

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

مدلسازی اندرکنش سیال-سازه ناشی از ضربه قوچ با در نظر

گرفتن لوله حاوی سیال ویسکوالاستیک

نگارنده: بنفشه نوروزی

استاد راهنما

دکتر احمد احمدی

اساتید مشاور

دکتر محمود نوروزی

دکتر محسن لشکریلوک

خرداد ۱۳۹۸

**تقدیم به پدر و مادر عزیز**

**و**

**هم نفس‌هایم**

**"علی و مانی"**

## تقدیر و تشکر

سپاس خداوند مهربان را که همواره بیش از آن چه از او خواسته‌ام عطا فرموده است. همچنین از تمامی کسانی که من را در تهیه این رساله یاری کردند، قدردانی می‌نمایم: استاد راهنمای عزیزم، جناب آقای دکتر احمد احمدی، به خاطر آموزشها، رهنمودها، حمایت‌های پیوسته، تشویق‌ها و دلگرمی‌هایشان در تمام دوران دانشجویی دکتری‌ام. استاد مشاور فرهیخته‌ام جناب آقای دکتر محمود نوروزی که در تحلیل همه بخشهای مکانیکی تحقیق حاضر از تجربیات علمی ایشان بهره گرفتم. و همچنین، استاد مشاورم جناب آقای دکتر محسن لشکربلوک به خاطر اشراف بر مدلسازیهای هیدرولیکی و روشهای عددی که در طی انجام این تحقیق از رهنمودهای علمی ایشان سود بردم.

# تعمیرنامه

اینجانب بنفشه نوروزی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی اندرکنش سیال-سازه ناشی از ضربه قوچ با در نظر گرفتن لوله حاوی سیال ویسکوالاستیک 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 رساله 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 رساله، 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. از طرفی با توجه به اینکه رخداد پدیده ضربه قوچ، به طور معمول، ارتعاش جداره لوله را در پی دارد و در ابعاد وسیع ممکن است، منجر به آسیبهای جدی به سیستم لوله شود، بررسی اثرات تداخلی سیال-سازه طی کوبله های مختلف، نیز در کنار مدلسازی این پدیده، ضروری به نظر می‌رسد. به همین منظور، پس از افزودن معادلات ارتعاش محوری سازه به معادلات سیال و تشریح دیدگاههای رایج در زمینه آنالیز کوبله، مدلسازی عددی در مورد محلول پلیمری که تحت کوبله های مختلف اتصال و کوبله پواسون و همچنین کوبله همزمان اتصال و پواسون، قرار گرفته انجام می‌گردد. سیستم مورد بررسی در رساله حاضر، از نوع شیر، لوله و مخزن در نظر گرفته می‌شود و در بخش ویسکوالاستیک، از معادلات رئولوژی غیرخطی اولدرویدی به عنوان معادلات ساختاری تبیین کننده رابطه تنشها استفاده می‌شود، همچنین، روش عددی تفاضل محدود  $LxF$  جهت گسسته سازی معادلات به کار گرفته می‌شود. بررسی معادلات مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، نشان داد که رفتار سیال تحت رخداد این پدیده متاثر 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، اثرات لاین پکینگ در پشت شیر، با وضوح بیشتری مشاهده می‌گردد و همچنین، 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 می‌شود، با تقویت خاصیت الاستیک سیال، تمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارد شده را افزایش داده و باعث می‌شود، از میزان دمپینگ جریان انتقالی تا حدی کاسته شود. در مقایسه اثرات کوپله‌ها بر برهمکنش سیال ویسکوالاستیک-سازه در طی رخداد ضربه قوچ، کوپله ترکیبی اتصال و پواسون و پس از آن، کوپله اتصال بیشترین تاثیر و کوپله پواسون نیز کمترین تاثیر را بر ارتفاع موج فشاری نمایش دادند. شرایط مرزی تعریف شده برای کوپله اتصال، به گونه ای است که به شیر اجازه ارتعاش در سیستم داده می‌شود و همین مساله باعث تاثیر پذیری شدید سیستم از اثرات این کوپله می‌شود که معمولا در محل‌های تغییر مومنتوم جریان، نظیر پشت شیرها، تقاطعها و.. اتفاق می‌افتد. اما در کوپله پواسون، شرایط مرزی تحمیل شده به سیستم از تقید بالایی برخوردار است و با تحمیل شرط گیردار نمودن سازه در محل‌های ذکر شده، میزان تاثیرپذیری سیستم از این کوپله به حداقل می‌رسد. از طرفی در سیال ویسکوالاستیک، پس از اعمال اثرات کوپله، تفاوت زیادی در میزان تنش‌های برشی ناشی از ضربه قوچ مشاهده نمی‌شود. با این وجود، در مقایسه جزئیات، کوپله پواسون و کوپله اتصال، به ترتیب کمترین و بیشترین میزان تنش را به خود اختصاص می‌دهند.

**واژگان کلیدی:** چکش ویسکوالاستیک، مدل اولدروید-بی، اندر کنش سیال ویسکوالاستیک-سازه، روش دو گام زمانی لاکس-فردریشک، کوپلینگ پواسون.

**Journal papers**

1. B. Norouzi, A. Ahmadi, M. Norouzi & M. Lashkarbolouk, Numerical modeling of fluid–structure interaction during viscoelastic fluid hammer phenomenon in a pipeline, Journal of Engineering Mechanic, (under reviewing).
2. B. Norouzi, A. Ahmadi, M. Norouzi & M. Lashkarbolouk, Numerical modeling of the fluid hammer phenomenon of viscoelastic flow in pipes, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, (Revising).
3. B. Norouzi, A. Ahmadi, M. Norouzi & M. Lashkarbolouk, Comparison of the effect of Reynolds number in “Oldroyd-B” and “Upper-Convected-Maxwell” fluid hammer to “Newtonian” fluid in laminar flow, Journal of Civil Engineering, Amirkabir university of technology, (In Persian) (Revising).
4. B. Norouzi, A. Ahmadi, M. Norouzi & M. Lashkarbolouk, Modeling of an Upper-Convected-Maxwell fluid hammer phenomenon in pipe system, Journal of Mechanical Engineering, Amirkabir university of technology, (Accepted).
5. B. Norouzi, A. Ahmadi, M. Lashkarbolouk & M. Norouzi, Numerical solution of water hammer phenomenon in the pipe system by Meshless numerical method, Journal of Water and Soil Conservation, 2018, 25(3).1-24.(In Persian). (Published).



## Conference papers

1. B. Norouzi, A. Ahmadi, M. Norouzi & M. Lashkarbolouk, Sensitive analysis about the velocity of pressure wave in Newtonian and viscoelastic fluid hammer in attenuation time of transient flow, 11th International Congress on Civil Engineering, 2018, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian).
2. B. Norouzi, A. Ahmadi, M. Lashkarbolouk & M. Norouzi, Modeling the behavior of the resulted pressure wave of the fluid hammer phenomenon by adding different solvents using Oldroyd-B equations, 11th International Congress on Civil Engineering, 2018, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian).
3. B. Norouzi, A. Ahmadi, M. Norouzi & M. Lashkarbolouk, Numerical investigation of the viscoelastic fluid's effects in decreasing shear stresses due to water hammer phenomenon using Mesh-less method, 11th International Congress on Civil Engineering, 2018, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian).

## فهرست مطالب

فصل اول کلیات .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۲
۲-۱- فرضیات رساله .....	۴
۳-۱- اهداف رساله .....	۵
۴-۱- فصل بندی رساله .....	۶
فصل دوم تاریخچه و مطالعات پیشین .....	۹
۱-۲- کلیاتی درباره سیالات غیرنیوتنی .....	۱۰
۱-۲-۱- طبقه بندی سیالات غیرنیوتنی .....	۱۱
۱-۲-۱-۱- سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان .....	۱۱
۱-۲-۱-۲- سیالات غیرنیوتنی تابع زمان .....	۱۲
۱-۲-۱-۳- سیالات ویسکوالاستیک .....	۱۴
۲-۲- پدیده ضربه قوچ (چکش آبی) .....	۲۳
۳-۲- تاریخچه مطالعات جریانهای میرا .....	۲۶
۴-۲- تاریخچه مطالعات اندرکنش سیال - سازه .....	۲۹
فصل سوم معادلات حاکم .....	۳۳
۱-۳- معادلات کلی حاکم بر ضربه قوچ .....	۳۴
۱-۳-۱- معادله پیوستگی .....	۳۴
۱-۳-۱-۱- کاربرد معادله حالت در معادله پیوستگی .....	۳۵
۱-۳-۱-۲- معادله کامل سرعت موج در جریانهای انتقالی .....	۳۷
۱-۳-۲- معادله مومنتوم .....	۳۸
۲-۳- خانواده مدلهای اولدرویید .....	۴۲
۱-۲-۳- روابط تنش حاکم بر بخش حلال یک محلول پلیمری ویسکوالاستیک .....	۴۴
۲-۲-۳- روابط تنش حاکم بر بخش حلشونده یک محلول پلیمری ویسکوالاستیک .....	۴۵
۳-۲-۳- معادله ساختاری دو ثابت مدل اولدرویید-بی .....	۴۶
۳-۳- معادلات اصلی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک .....	۴۸
فصل چهارم مدلسازی عددی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک (چکش سیال ویسکوالاستیک) .....	۵۱

- ۴-۱-۱- روش عددی تفاضل محدود..... ۵۲
- ۴-۱-۱- روش لاکس-فردریش (LXF)..... ۵۵
- ۴-۱-۲- روش های چندگام زمانی ..... ۵۵
- ۴-۱-۳- فرمول بندی روش لاکس فردریش ..... ۵۷
- ۴-۱-۴- انتخاب اندازه گام زمانی و محدودیت پایداری..... ۶۰
- ۴-۲- آنالیز ابعادی و بیبعد سازی معادلات حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک..... ۶۱
- ۴-۳- شرایط اولیه و مرزی ..... ۶۴
- ۴-۵- اعتبار سنجی مدل..... ۶۶
- ۴-۶- مدلسازی عددی ..... ۶۸
- ۴-۶-۱- مقایسه رفتار سیال در حالات مختلف در طول پدیده ضربه قوچ ..... ۷۰
- ۴-۷- بررسی تاثیر اعداد بیبعد بر اتفاقات ضربه قوچ ..... ۷۵
- ۴-۷-۱- بررسی تاثیر عدد دبور..... ۷۵
- ۴-۷-۲- بررسی تاثیر عدد بتا (نسبت ویسکوزیته) ..... ۷۷
- ۴-۷-۳- بررسی تاثیر عدد رینولدز ..... ۷۹
- فصل پنجم مدلسازی اندرکنش سیال-سازه طی رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک و بررسی نتایج ۸۳**
- ۵-۱- اندرکنش سیال-سازه در لولهها ..... ۸۴
- ۵-۲- انواع معادلات مدلسازی کوپله ..... ۸۴
- ۵-۳- معادلات حاکم بر اندرکنش سیال ویسکوالاستیک-سازه..... ۸۵
- ۵-۳-۱- معادلات سیال ..... ۸۵
- ۵-۳-۲- معادلات ارتعاش محوری سازه..... ۸۹
- ۵-۴- انواع مکانیزمهای اثرات کوپله ..... ۹۲
- ۵-۴-۱- اثر تداخلی پواسون ..... ۹۲
- ۵-۴-۲- اثر تداخلی تقاطع (اتصال) ..... ۹۳
- ۵-۴-۳- اثر تداخلی اصطکاک ..... ۹۳
- ۵-۴-۴- تفاوت اثر تداخلی پواسون و اتصال ..... ۹۴
- ۵-۵- شرایط مرزی کوپله اتصال و پواسون ..... ۹۴
- ۵-۵-۱- نقطه انتهای بالادست لوله ..... ۹۵
- ۵-۵-۲- نقطه پشت شیر ..... ۹۵

۹۶.....	۵-۶- مدلسازی عددی
۹۶.....	۵-۶-۱- کوپله اتصال
۱۰۰.....	۵-۶-۲- کوپله پواسون
۱۰۴.....	۵-۶-۳- کوپله پواسون و اتصال
۱۰۶.....	۵-۷- مقایسه تاثیر کوپله ها بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک
<b>۱۰۹.....</b>	<b>فصل ششم خلاصه، نتیجه گیری و پیشنهادات</b>
۱۱۰.....	۶-۱- خلاصه
۱۱۲.....	۶-۲- نتیجه گیری
۱۱۲.....	۶-۲-۱- نتایج کلی مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک (چکش سیال ویسکوالاستیک)
۱۱۴.....	۶-۲-۲- نتایج کلی مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن اثرات تداخلی
۱۱۷.....	۶-۳- پیشنهادات
۱۲۰.....	منابع فارسی
۱۲۰.....	منابع انگلیسی

## فهرست جداول

جدول ۳-۱- تغییرات ثابت $k$ با نسبت پواسون مصالح لوله.....	۳۸
جدول ۴-۲- مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله.....	۶۷
جدول ۴-۳- محدوده ثابت زمان رهایی از تنش و ویسکوزیته.....	۶۹
جدول ۴-۴- مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله.....	۷۰
جدول ۴-۵- مشخصات حالات مختلف مدلسازی.....	۷۴
جدول ۵-۱- مشخصات سیال و ویژگیهای فیزیکی سیستم.....	۹۶

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- منحنی های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات مستقل از زمان ..... ۱۲
- شکل ۲-۲- منحنی های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات غیر نیوتنی تابع از زمان ..... ۱۴
- شکل ۳-۲- طرح شماتیک جریان برشی ساده ( جریان کوئت) ..... ۱۵
- شکل ۴-۲- اعمال چرخش به دو سیال نیوتنی (N) و ویسکوالاستیک (V) ..... ۱۷
- شکل ۵-۲- تغییر جهت جریان های ثانویه در عمق یک جریان در حال چرخش، سیال نیوتنی (N) و ویسکوالاستیک (V) ..... ۱۷
- شکل ۶-۲- بازگشت فتری یک سیال ویسکوالاستیک ..... ۱۸
- شکل ۷-۲- زمان اعمال تغییر شکل در مواد گوناگون تحت بارگذاری های مختلف ..... ۱۹
- شکل ۸-۲- دیاگرام پیپکین ..... ۲۱
- شکل ۹-۲- توقف لحظه ای سیال بدون اصطکاک در لوله افقی ..... ۲۴
- شکل ۱۰-۲- مراحل رخداد ضربه قوچ ..... ۲۵
- شکل ۱۱-۲- تغییرات فشار با زمان در پشت شیر ..... ۲۶
- شکل ۱-۳- شماتیک تنش های برشی وارد بر وجوه المانی از جریان ..... ۴۰
- شکل ۱-۴- طرح کلی حل عددی به روش تفاضل محدود ..... ۵۳
- شکل ۲-۴- نتایج حاصل از تاریخچه فشاری به روش های مختلف ..... ۵۴
- شکل ۳-۴- نمای شماتیک مش جابه جا شده ..... ۵۷
- شکل ۴-۴- طرح شماتیک روش لاکس فردریش اصلی ..... ۵۸
- شکل ۵-۴- طرح شماتیک روش دو گام زمانی لاکس فردریش ..... ۵۹
- شکل ۶-۴- نمایی از سیستم شیر- لوله و مخزن ..... ۶۴
- شکل ۷-۴- تاریخچه زمانی فشار در شبکه بندی های مختلف در نقطه پشت شیر ..... ۶۵
- شکل ۸-۴- اعتبار سنجی مدل پیشنهادی برای سیال نیوتنی باروشهای عددی زیلک و روش وهبا و روش آزمایشگاهی ..... ۶۸
- شکل ۹-۴- نمایی از سیستم شیر- لوله و مخزن ..... ۶۹
- شکل ۱۰-۴- مقایسه تاریخچه فشاری در سیالات مختلف ..... ۷۱
- شکل ۱۱-۴- مقایسه تنش های برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محلول های نیوتنی و ویسکوالاستیک در نقطه وسط لوله  $Re = 80, \beta = 0, M = 9.66e - 5, De = 0$  سیال نیوتنی ..... ۷۲
- شکل ۱۲-۴- تاثیر پارامتر  $k$  بر تاریخچه فشاری در پشت شیر ..... ۷۴
- شکل ۱۳-۴- تاثیر عدد دوبرا بر تاریخچه فشاری  $Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}$  ..... ۷۶

- شکل ۴-۱۴- تاثیر عدد دبوراً بر تنش های برشی در وسط لوله  $Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}$  ..... ۷۷
- شکل ۴-۱۵- تاثیر نسبت ویسکوزیته  $\beta$  بر تاریخچه فشاری  $Re = 80, De = 10, M = 10^{-4}$  ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۶- تاثیر نسبت ویسکوزیته  $\beta$  بر تنش های برشی در وسط لوله  $Re = 80, De = 10, M = 10^{-4}$  ... ۷۹
- شکل ۴-۱۷- تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در ضربه قوچ نیوتنی  $\beta = 0, De = 0, M = 10^{-4}$  ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۸- تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک  $\beta = 0.6, De = 10, M = 10^{-4}$  ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۹- مقایسه تنش های برشی ناشی از ضربه قوچ با رینولدزهای مختلف در نقطه وسط لوله ..... ۸۱
- شکل ۵-۱- مقایسه تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله اتصال ..... ۹۷
- شکل ۵-۲- نمایش تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله اتصال ..... ۹۷
- شکل ۵-۳- مقایسه تنش های برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محل نقطه وسط لوله ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۴- مقایسه تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله پواسون ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۵- نمایش تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله پواسون ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۶- مقایسه تنش های برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محل نقطه وسط لوله ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۷- مقایسه تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله همزمان اتصال و پواسون ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۸- نمایش تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله پواسون و اتصال ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۹- مقایسه تنش های برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محل نقطه وسط لوله ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۰- مقایسه تاریخچه فشار حین وقوع ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک در کوپلینگ های مختلف ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۱- مقایسه تنش های برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک در کوپلینگهای مختلف در نقطه وسط لوله ..... ۱۰۸

فهرست علائم

علائم انگلیسی	علائم یونانی	
$De$	$\eta$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$E$	$\lambda$	ثابت زمانی رهایی از تنش یا آرامش (s)
$e$	$\nu$	نسبت پواسون
$H$	$\rho$	جرم مخصوص سیال ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$M$	$\tau$	تنش‌های برشی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$r$	$\beta$	عدد نسبت ویسکوزیته حل شونده
$Re$		عدد رینولدز
$t$	$n$	گام زمانی قبل
$V$	$n+1$	گام زمانی بعد
$v$	$T$	ترانهاده
$p$		مصالح لوله
$r$	$f$	راستای شعاعی لوله
$z$	$p$	راستای محور مرکزی لوله
	$s$	حلال نیوتنی
		زیرنویس‌ها
		بالانویس‌ها



# فصل اول

## کلیات

۱-۱- مقدمه

۱-۲- فرضیات رساله

۱-۳- اهداف رساله

۱-۴- فصل بندی رساله

در مباحث مربوط به سیالات، جریان غیردائمی<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. ضربه قوچ<sup>۳</sup>، 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، جداسدن 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<sup>۴</sup> و امکان جدایی ستون سیال<sup>۵</sup> 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

---

<sup>1</sup> Unsteady

<sup>2</sup> Transient fluid

<sup>3</sup> Water hammer

<sup>4</sup> Cavitation

<sup>5</sup> Column Separation

سیال، تا حد زیادی مغفول مانده است. در سالهای اخیر، تاثیر به کارگیری 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 قطعاً با قرارگیری این سیالات در شرایط رخداد ضربه قوچ، نتایج مهمی به دست آورده می‌شود.

یکی از این گروه سیالات، سیالات ویسکوالاستیک<sup>1</sup> 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 معمولاً ناشی از زنجیره طویل مولکولهاست که در اثر کنشها بر یکدیگر بروز می‌کند. این سیالات معمولاً 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؟

---

<sup>1</sup> Viscoelastic

- آیا معادله ساختاری برای مدلسازی رفتار دوگانه سیال ویسکوالاستیک وجود دارد؟
- چه تفاوت‌هایی بین ارتفاع موج فشاری و تنشهای برشی ناشی از ضربه قوچ یک سیال نیوتنی و ضربه قوچ حاصل از سیال ویسکوالاستیک وجود دارد؟
- در بحث اندر کنش سیال-سازه در لوله‌ها در حین وقوع ضربه قوچ، که معادلات سیال و سازه به طور همزمان، تحلیل می‌شوند، افزودن معادلات سیال ویسکوالاستیک، چه تاثیری در نتایج نهایی دارد؟
- آیا ویژگیهای سیال ویسکوالاستیک تاثیری در تعدیل و یا تشدید تنشهای برشی مخرب ناشی از ضربه قوچ دارد؟

در تحقیق حاضر، تلاش می‌شود که به همه این پرسشها به تفصیل، پاسخ داده شود.

## ۱-۲- فرضیات رساله

در کلیه تحلیل‌های سازه‌ای و هیدرولیکی رساله حاضر، لوله به صورت جداره نازک فرض می‌شود که از مواد الاستیک تهیه شده است. سیستم مورد بررسی در این مطالعه از نوع کلاسیک شیر، لوله-مخزن می‌باشد. مدلسازی مساله با انتگرالگیری از معادلات در راستای شعاع سطح مقطع لوله، به صورت یک بعدی در نظر گرفته می‌شود. 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 صرفنظر می‌گردد. سیال موجود در لوله تراکم ناپذیر، غیرنیوتنی و از نوع ویسکوالاستیک در نظر گرفته می‌شود. در مدلسازی رفتار سیال ویسکوالاستیک، از معادلات ساختاری اولدروید بی استفاده می‌شود. از اثرات خمشی، اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی عرضی صرفنظر می‌شود که این فرضیات با عنوان امواج با طول موج های بلند<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. مدل ارائه شده در تحقیق، برای لوله هایی با مقطع گرد که در فضای آزاد در معرض فشار هوای جو هستند، معتبر می‌باشد. جهت بررسی اثرات تداخلی سیال-سازه، هر دو کوپله پواسون و اتصال در نظر گرفته می‌شود. لوله ها و شیرها در جهت محوری کاملاً آزاد فرض

<sup>1</sup> Long wavelength approximation

شده به گونه‌ای که اثر تداخلی پواسون و اتصال مشاهده گردد. کرنشهای ایجاد شده در اثر تداخل سیال-سازه، کوچک بوده و با استفاده از تئوری کرنشهای بسیار کوچک<sup>1</sup> محاسبه می‌شوند. در تحلیل معادلات، از عبارتهای همرفتی به دلیل کوچکی در مقایسه با سرعت موج صرفنظر می‌شود. دمای محیط، ثابت فرض می‌شود.

### ۱-۳- اهداف رساله

در رساله حاضر، سعی شده تا با از میان برداشتن فرض پایه‌ای 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 قابلیت‌های آنها در علوم مهندسی و ایجاد طرحهای 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 تنش‌ی معادل تنش جریان دائمی در پدیده ضربه قوچ، صرفنظر شده و از معادلات ساختاری مدل اولدریوید بی در تحلیل تنشهای غیر دائمی ناشی از این پدیده استفاده می‌گردد. معادلات مورد نظر پس از بی‌بعد سازی با استفاده از روش عددی دو گام زمانی لاکس فردریش<sup>2</sup> (LXF) تحلیل گردیده و سپس، ارتفاع موج فشاری و تنشهای برشی ایجاد شده ناشی از ضربه قوچ، در نقاط بحرانی لوله ترسیم می‌گردند.

هدف از این تحلیل، در درجه نخست 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؟

یکی دیگر از اهداف رساله حاضر، بررسی اثرات تداخلی سیال-سازه در حین وقوع ضربه قوچ می‌باشد. به این منظور، هر دو کوپله پواسون و اتصال به صورت منفک و همچنین کوپل همزمان اتصال و

<sup>1</sup> Infinitesimal strain theory

<sup>2</sup> Two-step variant of the Lax-Friedrichs

پواسون در نظر گرفته می‌شود. با حل معادلات سازه و هیدرولیک در بحث اندرکنش سیال-سازه، می‌توان بررسی نمود که چه تفاوتی در رفتار سیالات ایده‌آل (بدون اصطکاک)، سیال نیوتنی و سیال ویسکوالاستیک در هر یک از کوپله‌های ذکر شده مشاهده می‌شود؟ تنشهای برشی ناشی از این پدیده در کدام کوپله و با کدام نوع سیال با شدت بیشتری بر لوله اعمال می‌شوند و آیا راهکاری برای کاهش آنها می‌توان ارائه داد؟

#### ۱-۴- فصل بندی رساله

در فصل اول رساله چنانچه گذشت، کلیات، فرضیات و اهداف مطالعه مطرح گردید. در فصل دوم، ابتدا انواع سیالات غیرنیوتنی به صورت کلی معرفی می‌شود و سپس، مروری بر مطالعات گذشته سایر محققین در دو بخش تاریخچه جریانهای میرا و اندرکنش سیال-سازه در طول این جریانها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

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، 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 دو گام زمانی (LxF) تعریف می‌شود و معادلات به دست آمده از فصل سوم با استفاده از این روش تحلیل می‌شوند، در انتهای این فصل، پس از بی‌بعد سازی معادلات، تاثیر هر یک از اعداد بی‌بعد بر رفتار موج فشاری حاصل از ضربه قوچ در سیالات ویسکوالاستیک بررسی می‌گردد.

فصل پنجم به مبحث اثر تداخلی سیال ویسکوالاستیک-سازه اختصاص داده می‌شود و معادلات سازه-ای و هیدرولیکی به همراه شرایط مرزی در کوپله‌های اتصال و پواسون و همچنین کوپله همزمان اتصال و پواسون معرفی و سپس به تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود.

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





## فصل دوم

# تاریخچه و مطالعات پیشین

۲-۱- کلیاتی درباره سیالات غیرنیوتنی

۲-۲- مروری بر پدیده ضربه قوچ

۲-۳- تاریخچه مطالعات جریانهای میرا

۲-۴- تاریخچه مطالعات اندرکنش سیال-سازه

در این فصل، ابتدا به جهت تبیین جایگاه سیالات ویسکوالاستیک در مکانیک سیالات، مرور کوتاهی بر انواع سیالات غیرنیوتنی انجام می‌شود و سپس، پیشینه مطالعات صورت گرفته در زمینه جریان گذرا، پدیده ضربه قوچ و اندرکنش سیال سازه در طی رخداد این پدیده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۱- کلیاتی درباره سیالات غیرنیوتنی

سیالات را می‌توان 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 می‌باشد. دیدگاه اول، منجر به این تقسیم‌بندی خواهد شد که آیا المانهای سیال در برابر فشار تغییر حجم می‌دهند یا خیر، که در نتیجه تعاریف تراکم پذیری و تراکم ناپذیری شکل می‌گیرند. دیدگاه دوم که سبب تقسیم بندی دیگری می‌شود، رفتار سیال در مقابل تنشهای برشی است. چنانچه رفتار سیال به گونه‌ای باشد که رابطه تنشهای برشی وارد بر سیال با تغییرات نرخ برش، به صورت خطی باشد، آن سیال به عنوان سیال نیوتنی شناخته می‌شود، 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 غیرنیوتنی طبقه بندی می‌شود [Bird et al. 1987].

محدوده سیالات غیر نیوتنی بسیار گسترده است. در محدوده سیالات غیر نیوتنی موجود در طبیعت می‌توان به موارد بسیاری اشاره نمود از جمله شیره درختان و گیاهان، بسیاری از مواد خوراکی، بسیاری از مواد موجود در بدن مانند مخاطها و به‌ویژه خون که به دلیل ارائه رفتار متفاوت در شرایط مختلف، دست مایه بسیاری از تحقیقات و مطالعات شده است، به گونه‌ای 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 می‌توان به مباحث پلیمرها، رنگها و جوهرها، صنایع دارویی، صنایع غذایی، صنایع آرایشی و بارتفاعاشتی 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

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

۱. سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان

۲. سیالات غیرنیوتنی وابسته به زمان

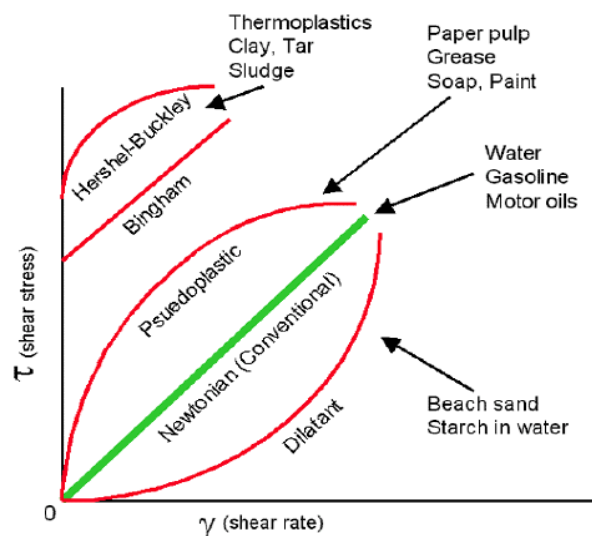
۳. سیالات ویسکوالاستیک

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

### ۲-۱-۱-۱-۲ - 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 (۲-۱) 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، دوغ‌آبهای 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<sup>۱</sup> و سیالات دایلاتنت<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. این سیالات به صورت سیالات نیوتنی تعمیم یافته<sup>۳</sup> 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  $\eta_{\infty}$  و در شدتهای برش کم به ویسکوزیته در برش صفر  $\eta_0$  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

<sup>1</sup> Pseudoplastic

<sup>2</sup> Dilatant

<sup>3</sup> Generalized Newtonian fluids

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

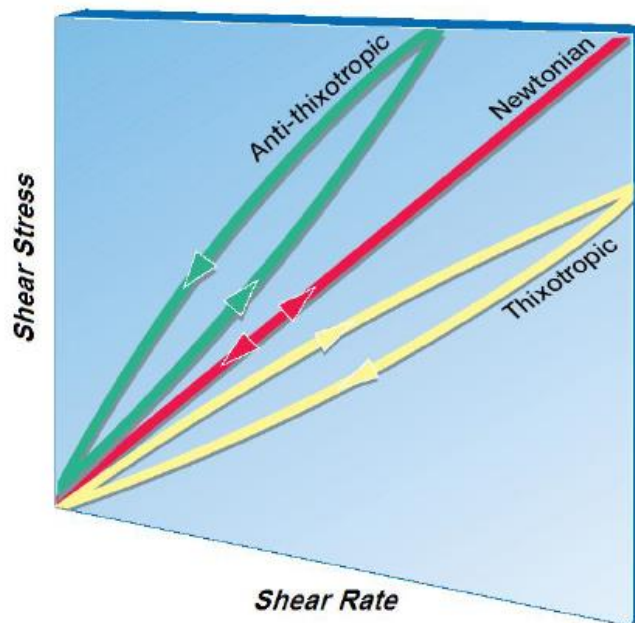
در بعضی از سیالات غیرنیوتنی، علاوه بر اینکه ویسکوزیته تابعی از نرخ برش است، تابعی از زمان نیز می‌باشد. به عبارت دیگر در این سیالات، در حین یک نرخ برش ثابت، ساختمان مولکولی ماده به طور مداوم در حال تغییر است و لذا مقدار ویسکوزیته و تنش برشی نیز تابعی از زمان خواهد بود. به طور کلی این مواد به دو دسته سیالات تیکسوتروپیک<sup>۱</sup> و سیالات رئوپکتیک<sup>۲</sup> و آنتی تیکسوتروپیک<sup>۳</sup> تقسیم می‌شوند. در سیالات تیکسوتروپیک، چنانچه ماده در معرض یک شدت برش ثابت و دمایی معین قرار داده شود، تنش برشی یک کاهش برگشت پذیر نسبت به زمان پیدا می‌کند. 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 می‌کند و لذا با افزایش زمان، ویسکوزیته سیال کاهش می‌یابد. 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 می‌شود، بنابراین امکان برخورد مولکولها و فعالتر شدن مکانیزم ترمیم افزایش می‌یابد. به همین دلیل، پس از گذشت مدت زمان مشخصی تعادلی بین فرآیندهای شکست و عبارتی به وجود می‌آید و ویسکوزیته به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند. 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

<sup>1</sup> Thixotropic

<sup>2</sup> Rheopectic

<sup>3</sup> Antithixotropic

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]. در شکل (۲-۲) منحنی تنش در برابر نرخ برش برای مواد رئوپکتیک و تیکسوتروپیک نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- منحنی های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات غیر نیوتنی تابع از زمان [Malkin 1994]

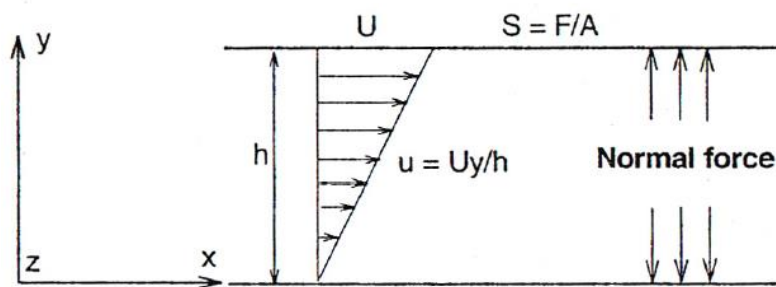
### ۲-۱-۱-۳- سیالات ویسکوالاستیک

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، می باشد. از سوی دیگر، الاستیسیته یکی از خواص مواد جامد محسوب می شود. در واقع، سیالات ویسکوالاستیک موادی هستند که ویژگیهای ویسکوز و الاستیک را به صورت توأمان دارا می باشند 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 کرد که 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].

### ۲-۱-۱-۳-۱-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 به طور ناگهانی متوقف شود، بر خلاف سیالات نیوتنی که در آنها تنش به طور 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 ۲-۳- طرح شماتیک جریان برشی ساده (جریان کوئت) [Phan-Thien 2002]

بر خلاف آنچه در شکل ۲-۳ در مورد یک جریان برشی ساده نشان داده می‌شود، در مورد یک 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 به طور آنی متوقف نمی‌شود بلکه تا حدی

به عقب برمی‌گردد. 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 می‌شود 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 تفاوت‌های سیالات ویسکوالاستیک با سایر سیالات، وجود اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم در این مواد است. به عنوان نمونه در جریان کوئت، یک سیال معمولی تنش‌های نرمال همواره ثابت برابر فشار استاتیکی است اما در جریان کوئت یک سیال ویسکوالاستیک، اختلافی بین تنش‌های نرمال مشاهده می‌شود [Huilgol & Phan-Thien 1997]. به طور کلی، جریان برشی این مواد، آرایش و موقعیت مولکول‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد و کشیدگی و همراستا شدن مولکول‌های طویل پلیمری در راستای خطوط جریان را در پی دارد که این امر سبب خواص غیر ایزوتروپیک در سیال می‌شود. لذا جهت حفظ این انحراف، میدان تنش نیز تحت تاثیر قرار گرفته و اختلاف تنش‌های نرمال پدید می‌آیند [Bird et.al. 1987]. بنابراین می‌توان خلاصه نمود که دارا بودن ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش و نیز وجود اختلاف تنش‌های نرمال در سیالات ویسکوالاستیک، سبب بروز رفتارهای عجیب و بعضا متضاد در این سیالات نسبت به سایر سیالات می‌شود که در ادامه برخی از این رفتارها به اختصار مطرح می‌گردد.

### الف - تغییر شکل سطح آزاد یک سیال در حال چرخش

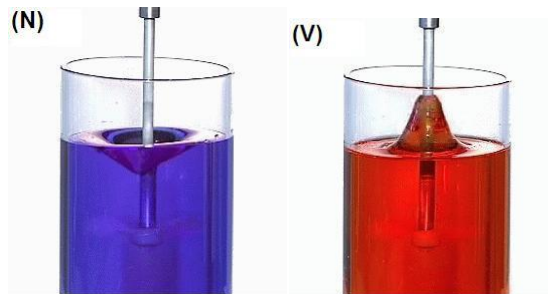
هنگامی که یک سیال نیوتنی در یک ظرف، به وسیله یک میله چرخان، بهم زده می‌شود، سطح سیال در وسط ظرف، پایین و در نزدیکی دیواره بالا می‌آید. این پدیده ناشی از نیروهای گریز از مرکز بوده و سبب تبدیل سطح آزاد سیال به یک سطح مقعر با تقارن محوری می‌شود. چنانچه این آزمایش به وسیله یک سیال ویسکوالاستیک تکرار شود،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



تنشهای نرمال اول در این مواد است. طبق مطالعات انجام شده، در این آزمایش مقدار  $\frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}}{r}$

مقداری غیر صفر و مثبت است که می تواند به اثر نیروی گریز از مرکز چیره شود و رفتار متضادی را

به نمایش بگذارد [Huilgol & Phan-Thien 1997].



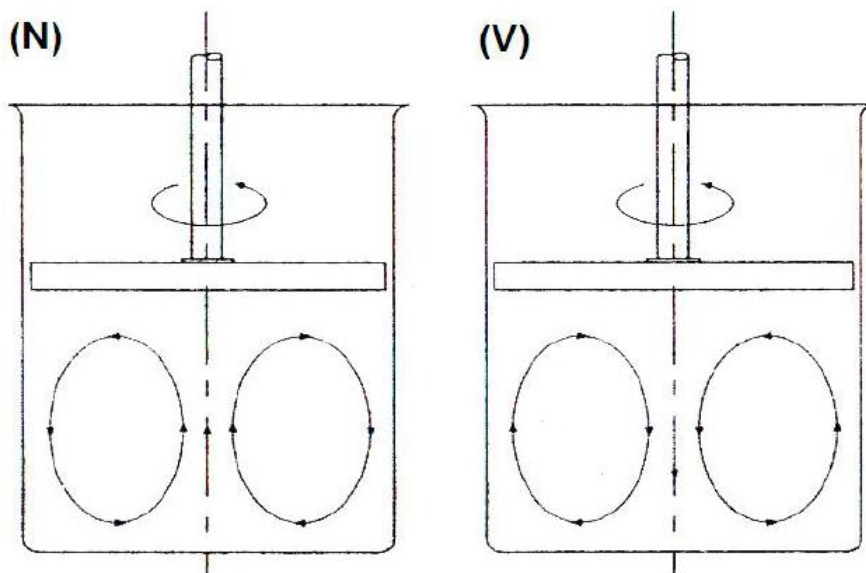
شکل ۲-۴ - اعمال چرخش به دو سیال نیوتنی (N) و ویسکوالاستیک (V) [Phan-Thien 2002].

### ب- تغییر جهت جریانهای ثانویه یک جریان در حال چرخش

چنانچه درب ظرف حاوی یک سیال، شروع به دوران نماید، یک جریان ثانویه بین سطح چرخنده و

دیواره های ثابت به وجود می آید. در اینجا نیز اثر اختلاف تنش های نرمال اول سبب برعکس شدن

جهت جریان ثانویه در سیال ویسکوالاستیک نسبت به سیال نیوتنی می شود [Phan-Thien 2002].

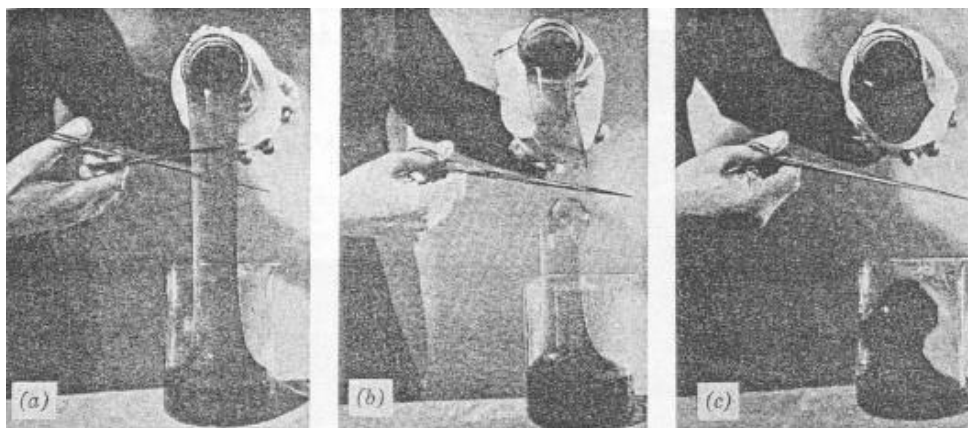


شکل ۲-۵ - تغییر جهت جریانهای ثانویه در عمق یک جریان در حال چرخش، سیال نیوتنی (N) و ویسکوالاستیک

[Phan-Thien 2002] (V)

### ج- 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 می گردد . این پدیده ناشی از خواص الاستیک ماده است و اصطلاحاً گفته می شود که سیال ویسکوالاستیک دارای حافظه است [Phan-Thien 2002].



شکل ۲-۶ - بازگشت فنری یک سیال ویسکوالاستیک [Phan-Thien 2002].

موارد دیگری نظیر آماسیدگی جت در این سیالات ( متورم شدن در نزدیکی نقطه خروج از سر نازل)، شکل محدب سطح آزاد آب در جریان این سیالات در یک کانال باز شیبدار که نشانه اختلاف تنشهای نرمال اول و دوم در سیالات ویسکوالاستیک است و همچنین، جریان یافتن سیفونی این سیالات بدون لوله مکش که به علت کشیدگی مولکولهای طولیل پلیمر در امتداد خط جریان می باشد و ..نمونه هایی از رفتارهای متفاوت سیالات ویسکوالاستیک می باشد [Phan-Thien 2002].

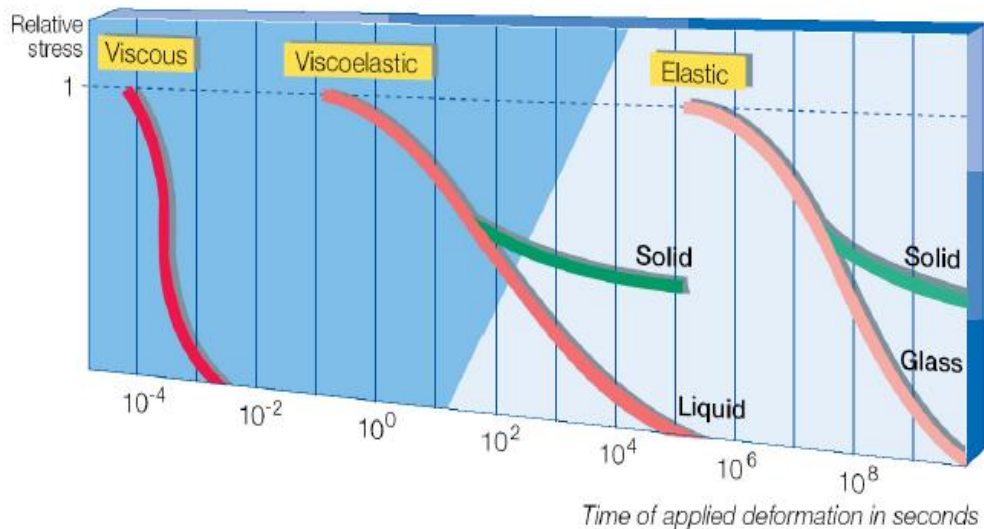
### ۲-۱-۱-۳-۲- پارامترهای مهم در جریان سیالات ویسکوالاستیک

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

زمان رهایی از تنش یک خاصیت هر ماده به شمار می آید که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\lambda = \frac{\eta}{G} \quad (1-2)$$

که در آن،  $\lambda$  زمان رهایی از تنش،  $\eta$  ویسکوزیته و  $G$  مدول صلبیت می‌باشد [Phan-Thien 2002]. در نمودار شکل ۷-۲ زمان اعمال تغییر شکل در مواد گوناگون تحت بارگذاری‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۷-۲- 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 ۷-۲ مشخص است، به ازای اعمال تنش نسبی معادل ۱، زمان رهایی از تنش یک سیال ویسکوز حدوداً  $(10^{-2.5} - 10^{-4}) = 0.003062$  ثانیه می‌باشد. اما در مورد جامدات و مواد الاستیک، زمان رهایی از تنش بسیار بیشتر می‌باشد، مثلاً در شیشه این زمان معادل  $(10^{10} - 10^5) = 9999900000$  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  $(10^{5.5} - 10^{-1}) = 316227.7$  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 دבורا

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

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

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

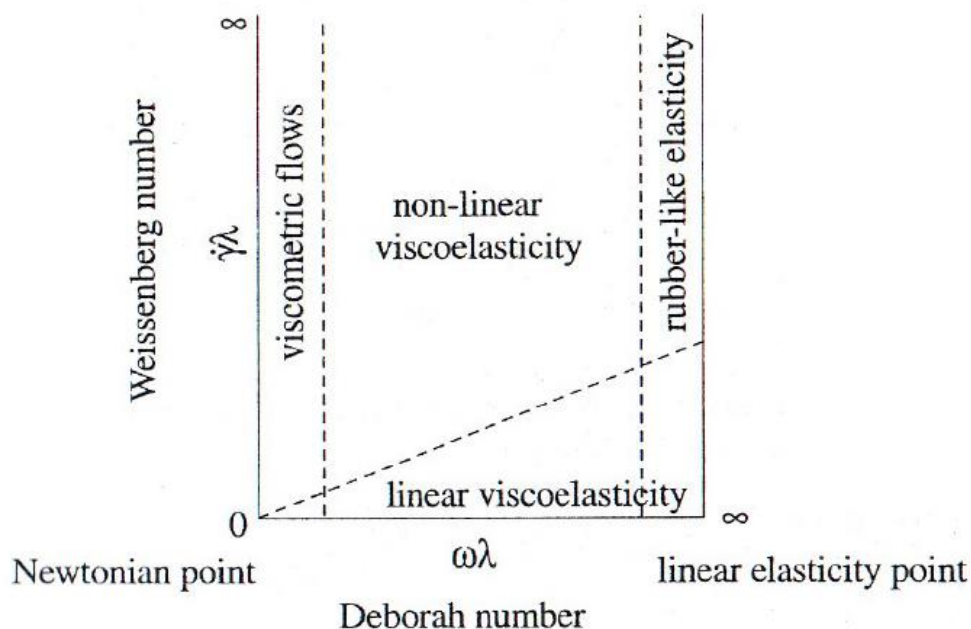
### ۲- عدد وایزنبرگ

عدد وایزنبرگ بر اساس نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی حاصل از ویسکوزیته تعریف می‌شود.

$$Wi = \lambda \dot{\gamma} \quad (3-2)$$

در فرمول فوق،  $\lambda$  زمان رهایی از تنش و  $\dot{\gamma}$  نرخ تغییر شکل می‌باشد. این عدد بر اساس روابط مختلفی تعریف شده که رابطه ۲-۳ متداول‌ترین شکل بیان آن است. بنابراین در یک سیال بخصوص، بالا بودن عدد وایزنبرگ به معنای غیر نیوتنی بودن این سیال است. مسلم است که اگر اعداد وایزنبرگ و دבורا برای یک ماده مشخص مقدار کوچک داشته باشند، ماده شانس جریان یافتن را پیدا می‌کند و بالعکس [Phan-Thien 2002]. معمولاً از دیاگرام پیپکین برای مشخص نمودن وضعیت ویسکوالاستیک

ماده استفاده می شود. در شکل ۲-۸ این دیاگرام نشان داده شده است. مطابق شکل محور افقی بر حسب عدد دبورا و محور قائم بر حسب عدد وایزنبرگ است. این دیاگرام ابزار مناسبی جهت انتخاب یک قانون پایه برای یک ماده مشخص است.



شکل ۲-۸- دیاگرام پیپکین [Phan-Thien 2002]

مطابق این دیاگرام هنگامی که  $De = Wi = 0$  باشد، ماده یک سیال نیوتنی است و هنگامی که  $De$  به سمت بی نهایت میل کند، ماده یک جامد الاستیک خواهد بود. در ناحیه میانی مربوط به عدد  $De$  ماده از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان می دهد. به نحوی که در این ناحیه به ازای اعداد  $Wi$  مدل های ویسکوالاستیک خطی و در اعداد  $Wi$  بزرگ مدل های ویسکوالاستیک غیر خطی برای ماده مناسب هستند. همچنین در اعداد  $De$  کوچک ماده رفتار ویسکومتريک و در اعداد  $De$  بزرگ رفتاری شبیه لاستیکها از خود نشان می دهد. در تمامی بخش ها، عدد وایزنبرگ خطی یا غیر خطی بودن رفتار ماده را مشخص می کند به نحوی که به ازای اعداد  $Wi$  کوچک، مدل ها خطی و به ازای اعداد  $Wi$  بزرگ، مدل ها غیر خطی خواهند بود. بنابراین با یافتن اعداد  $De$  و  $Wi$  با استفاده از دیاگرام پیپکین می توان معادله متشکله مناسب را برای هر ماده ای تعیین نمود [Phan-Thien 2002].

## ۲-۱-۱-۳- 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<sup>۱</sup> 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 رساله 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<sup>۲</sup>، کلوین-ویت<sup>۳</sup>، برگرز<sup>۴</sup> 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 ماکسولبه دست می‌آید [Bird et al. 1987].

هر چند که مدل‌های ویسکوالاستیک خطی روابط دیفرانسیلی ساده‌ای را بین تنش و نرخ برش پیش-بینی 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

<sup>1</sup> Constitutive equation

<sup>2</sup> James Clerk Maxwell

<sup>3</sup> Kelvin-Voigt

<sup>4</sup> Burgers

تحلیل جریان، در ابتدا با استفاده از مدل‌های خطی انجام شود و پاسخ‌های حاصل از آن به عنوان فرض اولیه در مدل‌های غیر خطی به کار رود. از جمله مدل‌های ویسکوالاستیک غیرخطی می‌توان به خانواده مدل‌های اولدرویید<sup>۱</sup>، مدل راینر-ریولین<sup>۲</sup>، مدل کریمینال اریکسون فیلیبی<sup>۳</sup>، مدل چهار ثابت فان-تین-تنر<sup>۴</sup>، مدل سه ثابت گزیکس<sup>۵</sup>، مدل دامبل<sup>۶</sup> و مدل کارتیس-برد<sup>۷</sup> اشاره نمود [Bird et al. 1987].

در تحقیق حاضر از خانواده مدل‌های اولدرویید 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، به منظور 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؟ آیا اندرکنش سیال-سازه با لحاظ گروه‌های مختلف سیالات غیرنیوتنی در طی رخداد این پدیده بررسی شده است؟ و در صورت بررسی، چه تفاوت رفتاری بین سیالات ویسکوالاستیک و سایر گروه‌های سیال غیرنیوتنی مشاهده می‌شود؟

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

## ۲-۲- پدیده ضربه قوچ (چکش آبی)

برای توضیح و درک بهتر پدیده ضربه قوچ، این مکانیزم در سیستم مخزن-لوله-شیر بررسی می‌شود. در شکل ۲-۹ نمایی از سیستم شیر، لوله و مخزن مشاهده می‌شود که در اثر بسته شدن ناگهانی شیر، موج فشاری ایجاد شده با سرعتی معادل  $a$  به سمت بالادست لوله در حرکت می‌باشد.

<sup>1</sup> Oldroyd

<sup>2</sup> Reiner-Rivlin

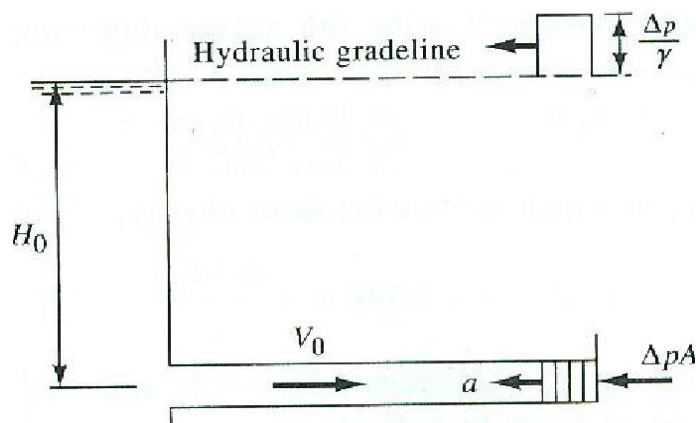
<sup>3</sup> Criminale-Eriksen-Filbey model (CEF model)

<sup>4</sup> Phan-Thien-Tanner model

<sup>5</sup> Giesekus model

<sup>6</sup> Dumbbell model

<sup>7</sup> Curtiss-Bird



شکل ۹-۲- توقف لحظه‌ای سیال بدون اصطکاک در لوله افقی [Wylie & Streeter 1993]

با توجه به شکل ۹-۲ پس از قطع ناگهانی جریان، پدیده ضربه قوچ در لوله به صورت زیر اتفاق می‌افتد: در توضیحات ذیل و همچنین در کل رساله، سرعت موج فشاری با  $c$  نمایش داده می‌شود.

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 ارتفاع، 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 ۱۰-۲- الف، تمام

سیال موجود در لوله تحت ارتفاع اضافی  $H$  قرار گرفته‌است. در این لحظه، به دلیل عدم توانایی موج فشار در تغییر ارتفاع 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 ۱۰-۲- ب). پس از رسیدن موج کاهش فشار به شیر، از

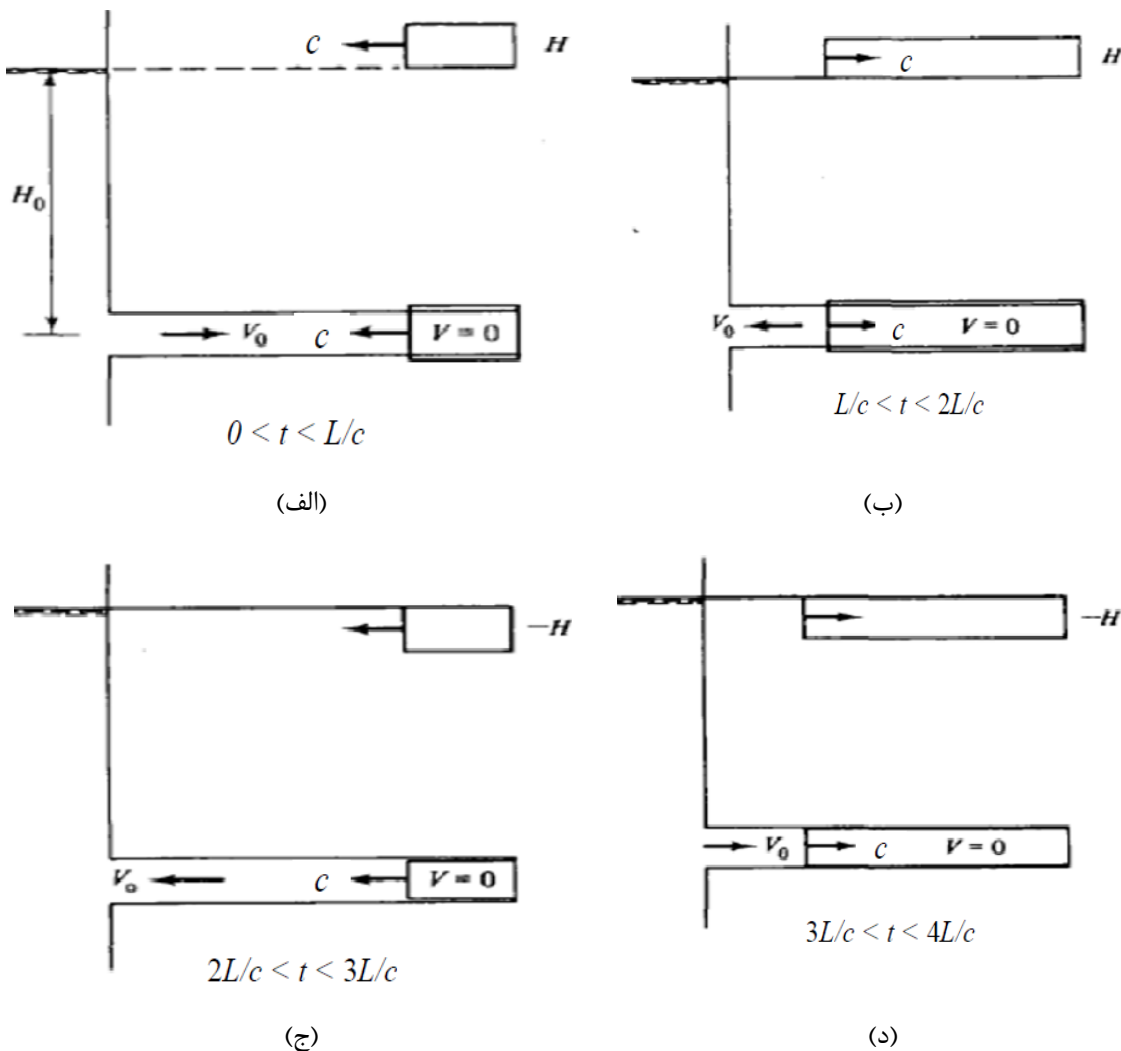
آنجایی که شیر بسته است و جریانی در آن، شکل نمی‌گیرد، فشار در این لحظه در این محل به  $-H$  خواهد رسید. این کاهش فشار، باعث انقباض لوله می‌شود. نتیجه شرایط نامتوازن این است که موج

فشار منفی با سرعت  $c$  به سمت بالادست حرکت خواهد کرد و در لحظه  $t = \frac{3L}{c}$  به مخزن خواهد



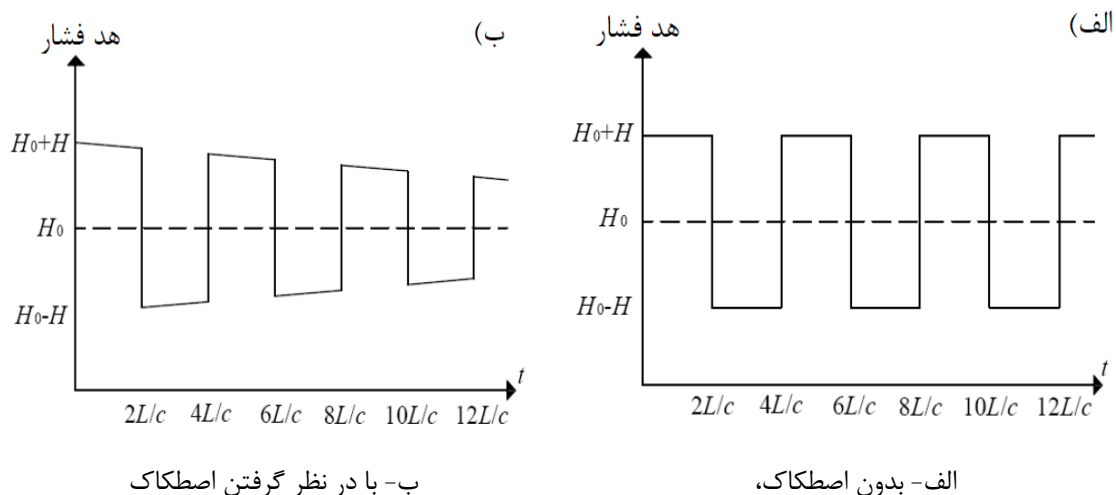
رسید (شکل ۱۰-۲-ج). در این لحظه، چنانچه فشار درون لوله از فشار بخار کمتر شود، سیال، تبخیر و پدیده کاویتاسیون و جدایی ستون مایع، رخ خواهد داد. پس از رسیدن موج فشار منفی به مخزن، دوباره شرایط نامتوازنی ایجاد خواهد شد و سیال درون لوله با همان سرعت اولیه به سمت جلو جاری می شود. همزمان بانشار موج به پایین 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، دقیقا همانند زمان بسته شدن شیر است.

(شکل ۱۰-۲-د). این فرایند هر  $t = \frac{4L}{c}$  ثانیه تکرار می شود [Wylie & Streeter 1993].



شکل ۱۰-۲-۱- مراحل رخداد ضربه قوچ [Wylie & Streeter, 1993]

در صورت وجود اصطکاک، با هر تکرار، مقداری از فشار کاسته می شود تا به حالت ماندگار و ساکن برسد که در شکل ۱۱-۲ مشاهده می شود.



شکل ۲-۱۱- تغییرات فشار با زمان در پشت شیر [Wylie & Streeter 1993]

## ۲-۳- تاریخچه مطالعات جریانهای میرا

هیدرولیک جریانهای میرا برای اولین بار توسط نیوتن<sup>۱</sup> و لاگرانژ<sup>۲</sup> 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، وبر<sup>۳</sup> به 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<sup>۴</sup>، سرعت موج را با توجه به کشسان بودن جداره لوله و کشسانی سیال ارائه [Korteweg 1878]. گرومیکا<sup>۵</sup> 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. ژوکووسکی قانون

<sup>1</sup>Newton

<sup>2</sup>Lagrange

<sup>3</sup>Weber

<sup>4</sup>Korteweg

<sup>5</sup>Gromeka

محاسبه مقدار فشار در اثر بستن آبی شیر را برای سیستم ساده شیر لوله مخزن به دست آورد. این قانون، بیان می‌دارد که میزان افزایش فشار در اثر بستن آبی شیر از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Delta H = \frac{cV_0}{g} \quad (4-2)$$

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<sup>۱</sup> 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 عبارت 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<sup>۲</sup> و لای<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> اشاره نمود [Zielke 1968]. وی در این تحقیق برای جریانهای غیر ماندگار لایه‌ای در حالت

<sup>1</sup> Allievi

<sup>2</sup> Streeter

<sup>3</sup> Lai

<sup>4</sup> Ruus

<sup>5</sup> Zielke

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 می‌باشد و استفاده از آن را در کاربردهای مهندسی تا حد زیادی محدود می‌نماید. از آن پس، مطالعات متعددی با محوریت پدیده ضربه قوچ توسط پژوهشگران انجام گرفت که از این میان، می‌توان به مواردی نظیر بررسی اثرات اصطکاک غیرماندگار در طول لوله و مدلسازی شبه دو بعدی معادلات حاکم، تاثیر جنس لوله و نیز تکیه‌گاهها 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 می‌باشد و حال آنکه فرض اصلی در رساله حاضر، برقراری یک سیال غیرنیوتنی در لوله از نوع ویسکوالاستیک و مشاهده رفتار موج فشاری در طی رخداد پدیده ضربه قوچ در لوله می‌باشد. جستجوهای صورت گرفته در این خصوص، نشان می‌دهد که بررسی این موضوع، تنها به دو مطالعه محدود می‌شود 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 قانون توانی 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 می‌شود: "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 می‌گیرد [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 راستی‌آزمایی نتایج حاصل از روشهای عددی فوق با نتایج آزمایشگاهی موجود، نتیجه گرفت که به‌کارگیری سیال غیرنیوتنی تاثیرات قابل توجهی در تغییرات تاریخچه زمانی فشار و همچنین توزیع پروفیل سرعت سیال می‌گذارد، از آن جمله می‌توان به اثر افزایش فشار و لاین پکینگ در اثر افزایش نازک شدگی برش اشاره نمود [مجد ۱۳۹۴]. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که تاکنون به‌کارگیری سیال ویسکوالاستیک و بررسی عملکرد موج فشاری آن در اثر بسته شدن ناگهانی شیر 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 می‌تواند منجر به توقف ناگهانی جریان سیال شود، ضروری به نظر می‌رسد.

## ۲-۴- تاریخچه مطالعات اندرکنش سیال - سازه

با توجه به اینکه رخداد پدیده ضربه قوچ، به‌طور معمول، ارتعاش جداره لوله را در پی دارد و در ابعاد وسیع ممکن است، منجر به آسیبهای جدی به سیستم لوله شود، بررسی این مساله نیز در کنار مدلسازی این پدیده، همواره مورد توجه بوده است. مطالعات اندرکنش سیال - سازه از نیمه دوم قرن نوزدهم آغاز و به دلیل ابعاد گسترده آن، تاکنون نیز ادامه دارد. از مهمترین مطالعات انجام گرفته در این خصوص، می‌توان به لوویج<sup>۱</sup> و تایلینگ<sup>۲</sup> در ۱۹۸۹ اشاره نمود که تداخل سیال و لوله را با به‌کار بردن تئوری ضربه قوچ برای سیال و تئوری خمش تیموشنکو برای المان لوله مدل کردند و یک فرایند مرکب از روش مشخصه MOC و اجزای محدود FEM ارائه نمودند. آنها در این مطالعه معادلات

<sup>1</sup> Laavooij

<sup>2</sup> Tijsseling

هیدرولیکی را با روش MOC و معادلات لرزه‌ای سازه را با روش FEM تحلیل نمودند [Laavooij & Tijsseling 1990] برگانت<sup>1</sup> و تایلینگ در ۲۰۰۱ مقاله‌ای با استفاده از روش مشخصه MOC برای حل معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای، تداخل سیال و سازه را به صورت کوپله در نظر گرفتند و پارامترهای موثر در میرایی موج ضربه قوچ را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مقاله اثرات اصطکاک غیرماندگار، کاویتاسیون و تداخل سیال و سازه‌ی لوله را بررسی و تأثیر هر پارامتر را بر کل سیستم با حل چند مثال مورد ارزیابی قرار دادند. این روش به دلیل اینکه در پاره‌ای از مسائل، نیاز به درون‌یابی عددی دارد، دارای خطا است [Bergant & Tijsseling 2001].

در سال ۲۰۰۳، تایلینگ در مقاله‌ای دیگر با ارائه حل دقیق برای سیستم چهار معادله‌ای ارتعاش محوری لوله سیال، روشی جهت دقت بخشیدن به حل فوق‌الذکر ارائه کرده است [Tijsseling 2003]. همزمان با کار تایلینگ، مقاله مهم دیگری نیز توسط لی و همکاران ارائه شد که تنها در روش حل معادلات تفکیک یافته با مقاله تایلینگ تفاوت دارد. به این ترتیب که در مقاله آنها به جای استفاده از روش خطوط مشخصه از روشی بر پایه حل دالامبر در معادلات موج استفاده شد [Li et al. 2003]. لیانگ و همکاران نیز در تحقیق مشابهی با استفاده از روش ماتریس انتقال، حل تحلیلی برای معادلات تداخلی سیال-سازه در لوله ارائه دادند و نتیجه گرفتند که در مورد مطالعاتی آنها، اثر تداخلی اتصال نسبت به اثر تداخلی پواسون بسیار مهم‌تر است [Yang et al. 2004]. تایلینگ و واردی در سال ۲۰۰۸، مطالعه جامعی را انجام دادند که در آن اطلاعات مفیدی در زمینه فرکانس اصلی ضربه قوچ، فرکانس اصلی امواج تنش و اهمیت نوع تکیه‌گاه‌ها در رفتار دینامیکی سیستم‌های لوله می‌باشد [Tijsseling & Vardy 2008]. احمدی و کرامت با ارائه مقاله‌ای در سال ۲۰۱۰، به بررسی اثرات انواع مختلف کوپله اتصال در پدیده ضربه قوچ پرداختند. آنها در این مقاله، روابط شرایط مرزی مورد نیاز جهت مدلسازی کوپله اتصال در حالات مختلف، مانند پمپ‌ها، شاخه‌ها و شیرهایی که امکان جابه‌جایی داشتند را برای حل معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای با استفاده از روش MOC-FEM ارائه

---

<sup>1</sup> Bergant

نمودند [Ahmadi & Keramat 2010]. فراس در ۲۰۱۵ اثرات اندر کنش سیال-سازه را در یک جریان گذرا در لوله های توریک با در نظر گرفتن امواج تنش محوری مورد بررسی قرار داد. در مطالعه او سه کوپلینگ اصطکاک، پواسون و تقاطع روی سیستم اعمال گردید و تنش برشی ایجاد شده بین سیال و دیواره لوله، حرکت محوری لوله ایجاد شده توسط تغییر شکل شعاعی و همچنین ارتعاش لوله در اثر عدم تعادل نیروها در اتصالات و مرزها بررسی گردید. وی برای توصیف رفتار کوپلینگ سازه ای دو مدل مفهومی ارائه داد: در مدل اول از سیم پیچ به عنوان یک لوله صاف با شیر متحرک استفاده شد و در مدل دوم فرض گردید که تغییر شکل محوری در هر حلقه سیم پیچ مستقل از دیگری است. مدل اول، مدل ساده ای برای تعمیم و مدل دوم، به عنوان مدل دقیق تر ارزیابی گردید [Ferras 2015].

استامیر در ۲۰۱۸ در مقاله ای به مدلسازی ضربه قوچ و اثرات اندر کنش ناشی از آن با تکیه گاه های ویسکوالاستیکی پرداخت. او یک مدل ۴ معادله ای برای FSI ارائه داد. مدلسازی عددی او ابتدا برای یک خط لوله انجام و با نتایج آزمایشگاهی مورد راستی آزمایی قرار گرفت که همپوشانی مطلوبی حاصل گردید و سپس مدلسازی برای یک خط لوله متصل به کف با تکیه گاه های ویسکوالاستیک انجام گردید و مشخص شد که تاثیر ویسکوالاستیک تکیه گاهها به دلیل جذب انرژی، می تواند دامنه نوسانات موج فشاری ناشی از ضربه قوچ را تا حد زیادی کاهش دهد [Sławomir 2018].

سوابق مطالعاتی اندر کنش سیال-سازه حاکی از این است که تاکنون ارتعاش لوله ناشی از کوپلینگ های مختلف طی رخداد پدیده ضربه قوچ در شرایطی که به جای آب، یک سیال ویسکوالاستیک در لوله در جریان است، مورد بررسی قرار نگرفته است. برای نخستین بار در رساله حاضر، در فصل پنجم به مبحث اثر تداخلی سیال ویسکوالاستیک-سازه پرداخته می شود و معادلات سازه ای و هیدرولیکی به همراه شرایط مرزی در کوپله های اتصال و پواسون و همچنین کوپله همزمان اتصال و پواسون معرفی و سپس نتایج بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.





# فصل سوم

## معادلات حاکم

- معادلات کلی حاکم بر ضربه قوچ
- خانواده مدل‌های اولدروید
- معادلات اصلی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک

این فصل که به معادلات حاکم بر ضربه قوچ در لوله حاوی سیال ویسکوالاستیک اختصاص داده شده است، به سه 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.

### ۳-۱- معادلات کلی حاکم بر ضربه قوچ

برای استحصال روابط حاکم بر جریان میرا به‌گونه‌ای 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.

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

که  $\rho$  نمایانگر جرم مخصوص ماده و  $\nabla$  حجم ماده می‌باشد. فرم نمادین معادله پیوستگی به صورت زیر تعریف می‌شود [Bird et al. 2002]:

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

که در رابطه فوق،  $\mathbf{v}$  بیانگر بردار سرعت است. اپراتور  $\nabla \cdot \rho \mathbf{v}$  در سیستم مختصات استوانه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود [Bird et al. 2002]:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) \quad (3-3)$$

با جایگزینی رابطه (3-3) در رابطه (2-3) و تعمیم آن، معادله پیوستگی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (4-3)$$

در این رابطه،  $v$  نمایانگر سرعت،  $t$  متغیر زمان و  $r, \theta, Z$  مولفه‌های محورهای مختصات در دستگاه مختصات استوانه‌ای هستند [Bird et al. 2002]. 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (5-3)$$

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

### ۳-۱-۱-۱- کاربرد معادله حالت<sup>۱</sup> در معادله پیوستگی

از آنجا که محاسبات در شبکه‌ی لوله‌ها غالباً بر حسب مقادیر فشار یا ارتفاع 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].

<sup>1</sup>State Equation

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial p_f} = \frac{\rho_f}{E_f} \quad (۶-۳)$$

اندیس  $f$  نمایانگر سیال می‌باشد که معمولاً در معادلات کلی نوشته نمی‌شود اما در تعاریف جزئی پارامترها به جهت تمایز بین مشخصات سیالی و سازه‌ای بهتر است لحاظ گردد. چنانچه شرایط هم-دمایی برقرار باشد، چگالی و مدول حجمی در سمت راست معادله را می‌توان با یک مقدار ثابت تخمین زد. در نتیجه بین فشار و چگالی رابطه‌ی خطی برقرار خواهد شد. البته این فرض، زمانی صادق خواهد بود که مقدار مدول حجمی بسیار بزرگتر از فشار سیال باشد ( $p \ll E_f$ ) که در زمینه‌های مورد بحث تحقیق حاضر، این فرض صادق است.

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \xrightarrow{\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{\rho}{E}} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho}{E} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \\ \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \xrightarrow{\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{\rho}{E}} \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{\rho}{E} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (۷-۳)$$

با انجام عملیات جبری، معادله پیوستگی در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{v_r}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} + v_z \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (۸-۳)$$

در رابطه فوق، می‌توان از عبارت‌های همرفتی غیرخطی به علت کوچکی صرفنظر نمود [Wahba 2013].

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (۹-۳)$$

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

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \rightarrow \frac{1}{c^2} = \frac{\rho}{E} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن،  $\rho$  و  $E$  جرم مخصوص و مدول حجمی سیال هستند و  $c$  معادل سرعت صوت در سیال بی‌کرانه است که فرمول کامل آن در بخش بعد، معرفی می‌شود. با جایگزین کردن سرعت صوت در رابطه (۹-۳)، شکل کلی معادله پیوستگی استخراج می‌شود:

$$\frac{1}{\rho c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (11-3)$$

با جایگزین کردن رابطه  $p = \rho gh$  معادله پیوستگی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (12-3)$$

چنانچه بررسی اثرات اندرکنش سیال سازه مدنظر باشد، می‌بایست مولفه‌های سرعت شعاعی بررسی شوند، اما در این بخش، به دلیل اینکه هدف اولیه، استحصال معادله پیوستگی حاکم بر ضربه قوچ است و نه بررسی اثرات اندرکنش، (فصل پنجم به این مبحث اختصاص داده می‌شود)، می‌توان از سرعت شعاعی صرفنظر نمود، بنابراین معادله کلی پیوستگی در مدلسازی ضربه قوچ، به صورت زیر ساده سازی می‌شود:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (13-3)$$

که در رابطه فوق،  $h$  ارتفاع 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 می‌باشد که در بخش ذیل، معرفی می‌گردد.

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

رابطه سرعت موج که در معادله پیوستگی استفاده می‌شود، به صورت کامل تر که در برگیرنده اثرات

تراکم‌پذیری سیال و انعطاف‌پذیری جداره لوله است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{c^2} = \frac{d\rho_f}{dp} + \frac{\rho_f}{A} \frac{dA}{dp} \quad (14-3)$$

عبارت اول در سمت راست رابطه، نشان دهنده تاثیر پذیری سرعت موج از تراکم پذیری سیال و عبارت دوم، اثر نرمی جداره لوله می‌باشد. با حذف هر کدام از این دو عبارت می‌توان 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].

$$c^2 = \frac{\frac{E_f}{\rho_f}}{1 + k \frac{E_f D}{e E_p}} \quad (15-3)$$

در رابطه فوق که در فصل پنجم، به طور کامل، اثبات می‌شود،  $E_f$  مدول حجمی سیال،  $\rho_f$  جرم مخصوص سیال،  $E_p$  مدول یانگ مصالح لوله،  $\ell$  ضخامت لوله و  $D$  قطر لوله می‌باشد.  $k$  ثابتی است که به صورت تابعی از نسبت پواسون مصالح لوله  $\nu_p$  تعریف می‌شود [Wahba 2013].

جدول ۳-۱- تغییرات ثابت  $k$  با نسبت پواسون مصالح لوله [Wahba 2013]

$1 - \frac{\nu_p}{2}$	لوله فقط در انتهای بالادست مقید شود. <sup>۱</sup>
$k$	لوله از حرکت محوری باز داشته شود. <sup>۲</sup>
1	لوله با اتصالات انبساطی <sup>۳</sup>

۳-۱-۲ معادله مومنتوم

فرم نمادین معادلات دیفرانسیل حرکت<sup>۴</sup> برای یک ذره که به معادله مومنتوم موسوم است، به صورت زیر تعریف می‌شود. فرض اساسی جهت به دست آوردن این معادلات، استفاده از قانون دوم نیوتن<sup>۵</sup> می‌باشد [Bird et al. 2002].

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} + \nabla p + [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] - \rho \mathbf{g} = 0 \quad (16-3)$$

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]:

<sup>1</sup> Pipe restrained at upstream end only

<sup>2</sup> Pipe restrained from axial movement

<sup>3</sup> Pipe with expansion joints

<sup>4</sup> Differential equations of motion

<sup>5</sup> Newton's law

$$\begin{cases} \left[ \frac{D\mathbf{v}}{Dt} \right]_z = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ [\nabla p]_z = \frac{\partial p}{\partial z} \\ [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}]_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (17-3)$$

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

$$\rho \left[ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial p}{\partial z} + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} \right] - \rho g_z = 0 \quad (18-3)$$

با صرفنظر از عبارتهای همرفتی سرعت به دلیل کوچکی [Wahba 2013] و اعمال فرض تقارن محوری

در لوله که منجر به حذف مقادیر زاویه‌ای و تغییرات آن می‌شود، رابطه به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} \right] - \rho g \sin \theta = 0 \quad (19-3)$$

که در آن،  $\theta$  زاویه بین محور لوله و یک صفحه افقی،  $\tau_{rz}$  میزان تنش وارد بر صفحه  $r$  در جهت  $z$  و

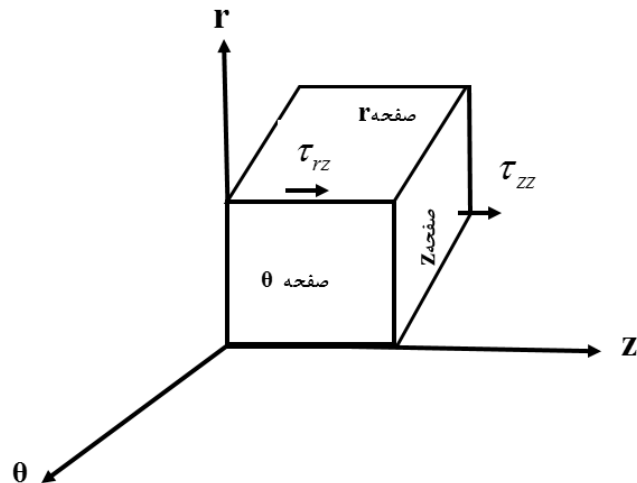
$\tau_{zz}$  میزان تنش وارد بر صفحه  $z$  در جهت  $z$  می‌باشد. یادآوری می‌شود که در هیدرودینامیک، نام هر

صفحه از روی نام محوری که به طور متعامد با آن، قرار گرفته انتخاب می‌شود. بنابراین تعریف، صفحه

$r$ ، صفحه‌ای است که محور  $r$  عمود بر آن و صفحه  $z$  صفحه‌ای است که محور  $z$  عمود بر آن واقع شده

باشد که در شکل ۱-۳، 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  $\tau_{rz}$  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  $\tau_{zz}$  صرف نظر می‌شود [Wahba 2013] که از دقت مناسبی نیز برخوردار است. بنابراین، معادله مومنوم محوری کاربردی در اینگونه مسائل، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} - \rho g \sin \theta = 0 \quad (20-3)$$

در گام آخر، با در نظر گرفتن لوله به صورت افقی و همچنین جایگزینی ارتفاع فشار از معادله رابطه مومنوم محوریبه دست آورده می‌شود. بنابراین، معادلات کلی پیوستگی و مومنوم حاکم بر ضربه قوچ را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (21-3)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} = 0 \quad (22-3)$$



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:

$$\tau_{rz} = \tau_0 = \gamma R S_0 \quad (23-3)$$

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<sup>۱</sup> خوانده می‌شود و مقدار معادل آن از رابطه داری-ویسباخ به صورت معادله زیر به دست آورده می‌شود:

$$s_0 = s_f = \frac{h_f}{l} = \frac{f v_{rel} |v_{rel}|}{2gD} \quad (24-3)$$

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

$$v_{rel} = v_z - \dot{u}_z \quad (25-3)$$

که در آن  $v_z$  سرعت مطلق سیال و  $\dot{u}_z$  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:

$$\tau_{rz} = \tau_0 = \gamma \frac{D}{4} \frac{f v_z |v_z|}{2gD} = \rho \frac{f v_z |v_z|}{8} \quad (26-3)$$

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:

<sup>1</sup> Quasi-Steady friction model

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

(۲۷-۳)

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{fv_z |v_z|}{2D} = 0$$

• در صورتی که از اصطکاک در طول لوله صرفنظر شود، عبارت تنش در معادله مومنوم 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 عبارت تنش در معادله مومنوم 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 برگزیده روابط بین تانسور تنش و نرخ برش هر سیال است، در تکمیل معادله مومنوم، 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<sup>۱</sup>

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 به دست 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، یعنی معادلات متشکله‌ای که در زمینه مدل سازی جریان سیالات ویسکوالاستیک کاربرد دارند پرداخته می‌شود.

<sup>1</sup> Oldroyd

در میان مدل‌های اولدروید، دو مدل اولدروید-ای و اولدروید-بی از همه معروفتر هستند. اولدروید، این دو مدل را با الهام از مدل خطی جفریز که یک مدل ویسکوالاستیک خطی است و با اعمال فرضیات و تقریب‌هایی در فانکشنال ویسکوالاستیک به دست آورد. مدل جفریز، مدل ساده و نسبتاً مناسبی برای بررسی رفتار یک ماده ویسکوالاستیک به‌شمار می‌رود چون که در آن، یک زمان آسودگی از تنش و یک زمان رهایی از تغییر شکل لحاظ شده است.

هرچند مدل‌های اولدروید-ای و اولدروید-بی به‌خوبی اصول مکانیک محیط‌های پیوسته را ارضا می‌کنند اما در زمینه تعیین اختلاف تنش نرمال دوم دارای ضعف‌هایی هستند.

همانطور که در فصل دوم ذکر شد، یکی از مهمترین تفاوت‌های سیالات ویسکوالاستیک با سایر سیالات، وجود اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم در این مواد است. به‌عنوان نمونه در جریان کوئت یک سیال معمولی، تنش‌های نرمال همواره ثابت و برابر فشار استاتیکی است اما در جریان کوئت یک سیال ویسکوالاستیک اختلافی بین تنش‌های نرمال مشاهده می‌شود که سبب بروز رفتارهای متفاوت و بعضاً متضاد سیالات ویسکوالاستیک نسبت به سایر سیالات می‌شود.

در معادله متشکله مدل اولدروید-ای، ثابت تنش نرمال دوم، قرینه ثابت تنش نرمال اول لحاظ می‌شود، درحالی‌که در مدل اولدروید-بی ثابت تنش نرمال اول وجود داشته اما ثابت تنش نرمال دوم در نظر گرفته نمی‌شود. از آنجا که در اکثر سیالات ویسکوالاستیک، ثابت تنش نرمال دوم دارای مقداری نسبتاً کوچک و حداکثر ۲۰٪ اختلاف تنش نرمال اول است، بنابراین به‌نظر می‌رسد که پاسخ‌های مدل اولدروید-بی به واقعیت نزدیک‌تر است. به‌همین دلیل استفاده از مدل اولدروید-ای چندان رایج نبوده، حال آنکه تحقیقات عددی و تحلیلی فراوانی بر اساس مدل اولدروید-بی انجام شده است. مدل اولدروید-بی به مدل همرفتی جفریز نیز معروف است [Bird et al. 1987].

در معادلات ساختاری مدل اولدروید-بی، سیال درون لوله به‌صورت 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.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_s \quad (28-3)$$

که  $\tau$  تنش کل محلول،  $\tau_s$  تنش حلال و  $\tau_p$  تنش ماده حل شونده می باشد. نکته قابل توجه این است که در مدل اولدروید-بی بخش حلال، به صورت یک سیال نیوتنی و بخش حل شونده از نوع یک سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیک (ماده پلیمری UCM<sup>1</sup>) لحاظ می گردد و روابط تنش در هر بخش محلول متفاوت است [Bird et al. 1987]. بنابراین هر بخش، به صورت جدا بررسی و پارامترهای آن معرفی می شود.

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

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

$$\boldsymbol{\tau}_s = \eta_s \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (29-3)$$

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

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}} = (\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T \quad (30-3)$$

در روابط فوق،  $\nabla \mathbf{v}$  تانسور گراد سرعت و  $T$  نیز نماد ترانپاده تانسور بردار سرعت می باشد که در

سیستم مختصات استوانه‌ای به صورت زیر تعریف می شوند [Bird et al. 1987]:

$$\nabla \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_r}{\partial r} & \frac{\partial v_\theta}{\partial r} & \frac{\partial v_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r}{r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \\ \frac{\partial v_r}{\partial z} & \frac{\partial v_\theta}{\partial z} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (31-3 \text{ الف})$$

$$(\nabla \mathbf{v})^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_r}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r} & \frac{\partial v_r}{\partial z} \\ \frac{\partial v_\theta}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r}{r} & \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial r} & \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (31-3 \text{ ب})$$

<sup>1</sup> Upper Convected Maxwell Model (UCM Model)

بنابراین، با جایگزینی مقادیر حاصل از عملیات جمع تانسوری، در رابطه (۳-۲۹) تنش برشی بخش حلال، قابل محاسبه است.

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:

$$\boldsymbol{\tau}_p + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p = \eta_p \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (۳۲-۳)$$

در رابطه فوق،  $\lambda$  ثابت زمان رهایی از تنش،  $\eta_p$  ویسکوزیته حل شونده،  $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$  نرخ برش سیال و  $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p$  مشتق زمانی همرفتی پاد همبسته تانسور تنش<sup>۱</sup> می‌باشد که به صورت  $\tau_{p(1)}$  نیز نشان داده می‌شود و به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p = \boldsymbol{\tau}_{p(1)} = \frac{D\boldsymbol{\tau}_p}{Dt} - \left( (\nabla\mathbf{v})^T \cdot \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_p \cdot (\nabla\mathbf{v}) \right). \quad (۳۳-۳)$$

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

$$\frac{D\boldsymbol{\tau}_p}{Dt} = \frac{\partial\boldsymbol{\tau}_p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau}_p \quad (۳۴-۳)$$

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]:

$$\mathbf{v} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau}_p = \begin{bmatrix} (v \cdot \nabla) \tau_{prr} - \frac{v_\theta}{r} (\tau_{p\theta r} + \tau_{p\theta r}) & (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta r} + \frac{v_\theta}{r} (\tau_{prr} - \tau_{p\theta\theta}) & (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta z} - \frac{v_\theta}{r} \tau_{p\theta z} \\ (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta r} + \frac{v_\theta}{r} (\tau_{prr} - \tau_{p\theta\theta}) & (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta\theta} + \frac{v_\theta}{r} (\tau_{p\theta r} + \tau_{p\theta r}) & (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta z} + \frac{v_\theta}{r} \tau_{p\theta z} \\ (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta z} - \frac{v_\theta}{r} \tau_{p\theta z} & (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta z} + \frac{v_\theta}{r} \tau_{p\theta z} & (v \cdot \nabla) \tau_{p\theta z} \end{bmatrix} \quad (۳۵-۳)$$

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

$$(v \cdot \nabla) = v_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (۳۶-۳)$$

<sup>1</sup> Contravariant convected time derivative of the stress tensor

از طرفی در فرمول محاسبه  $\tau_p$  علاوه بر تعاریف فوق، ضرب تانسورهای  $\tau_p$  و  $(\nabla v)^T$  وجود دارد که باید بر اساس قوانین ضرب تانسوری محاسبه گردد [Bird et al. 1987]. در حالت کلی، اگر  $A$  و  $B$  دو ماتریس  $(3 \times 3)$  باشند، حاصل ضرب نقطه‌ای تانسوری آنها به صورت زیر محاسبه می‌شود [Morrison 2001]:

$$\begin{aligned}
 A \cdot B &= A_{ip} B_{pk} \hat{e}_i \hat{e}_k \\
 A \cdot B &= \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 (A_{i1} B_{1k} + A_{i2} B_{2k} + A_{i3} B_{3k}) \hat{e}_i \hat{e}_k \\
 A &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \\
 A \cdot B &= \sum_{i=1}^3 (A_{i1} B_{11} + A_{i2} B_{21} + A_{i3} B_{31}) \hat{e}_i \hat{e}_1 + \sum_{i=1}^3 (A_{i1} B_{12} + A_{i2} B_{22} + A_{i3} B_{32}) \hat{e}_i \hat{e}_2 \\
 &\quad + \sum_{i=1}^3 (A_{i1} B_{13} + A_{i2} B_{23} + A_{i3} B_{33}) \hat{e}_i \hat{e}_3
 \end{aligned} \tag{3-37}$$

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

### ۳-۲-۳- معادله ساختاری دو ثابت مدول اولدرویید-بی

در بخش قبل، جهت محاسبه تنش محلول، ابتدا تنش در هر یک از بخشهای حلال نیوتنی و حل شونده پلیمری به صورت مجزا محاسبه گردید و ضمن معرفی پارامترها و انجام عملیات جبری ماتریسی روی روابط تنش و سرعت، از حاصل جمع تنشهای به دست آمده، تنش محلول ویسکوالاستیک با مدل یک ثابت اولدرویید-بی محاسبه گردید. حال، اگر تنش محلول، از ابتدا به صورت ترکیب حلال نیوتنی و حل شونده پلیمری در روابط، قرار داده شود و نه در انتها، به مدل دو

ثابته اولدروید-بی منتهی می‌شود که در برخی از مقالات، این شکل معادله مشاهده می‌شود (پیوست ۱). بدیهی است، نتایج حاصل از هر دو روش، کاملاً یکسان است.

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}} = \eta \left( \dot{\boldsymbol{\gamma}} + \omega \overset{\nabla}{\dot{\boldsymbol{\gamma}}} \right) \quad (3-38)$$

در رابطه فوق،  $\boldsymbol{\tau}$  نمایانگر تنش محلول،  $\lambda$  ثابت زمان رهایی از تنش،  $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$  نرخ برش سیال و اپراتور  $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}$  مشتق زمانی همرفتی پاد همبسته تانسور مورد نظر می‌باشد. پارامتر جدید در معادله فوق،  $\omega$  است که به ثابت زمانی تاخیر<sup>۱</sup> در سیالات ویسکوالاستیک موسوم است و به صورت زیر تعریف می‌شود [Bird et al. 1987]:

$$\omega = \frac{\eta_s}{\eta_s + \eta_p} \lambda = (1 - \beta) \lambda \quad (3-39)$$

$$\beta = \eta_p / \eta \quad (3-40)$$

مدل اولدروید-بی در حالت‌های خاصی به مدل‌های دیگری ساده می‌شود:

- اگر  $\omega = 0$  در این صورت مدل فوق همرفتی ماکسول (*UCM*) به دست می‌آید:

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}} = \eta \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (3-41)$$

- اگر  $\lambda = 0$  مدل اولدروید-بی به مدل سیال مرتبه دو تبدیل می‌گردد:

$$\boldsymbol{\tau} = \eta \left( \dot{\boldsymbol{\gamma}} + \omega \overset{\nabla}{\dot{\boldsymbol{\gamma}}} \right) \quad (3-42)$$

مدل سیال مرتبه دو یکی از مدل‌هایی است که جهت تبیین رفتار سیالات ویسکوالاستیک استفاده می‌شود. در این مدل که از ساده ترین مدل‌های رئولوژی این سیالات محسوب می‌شود، تنش‌های نرمال اولیه و ثانویه بر اساس بسط تیلور در معادلات، منظور می‌شوند. مدل سیال مرتبه دو با وجود سادگی روابط جبری و ارائه یک رابطه صریح، قادر به تبیین برخی ویژگی‌های سیال ویسکوالاستیک نظیر اثر باریک شونده نمی‌باشد. به همین دلیل معمولاً در مدل‌سازیهای رفتار

<sup>1</sup> Retardation time

سیالات ویسکوالاستیک در شرایط مشابه از مدل‌های اولدرویید-بی که کامل تر بوده و در روابط آن تمام ویژگی‌های سیال ویسکوالاستیک لحاظ می‌گردد، استفاده می‌شود.

• اگر  $\lambda = \omega$  این مدل به سیال نیوتنی با ویسکوزیته  $\eta$  ساده می‌شود

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (43-3)$$

### 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 مومنوموم بخش ۳-۱ در  $2\pi r$  ضرب شده و سپس از ۰ تا  $R$  انتگرالگیری و نهایتاً نتیجه بر  $\pi R^2$  تقسیم می‌شود. با این کار، تمام جملات موجود در معادلات (۳-۲۱) و (۳-۲۲) از حالت دو بعدی  $(t, z, r)$  به یک بعدی برحسب  $(t, z)$  تبدیل می‌شوند.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (44-3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{2}{\rho R} \tau_{rz}|_{r=R} = 0 \quad (45-3)$$

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

$$V = \frac{1}{A} \int v_z dA \quad (الف-46-3)$$

$$H = \frac{1}{A} \int h dA \quad (ب-46-3)$$

که در آن،  $v_z$  سرعت محوری و  $H$  ارتفاع فشار جریان می‌باشد. با در نظر گرفتن روابط اولدرویید-بی و عملیات جبری تانسوری و نهایتاً صرفنظر از عبارتهای همرفتی، عبارت تنش در معادله مومنوموم محاسبه می‌شود:

$$\tau_{rz}|_{r=R} = \tau_{sz}|_{r=R} + \tau_{prz}|_{r=R} \quad (47-3)$$

$$\tau_{sz}|_{r=R} = \eta_s (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)_{rz} = \eta_s \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \Big|_{r=R} \quad (48-3)$$



$$\tau_{prz}|_{r=R} + \lambda \tau_{prz}^{\nabla}|_{r=R} = \eta_p \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \Big|_{r=R} \quad (49-3)$$

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

$$v_z = v_{z\max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (50-3)$$

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، به‌سادگی قابل اثبات است. بنابراین، معادلات اساسی حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک را می‌توان به صورت زیر جمع بندی نمود:

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} (\tau_{srz}|_{r=R} + \tau_{prz}|_{r=R}) = 0 \quad (52-3)$$

$$\tau_{srz}|_{r=R} = -\eta_s \frac{4V}{R} \quad (53-3)$$

$$\tau_{prz}|_{r=R} + \lambda \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial t} = -\eta_p \frac{4V}{R} \quad (54-3)$$

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

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (55-3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{8\eta_s V}{\rho R^2} = 0 \quad (56-3)$$

که می‌توان با جایگزینی رابطه داری-ویسباخ در عبارت تنش ناشی از اصطکاک در جریان آرام،

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

به دست آورد.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (57-3)$$

که در آن،  $f$  ضریب داری-ویسباخ،  $V$  سرعت نسبی سیال درون لوله نسبت به دیوار داخلی لوله می‌باشد. در حالت نیوتنی، تنش برشی ناشی از اصطکاک جریان، به دلیل فرض برقراری جریان پایدار، به حالت اصطکاک شبه دائمی<sup>1</sup> خوانده می‌شود.

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 می‌شود، معادلات اساسی چگونه بی‌بعد می‌شوند، تاثیر هر یک از اعداد بی‌بعد بر ارتفاع موج فشاری چگونه است و نهایتاً این نکته که به کارگیری سیال ویسکوالاستیک چه اثری بر تنشهای ناشی از رخداد ضربه قوچ دارد، پرسشهایی است که در فصل بعد، به آنها پاسخ داده می‌شود.

---

<sup>1</sup> Quasi-Steady friction model

## فصل چهارم

### مدلسازی عددی ضربه قوچ سیال

### ویسکوالاستیک (چکش سیال ویسکوالاستیک)

- روش عددی LXF
- بی بعد سازی معادلات
- مدلسازی عددی
- بررسی تاثیر اعداد بی بعد بر پارامترهای ضربه قوچ

در این فصل، محاسبات و تحلیل نتایج ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک به سه بخش، تقسیم می‌شود. در بخش نخست، روش عددی به کار برده شده جهت مدلسازی مساله تشریح می‌گردد، در بخش دوم، مراحل بی‌بعد سازی معادلات، انجام شده و اعداد بی‌بعد موثر بر این نوع جریان میرا معرفی می‌گردد و سپس در بخش سوم، ضمن تحلیل نتایج به دست آمده، تاثیر هر یک از این اعداد، بر تاریخچه فشاری و نیز تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ، بررسی می‌شود.

#### ۴-۱- روش عددی تفاضل محدود

تقریب مشتق‌ها با استفاده از روش تفاضل محدود، یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای حل معادلات دیفرانسیل می‌باشد. تفاضل محدود یک بعدی در مکان، در سال ۱۷۶۸ با نام اولر<sup>۱</sup> و تعمیم دامنه به دو بعد، در سال ۱۹۰۸، با نام رانگ<sup>۲</sup> شناخته می‌شود. عصر روش‌های تفاضل محدود در کارهای عددی پیش از دهه ۱۹۵۰ آغاز شد و سپس، توسعه این روش‌ها با کمک مدلسازی کامپیوتری برای مسائل علمی با به‌کارگیری تکنولوژی ادامه یافت. نتایج تئوری به‌دست آمده در پنج دهه اخیر، دقت، پایداری و همگرایی روش‌های تفاضل محدود را برای معادلات مشتق جزئی تایید می‌کند [خلیقی ۱۳۹۴].

تفاضل محدود، یکی از روش‌های حل عددی معادله خطی یک‌بعدی و هذلولوی<sup>۳</sup> زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial f(u)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial f(u)}{\partial x} = A \frac{\partial u}{\partial x} \quad 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \quad (1-4)$$

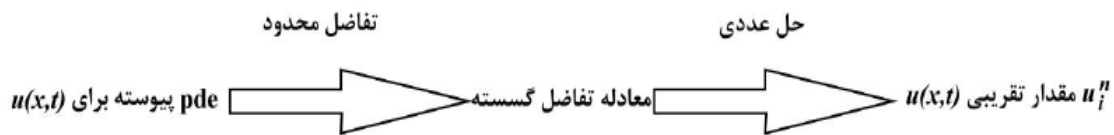
که  $A$  ماتریس ضرایب می‌باشد و مقداری ثابت دارد. شکل زیر، طرح کلی حل عددی به روش تفاضل

محدود را نشان می‌دهد [Recktenwald 2011].

<sup>1</sup> Euler

<sup>2</sup> Runge

<sup>3</sup> Hyperbolic



شکل ۴-۱- طرح کلی حل عددی به روش تفاضل محدود

همانطور که در شکل ۴-۱ مشخص است، در روش‌های عددی، معادله دیفرانسیل جزئی<sup>۱</sup> پیوسته با یک معادله تقریبی گسسته جایگزین می‌شود. منظور از معادله گسسته این است، که حل عددی تنها در نقاط محدودی از دامنه فیزیکی<sup>۲</sup> مشخص می‌باشد که تعداد این نقاط، توسط فرد استفاده کننده مشخص می‌شود و با افزایش تعداد نقاط، جزئیات<sup>۳</sup> و دقت<sup>۴</sup> حل عددی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، با توجه به روش اختلاف محدود انتخاب شده و با استفاده از معادلات جبری، مقادیر تابع در نقاطی که مقدار آن نامشخص است، محاسبه می‌گردد. از آنجا که بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را می‌توان توسط معادلات هذلولوی به خصوص قوانین بقای هذلولوی توصیف نمود، تلاشها، برای حل تقریبی این معادلات، منجر به معرفی روش‌های عددی جدید و دقیق‌تر نیز شده است. معادلات هذلولوی را در حالت کلی می‌توان به سه شکل زیر تقسیم بندی نمود:

$$\begin{cases} u_t = f(x, t, u, u_x) \\ u_t = f(x, t, u)_x + s(x, t, u) \\ u_t = f(u)_x \end{cases} \quad (۲-۴)$$

که  $u$  بیانگر معادله اصلی است که معمولاً تابعی از  $x, t$  می‌باشد و به صورتهای مختلف تعریف می‌شود، اندیسها در معادلات فوق، نمایانگر توابعی هستند که معادله اصلی نسبت به آنها مشتق گرفته می‌شود. به غیر از روشهای تفاضل محدود، تاکنون روشهای عددی مختلفی جهت مدلسازی جریانهای انتقالی در لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، جهت گسسته سازی معادلات حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک و بررسی اثرات اندرکنش سیال-سازه که در برگیرنده روابط مدل اولدریوید<sup>۴</sup> بی نیز می‌باشد، به یک روش عددی نیاز است که از دقت و هزینه محاسباتی

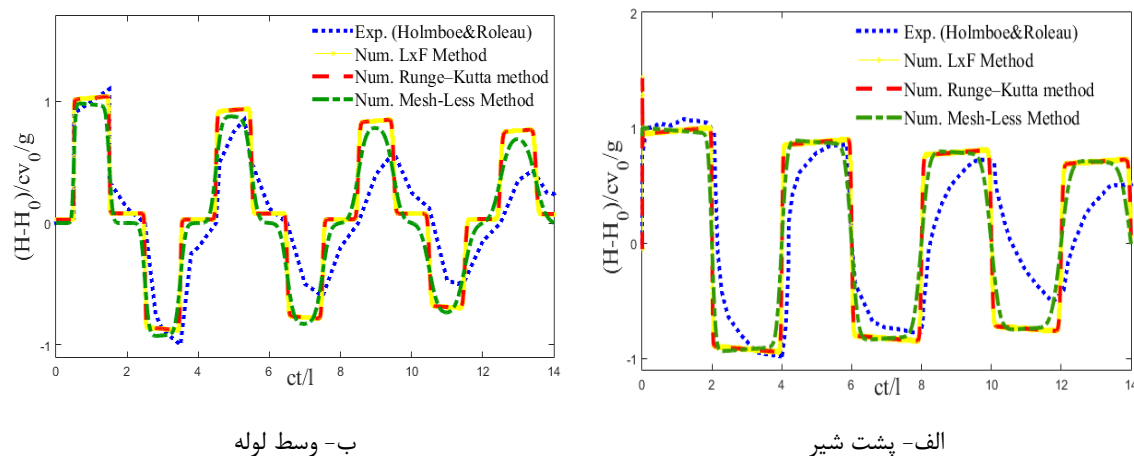
<sup>1</sup> Partial differential equation (PDE)

<sup>2</sup> Physical domain

<sup>3</sup> Resolution

<sup>4</sup> Accuracy

قابل قبولی برخوردار باشد. جهت حصول به یک روش عددی مناسب، در ادامه، نتایج آزمایش انجام شده توسط هولمبو و رولتو [Holmboe & Rouleau 1967] با سه روش عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. روشهای عددی مورد بحث، روش عددی تفاضل محدود<sup>۱</sup> LxF، روش عددی رانج کوتای<sup>۲</sup> مرتبه چهارم در گسسته سازی زمانی و نیز روش عددی بدون شبکه<sup>۳</sup> می‌باشند که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- نتایج حاصل از تاریخچه فشاری به روشهای مختلف

با توجه به شکل فوق، در هر سه روش عددی مورد بحث، نتایج تاریخچه فشاری در نقاط پشت شیر و وسط لوله بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی است که این مساله به مدلسازی یک بعدی مساله و در نظر گرفتن ویسکوزیته ثابت سیال، در مدلسازی ارتباط داده می‌شود [Wahba 2006]. روش عددی بدون شبکه حداقل مربعات گسسته همپوش از معادله اولر مرتبه اول استخراج شده است که کاربرد اصلی این معادله در مسائل عددی انتشار در شرایط گرادیان بالا می‌باشد. در حالی که پدیده ضربه قوچ، با تغییرات سریع فشار ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر، همراه است و روش عددی بدون شبکه قاعداً روش مناسبی برای مدلسازی این پدیده محسوب نمی‌شود [Liu 2002]. این مساله در شکل مربوط به نقطه وسط لوله که به تدریج، شکل منحنیها تیز می‌شود، قابل مشاهده است. از سویی مدلسازی یک بعدی انجام شده به روش عددی تفاضل محدود LxF و روش عددی رانج کوتا در مطالعه وهبا

<sup>1</sup> Lax- Friedrichs

<sup>2</sup> Runge-Kutta

<sup>3</sup> Mesh-Less

[Wahba 2006] نتایج مشابهی را در پشت شیر و وسط لوله نمایش می‌دهند. بررسیها نشان داد که از میان این دو روش، با توجه به حجم عملیات جبری موجود در زمینه مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک با به کار گیری روابط اولدروید-بی و نیز افزوده شدن معادلات سازه به کل معادلات سیال، در بحث اندر کنش سیال-سازه که به حل همزمان ۷ معادله می‌انجامد، روش عددی تفاضل محدود LXF روش مناسبتری می‌باشد. دقت مطلوب نتایج به دست آمده، عملیات جبری گسسته سازی نه چندان پیچیده، هزینه محاسباتی پایین، سرعت مناسب اجرا و فقدان جملات با درجه دو در معادلات اساسی را می‌توان از مهمترین دلایل انتخاب این روش برشمرد.

#### ۴-۱-۱- روش لاکس-فردریش (LXF)

نام‌گذاری این روش بر اساس نام دو دانشمند برجسته، پیتر لاکس<sup>۱</sup> و کورت فردریش<sup>۲</sup> صورت گرفته است و برای حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای براساس اختلاف محدود بنا شده است و فقط برای معادلات مرتبه اول قابل استفاده می‌باشد. لذا استفاده از این روش، محدود می‌باشد ولی قابلیت حل هر سه نوع معادلات دیفرانسیل هذلولوی را که در قسمت پیش معرفی شدند را داراست. این روش به‌عنوان راه حلی برای ناپایداری روش تقریب پیشرو زمان و تقریب مرکزی مکان<sup>۳</sup> (FTCS) مطرح شد. روش لاکس فردریش سنگ بنای اصلی بیشتر روش‌های مرکزی می‌باشد [Chikitkin & Rogov 2015] در این تحقیق، از روش دو گام زمانی لاکس-فردریش استفاده می‌شود که همگرایی بیشتر و حل دقیق‌تر معادلات را در پی دارد. در روش‌های چندگام زمانی، از معادلات تفاضل محدود با مراحل زمانی مختلف استفاده می‌شود [Hoffmann & Chiang 1989].

#### ۴-۱-۲- روش‌های چندگام زمانی

به‌طور کلی، روش تفاضل محدود، دامنه یا قلمرو فیزیکی حل را با یک مش یا شبکه جایگزین می‌کند که این شبکه به وسیله تعداد معینی سلول گسسته سازی شده است. در روش تفاضل محدود، مقادیر

<sup>1</sup> Peter Lax

<sup>2</sup> Kurt o. Friedrichs

<sup>3</sup> Forward in time, centered in space

تقریبی جواب مساله، در گره‌های مش جستجو می‌شود. در مسائل یک بعدی گسسته سازی در راستای بعد مکانی در محدوده  $[0, L]$  توسط  $M$  تعداد سلول یا خانه صورت می‌گیرد که به صورت زیر تعریف می‌شوند. ( $L$  نقطه مرز انتهایی شبکه می‌باشد):

$$\begin{aligned} 0 &= x_1 < x_2 < \dots < x_M = L \\ x_i &= (i-1)\Delta x, \quad i = 1, 2, \dots, M \\ \Delta x &= \frac{L}{M-1} \end{aligned} \quad (3-4)$$

در روش‌های چندگامی از شبکه جابه جا شده استفاده می‌شود. نقاط شبکه جابه جا شده را می‌توان به هر دو شکل زیر تعریف نمود:

$$\begin{aligned} x_{i+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2}(x_{i+1} + x_i) \\ x_{i+\frac{1}{2}} &= x_i + \frac{1}{2}\Delta x \quad i = 1, 2, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (4-4)$$

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

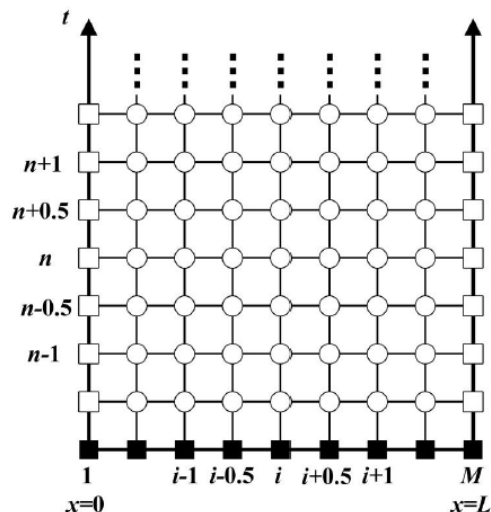
$$t^0 = 0, t^{n+1} = t^n + \Delta t \quad n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (5-4)$$

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

$$t^{n+\frac{1}{2}} = t^n + \frac{1}{2}\Delta t \quad (6-4)$$

دامنه حل در شکل (3-4) ترسیم شده است.





شکل ۳-۴- نمای شماتیک مش جابه جا شده [Khalighi et al. 2016]

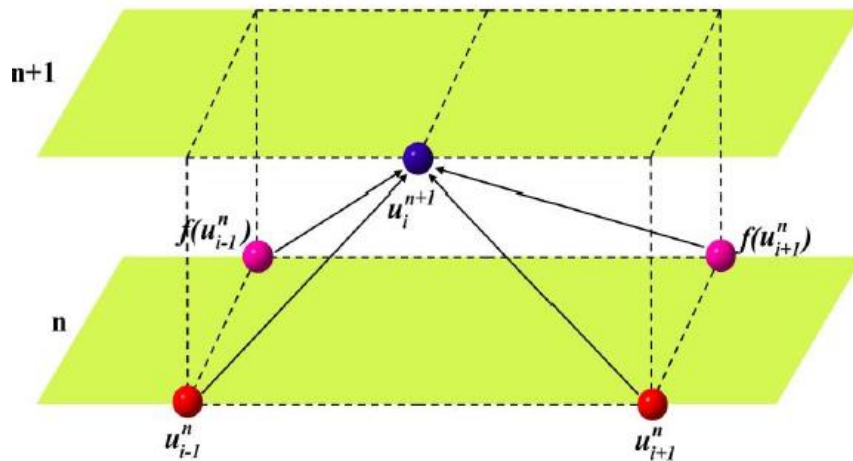
در شکل ۳-۴ محور افقی، طول لوله است که به  $M$  گره تقسیم شده و محور عمودی نیز زمان با گامهای زمانی معادل  $n$  می باشد. در شبکه های مش بندی اصلی، ابعاد هر سلول، در راستای زمان و مکانی به اندازه واحد تعریف می شود. اما در روش دو گام زمانی، همانطور که مشخص است، ابعاد سلولها به اندازه  $0.5$  واحد در راستای زمان و مکان تعریف می شود. بنابراین، با توجه به تعریف جدید گامهای زمانی و مکانی در این حالت، فرمول بندی روش نیز تا حدودی تغییر خواهد کرد.

#### ۳-۱-۴- فرمول بندی روش لاکس فردریش

اگر معادله ۱-۴ در نظر گرفته شود، نحوه گسسته سازی آن به شیوه لاکس فردریش اصلی به صورت زیر می باشد. این روش از تفاضل محدود مرکزی در بعد مکان استفاده می کند و معادله تفاضل محدود آن چنین است:

$$\frac{u_i^{n+1} - \frac{1}{2}(u_{i+1}^n + u_{i-1}^n)}{\Delta t} = \frac{f(u_{i+1}^n) - f(u_{i-1}^n)}{2\Delta x} \quad (۷-۴)$$

طرح شماتیک این روش در شکل (۴-۴) رسم شده است.



شکل ۴-۴- طرح شماتیک روش لاکس فردریش اصلی [Khalighi et al. 2016]

در شکل ۴-۴، برای محاسبه میزان متغیر در گام زمانی بعد که معادل  $u_i^{n+1}$  می‌باشد، کافیت در گام زمانی حاضر، مقادیر قبل و بعد این متغیر یعنی  $u_{i+1}^n$  و  $u_{i-1}^n$  به همراه توابع محاسباتی آنها که معادل  $f(u_{i+1}^n)$  و  $f(u_{i-1}^n)$  می‌باشد، موجود باشد تا بلافاصله مقدار  $u_i^{n+1}$  که میزان متغیر در گام زمانی بعد می‌باشد، محاسبه گردد. حال، اگر بازه زمانی و مکانی در مسیر رسیدن به گام زمانی بعد، به دو نیم بازه تقسیم شود، علیرغم اینکه محاسبات کمی پیچیده می‌شود و زمان عملیات نیز تا حدودی افزایش می‌یابد، اما نتایج دست آمده از همگرایی و دقت مناسبتری برخوردار می‌شود. به این منظور، معادله (۴-۱) به دو مرحله زمانی به صورت زیر تقسیم می‌شود:

### گام زمانی اول:

معادلات در گام زمانی اول، به صورت زیر گسسته سازی می‌شوند:

$$\frac{u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{1}{2}(u_{i+1}^n + u_i^n)}{\frac{\Delta t}{2}} = \frac{f(u_{i+1}^n) - f(u_i^n)}{2 \frac{\Delta x}{2}} \quad (۴-۸)$$

$$u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(u_{i+1}^n + u_i^n) + \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{f(u_{i+1}^n) - f(u_i^n)}{\Delta x} \right)$$

توجه شود که معادله (۴-۸) مقادیر تابع  $u$  را در گره های مکانی  $i=1,2,\dots,M-1$  و زمان  $n+\frac{1}{2}$  را

روی مش شطرنجی نتیجه می دهد.

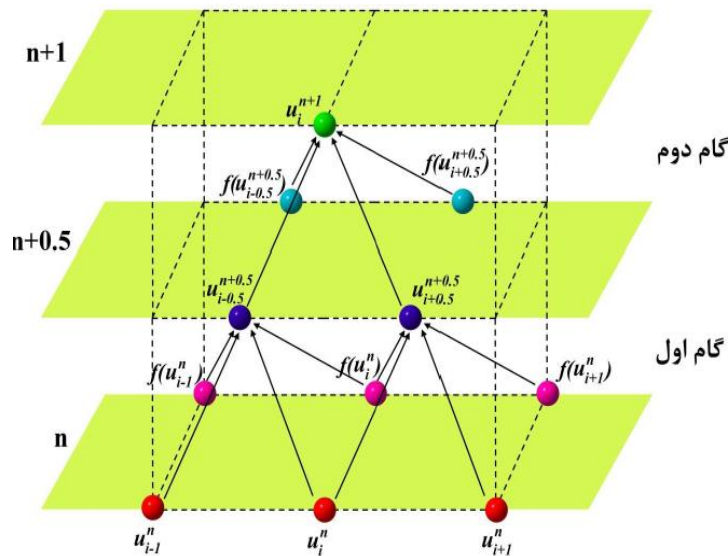
### گام زمانی دوم:

نحوه گسسته سازی معادلات در گام زمانی دوم به صورت زیر می باشد:

$$\frac{u_i^{n+1} - \frac{1}{2} \left( u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right)}{\frac{\Delta t}{2}} = \frac{f(u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}) - f(u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}})}{2 \frac{\Delta x}{2}} \quad (۴-۹)$$

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{2} \left( u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{f(u_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}) - f(u_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}})}{\Delta x} \right)$$

طرح شماتیک روش دو گام زمانی در شکل (۴-۵) رسم شده است.



شکل ۴-۵- طرح شماتیک روش دو گام زمانی لاکس فردریش [Khalighi et al. 2016]

با توجه به شکل (۴-۵) در گام زمانی دوم و با کمک معادله (۴-۹) مقادیر تابع  $u$  در گره های مکانی

$i=1,2,\dots,M-1$  و زمان  $n+1$  روی مش اصلی محاسبه می شود. در واقع، در روش دو گام زمانی

لاکس فردریش، گام زمانی اول روی مش شطرنجی است و با برداشتن گام زمانی دوم، مقدار تابع در

گام زمانی بعد روی مش اصلی حاصل می‌شود. شرط پایداری این روش به صورت بیان می‌شود

$$\frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad \text{که } c \text{ سرعت موج است.}$$

۴-۱-۴- انتخاب اندازه گام زمانی و محدودیت پایداری

به منظور پایداری حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی (معمولا معادلات هذلولوی) از شرط پایداری عدد کورانت استفاده می‌شود. این عدد همچنین به نام شرط کورانت-فردریش-لوی یا شرط CFL نیز شناخته می‌شود. تاریخچه شرط پایداری به سال ۱۹۲۸ و مقاله نوشته شده توسط سه دانشمند یادشده باز می‌گردد که نقش اساسی این عدد را در فرآیند گسسته سازی اثبات نمودند. در مسائل یک بعدی این عدد از رابطه حاصل می‌شود:

$$\Delta t = \frac{Cr_{Max} \Delta x}{\lambda_{Max}} \quad (۱۰-۴)$$

که  $\Delta x$  اندازه گام مکانی  $\Delta t$  اندازه گام زمانی و  $\lambda^n$  سرعت موج در گام زمانی  $n$  می‌باشد. انتخاب اندازه گام زمانی  $\Delta t$  در روش‌های عددی به کار رفته در این تحقیق، همانند سایر روش‌ها، وابسته به محدوده عدد کورانت می‌باشد. تحلیل پایداری ون نیومن<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که به ازای عدد کورانت در بازه  $0 \leq Cr_{Max} \leq 1$  جواب پایدار است که به شرط CFL موسوم است. به کمک این معیار، گام زمانی محاسبه می‌شود. معمولا به ازای کورانت ۰/۹ الی ۱، دقیق ترین جواب‌ها حاصل می‌شود. بنابراین در مدلسازی پدیده ضربه قوچ مورد بحث، عدد کورانت می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$Cr = \frac{c.\Delta t}{\Delta x} \quad (۱۱-۴)$$

در رابطه فوق،  $c$  سرعت موج فشاری ناشی از بسته شدن سریع شیر و  $\Delta x$  و  $\Delta t$  به ترتیب، اندازه گامهای مکانی و زمانی هستند.

<sup>1</sup> Von-Neumann stability analysis

#### ۲-۴- 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 می‌سازد. این تعمیم، چندین نتیجه را در بر دارد از جمله اینکه می‌توان پدیده‌ها را به طور کلی و بدون محدود شدن به حالت خاص آزمایش انجام شده تشریح نمود. به این ترتیب، می‌توان 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. نتایج حاصل را می‌توان به صورت فشرده و مفید به سایر پژوهشگران ارائه نمود تا استفاده از آنها ساده تر شود. ارائه اطلاعات منظم در این زمینه، موجب می‌شود که محققین قادر باشند جنبه‌های جدید و حوزه‌های نامعلوم یک پدیده را کشف نمایند. اگر ابزار لازم برای تحلیل‌های ابعادی موجود نباشند، پیشرفت علمی در مورد شناخت پدیده‌ها به تدریج از بین خواهد رفت. بسیاری از پارامترهای بدون بعد را می‌توان نسبت دو نیروی سیال دانست. مقدار نسبی این نسبتها نشان دهنده اهمیت نسبی یکی از نیروها نسبت به دیگری است. اگر در یک حالت خاص جریان، بعضی از نیروها خیلی بزرگتر از سایر نیروها باشند، غالباً می‌توان از اثر نیروهای کوچکتر صرف نظر نمود و پدیده را مورد بررسی قرار داد. در این صورت، نتایج، همانند هنگامی که دست می‌آید که تحلیل با در نظر گرفتن نیروهای اصلی انجام شده باشد. به این ترتیب می‌توان 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:

$$V^* = \frac{V}{v_0}, H^* = \frac{H}{cv_0/g}, z^* = \frac{z}{D}, t^* = \frac{t}{D/c}, \tau^* = \frac{\tau}{\rho cv_0} \quad (12-4)$$

$$De = \frac{\lambda}{D/v_0}, \beta = \frac{\eta_p}{\eta_p + \eta_s}, M = \frac{v_0}{c}, Re = \frac{\rho v_0 D}{\eta_p + \eta_s} \quad (13-4)$$

که  $v_0$  سرعت جریان در حالت دائمی،  $c$  سرعت صوت،  $D$  قطر لوله،  $H$  ارتفاع موج فشار جریان،  $\tau$  تنش برشی،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $\lambda$  زمان رهایی از تنش،  $\eta_p$  ویسکوزیته حل شونده،  $\eta_s$  ویسکوزیته حلال،  $De$  عدد دبورا،  $\beta$  عدد نسبت ویسکوزیته،  $M$  عدد ماخ و  $Re$  عدد رینولدز می-باشند. حال، مراحل بی-بعد سازی روی معادلات به دست آمده در فصل سوم (۳-۵۱ الی ۳-۵۴)، با استفاده از قوانین مشتق زنجیره‌ای و به‌کارگیری تعاریف فوق، انجام می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial H^*} \cdot \frac{\partial H^*}{\partial t^*} \cdot \frac{\partial t^*}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial V^*} \cdot \frac{\partial V^*}{\partial z^*} \cdot \frac{\partial z^*}{\partial z} = 0 \\ \boxed{\frac{\partial H}{\partial H^*} = \frac{cv_0}{g}, \frac{\partial t^*}{\partial t} = \frac{c}{D}, \frac{\partial V}{\partial V^*} = v_0, \frac{\partial z^*}{\partial z} = \frac{1}{D}} \\ \frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \end{array} \right. \quad (14-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} (\tau_{srz}|_{r=R} + \tau_{prz}|_{r=R}) = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial V^*} \cdot \frac{\partial V^*}{\partial t^*} \cdot \frac{\partial t^*}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial H^*} \cdot \frac{\partial H^*}{\partial z^*} \cdot \frac{\partial z^*}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} (\tau_{srz}^* \rho c v_0|_{r=R} + \tau_{prz}^* \rho c v_0|_{r=R}) = 0 \\ \boxed{\frac{\partial V}{\partial V^*} = v_0, \frac{\partial t^*}{\partial t} = \frac{c}{D}, \frac{\partial H}{\partial H^*} = \frac{cv_0}{g}, \frac{\partial z^*}{\partial z} = \frac{1}{D}, \frac{\partial z^*}{\partial z} = \frac{1}{D}} \\ \frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} - 4(\tau_{srz}^*|_{r=R} + \tau_{prz}^*|_{r=R}) = 0 \end{array} \right. \quad (15-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{srz}|_{r=R} = -\eta_s \cdot \frac{4V}{R} \\ \tau_{srz}^* \rho c v_0|_{r=R} = -\eta_s \cdot \frac{8V^* v_0}{D} \\ \boxed{\beta = \frac{\eta_p}{\eta_s + \eta_p} \rightarrow \beta = \frac{\eta - \eta_s}{\eta} = 1 - \frac{\eta_s}{\eta}, M = \frac{v_0}{c}, Re = \frac{\rho v_0 D}{\eta}} \\ \tau_{srz}^*|_{r=R} = \frac{-8}{Re} \cdot M \cdot V^* \cdot (1 - \beta) \end{array} \right. \quad (16-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
\tau_{prz}|_{r=R} + \lambda \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial t} = -\eta_p \frac{4V}{R} \\
\rho c v_0 \tau_{prz}^*|_{r=R} + De \cdot \frac{D}{v_0} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial t^*} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} \cdot \frac{\partial t^*}{\partial t} = -\eta_p \frac{8V^* v_0}{D} \\
\rho c v_0 \tau_{prz}^*|_{r=R} + De \cdot \frac{D}{v_0} \cdot \rho c v_0 \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} \cdot \frac{c}{D} = -\eta_p \frac{8V^* v_0}{D} \\
\tau_{prz}^*|_{r=R} + De \cdot \frac{1}{v_0} \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} \cdot c = -\eta_p \frac{8V^* v_0}{\rho c v_0 D} \\
\boxed{\text{Re} = \frac{\rho v_0 D}{\eta}, M = \frac{v_0}{c}, \beta = \frac{\eta_p}{\eta_T}} \\
\tau_{prz}^*|_{r=R} + \frac{De}{M} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} = -8\beta \cdot \frac{V^*}{\text{Re}} \cdot M
\end{array} \right. \quad (17-4)$$

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

نمود:

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \quad (18-4)$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} - 4(\tau_{srz}^*|_{r=R} + \tau_{prz}^*|_{r=R}) = 0 \quad (19-4)$$

$$\tau_{srz}^*|_{r=R} = \frac{-8}{\text{Re}} \cdot M \cdot V^* \cdot (1 - \beta) \quad (20-4)$$

$$\tau_{prz}^*|_{r=R} + \frac{De}{M} \cdot \frac{\partial \tau_{prz}^*}{\partial t^*} = -8\beta \cdot \frac{V^*}{\text{Re}} \cdot M \quad (21-4)$$

که در مورد رخداد ضربه قوچ در یک محلول نیوتنی، شکل بی بعد معادلات فوق، به صورت زیر ساده

می شود:

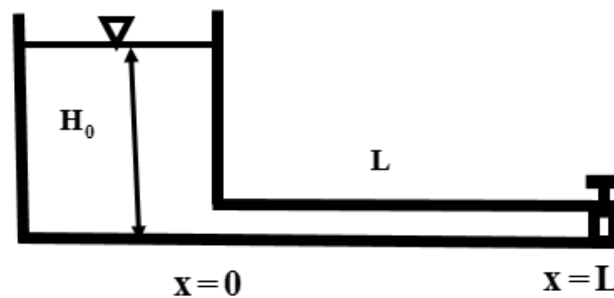
$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 \quad (22-4)$$

$$\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + \frac{\partial H^*}{\partial z^*} + \frac{32}{\text{Re}} \cdot M \cdot V^* = 0 \quad (23-4)$$

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 مومنوموم ظاهر می‌شوند.

#### ۳-۴- شرایط اولیه و مرزی

سیستم مورد بررسی در رساله حاضر، از نوع شیر، لوله و مخزن است که در شکل ۴-۶ نشان داده می‌شود.



شکل ۴-۶- نمایی از سیستم شیر- لوله و مخزن

در رخداد پدیده ضربه قوچ، فرض می‌شود، 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 (۴-۲۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$H_1 = H_{Res} \quad (۴-۲۴)$$

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 (۴-۲۵) لحاظ می‌گردد.

$$v_n = 0 \quad (۴-۲۵)$$



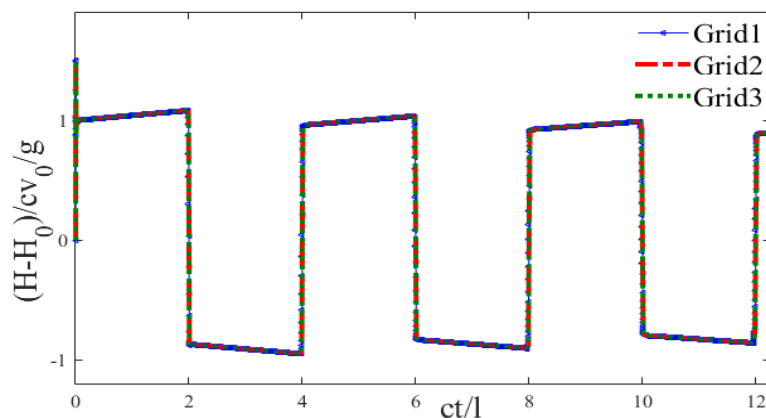
که در آن،  $v_n$ ، سرعت مربوط به گره متصل به شیر، می باشد.

#### ۴-۴- مشخصات شبکه بندی

در مدلسازی یک بعدی مطالعه حاضر، بهترین حالت پایداری به ازای عدد کورانت ۰,۹۹ حاصل گردید. در جدول ۴-۱ اندازه گامهای مکانی برای سه شبکه بندی مختلف به صورت بی بعد نشان داده می شود.

جدول ۴-۱- اندازه گامهای مکانی بی بعد برای سه شبکه بندی مختلف

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



شکل ۴-۷- تاریخچه زمانی فشار در شبکه بندیهای مختلف در نقطه پشت شیر

شکل ۴-۷ تاریخچه زمانی فشار در پشت شیر را برای سه شبکه بندی مختلف را نمایش می دهد. همانطور که مشخص است، نتایج شبکه بندی بسیار به هم نزدیک است. با در نظر گرفتن  $cpu$  کامپیوتر استفاده شده که معادل ۲,۵ گیگا هرتز است و زمان اجرای هر شبکه بندی، یک معیار زمانی برای اجرای هر شبکه به دست می آید. به طور معمول در چنین مواردی، جهت کاهش هزینه های

محاسباتی و نیز حفظ دقت محاسبات، از شبکه بندی متوسط استفاده می‌شود. بنابراین شبکه بندی دوم در جدول ۴-۱ در مدلسازی مورد نظر به کار گرفته می‌شود که بر اساس آن، طول لوله به ۲۰۰۰ قسمت، تقسیم می‌شود.

#### ۴-۵- اعتبار سنجی مدل

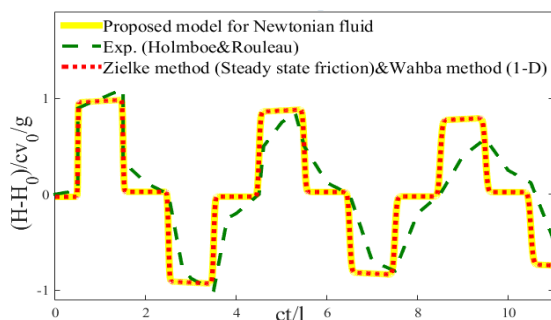
یکی از چالشهای مهم در زمینه اعتبار سنجی مدل‌های سیالات غیر نیوتنی، کمبود مطالعات آزمایشگاهی با به‌کارگیری این سیالات می‌باشد. در مورد موضوع مطالعه حاضر نیز این مشکل وجود دارد. علیرغم اینکه سیالات ویسکوالاستیک اخیراً در بسیاری از علوم صنعتی و شیمیایی، مورد توجه قرار گرفته‌اند اما هنوز جنبه کاربردی رخداد 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 می‌رود که اطلاعات معتبر کمتری در مورد این گروه سیالات، نسبت به سایر گروه‌های سیالات غیر نیوتنی در دسترس است. در مدلسازی 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 می‌گیرد. 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<sup>۱</sup> که بر اساس آزمایش معتبر هولمبو و رولئو [Holmboe & Rouleau 1967] انجام شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در مطالعه تحلیلی زیلک [Zielke 1968] که

<sup>1</sup> Steady State Friction

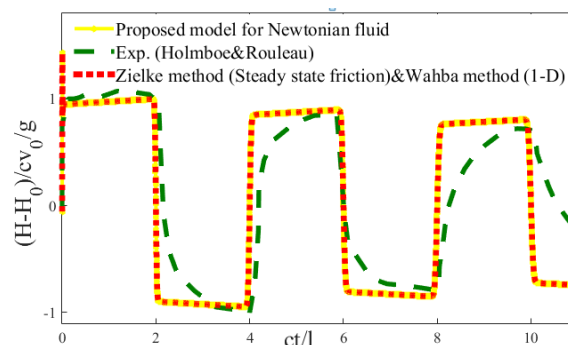
از بارزترین تحقیقات انجام شده در زمینه مدلسازی جریانهای انتقالی است، برای جریانهای غیر ماندگار آرام در حالت تک بعدی روابطی تحلیلی تعریف می‌شود که همچنان به عنوان مرجع برای مقایسه دیگر مسائل مشابه به کار می‌رود. در روش زیلک، مدلسازی ضربه قوچ در لوله در دو حالت اصطکاک دائمی و غیردائمی انجام گرفته است. 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 ۲-۴ مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

جدول ۲-۴- مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله [Holmboe & Rouleau 1967]

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



ب- وسط لوله



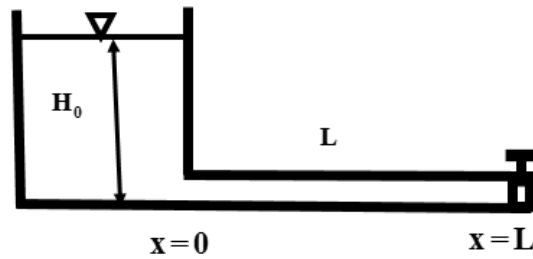
الف- پشت شیر

شکل ۴-۸- اعتبار سنجی مدل پیشنهادی برای سیال نیوتنی با روش‌های عددی زیلک و روش وهبا و روش آزمایشگاهی با دقت در شکل ۴-۸، 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<sup>۱</sup> می‌باشد [Wahba 2006].

#### ۴-۶- مدل‌سازی عددی

به‌منظور مدل‌سازی شرایط رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، به یک محلول پلیمری نیاز است. مشخصات محلول پلیمری در جدول ۴-۳ 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 (۴-۹) جهت بررسی شرایط مرزی، مجدداً نمای کلی سیستم شیر-لوله و مخزن نشان داده می‌شود.

<sup>1</sup> Steady State Friction



شکل ۴-۹- نمایی از سیستم شیر- لوله و مخزن

شکل (۴-۹) 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 ۴-۳- 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 (۴-۴) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۴-۴- مشخصات سیال و اطلاعات شکل لوله

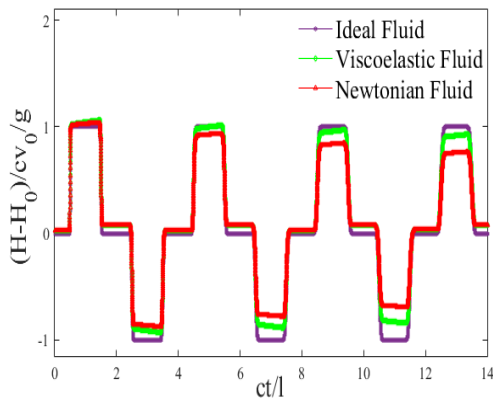
مشخصات آزمایش	مقادیر
طول لوله (m)	۳۶/۰۹
سرعت متوسط (m/s)	۰/۱۲۸
سرعت موج (m/s)	۱۳۲۴
مدول حجمی سیال (Gpa)	۳,۸۵
قطر داخلی لوله (m)	۰/۰۲۵۴
ویسکوزیته دینامیکی (pa.s)	۰/۰۸۹۱۸
جرم مخصوص سیال (kg/m <sup>3</sup> )	۲۲۰۰

عدد دبور در محلول پلیمری مورد نظر بر طبق اطلاعات جدول (۴-۴) معادل ۹/۶ محاسبه می‌گردد که می‌توان به طور تقریبی ۱۰ در نظر گرفت.

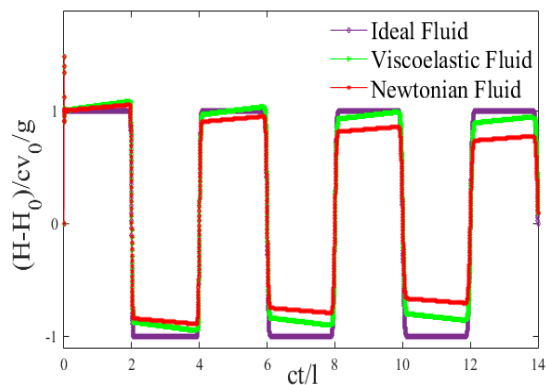
$$\begin{cases} De = \frac{\lambda}{T} = \frac{1.9}{0.198} = 9.6 \\ T = \frac{D}{v_0} = \frac{0.0254}{0.128} = 0.198s \end{cases} \quad (۲۶-۴)$$

#### ۴-۶-۱- 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 (۴-۹) 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 ۴-۱۰- مقایسه تاریخچه فشاری در سیالات مختلف

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

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

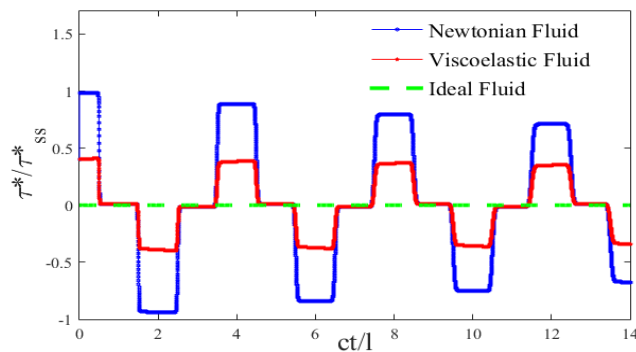
با توجه به شکل (۴-۱۰) دو نکته حائز اهمیت است:

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 ۴-۹، 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 (۴-۱۱) نشان داده می‌شود.



شکل ۴-۱۱- مقایسه تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محلولهای نیوتنی و ویسکوالاستیک در نقطه وسط

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

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

در شکل (۴-۱۱) 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، به طور 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، به طور 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).

در مورد نکته دوم شکل (۴-۱۰) که به میزان تجاوز فشار اولیه در محل پشت شیر از فشار ژوکووسکی می‌پردازد، باید به پدیده لاین پکینگ<sup>۱</sup> اشاره شود که در بخش (۴-۶-۲)، به طور کامل، تشریح می‌شود:

#### ۴-۶-۲- پدیده لاین پکینگ

پدیده لاین پکینگ که به تاثیرات اصطکاکی ایجاد شده در طول لوله ارتباط داده می‌شود، متاثر از تغییرات یک پارامتر بی بعد است که به صورت زیر تعریف می‌شود [Wahba 2008].

$$k = \frac{F_l}{F_v} = \frac{\rho c v_0 D^2}{D \eta l v_0 / D} = \frac{\rho c D^2}{\eta l} = \frac{c D^2}{\nu l} \quad (۴-۲۷)$$

بنا بر تعریف، این پارامتر بی بعد که از نسبت تقسیم نیروی ژوکووسکی به نیروی ویسکوز حاصل می‌شود، تابعی از جرم مخصوص، سرعت موج فشاری، قطر و طول لوله و همچنین ویسکوزیته سیال می‌باشد. مدلسازی وهبا [Wahba 2008] در مورد سیالات نیوتنی در طول پدیده ضربه قوچ نشان داد که با افزایش این پارامتر، تغییرات فشار نسبت به فشار ژوکووسکی بسیار کم و با کاهش این پارامتر،

<sup>۱</sup> “line packing” or “pipeline packing”

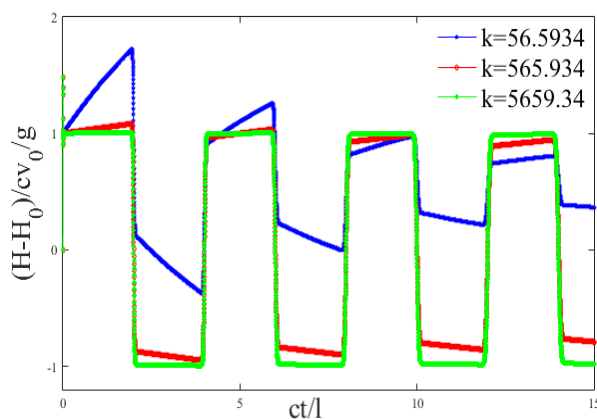
تغییرات فشار نسبت به فشار ژوکوسکی (تقریباً ۶۰ درصد بیشتر) می شود. در مدلسازی مطالعه حاضر که بر اساس جدول شماره (۳-۴) انجام شده است، مقدار عددی این پارامتر به صورت زیر تخمین زده می شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 2200 \text{ kg/m}^3 \\ c = 1324.7 \text{ m/s} \\ D = 0.0253 \text{ m} \\ \eta = 0.08918 \text{ pa.s} \\ l = 36.09 \text{ m} \end{array} \Rightarrow k = \frac{\rho c D^2}{\eta l} = 56.5934 \right. \quad (28-4)$$

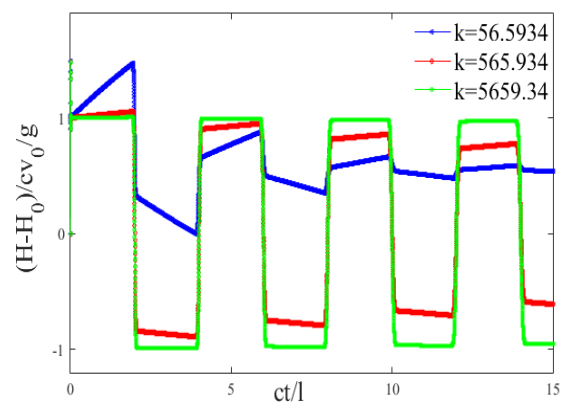
جهت بررسی نتایج مطالعه وهبا و مقایسه میزان تاثیرپذیری رفتار سیالات نیوتنی و ویسکوالاستیک در مطالعه حاضر، از تغییرات پارامتر بی بعد  $k$ ، مطابق جدول (۴-۵) سه حالت در مورد هر سیال بررسی قرار می گیرد:

جدول ۴-۵- مشخصات حالات مختلف مدلسازی

$k = \frac{\rho c D^2}{\eta l}$	$Re = \frac{\rho v_0 D}{\eta}$	شماره حالتها
۵۶۵,۹۳۴	۸۰	۱
۵۶,۵۹۳۴	۸۰	۲
۵۶۵۹,۳۴	۸۰	۳



ب- سیال ویسکوالاستیک



الف- سیال نیوتنی

شکل ۴-۱۲- تاثیر پارامتر  $k$  بر تاریخچه فشاری در پشت شیر

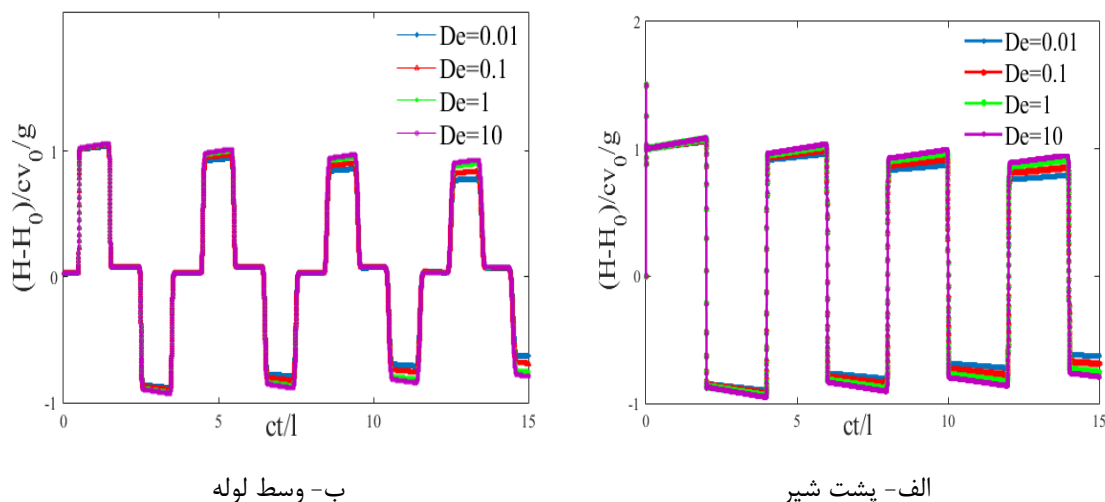
با توجه به شکل (۴-۱۲) با کاهش ضریب  $k$  ضمن افزایش دمپینگ جریان انتقالی، پدیده لاین پکینگ یا میزان تجاوز فشار اولیه در محل پشت شیر از فشار ژوکووسکی با وضوح بیشتری در مورد هر دو سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک، اتفاق می افتد که به نوعی نتایج وهبا را تایید می کند. از طرفی، در مقایسه رفتاری بین سیال نیوتنی و سیال ویسکوالاستیک، مشاهده می شود که در شرایط مشابه، میزان تجاوز فشار اولیه از فشار ژوکووسکی در محل پشت شیر، در سیال ویسکوالاستیک، نسبت به سیال نیوتنی کمی بیشتر است که دلیل آن به طور قطع، به ویژگی الاستیکی این سیال نظیر ثابت زمان رهایی از تنش ارتباط داده می شود که به شدت متمایل به نگهداشت انرژی پتانسیل وارده بوده و در مقابل دمپینگ جریان انتقالی مقاومت می کند. همین مساله باعث می شود که در مقایسه با سیال نیوتنی، زمان میرایی طولانی تری داشته باشند.

#### ۴-۷- بررسی تاثیر اعداد بی بعد بر اتفاقات ضربه قوچ

با دقت در معادلات (۴-۱۸) الی (۴-۲۱) مشخص می گردد که معادلات حاکم در حالت وقوع ضربه قوچ در یک محلول ویسکوالاستیک، متأثر از تغییرات اعداد بی بعد دوبرا، 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  $10^{-4} - 10^{-5} \approx M$  بوده و از بررسی تاثیر آن، صرف نظر می شود.

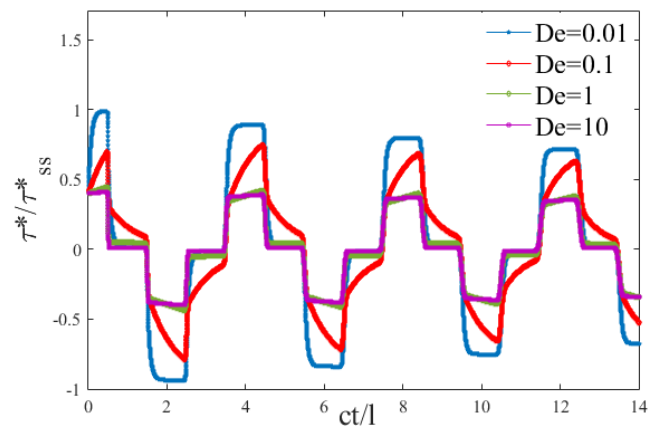
#### ۴-۷-۱- بررسی تاثیر عدد دوبرا

جهت بررسی تاثیر عدد دوبرا بر تاریخچه فشار ضربه قوچ ویسکوالاستیک، محلولهای پلیمری رقیق تر با زمان-های رهایی از تنش کمتر از ۱,۹ که به دوبراهای کمتر از ۱۰ می انجامد، مدلسازی و نتایج به دست آمده در شکل (۴-۱۳) نشان داده می شود.



شکل ۴-۱۳- تاثیر عدد دبورا بر تاریخچه فشاری  $Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}$

در شکل (۴-۱۳) دو نکته حائز اهمیت است، نخست، رخداد پدیده لاین پکینگ در محل پشت شیر که در بخش (۴-۶-۲)، به تشریح، به آن پرداخته شد. نکته دوم افزایش دمپینگ جریان انتقالی با کاهش دبورا می‌باشد. این مساله نیز قابل پیش بینی بود. همانطور که در تشریح نکته اول شکل (۴-۱۰) اشاره گردید، ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش، در مقابل دمپینگ جریان انتقالی مقاومت می‌کند، بنابراین، انتظار می‌رود 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 دبورای بسیار پایین مشابه رفتار محلول نیوتنی می‌شود. در شکل (۴-۱۴) تاثیر عدد دبورا بر تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، در نقطه وسط لوله نمایش داده می‌شود.



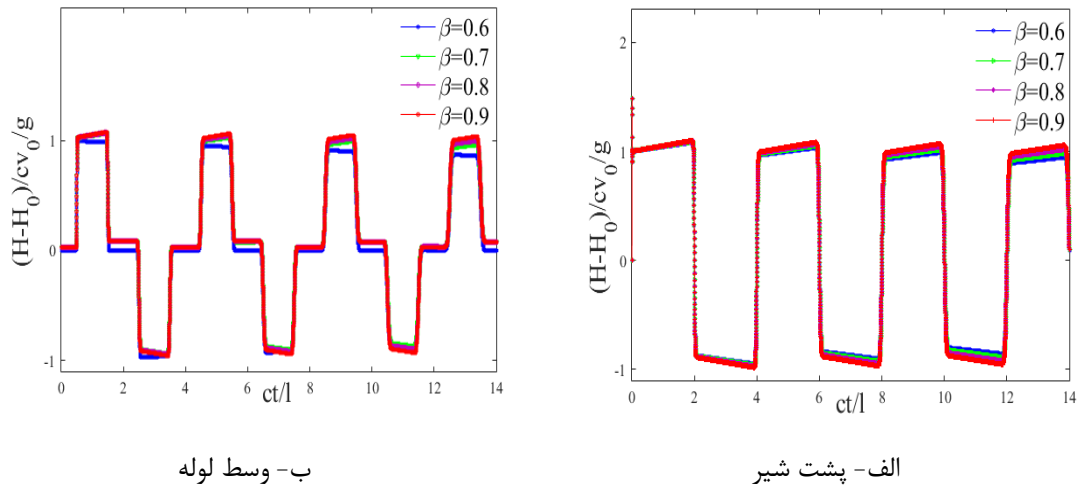
شکل ۴-۱۴- تاثیر عدد دبورا بر تنشهای برشی در وسط لوله  $Re = 80, \beta = 0.6, M = 10^{-4}$

با توجه به شکل (۴-۱۴) 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 (۴-۱۱) 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.

#### ۴-۷-۲- بررسی تاثیر عدد بتا (نسبت ویسکوزیته)

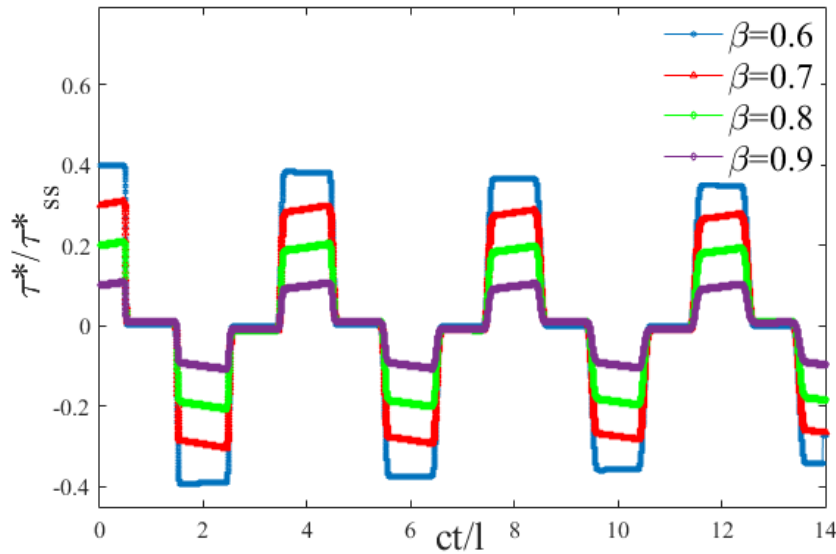
در این بخش، با فرض ویسکوزیته ثابت برای محلول پلیمری، ویسکوزیته حلال نیوتنی و حل‌شونده ویسکوالاستیک در چندین حالت، تغییر داده می‌شوند و سپس تاثیر نسبت ویسکوزیته (عدد  $\beta$ ) روی تاریخچه فشار ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک بررسی می‌شود. با در نظر گرفتن مدل اولدریوید-بی محلول پلیمری به دو بخش حلال نیوتنی و حل‌شونده ویسکوالاستیک تقسیم می‌شود، بنابراین، با افزایش  $\beta$  بخش پلیمری ویسکوالاستیک، موثرتر می‌شود. بنابراین، در یک محلول ویسکوالاستیک با زمان ثابت رهایی از تنش ثابت، انتظار می‌رود که با کاهش  $\beta$ ، 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 می افتد. در شکل (۴-۱۵) تاثیر نسبت ویسکوزیته  $\beta$  روی تاریخچه فشار در نقاط پشت شیر و وسط لوله نشان داده می شود.



شکل ۴-۱۵- تاثیر نسبت ویسکوزیته  $\beta$  بر تاریخچه فشاری  $Re = 80, De = 10, M = 10^{-4}$

در شکل (۴-۱۵) نیز ضمن مشاهده تاثیر لاین پکینگ در محل پشت شیر برای همه حالت‌های نسبت ویسکوزیته، مشخص می شود که افزایش  $\beta$  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 می شود. در شکل (۴-۱۶) تاثیر نسبت ویسکوزیته  $\beta$  روی تنشهای برشی در وسط لوله نشان داده می شود.

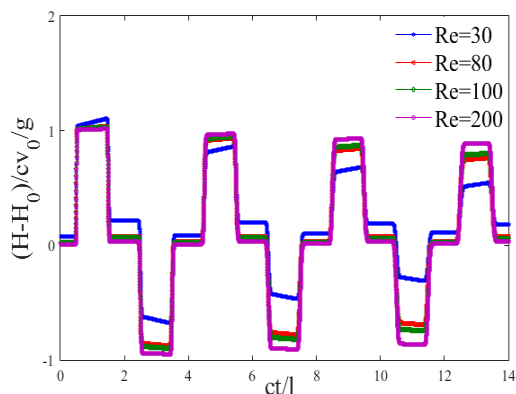


شکل ۴-۱۶- تاثیر نسبت ویسکوزیته  $\beta$  بر تنشهای برشی در وسط لوله  $Re = 80, De = 10, M = 10^{-4}$

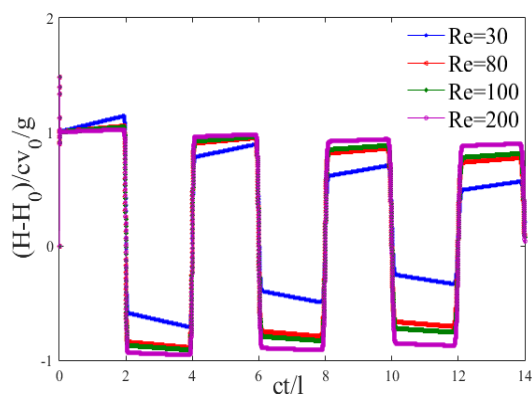
بر طبق معادلات اولدروید-بی، تنشهای برشی در طول لوله از مجموع تنشها در بخش حلال و حل-شونده ویسکوالاستیک، محاسبه می‌شوند. با در نظر گرفتن این مساله که ویژگیهای سیال ویسکوالاستیک، نقش مهمی در کاهش تنشهای برشی دارد، بر اساس شکل (۴-۱۶) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش  $\beta$  که با افزایش تاثیر بخش ویسکوالاستیک محلول همراه است، میزان نگهداشت انرژی سیال بیشتر و تنشهای برشی وارد بر لوله کمتر می‌شود و بالعکس.

#### ۴-۷-۳- بررسی تاثیر عدد رینولدز

موج فشاری ناشی از جریان انتقالی حتی در حالت وجود سیال نیوتنی نیز بنا بر معادله (۴-۲۳) نسبت به عدد رینولدز حساس است. تاثیر عدد رینولدز روی تاریخچه فشار در مورد محلول نیوتنی در شکل (۴-۱۷) و در مورد محلول پلیمری ویسکوالاستیک در شکل (۴-۱۸) مشاهده می‌شود.

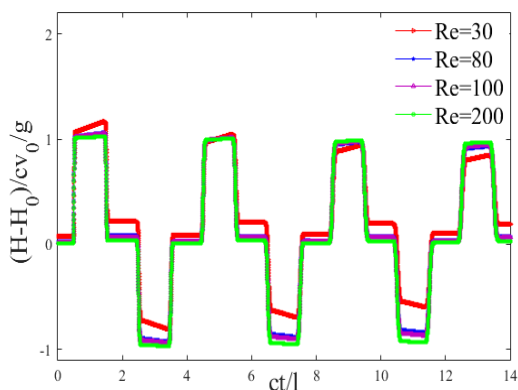


ب- وسط لوله

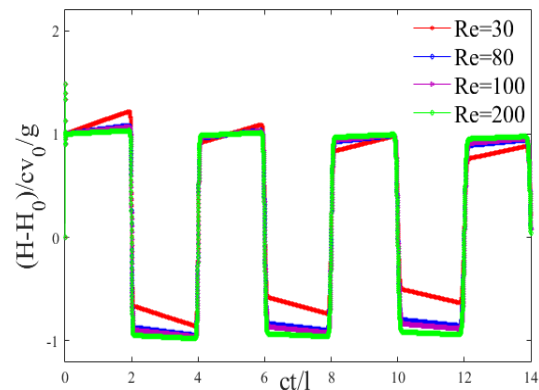


الف- پشت شیر

شکل ۴-۱۷- تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در ضربه قوچ نیوتنی  $\beta = 0, De = 0, M = 10^{-4}$



ب- وسط لوله



الف- پشت شیر

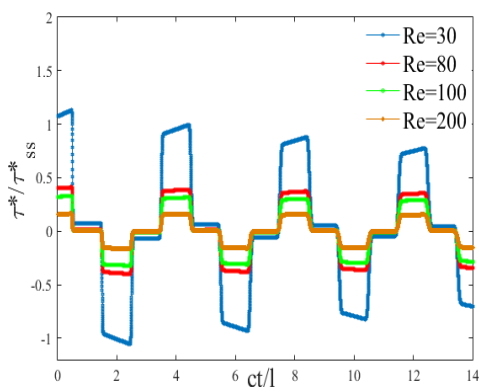
شکل ۴-۱۸- تاثیر عدد رینولدز بر تاریخچه فشاری در ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک

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

اولین نکته که در شکل‌های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) مشخص است، رخداد واضح لاین پکینگ در رینولدزهای پایین در هر دو سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک است. علت این مساله همانطور که در بخش (۴-۶-۲) بیان گردید، به تاثیر پذیری رخداد این پدیده از ویسکوزیته سیال ارتباط داده می‌شود و بنابراین در رینولدزهای پایین، لاین پکینگ با وضوح بیشتری اتفاق می‌افتد. نکته دیگر 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

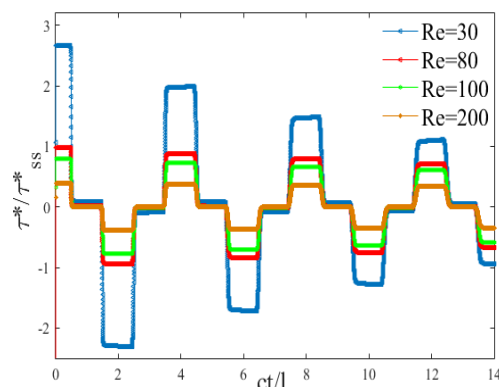


بنابراین میرایی جریان زودتر اتفاق می‌افتد. در واقع، در محدوده جریان آرام با افزایش عدد رینولدز، ارتفاع ارتفاعی موج، بیشتر و زمان میرایی جریان، طولانی‌تر می‌شود که همین اتفاق در مورد محلول ویسکوالاستیک با حساسیت کمتری (به دلیل تاثیر از پارامترهای بیشتر) تکرار می‌شود. در شکل (۴-۱۹) مقایسه‌ای بین تنشهای برشی با تغییرات عدد رینولدز در طول رخدادهای 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 ۴-۱۹- مقایسه تنشهای برشی ناشی از ضربه قوچ با رینولدزهای مختلف در نقطه وسط لوله

شکل (۴-۱۹) 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. حال، که با یکی از روشهای عددی تفاضل محدود، ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک در سیستم شیر، لوله و مخزن مدلسازی گردید و ارتفاع موج فشاری و نیز تنشهای برشی ایجاد شده در اثر وقوع این پدیده در نقاط بحرانی لوله ترسیم و با ضربه قوچ سیال نیوتنی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت، این پرسش مطرح می‌شود که در طی رخداد

ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، چه اندرکنشی بین سیال و سازه لوله به وجود می آید؟ به طور کل، در مدلسازی اندرکنش سیال- سازه که معادلات سیال و سازه به طور همزمان، تحلیل می شوند، افزودن معادلات سیال ویسکوالاستیک، چه تاثیری در نتایج نهایی دارد؟ در کوپله های معروف اتصال و پواسون و نیز کوپله همزمان اتصال و پواسون چه تفاوتی بین عملکرد سیال ویسکوالاستیک و سیال نیوتنی وجود دارد؟ در فصل پنجم به پرسشهای فوق، پاسخ داده می شود.

## فصل پنجم

### مدلسازی اندرکنش سیال-سازه طی رخداد

### ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک و بررسی نتایج

- اندرکنش سیال-سازه در لوله‌ها
- انواع معادلات مدلسازی کوپله
- انواع مکانیزم‌های اثرات کوپله
- مدلسازی عددی محلول پلیمری با اثرات اندرکنش سیال و سازه

در این فصل، به منظور بررسی اثرات اندرکنش سیال-سازه در حین وقوع ضربه قوچ در لوله، در ابتدا ضمن تشریح اهمیت توجه به این مساله، دیدگاههای رایج در زمینه آنالیز کوپله شامل تعداد معادلات و همچنین، اثرات رفتار سیال و سازه در آنالیز کوپله در لوله‌ها تعریف می‌گردد و سپس، محلول پلیمری تحت کوپله‌های مختلف مدلسازی می‌شود و در انتها نتایج به دست آمده در مورد اثرات سیال-سازه در این کوپله‌ها با هم مقایسه و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

### ۵-۱- اندرکنش سیال-سازه در لوله‌ها

در اثر جریان گذرای مانند ضربه قوچ، در سیال درون لوله، نیروهای دینامیکی قابل ملاحظه‌ای بر سازه لوله وارد می‌شود. چنانچه این نیروها موجب تغییر شکل، حرکت و ارتعاش شبکه لوله در جهت طولی<sup>۱</sup> و جانبی شوند، با عکس العمل متقابل، نیروهای سازه‌ای بر پارامترهای هیدرولیکی اثر گذاشته و موجب افزایش و ارتعاش در ارتفاع‌های فشار می‌شوند، این پدیده را اندرکنش سیال سازه می‌نامند. در واقع، در این حالت، هم تغییرات سیال بر روی سازه و هم تغییرات سازه بر سیال تاثیرگذار می‌باشد و نمی‌توان رفتار آنها را به طور جداگانه بررسی نمود. بنابراین بایستی معادلات حاکم بر حرکت سیال و ارتعاشات سازه را به طور همزمان (کوپله)، با استفاده از روشهای مناسب حل نمود. آنالیز کوپله را می‌توان بر اساس دو دیدگاه مورد بررسی قرار داد.

۱- براساس تعداد معادلات به کار رفته، جهت مدلسازی کوپله‌ی حل مسائل اندرکنش سیال-سازه در لوله‌ها.

۲- بر اساس مکانیزم‌های اثرات رفتار سیال و سازه در آنالیز کوپله در لوله‌ها.

### ۵-۲- انواع معادلات مدلسازی کوپله

در این دیدگاه، تاپسلینگ روشهای کوپله حل مسائل FSI لوله‌ها را با توجه به معادلات دیفرانسیلی که برای هر روش استفاده می‌شود به چهار دسته‌ی: مدل دو معادله دیفرانسیل، مدل چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول، مدل شش معادله دیفرانسیل مرتبه اول و مدل چهارده معادله دیفرانسیل مرتبه

---

<sup>1</sup> Longitudinal displacements

اول تقسیم می‌کند. در تمامی این مدلها، دو معادله مربوط به، روابط حاکم بر حرکت سیال (پیوستگی و مومنتوم) می‌باشد. سایر معادلات نیز با توجه به اینکه در فضای دو بعدی یا سه بعدی در حال بررسی است، شامل معادلات ارتعاش محوری، پیچشی و خمشی سازه لوله می‌باشد. معادلات ارتعاش محوری و پیچشی که خود، معادلات مرتبه دوم هستند، به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول و معادله خمشی سازه که از مرتبه چهار است، به چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول قابل تبدیل می‌باشد [Tijsseling 1996]. مدل دو معادله دیفرانسیل به نوعی یک روش نیمه کوپله محسوب می‌شود چراکه فقط دو معادله دیفرانسیل هیدرولیک حل می‌شوند و سپس مقادیر به دست آمده ( فشارها و سرعت‌های سیال)، برای معادلات سازه‌ای مانند یک بارگذاری خارجی تلقی می‌گردند. این روش تحلیل به نام روش حل ضربه کوچ کلاسیک نیز معروف می‌باشد. در رساله حاضر، برای تحلیل سیستم ساده لوله مخزن شیر در حالت مستقیم، از مدل چهار معادله دیفرانسیل، استفاده می‌شود. پیش از مدلسازی عددی، باید بررسی نمود که در بحث اندرکنش سیال - سازه، چه تغییراتی در معادلات حاکم بر ضربه کوچ سیال ویسکوالاستیک رخ می‌دهد؟

### ۵-۳- معادلات حاکم بر اندرکنش سیال ویسکوالاستیک - سازه

#### ۵-۳-۱- معادلات سیال

معادلات حاکم بر سیال همانطور که در فصل سوم تشریح گردید، پیوستگی و مومنتوم می‌باشند. درمباحث اندرکنش، در معادله مومنتوم هیچ تغییری نسبت به مدلسازی بدون اثرات تداخلی سیال - سازه، ایجاد نمی‌شود [کرامت ۱۳۸۹]. در تحقیق حاضر، از یک محلول ویسکوالاستیک به جای آب، درون لوله استفاده گردیده که جهت جایگذاری عبارت تنش در معادله مومنتوم، از روابط اولدرویدی استفاده می‌شود. معادله تنش اولدروید - بی نیز در حالت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش، هیچ تغییری نمی‌کند. تنها تفاوتی که در این بخش، باید لحاظ گردد، در نظرگرفتن عبارت سرعت شعاعی در معادله پیوستگی سیال است که در محاسبات فصل سوم، به دلیل عدم بررسی اثرات اندرکنش، از آن،

صرفنظر شده بود. بنابراین، معادله پیوستگی در حالت تداخلی سیال- سازه باید بازنویسی شود. چنانچه معادله (۳-۹) مجدداً در نظر گرفته شود:

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (۱-۵)$$

با یکپارچه کردن عبارت سرعت شعاعی، معادله فوق، به صورت زیر باز نویسی می‌شود:

$$\left( \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (۲-۵)$$

جهت رسیدن به یک فرمول بندی یک بعدی، عبارتهای معادله فوق، در راستای شعاعی از 0 تا R انتگرالگیری می‌شوند. با این کار، تمام جملات موجود در معادلات از حالت دو بعدی  $(t, z, r)$  به یک بعدی برحسب  $(t, z)$  تبدیل می‌شوند.

$$\begin{cases} \int \frac{\partial p}{\partial t} dA = A \frac{\partial P}{\partial t} \\ \int \frac{\partial v_z}{\partial z} dA = \frac{\partial}{\partial z} \int v_z dA = A \frac{\partial V}{\partial z} \\ \int \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} dA = \int_0^R \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} 2\pi r dr = 2\pi R v_r \Big|_{r=R} \end{cases} \quad (۳-۵)$$

بنابراین، معادله پیوستگی با جایجایی ترتیبی عبارتها به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{1}{E_f} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{2}{R} v_r \Big|_{r=R} = 0 \quad (۴-۵)$$

که در رابطه فوق، مقادیر سرعت و فشار به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v_z 2\pi r dr \\ P &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R p 2\pi r dr \end{aligned} \quad (۵-۵)$$

معادل سرعت شعاعی جریان در لوله است که در بررسی اثر تداخلی سیال- سازه معادل

سرعت لوله در راستای شعاعی تعریف و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$v_r \Big|_{r=R} = \dot{u}_r \Big|_{r=R} \quad (۶-۵)$$

که  $\dot{u}_r$  مشتق جابجایی سازه در راستای شعاعی است که معادل همان سرعت شعاعی جریان در نظر گرفته می‌شود. حال، با تعریف کرنش محیطی  $\varepsilon_\phi$  در دستگاه مختصات استوانه‌ای، عبارت سرعت شعاعی به گونه‌ای دیگر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_\phi = \frac{u_r}{r} \rightarrow u_r = r\varepsilon_\phi \quad (7-5)$$

با توجه به محدود بودن امتداد شعاعی  $r$  به دیواره داخلی تا دیواره بیرونی لوله که معادل  $R \leq r \leq R+e$  می‌باشد و ضخامت ناچیز لوله  $e \rightarrow 0$ ، می‌توان  $r \cong R$  در نظر گرفت. بنابراین، عبارت سرعت شعاعی به مشتق کرنش محیطی تبدیل می‌شود:

$$\dot{u}_r|_{r=R} = \frac{\partial}{\partial t} R\varepsilon_\phi = R \frac{\partial \varepsilon_\phi}{\partial t} \quad (8-5)$$

که در رابطه (۴-۵) جایگزین می‌شود:

$$\frac{1}{E_f} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial z} + 2 \frac{\partial \varepsilon_\phi}{\partial t} = 0 \quad (9-5)$$

به همین ترتیب، عبارت  $\frac{\partial \varepsilon_\phi}{\partial t}$  با به‌کارگیری سه معادله دیگر (رابطه سه بعدی تنش-کرنش در مواد

الاستیک در جهت  $\phi$  و فرضیات لوله‌های جداره نازک که به ترتیب در روابط (۵-۱۰) ارائه شده است)،

به رابطه (۵-۱۱) بر حسب تنش محوری تبدیل می‌شود.

$$\varepsilon_\phi = \frac{\sigma_\phi}{E_p} - \frac{\nu_p}{E_p} \sigma_z \quad (10-5)$$

$$\sigma_\phi = \frac{Dp}{2e}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\phi}{\partial t} = \frac{D}{eE_p} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{2\nu_p}{E_p} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \quad (11-5)$$

در روابط فوق،  $E_p$  مدول یانگ مصالح لوله،  $\sigma_\phi$  تنش محیطی،  $\nu_p$  نسبت پواسون مصالح لوله و  $\sigma_z$

تنش محوری لوله می‌باشد. از طرفی برای محاسبه  $\frac{\partial \varepsilon_\phi}{\partial t}$  به مقدار مشتق زمانی تنش محوری  $\frac{\partial \sigma_z}{\partial t}$

نیاز است که برای محاسبه آن، معادله پواسون (رابطه ۵-۱۲)، کرنش محوری (رابطه ۵-۱۳) و فرضیه لوله‌های جداره نازک (رابطه ۵-۱۴) به کار گرفته می‌شود تا عبارت تنش محوری مطابق رابطه (۵-۱۵) بر حسب سرعت محوری به دست آورده شود.

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_p} - \frac{v_p}{E_p} \sigma_\phi \rightarrow \sigma_z = E_p \varepsilon_z + v_p \sigma_\phi \quad (12-5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (13-5)$$

$$\sigma_\phi = \frac{Dp}{2e} \quad (14-5)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = E_p \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} + v_p \frac{D}{2e} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (15-5)$$

با جایگزینی عبارت  $\frac{\partial \sigma_z}{\partial t}$  در معادله (۵-۱۱) و به کارگیری رابطه  $P = \rho g H$ ، عبارت کرنش محیطی ناشی از سرعت شعاعی در معادله (۵-۸) به سرعت محوری تبدیل می‌شود، بنابراین، معادله پیوستگی در حالت تداخلی سیال-سازه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c_f^2}{g} \frac{\partial V}{\partial z} - 2v_p \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} \frac{c_f^2}{g} = 0 \quad (16-5)$$

در معادله فوق،  $\dot{u}_z$  سرعت لوله در امتداد محوری،  $H$  ارتفاع متوسط فشار و  $V$  سرعت متوسط جریان می‌باشد.  $c_f$  نیز سرعت موج فشاری است که مشابه با مدلسازی ضربه قوچ بدون اثر تداخلی می‌باشد که در فصل سوم، نیز معرفی شده بود:

$$c_f^2 = \frac{\frac{E_f}{\rho_f}}{1 + k \frac{E_f D}{e E_p}} \quad (17-5)$$

که  $E_f$  مدول الاستیک سیال،  $\rho_f$  جرم مخصوص سیال،  $E_p$  مدول یانگ مصالح لوله،  $\ell$  ضخامت لوله و  $D$  قطر لوله می‌باشد.  $k$  ثابتی است که به صورت تابعی از نسبت پواسون مصالح لوله  $v_p$  تعریف می‌شود [Wahba 2013].



$$k \left| \begin{array}{l} 1 - \frac{v_p}{2} \\ 1 - v_p^2 \\ 1 \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{لوله فقط در انتهای بالادست مقید شود}^1. \\ \text{لوله از حرکت محوری باز داشته شود}^2. \text{ (کوپلینگ} \\ \text{پواسون)} \\ \text{لوله با اتصالات انبساطی}^3 \text{ (کوپلینگ اتصال)} \end{array} \quad (18-5)$$

بنابراین، در بخش بررسی اثرات تداخلی سیال-سازه، معادلات سیال، شامل چهار معادله پیوستگی، مومنتوم و معادلات تنش محلول ویسکوالاستیک، می باشد که به صورت روابط زیر تعریف می شوند:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c_f^2}{g} \frac{\partial V}{\partial z} - 2v_p \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} \frac{c_f^2}{g} = 0 \quad (19-5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{2}{\rho R} (\tau_{srz}|_{r=R} + \tau_{prz}|_{r=R}) = 0 \quad (20-5)$$

$$\tau_{srz}|_{r=R} = -\eta_s \frac{4V}{R} \quad (21-5)$$

$$\tau_{prz}|_{r=R} + \lambda \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial t} = -\eta_p \frac{4V}{R} \quad (22-5)$$

### ۵-۳-۲- معادلات ارتعاش محوری سازه

به علت وجود جمله کوپله پواسون در معادله پیوستگی و نیاز به محاسبه جابجایی محوری نقاط مختلف لوله، معادلات مربوط به ارتعاش محوری نیز باید استخراج گردند. ارتعاش محوری نیز به نوبه خود، تحت تاثیر اثرات دیواره لوله خواهد بود. جهت مدلسازی ارتعاش محوری، نقطه آغازین، نوشتن معادله مومنتوم در جهت محوری است. در این معادله، از اثرات سختی خمشی، اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی عرضی صرف نظر می گردد. این فرضیات به عنوان فرضیات امواج با طول موجهای بلند خوانده می شوند.

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial t} - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} - \frac{1}{\rho_t r} \frac{\partial (r \tau_{rz})}{\partial r} - g \sin \theta = 0 \quad (23-5)$$

<sup>1</sup> Pipe restrained at upstream end only

<sup>2</sup> Pipe restrained from axial movement

<sup>3</sup> Pipe with expansion joints

که در آن،  $\rho_t$  جرم مخصوص مصالح لوله،  $\sigma_z$  تنش محوری،  $\dot{u}_z$  سرعت محوری و  $\theta$  زاویه بین محور لوله و صفحه افقی می‌باشد. جهت رسیدن به یک فرمول‌بندی یک بعدی، عبارتهای معادله فوق، در  $2\pi r$  ضرب و سپس در راستای شعاعی از  $R$  تا  $R+e$  انتگرالگیری می‌شوند و سپس بر  $2\pi(R+\frac{e}{2})e$  تقسیم می‌گردند. با این کار، تمام جملات موجود در معادلات از حالت دو بعدی  $(t, z, r)$  به یک بعدی برحسب  $(t, z)$  تبدیل می‌شوند. با توجه به اینکه لوله به صورت افقی قرار گرفته معادله حرکت در جهت محوری، به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial t} - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial z} - \frac{1}{\rho_t} \frac{R+e}{(R+\frac{e}{2})e} \tau_{rz} \Big|_{r=R+e} + \frac{1}{\rho_t} \frac{R}{(R+\frac{e}{2})e} \tau_{rz} \Big|_{r=R} = 0 \quad (24-5)$$

که در آن،  $\bar{u}_z$  و  $\bar{\sigma}_z$  مقادیر متوسط سرعت و تنش محوری می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\bar{u}_z = \frac{1}{2\pi(R+\frac{e}{2})e} \int_R^{R+e} \dot{u}_z 2\pi r dr \quad (25-5)$$

$$\bar{\sigma}_z = \frac{1}{2\pi(R+\frac{e}{2})e} \int_R^{R+e} \sigma_z 2\pi r dr$$

حال، بر اساس معادله بقای مومنتوم، در مرز تماس سیال و سازه در دیواره لوله رابطه زیر در مورد تنش‌ها برقرار است:

$$\tau_{rz} \Big|_{r=R+e} = 0 \quad (26-5)$$

$$\tau_{rz} \Big|_{r=R} = \tau_{rz} \Big|_{r=R}$$

حال با به‌کارگیری مدل اولدروید-بی، مانند معادلات بخش سیال، تنشها به دو بخش حلال و حل شونده تقسیم می‌شود.

$$\tau_{rz} \Big|_{r=R} = \tau_{sz} \Big|_{r=R} + \tau_{pz} \Big|_{r=R} \quad (27-5)$$

$$\tau_{sz} \Big|_{r=R} = -\eta_s \cdot \frac{4V}{R} \quad (28-5)$$

$$\tau_{prz}|_{r=R} + \lambda \frac{\partial \tau_{prz}}{\partial t} = -\eta_p \frac{4V}{R} \quad (29-5)$$

به این ترتیب، اجزای یکی از معادلات ارتعاش محوری سازه (معادله ۲۴-۵) که باید به صورت کوپل با معادلات سیال، به طور همزمان، حل شوند، تکمیل می‌گردد.

دومین معادله ارتعاش محوری سازه نیز به صورت زیر به دست آورده می‌شود:

ابتدا رابطه تنش-کرنش نسبت به امتداد محوری مطابق معادله (۳۰-۵) در نظر گرفته می‌شود، سپس فرضیات مربوط به لوله‌های جداره نازک از رابطه (۳۱-۵) اعمال می‌گردد و در مرحله بعد، با فرض ثابت بودن نسبت پواسون، از ترکیب دو رابطه (۳۰-۵) و (۳۱-۵) نسبت به زمان مشتق‌گیری انجام می‌شود به این ترتیب، معادله (۳۲-۵) حاصل می‌شود:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_p} - \frac{\nu_p}{E_p} \sigma_\phi \quad (30-5)$$

$$\sigma_\phi = \frac{Dp}{2e} \quad (31-5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} = \frac{1}{E_p} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} - \frac{\nu_p}{E_p} \frac{\partial Dp}{\partial t} \frac{1}{e} \quad (32-5)$$

در رابطه فوق، کرنشهای کوچک از رابطه (۳۳-۵) و عبارت فشار نیز از  $p = \rho gh$  جایگزین می‌شود تا معادله تغییرات تنش محوری سازه نسبت به زمان، مطابق رابطه (۳۴-۵) حاصل گردد:

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (33-5)$$

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} - \frac{1}{\rho_t c_t^2} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} + g \frac{D \nu_p \rho_f}{2 e \rho_t c_t^2} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (34-5)$$

$$c_t^2 = \frac{E_p}{\rho_t} \quad (35-5)$$

که در آن،  $c_t$  سرعت موج تنشی و  $\rho_t$  جرم حجمی مواد لوله می‌باشند. حال، جهت حصول به یک

معادله یک بعدی، کفایت از تک تک عبارتهای معادله (۳۴-۵) در راستای شعاعی از  $R$  تا  $R+e$

انتگرالگیری شود. به این ترتیب، دومین معادله ارتعاش محوری سازه به صورت رابطه (۳۶-۵) به دست آورده می‌شود.

$$\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} - \frac{1}{\rho_i c_i^2} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial t} + g \frac{D \nu_p \rho_f}{2 e \rho_i c_i^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (36-5)$$

در رابطه فوق،  $\bar{u}_z$  و  $\bar{\sigma}_z$  مقادیر متوسط سرعت و تنش محوری می‌باشند که پیشتر در رابطه (۲۵-۵) تعریف شدند. بنابراین، معادلات (۲۴-۵) و (۳۶-۵) همراه با معادلات پیوستگی و ممنتوم سیال (روابط (۱۹-۵) الی (۲۲-۵)) جهت حل مساله تداخل سیال - سازه در یک سیستم مخزن - لوله - شیر به کار گرفته می‌شوند.

#### ۵-۴- انواع مکانیزم‌های اثرات کوپله

در این دیدگاه، مکانیزم‌ها با توجه به اثراتی که رفتار سیال بر سازه‌ی لوله و اتصالات جانبی و برعکس می‌گذارد مطالعه می‌شود. در واقع، از این نظر که چگونه و چه مکانیزم‌هایی می‌تواند این اثرات تداخلی و کوپله را ایجاد نماید، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بررسی‌های انجام شده بر روی پدیده تداخل سیال - سازه در لوله‌ها، تاکنون سه مکانیزم عمده شناخته شده است [Wiggert & Tijsseling 2001].

۱- مکانیزم کوپله پواسون<sup>۱</sup>

۲- مکانیزم کوپله اصطکاک<sup>۲</sup>

۳- مکانیزم کوپله تقاطع - (اتصال)<sup>۳</sup>

۵-۴-۱- اثر تداخلی پواسون

اثر تداخلی پواسون به دلیل وجود نسبت پواسون مصالح لوله می‌باشد. در این حالت، تغییر شکل‌های شعاعی، با توجه به نسبت پواسون به تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های محوری تبدیل می‌شوند. در واقع این

<sup>1</sup> Poisson coupling

<sup>2</sup> Friction coupling

<sup>3</sup> Junction coupling

اثر در معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای با عبارتهایی بر حسب نسبت پواسون ظاهر می‌شود، به نحوی که پارامترهای سازه‌ای را در معادلات هیدرولیکی و پارامترهای هیدرولیکی را در معادلات سازه‌ای وارد می‌نماید. بدیهی است مقدار اثر این کوپله، بستگی زیادی به نسبت پواسون مصالح به کار رفته در لوله دارد و در صورتی که این نسبت در این عبارتها برابر صفر در نظر گرفته شود، این اثر تداخلی در نظر گرفته نمی‌شود. باید توجه نمود که این اثر می‌تواند در فشارها و تنشهای حاصله، تاثیر زیادی داشته باشد.

#### ۵-۴-۲- اثر تداخلی تقاطع (اتصال)

اگر سیستم لوله در محل‌هایی که سیال تغییر مومنتوم می‌دهد، مانند محل شیرها، تقاطع‌ها، زانویی-ها، اوریفیس‌ها، محل‌هایی که لوله تغییر قطر می‌دهد (ونتوری‌ها) و...، به نحوی به زمین متصل شده باشند که امکان جابه‌جایی و حرکت آنها وجود داشته باشد، می‌تواند در اثر نوسانات فشار و سرعت ناشی از یک تحریک مکانیکی در سیستم، اثر تداخلی تقاطع (اتصال) ایجاد شود. در بعضی موارد، این اثر کوپله بسیار جدی‌تر از اثر کوپله پواسون بوده و می‌تواند باعث تشدید تنش‌ها و تخریب سازه گردد.

#### ۵-۴-۳- اثر تداخلی اصطکاک

مکانیزم کوپله اصطکاک، ناشی از اصطکاک سیال با جداره‌ی داخلی لوله می‌باشد. این اثر تداخلی نیز مانند کوپله پواسونی در شکل معادلات دیفرانسیلی هیدرولیکی و سازه‌ای که استفاده می‌شود، وجود دارد. اثر این کوپله در مقایسه با کوپله پواسون و اتصال بسیار بسیار جزئی و قابل چشم پوشی است [Gale & Tiselj 2008]. عملکرد این اثر به نحوی است که موجب کاهش فشارها و تنش‌ها در لوله می‌گردد. به همین دلیل، اکثر محققین، این اثر را در جهت اطمینان طراحی در نظر نمی‌گیرند. برای بررسی دقیق آن، باید از یک مدل اصطکاک غیرماندگار استفاده شود که در اینجا مورد نظر ما نیست.

#### ۵-۴-۴- تفاوت اثر تداخلی پواسون و اتصال

از دو منظر می‌توان تفاوت اثر تداخلی پواسون و اتصال را بررسی کرد. یکی از لحاظ علل ایجاد آن که در بخش‌های پیش، توضیح داده شد، و دیگری نحوه‌ی به‌کارگیری و اعمال این اثرات تداخلی که برای حل معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای نیاز است. در مباحث تداخلی سیال-سازه، بایستی اثرات تداخلی در هر یک از معادلات دیفرانسیلی حاکم، شرایط مرزی و نیز شرایط اولیه بررسی شود. چراکه در حل یک پدیده و مدل‌سازی ریاضی آن، رسیدن به جواب درست مسأله، نیازمند شناخت درست روابط حاکم و شرایط مرزی و شرایط اولیه می‌باشد. اثر تداخلی پواسون، اثری است که خود را در معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیال و سازه ارایه شده، به صورت جملاتی که شامل نسبت پواسون هستند، نشان می‌دهد و به این طریق، رفتار سیال و سازه را با یکدیگر مرتبط می‌سازد. در حالی که اثر تداخلی اتصال، در شرایط مرزی که برای تحلیل سازه یا سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد ظاهر می‌شود. یعنی در شرایط مرزی که برای تحلیل هیدرولیکی استفاده می‌شود باید از مقادیر سازه‌ای مانند جابجایی‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌های سازه‌ای که در این نقاط اتفاق می‌افتد، با توجه به نوع شرط مرزی، استفاده شود و هم در شرایط مرزی که برای تحلیل سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد (بارگذاری‌ها)، از مقادیر پارامترهای هیدرولیکی استفاده شود. این بارگذاری‌های مرزی، ناشی از حاصلضرب فشار سیال در سطح مقطع جریان، در مقاطع ورودی و خروجی حجم کنترل نظیر اتصالات می‌باشد که می‌تواند به صورت یک بارگذاری متمرکز بر سازه در نظر گرفته شود. این نیروهای متمرکز در فشارهای بالایی که غالباً در آغاز یک جریان غیرماندگار به وجود می‌آید مقادیر قابل توجهی خواهند داشت. بنابراین برای یک تحلیل عددی، هم برای مدل‌سازی اثر کوپله پواسون و هم برای مدل‌سازی اثر کوپله اتصال، باید از یک الگوریتم تکرار برای همگرایی مقادیر در معادلات و مرزها استفاده شود.

#### ۵-۵- شرایط مرزی کوپله اتصال و پواسون

همواره شرایط مرزی حاکم بر سیستم، به‌عنوان بخش تکمیلی برای مدل ریاضی و روش‌های عددی، مورد نیاز می‌باشد. از آنجا که شرایط مرزی کوپله‌ها در محل پشت شیر، در سیستم مورد بررسی شیر،

لوله و مخزن، کمی متفاوت است، در این بخش، دو نقطه مرزی لوله، یکی نقطه پشت شیر و دیگری انتهای بالادست لوله که مجاور مخزن می باشد، به تفکیک بررسی می گردد.

#### ۵-۵-۱- نقطه انتهای بالادست لوله

در هر دو نوع کوپله اتصال و پواسون، در انتهای بالادست لوله، شرایطی حاکم است که نمایانگر وجود ارتفاع ثابتی معادل ارتفاع مخزن، برای آن نقطه می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$H_1 = H_0 \quad (۳۹-۵)$$

$$\dot{u}_{z1} = 0 \quad (۴۰-۵)$$

در روابط فوق، زیرنویس صفر، مقدار متغیرها را در شرایط جریان دائمی و اندیس ۱، نقطه انتهایی بالادست لوله را نشان می دهد.

#### ۵-۵-۲- نقطه پشت شیر

در کوپله اتصال، شرایط مرزی برای نقطه پشت شیر، به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_v = \dot{u}_{zv} \quad (۴۱-۵)$$

$$\sigma_v A_t = \rho_f g A_f (H_v - H_0) \quad (۴۲-۵)$$

در روابط فوق، اندیس  $v$  بیانگر مقدار متغیر در محل پشت شیر،  $A_f$  سطح مقطع جریان،  $A_t$  سطح مقطع جداره لوله می باشد. در واقع، در کوپله اتصال، شیر مجاز به حرکت است که ارتعاش لوله را در پی دارد. اما در کوپله پواسون، شرایط مرزی برای نقطه پشت شیر که شیر به طور ناگهانی بسته می شود، به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_v = 0 \quad (۴۳-۵)$$

$$\dot{u}_{zv} = 0 \quad (۴۴-۵)$$

در کوپله پواسون، بر خلاف کوپله اتصال، فرض می شود که شیر ثابت است و لوله در آن محل، درگیر ارتعاش نمی شود.

## ۵-۶- مدلسازی عددی

در این بخش، محلول پلیمری ویسکوالاستیک فصل گذشته که مدلسازی ضربه قوچ بدون اثرات تداخلی روی آن، انجام گردید، مجدداً با در نظر گرفتن اثرات تداخلی سیال-سازه تحت کوبلینگهای اتصال، پواسون و کوبلینگ همزمان اتصال و پواسون، در نقاط بحرانی لوله مانند پشت شیر و نقطه وسط لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد و در هر مرحله تاثیرات کوبلینگها بر ارتفاع فشار و تنشهای برشی ناشی از ضربه قوچ در سیالات نیوتنی و ویسکوالاستیک مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مشخصات سازه‌ای لوله در بررسی اثرات اندرکنش، در جدول (۵-۱) ثبت گردیده است.

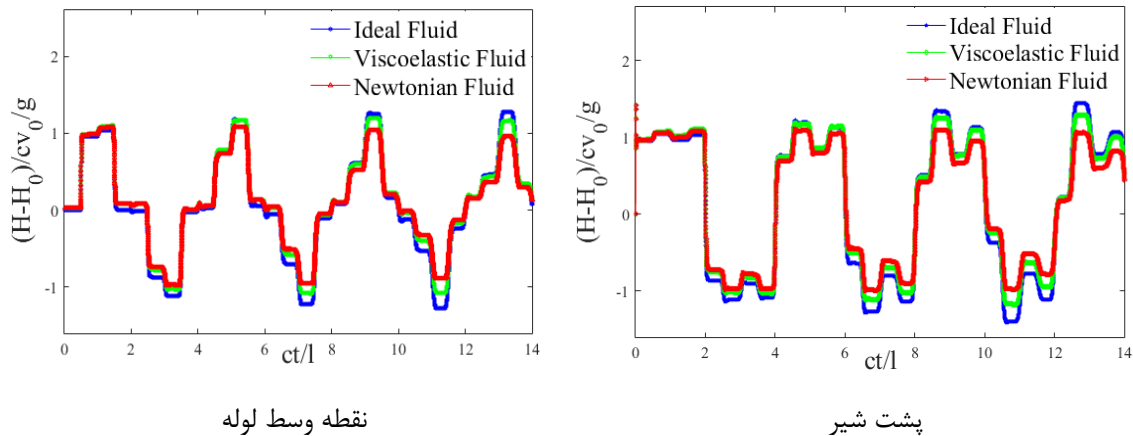
جدول ۵-۱- مشخصات سیال و ویژگیهای فیزیکی سیستم	
۳۶/۰۹	طول لوله (m)
۰/۱۲۸	سرعت متوسط (m/s)
۱۳۲۴	سرعت موج (m/s)
۰/۰۲۵۳	قطر لوله (m)
۲۲۰۰	وزن مخصوص محلول ( $\text{kg/m}^3$ )
۵۲۸۰/۵	سرعت موج تنشی (m/s)
۷۹۰۰	جرم مخصوص لوله ( $\text{kg/m}^3$ )
۲۱۰	مدول یانگ لوله (Gpa)
۰/۳	نسبت پواسون
۰/۷۸	ضریب دارسی-ویسباخ
۸۰	عدد رینولدز
۰/۶	نسبت ویسکوزیته
$۹/۶۶ \times 10^{-۵}$	عدد ماخ
۱۰	عدد دپورا

## ۵-۶-۱- کوبله اتصال

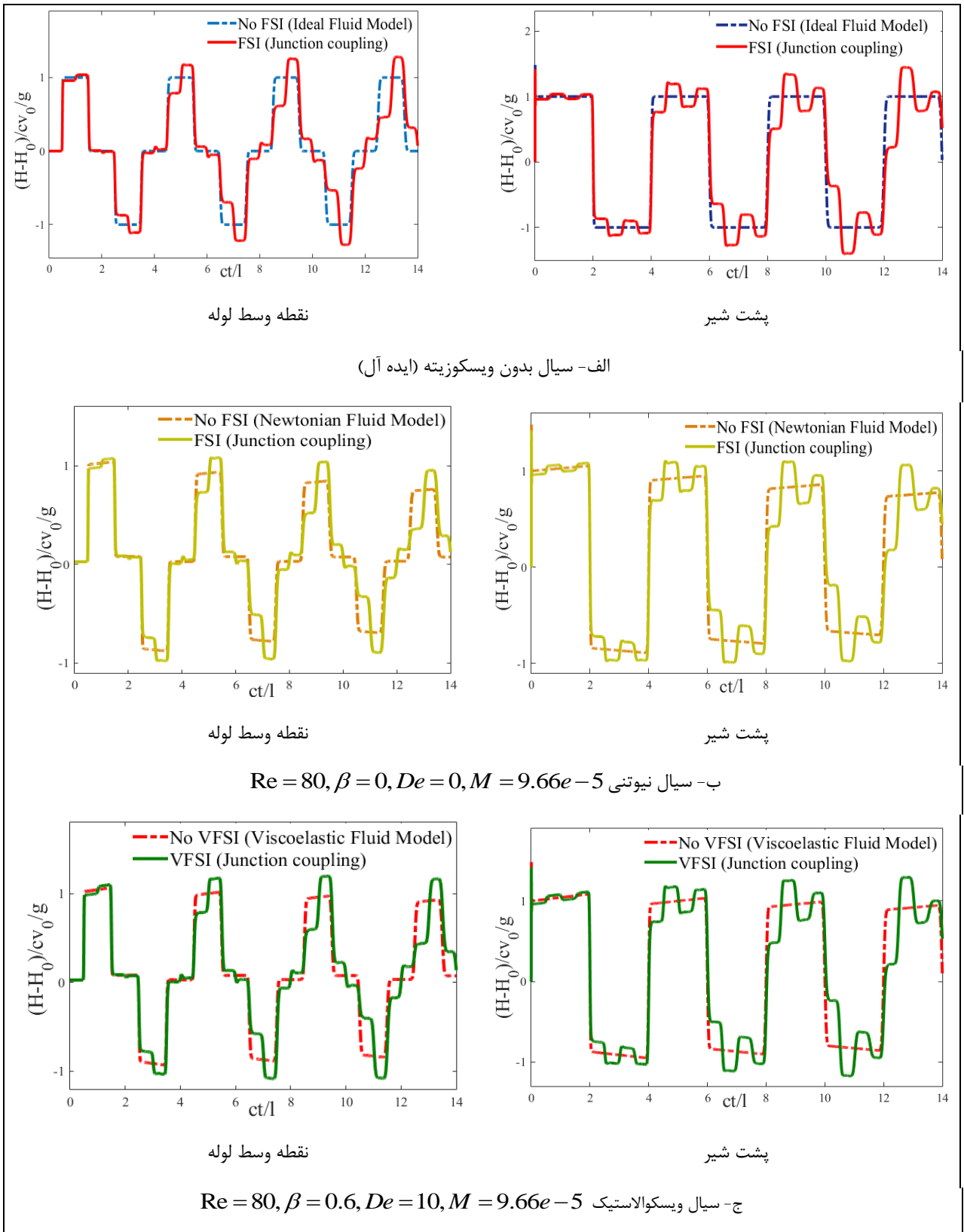
کوبلینگ اتصال که در اثر تغییر در اندازه و جهت سرعت جریان، رخ می‌دهد، به دلیل شرایط مرزی که به سازه امکان ارتعاش در محل پشت شیر را می‌دهد، معمولاً مهم‌ترین نوع کوبله در بررسی اثر تداخلی سیال-سازه به‌شمار می‌رود. به جهت بررسی تاثیر این کوبله بر اتفاقات ناشی از ضربه قوچ در



لوله، رفتار سیال، مشابه فصل قبل، در سه حالت سیال ایده‌آل (بدون اصطکاک)، نیوتنی و ویسکوالاستیک در دو نقطه پشت شیر و وسط لوله مورد مقایسه قرار گرفته و در شکل (۵-۱) نشان داده می‌شود.

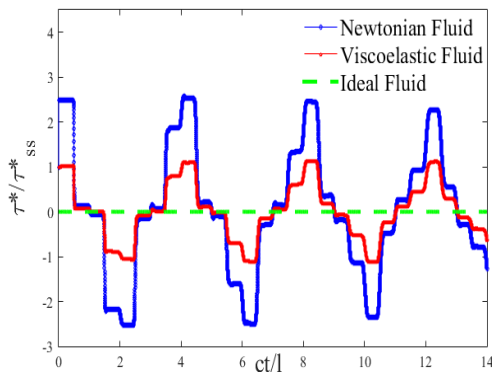


شکل ۵-۱- مقایسه تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله اتصال شکل (۵-۱) نشان می‌دهد که در حالت اعمال اثرات کوپله اتصال، ضمن مشاهده تغییرات محسوس در رفتار موج فشاری ناشی از بستن سریع شیر، عملکرد رفتاری سیالات از نظر ارتفاع موج فشاری و نیز زمان میرایی جریان انتقالی ایجاد شده مشابه حالت مدلسازی ضربه قوچ در این سیالات، بدون اعمال اثرات تداخلی سازه می‌باشد. در واقع، هر دو نکته که در تفسیر رفتار سیالات در شرایط رخداد ضربه قوچ در فصل پیش ذکر گردید، (پدیده لاین پکینگ در پشت شیر و نیز طولانی تر بودن زمان میرایی موج فشاری در سیالات ویسکوالاستیک در مقایسه با سیالات نیوتنی) در این شکل نیز مشاهده می‌شود. در ادامه، به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر کوپله اتصال بر هر یک از حالات سیال (سیال ایده‌آل، نیوتنی و ویسکوالاستیک) به تفکیک بررسی و با حالت بدون اثرات تداخلی مورد مقایسه قرار داده می‌شود.

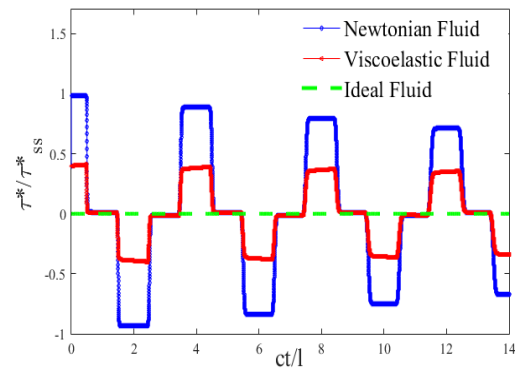


شکل ۵-۲- نمایش تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله اتصال

بخشهای مختلف شکل (۲-۵) نشان می‌دهند که روند تغییرات رفتار موج فشاری با در نظر گرفتن اثر تداخلی کوپلینگ اتصال، در سه حالت سیال، تقریباً مشابه است. آنچه در محل پشت شیر، برای هر سه حالت سیال مشاهده می‌شود، کاهش جزئی فشار از میزان فشار متداول ژوکوفسکی در اثر بسته شدن ناگهانی شیر می‌باشد. به نظر می‌رسد این مساله به شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای کوپلینگ اتصال، مرتبط است. با توجه به اینکه در این نوع کوپلینگ، به شیر، اجازه ارتعاش داده می‌شود، افزایش فشار ایجاد شده ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر، باعث می‌شود که شیر به سمت پایین دست کشیده شود، بنابراین، یک مخزن ذخیره اضافی برای مایع ایجاد می‌شود که منتج به ایجاد فشار اولیه پایین تر می‌شود. در واقع، این حرکت شیر، باعث می‌شود که سیال، به طور کامل، متوقف نشود و با سرعتی معادل سرعت شیر حرکت کند، بنابراین، انرژی جنبشی در محل پشت شیر به طور کامل به ارتفاع فشاری تبدیل نمی‌شود و بنابراین ارتفاع فشار در محل پشت شیر از میزان فشار در حالت بدون اثرات تداخلی که در آن، سرعت سیال در پشت شیر کاملاً به صفر رسیده بود، کمتر خواهد بود. موج تنش محوری ناشی از حرکت شیر، در طول لوله، شیر را به عقب، هل می‌دهد و این عمل پمپی همچنان ادامه پیدا می‌کند تا جریان، به تدریج، میرا شود. این مساله در مطالعه ای که توسط برگانت و همکاران در مورد سیال نیوتنی در شرایط کوپلینگ اتصال انجام شد، نیز مشاهده گردید. [Bergant et. al. 2008]. تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ، نیز تحت تاثیر کوپله اتصال، دستخوش تغییراتی می‌شوند. در ادامه، مقایسه‌ای بین تنشهای برشی ناشی از وقوع ضربه قوچ در نقطه وسط لوله با در نظر گرفتن اثرات تداخلی کوپلینگ اتصال، انجام و در شکل شماره (۳-۵) نشان داده می‌شود.



ب- با در نظر گرفتن اثرات تداخلی کوپله اتصال



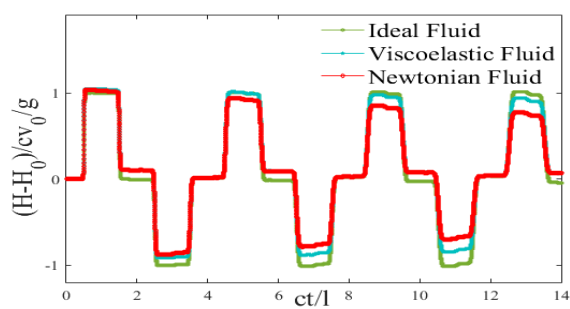
الف- بدون در نظر گرفتن اثرات تداخلی

شکل ۵-۳- مقایسه تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محل نقطه وسط لوله

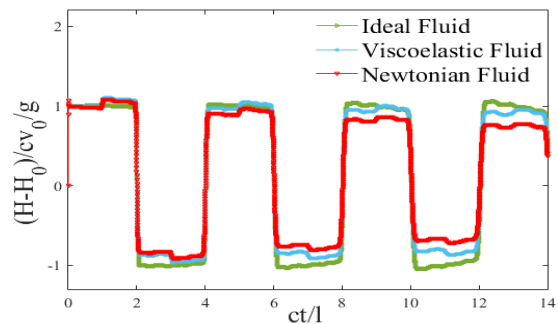
با توجه به شکل (۵-۳)، روند ترتیبی کاهش تنشهای برشی در سه حالت سیال، مشابه حالت مدلسازی ضربه قوچ این سیالات، بدون اثرات تداخلی می‌باشد. در واقع، ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش به عنوان یک خاصیت جامد گونه سیالات ویسکو الاستیک، ضمن ذخیره سازی انرژی پتانسیل تحمیل شده بر سیستم، کاهش تنشهای برشی در طول لوله را در پی دارد. با دقت در شکل (۵-۳)، مشخص می‌شود که میزان تنشها با در نظر گرفتن اثرات کوپله اتصال در مورد هر سیال، تقریباً به دوبرابر افزایش یافته است.

#### ۵-۶-۲- کوپله پواسون

کوپله پواسون، که به میزان جابجایی و تغییر شکل محوری ناشی از نسبت پواسون مصالح لوله نسبت داده می‌شود، معمولاً از تاثیر کمتری نسبت به کوپله اتصال، برخوردار است که یکی از دلایل مهم آن، شرایط مرزی تعریف شده برای آن می‌باشد که بر اساس آن، بر خلاف کوپله اتصال، به شیر اجازه ارتعاش داده نمی‌شود و سرعت جریان و سرعت محوری لوله در محل پشت شیر، معادل صفر در نظر گرفته می‌شود. جهت بررسی دقیق تاثیرات کوپله پواسون، با به کارگیری معادلات سازه و سیال در بخش اثرات تداخلی و همچنین اعمال شرایط مرزی مطابق روابط (۵-۴۳) و (۵-۴۴) مقادیر تاریخچه فشاری ضربه قوچ در این شرایط مطابق شکل (۵-۴)، قابل استحصال است.

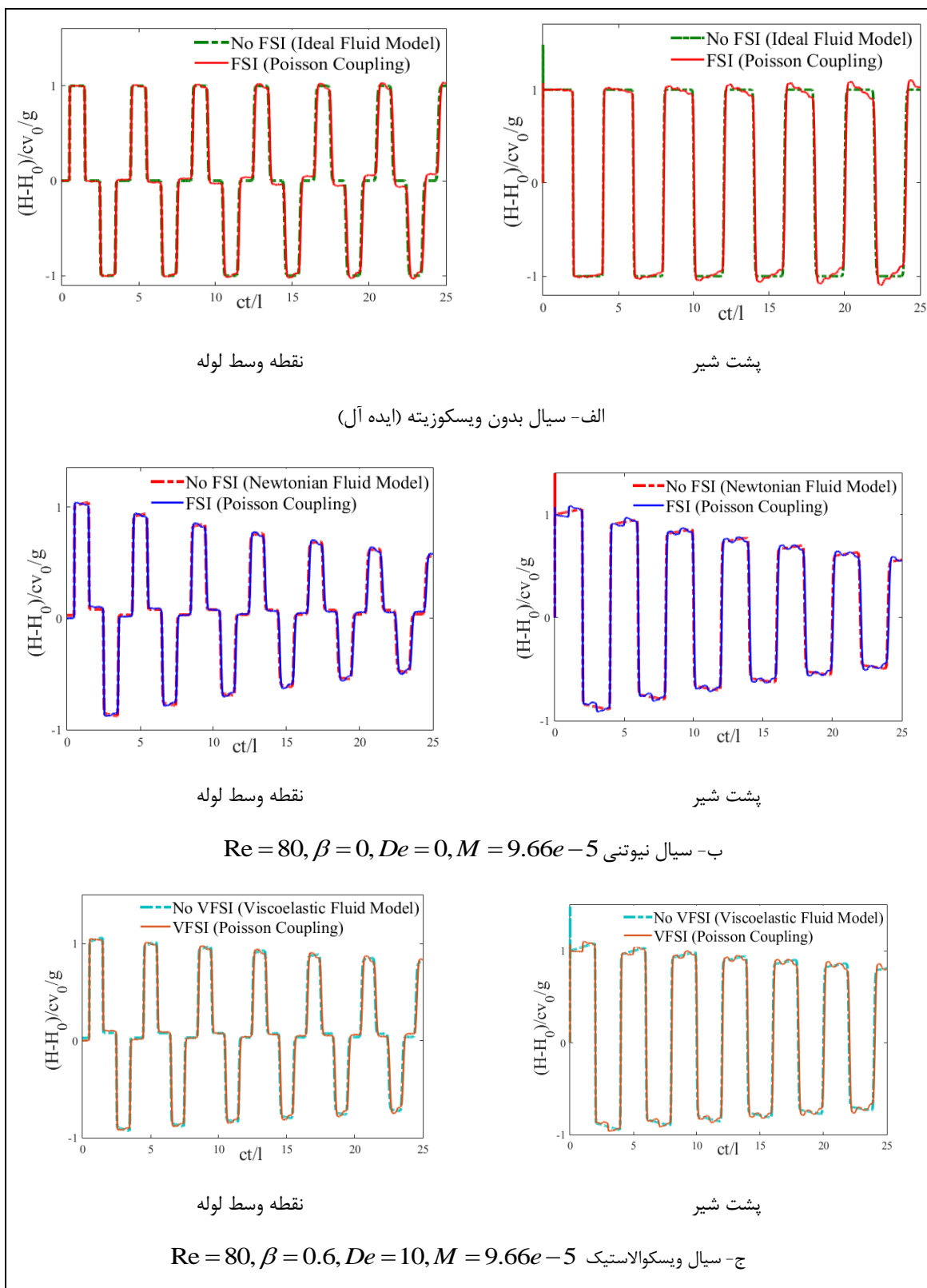


وسط لوله



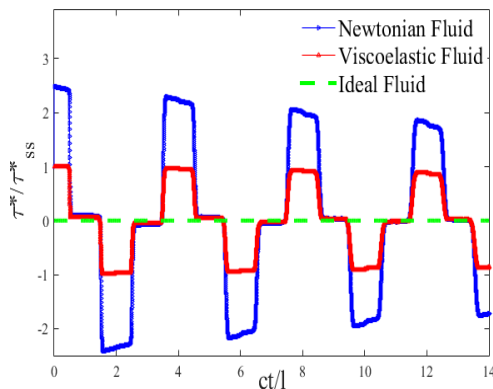
پشت شیر

شکل ۴-۵ مقایسه تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله پواسون با توجه به شکل (۴-۵)، روند ترتیبی سیالات در حالات ایده آل، نیوتنی و ویسکوالاستیک، از نظر ارتفاع موج فشاری مشابه مدلسازی ضربه قوچ این سیالات، بدون در نظر گرفتن اثر تداخلی و همچنین کوپله اتصال است. به جهت بررسی دقیق تر میزان تفاوت در تاریخچه فشاری این سیالات، در ادامه هر یک از سیالات، به تفکیک با حالت بدون اثر تداخلی مورد مقایسه قرار می گیرند.

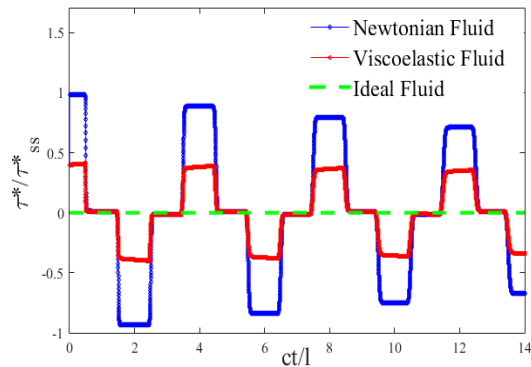


شکل ۵-۵- نمایش تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوبله پواسون

همانطور که در بخشهای شکل ۵-۵- مشاهده می‌شود، کوپله پواسون، در ابتدای حرکت موج فشاری در محل پشت شیر، تاثیر کمی از خود نشان می‌دهد که آن هم، در مقایسه با تاثیر پذیری ضعیف در نقطه وسط لوله، حائز اهمیت است. در واقع، مکانیسم عملکرد این کوپله به این صورت است که پس از بسته شدن سریع شیر، فشار سیال در حال حرکت در محل پشت شیر افزایش می‌یابد و این مساله باعث انبساط شعاعی جداره لوله می‌شود. به طور همزمان با انبساط شعاعی در لوله یک انقباض محوری در لوله اتفاق می‌افتد که منجر به ارسال یک موج تنشی<sup>۱</sup> و نهایتاً تغییر در فشار سیال می‌شود. در ادامه تنشهای برشی ناشی از وقوع ضربه قوچ در نقطه وسط لوله با در نظر گرفتن اثرات تداخلی کوپلینگ پواسون، بررسی و در شکل شماره (۵-۶) نشان داده می‌شود.



ب- با در نظر گرفتن اثرات تداخلی کوپله پواسون



الف- بدون در نظر گرفتن اثرات تداخلی

شکل ۵-۶- مقایسه تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محل نقطه وسط لوله

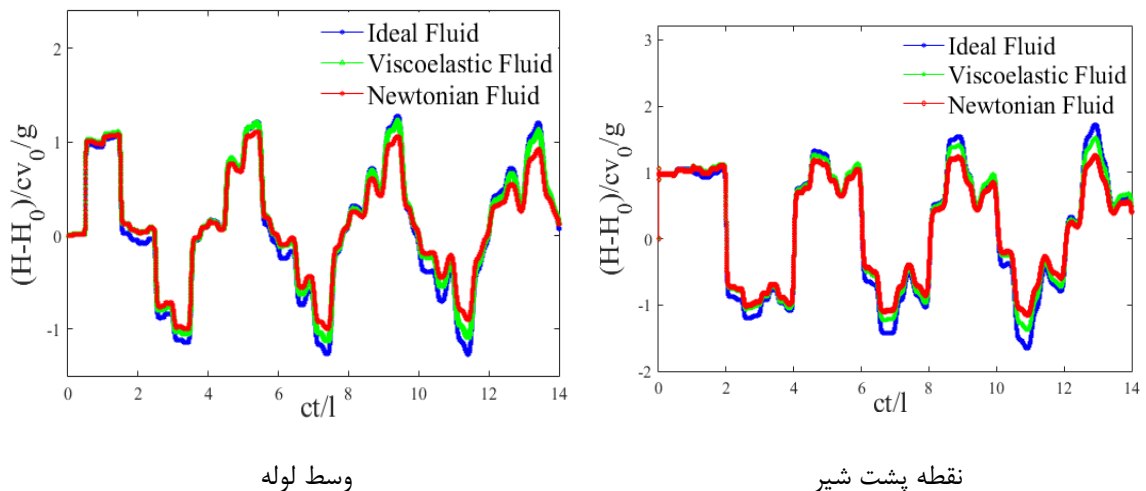
با توجه به شکل (۵-۶) در هر دو حالت الف و ب، سیال ویسکوالاستیک تنشهای برشی کمتری را نسبت به سیال نیوتنی در طول لوله نمایش می‌دهد که دلیل آن همانطور که در بخشهای پیش ذکر گردید، به خاصیت الاستیکی این سیال ارتباط داده می‌شود. این خاصیت که از آن به ویژگی ثابت زمان رهایی از تنش یاد می‌شود، بخش عمده ای از انرژی وارد شده به سیستم در اثر قطع ناگهانی جریان را در خود ذخیره می‌کند و مانع از هدر دهی آن می‌شود. همین مساله باعث می‌شود که تنشهای برشی ناشی از رخداد پدیده ضربه قوچ در طول لوله تا حد زیادی در این سیالات، کاهش یابد.

<sup>1</sup> stress wave

این نکته از طریق روابط ریاضی حاکم بر مدلسازی این سیالات، نیز قابل اثبات است (پیوست ۲). از طرفی با دقت در شکل ۵-۶ مشخص می‌شود که در حالت بررسی اثرات کوپله پواسون، میزان تنشها به دلیل دخالت اثرات سرعت موج تنشی و عبارتهای دارای نسبت پواسون که کوپله پواسون را تشدید می‌کند، در هر سیال، تقریبا به دو برابر افزایش پیدا می‌کند.

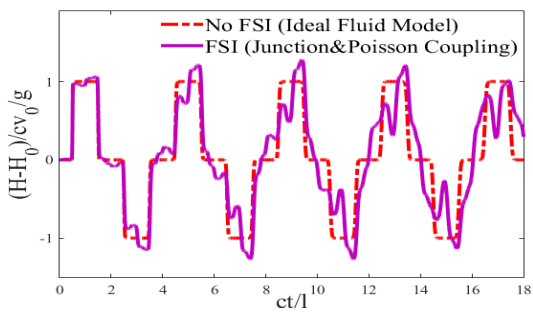
### ۵-۶-۳- کوپله پواسون و اتصال

نوع دیگری از کوپله که معمولا در بررسی اثرات تداخلی در کنار سایر کوپله‌ها بررسی می‌شود، کوپله همزمان اتصال و پواسون می‌باشد. در این حالت، معادلات حاکم بر سیستم، معادلات کوپله پواسون و شرایط مرزی وارد شده برسیستم، شرایط مرزی کوپله اتصال در نظر گرفته می‌شود. در ادامه تاثیر این نوع کوپله در سه حالت سیال مورد بررسی، در قالب نمودار نشان داده می‌شود.

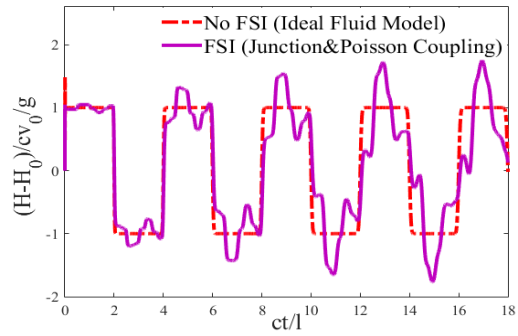


شکل ۵-۷- مقایسه تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله همزمان اتصال و پواسون با توجه به شکل (۵-۷) بازهم روند ترتیبی کاهش ارتفاع نوسانات موج فشاری در سه نوع سیال ایده‌آل، نیوتنی و ویسکوالاستیک، با مشخصات ذکر شده، به همان صورت مدلسازی ضربه قوچ این سیالات در فصل گذشته و همچنین کوپله اتصال و کوپله پواسون تفکیک شده در همین فصل، تکرار گردید. به منظور بررسی دقیق تر، رفتار هر یک از سیالات، به تفکیک تحت این کوپله در شکل زیر نمایش داده می‌شود و با حالت بدون اثر تداخلی مقایسه می‌گردد.



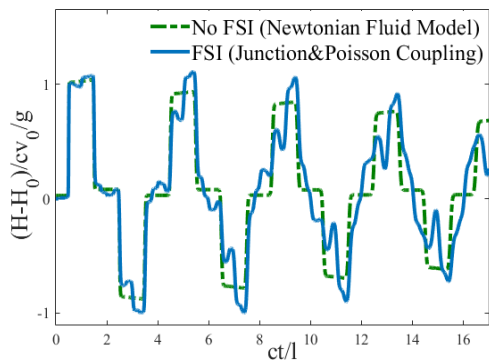


نقطه وسط لوله

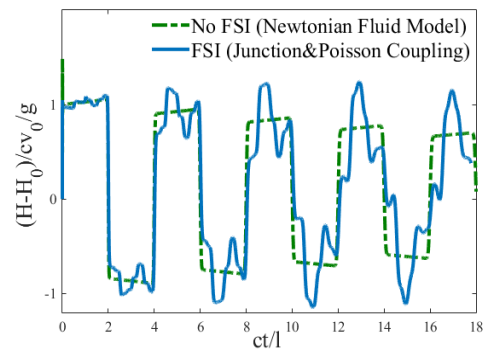


پشت شیر

الف- سیال بدون ویسکوزیته (ایده آل)

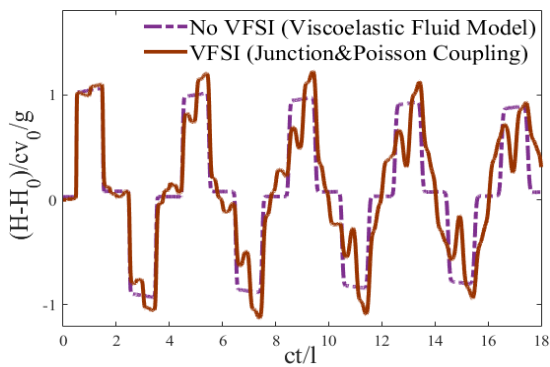


نقطه وسط لوله

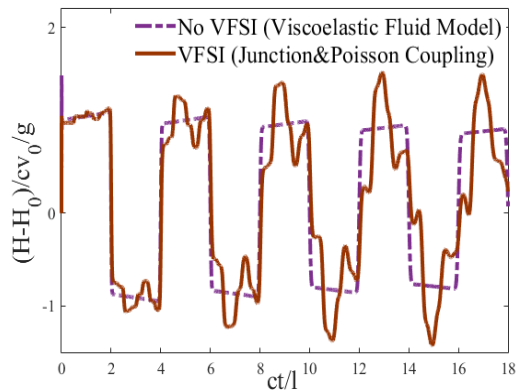


پشت شیر

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



نقطه وسط لوله

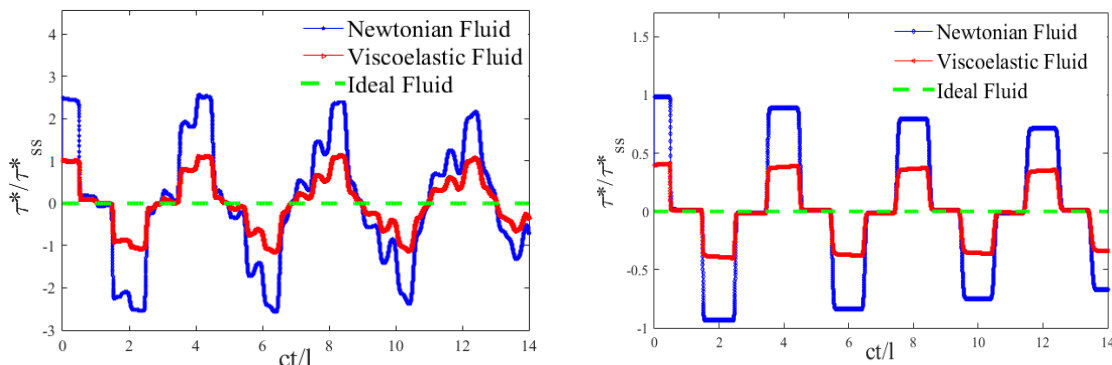


پشت شیر

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

شکل ۵-۸- نمایش تاریخچه فشار سیال در حالات مختلف در حین رخداد ضربه قوچ در کوپله پواسون و اتصال

در شکل (۵-۸) تاثیرات ترکیب شکل (۵-۲) و (۵-۵)، به وضوح، قابل مشاهده است. نکات قابل ملاحظه از یک سو، پایین آمدن جزئی فشار اولیه در محل پشت شیر، می باشد که نشان از اعمال شرایط مرزی کوپله اتصال دارد که بنا بر آن به شیر اجازه ارتعاش داده می شود که همین مساله، کاهش جزئی ارتفاع فشار اولیه پس از بسته شدن سریع شیر را به همراه دارد. از سویی دیگر، شکل نامنظم نوسانات ایجاد شده نشانگر ترکیب معادلات پواسون حاوی عبارتهای سرعت موج تنشی و.. با شرایط مرزی کوپله اتصال می باشد. در ادامه، تنشهای برشی پس از اعمال این کوپله ترکیبی در نقطه وسط لوله بررسی و با حالت بدون اثرات کوپله، مورد مقایسه قرار می گیرد.



ب- با در نظر گرفتن اثرات کوپله همزمان پواسون و اتصال

الف- بدون در نظر گرفتن اثرات تداخلی

شکل ۵-۹- مقایسه تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در محل نقطه وسط لوله

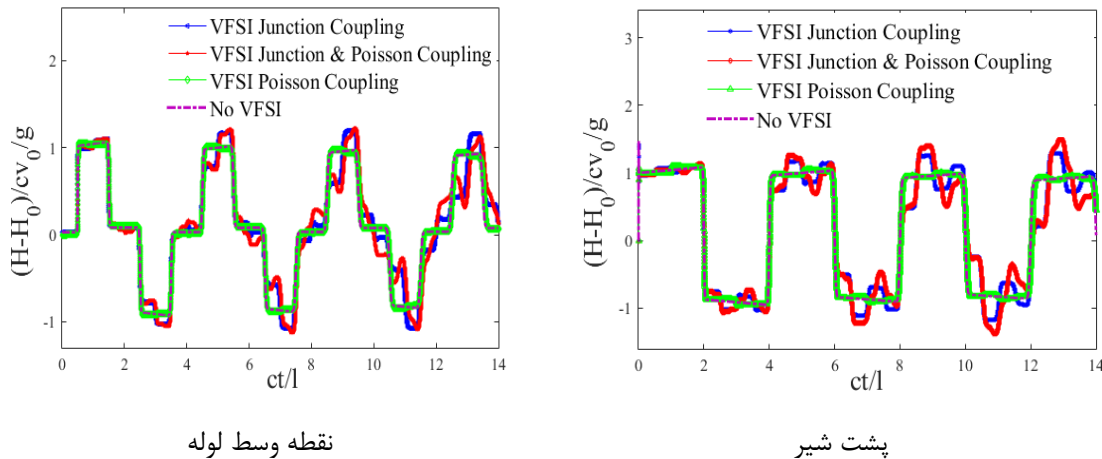
مقایسه بخشهای الف و ب در شکل ۵-۹ نشان می دهد که در کوپله همزمان اتصال و پواسون نیز، مانند آنچه در بررسی کوپله تفکیکی اتصال و پواسون مشاهده گردید، ویژگی الاستیکی در سیال ویسکوالاستیک، خاصیت کم کنندگی در تنشهای برشی ناشی از ضربه قوچ در لوله را به همراه دارد، از طرفی با اعمال اثرات کوپله ترکیبی در بخش (ب)، ضمن افزایش یافتن میزان تنشها تا حدود بیش از دو برابر، نوسانات ظاهری تنشها نیز در مقاطع زمانی مختلف، افزایش می یابد.

### ۵-۷- مقایسه تاثیر کوپله ها بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک

در این بخش، با توجه به موضوع رساله حاضر که به بررسی مسایل اندرکنش سیال ویسکوالاستیک-سازه<sup>۱</sup> در حین وقوع ضربه قوچ می پردازد، سیال ویسکوالاستیک مورد بحث به صورت منفک، مورد

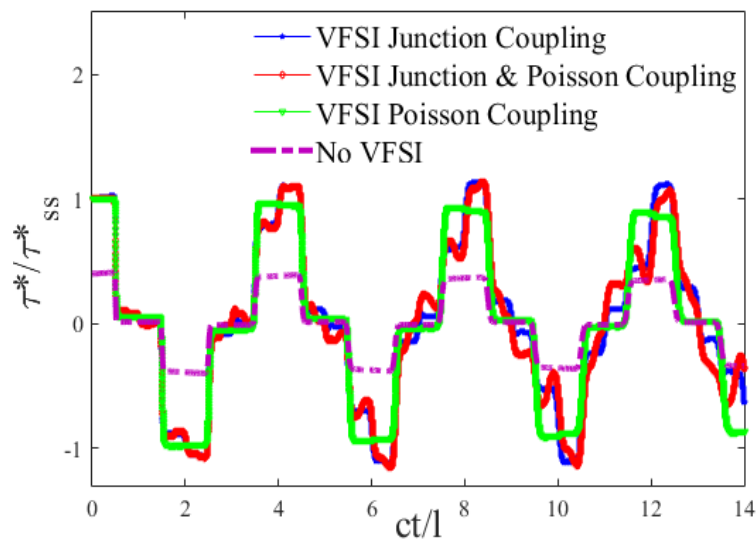
<sup>۱</sup> Viscoelastic Fluid Structure Interaction (VFSI)

بررسی و تاثیر کوبله‌های مختلف بر جریان انتقالی ناشی از این سیال، مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۵-۱۰- مقایسه تاریخچه فشار حین وقوع ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک در کوبلینگهای مختلف

با توجه به شکل ۵-۱۰، در بررسی برهمکنش سیال ویسکوالاستیک-سازه در طی رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، کوبله ترکیبی اتصال و پواسون و پس از آن، کوبله اتصال بیشترین تاثیر و کوبله پواسون نیز کمترین تاثیر را بر ارتفاع موج فشاری نمایش می‌دهند. همانطور که در بخشهای معرفی این کوبله‌ها ذکر گردید، شرایط مرزی تعریف شده برای کوبله اتصال، به‌گونه‌ای است که به شیر اجازه ارتعاش در سیستم داده می‌شود و همین مساله باعث تاثیرگیری شدید سیستم از اثرات این کوبله می‌شود که معمولا در محلهای تغییر مومنوم جریان، نظیر پشت شیرها، تقاطعها، زانویی‌ها و.. اتفاق می‌افتد. اما در کوبله پواسون، شرایط مرزی تحمیل شده به سیستم از تقید بالایی برخوردار است و با تحمیل شرط گیردار نمودن سازه در محلهای ذکر شده، میزان تاثیرپذیری سیستم از این کوبله به حداقل می‌رسد. کوبله پواسون به نسبت پواسون مصالح لوله و میزان تغییر شکلهای شعاعی لوله وابسته است که معمولا در جریانهایی با سرعت بالا از نمود بیشتری برخوردار است. همچنین تنشهای برشی وارد بر سیستم نیز در اثر اعمال کوبله‌ها دستخوش تغییراتی می‌شوند که در شکل ۵-۱۱ میزان این تنشها در نقطه وسط لوله نمایش داده می‌شود.



شکل ۵-۱۱- مقایسه تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک در کوپلینگهای مختلف در نقطه وسط لوله

با توجه به شکل ۵-۱۱- کمترین میزان تنشهای برشی وارد بر لوله مربوط به زمانی است که اثرات کوپله بر سیستم اعمال نمی‌شود، پس از اعمال اثرات کوپله، میزان تنشها تقریباً به دو برابر افزایش می‌یابد. در مقایسه جزئیات تنشهای برشی، کوپله پواسون و کوپله اتصال، به طور تقریبی به ترتیب کمترین و بیشترین میزان تنش را به خود اختصاص می‌دهند که دلیل آن، به طور مستقیم به تاثیر پذیری سیستم از اثرات آنها ارتباط داده می‌شود.

## فصل ششم

### خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در رساله 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 بارافعال آن توقف ناگهانی جریان در لوله که تبعات ناشی از رخداد ضربه قوچ را به همراه دارد، امری محتمل به‌شمار می‌رود. به‌این 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 غیر-نیوتنی 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. از طرفی با توجه به اینکه رخداد پدیده ضربه قوچ، به‌طور معمول، ارتعاش جداره لوله را در پی دارد و در ابعاد وسیع ممکن است، منجر به آسیبهای جدی به سیستم لوله شود، بررسی اثرات تداخلی سیال-سازه طی کوپله‌های مختلف، نیز در کنار مدلسازی این پدیده، باید مورد توجه 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 بی‌بعد 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 و اثرات اندر کنش سیال-سازه در حین وقوع آن، اختصاص داده شد که به مطالبی نظیر "چگونگی رخداد پدیده ضربه قوچ در لوله، سوابق مطالعاتی صورت گرفته در این زمینه و همچنین بررسی تاریخیچه مطالعات انجام گرفته در زمینه

اثرات اندرکنش سیال- سازه در طول ضربه قوچ " 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 به‌کار رفته در مدلسازی ضربه‌قوچ، 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 تبیین‌کننده رفتار سیالات ویسکوالاستیک، خانواده مدل‌های اولدروید می‌باشد، از معادلات این مدل، به‌عنوان معادلات ساختاری در مدلسازی سیال ویسکوالاستیک رساله حاضر استفاده گردید. به‌همین منظور، بخش دوم از فصل سوم رساله 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 به‌طور 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. پس از استحصال معادلات حاکم بر مساله، در گام بعد، می‌بایست، 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 می‌گرفت. از این سو، فصل چهارم نیز به چند بخش تقسیم گردید، در بخش نخست، روش عددی تفاضل محدود  $LXF$  به‌عنوان روش عددی مورد استفاده در این رساله با تشریح مزایا و محدودیتها به‌طور کامل، معرفی گردید و سپس معادلات حاکم بر مساله با این روش، گسسته سازی شده و در قالب یک مساله شامل سیستم شیر، لوله و مخزن ضربه‌قوچ سیال ویسکوالاستیک، مدلسازی گردید. یکی از نکاتی که در انتهای مدلسازی مورد بررسی قرار گرفت، بی‌بعد سازی معادلات و استخراج پارامترهای بی‌بعد حاکم بر معادلات بود. پس از بی‌بعد سازی مشخص گردید که معادلات حاکم بر ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، متأثر از اعداد بی‌بعد دبور، رینولدز، ماخ و نسبت ویسکوزیته

(بتا) می‌باشد 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 دقیق‌تر تاثیر سیال ویسکوالاستیک بر اتفاقات ضربه قوچ، در همه موارد، رفتار سیال ویسکوالاستیک با سیال ایده‌آل (بدون ویسکوزیته) و سیال نیوتنی (با ویسکوزیته مشابه سیال ویسکوالاستیک) مقایسه و نتایج حاصله مورد بحث و بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی اثرات اندرکنش سیال-سازه در حین وقوع ضربه قوچ در لوله، در فصل پنجم، ابتدا به تشریح اهمیت توجه به این مساله پرداخته شد و سپس دیدگاههای رایج در زمینه آنالیز کوپله شامل تعداد معادلات در لوله‌ها تعریف گردید و نهایتاً، مدلسازی عددی در مورد محلول پلیمری که تحت کوپله‌های مختلف اتصال و کوپله پواسون و همچنین کوپله همزمان اتصال و پواسون، قرار گرفته انجام گردید و نتایجبه دست آمده در مورد اثرات سیال-سازه در این کوپله‌ها در سیالات ایده‌آل، نیوتنی و ویسکوالاستیک با هم مقایسه و مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

## ۶-۲- نتیجه گیری

نتایج کلیبه دست‌آمده از رساله حاضر را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. در بخش اول، نتایج حاصل از مدلسازی ضربه‌قوچ سیال ویسکوالاستیک بدون اثرات تداخلی تشریح می‌گردد که در آن، تفاوت‌های رفتاری سیال ویسکوالاستیک و سیال نیوتنی در حین رخداد ضربه قوچ در لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش دوم، نتایج حاصل از مدلسازی ضربه‌قوچ سیال ویسکوالاستیک با درنظر گرفتن اثرات اندرکنش سیال-سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن، رفتار جریان تحت تاثیر کوپله‌های مختلف مدلسازی می‌شود.

## ۶-۲-۱- نتایج کلی مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک (چکش سیال ویسکوالاستیک)

تفاوت رفتار سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک را در حین رخداد ضربه قوچ در لوله می‌توان در چندین بخش مورد بررسی قرار داد:



## ۶-۲-۱-۱- 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 اولدرویید-بی استفاده گردید. بی بعد سازی معادلات نشان می‌دهد که در این حالت، معادلات حاکم، متاثر از اعداد بی بعد ماخ، رینولدز، دپورا و نسبت ویسکوزیته هستند.

## ۶-۲-۱-۲- 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 می‌رسد. 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 می‌شود، سریعتر اتفاق می‌افتد. علت این مساله به ویژگی ثابت زمانی رهایی از تنش در سیالات ویسکوالاستیک ارتباط داده می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که انرژی پتانسیل تحمیل شده به سیستم در سیال ذخیره گردد و تمایل به دمپینگ کاهش یابد.

## ۶-۲-۱-۳- پدیده لاین پکینگ

پدیده لاین پکینگ که به میزان تجاوز ارتفاع فشار اولیه در محل پشت شیر از فشار ژوکوسکی اطلاق می‌شود، در مدلسازی ضربه قوچ هر دو نوع سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک مشاهده گردید. آنچه در بررسی تفاوت رفتاری این دو نوع سیال، حائز اهمیت است، این است که در سیال ویسکوالاستیک این میزان تجاوز از فشار ژوکوسکی در مقایسه با سیال نیوتنی کمی بیشتر است که با توجه به یکسان در نظر گرفتن ویسکوزیته این دو نوع سیال و سایر مشخصات فیزیکی، این مساله تنها به دارا بودن ویژگی الاستیک در این سیالات ارتباط داده می‌شود. نگهداشت انرژی و عدم تمایل به دمپینگ که از

خواص بخش الاستیکی یک سیال ویسکوالاستیک می‌باشد، باعث می‌شود که در این سیالات، این پدیده با وضوح بیشتری مشاهده گردد.

#### ۶-۲-۱-۴- تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ در لوله

در ضربه قوچ کلاسیک، در محاسبه تنشهای برشی از روابط جریان پایدار استفاده می‌شود که بر این اساس، تنش های برشی تابعی از ویسکوزیته سیال محسوب می‌شوند، در حالی که در ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، در محاسبه تنشهای برشی از روابط معادلات ساختاری استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر از روابط مدل اولدرویید-بی استفاده گردید. بر این اساس، تنش های برشی تابعی از ویسکوزیته، ثابت زمان رهایی از تنش و نیز نسبت ویسکوزیته محلول محسوب می‌شوند. 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 می‌شود که میزان تنشهای برشی ناشی از این پدیده در لوله در مقایسه با سیالات نیوتنی تا حد زیادی کاهش یابد.

#### ۶-۲-۲-۲- نتایج کلی مدلسازی ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن اثرات تداخلی

به‌منظور بررسی اثرات اندرکنش سیال-سازه در حین وقوع ضربه قوچ در لوله، پس از بازنویسی معادلات ضربه قوچ ویسکوالاستیک و دخالت معادلات ارتعاش محوری سازه، کوپله‌های مختلف به همراه معادلات و شرایط مرزی هر یک تعریف گردید. در ادامه، مدلسازی عددی در مورد محلول پلیمری به عنوان یک سیال ویسکوالاستیک که تحت کوپله‌های اتصال و پواسون و کوپله همزمان اتصال و پواسون قرار گرفته انجام گردید و رفتار آن با سیال ایده‌آل و سیال نیوتنی با ویسکوزیته مشابه مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج کلی زیر را در بر داشت:

- در مورد کوپله اتصال که معمولاً مهم‌ترین نوع کوپله در بررسی اثر تداخلی سیال-سازه به-شمار می‌رود، بررسیها نشان داد که روند تغییرات رفتار موج فشاری با در نظر گرفتن اثر تداخلی این کوپله، در سه حالت سیال مورد مقایسه، تقریباً مشابه است. آنچه در محل پشت

شیر، برای هر سه حالت سیال مشاهده می‌شود، کاهش جزئی فشار از میزان فشار متداول ژوکوفسکی در اثر بسته شدن ناگهانی شیر می‌باشد. به نظر می‌رسد این مساله به شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای کوپله اتصال، مرتبط است، با توجه به اینکه در این نوع کوپله، به شیر، اجازه ارتعاش داده می‌شود، افزایش فشار ایجاد شده ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر، باعث می‌شود که شیر به سمت پایین دست کشیده شود، بنابراین، یک مخزن ذخیره اضافی برای مایع ایجاد می‌شود که منتج به ایجاد فشار اولیه پایین تر می‌شود. در واقع، این حرکت شیر، باعث می‌شود که سیال، به طور کامل، متوقف نشود و با سرعتی معادل سرعت شیر حرکت کند، بنابراین، انرژی جنبشی در محل پشت شیر به طور کامل به ارتفاع فشاری تبدیل نمی‌شود و بنابراین ارتفاع فشار در محل پشت شیر از میزان فشار در حالت بدون اثرات تداخلی که در آن، سرعت سیال در پشت شیر کاملاً به صفر رسیده بود، کمتر خواهد بود. موج تنش محوری ناشی از حرکت شیر، در طول لوله، شیر را به عقب، هل می‌دهد و این عمل پمپی همچنان ادامه پیدا می‌کند تا جریان، به تدریج، میرا شود. از طرفی تنشهای برشی ناشی از رخداد ضربه قوچ، نیز تحت تاثیر کوپله اتصال، دستخوش تغییراتی می‌شوند. روند ترتیبی کاهش تنشهای برشی در سه حالت سیال، مشابه حالت مدلسازی ضربه قوچ این سیالات، بدون اثرات تداخلی می‌باشد. با دقت در نتایج، مشخص گردید که میزان تنشها در مورد هر سیال، با در نظر گرفتن اثرات کوپله اتصال، تقریباً به دوبرابر افزایش یافته است.

- در مورد کوپله پواسون، که به میزان جابجایی و تغییر شکل محوری ناشی از نسبت پواسون مصالح لوله نسبت داده می‌شود، بررسیها نشان داد که کوپله پواسون، در ابتدای حرکت موج فشاری در محل پشت شیر، تاثیر کمی از خود نشان می‌دهد که آن هم، در مقایسه با تاثیر پذیری ضعیف در نقطه وسط لوله، حائز اهمیت است. در واقع، مکانیسم عملکرد این کوپله به این صورت است که پس از بسته شدن سریع شیر، فشار سیال در حال حرکت در محل پشت شیر افزایش می‌یابد و این مساله باعث انبساط شعاعی جداره لوله می‌شود. به طور همزمان با

انبساط شعاعی در لوله یک انقباض محوری در لوله اتفاق می‌افتد که منجر به ارسال یک موج تنشی و نهایتاً تغییر در فشار سیال می‌شود. تاثیرات کوپله پواسون در ابتدا خیلی کوچک هستند و به تدریج در طول لوله زیاد می‌شوند. از طرفی محاسبه میزان تنشهای برشی نشان داد که با اعمال اثرات کوپله پواسون، میزان تنشها در سیالات نیوتنی و ویسکوالاستیک مورد مقایسه تقریباً به دو برابر، افزایش یافته است که دلیل آن، می‌تواند به دخالت اثرات سرعت موج تنشی و عبارتهای دارای نسبت پواسون که کوپله پواسون را تشدید می‌کند ارتباط داده شود.

- در مورد اعمال کوپله همزمان اتصال و پواسون که معادلات حاکم بر سیستم، معادلات کوپله پواسون و شرایط مرزی وارد شده برسیستم، شرایط مرزی کوپله اتصال در نظر گرفته می‌شود، بررسیها نشان داد که روند ترتیبی کاهش ارتفاع نوسانات موج فشاری در سه نوع سیال ایده‌آل، نیوتنی و ویسکوالاستیک، مشابه کوپله اتصال و کوپله پواسون تفکیک شده است. شکل نامنظم نوسانات رفتاری موج فشاری در این حالت، به تاثیرات ترکیب کوپله‌ها ارتباط داده می‌شود. پایین آمدن جزئی فشار اولیه در محل پشت شیر، نشان از اعمال شرایط مرزی کوپله اتصال و شکل نامنظم نوسانات ایجاد شده نشانگر ترکیب معادلات پواسون حاوی عبارتهای سرعت موج تنشی و.. با شرایط مرزی کوپله اتصال می‌باشد. از طرفی با اعمال اثرات کوپله ترکیبی ضمن افزایش یافتن میزان تنشها تا حدود بیش از دو برابر، نوسانات ظاهری تنش‌ها نیز در مقاطع زمانی مختلف، افزایش می‌یابد.

- در مقایسه اثرات کوپله‌ها بر برهمکنش سیال ویسکوالاستیک-سازه در طی رخداد ضربه قوچ سیال ویسکوالاستیک، کوپله ترکیبی اتصال و پواسون و پس از آن، کوپله اتصال بیشترین تاثیر و کوپله پواسون نیز کمترین تاثیر را بر ارتفاع موج فشاری نمایش می‌دهند. شرایط مرزی تعریف شده برای کوپله اتصال، به‌گونه‌ای است که به شیر اجازه ارتعاش در سیستم داده می‌شود و همین مساله باعث تاثیرگیری شدید سیستم از اثرات این کوپله می‌شود که

معمولا در محللهای تغییر مومنتوم جریان، نظیر پشت شیرها، تقاطعها، زانوبیها و.. اتفاق می افتد. اما در کوپله پواسون، شرایط مرزی تحمیل شده به سیستم از تقید بالایی برخوردار است و با تحمیل شرط گیردار نمودن سازه در محللهای ذکر شده، میزان تاثیرپذیری سیستم از این کوپله به حداقل می رسد. از طرفی در سیال ویسکوالاستیک، پس از اعمال اثرات کوپله، تفاوت زیادی در میزان تنشهای برشی ناشی از ضربه قوچ مشاهده نمی شود. با این وجود، در مقایسه جزئیات، کوپله پواسون و کوپله اصطکاک، به ترتیب کمترین و بیشترین میزان تنش را به خود اختصاص می دهند که دلیل آن، به طور مستقیم به تاثیر پذیری سیستم از اثرات آنها ارتباط داده می شود.

### ۳-۶- پیشنهادات

با توجه به این که مباحث مربوط به مدلسازی جریان میرای سیال ویسکوالاستیک در لوله ها و بررسی اثرات تداخلی سیال- سازه در حین وقوع آن، تاکنون به طور جدی مورد مطالعه قرار نگرفته و تحقیقات صورت گرفته تاکنون، در زمینه سیالات ویسکوالاستیک به بررسی جنبه های دیگری از این سیالات محدود شده اند، زمینه های مورد بحث و تحلیل در مورد این موضوع، همچنان فراهم است. در واقع، این رساله، نخستین گام در این زمینه به شمار می رود که به همین دلیل، با محدودیتهایی در اعمال فرضیات در شکل سیستم و نیز معادلات کلی حاکم بر مساله همراه بود. بی شک، انجام تحقیقات گسترده تر در این زمینه در سیستمهای پیچیده و کاهش فرضیات، می تواند به افزایش دقت نتایج دست آمده از این تحقیق، کمک شایانی نماید. به همین منظور، پیشنهاداتی برای ادامه کار در این زمینه ارائه می گردد:

- 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 می شود، ضروری است که برای کاربردهای بیشتر و تکمیل مطالعات، مدل های جریان آشفته به معادلات پایه اضافه گردد تا با استفاده از آن، محدوده ی کاربرد سیالات ویسکوالاستیک و به-

طور کل، سیالات غیرنیوتنی در جریانهای غیر دائمی افزایش یابد. از سوی دیگر، با این شیوه می توان از اطلاعات بیشتری برای نتایج آزمایشگاهی و صحت سنجی روشها و مدل‌های عددی استفاده نمود.

- در رساله 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 سه ثابت 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 رساله 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 دوبعدی 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 غیر الاستیک 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 رساله 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 به‌کارگیری 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] خلیقی ف، (۱۳۹۵)، پایان نامه ارشد: بررسی عددی پدیده ضربه قوچ در شبکه لوله ها با استفاده از الگوریتم شمپاین"، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۲] شیخی نارانی م، (۱۳۷۱) "بررسی خواص، جریان، انتقال حرارت و اختلاط سیالات غیر نیوتنی"، چاپ اول، جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر، تهران.
- [۳] کرامت ع، (۱۳۸۹)، رساله دکتری: "بررسی اندرکنش سیال سازه در سیستمهای لوله ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن جدایی ستون مایع"، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۴] مجد ع، (۱۳۹۴)، رساله دکتری: "مدل سازی جریان غیر ماندگار حاوی سیال غیر نیوتنی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال سازه در سیستم لوله"، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

## منابع انگلیسی

- [1] Ahmadi A. and Keramat A. (2010) "Investigation of fluid–structure interaction with various types of junction coupling" **Journal of Fluids and Structures**, 26, 7-8, pp. 1123.
- [2] Allievi L., (1913), "Teoria del colpo d'ariete," Atti Collegio Ing. Arch. (English translation by Halmos EE 1929), "The Theory of waterhammer," Trans. ASME.
- [3] Bergant A. and Tijsseling A.S., (2001) "Parameters Affecting Water Hammer Wave Attenuation, Shape Timing", The 9th Int. Meeting of the IAHR Work Group on the Behaviour of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory Conditions, P26, Trondheim, Norway.
- [4] Bergant A., Tijsseling A., Vítkovský J.P., Covas D., Simpson A.R. and Lambert M.F. (2008) "Parameters affecting water hammer wave attenuation", shape and timing. Part 2: Case studies, **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, 46, 3, pp. 382.
- [5] Bird R.B., Armstrong R. C., and Hassager O. (1987), "Dynamics of polymeric liquids", Vol.1, 2ed, John Willey&Sons.



- [6] Bird R.B., Stewart W.E. and Lightfoot E.N. (2002), “**Transport Phenomena**”, 2ed, John Willey&Sons.
- [7] Boger D.V. and Walters K. (1993), “**Rheological phenomena in focus**”, Elsevier, Amsterdam.
- [9] Chen Z. and Barbieri R. (2012), “Editorial: Engineering Approaches to Study Cardiovascular Physiology: Modeling, Estimation, and Signal Processing”, **J. Frontiers in Physiology**, pp. 1.
- [8] Chikitkin, A.V., Rogov, B.V., Utyuzhnikov, S.V., (2015), “High-order accurate monotone compact running scheme for multidimensional hyperbolic equations” **Applied Numerical Mathematics**, 93, pp. 150.
- [10] Ferràs D. (2015) “Fluid–structure interaction in pipe coils during hydraulic transients”, The 36th IAHR World Congress 28 June – 3 July, The Hague, the Netherlands.
- [11] Gale J. and Tiselj I. (1996) “Godunov’s Method for Simulations of Fluid Structure Interaction in Piping Systems” **Journal of Pressure Vessel Technology**, 130, 3, pp. 120.
- [12] 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.
- [13] Hoffmann, K.A., Chiang, S.T., (1989), “**Computational Fluid Dynamics for Engineers**”. Engineering Education Systems, Austin, Texas, USA.
- [14] Larson R. G. (1988), “**Constitutive Equations for Polymer Melts and Solutions**”, Butterworths, Boston.
- [15] Holmboe E.L., Rouleau W.T. (1967), “The effect of viscous shear on transients in liquid lines”, **J. Basic Eng. Trans.**, 89, 1, pp. 174.
- [16] Huilgol R. R. and Phan-Thien N. (1997), “**Fluid Mechanic of Viscoelasticity**”, First Edition, Elsevier.
- [17] Joukowski, N. E., 1898, “**Memoirs of the Imperial Academy Society of St. Petersburg**,” 9, 5 (Russian translated by O Simin 1904), J. Amer. Water Works Assoc., 24, pp. 341–424.

- [18] Keramat A., Kolahi A.G., and Ahmadi A. (2013) “Waterhammer modelling of viscoelastic pipes with a time-dependent Poisson's ratio” **Journal of Fluids and Structures**, 43, 0, pp 164.
- [19] Korteweg D.J. (1878), “Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Elastischen Röhren,” **J. Ann. Phys. Chemie**, 241, 12, pp. 525.
- [20] Khalighi F., Ahmadi A. and Keramat A. (2016) “Investigation of Fluid-structure Interaction by Explicit Central Finite Difference Methods” **International Journal of Engineering**, 29, 5, pp. 590.
- [21] Liu, G.R.2002. **Mesh Free Methods: Moving Beyond the Finite Element Method**. Vol. 1 (1st edition), CRC Press: Boca Raton, USA.
- [22] Li Q., Yang K. and Zhang L. (2003) “Analytical Solution for Fluid-Structure Interaction in Liquid-Filled Pipes Subjected to Impact-Induced Water Hammer” **Journal of Engineering Mechanics**, 129, 12, pp. 1408.
- [23] Laavooij C.S., Tijsseling A. S., (1990), “Fluid Structure Interaction in Compliant Piping Systems”, 6<sup>th</sup> Int. Conference. On Pressure Surges, BHRA, P85, Cambridge , United Kingdom.
- [24] Malkin A. Y. (1994), “**Rheology Fundamentals**”, First Edition, Chem. Tech. Publishing, Toronto.
- [25] Mandani S, Norouzi M. and Shahmardan M.M. (2018) “An experimental investigation on impact process of Boger drops onto solid surfaces” **Korea-Australia Rheology J**, 30, pp. 99.
- [26] Morrison F.A. (2001), “**Understanding Rheology**”, New York Oxford University.
- [27] Oldroyd J. G. (1958), “Non-Newtonian effects in steady motion of some idealized elastic-viscous fluids”, **J. Roy.Soc.**, London Ser 245, pp. 278.
- [28] Phan-Thien N. (2002), “**Understanding Viscoelasticity**”, First Edition, Springer, Berlin.
- [29] Recktenwald G.W., (2011), “**Finite difference approximations to the heat equation**”.

- [30] 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.
- [31] Shampine L.F. (2004), “Two-step Lax-Friedrichs method” **Applied Mathematics Letters**, 18, pp. 1134.
- [32] Shampine L.F., (2005), “Solving hyperbolic PDEs in MATLAB” **Applied Numerical Analysis & Computational Mathematics**, 2, pp. 346.
- [33] Sławomir H. (2018) “Numerical modeling of water hammer with fluid–structure interaction in a pipeline with viscoelastic supports” **Journal of Fluids and Structures**, 76, pp. 469.
- [34] Streeter V. L., and Lai C. (1963), “Waterhammer Analysis Including Fluid Friction,” **J. Trans. Am. Soc. Civ. Eng.**, 128, 1, pp. 1491.
- [35] Tijsseling A.S. (1996) “Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: a review” **Journal of Fluids and Structures**, 10, pp. 109.
- [36] Tijsseling A.S. (2003) “Exact Solution of Linear Hyperbolic Four-Equation System in Axial Liquid-Pipe Vibration” **Journal of Fluids & Structures**, 18, pp. 179.
- [37] Tijsseling A.S., Vardy A.E., (2008), “Time scales and FSI in oscillatory liquid-filled pipe flow”. BHR Group, Proc. of the 10th Int. Conf. on Pressure Surges (Editor S Hunt), P553, Edinburgh, United Kingdom.
- [38] Wahba E.M (2006) Runge–Kutta time-stepping schemes with TVD central differencing for the water hammer equations. *Int J Numer Method Fluids* 52:571-590.
- [39] Wahba E.M (2008) Modelling the attenuation of laminar fluid transients in piping systems. *J Appl Math Model* 32: 2863-2871.
- [40] 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.
- [41] Wiggert D.C., Tijsseling, A.S. (2001) “Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping” **J. ASME Applied Mechanics Reviews**, 54, pp. 455.

- [42] Wylie E. B., Streeter V.L. (1993), “**Fluid Transients in systems**”, First Edition, Pearson.
- [43] Yang K., Li Q.S., Zhang, L. (2004), “Longitudinal Vibration Analysis of Multi-Span Liquid-Filled Pipelines with Rigid Constraints” **Journal of Sound and Vibration**, 273, pp. 125.
- [44] Zielke W. (1968) “Frequency- Dependent Friction in Transient Pipe flow” **J. Basic Eng.**, 90, 1, pp 109.

$$\begin{cases} \tau_p + \lambda_1 \tau_{p(1)} = \eta_p \dot{\gamma} \\ \tau_s = \eta_s \dot{\gamma} \end{cases} \xrightarrow{\square} \tau_p + \lambda_1 \tau_{p(1)} + \tau_s = (\eta_p + \eta_s) \dot{\gamma}$$

$$\begin{cases} \eta_p + \eta_s = \eta \\ \tau_p + \tau_s = \tau \\ \tau_{p(1)} = \tau_{(1)} - \tau_{s(1)} \xrightarrow{\tau_{s(1)} = \eta_s \dot{\gamma}_{(1)}} \tau_{p(1)} = \tau_{(1)} - \eta_s \dot{\gamma}_{(1)} \end{cases}$$

$$\tau + \lambda_1 (\tau_{(1)} - \eta_s \dot{\gamma}_{(1)}) = \eta \dot{\gamma}$$

$$\tau + \lambda_1 \tau_{(1)} = \eta \dot{\gamma} + \lambda_1 \eta_s \dot{\gamma}_{(1)}$$

$$\tau + \lambda_1 \tau_{(1)} = \eta (\dot{\gamma} + \lambda_1 \frac{\eta_s}{\eta} \dot{\gamma}_{(1)}) \xrightarrow{\text{If } \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\eta_s}{\eta} \Rightarrow \lambda_2 = \lambda_1 \frac{\eta_s}{\eta}} \tau + \lambda_1 \tau_{(1)} = \eta (\dot{\gamma} + \lambda_2 \dot{\gamma}_{(1)})$$

$$\begin{cases} \tau_{(1)} = \tau \\ \lambda_2 = \omega \Rightarrow \tau + \lambda_1 \tau = \eta (\dot{\gamma} + \omega \dot{\gamma}) \\ \dot{\gamma}_{(1)} = \dot{\gamma} \end{cases}$$

$$\frac{dy}{dx} + p(x)y = q(x) \rightarrow \boxed{y = \frac{1}{e^{\int p(x)dx}} \left( \int e^{\int p(x)dx} q(x)dx + c \right)}$$

$$\tau_p + \lambda \frac{\partial \tau_p}{\partial t} = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{D}$$

$$\text{if } \lambda = 1 \Rightarrow \frac{\partial \tau_p}{\partial t} + \tau_p = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{D} \rightarrow$$

$$\begin{cases} p(x) = 1 \Rightarrow \int p(x)dx = x \\ q(x) = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{D} \end{cases} \Rightarrow \tau_p = \frac{1}{e^x} \left( \int e^x \frac{-8\eta_p \bar{V}}{D} dx + c \right) \Rightarrow \boxed{\tau_p = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{D} + ce^{-x}}$$

$$x = 1 \rightarrow \xrightarrow{e=2.718218284} e^{-1} = 0.367888 \Rightarrow \tau_p = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{D} + 0.367888c$$

$$\text{if } \lambda = 2 \Rightarrow 2 \frac{\partial \tau_p}{\partial t} + \tau_p = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{D} \rightarrow$$

$$\begin{cases} p(x) = \frac{1}{2} \Rightarrow \int p(x)dx = \frac{x}{2} \\ q(x) = \frac{-4\eta_p \bar{V}}{D} \end{cases} \Rightarrow \tau_p = \frac{1}{e^{\frac{x}{2}}} \left( \int e^{\frac{x}{2}} \frac{-4\eta_p \bar{V}}{D} dx + c \right) \Rightarrow \boxed{\tau_p = \frac{-4\eta_p \bar{V}}{D} + ce^{-\frac{x}{2}}}$$

$$x = 1 \rightarrow \xrightarrow{e=2.718218284} e^{-1/2} = 0.606538 \Rightarrow \tau_p = \frac{-4\eta_p \bar{V}}{D} + 0.606538c$$

$$\text{if } \lambda = 3 \Rightarrow 3 \frac{\partial \tau_p}{\partial t} + \tau_p = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{D} \rightarrow$$

$$\begin{cases} p(x) = \frac{1}{3} \Rightarrow \int p(x)dx = \frac{x}{3} \\ q(x) = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{3D} \end{cases} \Rightarrow \tau_p = \frac{1}{e^{\frac{x}{3}}} \left( \int e^{\frac{x}{3}} \frac{-8\eta_p \bar{V}}{3D} dx + c \right) \Rightarrow \boxed{\tau_p = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{3D} + ce^{-\frac{x}{3}}}$$

$$x = 1 \rightarrow \xrightarrow{e=2.718218284} e^{-1/3} = 0.716537 \Rightarrow \tau_p = \frac{-8\eta_p \bar{V}}{3D} + 0.716537c$$

## **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. Since the occurrence of this phenomenon causes the pipe wall to vibrate, it is also necessary to consider the effects of fluid structure interaction. 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, and the two-step variant of the Lax-Friedrichs (LxF) finite difference numerical method is used for discretization of 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. As for the effects of viscoelasticity on the fluid-structure interaction during the fluid hammer phenomenon, results showed that the compound coupling and junction coupling have the greatest effect on the pressure head, and Poisson coupling has the least effect. In the definition of the boundary conditions for junction coupling, the valve is allowed to vibrate; this causes the effect of junction coupling on the pressure head to be more prominent. This coupling usually occurs at locations where the flow momentum

changes, such as at valves, junctions and so on. But in Poisson's case, the boundary conditions imposed on the system are largely dependent on the structure; this means the coupling effect on the system is minimal. On the other hand, coupling effects in a viscoelastic fluid do not significantly impact the shear stresses in the fluid hammer phenomenon. In a detailed comparison, the Poisson coupling and junction coupling exhibit the lowest and maximum shear stresses, respectively.

**Keywords:** Viscoelastic fluid hammer, Oldroyd-B model, Viscoelastic Fluid Structure Interaction, Two-step variant of the Lax-Friedrichs (LxF), Poisson coupling.





**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil engineering**

**Ph.D. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures**

**Modeling of fluid-structure interaction due to fluid hammer  
with viscoelastic fluid**

**By: Banafsheh Norouzi**

**Supervisor:**

**Dr. Ahmad Ahmadi**

**Advisor:**

**Dr. Mahmood Norouzi**

**Dr. Mohsen Lashkarblouk**

**Jun 2019**