسکوالاستیک

آزمایش معروفی که به بررسی رفتار جریان مواد ویسکوالاستیک می‌پردازد، آزمایش جریان کوئت یا جریان برشی ساده است. مطابق شکل زیر، چنانچه یک سیال ویسکوالاستیک بین دو صفحه تخت موازی قرار گیرد و صفحه بالایی با سرعت U حرکت نماید، یک جریان برشی ساده ایجاد می‌شود. اگر عمل برش دهی قطع و حرکت صفحه بالایی به‌طور ناگهانی متوقف شود، بر خلاف سیالات نیوتنی که در آنها تنش به‌طور آنی صفر می‌شود، در سیالات ویسکوالاستیک، کاهش تنش برشی دارای بازه زمانی یا به عبارت دیگر دارای زمان آسودگی از تنش است [Phan-Thien 2002].

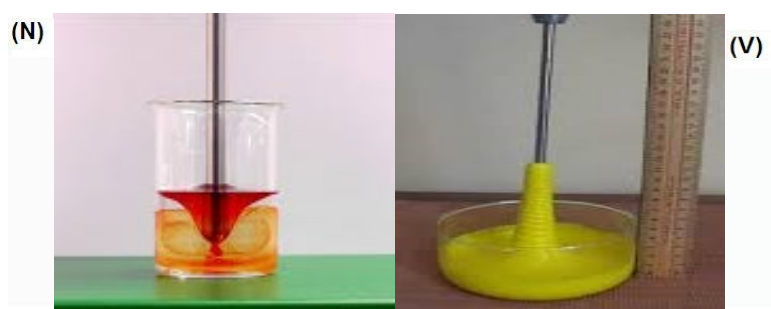


شکل ۲-۲- طرح شماتیک جریان برشی ساده (جریان کوئت) [Phan-Thien 2002].

همچنین برای سیال ویسکوالاستیک، چنانچه در حین حرکت صفحه بالایی، تنش به طور آنی قطع شود، (نیروی روی صفحه قطع و صفحه به حال خود، رها گردد)، صفحه بالایی تا حدی به عقب برمی گردد، در حالی که در سایر صفحات، توقف صفحه بالایی نیز آنی است. در واقع، بازگشت صفحه بالایی ناشی از خاصیت الاستیک ماده است، اما این بازگشت، نسبت به مواد الاستیک با خواص الاستیک یکسان، کندتر است که این موضوع ناشی از وجود مکانیزم ویسکوز در این مواد است. بر این اساس، ادعا می شود که این مواد دارای یک حافظه جهت دار از تغییر شکلهای خود بوده و از حالت قبلی خود آگاه هستند [Phan-Thien 2002]. یکی از مهمترین تفاوت های سیالات ویسکوالاستیک با سایر سیالات، وجود اختلاف تنش های نرمال اول و دوم در این مواد است. به عنوان نمونه در جریان کوئت، یک سیال معمولی تنش های نرمال همواره ثابت برابر فشار استاتیکی است اما در جریان کوئت یک سیال ویسکوالاستیک، اختلافی بین تنش های نرمال مشاهده می شود [Huilgol & Phan-Thien 1997]. به طور کلی، جریان برشی این مواد، آرایش و موقعیت مولکولها را تحت تاثیر قرار می دهد و کشیدگی و همراستا شدن مولکول های طویل پلیمری در راستای خطوط جریان را در پی دارد که این امر سبب خواص غیر ایزوتروپیک در سیال می شود. لذا جهت حفظ این انحراف، میدان تنش نیز تحت تاثیر قرار گرفته و اختلاف تنش های نرمال پدید می آیند [Bird et.al. 1987]. بنابراین می توان خلاصه نمود که دارا بودن ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش و نیز وجود اختلاف تنش های نرمال در سیالات ویسکوالاستیک، سبب بروز رفتارهای عجیب و بعضا متضاد در این سیالات نسبت به سایر سیالات می شود که در ادامه برخی از این رفتارها به اختصار مطرح می گردد.

الف - تغییر شکل سطح آزاد یک سیال در حال چرخش

هنگامی که یک سیال نیوتنی در یک ظرف، به وسیله یک میله چرخان، به هم زده می‌شود، سطح سیال در وسط ظرف، پایین و در نزدیکی دیواره بالا می‌آید. این پدیده ناشی از نیروهای گریز از مرکز بوده و سبب تبدیل سطح آزاد سیال به یک سطح مقعر با تقارن محوری می‌شود. چنانچه این آزمایش به وسیله یک سیال ویسکوالاستیک تکرار شود، سطح جریان، به شکل یک سطح محدب در می‌آید و اصطلاحاً گفته می‌شود که سیال تمایل به بالا رفتن از میله چرخان را دارد.

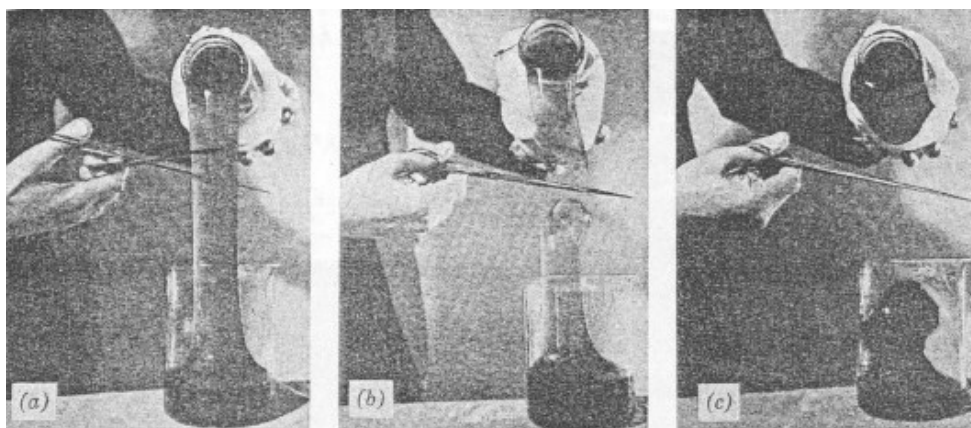


شکل ۲-۳ - اعمال چرخش به دو سیال نیوتنی (N) و ویسکوالاستیک (V) [Phan-Thien 2002].

همانطور که در شکل (۲-۳) مشاهده می‌شود، در بخش سیال نیوتنی، سطح سیال به شکل مقعر و در حالت سیال ویسکوالاستیک سطح سیال به شکل محدب دیده می‌شود [Huilgol & Phan-Thien 1997].

ب - بازگشت فنری

اگر یک سیال ویسکوالاستیک در حال خالی شدن از یک ظرف به ظرف دیگری باشد، چنانچه بوسیله یک قیچی جریان قطع شود، قسمتی از سیال که بالای قیچی قرار دارد دوباره به ظرف اول باز می‌گردد. این پدیده ناشی از خواص الاستیک ماده است و اصطلاحاً گفته می‌شود که سیال ویسکوالاستیک دارای حافظه است [Phan-Thien 2002].

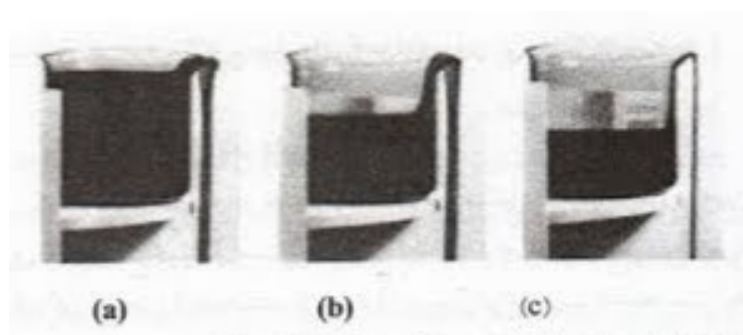


شکل ۲-۴ - بازگشت فنی یک سیال ویسکوالاستیک [Phan-Thien 2002].

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، در یک سیال ویسکوالاستیک، پس از قطع جریان توسط قیچی، قسمتی از سیال که در بالای قیچی قرار دارد، به داخل ظرف بازگشته است [Phan-Thien 2002].

ج - سیفون بدون لوله

پدیده جالب توجه دیگر در جریان مواد ویسکوالاستیک، جریان سیفون بدون لوله در این مواد است. تخلیه سیفونی یک سیال نیوتونی از یک طرف تنها بوسیله قرار دادن لوله در آن و ایجاد مکش کافی در سر آزاد لوله امکان پذیر است. اما ایجاد جریان سیفونی در سیالات ویسکوالاستیک حتی بدون وجود لوله نیز امکان پذیر است! این پدیده در پلیمر های دارای مونومر های بزرگتر (پلیمر های درشت ملکول) با جریان بیشتری اتفاق می‌افتد. باور بر این است که کشیدگی ملکول های طویل پلیمر در امتداد خط جریان سبب ادامه یافتن جریان سیفون می‌شود.



شکل ۲-۵ - سیفون بدون لوله سیالات ویسکوالاستیک

همانطور که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، در یک سیال ویسکوالاستیک جریان سیفونی بدون وجود لوله به وقوع پیوسته است.

۲-۱-۱-۳-۲ پارامترهای مهم در جریان سیالات ویسکوالاستیک

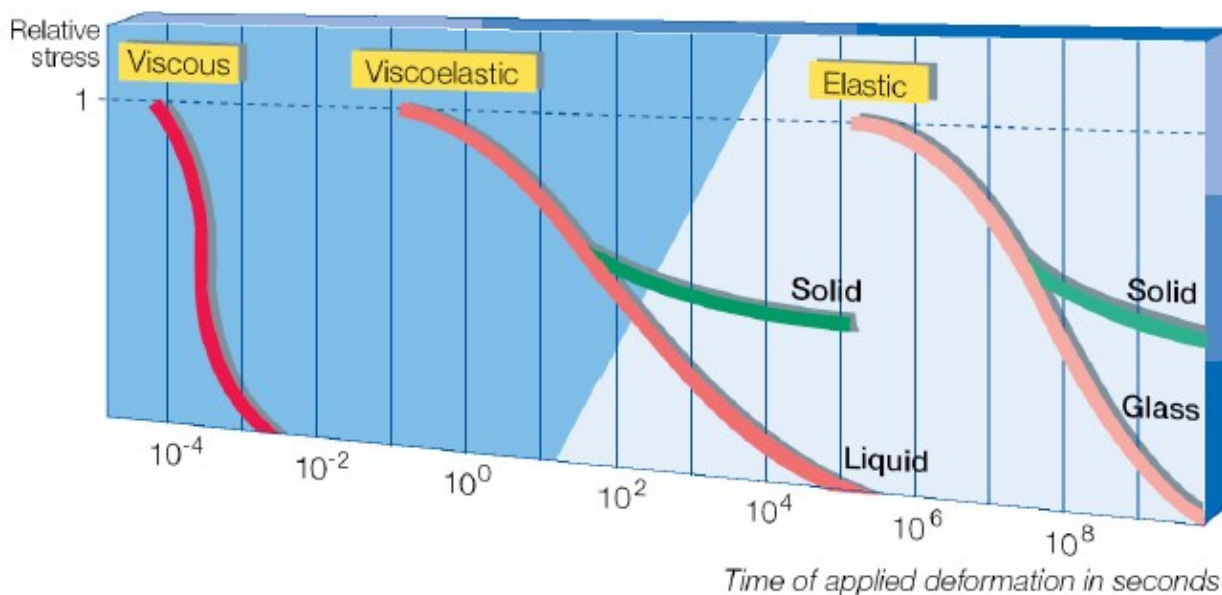
در تحلیل معادلات سیال ویسکوالاستیک، دو عدد بدون بعد مهم به کار برده می‌شود که در پیش‌بینی رفتار جریان این سیالات و همچنین تعیین میزان ویسکوالاستیسیته ماده اهمیت دارد. پیش از معرفی این اعداد، اصطلاح زمان رهایی از تنش تعریف می‌شود.

زمان رهایی از تنش یک خاصیت هر ماده به شمار می‌آید که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{\eta}{G} \quad (۱-۲)$$

که در آن، λ زمان رهایی از تنش، η ویسکوزیته و G مدول صلبیت می‌باشد [Phan-Thien 2002].

در نمودار شکل ۲-۶ زمان اعمال تغییر شکل در مواد گوناگون تحت بارگذاری‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- زمان اعمال تغییر شکل در مواد گوناگون تحت بارگذاری‌های مختلف [Malkin 1994]

با توجه به نمودار فوق، در محور افقی، زمان تغییر شکل مواد و در محور عمودی تنش برشی وارد شده نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲-۶ مشخص است، به ازای اعمال تنش نسبی معادل ۱، زمان رهایی از تنش یک سیال ویسکوز حدوداً 10^{-4} ثانیه می‌باشد. اما در مورد جامدات و مواد الاستیک، زمان رهایی از تنش بسیار بیشتر می‌باشد، مثلاً در شیشه این زمان، معادل 10^5 ثانیه به طول می‌انجامد. در جامدات، ممکن است برای اینکه تنش اعمال شده به صفر برسد، زمانی معادل ماهها و حتی سالها طول بکشد در واقع، این مساله از ویژگیهای مهم جامدات است که تنش را در خود نگه می‌دارند، زمان رهایی از تنش در یک جامد ایده آل بی‌نهایت است. اما مواد ویسکوالاستیک در واقع، حد واسطی بین جامدات و سیالات محسوب می‌شوند که اگر رفتار دو حالت جامد و مایع را در نظر بگیریم، در مورد مایعات ویسکوالاستیک، این زمان حدود 10^5 ثانیه و در مورد جامدات می‌تواند بسیار بیشتر از این مقدار باشد.

با توجه به مطالب فوق و نیز فرمول زمان رهایی از تنش، می‌توان اظهار داشت که هرچه ویسکوزیته یک ماده کمتر و مدول صلبیت آن بیشتر باشد، چون زمان رهایی از تنش کمتر می‌شود، آن ماده رفتاری شبیه به رفتار سیال دارد و برعکس. به این ترتیب که با افزایش ویسکوزیته ماده و نیز کاهش مدول صلبیت، رفتار جامد گونه قوی‌تر و زمان رهایی از تنش بیشتر می‌شود. این زمان، برای گازها و مایعات نیوتنی عددی بسیار کوچک (کوچکتر از 10^{-4} تا 10^{-6}) و برای جامدات الاستیک عدد بزرگی (بزرگتر از ۱۰۰ ثانیه) است [Phan-Thien 2002].

۱- عدد دبورا

عدد دبورا بصورت نسبت زمان آسودگی از تنش به زمان مشخصه تعریف می‌شود.

$$De = \frac{\lambda}{t_p} \quad (2-2)$$

که در آن، λ زمان رهایی از تنش، t_p زمان مشخصه می‌باشد. بنابراین برای یک زمان مشخصه معین (یا نسبت مقیاس طولی به مقیاس سرعت معین) عدد دبورا در گازها و مایعات نیوتنی عددی بسیار کوچک و در جامدات الاستیک عدد بسیار بزرگی است [Phan-Thien 2002].

۲-۱-۱-۳-۳-مدلهای رئولوژی

اینکه در سیالات ویسکوالاستیک چه رابطه‌ای بین تنش و نرخ کرنش برقرار است، موضوع مهمی بود که توسط دانشمندان مختلف مورد بررسی قرار گرفت و منجر به ایجاد معادلات ساختاری و مدلهای مختلف رئولوژی گردید.

به‌طور کلی، مدلهای رئولوژی تبیین‌کننده رابطه‌ی بین تانسور تنشهای اضافی و تانسور نرخ کرنش برای یک سیال هستند. مدلهای رئولوژی ویسکوالاستیک که موضوع تحقیق حاضر می‌باشند، به گروه مدلهای خطی و غیر خطی تقسیم بندی می‌شوند. مدل‌های ویسکوالاستیک خطی بر پایه تلفیق خواص جامدات خطی و سیالات نیوتنی ارائه شده‌اند. به‌عبارتی این مدل‌ها از ترکیب‌های مختلفی از مجموعه‌ای از فنرها و دمپرهای خطی حاصل شده‌اند. از معروفترین نوع این مدل‌ها می‌توان به مدل ماکسول، کلوین-ویت، برگرز و ماکسول توسعه یافته اشاره نمود. مدل ماکسول، رفتار سیال ویسکوالاستیک را بر اساس یک فنر و دمپر سری و مدل کلوین-ویت این رفتار را بر اساس یک فنر و دمپر موازی خطی شبیه سازی می‌کند. در مدل برگرز از ترکیب یک المان ماکسول با یک المان کلوین-ویت به صورت سری استفاده می‌شود و مدل ماکسول توسعه یافته نیز از طریق موازی کردن تعداد متناهی از المانهای ماکسول به‌دست می‌آید [Bird et al. 1987].

هر چند که مدل‌های ویسکوالاستیک خطی روابط دیفرانسیلی ساده‌ای را بین تنش و نرخ برش پیش‌بینی می‌کنند، اما این مدل‌ها به دلایلی نظیر رفتار کاملاً غیرخطی محلولهای غلیظ، مذابهای پلیمری و سیالات بیولوژیک و همچنین عدم توانایی مدل‌سازی اختلاف تنش‌های نرمال و وابستگی توابع رئولوژیک به نرخ برش در مدلهای خطی دارای خطای محاسباتی می‌باشند [Larson 1988]. با این وجود، استفاده از مدل‌های خطی برای تحلیل تغییر شکل‌های کوچک مواد ویسکوالاستیک رایج است. همچنین به دلیل پیچیدگیها و ناپایداریهای شدید عددی در مدل‌های غیر خطی، توصیه می‌شود که تحلیل جریان، در ابتدا با استفاده از مدل‌های خطی انجام شود و پاسخ‌های حاصل از آن به عنوان فرض اولیه در مدل‌های غیر خطی به‌کار رود. از جمله مدل‌های ویسکوالاستیک غیرخطی می‌توان به خانواده مدل‌های اولدروید، مدل راینر-ریولین، مدل

کریمینال اریکسون فیلبی، مدل چهار ثابتۀ فان- تین-تنر، مدل سه ثابتۀ گزیکس، مدل دامبل و مدل کارتیس-برد اشاره نمود [Bird et al. 1987].

در تحقیق حاضر از خانواده مدل‌های اولدروید جهت مدلسازی رفتار سیال ویسکوالاستیک در حین وقوع ضربه قوچ، استفاده شده که در فصل سوم، معادلات ساختاری این مدل، تشریح می‌گردد.

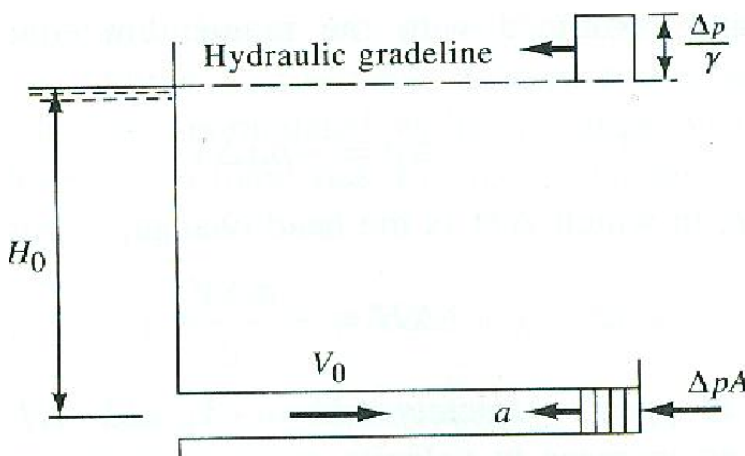
حال، که جایگاه سیالات ویسکوالاستیک، در بین گروههای مختلف سیالات غیرنیوتنی مشخص شد، به‌منظور مقایسه عملکرد رفتاری این سیالات با سایر گروهها، باید بررسی نمود که آیا تاکنون مطالعاتی در مورد ضربه قوچ با در نظر گرفتن این سیالات غیر نیوتنی انجام گرفته است؟

جهت پاسخ به این پرسشها در ادامه، مرور کوتاهی بر پدیده ضربه قوچ و تاریخچه مطالعات پیشین در زمینه جریان گذرا در حین وقوع پدیده ضربه قوچ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

❖ بخش دوم

۲-۲- پدیده ضربه قوچ (چکش آبی)

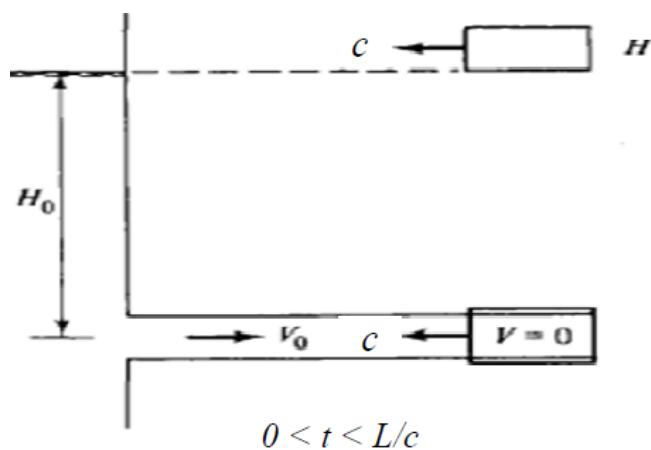
برای توضیح و درک بهتر پدیده ضربه قوچ، این مکانیزم در سیستم مخزن-لوله- شیر بررسی می‌شود.



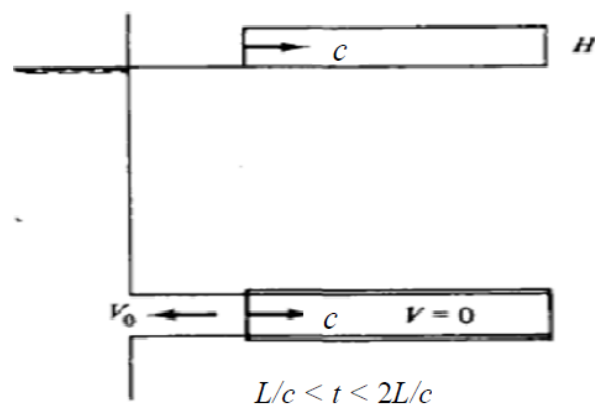
شکل ۲-۷- توقف لحظه‌ای سیال بدون اصطکاک در لوله افقی [Wylie & Streeter 1993]

ابتدا سیال در لوله با سرعت اولیه مشخص، در حالت ماندگار در جریان است. ناگهان در لحظه $t = 0$ شیر واقع در پایین دست، بسته می‌شود. بنابراین، سرعت در پشت شیر، برابر با صفر خواهد شد. بر اساس رابطه برنولی، در این لحظه، فشار در پشت شیر به اندازه هد، افزایش می‌یابد. این افزایش فشار، باعث انبساط لوله

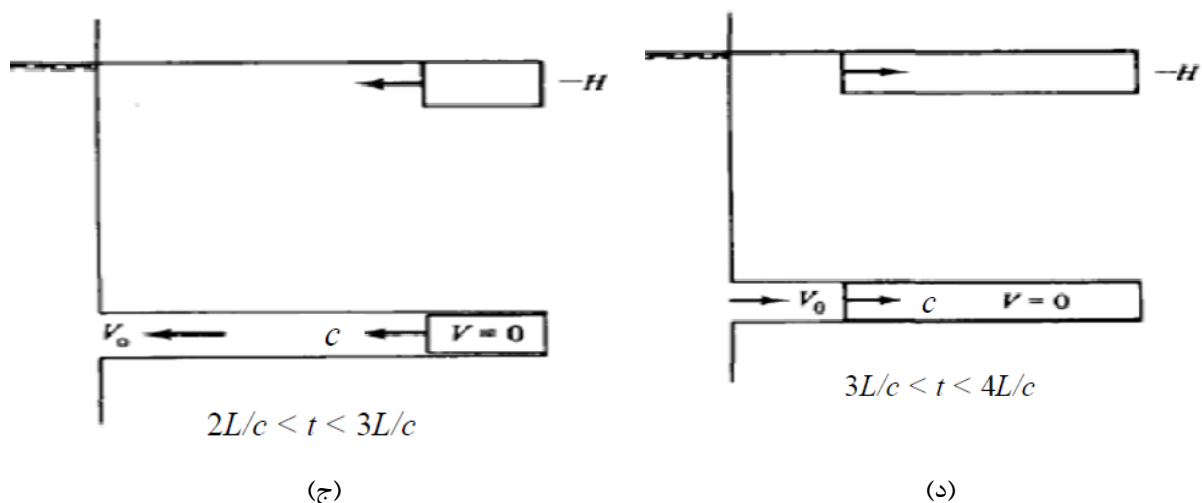
می‌شود. اما از آنجایی که هنوز از بالادست، سیال با سرعت اولیه مشخص، به سمت شیر در جریان است، لایه‌های سیال، یکی پس از دیگری متراکم شده و این موج فشار با سرعت c به سمت بالادست، منتقل و در لحظه $t = \frac{L}{c}$ به مخزن خواهد رسید. در شکل الف، تمام سیال موجود در لوله تحت هد اضافی H قرار گرفته‌است. در این لحظه، به دلیل عدم توانایی موج فشار در تغییر هد مخزن، شرایط نامتوازنی رخ خواهد داد. این امر، باعث می‌شود، تا جریان معکوسی در لوله با همان سرعت اولیه شکل گیرد تا وضعیت جریان را به حالت قبل برگرداند. موج کاهش فشار، در لحظه $t = \frac{2L}{c}$ به شیر خواهد رسید (شکل ب). پس از رسیدن موج کاهش فشار به شیر، از آنجایی که شیر بسته است و جریانی در آن، شکل نمی‌گیرد، فشار در این لحظه در این محل به $-H$ خواهد رسید. این کاهش فشار، باعث انقباض لوله می‌شود. نتیجه شرایط نامتوازن این است که موج فشار منفی با سرعت c به سمت بالادست حرکت خواهد کرد و در لحظه $t = \frac{3L}{c}$ به مخزن خواهد رسید (شکل ج).



(الف)



(ب)



شکل ۲-۸- مراحل رخداد ضربه قوچ [Wylie & Streeter, 1993]

در این لحظه، چنانچه فشار درون لوله از فشار بخار کمتر شود، سیال، تبخیر و پدیده کاویتاسیون و جدایی ستون مایع، رخ خواهد داد. پس از رسیدن موج فشار منفی به مخزن، دوباره شرایط نامتوازنی ایجاد خواهد شد و سیال درون لوله با همان سرعت اولیه به سمت جلو جاری می شود. همزمان با انتشار موج به پایین دست با سرعت c ، لوله و جریان سیال به شرایط عادی برمی گردند. زمانی که موج به شیر می رسد، $t = \frac{4L}{c}$ شرایط، دقیقاً همانند زمان بسته شدن شیر است. (شکل د). این فرایند هر $t = \frac{4L}{c}$ ثانیه تکرار می شود [Wylie & Streeter 1993].

۲-۳- تاریخچه مطالعات جریانهای میرا

هیدرولیک جریانهای میرا برای اولین بار توسط نیوتن و لاگرانژ در قرن ۱۷ با تحقیق درباره نحوه انتشار امواج صوتی در هوا و انتشار امواج در آبهای کم عمق، مورد مطالعه قرار گرفت. بعدها در سال ۱۸۶۶، وبربه مطالعه جریان سیال غیر قابل تراکم در لوله های کشسان پرداخت و آزمایشاتی جهت تعیین سرعت امواج فشاری انجام داد. همچنین او معادلات پیوستگی و اندازه حرکت را که اساس مطالعات جریانهای غیرماندگار به شمار می روند را ارائه نمود. در ۱۸۷۸، کورت وگ، سرعت موج را با توجه به کشسان بودن جداره لوله و کشسانی سیال ارائه [Korteweg 1878]. گرومیکا در ۱۸۸۳ در بررسی سرعت انتشار امواج ضربه قوچ در لوله های الاستیک، برای اولین بار افتهای اصطکاکی را به هنگام تحلیل ضربه قوچ مد نظر قرار داد. او فرض

کرد که سیال، غیر قابل تراکم است و افتهای اصطکاکی با سرعت، رابطه مستقیم دارند [Gromeka 1883]. به طور کل، در خلال ربع اول قرن بیستم، بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه ضربه قوچ، در قاره اروپا بوده است. جکفسکی قانون محاسبه مقدار فشار در اثر بستن آنی شیر را برای سیستم ساده شیر لوله مخزن به دست آورد. این قانون، بیان می‌دارد که میزان افزایش فشار در اثر بستن آنی شیر از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Delta H = \frac{cV_0}{g} \quad (3-2)$$

که در این رابطه، c : سرعت انتشار موج صوت در سیال، V_0 : سرعت اولیه سیال در لوله و g : شتاب جاذبه زمین می‌باشد. ژوکوفسکی بر اساس مطالعات نظری و آزمایشگاهی که انجام داد، گزارشی در مورد تئوری اساسی ضربه قوچ منتشر نمود همچنین او با استفاده از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت، رابطه ای ما بین کاهش سرعت و افزایش فشار ناشی از آن به دست آورد [Joukowsky 1898]. آلیوی در سالهای ۱۹۰۳ تا ۱۹۱۳ تحلیل‌های دقیق تئوری ارائه نمود که پایه‌ای برای تئوری های مدرن قرار گرفت. در مدلهای کلاسیک و معمول روابط ضربه قوچ، جهت مدلسازی ترم اصطکاک، معمولاً در الگوریتمهای استاندارد حل معادلات، 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 حالات، تنشهای برشی دیوار رفتاری شبه استاتیکی از خود، بروز می‌دهند، وی در همان سالها، تئوری عمومی ضربه قوچ خود را منتشر نمود، معادله اندازه حرکتی که او به دست آورد، از آنچه کورت‌برگ به دست آورده بود، دقت بیشتری داشت [Allievi 1913]. استریتر و لای در ۱۹۶۳ در مقاله ای مشترک برای نخستین بار، روش مشخصه را در تحلیل جریان میرا با استفاده از کامپیوتر، تعمیم دادند [Streeter & Lai 1963]. در ۱۹۶۶، رویس برای اولین بار روش بسته شدن بهینه شیر را با مطالعه بر روی مراحل بسته شدن شیرهای توربین هیدرولیکی ارائه نمود [Ruus 1966]. از بارزترین تحقیقات انجام شده در زمینه اصطکاک غیر ماندگار می‌توان به مقاله تحلیلی زیلیک اشاره نمود [Zielke 1968]. وی در این تحقیق برای جریانهای غیر ماندگار لایه‌ای در حالت تک بعدی روابطی تحلیلی به دست آورد که همچنان به عنوان مرجع برای مقایسه دیگر مسائل مشابه به کار 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 حالت غیرماندگاری، لازم است که محاسبات، برای همه گامهای زمانی تکرار گردد، به همین سبب، نیاز به پردازش قابل توجهی می-باشد و استفاده از آن را در کاربردهای مهندسی تا حد زیادی محدود می-نماید. از آن پس، مطالعات متعددی با محوریت پدیده ضربه قوچ توسط پژوهشگران انجام گرفت که از این میان، می-توان به مواردی نظیر بررسی اثرات اصطکاک غیرماندگار در طول لوله و مدلسازی شبه دو بعدی معادلات حاکم، تاثیر جنس لوله و نیز تکیه-گاهها بر میرایی جریان انتقالی، اثرات وجود روزنه در لوله و نشت جریان، بررسی کاویتاسیون و امکان جدایی ستون سیال در 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 می-باشد و حال آنکه فرض اصلی در تحقیق حاضر، برقراری یک سیال غیرنیوتنی در لوله از نوع ویسکوالاستیک و مشاهده رفتار موج فشاری در طی رخداد پدیده ضربه قوچ در لوله می-باشد. جستجوهای صورت گرفته دراین خصوص، نشان می-دهد که بررسی این موضوع، تنها به دو مطالعه محدود می-شود که در آنها اثرات سیال غیرنیوتنی در طول پدیده ضربه قوچ به صورت کلی بررسی شده است. وهبا در مطالعه خود، از یک سیال غیر نیوتنی از نوع پاورلا و در لوله استفاده نمود و تاثیر 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 به جای چکش آبی، چکش سیال غیرنیوتنی نامید. مقاله او با این جمله آغاز می-شود: "هدف از این مطالعه، ساخت پلی بر شکاف بین تئوری چکش آبی و مکانیک سیالات غیر نیوتنی است". وهبا از روش عددی تفاضل محدود شبه دوبعدی برای تحلیل نتایج استفاده نمود. بدین ترتیب که برای عبارتهای مکانی از تفاضل مرکزی مرتبه دوم و برای انتگرالگیری زمانی از رانج کوتای مرتبه چهارم استفاده نمود و نتیجه گرفت که جریان غیر ماندگار لایه‌ای به شدت تحت تاثیر اثرات غیرنیوتنی سیال، شامل رفتار نازک شدگی برش و ضخیم شدن برش، قرار می-گیرد[Wahba 2013]. همزمان با وهبا، مجد در رساله دکتری خود با دو روش عددی به مدلسازی جریان غیر دائمی حاوی سیال غیرنیوتنی پرداخت. در روش اول برای محاسبه انتگرالگیری زمانی از روش

انتگرالگیری رانج کوتای مرتبه چهارم و در روش دوم، از روش خطوط مشخصه دو بعدی استفاده نمود و پس از راستی آزمایی نتایج حاصل از روشهای عددی فوق با نتایج آزمایشگاهی موجود، نتیجه گرفت که به-کارگیری سیال غیرنیوتنی تاثیرات قابل توجهی در تغییرات تاریخچه زمانی فشار و همچنین توزیع پروفیل سرعت سیال می گذارد، از آن جمله می توان به اثر افزایش فشار و لاین پکینگ در اثر افزایش نازک شدگی برش اشاره نمود [مجد ۱۳۹۴]. نوروزی و همکاران در مطالعه ای به بررسی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک پرداختند و با بکارگیری روش عددی لاکس فردریش به این نتیجه رسیدند که زمان میرایی در جریان انتقالی ناشی از سیال ویسکوالاستیک، نسبت به سیال نیوتنی، طولانی تر بوده و دمپینگ جریان، دیرتر اتفاق می افتد. و همچنین میزان تنش های برشی ناشی از این پدیده در لوله در مقایسه با سیالات نیوتنی تا حد زیادی کاهش می یابد [نوروزی ۱۳۹۸]. تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد که تاکنون به کارگیری سیال ویسکوالاستیک و بررسی عملکرد موج فشاری آن در اثر بسته شدن ناگهانی شیر به روش MOC در سیستم شیر-لوله و مخزن در آثار هیچ یک از محققین مشاهده نشده است. با توجه به کاربرد وسیع این گروه از سیالات غیرنیوتنی در صنعت، داروسازی، پلیمر و... بررسی این موضوع که ممکن است در اثر قطع ناگهانی جریان برق، خرابی پمپ و یا وقوع هر اتفاق پیش بینی نشده دیگری که می تواند منجر به توقف ناگهانی جریان سیال شود، ضروری به نظر می رسد.

فصل سوم

معادلات حاکم بر ضربه قوچ در لوله
حاوی سیال ویسکوالاستیک

- معادلات حاکم بر ضربه قوچ
- خانواده مدل های اولدروید
- معادلات اصلی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک
- بی بعد سازی معادلات

این فصل که به معادلات حاکم بر ضربه قوچ در لوله حاوی سیال ویسکوالاستیک اختصاص داده شده است، به چهار بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول، معادلات حاکم بر ضربه قوچ در حالت کلی اثبات و بازنویسی می‌شود، در بخش دوم برای تکمیل معادلات تنش، خانواده مدل‌های اولدروید، معرفی می‌گردد و پس از انجام مراحل محاسبه و جایگزینی معادلات، با استفاده از قوانین تانسورها و مفاهیم هیدرودینامیکی در بخش سوم، معادلات اصلی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک تشریح می‌گردد. و در بخش آخر مراحل بی بعد سازی معادلات، انجام شده است.

۳-۱- معادلات کلی حاکم بر ضربه قوچ

برای استحصال روابط حاکم بر جریان میرا به گونه ای که بتوان با آن رفتار یک سیال ویسکوالاستیک غیر نیوتنی را مدل سازی نمود، لازم است، معادلات حاکم از ابتدا بازنویسی شوند. معادلات پایه و اساسی حاکم بر ضربه قوچ، همان معادلات پایستار پیوستگی و مومنتوم می‌باشند. علاوه بر آن، از روابط دیگری همچون معادله‌ی حالت استفاده خواهد شد که هر کدام در جای خود تعریف می‌شوند. در محاسبه روابط از سیستم مختصات استوانه‌ای استفاده می‌شود. در این بخش، ابتدا معادلات پایه پیوستگی و مومنتوم در دستگاه مختصات استوانه‌ای ارائه خواهند شد، سپس با بیان فرضیات مسئله و تبدیلات و جایگزین‌های لازم، به تشریح روند استحصال معادلات پرداخته می‌شود. قابل ذکر است در این مرحله فرض تراکم‌پذیری برای سیال برقرار خواهد بود.

۳-۱-۱ معادله پیوستگی

اصل بقای جرم که معادله‌ی پیوستگی نیز نامیده می‌شود، از مباحث ابتدایی مکانیک محیط‌های پیوسته بوده که بیان می‌دارد که اگر حجم کوچکی از ماده را در امتداد حرکتش پی بگیریم، جرم مخصوص و حجم آن ممکن است تغییر کند، اما حاصل ضرب آنها که بیانگر جرم ماده است، مقداری ثابت خواهد بود که به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{D}{Dt}(\rho dV) = 0 \quad (3-1)$$

که فرم نمادین معادله پیوستگی به صورت زیر تعریف می‌شود [Bird et al. 2002]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (2-3)$$

با جایگزاری اپراتور $\nabla \cdot \rho \mathbf{v}$ در سیستم مختصات استوانه‌ای و با توجه به فرض تقارن محوری در طول لوله، می‌توان از مقادیر زاویه و تغییرات زاویه‌ای صرف‌نظر نمود. با حذف عبارتهای مربوط به سرعت زاویه‌ای معادله پیوستگی به شکل زیر ساده خواهد شد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (3-3)$$

که در رابطه فوق، v_r سرعت شعاعی و v_z سرعت محوری جریان داخل لوله می‌باشند.

۳-۱-۱-۱- کاربرد معادله حالت در معادله پیوستگی

از آن جا که محاسبات در شبکه‌ی لوله‌ها غالباً بر حسب مقادیر فشار یا هد لوله انجام می‌گیرد، لذا در مرحله بعدی می‌بایست مقادیر چگالی و تغییرات آن، با متغیر فشار جایگزین شود. جهت برقراری رابطه بین متغیر چگالی، سیال و فشار سیال، از معادله‌ی حالت استفاده می‌شود [Keramat et al. 2013].

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial p_f} = \frac{\rho_f}{E_f} \quad (\text{F-3})$$

چنانچه شرایط هم‌دمایی برقرار باشد، و با توجه به رابطه خطی بین فشار و چگالی به شرط اینکه مدول حجمی بسیار بزرگتر از فشار سیال باشد $(p \ll \rho)$. با انجام عملیات جبری و صرفنظر از عبارت های همرفتی غیر خطی به علت کوچکی معادله پیوستگی در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (\Delta-3)$$

اگر معادله‌ی نیوتن- لاپلاس به صورت تقریبی، زیر در نظر گرفته شود [Keramat et al. 2013]:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \rightarrow \frac{1}{c^2} = \frac{\rho}{E} \quad (6-3)$$

که در آن، ρ و E جرم مخصوص و مدول بالک سیال هستند و ℓ معادل سرعت صوت در سیال بی کرانه است. با جایگزین کردن سرعت صوت و رابطه $p = \rho gh$ در رابطه (۳-۸) و از انجایی که هدف استحصال معادله پیوستگی حاکم بر ضربه قوچ است می توان از سرعت های شعاعی صرف نظر کرد، بنابراین معادله کلی پیوستگی در مدلسازی ضربه قوچ، به صورت زیر ساده سازی می شود:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (۷-۳)$$

که در رابطه فوق، h هد موج فشاری، v_z سرعت در راستای محور لوله، t زمان، g شتاب گرانش و c سرعت موج فشاری ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر می باشد که در بخش ذیل، معرفی می گردد.

۳-۱-۱-۲- معادله کامل سرعت موج در جریانهای انتقالی

رابطه سرعت موج که در معادله پیوستگی استفاده می شود، به صورت کامل تر که در برگیرنده اثرات تراکم-پذیری سیال و انعطاف پذیری جداره لوله است، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{1}{c^2} = \frac{d\rho_f}{dp} + \frac{\rho_f}{A} \frac{dA}{dp} \quad (۸-۳)$$

عبارت اول در سمت راست رابطه، نشان دهنده تاثیر پذیری سرعت موج از تراکم پذیری سیال و عبارت دوم، اثر نرمی جداره لوله می باشد. با حذف هر کدام از این دو عبارت می توان به ترتیب، سرعت موج در سیال تراکم ناپذیر و سرعت موج در جداره لوله صلب را محاسبه نمود. با استفاده از فرضیات تئوری الاستیسیته و در نظر گرفتن کرنش محوری لوله، معادله کامل سرعت موج در جریانهای انتقالی را می توان به صورت زیر در نظر گرفت [Wylie & Streeter 1993].

$$c^2 = \frac{\frac{E_f}{\rho_f}}{1 + \frac{E_f D}{e E_p}} \quad (۹-۳)$$

E_f مدول بالک سیال، ρ_f جرم مخصوص سیال، E_p مدول یانگ مصالح لوله، e ضخامت لوله و D قطر لوله می باشد. [Wahba 2013].

۳-۱-۲ معادله مومنتوم

فرم نمادین معادلات دیفرانسیل حرکت برای یک ذره که به معادله مومنتوم موسوم است، به صورت زیر تعریف می شود. فرض اساسی جهت به دست آوردن این معادلات، استفاده از قانون دوم نیوتن می باشد [Bird et al. 2002].

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} + \nabla p + [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] - \rho \mathbf{g} = 0 \quad (۱۰-۳)$$

جهت تعمیم معادله مومنتوم در راستای محور لوله، ابتدا باید تعاریف عملگرهای برداری معادله فوق در امتداد محور لوله در نظر گرفته شود [Bird et al. 2002]:

$$\begin{cases} \left[\frac{D\mathbf{v}}{Dt} \right]_z = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ [\nabla p]_z = \frac{\partial p}{\partial z} \\ [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}]_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (۱۱-۳)$$

با جایگزینی تعاریف فوق، در رابطه (۳-۱۶) معادله مومنتوم محوری حاصل می شود:

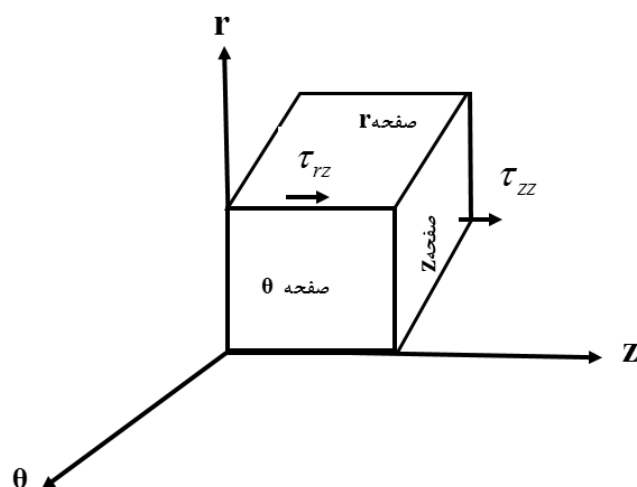
$$\rho \left[\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial p}{\partial z} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] - \rho g_z = 0 \quad (۱۲-۳)$$

با صرف نظر از ترمهای همرفتی سرعت به دلیل کوچکی [Wahba 2013] و اعمال فرض تقارن محوری در لوله که منجر به حذف مقادیر زاویه ای و تغییرات آن می شود، رابطه به صورت زیر ساده می شود:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] - \rho g \sin \theta = 0 \quad (۱۳-۳)$$

که در آن، θ زاویه بین محور لوله و یک صفحه افقی، τ_{rz} میزان تنش وارد بر صفحه r در جهت z و τ_{zz} میزان تنش وارد بر صفحه z در جهت z می باشد. یادآوری می شود که در هیدرودینامیک، نام هر صفحه از روی نام محوری که به طور متعامد با آن، قرار گرفته انتخاب می شود. بنابراین تعریف، صفحه r' ، صفحه ای است که محور r عمود بر آن و صفحه z صفحه ای است که محور z عمود بر آن واقع شده باشد که در

شکل ۳-۱، نمای کلی این صفحات و تنشهای برشی وارد بر آنها برای یک المان مکعبی در دستگاه مختصات استوانه‌ای، نشان داده می‌شود.



شکل ۳-۱- شماتیک تنشهای برشی وارد بر وجوه المانی از جریان

بیشترین میزان تنشهای برشی ناشی از رخداد پدیده ضربه قوچ را تنشهای برشی وارد بر جداره لوله تشکیل می‌دهد که با توجه به شکل τ_{rz} می‌باشد، به همین دلیل، در همه تحلیلهای جریان میرای ضربه قوچ، فقط از این تنش، به عنوان تنش مستهلک کننده جریان، در اثر بسته شدن ناگهانی شیر در طول لوله یاد می‌شود و از τ_{zz} صرف نظر می‌شود [Wahba 2013] که از دقت مناسبی نیز برخوردار است. بنابراین، معادله مومنتوم محوری کاربردی در اینگونه مسائل، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} - \rho g \sin \theta = 0 \quad (۳-۱۴)$$

در گام آخر، با در نظر گرفتن لوله به صورت افقی و همچنین جایگزینی هد فشار از معادله $p = \rho gh$ رابطه مومنتوم محوری به صورت زیر اثبات می‌شود:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{\partial \rho gh}{\partial Z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{rz}}{\partial r} - \rho g \sin \theta &= 0 \\ \rho \frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial Z} (\rho g) + \frac{1}{r} \frac{\partial r \tau_{rz}}{\partial r} - \rho g \sin \theta &= 0 \\ \rho \left[\frac{\partial V_z}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial Z} + \frac{1}{r \rho} \frac{\partial r \tau_{rz}}{\partial r} - g \sin \theta \right] &= 0 \end{aligned} \quad (۳-۱۵)$$

بنابراین، معادلات کلی پیوستگی و مومنتوم حاکم بر ضربه قوچ را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (۱۶-۳)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} = 0 \quad (۱۷-۳)$$

در معادلات فوق، چنانچه یک سیال نیوتنی نظیر آب، درون لوله جریان داشته باشد، در جایگذاری پارامتر تنش، به طور متداول، فرض بر این بوده که روابط جریان پایدار در لوله برقرار است و از معادله شزی در محاسبه تنش استفاده می‌شود:

$$\tau_{rz} = \tau_0 = \gamma R S_0 \quad (۱۸-۳)$$

که R نمایانگر شعاع هیدرولیکی است که از نسبت تقسیم مساحت به محیط مجاری محاسبه می‌شود و S_0 شیب کف کانال است که با توجه به فرض برقراری جریان پایدار، برابر با شیب خط انرژی در نظر گرفته می‌شود و به حالت شبه اصطکاک ماندگار خوانده می‌شود و مقدار معادل آن از رابطه دارسی-ویسباخ به صورت معادله زیر به دست آورده می‌شود:

$$s_0 = s_f = \frac{h_f}{l} = \frac{f v_{rel} |v_{rel}|}{2gD} \quad (۱۹-۳)$$

که در آن، h_f شیب خط انرژی، f ضریب دارسی-ویسباخ، v_{rel} سرعت نسبی سیال درون لوله نسبت به دیوار داخلی لوله می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_{rel} = v_z - i \quad (۲۰-۳)$$

که در آن v_z سرعت مطلق سیال و i سرعت مطلق دیواره لوله در امتداد محور مرکزی می‌باشد. بنابراین، در شرایطی که لوله ثابت باشد، مانند مسائل کلی ضربه قوچ، سرعت مطلق سیال، می‌تواند جایگزین سرعت نسبی شود [کرامت ۱۳۸۹]. بنابراین، تنش برشی جریان میرای ناشی از ضربه قوچ، معادل رابطه زیر خواهد بود:

$$\tau_{rz} = \tau_0 = \gamma \frac{D}{4} \frac{f v_z |v_z|}{2gD} = \rho \frac{f v_z |v_z|}{8} \quad (۲۱-۳)$$

با جایگزینی پارامتر تنش در جداره لوله، معادله مومنتوم متداول در تحلیل ضربه قوچ، استخراج می‌شود. بنابراین، معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر ضربه قوچ سیال نیوتنی را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (22-3)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{f v_z |v_z|}{2D} = 0 \quad (23-3)$$

- در صورتی که از اصطکاک در طول لوله صرف‌نظر شود، ترم تنش در معادله مومنتوم حذف شده در این حالت، این پدیده اصطلاحاً ضربه قوچ کلاسیک نامیده می‌شود.

اما پرسش اصلی اینجا مطرح می‌شود که در صورتی که سیال جاری در لوله از نوع غیر نیوتنی باشد، قطعاً نمی‌توان از ایجاد تنش برشی صرف‌نظر نمود و از طرف دیگر، تنشهای برشی ناشی از رخداد این پدیده را دیگر نمی‌توان با فرض جریان پایدار تحلیل نمود، پس در جایگذاری ترم تنش در معادله مومنتوم چه باید کرد؟

پاسخ این است که در مسیر بدست آوردن روابط نهایی، باید به سراغ علم رئولوژی و رفتار شناسی سیالات رفت و از معادلات ساختاری که در برگیرنده روابط بین تانسور تنش و نرخ برش هر سیال است، در تکمیل معادله مومنتوم، کمک گرفت. در تحقیق حاضر از معادلات ساختاری خانواده مدل‌های اولدروید استفاده شده که در ادامه این فصل، معرفی می‌گردد.

۳-۲- خانواده مدل‌های اولدروید

یکی از معروفترین روش‌های تبیین رفتار سیالات ویسکوالاستیک، خانواده مدل‌های اولدروید است. اصولاً این مدل، یک بسط خطی از تانسور تنش است. مدل اولدروید بر اساس یک فرض خاص از رفتار ویسکوالاستیک به‌دست آمده و یک مدل تجربی محسوب می‌شود [Oldroyd 1958]. خانواده روش اولدروید که در رساله حاضر مورد استفاده قرار گرفته است، مبحث مفصلی از مکانیک محیط‌های پیوسته می‌باشد [Bird et al. 1987] که پرداختن به جزئیات آن از حوصله این بحث خارج است و در اینجا تنها به نتایج حاصل از آن،

پردازته می‌شود. در معادلات ساختاری مدل اولدروید-بی، سیال درون لوله به صورت یک محلول که ترکیبی از یک حلال و حل‌شونده می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، تنش کل محلول از حاصل جمع تنش حلال و حل‌شونده محاسبه می‌شود.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_s \quad (24-3)$$

که τ تنش کل محلول، τ_s تنش حلال و τ_p تنش ماده حل‌شونده می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در مدل اولدروید-بی بخش حلال، به صورت یک سیال نیوتنی و بخش حل‌شونده از نوع یک سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیک (ماده پلیمری) لحاظ می‌گردد و روابط تنش در هر بخش محلول متفاوت است [Bird et al. 1987]. بنابراین هر بخش، به صورت جدا بررسی و پارامترهای آن معرفی می‌شود.

۳-۲-۱- روابط تنش حاکم بر بخش حلال یک محلول پلیمری ویسکوالاستیک

تنش برشی در این بخش، از روابط حاکم بر سیالات نیوتنی تبعیت می‌کند.

$$\boldsymbol{\tau}_s = \eta_s \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (25-3)$$

که η_s نمایانگر ویسکوزیته حلال و $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ نرخ برش سیال می‌باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}} = (\nabla \mathbf{v})^T \quad (26-3)$$

در روابط فوق، $\nabla \mathbf{v}$ تانسور گراد سرعت و T نیز نماد ترانپاز تانسور بردار سرعت می‌باشد که در سیستم مختصات استوانه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شوند [Bird et al. 1987]:

$$\nabla \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_r}{\partial r} & \frac{\partial v_\theta}{\partial r} & \frac{\partial v_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r}{r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \\ \frac{\partial v_r}{\partial z} & \frac{\partial v_\theta}{\partial z} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (27-3 \text{ الف})$$

$$(\nabla \mathbf{v})^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_r}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r} & \frac{\partial v_r}{\partial z} \\ \frac{\partial v_\theta}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r}{r} & \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3-27\text{ب})$$

بنابراین، با جایگزینی مقادیر حاصل از عملیات جمع تانسوری، در رابطه (3-29) تنش برشی بخش حلال، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\tau_s = \eta_s \cdot \begin{pmatrix} 2\left(\frac{\partial V_r}{\partial r}\right) & \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta}{r} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r} & \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \\ \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta}{r} & 2\left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_r}{r}\right) & \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial z} & 2\left(\frac{\partial V_z}{\partial z}\right) \end{pmatrix} \quad (3-28)$$

۳-۲-۲- روابط تنش حاکم بر بخش حل شونده یک محلول پلیمری ویسکوالاستیک

در بخش پلیمر حل شونده ویسکوالاستیک، تنشهای برشی از رابطه اولدروید-بی محاسبه می‌شوند:

$$\boldsymbol{\tau}_p + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p = \eta_p \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p \quad (3-29)$$

در رابطه فوق، λ ثابت زمان رهایی از تنش، η_p ویسکوزیته حل شونده، نرخ برش سیال و $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p$ مشتق زمانی همرفتی پاد همبسته تانسور تنش می‌باشد که به صورت $\tau_{p(l)}$ نیز نشان داده می‌شود و به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p = \boldsymbol{\tau}_{p(l)} = \frac{\mathbf{D}\boldsymbol{\tau}_p}{\mathbf{D}t} - \left((\nabla \mathbf{v})^T \cdot \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_p \cdot (\nabla \mathbf{v}) \right). \quad (3-30)$$

که $\frac{\mathbf{D}\boldsymbol{\tau}_p}{\mathbf{D}t}$ نمایانگر مشتق کامل تنش پلیمر حل شونده است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\mathbf{D}\boldsymbol{\tau}_p}{\mathbf{D}t} = \frac{\partial \boldsymbol{\tau}_p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau}_p \quad (3-31)$$

سایر تعاریف نظیر $\nabla \mathbf{v}$ و $(\nabla \mathbf{v})^T$ مشابه بخش حلال است. $\mathbf{v} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau}_p$ ماتریس حاصل از ضرب سرعت در گراد

تنش می‌باشد که در سیستم مختصات استوانه‌ای ماتریس زیر می‌باشد [Bird et al. 1987]:

$$v \cdot \nabla \tau_p = \begin{bmatrix} (v \cdot \nabla) \tau_{prr} - \frac{v_\theta}{r} (\tau_{pr\theta} + \tau_{p\theta r}) & (v \cdot \nabla) \tau_{pr\theta} + \frac{v_\theta}{r} (\tau_{prr} - \tau_{p\theta\theta}) & (v \cdot \nabla) \tau_{prz} - \frac{v_\theta}{r} \tau_{p\theta z} \\ (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta r} + \frac{v_\theta}{r} (\tau_{prr} - \tau_{p\theta\theta}) & (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta\theta} + \frac{v_\theta}{r} (\tau_{pr\theta} + \tau_{p\theta r}) & (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta z} + \frac{v_\theta}{r} \tau_{prz} \\ (v \cdot \nabla) \tau_{p z r} - \frac{v_\theta}{r} \tau_{p z \theta} & (v \cdot \nabla) \tau_{z \theta} + \frac{v_\theta}{r} \tau_{p z r} & (v \cdot \nabla) \tau_{p z z} \end{bmatrix} \quad (32-3)$$

در ماتریس فوق، عملگر $(v \cdot \nabla)$ معادل رابطه زیر می باشد:

$$(v \cdot \nabla) = v_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (33-3)$$

از طرفی در فرمول محاسبه τ_p^∇ علاوه بر تعاریف فوق، ضرب تانسورهای τ_p و (∇v) وجود دارد که باید بر اساس قوانین ضرب تانسوری محاسبه گردد [Bird et al. 1987]. در حالت کلی، اگر A و B دو ماتریس (3×3) باشند، حاصل ضرب نقطه‌ای تانسوری آنها به صورت زیر محاسبه می شود [Morrison 2001]

$$\begin{aligned} A \cdot B &= A_{ip} B_{pk} \hat{e}_i \hat{e}_k \\ A \cdot B &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 (A_{i1} B_{1k} + A_{i2} B_{2k} + A_{i3} B_{3k}) \\ A &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \\ A \cdot B &= \sum_{i=1}^3 (A_{i1} B_{11} + A_{i2} B_{21} + A_{i3} B_{31}) \hat{e}_i \hat{e}_1 + \sum_{i=1}^3 (A_{i1} B_{12} + A_{i2} B_{22} + A_{i3} B_{32}) \hat{e}_i \hat{e}_2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^3 (A_{i1} B_{13} + A_{i2} B_{23} + A_{i3} B_{33}) \hat{e}_i \hat{e}_3 \end{aligned} \quad (34-3)$$

که $\hat{e}_i$ ها بردارهای پایه متعامد می باشند. بنابراین، با استفاده از عملیات جبری ماتریسی و روابط ذکر شده، مقادیر تنش حلال و حل شونده و نهایتاً تنش محلول را می توان محاسبه نمود. در بخش ۳-۳، چهار معادله اصلی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، جهت مدلسازی این پدیده، به دست آورده می شوند.

۳-۳- معادلات اصلی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک

جهت رسیدن به یک فرمول بندی یک بعدی سازگار با معادلات کلاسیک چکش آبی، معادلات پیوستگی و مومنتوم بخش ۳-۱ در $2\pi r$ ضرب شده و سپس از ۰ تا R انتگرالگیری و نهایتاً نتیجه بر πR^2 تقسیم می -

شود. با این کار، تمام جملات موجود در معادلات (۳-۲۲) و (۳-۲۳) از حالت دو بعدی (t, z, r) به یک بعدی برحسب (t, z) تبدیل می‌شوند.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (3-35)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{2}{\rho R} \tau_{rz} \Big|_{r=R} = 0 \quad (3-36)$$

جهت استحصال معادله (۳-۳۶) کافیت، ترمهای معادله مومنتوم در راستای شعاع لوله به صورت زیر انتگرالگیری شوند:

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial r} = 0 \xrightarrow{2\pi r} \int_0^R \frac{\partial V}{\partial t} 2\pi r dr + \int_0^R g \frac{\partial H}{\partial z} 2\pi r dr + \int_0^R \frac{1}{\rho r} \frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial r} 2\pi r dr = 0 \quad (3-37 \text{ الف})$$

$$2\pi \frac{\partial V}{\partial t} \frac{r^2}{2} \Big|_0^R + 2\pi g \frac{\partial H}{\partial z} \frac{r^2}{2} \Big|_0^R + \frac{2\pi}{\rho r} r \tau_{rz} \Big|_0^R = 0 \quad (3-37 \text{ ب})$$

$$\pi R^2 \frac{\partial V}{\partial t} + \pi g R^2 \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{2\pi}{\rho} \tau_{rz} = 0 \xrightarrow{\div \pi R^2} \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{2}{\rho R} \tau_{rz} \Big|_{r=R} = 0$$

که در روابط فوق، سرعت و هد فشاری متوسط به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$V = \frac{1}{A} \int v_z dA \quad (3-38 \text{ الف})$$

$$H = \frac{1}{A} \int h dA \quad (3-38 \text{ ب})$$

که در آن، v_z سرعت محوری و H هد فشار جریان می‌باشد. با در نظر گرفتن روابط اولدریوید-بی و عملیات جبری تانسوری و نهایتاً صرفنظر از ترمهای همرفتی، ترم تنش در معادله مومنتوم محاسبه می‌شود:

$$\tau_{rz} \Big|_{r=R} = \tau_{sz} \Big|_{r=R} + \tau_{prz} \Big|_{r=R} \quad (39-3)$$

$$\tau_{sz} \Big|_{r=R} = \eta_s (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)_{rz} = \eta_s \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \Big|_{r=R} \quad (40-3)$$

$$\tau_{prz} \Big|_{r=R} + \lambda \tau_{prz}^{\nabla} \Big|_{r=R} = \eta_p \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \Big|_{r=R} \quad (41-3)$$

حال، با توجه به برقراری جریان آرام در لوله، از معادله پروفیل سرعت پوازی برای جریان آرام در یک لوله طولانی استفاده شده و ترمهای مناسب در معادلات تنش، جایگزین می‌شود.

$$v_z = v_{z\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (42-3)$$

در رابطه فوق، r فاصله شعاعی از مرکز لوله و R شعاع لوله می‌باشد. یادآوری می‌شود که در جریانهای آرام، رابطه $V = \frac{v_{z\max}}{2}$ بین سرعت متوسط و سرعت ماکزیمم در لوله برقرار است که با استفاده از تعریف سرعت متوسط در این جریانها، تنش بخش حلال و حل شونده به صورت زیر قابل اثبات است:

بخش حلال نیوتنی:

$$\tau_{sz} \Big|_{r=R} = \eta_s (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)_{rz} = \eta_s \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \Big|_{r=R} \quad (43-3 \text{ الف})$$

$$\begin{aligned} \tau_{sz} \Big|_{r=R} &= \eta_s \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \cdot 2V \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \right) + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right] \Big|_{r=R} = \\ \tau_s \left[2V \left(0 - \frac{2V \cdot R^2}{R^4} \right) \right] \Big|_{r=R} &= -\eta_s \frac{4V}{R} \end{aligned} \quad (43-3 \text{ ب})$$

بخش حل شونده ویسکوالاستیک:

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

$$\tau_{prz}|_{r=R} + \frac{\lambda \tau_{prz}}{\partial t} = \eta_p \cdot \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \cdot 2V \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \right) + \frac{\partial V_r}{\partial Z} \right] \Big|_{r=R} \quad (3-44-الف)$$

$$\tau_{prz}|_{r=R} + \frac{\lambda \tau_{prz}}{\partial t} = \eta_p \cdot \left[2V \left(0 - \frac{2rR^2}{R^4} \right) \right] \Big|_{r=R} \rightarrow$$

$$\tau_{prz}|_{r=R} + \frac{\lambda \tau_{prz}}{\partial t} = -\eta_p \frac{4V}{R} \quad (3-44-ب)$$

بنابراین، معادلات اساسی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک را می‌توان به صورت زیر جمع بندی نمود:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (3-45)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} (\tau_{srz}|_{r=R} + \tau_{prz}|_{r=R}) = 0 \quad (3-46)$$

$$\tau_{srz}|_{r=R} = -\eta_s \cdot \frac{4V}{R} \quad (3-47)$$

$$\tau_{prz}|_{r=R} + \lambda \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial t} = -\eta_p \frac{4V}{R} \quad (3-48)$$

در معادلات فوق، چنانچه از ترم تنش حل شونده ویسکوالاستیک، صرفنظر شود، معادله ضربه قوچ سیال نیوتنی قابل استخراج است:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (3-49)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{8\eta_s V}{\rho R^2} = 0 \quad (3-50)$$

که می‌توان با جایگزینی رابطه دارسی-ویسباخ در ترم تنش ناشی از اصطکاک در جریان آرام،

$$f = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64\eta_s}{\rho V 2R}$$

دست آورد.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (3-51)$$

که در آن، f ضریب دارسی-ویسباخ، V سرعت نسبی سیال درون لوله نسبت به دیوار داخلی لوله می-

باشد. در حالت نیوتنی، تنش برشی ناشی از اصطکاک جریان، به دلیل فرض برقراری جریان پایدار، به حالت

اصطکاک شبه دائمی خوانده می‌شود.

۳-۴- آنالیز ابعادی و بی بعد سازی معادلات حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک

آشنایی با پارامترهای بدون بعد، نقش مهمی در درک عمیق تر جریان سیالات دارند. مفاهیم تحلیل ابعادی و درک رفتار سیال تحت مطالعه در شرایط مختلف، امکان تعمیم نتایج آزمایشگاهی را فراهم می سازد. این تعمیم، چندین نتیجه را در بر دارد از جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود :

۱- پدیده ها را به طور کلی و بدون محدود شدن به حالت خاص آزمایش انجام شده تشریح نمود. به این ترتیب، می توان آزمایشات کمتری را در مورد وجوه ناشناخته مساله مورد نظر انجام داد که به طور قطع منجر به صرفه جویی در وقت و هزینه خواهد شد.

۲- نتایج حاصل را می توان به صورت فشرده و مفید به سایر پژوهشگران ارائه نمود تا استفاده از آنها ساده تر شود. ارائه اطلاعات منظم در این زمینه، موجب می شود که محققین قادر باشند جنبه های جدید و حوزه های نامعلوم یک پدیده را کشف نمایند.

۳- اگر ابزار لازم برای تحلیل های ابعادی موجود نباشند، پیشرفت علمی در مورد شناخت پدیده ها به تدریج از بین خواهد رفت.

۴- بسیاری از پارامترهای بدون بعد را می توان نسبت دو نیروی سیال دانست. مقدار نسبی این نسبتها نشان دهنده اهمیت نسبی یکی از نیروها نسبت به دیگری است.

۵- اگر در یک حالت خاص جریان، بعضی از نیروها خیلی بزرگتر از سایر نیروها باشند، غالباً می توان از اثر نیروهای کوچکتر صرف نظر نمود و پدیده را مورد بررسی قرار داد. در این صورت، نتایج، همانند هنگامی به دست می آید که تحلیل با در نظر گرفتن نیروهای اصلی انجام شده باشد.

به این ترتیب می توان برای حل مساله از روشهای آزمایشگاهی و ریاضی ساده تری استفاده نمود [Streeter and Lai, 1963]. متغیرها و پارامترهای بدون بعد به کار رفته جهت بی بعد سازی معادلات عبارتند از:

$$V^* = \frac{V}{v_0}, H^* = \frac{H}{cv_0/g}, z^* = \frac{z}{D}, t^* = \frac{t}{D/c}, \tau^* = \frac{\tau}{\rho cv_0} \quad (۵۲-۳)$$

$$De = \frac{\lambda}{D/v_0}, \quad \beta = \frac{\eta_p}{\eta_p + \eta_s}, \quad M = \frac{v_0}{c}, \quad Re = \frac{\rho v_0 D}{\eta_p + \eta_s} \quad (53-3)$$

که v_0 سرعت جریان در حالت دائمی، c سرعت صوت، D قطر لوله، H ارتفاع موج فشار جریان، τ تنش برشی، ρ جرم مخصوص سیال، λ زمان رهایی از تنش، η_p ویسکوزیته حل شونده، η_s ویسکوزیته حلال، De عدد دبورا، β عدد نسبت ویسکوزیته، M عدد ماخ و Re عدد رینولدز می‌باشند. حال، مراحل بی‌بعد سازی روی معادلات به دست آمده در این فصل (۳-۴۵ الی ۳-۴۸)، با استفاده از قوانین مشتق زنجیره‌ای و به کارگیری تعاریف فوق، انجام می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial H^*} \cdot \frac{\partial H^*}{\partial t^*} \cdot \frac{\partial t^*}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial V^*} \cdot \frac{\partial V^*}{\partial z^*} \cdot \frac{\partial z^*}{\partial z} = 0 \\ \boxed{\frac{\partial H}{\partial H^*} = \frac{cv_0}{g}, \frac{\partial t^*}{\partial t} = \frac{c}{D}, \frac{\partial V}{\partial V^*} = v_0, \frac{\partial z^*}{\partial z} = \frac{1}{D}} \\ \frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \end{array} \right. \quad (54-3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} (\tau_{srz}|_{r=R} + \tau_{prz}|_{r=R}) = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial V^*} \cdot \frac{\partial V^*}{\partial t^*} \cdot \frac{\partial t^*}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial H^*} \cdot \frac{\partial H^*}{\partial z^*} \cdot \frac{\partial z^*}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} (\tau_{srz}^* \rho c v_0|_{r=R} + \tau_{prz}^* \rho c v_0|_{r=R}) = 0 \\ \boxed{\frac{\partial V}{\partial V^*} = v_0, \frac{\partial t^*}{\partial t} = \frac{c}{D}, \frac{\partial H}{\partial H^*} = \frac{cv_0}{g}, \frac{\partial z^*}{\partial z} = \frac{1}{D}, \frac{\partial z^*}{\partial z} = \frac{1}{D}} \\ \frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} - 4(\tau_{srz}^*|_{r=R} + \tau_{prz}^*|_{r=R}) = 0 \end{array} \right. \quad (55-3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{srz} \Big|_{r=R} = -\eta_s \cdot \frac{4V}{R} \\ \tau_{srz}^* \rho c v_0 \Big|_{r=R} = -\eta_s \cdot \frac{8V^* v_0}{D} \\ \boxed{\beta = \frac{\eta_p}{\eta_s + \eta_p} \rightarrow \beta = \frac{\eta - \eta_s}{\eta} = 1 - \frac{\eta_s}{\eta}, M = \frac{v_0}{c}, \text{Re} = \frac{\rho v_0 D}{\eta}} \\ \tau_{srz}^* \Big|_{r=R} = \frac{-8}{\text{Re}} \cdot M \cdot V^* \cdot (1 - \beta) \end{array} \right. \quad (56-3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{prz} \Big|_{r=R} + \lambda \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial t} = -\eta_p \frac{4V}{R} \\ \rho c v_0 \tau_{prz}^* \Big|_{r=R} + De \cdot \frac{D}{v_0} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial \tau_{prz}^*} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} \cdot \frac{\partial t^*}{\partial t} = -\eta_p \frac{8V^* v_0}{D} \\ \rho c v_0 \tau_{prz}^* \Big|_{r=R} + De \cdot \frac{D}{v_0} \cdot \rho c v_0 \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} \cdot \frac{c}{D} = -\eta_p \frac{8V^* v_0}{D} \\ \tau_{prz}^* \Big|_{r=R} + De \cdot \frac{1}{v_0} \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} \cdot c = -\eta_p \frac{8V^* v_0}{\rho c v_0 D} \\ \boxed{\text{Re} = \frac{\rho v_0 D}{\eta}, M = \frac{v_0}{c}, \beta = \frac{\eta_p}{\eta_T}} \\ \tau_{prz}^* \Big|_{r=R} + \frac{De}{M} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} = -8\beta \cdot \frac{V^*}{\text{Re}} \cdot M \end{array} \right. \quad (57-3)$$

بنابراین، معادلات بی بعد حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک را می توان به صورت زیر معرفی نمود:

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \quad (58-3)$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} - 4(\tau_{srz}^* \Big|_{r=R} + \tau_{prz}^* \Big|_{r=R}) = 0 \quad (59-3)$$

$$\tau_{srz}^* \Big|_{r=R} = \frac{-8}{\text{Re}} \cdot M \cdot V^* \cdot (1 - \beta) \quad (60-3)$$

$$\tau_{prz}^* \Big|_{r=R} + \frac{De}{M} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} = -8\beta \cdot \frac{V^*}{\text{Re}} \cdot M \quad (61-3)$$

بنابراین در یک سیال ویسکوالاستیک، معادلات جریان غیر دائمی ناشی از ضربه قوچ متاثر از اعداد بی بعد رینولدز Re و بتا β و ماخ M می باشد که با صفر نمودن ترمهای حاوی تنش و ویسکوزیته پلیمری که در معادلات ضربه قوچ مورد رخداد ضربه قوچ در یک محلول نیوتنی، به صورت زیر مستخرج می گردد.

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \quad (۶۲-۳)$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} + \frac{32}{Re} M V^* = 0 \quad (۶۳-۳)$$

بنابراین، در یک محلول نیوتنی، اعداد تاثیرگذار بر معادلات، عدد ماخ و عدد رینولدز هستند که در شرایط در نظر گرفتن اصطکاک ناشی از تنش، در معادله مومنتوم ظاهر می شوند.

در مرحله بعد، پس از استحصال معادلات اساسی حاکم بر جریان گذرای یک سیال ویسکوالاستیک، باید با یک روش عددی مناسب، اقدام به گسسته سازی معادلات و مدل سازی مساله نمود. اینکه چه روش عددی برای مدل سازی این پدیده در نظر گرفته می شود، پرسشی است که در فصل بعد، به آن پاسخ داده می شود.

فصل ۴

حل عددی

- معرفی روش عددی خطوط مشخصه (MOC)
- حل عددی با روش خطوط مشخصه (MOC)
- شرایط اولیه و مرزی
- شبکه بندی خطوط مشخصه (MOC)

در این فصل ابتدا روش عددی خطوط مشخصه معرفی می گردد. سپس معادلات بدست آمده از ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک با استفاده از این روش مورد مدلسازی قرار می گیرد.

۴-۱- معرفی روش عددی خطوط مشخصه (MOC)

روش MOC، که به روش خطوط مشخصه معروف است، یکی از بهترین روش هایی است که برای حل معادلات جریانهای غیر دائمی بکار برده می شود و در بین تمام روش های عددی دیگر که می توان استفاده کرد، جواب های دقیق تر و سریعتری حاصل می شود. علت دقت و سرعت بالای این روش این است که به نوعی می توان گفت این روش یک روش نیمه تحلیلی است و جواب معادله دیفرانسیل را با یک حل تحلیلی روی خطوط مشخصی، تقریباً به طور دقیق می دهد. به همین دلیل معادلات زیادی برای بهبودی و تکامل روش خطوط مشخصه و گرفتن جواب های دقیق تر از آن صورت گرفته است که در این فصل سعی شده است تا بعضی از آن ها مورد بررسی قرار داده شوند. [کرامت ۱۳۸۹]

۴-۲- تحلیل معادلات جریان غیردائمی به روش MOC

در این قسمت معادلات هیدرولیک جریان که به صورت (۴-۱) و (۴-۲) می باشند با روش خطوط مشخصه حل می شود. [کرامت ۱۳۸۹]

$$L_1 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{C^2}{g} \frac{\partial V}{\partial Z} = 0 \quad (۴-۱)$$

$$L_2 = \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial Z} + f \frac{V |V|}{2D} = 0 \quad (۴-۲)$$

در این روش ابتدا معادلات دیفرانسیل جزئی پیوستگی و اندازه حرکت، بر روی مسیرهایی به معادلات دیفرانسیل کامل تبدیل می شود و سپس به روش تفاضل محدود صریح حل می شوند. چون در این روش هر قسمت لوله بصورت جداگانه تحلیل میشود، برای حل مسائل پیچیده مناسب تر است. البته عیب این روش این است که بازه های زمانی و مکانی باید نسبت به هم دارای تناسب خاصی باشند و به این دلیل بازه های زمانی باید وابسته به ابعاد مسئله انتخاب شوند. در نهایت معادلات هذلولی مذکور جهت حل به شرایط

مرزی و شرایط اولیه نیاز دارند. شرایط اولیه برای جریان غیر ماندگار مذکور، مقادیر دبی و ارتفاع پیزومتریک در حالت ماندگار است. شرایط مرزی نیز با توجه به صورت مسئله تعیین می شود. [کرامت ۱۳۸۹]

هدف این است که معادلات دیفرانسیل (۱-۴) و (۲-۴) به دو یا چند معادله دیفرانسیل ساده تر که قابل حل بصورت تحلیلی باشند، تبدیل شوند. برای این کار پارامتر دلخواه λ در نظر گرفته میشود و یک ترکیب خطی از دو معادله L_1 و L_2 با استفاده از آن ساخته می شود. سپس دو مقدار دلخواه به λ داده می شود تا دو معادله دیفرانسیل دیگر، که ترکیبی از L_1 و L_2 هستند بدست آید. برای این کار به صورت زیر عمل می شود. [کرامت ۱۳۸۹]

$$L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (۳-۴)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \lambda g \frac{\partial H}{\partial Z} + \lambda \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{C^2}{g \lambda} \frac{\partial V}{\partial Z} \right) + f \lambda \frac{V |V|}{2D} = 0 \quad (۴-۴)$$

با توجه به رابطه (۴-۴) می توان دید اگر ضرایب $\frac{\partial H}{\partial Z}$ و $\frac{\partial V}{\partial Z}$ عبارت $\frac{dZ}{dt}$ باشد می توان آن را بصورت یک معادله دیفرانسیل کامل تبدیل کرد. لکن فعلا بدون توجه به این مطلب، سعی میشود دو معادله دیفرانسیل از (۴-۴) بدست آورده شود. برای این کار ضرایب $\frac{\partial H}{\partial Z}$ و $\frac{\partial V}{\partial Z}$ را مساوی هم قرار داده میشود تا دو مقدار برای λ بدست آید. [کرامت ۱۳۸۹]

$$\lambda g = \frac{C^2}{g \lambda} \rightarrow \lambda^2 g^2 = C^2 \rightarrow \lambda = \pm \frac{C}{g} \quad (۵-۴)$$

با جایگذاری مقادیر λ در روابط (۴-۴) دو معادله دیفرانسیل به دست می آید که هم ارز دو معادله (۱-۴) و (۲-۴) هستند. بنابراین جواب این دو معادله دیفرانسیل در واقع جواب های معادلات دیفرانسیل ضربه قوچ هستند. برای انتگرال گیری و گسسته سازی معادلات به صورت زیر عمل می نمایند. [کرامت ۱۳۸۹]

اگر $C = \pm \frac{dZ}{dt}$ باشد، این معادلات به دو معادله دیفرانسیل کامل تبدیل می شود، زیرا مشخص است که:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial Z} \frac{dZ}{dt} = \frac{dH}{dt} \quad \text{و} \quad \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial Z} \frac{dZ}{dt} = \frac{dV}{dt} \quad (۶-۴)$$

اینکه بجای C گذاشته شود $\pm \frac{dZ}{dt}$ ، خللی در جواب ایجاد نمیکند زیرا Z و t دو متغیر مستقل هستند و اگر مسئله به این ملزم شود که گره ها روی این خط $C = \pm \frac{dZ}{dt}$ باشند می توان بین گره ها هر رابطه ای را که با استفاده از $C = \pm \frac{dZ}{dt}$ حاصل می شود استفاده کرد. [کرامت ۱۳۸۹]

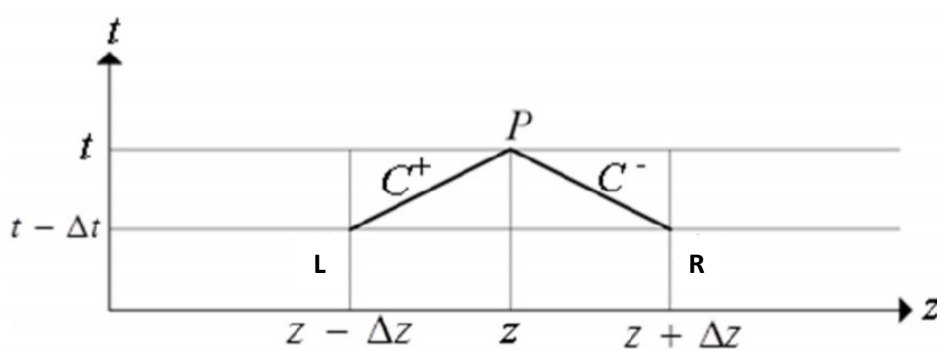
در روش تفاضل محدود ابتدا باید یک شبکه بنا شود تا مقادیر مجهولات را بتوان روی گره های شبکه بصورت گسسته شده درآورد. شبکه ای که در آنجا بنا میشد یک شبکه کاملاً دلخواه بود و تنها در صفحه گره هایی ایجاد میشد که بتوان معادلات را گسسته سازی کرد. اما در اینجا باید گره ها (مجهولات) را روی شبکه ای در نظر گرفت که بین ΔZ و Δt اش رابطه $\frac{dZ}{dt} = \frac{\Delta Z}{\Delta t} = C$ حاکم باشد. بنابراین در اینجا دیگر نمیتوان نقاط را در یک فضای Z-t دلخواه پخش کرد و بینشان رابطه برقرار کرد. بلکه باید حتماً نقاط را روی دسته خطوی که عبارت دیفرانسیلی $C = \frac{dZ}{dt}$ تولید میکند، گستراند. [کرامت ۱۳۸۹]

در نتیجه با توجه به معادلات گفته شده میتوان نوشت:

$$\text{if } C = \frac{dZ}{dt} \rightarrow \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} \frac{C}{g} + \frac{fCV |V|}{2gD} = 0 \quad (۷-۴)$$

$$\text{if } C = -\frac{dZ}{dt} \rightarrow \frac{dH}{dt} - \frac{dV}{dt} \frac{C}{g} + \frac{fCV |V|}{2gD} = 0 \quad (۸-۴)$$

حال معادله (۷-۴) روی خط C^+ ($\frac{dz}{dt} = \frac{\Delta z}{\Delta t} = C$) گسسته سازی میشود. (به شکل (۴-۱) توجه شود).



شکل (۱-۴): خطوط مشخصه در صفحه Z-t

$$\frac{H_P - H_L}{\Delta t} + \frac{C}{g} \frac{V_P - V_L}{\Delta t} + \frac{f C V_L |V_L|}{2gD} = 0 \rightarrow H_P = H_L - \frac{C}{g} (V_P - V_L) - \frac{f C \Delta t V_L |V_L|}{2gD} \quad (۹-۴)$$

با معرفی ثابت های $B = \frac{C}{g}$ و $R = \frac{f \Delta Z}{2gD}$ معادله (۹-۴) را می توان بصورت زیر درآورد. (همانطور که

گفته شد، $\Delta Z = C \Delta t$ خواهد بود). [کرامت ۱۳۸۹]

$$H_P = H_L - B (V_P - V_L) - R V_L |V_L| \quad (۱۰-۴)$$

برای سادگی در استفاده از این فرمول، بصورت زیر نوشته میشود:

$$\begin{aligned} H_P &= C_P - B V_P \\ C_P &= H_L + B V_L - R V_L |V_L| \end{aligned}$$

به همین ترتیب از گسسته سازی معادله (۸-۴) روی خط C^- ($\frac{dz}{dt} = \frac{\Delta z}{\Delta t} = -C$) به ترتیبی که روی خط C^+ انجام شد، مشاهده میشود:

$$H_P = H_R + B (V_P - V_R) - R V_R |V_R|$$

که در آن $B = \frac{C}{g}$ و $R = \frac{f \Delta Z}{2gD}$ میباشد. برای سادگی در استفاده از فرمول (۱۲-۴)، به صورت زیر نوشته میشود:

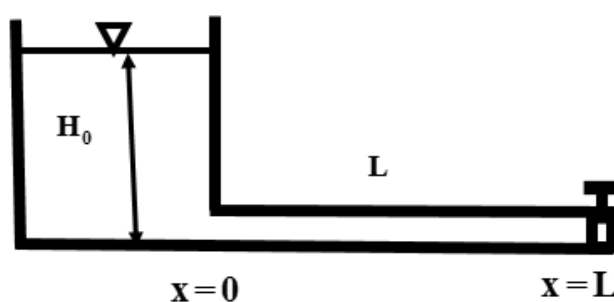
$$\begin{aligned} H_P &= C_m - B V_P \\ C_m &= H_R - B V_R - R V_R |V_R| \end{aligned} \quad (۱۱-۴)$$

معادلات (۴-۱۱) و (۴-۱۳) به ترتیب مربوط به گسسته سازی روی خطوط C^+ و C^- می باشند را می توان بصورت هم زمان حل کرد. در این معادلات مجهولات H_p و V_p می باشد که پس از حل هم زمان معادلات مذکور، برحسب H_L ، H_R ، V_L ، V_R بدست خواهند آمد. [کرامت ۱۳۸۹]

۴-۳- شرایط اولیه و مرزی:

از حل معادلات دیفرانسیل هیدرولیک جریان با روش خطوط مشخصه، نشان داده شد که برای هر گره میانی میتواند دو رابطه (C^+ ، C^-) نوشته شود که از حل همزمان این دو رابطه، برای هر گره دو مجهول H و V بدست خواهند آمد. اما برای گره هایی که گره میانی نیستند نمی تواند هر دو رابطه C^+ و C^- را نوشته شود، در این صورت برای بدست آوردن مجهولات نظیر این گره ها، باید از روابط مناسب دیگری که می توان برای گره های روی مرز نوشت استفاده شود. این روابط که به آن ها شرایط مرزی گفته می شود تاثیر گذار ترین عامل در بدست آوردن جواب های نهایی مسئله می باشند. گره های ابتدا و انتهای هر لوله، وسایل نصب شده روی شبکه ی لوله ها مثل شیرها، پمپ ها، مخازن موج گیر، اریفیس ها و ... به عنوان شرایط مرزی که باید برای آن ها از روابط خاص خود استفاده شود، می باشند. [کرامت ۱۳۸۹]

سیستم مورد بررسی در این تحقیق، از نوع شیر، لوله و مخزن است که در شکل ۴-۲ نشان داده می شود.



شکل ۴-۲- نمایی از سیستم شیر- لوله و مخزن

با توجه به شکل فوق، در رخداد پدیده ضربه قوچ، فرض می شود، خط لوله در بالادست، به مخزنی با ارتفاع 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 (۴-۱۴) در نظر گرفته می‌شود. [کرامت ۱۳۸۹]

$$H_1 = H_{Res} \quad (۴-۱۴)$$

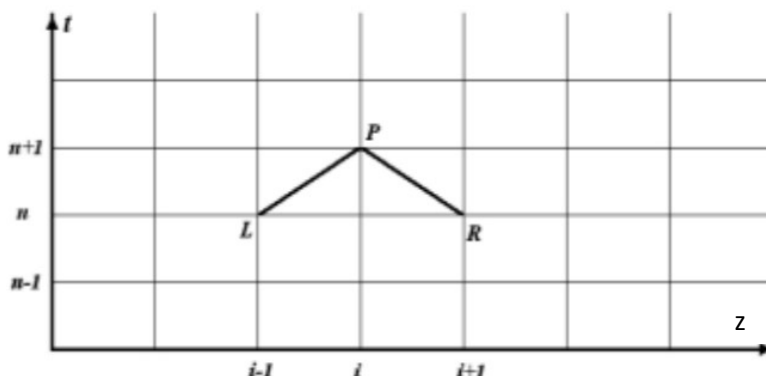
که در آن، H_1 ارتفاع مربوط به گره متصل به مخزن، می‌باشد. از طرفی در پایین دست جریان که خط لوله به شیر متصل است، با بسته شدن ناگهانی شیر، جریان انتقالی در لوله به وجود آمده و سرعت متوسط جریان در پشت شیر، صفر می‌شود. بنابراین، شرط مرزی پایین دست، مطابق معادله (۴-۱۵) لحاظ می‌گردد. [کرامت ۱۳۸۹]

$$v_n = 0 \quad (۴-۱۵)$$

که در آن، v_n ، سرعت مربوط به گره متصل به شیر، می‌باشد.

۴-۴- شبکه بندی خطوط مشخصه برای گره

در مدل سازی یک بعدی معادله حاضر، برای اینکه بتوان از فرمول های بدست آمده برای برنامه نویسی کامپیوتری استفاده کرد. مطابق شکل (۴-۳) بجای اندیس های n, i استفاده می شود. بطوری که i نشان دهنده شماره گرهی است که مجهول مسئله باشد و رابطه برای آن نوشته می شود (اندیس مکانی)؛ و n اندیس مربوط به گام زمانی می باشد، (اندیس زمانی). [کرامت ۱۳۸۹]



شکل ۴-۳- وضعیت خطوط مشخصه برای گره

همانطور که در شکل (۳-۴) مشاهده میشود، اندیس n ، مربوط به زمان حال، $n+1$ مربوط به زمان آینده و $n-1$ مربوط به گام زمانی گذشته است. [کرامت ۱۳۸۹]

در فصل بعد، نتایج مدلسازی معادلات ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک در جریان غیر دائمی در لوله ها به روش MOC تشریح و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

فصل پنجم

مدلسازی عددی به روش MOC

- مدلسازی عددی
- تحلیل نتایج مدلسازی جریان غیر دائمی سیال ویسکوالاستیک
- بررسی تاثیر اعداد بی بعد بر جریان غیر دائمی سیال ویسکوالاستیک

این فصل به ۳ بخش تقسیم می‌گردد؛ در بخش نخست معادلات به دست آمده از جریان غیر دائمی سیال ویسکوالاستیک در لوله ها با روش عددی MOC مدل سازی می گردد و نتایج به دست آمده با یک مدل آزمایشگاهی و دو مدل عددی مورد مقایسه و اعتبار سنجی قرار می گیرد. در بخش دوم رفتار سیالات مختلف در شرایط رخ داد ضربه قوچ در ۳ حالت سیال ایده آل، نیوتنی و ویسکوالاستیک در نقاط بحرانی پشت شیر و وسط لوله مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌گیرد. در انتهای این بخش نمودار تنش های برشی ناشی از ضربه قوچ نیز در ۳ حالت سیال ذکر شده در نقطه وسط لوله ترسیم و تفسیر می‌گردد. بخش سوم نیز به بررسی تاثیر هر یک از اعداد بی بعد مستخرج از معادلات جریان غیر دائمی سیال ویسکوالاستیک در قالب نمودار اختصاص داده می‌شود.

❖ بخش اول

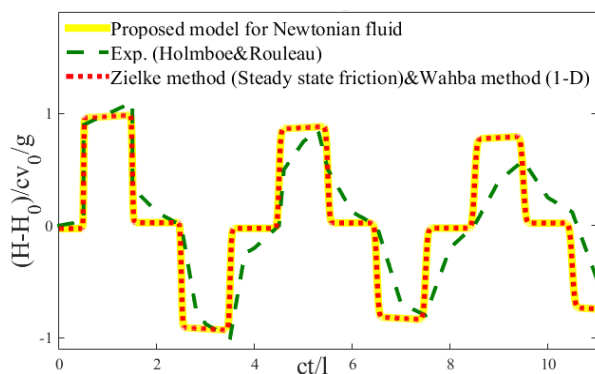
۵-۱- اعتبار سنجی مدل

یکی از چالش های مهم در زمینه اعتبار سنجی مدل های سیالات غیر نیوتنی، کمبود مطالعات آزمایشگاهی با به کارگیری این سیالات می باشد. در مورد موضوع مطالعه حاضر نیز این مشکل وجود دارد. علیرغم اینکه سیالات ویسکوالاستیک اخیرا در بسیاری از علوم صنعتی و شیمیایی، مورد توجه قرار گرفته اند اما هنوز جنبه کاربردی رخداد پدیده ضربه قوچ در لوله با سیال ویسکوالاستیک، در سیستمی شبیه سیستم مورد مطالعه نظیر شیر، لوله و مخزن جدی گرفته نشده و هیچ مطالعه آزمایشگاهی و حتی عددی در این زمینه انجام نگرفته است. پیچیدگی و حتی در برخی موارد، ناشناخته ماندن رفتار این سیالات شبه جامد، چنانچه در فصل سوم توضیح داده شد، از دلایلی به شمار می رود که اطلاعات معتبر کمتری در مورد این گروه سیالات، نسبت به سایر گروه های سیالات غیر نیوتنی در دسترس است. در مدل سازی سیالات غیر نیوتنی، در چنین مواردی، مرسوم است که نتایج مدل پیشنهادی سیال غیر نیوتنی با صفر قرار دادن عبارتهای غیر نیوتنی با نتایج یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی انجام شده در آن زمینه با به کارگیری یک سیال نیوتنی، مورد مقایسه قرار می گیرد. در مطالعه حاضر، آزمایش انجام شده در زمینه ضربه قوچ سیال نیوتنی توسط

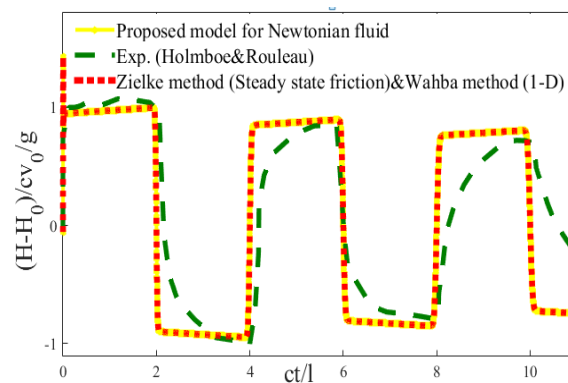
هولمبو و رولئو مبنا قرار می‌گیرد. [Holmboe &Rouleau 1967]. به منظور اعتبار سنجی مدل و روش پیشنهادی، نتایج حاصل از اجرای مدل، بدون دخالت ویژگیهای ویسکوالاستیک که معادل به کارگیری سیال نیوتنی در لوله می‌باشد، با نتایج عددی وهبا (یک بعدی) [Wahba 2006] و همچنین روش عددی زیلک [Zielke 1968] در حالت اصطکاک ثابت که بر اساس آزمایش معتبر هولمبو و رولئو [Holmboe &Rouleau 1967] انجام شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در مطالعه تحلیلی زیلک [Zielke 1968] که از بارزترین تحقیقات انجام شده در زمینه مدلسازی جریانهای انتقالی است، برای جریانهای غیر ماندگار آرام در حالت تک بعدی روابطی تحلیلی تعریف می‌شود که همچنان به عنوان مرجع برای مقایسه دیگر مسائل مشابه به کار می‌رود. در روش زیلک، مدلسازی ضربه قوچ در لوله در دو حالت اصطکاک دائمی و غیردائمی انجام گرفته است. پیچیدگی روابط تحلیلی به علت وابسته بودن اصطکاک جریان غیرماندگار به تاریخچه سرعت و پردازش قابل توجه به همراه هزینه محاسباتی نسبتاً بالا از ویژگیهای روابط مورد استناد زیلک در مدلسازی جریانهای انتقالی به‌شمار می‌رود. روش عددی دیگری که جهت مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی به کار گرفته شده، روش وهبا [Wahba 2006] می‌باشد. در روش وهبا که برای مدلسازی جریانهای آرام انتقالی در حالت یک بعدی و دو بعدی در لوله به کار می‌رود، از تفاضل مرکزی مرتبه دوم برای عبارتهای مکانی و از روش رانج کوتای مرتبه چهارم برای انتگرالگیری زمانی استفاده می‌شود. در ادامه نتایج مدل پیشنهادی برای سیال نیوتنی با نتایج این دو روش بر اساس اطلاعات آزمایش هولمبو و رولئو [Holmboe &Rouleau 1967] در جدول (۵-۱) مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

جدول ۵-۱- مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله [Holmboe &Rouleau 1967]

مشخصات	مقادیر
طول لوله (m)	۳۶,۰۹
سرعت متوسط (m/s)	۰,۱۲۸
سرعت موج (m/s)	۱۳۲۴
قطر داخلی لوله (m)	۰,۰۲۵۴
ویسکوزیته دینامیکی (pa.s)	۰,۰۳۴۸۳
جرم مخصوص سیال (kg/m^3)	۸۷۸
عدد رینولدز	۸۲



ب- وسط لوله



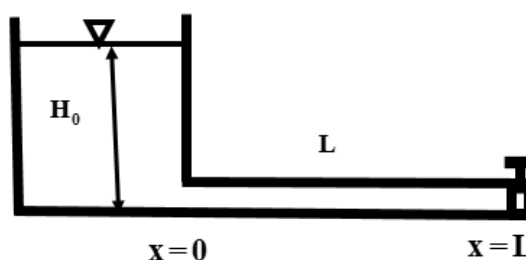
الف- پشت شیر

شکل ۵-۱- اعتبار سنجی مدل پیشنهادی برای سیال نیوتنی با روش‌های عددی زیلک و روش وهبا و روش آزمایشگاهی با دقت در شکل ۵-۱، دو نکته قابل بررسی است. نخست اینکه، مدل پیشنهادی برای تحلیل رفتارسیالات غیر نیوتنی بدون لحاظ ویژگیهای ویسکوالاستیکی سیال، بر نتایج روشهای عددی معتبری مانند روش زیلک در حالت ویسکوزیته ثابت و همچنین، روش عددی وهبا در حالت یک بعدی، 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 زیلک و وهبا اشاره شده است، علت عدم انطباق کامل مدلسازی عددی بر نتایج آزمایشگاهی، مدلسازی یک بعدی مساله و در نظر گرفتن ویسکوزیته در حالت جریان دائمی می‌باشد [Wahba 2006].

❖ بخش دوم

۵-۲- مدلسازی عددی

به منظور مدلسازی شرایط رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، به یک محلول پلیمری نیاز است. مشخصات محلول پلیمری در جدول ۵-۲ نشان داده شده که از منبع [Mandani et al. 2018] اقتباس می‌گردد و در آن، زمان رهایی از تنش معادل ۱,۹ ثانیه می‌باشد. در شکل (۵-۲) جهت بررسی شرایط مرزی، مجدداً نمای کلی سیستم شیر-لوله و مخزن نشان داده می‌شود.



شکل ۵-۲- نمایی از سیستم شیر-لوله و مخزن

شکل (۵-۲) نشان می‌دهد که سیستم مورد نظر، شامل یک مخزن در بالادست یک خط لوله و یک شیر در انتهای پایین دست لوله است و سیال از مخزن به سمت شیر در جریان است، ضربه قوچ زمانی رخ می‌دهد که شیر پایین دست به طور ناگهانی بسته شود، این عمل، با ایجاد موج فشاری و حرکت رفت و برگشتی آن در طول لوله همراه است تا به تدریج میرا شود.

جدول ۵-۲- محدوده ثابت زمان رهایی از تنش و ویسکوزیته [Mandani et al. 2018]

شماره پلیمر	ویسکوزیته دینامیکی ($pa.s$)	زمان رهایی از تنش (s)
1	0.0319	0
2	0.0625	7.088e-4
3	0.0131	0.2469
4	0.0025	10.2117
نمونه	$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} = 1.9$	

بنابراین پلیمری با زمان آسودگی از تنش معادل ۱,۹ ثانیه و ویسکوزیته ۰,۰۸۹۱۸ پاسکال ثانیه جهت مدلسازی انتخاب می‌گردد. سایر شرایط فیزیکی سیستم شیر، لوله و مخزن مورد بررسی نیز بر اساس جدول (۵-۳) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵-۳- مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله

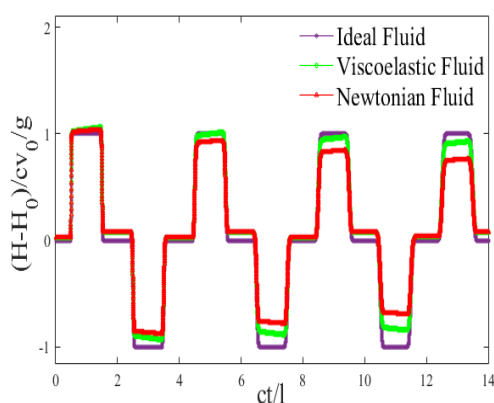
مشخصات آزمایش	مقادیر
طول لوله (m)	۳۶/۰۹
سرعت متوسط (m/s)	۰/۱۲۸
سرعت موج (m/s)	۱۳۲۴
مدول حجمی سیال (Gpa)	۳,۸۵
قطر داخلی لوله (m)	۰,۲۵۴/۰
ویسکوزیته دینامیکی (pa.s)	۰/۰۸۹۱۸
جرم مخصوص سیال (kg/m^3)	۲۲۰۰

عدد دپورا در محلول پلیمری مورد نظر بر طبق اطلاعات جدول (۳-۵) معادل ۹/۶ محاسبه می‌گردد که می‌توان به طور تقریبی ۱۰ در نظر گرفت.

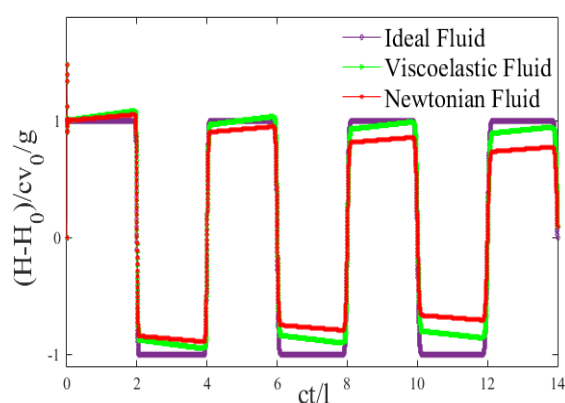
$$\begin{cases} De = \frac{\lambda}{T} = \frac{1.9}{0.198} = 9.6 \\ T = \frac{D}{v_0} = \frac{0.0254}{0.128} = 0.198s \end{cases} \quad (۱-۵)$$

۵-۲-۱- مقایسه رفتار سیال در حالات مختلف در طول پدیده ضربه قوچ

در این بخش، مقایسه‌ای بین رفتار یک سیال ایده‌آل، نیوتنی و محلول ویسکوالاستیک در حین وقوع پدیده ضربه قوچ، انجام شده که در شکل (۲-۵) نشان داده می‌شود. لازم به یادآوری است که سرعت سیال، پس از بسته شدن ناگهانی شیر، در محل پشت شیر، به صفر می‌رسد و در یک لحظه انرژی جنبشی به طور کامل به پتانسیل تبدیل می‌شود. انرژی پتانسیل وارد شده به صورت افزایش ارتفاعی معادل ارتفاع ژوکووسکی در محل پشت شیر، خود را نشان می‌دهد. ارتفاع فشار ژوکووسکی، ماکزیمم افزایش فشاری است که با نادیده گرفتن تاثیرات ویسکوز سیال در طول این جریان انتقالی رخ خواهد داد و از نظر مقدار عددی معادل $\frac{cv_0}{g}$ است. تاکید می‌گردد که ویسکوزیته در حالت سیال نیوتنی، مشابه ویسکوزیته محلول ویسکوالاستیک یعنی ۰/۰۸۹۱۸ پاسکال ثانیه لحاظ می‌گردد.



ب- وسط لوله



الف- پشت شیر

شکل ۵-۳- مقایسه تاریخچه فشاری در سیالات مختلف

سیال نیوتنی	$Re = 80, \beta = 0, M = 10^{-4}, De = 0$
محلول ویسکوالاستیک	$Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}, De = 10$

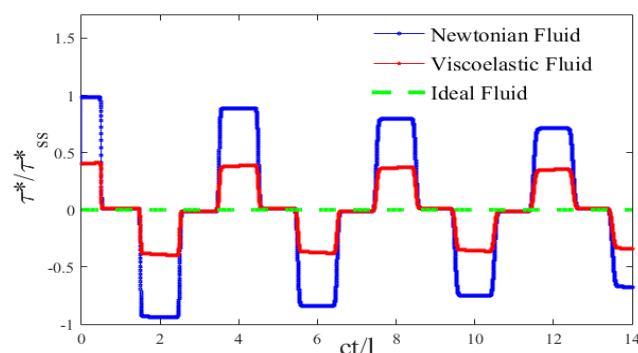
با توجه به شکل (۵-۳) دو نکته حائز اهمیت است:

۱: کاهش دمپینگ جریان انتقالی در محلول ویسکوالاستیک در مقایسه با محلول نیوتنی که به میرایی طولانی‌تر جریان در سیالات ویسکوالاستیک می‌انجامد.

۲: برای همه سیالات، باید حداکثر فشار در پشت شیر معادل ارتفاع فشار ژوکووسکی باشد، اما در شکل ۵-۲، در هر دو مورد سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در بازه زمانی $t^* = 0$ الی $t^* = 2$ افزایش فشاری بیشتر از ارتفاع ژوکووسکی رخ میدهد.

در مورد نکته اول، با توجه به اینکه همه مشخصات سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در مدلسازی انجام شده نظیر ویسکوزیته، جرم مخصوص، یکسان در نظر گرفته شده است، تفاوت رفتاری مشاهده شده در دمپینگ جریان انتقالی این دو سیال، به طور 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 ویسکوالاستیک، ویژگیهای مایع و جامد به طور 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. به طور همزمان، بخش مایع گونه سیال 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 ایجاد کننده خواص ویسکوالاستیک، نظیر ثابت زمان رهایی از تنش در یک سیال، بیشتر باشد، این انتظار می‌رود که به دلیل بیشتر شدن خاصیت الاستیکی در سیال، زمان میرایی جریان انتقالی طولانی‌تر شود. در ادامه برای سه

حالت یاد شده سیال، مقایسه‌ای بین تنشهای برشی ناشی از توقف ناگهانی جریان در نقطه وسط لوله انجام شده که در شکل (۴-۵) نشان داده می‌شود.



شکل ۴-۵- مقایسه تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محلولهای نیوتنی و ویسکوالاستیک در نقطه وسط

سیال نیوتنی $Re = 80, \beta = 0, M = 9.66e-5, De = 0$

سیال ویسکوالاستیک $Re = 80, \beta = 0.6, M = 9.66e-5, De = 10$

در شکل (۴-۵) محور عمودی نسبت تنشهای برشی سیال ویسکوالاستیک به تنشهای برشی در حالت جریان دائمی را در حالت بدون بعد و محور افقی نیز پارامتر زمان بی‌بعد شده را نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، تنشهای برشی در یک سیال ویسکوالاستیک، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از تنشهای برشی محلول نیوتنی است. با در نظر گرفتن این مساله که ویسکوزیته هر دو محلول، یکسان است، کاهش تنشهای برشی، به‌طور قطع، به ویژگیهای ویسکوالاستیک محلول ارتباط داده می‌شود. ویژگی ذخیره سازی انرژی پتانسیل در محلول ویسکوالاستیک که ناشی از خاصیت الاستیک بخش جامد در آن است، را می‌توان عامل اصلی کاهش تنشهای برشی در یک محلول ویسکوالاستیک در مقایسه با محلول نیوتنی برشمرد که این مساله از طریق رابطه تنشهای برشی مربوط به حل شونده ویسکوالاستیک نیز قابل بررسی است، رابطه ریاضی تنشهای برشی محلول ویسکوالاستیک، نشان می‌دهد که رابطه غیرمستقیم بین ضریب ثابت زمان رهایی از تنش و میزان تنشهای برشی در یک سیال ویسکوالاستیک برقرار است (پیوست ۲).

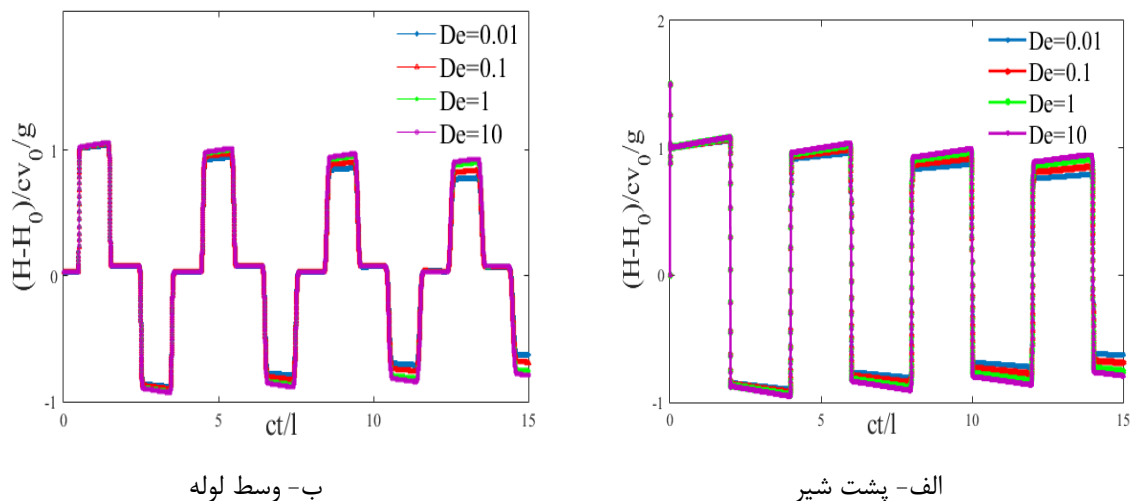
❖ بخش سوم

۵-۳- بررسی تاثیر اعداد بی بعد بر اتفاقات ضربه قوچ

با دقت در معادلات (۵۸-۳) الی (۶۱-۳) مشخص می گردد که معادلات حاکم در حالت وقوع ضربه قوچ در یک محلول ویسکوالاستیک، متأثر از تغییرات اعداد بی بعد دبورا، بتا، رینولدز و ماخ می باشند، حال، باید تاثیر هریک از اعداد بی بعد بر اتفاقات ناشی از رخداد ضربه قوچ بررسی گردد. لازم به ذکر است که به طور کلی، در حین وقوع پدیده ضربه قوچ، به دلیل کوچکی سرعت جریان در برابر سرعت موج، عدد ماخ، بسیار ناچیز $10^{-4} - 10^{-5} M$ بوده و از بررسی تاثیر آن، صرف نظر می شود.

۵-۳-۱- بررسی تاثیر عدد دبورا

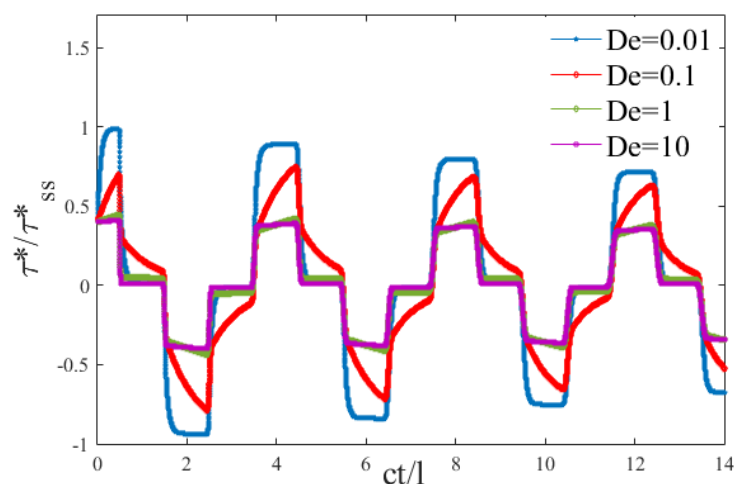
جهت بررسی تاثیر عدد دبورا بر تاریخچه فشار ضربه قوچ ویسکوالاستیک، محلولهای پلیمری رقیق تر با زمان-های رهایی از تنش کمتر از ۱٫۹ که به دبوراهاى کمتر از ۱۰ می انجامد، مدلسازی و نتایج به دست آمده در شکل (۵-۵) نشان داده می شود.



شکل ۵-۵- تاثیر عدد دبورا بر تاریخچه فشاری $Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}$

در شکل (۵-۵) یک نکته حائز اهمیت است، اینکه افزایش دمپینگ جریان انتقالی با کاهش دبورا می باشد. این مساله نیز قابل پیش بینی بود. همانطور که در تشریح نکته اول شکل (۵-۳) اشاره گردید، ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش، در مقابل دمپینگ جریان انتقالی مقاومت می کند، بنابراین، انتظار می رود که با کاهش

دبورا که منتج از کاهش این ویژگی است، دمپینگ جریان انتقالی بیشتر و زمان میرایی کوتاهتر گردد. در واقع، رفتار محلول پلیمری در دبورا بسیار پایین مشابه رفتار محلول نیوتنی می‌شود. در شکل (۵-۶) تاثیر عدد دبورا بر تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، در نقطه وسط لوله نمایش داده می‌شود.

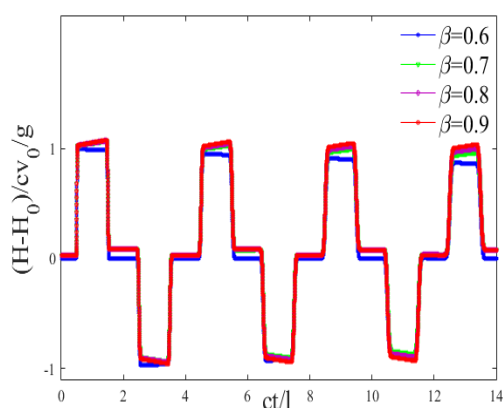


شکل ۵-۶- تاثیر عدد دبورا بر تنشهای برشی در وسط لوله $Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}$

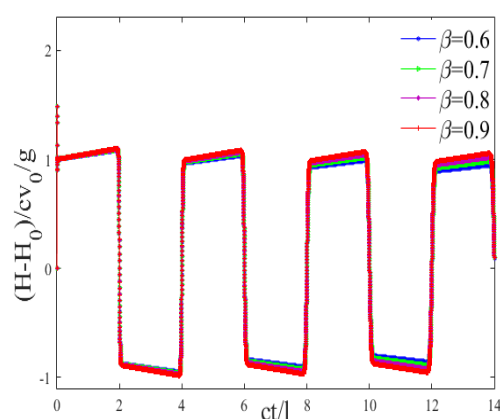
با توجه به شکل (۵-۶) با افزایش عدد دبورا، میزان تنشهای برشی در لوله کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر، هرچه ویژگیهای ویسکوالاستیکی محلول، بیشتر می‌شود، تنشهای ایجاد شده ناشی از رخداد ضربه قوچ کمتر می‌شود. این نتیجه، در واقع، تاییدی بر نتیجه شکل (۵-۴) می‌باشد که با تحلیل صورت گرفته در آن بخش، مشخص گردید که ویژگیهای الاستیک در یک سیال ویسکوالاستیک که باعث نگهداشت انرژی پتانسیل در خود سیال می‌شود و در برابر هدر دهی آن، مقاومت می‌کند، باعث می‌شود که تنشهای برشی محلول ویسکوالاستیک به‌طور قابل توجهی کمتر از محلول نیوتنی با ویسکوزیته مشابه شود. بدیهی است، دبوراهای بالاتر که منتج از ثابت زمان رهایی از تنش بزرگتری هستند، دارای خاصیت الاستیک قوی‌تر بوده و میزان نگهداشت انرژی در آنها بیشتر است که نهایتاً باعث می‌شود میزان تنشهای برشی اعمال شده بر جداره لوله از طرف آنها کمتر گردد.

۵-۳-۲- بررسی تاثیر عدد بتا (نسبت ویسکوزیته)

در این بخش، با فرض ویسکوزیته ثابت برای محلول پلیمری، ویسکوزیته حلال نیوتنی و حل‌شونده ویسکوالاستیک در چندین حالت، تغییر داده می‌شوند و سپس تاثیر نسبت ویسکوزیته (عدد β) روی تاریخچه فشار ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک بررسی می‌شود. با در نظر گرفتن مدل اولدرویڈبی محلول پلیمری به دو بخش حلال نیوتنی و حل‌شونده ویسکوالاستیک تقسیم می‌شود، بنابراین، با افزایش β بخش پلیمری ویسکوالاستیک، موثرتر می‌شود. بنابراین، در یک محلول ویسکوالاستیک با زمان ثابت رهایی از تنش ثابت، انتظار می‌رود که با کاهش β ، محلول پلیمری بیشتر شبیه یک سیال نیوتنی رفتار کند و همانطور که در مورد محلولهای نیوتنی ذکر گردید، موج فشاری در این حالت، کوتاهتر بوده و میرایی جریان، زودتر اتفاق می‌افتد. در شکل (۵-۷) تاثیر نسبت ویسکوزیته β روی تاریخچه فشار در نقاط پشت شیر و وسط لوله نشان داده می‌شود.



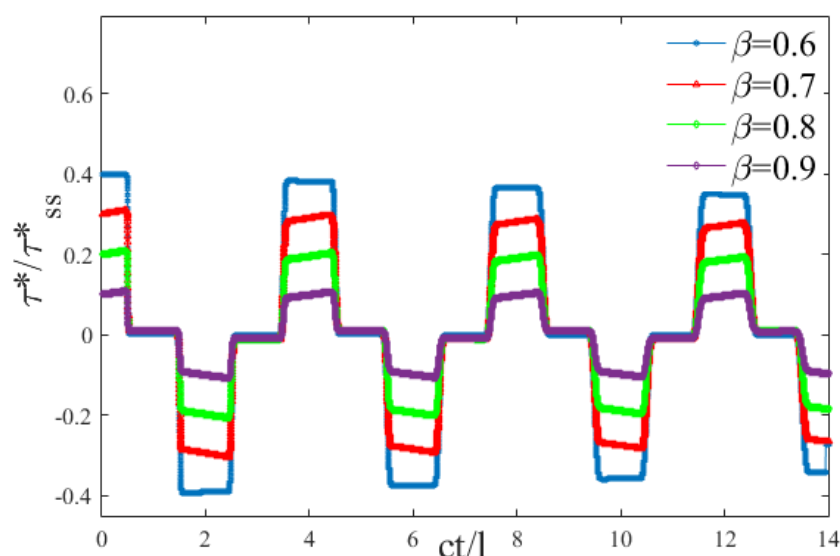
ب- وسط لوله



الف- پشت شیر

شکل ۵-۷- تاثیر نسبت ویسکوزیته β بر تاریخچه فشاری $Re = 80, De = 10, M = 10^{-4}$

در شکل (۵-۷) نیز ضمن مشاهده تاثیر لاین پکینگ در محل پشت شیر برای همه حالت‌های نسبت ویسکوزیته، مشخص می‌شود که افزایش β نزدیک تر شدن رفتار محلول به حالت ویسکوالاستیک را در پی دارد و بنابراین، دمپینگ جریان انتقالی کمتر، پیک موج فشاری کمی بلندتر و زمان میرایی جریان نیز کمی طولانی تر می‌شود. در شکل (۵-۸) تاثیر تاثیر نسبت ویسکوزیته β روی تنشهای برشی در وسط لوله نشان داده می‌شود.

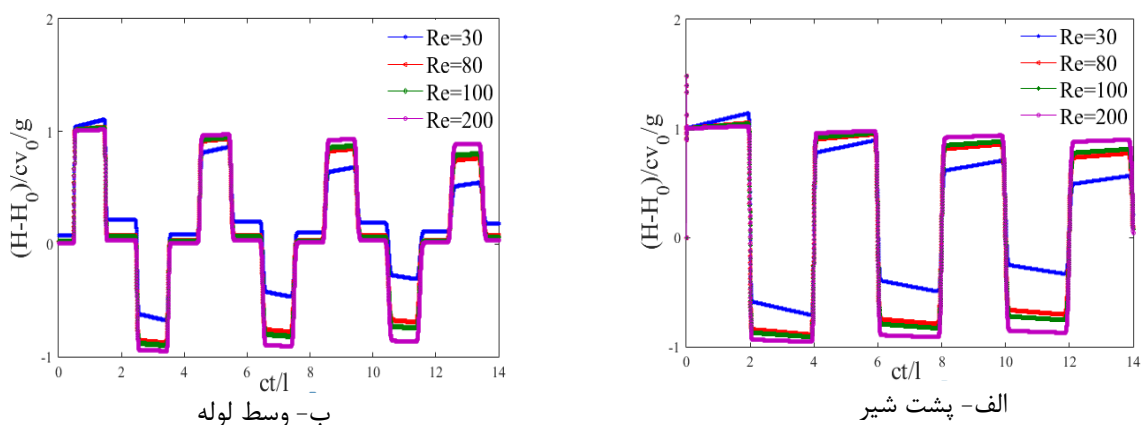


شکل ۸-۵- تاثیر نسبت ویسکوزیته β بر تنشهای برشی در وسط لوله $Re = 80, De = 10, M = 10^{-4}$

بر طبق معادلات اولدروید-بی، تنشهای برشی در طول لوله از مجموع تنشها در بخش حلال و حل‌شونده ویسکوالاستیک، محاسبه می‌شوند. با در نظر گرفتن این مساله که ویژگیهای سیال ویسکوالاستیک، نقش مهمی در کاهش تنشهای برشی دارد، بر اساس شکل (۸-۵) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش β که با افزایش تاثیر بخش ویسکوالاستیک محلول همراه است، میزان نگهداشت انرژی سیال بیشتر و تنشهای برشی وارد بر لوله کمتر می‌شود و بالعکس.

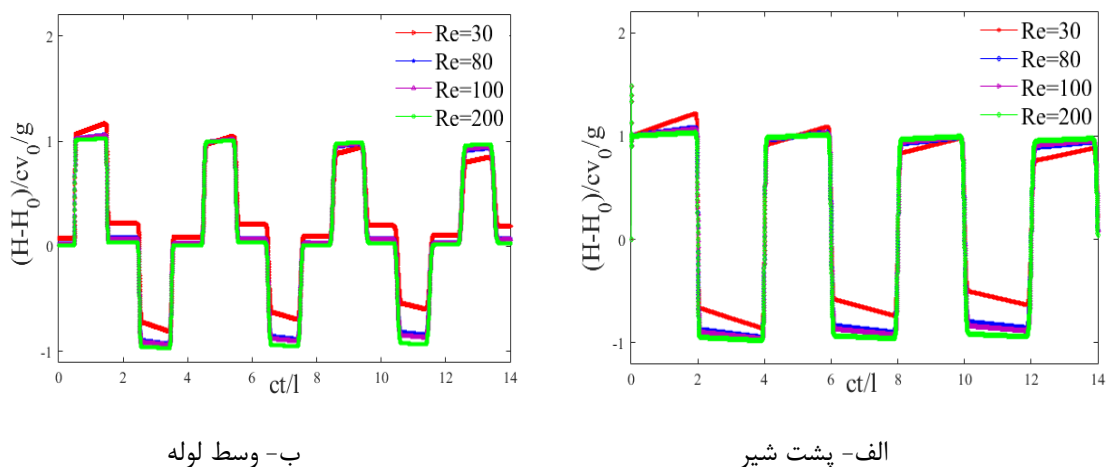
۵-۳-۳- بررسی تاثیر عدد رینولدز

موج فشاری ناشی از جریان انتقالی حتی در حالت وجود سیال نیوتنی نیز بنا بر معادله (۳-۶۳) نسبت به عدد رینولدز حساس است. تاثیر عدد رینولدز روی تاریخچه فشار در مورد محلول نیوتنی در شکل (۵-۹) و در مورد محلول پلیمری ویسکوالاستیک در شکل (۵-۱۰) مشاهده می‌شود.



شکل ۹-۵- تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در ضربه قوچ نیوتنی

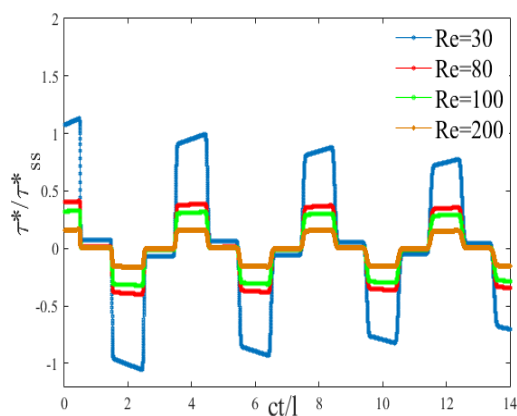
$$\beta = 0, De = 0, M = 10^{-4}$$



شکل ۵-۱۰- تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک

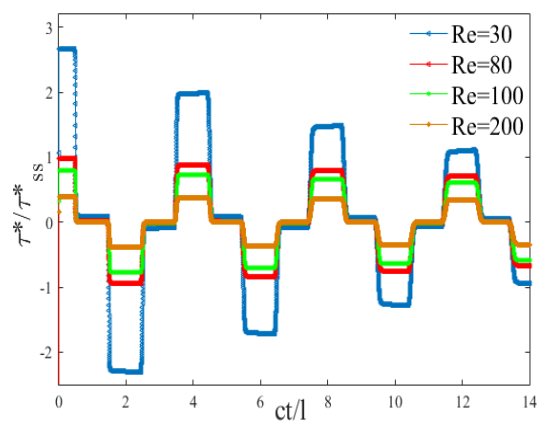
$$\beta = 0.6, De = 10, M = 10^{-4}$$

اولین نکته که در شکل‌های (۵-۹) و (۵-۱۰) مشخص است، این است که مسیر کلی تغییرات فشاری در محلول‌های نیوتنی و ویسکوالاستیک با تغییرات رینولدز، مشابه است با این تفاوت که این میزان حساسیت در حالت نیوتنی بیشتر است، به‌ویژه در رینولدزهای پایین. به این معنا که در ضربه قوچ آرام، قوت ویسکوزیته سیال به عنوان یک تاثیر اصطکاکی زیاد می‌شود و بنابراین میرایی جریان زودتر اتفاق می‌افتد. در واقع، در محدوده جریان آرام با افزایش عدد رینولدز، ارتفاع ارتفاعی موج، بیشتر و زمان میرایی جریان، طولانی‌تر می‌شود که همین اتفاق در مورد محلول ویسکوالاستیک با حساسیت کمتری (به دلیل تاثیر از پارامترهای بیشتر) تکرار می‌شود. در شکل (۵-۱۱) مقایسه‌ای بین تنش‌های برشی با تغییرات عدد رینولدز در طول رخداد ضربه قوچ در وسط لوله انجام شده است:



ب- محلول ویسکوالاستیک

$$\beta = 0.6, M = 10^{-4}, De = 10$$



الف- محلول نیوتنی

$$\beta = 0, M = 10^{-4}, De = 0$$

شکل ۵-۱۱- مقایسه تنشهای برشی ناشی از ضربه قوچ با رینولدزهای مختلف در نقطه وسط لوله

شکل (۵-۱۱) 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 تاثیر افزایشی بر تنشهای برشی داشته و این مساله، در مورد هر دو محلول نیوتنی و ویسکوالاستیک صادق است. یادآوری می‌گردد که ویژگی ذخیره سازی انرژی پتانسیل در محلول ویسکوالاستیک که ناشی از خاصیت الاستیک بخش جامد در آن است، باعث می‌شود که تنشهای برشی در یک محلول ویسکوالاستیک در مقایسه با محلول نیوتنی کاهش یابد.

خلاصه، نتیجه‌گیری و

پیشنهادهات

در تحقیق حاضر، سعی شده تا با از میان برداشتن فرض پایه‌ای سیال نیوتنی، ارتباطی بین دو حوزه جریانهای میرای غیردائمی در لوله و مباحث سیالات ویسکوالاستیک برقرار گردد. علت این امر، کاربرد وسیع سیالات ویسکوالاستیک در علوم مهندسی، داروسازی، صنایع پلیمر، محصولات غذایی و... می‌باشد که در همه این موارد، قطع ناگهانی جریان برق و به دنبال آن توقف ناگهانی جریان در لوله که تبعات ناشی از رخداد ضربه قوچ را به همراه دارد، امری محتمل به‌شمار می‌رود. به این منظور، در گام اول، موضوع مورد نظر از دو زاویه متفاوت، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. چراکه از یک سو، می‌بایست، با ویژگیها و معادلات رئولوژی سیال ویسکوالاستیک که یکی از گروههای اصلی سیالات غیرنیوتنی را تشکیل می‌دهد به طور کامل آشنا شد و از سویی دیگر می‌بایست، جزئیات پدیده ضربه قوچ و معادلات حاکم بر آن که شامل معادلات اصلی ناویراستوکس و فرضیات آن، می‌شود، نیز جهت ایجاد ارتباط با معادلات سیال ویسکوالاستیک، به‌طور کامل، مورد بازنویسی قرار می‌گرفت. . در این راستا فصل دوم رساله به دو بخش تقسیم گردید. بخش اول به ویژگیهای سیالات ویسکوالاستیک اختصاص داده شد که مطالبی مانند "تبیین جایگاه سیالات ویسکوالاستیک در بین گروههای مختلف سیالات غیر نیوتنی، تعریف واژه ویسکوالاستیک و نحوه کشف این سیالات، ویژگیهای خاص و متفاوت این سیالات نسبت به سایر سیالات، اعداد بی بعد تعریف کننده مشخصات سیالات ویسکوالاستیک، دیاگرام پیپکین و نهایتاً معرفی مدلهای رئولوژی این سیالات که بیانگر رابطه بین تنش و نرخ کرنش در آنها می‌باشد" را در برمی‌گیرد و بخش دوم، نیز به پدیده ضربه قوچ در لوله، اختصاص داده شد که به مطالبی نظیر "چگونگی رخداد پدیده ضربه قوچ در لوله، سوابق مطالعاتی صورت گرفته در این زمینه" می‌پردازد. در گام بعد، می‌بایست، بین معادلات رئولوژی سیال ویسکوالاستیک و معادلات حاکم بر ضربه قوچ رابطه‌ای ایجاد می‌شد، به همین منظور، فصل سوم، به سه بخش تقسیم گردید. در بخش اول که به اثبات معادلات حاکم بر ضربه قوچ در حالت کلی اختصاص داده شد، معادلات پیوستگی و مومنتوم به کار رفته در مدلسازی ضربه قوچ، با استفاده از معادله حالت و معادله کامل سرعت موج و...، به‌طور کامل اثبات و بازنویسی شدند. از طرفی با توجه به اینکه یکی از محبوبترین معادلات رئولوژی

تبیین کننده رفتار سیالات ویسکوالاستیک، خانواده مدلهای اولدروید می باشد، از معادلات این مدل، به عنوان معادلات ساختاری در مدلسازی سیال ویسکوالاستیک تحقیق حاضر استفاده گردید. به همین منظور، بخش دوم از فصل سوم تحقیق به معرفی خانواده مدلهای اولدروید اختصاص داده شد که در آن، شکل ساختاری معادلات اولدروید یک ثابت و دو ثابت و همچنین، تنشهای برشی حاکم بر آن به طور کامل، تشریح گردید و در بخش سوم نیز، با استفاده از قوانین تانسورها و مفاهیم هیدرودینامیکی حاکم بر سیالات، ارتباطی بین معادلات ضربه قوچ مطروحه در بخش نخست این فصل و معادلات اولدرویدی سیال ویسکوالاستیک ایجاد و نهایتاً معادلات اصلی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک استخراج گردید. یکی از نکاتی که در انتهای این فصل مورد بررسی قرار گرفت، بی بعد سازی معادلات و استخراج پارامترهای بی بعد حاکم بر معادلات بود. پس از استحصال معادلات حاکم بر مساله، در گام بعد، می بایست، معادلات به دست آمده با یک روش عددی مناسب گسسته سازی و سپس ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی مناسب، مورد مدلسازی قرار می گرفت. از این سو، در فصل چهارم، روش عددی خطوط مشخصه MOC به عنوان روش عددی مورد استفاده در این تحقیق با تشریح مزایا و محدودیتها به طور کامل، معرفی گردید. و سپس معادلات حاکم بر مساله با این روش، گسسته سازی شده و در انتها شرایط اولیه و مرزی و همچنین شبکه بندی مساله به این روش مشخص گردید. در فصل پنجم معادلات حاکم گسسته سازی شده با این روش در قالب یک مساله شامل سیستم شیر، لوله و مخزن ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، مدلسازی گردید. پس از بی بعد سازی پارامترهای مورد نظر در فصل سوم مشخص گردید که معادلات حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، متأثر از اعداد بی بعد دبورا، رینولدز، ماخ و نسبت ویسکوزیته (بتا) می باشد و سپس تاثیر هر یک از این اعداد بر تاریخچه ارتفاع فشاری و تنشهای برشی ناشی از پدیده ضربه قوچ در نقطه وسط لوله ارزیابی گردید. جهت بررسی دقیق تر تاثیر سیال ویسکوالاستیک بر اتفاقات ضربه قوچ، در همه موارد، رفتار سیال ویسکوالاستیک با سیال ایده آل (بدون ویسکوزیته) و سیال نیوتنی (با ویسکوزیته مشابه سیال ویسکوالاستیک) مقایسه و نتایج حاصله مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

۶-۲- نتایج کلی مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک (چکش سیال ویسکوالاستیک)

نتایج کلی بدست آمده از تحقیق حاضر، مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک بدون اثرات تداخلی می باشد که در آن، تفاوت‌های رفتاری سیال ویسکوالاستیک و سیال نیوتنی در حین رخداد ضربه قوچ در لوله را میتوان در چندین بخش مورد بررسی قرار داد:

۶-۲-۱- فرمولاسیون

معادلات حاکم بر ضربه قوچ کلاسیک شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم بوده که متاثر از اعداد بی بعد ماخ و رینولدز هستند. در مدلسازی ضربه قوچ با سیال ویسکوالاستیک علاوه بر معادلات ذکر شده، به معادله ساختاری دیگری نیز جهت جایگزینی پارامتر تنش در معادله مومنتوم، نیاز است. در پژوهش حاضر، از روابط مدل اولدروید-بی استفاده گردید. بی بعد سازی معادلات نشان می دهد که در این حالت، معادلات حاکم، متاثر از اعداد بی بعد ماخ، رینولدز، دپورا و نسبت ویسکوزیته هستند.

۶-۲-۲- زمان میرایی و دمپینگ جریان انتقالی

به طور کلی جریان انتقالی ناشی از ضربه قوچ، پس از طی مسافت رفت و برگشتی در لوله به تدریج به میرایی می رسد. نتایج مدلسازیها نشان داد که در مقایسه بین سیال نیوتنی و سیال ویسکوالاستیک، میرایی و یا دمپینگ جریان در حالتی که از سیال نیوتنی استفاده می شود، سریعتر اتفاق می افتد. علت این مساله به ویژگی ثابت زمانی رهایی از تنش در سیالات ویسکوالاستیک ارتباط داده می شود. این ویژگی باعث می شود که انرژی پتانسیل تحمیل شده به سیستم در سیال ذخیره گردد و تمایل به دمپینگ کاهش یابد.

۶-۲-۳- تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در لوله

در ضربه قوچ کلاسیک، در محاسبه تنشهای برشی از روابط جریان پایدار استفاده می شود که بر این اساس، تنش های برشی تابعی از ویسکوزیته سیال محسوب می شوند، در حالی که در ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، در محاسبه تنشهای برشی از روابط معادلات ساختاری استفاده می شود. در پژوهش حاضر از روابط مدل اولدروید-بی استفاده گردید. بر این اساس، تنش های برشی تابعی از ویسکوزیته، ثابت زمان

رهایی از تنش و نیز نسبت ویسکوزیته محلول محسوب می شوند. بررسیها نشان داد که ثابت زمان رهایی از تنش، به عنوان ویژگی مهم الاستیکی در سیالات ویسکوالاستیک که به شدت تمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارد شده بر محلول را دارد، باعث می شود که میزان تنشهای برشی ناشی از این پدیده در لوله در مقایسه با سیالات نیوتنی تا حد زیادی کاهش یابد.

۶-۳- پیشنهادات

با توجه به این که مباحث مربوط به مدلسازی جریان میرای سیال ویسکوالاستیک در لوله‌ها، تاکنون به‌طور جدی مورد مطالعه قرار نگرفته و تحقیقات صورت گرفته تاکنون، در زمینه سیالات ویسکوالاستیک به بررسی جنبه‌های دیگری از این سیالات محدود شده‌اند، زمینه‌های مورد بحث و تحلیل در مورد این موضوع، همچنان فراهم است. در واقع، این تحقیق، نخستین گام در این زمینه به شمار می‌رود که به‌همین دلیل، با محدودیتهایی در اعمال فرضیات در شکل سیستم و نیز معادلات کلی حاکم بر مساله همراه بود. بی‌شک، انجام تحقیقات گسترده‌تر در این زمینه در سیستم‌های پیچیده و کاهش فرضیات، می‌تواند به افزایش دقت نتایج به دست آمده از این تحقیق، کمک شایانی نماید. به‌همین منظور، پیشنهاداتی برای ادامه کار در این زمینه ارائه می‌گردد:

- جریان میرای سیال ویسکوالاستیک مورد بحث در همه فصول رساله حاضر، از نوع آرام در نظر گرفته شد. به دلیل محدودیتهایی که با اعمال این فرض در معادلات، ایجاد می‌شود، ضروری است که برای کاربردهای بیشتر و تکمیل مطالعات، مدل‌های جریان آشفته به معادلات پایه اضافه گردد تا با استفاده از آن، محدوده‌ی کاربرد سیالات ویسکوالاستیک و به‌طور کلی، سیالات غیرنیوتنی در جریانهای غیر دائمی افزایش یابد. از سوی دیگر، با این شیوه می‌توان از اطلاعات بیشتری برای نتایج آزمایشگاهی و صحت سنجی روشها و مدل‌های عددی استفاده نمود.
- در تحقیق حاضر، از معادلات ساختاری مدل اولدروید در مدلسازی جریان غیردائمی سیال ویسکوالاستیک که از دقت نسبتاً مطلوبی در تخمین رفتار این سیالات برخوردار است، استفاده

گردید. پیشنهاد می‌شود در تکمیل مطالعات با این زمینه، از مدل‌های ویسکوالاستیک غیرخطی دیگر نظیر مدل سه‌ثابت گزیکس، مدل دامبل و... استفاده گردد.

- برای راستی‌آزمایی مدل‌های مختلف سیالات ویسکوالاستیک در جریانهای غیردائمی آرام، پیشنهاد می‌شود که مجموعه آزمایشی کامل، با استفاده از سیالات ویسکوالاستیک متفاوت با مشخصات گوناگون، تحت شرایط مختلفی انجام گیرد.

- مدل‌سازیهای انجام شده در تحقیق حاضر، به صورت یک بعدی انجام گرفت، جهت حصول به یک فرمولبندی یک بعدی، از تک تک عبارتها در راستای شعاعی انتگرالگیری گردید و این مساله با ایجاد محدودیتهایی در تحلیل عبارت تنش ماده حل شونده ویسکوالاستیک همراه شد که منجر به حذف عبارتهای همرفتی گردید، پیشنهاد می‌شود در ادامه مطالعات در این زمینه، مدل‌سازیهای دو-بعدی و سه بعدی جهت افزایش دقت محاسبات، مدنظر قرار گیرد.

- از آنجا که بسیاری از کاربردهای طبیعی و صنعتی جریانهای غیردائمی سیالات ویسکوالاستیک، در لوله‌هایی با جداره‌های غیرالاستیک می‌باشد، مانند حرکت خون در رگهای خونی، پیشنهاد می‌شود که اثر غیرالاستیک جداره لوله در مدل‌های جریان غیردائمی و همچنین مدل‌های اندرکنش سیال سازه دیده شود.

- در تحقیق حاضر، سیستم مورد بررسی از نوع شیر، لوله و مخزن بود، با توجه به کاربردهای گسترده این سیالات در علوم مهندسی و صنایع غذایی، شیمیایی و داروسازی و... پیشنهاد می‌شود که مطالعه روی به کارگیری سیال ویسکوالاستیک در سیستم لوله‌های پیچیده تر انجام گردد و از آنجا که برای بسط مدل سازی‌های مختلف لازم است تمامی اجزای آن به درستی مدل شوند، لذا توصیه می‌گردد شرایط مرزی مختلفی مانند مدل سازی پمپ، اتصالات، اثرات تغییر قطر لوله نیز در مطالعات مورد بررسی قرار گیرد.

منابع فارسی

- (۱) شیخی نارانی م، (۱۳۷۱) "بررسی خواص، جریان، انتقال حرارت و اختلاط سیالات غیر نیوتنی" چاپ اول، جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر، تهران.
- (۲) کرامت ع، (۱۳۸۹)، رساله دکتری: "بررسی اندرکنش سیال سازه در سیستم های لوله ویسکو الاستیک با در نظر گرفتن جدایی ستون مایع"، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- (۳) مجد ع (۱۳۹۴)، رساله دکتری "مدل سازی جریان غیر ماندگار حاوی سیال غیر نیوتنی با در نظر گرفتن امدر کنش سیال سازه در سیستم لوله ها"، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- (۴) نوروزی ب (۱۳۹۸)، رساله دکتری "مدل سازی اندر کنش سیال سازه ناشی از پدیده ضربه قوچ با در نظر گرفتن لوله حاوی سیال ویسکوالاستیک در سیستم لوله"، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

منابع انگلیسی

- [1] Allievi L., (1913), "Teoria del colpo d'ariete," Atti Collegio Ing. Arch. (English translation by Halmos EE 1929), "The Theory of waterhammer," Trans. ASME.
- [2] Bird R.B., Armstrong R. C., and Hassager O. (1987), "Dynamics of polymeric liquids", Vol.1, 2ed, John Willey&Sons.
- [3] Bird R.B., Stewart W.E. and Lightfoot E.N. (2002), "Transport Phenomena", 2ed, John Willey&Sons.
- [4] Chen Z. and Barbieri R. (2012), "Editorial: Engineering Approaches to Study Cardiovascular Physiology: Modeling, Estimation, and Signal Processing", J. Frontiers in Physiology, pp.1.
- [5] Gromeka I. S., (1883), PhD. Thesis, "Concerning the propagation Velocity of water hammer waves in Elastic Pipes," Scientific Soc. Of Univ. of Kazan, Kazan, U.S.S.R.
- [6] Huilgol R. R. and Phan-Thien N. (1997), "Fluid Mechanic of Viscoelasticity", First Edition, Elsevier.
- [7] Joukowski, N. E., (1898), "Memoirs of the Imperial Academy Society of St. Petersburg," 5. (Russian translated by O Simin 1904), J. Amer. Water Works Assoc., 24, pp. 341-424.
- [8] Korteweg D.J. (1878), "Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Elastischen Röhren," J. Ann. Phys. Chemie, 241, 12, pp. 525.

- [9] Larson R. G. (1988), "Constitutive Equations for Polymer Melts and Solutions", Butterworths, Boston.
- [10] Malkin A. Y. (1994), "Rheology Fundamentals", First Edition, Chem. Tech. Publishing, Toronto.
- [11] Morrison F.A. (2001), "Understanding Rheology", New York Oxford University.
- [12] Oldroyd J. G. (1958), "Non-Newtonian effects in steady motion of some idealized elasticviscous fluids", J. Roy.Soc., London Ser 245, pp. 278.
- [13] Phan-Thien N. (2002), "Understanding Viscoelasticity", First Edition, Springer, Berlin.
- [14] Ruus E. (1966) "Optimum Rate of closure of Hydraulic Turbine Gates", presented at Amer. Soc. Mech. Engrs. Engineering Inst. Of Canada conference, P80, Denver, Colorado.
- [15] Streeter V. L., and Lai C. (1963), "Waterhammer Analysis Including Fluid Friction,"J. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 128,1, pp. 1941.
- [16] Wahba E.M. (2013) "Non Newtonian fluid hammer in elastic circular pipes: shear-thinning and shear-thickening effects" J. Non Newtonian Fluid Mech., 1980,0. pp. 24.
- [17] Wylie E. B., Streeter V.L. (1993), "Fluid Transients in systems", First Edition, Pearson.
- [18] Zielke W. (1968) "Frequency- Dependent Friction in Transient Pipe flow" J. Basic Eng., 90, 1, pp 109.

Abstract

Nowadays viscoelastic fluids are used in engineering sciences, chemical and polymer industries; study of the properties of these fluids is of interest for many researchers. In this study, the behavior of these fluids is modeled in conditions such that the fluid hammer phenomenon occurs in a pipe. Here, this phenomenon is called “viscoelastic fluid hammer”. The main purpose of this study is to establish the governing equations for viscoelastic transient flow in the pipe. Firstly, the properties and equations of the viscoelastic fluid are explained and then the governing equations on the fluid hammer phenomenon are rewritten generally. The system studied in this thesis consists of the valve, pipe and reservoir. Oldroyd-B equations are used as constitutive equations for the relationship of stresses. Also, the numerical method of characteristic lines is used to discretize the equations.

Subsequently, the governing non-dimensional groups are computed. These groups are the Deborah, Reynolds and Mach numbers, and the viscosity ratio. To investigate the effect of the viscoelasticity of the fluid in all cases, viscoelastic fluid behavior is compared with the ideal fluid and Newtonian fluid (with viscosity similar to the viscoelastic fluid) and the results are discussed. The results of viscoelastic fluid hammer modeling showed that in a viscoelastic fluid, the effects of the line packing phenomenon at the valve are more prominent. Also, it was determined that the transient flow damping in a viscoelastic fluid is lower than in a Newtonian fluid, and so attenuation time is longer compared to a Newtonian fluid. It was argued that this is mainly related to the elastic properties of the viscoelastic fluid, such as the relaxation time constant. The elastic properties play an important role in storing the potential energy imposed on the fluid, whereas the viscous properties result in wasting of the imposed energy. These opposing actions in a viscoelastic fluid cause the damping time of the transient flow to become longer compared to a Newtonian fluid.

Keywords: Viscoelastic fluid hammer, Oldroyd-B model, Method Of Characteristic (MOC).



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil engineering

Master Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

**Investigation of Oldroyd-B Non-Newtonian Fluid Effects during Transient
Flows in a Pipeline**

By: Shaghayegh Khalili

Supervisor:

Dr. Ahmad Ahmadi

Dr. Banafsheh Norouzi

February 2021