

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

عَشْرُ
الْفَتْحِ
مُهْمَلٍ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه حرارت و سیالات

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بررسی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر

دانشجو:

سید رسول واردی

اساتید راهنما:

دکتر محمد جواد مغربی

دکتر محمد محسن شاهمردان

استاد مشاور:

دکتر محمود نوروزی

بهمن ماه ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید رسول واردی

تحت عنوان: بررسی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : محمود نوروزی		نام و نام خانوادگی : محمد جواد مغربی محمد محسن شاهمردان

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

که شمع وجودشان، همواره

روشنی بخش زندگی ام بوده است.

تقدیر و تشکر

از خداوند متعال سپاسگزارم که توفیق کسب علم و دانش را به من عطا فرمود تا بتوانم این مرحله از علم را با موفقیت به پایان برسانم. از خانواده عزیزم به خاطر محبت‌های بی‌دینگی که نسبت به من داشته و دارند، کمال تشکر و سپاس را دارم. از اساتید ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد جواد مغربی و جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان در کلیه مراحل انجام پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر محمود نوروزی که زحمات مشاوره این پایان‌نامه را به عهده داشته‌اند، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

در انتها نیز از تمامی اساتید محترم دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که توفیق شاگردیشان را داشتم، سپاسگزاری نموده و از خداوند منان آرزوی سلامت و توفیق روزافزون برایشان دارم.

سید رسول واردی

بهمن ۱۳۹۰

تعهد نامه

اینجانب سید رسول واردی به شماره دانشجویی ۸۸۰۳۳۲۴ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر تحت راهنمایی دکتر محمد جواد مغربی و دکتر محمد محسن شاهمردان 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 یافتههای 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.

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه / رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

چکیده

مطالعه جریان بر روی سیلندر، از جمله مسائل کلاسیک و پایه در دینامیک سیالات محسوب می‌شود که دارای کاربردهای متنوعی در صنایع گوناگون است. تاکنون تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بیشماری در خصوص این جریان صورت گرفته که عمده این تحقیقات در خصوص سیالات نیوتنی بوده و سهم اندکی از آن‌ها متوجه سیالات غیرنیوتنی و بویژه سیالات ویسکوالاستیک است. هدف اصلی از پژوهش حاضر، شناخت بهتر اثرات خواص ویسکوالاستیک بر ساختار و الگوی این جریان می‌باشد.

در این تحقیق، به مطالعه عددی جریان اینرسی سیال ویسکوالاستیک در عبور از روی یک سیلندر دایروی پرداخته شده است. به منظور مدل‌سازی این جریان، از نرم‌افزار منبع‌باز OpenFOAM که یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌باشد، استفاده شده است. این نرم‌افزار از شیوه عددی حجم محدود (FVM) برای حل معادلات با مشتقات جزئی استفاده می‌کند. در این‌جا برای نخستین بار جهت بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر، از مدل گزیکس به عنوان معادله ساختاری سیال ویسکوالاستیک استفاده شده است. این مدل غیرخطی از توانایی برجسته‌ای در توصیف ویسکوزیته در ناحیه توانی و همچنین اثر اختلاف تنش‌های نرمال برخوردار است. بر اساس شبیه‌سازی عددی، صحت نتایج حاصل از حل عددی ارزیابی و استقلال پاسخ‌های عددی از شبکه بررسی شده است. در این تحقیق اثر اعداد رینولدز و وایزنبرگ و همچنین ضریب تحرک در مدل گزیکس، بر الگوی گردابه‌های فون کارمن مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده می‌شود که ازدیاد خاصیت الاستیک سیال در قالب عدد وایزنبرگ، منجر به کاهش محسوس فرکانس و دامنه نوسانات و افزایش طول ناحیه جریان برگشتی، پیش از رسیدن به عدد رینولدز بحرانی و شروع نوسانات در جریان می‌گردد. شایان ذکر است که این خاصیت از سیال، ناپایداری در جریان را تشدید نموده و رینولدز بحرانی را کاهش می‌دهد. از دیگر نوآوری‌های تحقیق حاضر، بررسی اثر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر فرکانس گردابه‌های فون کارمن می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش این ضریب، فرکانس نوسانات در در جریان را تقویت نموده و سبب ازدیاد ناپایداری در جریان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ویسکوالاستیک، حل عددی، فون کارمن، سیلندر دایروی، وابسته به زمان، مدل گزیکس

فهرست مطالب

ت	تقدیر و تشکر	.....
خ	چکیده	.....
۱	فصل ۱: مقدمه	
۲	۱-۱- مقدمه	.....
۵	۲-۱- توصیف جریان عبوری از روی سیلندر	.....
۱۴	۲-۲-۱- موارد وقوع و استفاده از پدیده فون کارمن در صنعت	.....
۱۸	فصل ۲: مروری بر پیشینه تحقیق	
۱۹	۱-۲- مقدمه	.....
۱۹	۲-۲- تاریخچه	.....
۳۷	۳-۲- تحقیق حاضر	.....
۳۹	۴-۲- جنبه‌های نوآوری	.....
۴۰	۵-۲- ساختار کلی	.....
۴۲	فصل ۳: معادلات حاکم	
۴۳	۱-۳- مقدمه	.....
۴۳	۲-۳- معادلات حاکم بر جریان	.....
۴۵	۳-۳- فرضیات مساله	.....
۴۶	۴-۳- شرایط مرزی و شرایط اولیه	.....
۴۸	۵-۳- توابع ویسکومتریك	.....
۵۱	۶-۳- تحلیل فرکانس جریان	.....
۵۲	۷-۳- نیروهای وارده بر روی سیلندر	.....
۵۲	۳-۷-۱- نمایش نیروهای فشاری	.....
۵۳	۳-۷-۲- نیروهای ناشی از خاصیت ویسکوز	.....
۵۴	۳-۷-۳- محاسبه نیروی کل	.....
۵۶	فصل ۴: روش حل عددی با استفاده از نرم افزار OpenFOAM	
۵۷	۱-۴- مقدمه	.....
۵۷	۲-۴- روش حل عددی	.....
۵۸	۴-۲-۲- معادله تکامل فشار	.....

۵۹	۳-۲-۴- الگوریتم SIMPLE برای حل جریان تراکم ناپذیر
۶۶	۳-۴- معرفی نرم افزار منبع باز OpenFOAM
۷۰	۴-۴- فرایند حل در نرم افزار OpenFOAM
۷۰	۲-۴-۴- پیش پردازش (pre-processing)
۷۱	۳-۴-۴- پردازش (solving)
۷۱	۴-۴-۴- پس پردازش (post-processing)
۷۲	۵-۴- معرفی حل گر مورد استفاده در این پژوهش
۷۶	۶-۴- ساختار نمونه مطالعاتی در این پژوهش
۷۶	۱-۶-۴- پوشه "0"، اعمال شرایط اولیه و مرزی مساله
۸۱	۲-۶-۴- پوشه "constant"، تعریف شبکه و مقادیر ثابت مساله
۸۳	۳-۶-۴- پوشه system، تنظیم های حل

فصل ۵: نتایج عددی

۸۸	
۸۹	۱-۵- مقدمه
۸۹	۲-۵- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه و صحت نتایج
۱۰۱	۳-۵- تاثیر گسسته سازی جمله مشتق زمانی و گام زمانی بر حل
۱۰۴	۴-۵- بحث و نتایج
۱۰۵	۱-۴-۵- مطالعه جریان
۱۰۵	۲-۴-۵- مقایسه جریان سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک
۱۱۷	۳-۴-۵- اثر پارامترهای مختلف بر جریان
۱۱۸	۱-۳-۴-۵- بررسی اثر خاصیت الاستیک بر مشخصه های جریان در قالب عدد وایزبرگ
۱۲۰	۲-۳-۴-۵- بررسی اثر رینولدز بر مشخصه های جریان
۱۲۳	۳-۳-۴-۵- بررسی پارامتر ضریب تحرک بر فرکانس و پایداری جریان

فصل ۶:

۱۳۰	
۱۳۰	نتیجه گیری
۱۳۱	۱-۶- مقدمه
۱۳۳	۲-۶- پیشنهادات

پیوست ها

۱۳۴	
۱۳۵	پیوست الف
۱۳۵	مقدمه ای بر سیالات ویسکوالاستیک
۱۳۵	الف - مقدمه

الف - ۱ - طبقه بندی سیالات ویسکوالاستیک.....	۱۳۵
الف - ۱ - ۱ - سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان.....	۱۳۶
الف - ۱ - ۲ - سیالات غیر نیوتنی تابع زمان.....	۱۳۸
الف - ۱ - ۳ - سیالات ویسکوالاستیک.....	۱۴۰
الف - ۲ - برخی پارامترهای مهم در جریان سیالات ویسکوالاستیک.....	۱۴۲
پیوست ب.....	۱۴۵
معادلات ساختاری.....	۱۴۵
ب - مقدمه.....	۱۴۵
ب - ۱ - تقسیم بندی معادلات ساختاری.....	۱۴۵
ب - ۱ - ۱ - مدل های ویسکوالاستیک خطی.....	۱۴۵
ب - ۱ - ۲ - مدل های ویسکوالاستیک غیر خطی.....	۱۴۹
ب - ۱ - ۳ - تعدادی دیگر از معادلات ساختاری غیر خطی.....	۱۵۱
ب - ۲ - نحوه انتخاب معادله ساختاری.....	۱۵۲
پیوست پ.....	۱۵۳
معرفی نرم افزار OpenFOAM.....	۱۵۳
ب - مقدمه.....	۱۵۳
پ - ۱ - نرم افزارهای منبع باز یا آزاد.....	۱۵۸
پ - ۲ - توزیع های گنو / لینوکس.....	۱۵۹
پ - ۳ - مقایسه بین نرم افزار های کد باز و نرم افزارهای تجاری.....	۱۶۱
پیوست ت.....	۱۷۰
معرفی و بیان الگوریتم SIMPLE در نرم افزار OpenFOAM.....	۱۷۰
ت - مقدمه.....	۱۷۰
پیوست ج.....	۱۷۵
معرفی انواع شرایط مرزی در OpenFOAM.....	۱۷۵
ج - تقسیم بندی شرایط مرزی در OpenFOAM.....	۱۷۵
پیوست چ.....	۱۸۰
نحوه انجام عملیات ریاضی و عمل گره های تانسوری در نرم افزار OpenFOAM.....	۱۸۰
پیوست ه.....	۱۸۵
زندگی نامه تئودور فون کارمن (۱۹۶۳-۱۸۸۱).....	۱۸۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ جریان عبوری از روی سیلندر در رینولدز کمتر از عدد ۴ و رینولدز بین ۴ تا ۴۰ [۴]..... ۶
- شکل ۲-۱ جریان عبوری از روی سیلندر در عدد رینولدز بین ۸۰ تا ۲۰۰ [۴]..... ۶
- شکل ۳-۱ تمبر پستی کشور مجارستان، یادبود دانشمند مجاری تئودور فون کارمن، خطوط گردابه‌ای در زمینه عکس [۵]..... ۶
- شکل ۴-۱ خطوط گردابه‌ای فون کارمن [۷]..... ۷
- شکل ۵-۱ استفاده از پره‌های ماریپچی به منظور جلوگیری از ایجاد نوسان در گردابه‌ها در اثر عبور جریان هوا از روی میله استوانه‌ای [۴]..... ۸
- شکل ۶-۱ نمودار استروهاال به رینولدز [۵]..... ۹
- شکل ۷-۱ جریان مواد نفتی عبوری از روی سیلندر مدور در اعداد رینولدزهای مختلف [۶]..... ۱۰
- شکل ۸-۱ لایه مرزی آرام و مغشوش در اعداد رینولدز زیر بحرانی و بالای بحرانی [۴]..... ۱۲
- شکل ۹-۱ توزیع فشار روی سیلندر ایستا برای عدد رینولدز زیر بحرانی و بالای رینولدز بحرانی، زاویه شروع از نقطه سکون [۴]..... ۱۳
- شکل ۱۰-۱ اندازه گیری ضریب درگ در جریان حول سیلندر دایروی. سقوط ناگهانی ناشی از انتقال لایه مرزی آرام به مغشوش در نتیجه حرکت نقطه جدایش به سمت بالا [۴]..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱ خطوط گردابه‌ای فون کارمن در ناحیه پایین دست جریان در $Re=50$ ، نمایش جریان با شیر چگالیده شده [۴]..... ۱۴
- شکل ۱۲-۱ خطوط گردابه‌ای کاملاً توسعه یافته در اثر عبور جریان هوا با سرعت بالا بر فراز یک جزیره-عکس ماهواره ناسا (NASA) در ۲۶ آوریل ۲۰۰۲ [۵]..... ۱۴
- شکل ۱۳-۱ وقوع پدیده فون کارمن در پایین دست جریان هوای عبوری بر فراز قله کوه‌ها [۴]..... ۱۵
- شکل ۱۴-۱ دستگاه ورتکس متر به منظور اندازه گیری دبی جریان [۸]..... ۱۶
- شکل ۱-۲ شماتیک تونل آب از آزمایش انجام شده توسط پینهو [۲۷]..... ۲۳
- شکل ۲-۲ تغییرات عدد استروهاال با عدد رینولدز برای جریان نیوتنی و محلول گریسلین در آب ، نشانه توپر: سیلندر با قطر ۱۰ میلیمتر ، نشانه توخالی: سیلندر به قطر ۲۰ میلیمتر، () یونال و راکول [29]، (--) نوربرگ [37]..... ۲۵
- شکل ۳-۲ خطوط رگه (a) جریان نیوتنی (b) ویسکوالاستیک ۲۷
- شکل ۴-۲ خطوط جریان حول سیلندر در عدد دورا برابر ۱ و رینولدز برابر ۱۰۰ (a) $L^2=100$ ، (b) $L^2=1200$ ۲۸

- شکل ۲-۵ تاثیر الاستیسیته بر مشخصات جریان در پارامتر کشسانی بالای سیال ویسکوالاستیک
 ($Re=100$; $L^2=1200$) بر روی (a) ضریب درگ، (b) ضریب لیفت، خط پررنگ $De=1$ ، خط تیره
 کوچک $De=2$ ، خط تیره بزرگ $De=3$ ۳۰
- شکل ۲-۶ نمایش خطوط رگه با افزایش الاستیسیته در پارامتر کشسانی بالا $L^2=1200$ و $Re=100$
 (a) $De=1$ ، (b) $De=2$ و (c) $De=3$ ۳۱
- شکل ۲-۷ توزیع ورثیسته در زمانی واحد برای سیال MCR در $Re=66.6$ ۳۳
- شکل ۲-۸ تغییرات زمانی ضرایب (a) لیفت (b) درگ برای سیال MCR، $We=0, 0.4, 1.2, 2$ و
 $b=100$ ، $Re=66.6$ ۳۴
- شکل ۲-۹ تغییرات عدد استروهل نسبت به وایزبرگ برای سیال MCR در $Re=66.6$ و $b=100$ ۳۴
- شکل ۲-۱۰ توزیع فشار بر روی سطح سیلندر برای جریان سیال ویسکوالاستیک و نیوتنی (زاویه
 شروع، از نقطه مقابل سکون شروع شده و به صورت پادساعتگرد می باشد) نماد دایره سیال نیوتنی،
 نماد مربع $We=10$ ، نماد لوزی $We=80$ ۳۶
- شکل ۲-۱۱ توزیع فشار بی بعد بر روی سطح سیلندر در جریان سیال ویسکوالاستیک (زاویه شروع، از
 نقطه مقابل نقطه سکون، شروع شده و به صورت ساعتگرد می باشد) نماد دایره $L^2=100$ ، نماد مربع
 $L^2=10000$ ، نماد لوزی $L^2=22500$ ۳۶
- شکل ۲-۱۲ طرحواره هندسه مساله به همراه ابعاد آن در این پژوهش ۳۹
- شکل ۳-۱ نیروی فشاری وارد بر سیلندر ۵۲
- شکل ۳-۲ نمایش مولفه های سرعت و سهم سرعت های مماسی هر یک ۵۳
- شکل ۳-۳ نیروی ویسکوز و مولفه های برآیند سرعت مماسی در جهت پادساعتگرد ۵۴
- شکل ۴-۱ نام گذاری مرسوم برای مولکول محاسباتی در یک، دو و سه بعد ۶۰
- شکل ۴-۲ نام گذاری مرسوم برای سطوح، فواصل و ابعاد مولکول محاسباتی در دو بعد ۶۱
- شکل ۴-۳ تکرارهای داخلی و خارجی در هر گام زمانی حل ۶۱
- شکل ۴-۴ گام های اصلی در شبیه سازی عددی مساله ۷۰
- شکل ۴-۵ ساختار حل گر viscoelasticFluidFoam ۷۲
- شکل ۴-۶ ساختار پوشه Giesekus و فایل های موجود در هریک از پوشه ها ۷۷
- شکل ۵-۱ طرح واره ای از محدوده جریان به همراه ابعاد به کار گرفته شده ۹۰
- شکل ۵-۲ نمایش کامل شبکه های محاسباتی M-1 تا M-4 ۹۲
- شکل ۵-۳ بزرگ نمایی شبکه های محاسباتی در اطراف سیلندر ۹۳
- شکل ۵-۴ نمونه ای از تاریخچه همگرایی برای شبکه M-4 برای هر یک از مولفه های سرعت ۹۴

- شکل ۵-۵ تغییرات ضریب درگ برای چهار شبکه M-1 تا M-4..... ۹۵
- شکل ۶-۵ بزرگ‌نمایی تغییرات ضریب درگ در محدوده نوسانی برای چهار شبکه M-1 تا M-4. ۹۵
- شکل ۷-۵ تغییرات ضریب لیفت برای چهار شبکه M-1 تا M-4..... ۹۶
- شکل ۸-۵ بزرگ‌نمایی تغییرات ضریب لیفت در محدوده نوسانی برای چهار شبکه M-1 تا M-4... ۹۶
- شکل ۹-۵ نمودار ضریب درگ بر حسب ضریب لیفت..... ۹۷
- شکل ۱۰-۵ محاسبه زمان دوره تناوب و فرکانس جریان ۹۹
- شکل ۱۱-۵ محاسبه متوسط ضریب درگ ۱۰۰
- شکل ۱۲-۵ مقایسه نتایج ضریب لیفت با استفاده از روش‌های مرتبه اول و دوم در گسسته‌سازی جمله مشتق زمانی الف) کل زمان حل ب) بزرگ‌نمایی تغییرات ضریب لیفت در محدوده نوسانی.. ۱۰۲
- شکل ۱۳-۵ بزرگی میدان سرعت و خطوط جریان الف) سیال نیوتنی ب) سیال ویسکوالاستیک. ۱۰۶
- شکل ۱۴-۵ توزیع مولفه‌های میدان سرعت الف) جریان ویسکوالاستیک ($We=80$) ب) جریان نیوتنی ۱۰۷
- شکل ۱۵-۵ توزیع میدان ورتیسیته الف) جریان سیال نیوتنی ب) جریان سیال ویسکوالاستیک ($We=80$)..... ۱۰۷
- شکل ۱۶-۵ بردارهای سرعت الف) جریان سیال نیوتنی ب) جریان سیال ویسکوالاستیک ۱۰۸
- شکل ۱۷-۵ تغییرات سرعت محوری برای جریان سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک ۱۰۹
- شکل ۱۸-۵ توزیع فشار بر روی سطح سیلندر برای جریان سیال ویسکوالاستیک و نیوتنی (زاویه شروع، از نقطه سکون شروع شده و به صورت ساعتگرد می‌باشد)..... ۱۱۰
- شکل ۱۹-۵ نمودار تغییرات مولفه برشی تانسور تنش در مقاطع عرضی ناحیه پایین دست جریان الف) جریان سیال نیوتنی، ب) جریان سیال ویسکوالاستیک..... ۱۱۱
- شکل ۲۰-۵ توزیع میدان ورتیکال از لحظه شروع نوسان در جریان تا رسیدن به جریان نوسانی..... ۱۱۲
- شکل ۲۱-۵ توزیع میدان‌های متغیر برای جریان سیال گزیکس حول سیلندر..... ۱۱۴
- شکل ۲۲-۵ سرعت محوری در یک نقطه نسبت به زمان..... ۱۱۵
- شکل ۲۳-۵ تغییرات اختلاف تنش‌های نرمال الف) در امتداد محور تقارن، ب) در یک نقطه نسبت به زمان..... ۱۱۷
- شکل ۲۴-۵ تغییرات ضریب لیفت برای دو حالت جریان نیوتنی (خط پر) ویسکوالاستیک (خط چین) در $Re=100$ و $We=80$ ۱۱۹
- شکل ۲۵-۵ تغییرات سرعت محوری یک سلول در ناحیه ویک جریان سیال ویسکوالاستیک ۱۲۱
- شکل ۲۶-۵ مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از تحقیقات پیشین..... ۱۲۲

شکل ۵-۲۷	تأثیر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر تغییرات اختلاف تنش های نرمال در یک سلول در ناحیه ویک جریان نسبت به زمان.....	۱۲۴
شکل ۵-۲۸	تأثیر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر تغییرات اختلاف تنش های نرمال در خط مرکزی از سیلندر تا مرز خروجی	۱۲۵
شکل ۵-۲۹	تأثیر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر تغییرات اختلاف تنش های نرمال و تنش برشی بر روی سطح سیلندر.....	۱۲۶
شکل ۵-۳۰	توزیع فشار حول سیلندر در اثر افزایش ضریب تحرک در مدل گزیکس، الف) از نقطه سکون تا نقطه مقابل آن، ب) بزرگ‌نمایی توزیع فشار حول سیلندر در ناحیه جدایش.....	۱۲۷
شکل ۵-۳۱	توزیع میدان ورتیسیتیه برای مقادیر ضریب تحرک $\alpha=0.1$ و $\alpha=0.9$	۱۲۸
شکل ۵-۳۲	تأثیر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر تغییرات سرعت محوری یک سلول در ناحیه ویک.....	۱۲۹
شکل ۶-۱	شکل الف-۱: منحنی های تنش برشی در برابر نرخ برش	۱۳۷
شکل ۶-۲	شکل الف-۲: منحنی های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات غیر نیوتنی تابع از زمان [۳].....	۱۳۹
شکل ۶-۳	شکل الف-۳: طرح شماتیک جریان برشی ساده (جریان کوئت).....	۱۴۰
شکل ۶-۴	شکل الف-۴: دیاگرام پیپکین [۴۳].....	۱۴۴
شکل ۶-۵	شکل پ-۱ لیستی از پرکاربردترین نرم افزارهای منبع باز در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی	۱۵۴
شکل ۶-۶	شکل پ-۲ تعداد صفحات اینترنتی ایجاد شده در هر ماه در ۱۱ سال گذشته.....	۱۶۲
شکل ۶-۷	شکل پ-۳ درصد مشارکت کشورهای مختلف در وب سایت دینامیک سیالات محاسباتی	۱۶۲
شکل ۶-۸	شکل پ-۴ مقایسه تعداد فروم ها و پست های موجود در ارتباط با دو نرم افزار ANSYS و OpenFOAM.....	۱۶۳
شکل ۶-۹	شکل ج-۱ استفاده از شرط مرزی wedge برای برای صفحات برشی در هندسه متقارن محوری.....	۱۷۷

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) ثابت‌های مدل کاربو-یاسودا برای محلول‌های تیلوز و CMC ۲۴
- جدول (۲-۲) ثابت‌های مدل توانی برای محلول‌های تیلوز و CMC ۲۴
- جدول (۳-۲) مان آسودگی از تنش بدست آمده از تست خزش در ۲۵ درجه سانتیگراد ۲۵
- جدول (۴-۲) نتایج حاصل با تغییرات پارامتر کشسانی در $Re=100$ و دپورا برابر ۱ ۲۸
- جدول (۵-۲) نتایج بدست آمده با تغییرات دپورا در $L^2=1200$ ۲۹
- جدول (۱-۴) تعریف عمل‌گرهای دیفرانسیلی در نرم‌افزار OpenFOAM ۸۴
- جدول (۲-۴) انواع روش‌های حل دستگاه معادلات خطی ۸۶
- جدول (۱-۵) مشخصات شبکه‌های محاسباتی ۹۱
- جدول (۲-۵) نتایج بدست آمده از شبکه‌های مختلف ۹۸
- جدول (۳-۵) متوسط ضرایب لیفت و درگ برای گسسته سازی مرتبه اول و دوم جمله مشتق زمانی ۱۰۳
- جدول (۴-۵) اثرات انتخاب گام زمانی بر نتایج حل ۱۰۳
- جدول (۵-۵) اثر افزایش خاصیت الاستیک بر مشخصه های جریان ۱۱۸
- جدول (۶-۵) تاثیر از یاد عدد رینولدز بر مشخصه های جران سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک ۱۲۱
- جدول (پ-۱) هسته گروه توسعه دهنده OpenFOAM ۱۵۷
- جدول (پ-۲) فروم های ثبت شده در سایت CFD online و پست های مطرح شده ۱۶۳
- جدول (پ-۳) نصب نرم افزار در سیستم عامل های مختلف ۱۶۵
- جدول (پ-۴) تنظیمات دستی و ملاحظات عمومی ۱۶۵
- جدول (پ-۵) مدل های فیزیکی موجود در OpenFOAM و Fluent ۱۶۶
- جدول (پ-۶) شبکه و انواع شرایط مرزی ۱۶۶
- جدول (پ-۷) حل گر ها و روش های حل در OpenFOAM و Fluent ۱۶۷
- جدول (پ-۸) پس پردازش در OpenFOAM و Fluent ۱۶۷
- جدول (پ-۹) همایش های برگزار شده در نقاط مختلف دنیا ۱۶۸
- جدول (پ-۱۰) کارگاه های برگزار شده در نقاط مختلف دنیا ۱۶۸
- جدول (ج-۱) انواع شرط مرزی پایه ای برای تعریف مرزهای هندسه ۱۷۶
- جدول (ج-۲) انواع شرط مرزی مقدماتی برای میدان های متغیر ۱۷۸
- جدول (ج-۳) انواع شرط مرزی ترکیبی برای میدان های متغیر ۱۷۹
- جدول (چ-۱) عملیات ریاضی در نرم افزار OpenFOAM ۱۸۰

- جدول (چ-۲) تعریف توابع در نرم افزار OpenFOAM ۱۸۱
- جدول (چ-۳) عملیات تانسوری بر روی تانسور مرتبه دو در نرم افزار OpenFOAM ۱۸۲
- جدول (چ-۴) تعریف عملگرهای دیفرانسیلی در نرم افزار OpenFOAM ۱۸۳

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

شاید بتوان سرآغاز دانش مکانیک سیالات نوین را به اوایل قرن هفدهم نسبت داد. در آن تاریخ، همزمان با تولد مکانیک نیوتنی و حساب دیفرانسیل و انتگرال، نیوتن مدلی برای قانون پایه حاکم بر رفتار سینتیکی سیالات پیشنهاد نمود و سیالاتی که از این قانون تبعیت می‌کردند به سیالات نیوتنی معروف شدند. سیال نیوتنی، ماده‌ای است که در آن تنش برشی بدون وجود تنش تسلیم (صفر بودن تنش برشی در نرخ برش صفر) تنها تابعی خطی از نرخ برش بوده و در این ماده نسبت تنش برشی به نرخ برش، ویسکوزیته نامیده می‌شود. در اواخر قرن نوزدهم، دانش مکانیک سیالات شروع به توسعه در دو جهت متفاوت نمود. در یک جهت تئوری هیدرودینامیک قرار داشت که با استفاده از دیدگاه اوپلری سعی بر ارائه روابط جریان برای یک سیال غیر ویسکوز داشت. از این تئوری روابط تحلیلی متنوعی برای جریان سیالات غیرچسبنده بدون اصطکاک در هندسه‌های مختلف ارائه گردید. روابط بدست آمده از این تئوری در تعارض آشکار با مشاهدات تجربی قرار داشت و لذا این تئوری در عمل مورد استفاده چندانی قرار نگرفت. در جهتی دیگر، به علت رشد سریع تکنولوژی، مهندسين نیازمند حل مسائل مهمی بودند. لذا با استفاده از روش تجربی به حل این مسائل اقدام نمودند و دانشی که بر مبنای این مشاهدات تجربی توسعه یافت به هیدرولیک معروف شد. در آغاز قرن بیستم، پرانتل نشان داد که چگونه می‌توان این دو شاخه از مکانیک سیالات را به یکدیگر پیوند داد. در سال ۱۹۰۴ وی نظریه لایه مرزی را مطرح نمود و طی آزمایشات بسیار ساده‌ای نشان داد که در جریان حول یک جسم، اثر ویسکوزیته و اصطکاک سیال در یک لایه بسیار نازک نزدیک سطوح قابل ملاحظه است، اما در ناحیه دور از جسم می‌توان از اثر ویسکوزیته صرف‌نظر نمود. این نظریه، پایه اصلی مکانیک سیالات لزج محسوب می‌شود که از آن زمان تاکنون موضوع بسیاری از مطالعات تجربی، آزمایشگاهی و تحلیلی بوده است [۱].

با رشد صنایع مختلف، مهندسان و دانشمندان با سیالاتی روبرو شدند که رفتار برشی آنها با استفاده از مدل سیال نیوتنی قابل توصیف نبود. به طور خلاصه، انحرافات سیال از رفتار نیوتنی به شکل زیر قابل بیان هستند:

- وجود تنش تسلیم در ماده
- وابستگی ویسکوزیته به نرخ برش و یا زمان
- وجود خاصیت الاستیک در سیال

این مشکل به خصوص با پیدایش علم پلیمر نمود آشکارتری پیدا کرد. دانشمندان دریافتند که مدل نیوتنی برای گازها و مایعات دارای وزن مولکولی کمتر از ۱۰۰۰ با دقت بسیار مناسبی قابل به کارگیری است، اما این مدل برای مواد درشت مولکول چندان دقیق نیست و جریان برخی محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری رفتارهای متفاوت و بعضاً متضادی را نسبت به سیالات نیوتنی نشان می‌دهند [۲]. نیاز به مطالعه جریان این سیالات منجر به پیدایش شاخه جدیدی از علم به نام رئولوژی^۱ گردید. لغت رئولوژی از ریشه کلمه یونانی رئوس^۲ به معنی جریان می‌باشد و علم رئولوژی روی چگونگی جریان یافتن سیالات و واکنش آنها در برابر نیروهای مکانیکی بحث می‌کند. دانش رئولوژی در سال‌های بین دو جنگ جهانی توسعه یافت و انگیزه اصلی این مطالعات مسائل عمده‌تاً عملی و نه نظری بودند. در طی جنگ جهانی دوم استفاده از مواد شعله‌افکن به مطالعه در خصوص جت مواد ویسکوالاستیک منجر شد. سلاح شعله‌افکن به منظور پرتات مایعات آتش‌زا به سمت هدف مورد استفاده قرار می‌گرفت. مشکل اصلی در این راه، واگرایی جت این مواد در فواصل نزدیک بود که سبب عدم استفاده موثر از این سلاح می‌شد. دانشمندان با اضافه نمودن مواد پلیمری، مایع آتش‌زا را به سیالی ویسکوالاستیک تبدیل می‌کردند که جت این سیال تا فاصله مناسبی همگرا باقی می‌ماند. در گیرودار جنگ، مهندسين آلمانی به یکی از مهمترین کاربردهای

¹ Rheology

² Rheos