

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

لِشَرِّهِ
الْفِتْنَةِ
وَالْمَوْتِ



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 بہ:

پدر و مادر عزیزم

کہ شمع وجودشان، ہموارہ

روشنی بخش زندگی ام بودہ 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 محبت های بی دریغی 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 راهنمایی های ارزشمندشان در کلیه مراحل انجام پایان نامه تقدیر و تشکر می نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر محمود نوروزی که زحمات مشاوری این پایان نامه را به عهده داشته اند، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

در انتها نیز از تمامی اساتید محترم دانشکده مکانیک و انشگاه 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 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.

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

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

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.....	۴-۴-۲- پیش پردازش (pre-processing)
۷۱.....	۴-۴-۳- 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.....	۴-۶-۱- پوشه "0"، اعمال شرایط اولیه و مرزی مساله
۸۱.....	۴-۶-۲- پوشه "constant"، تعریف شبکه و مقادیر ثابت مساله
۸۳.....	۴-۶-۳- پوشه system، تنظیم های حل

فصل ۵: نتایج عددی

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

فصل ۶:

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

پیوست ها

۱۳۴.....	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 - ۲-۱ - سیالات غیر نیوتنی تابع زمان.....	۱۳۸
الف - ۳-۱ - 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-۲-۱ - مدل های ویسکوالاستیک غیر خطی.....	۱۴۹
ب-۳-۱ - تعدادی دیگر از معادلات ساختاری غیر خطی.....	۱۵۱
ب-۲ - نحوه انتخاب معادله ساختاری.....	۱۵۲
پیوست پ.....	۱۵۳
معرفی نرم افزار OpenFOAM.....	۱۵۳
پ - 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 گرهای 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 مارپیچی 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 $Re=55$ ، 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 ۵-۲ 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 ۶-۲ 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 ۷-۲ توزیع ورثیسته در زمانی واحد برای سیال MCR در $Re=66.6$ ۳۳
- شکل ۸-۲ 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 ۹-۲ تغییرات عدد استروهل نسبت به وایزنبرگ برای سیال MCR در $Re=66.6$ و $b=100$ ۳۴
- شکل ۱۰-۲ 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 ۱۱-۲ 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 $L^2=10000$ ۳۶
- شکل ۱۲-۲ طرحواره هندسه مساله به همراه ابعاد آن در این پژوهش ۳۹
- شکل ۱-۳ نیروی فشاری وارد بر سیلندر ۵۲
- شکل ۲-۳ 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 ۱-۴ نام گذاری مرسوم برای مولکول محاسباتی در یک، دو و سه بعد ۶۰
- شکل ۲-۴ نام گذاری مرسوم برای سطوح، فواصل و ابعاد مولکول محاسباتی در دو بعد ۶۱
- شکل ۳-۴ تکرارهای داخلی و خارجی در هر گام زمانی حل ۶۱
- شکل ۴-۴ گام های اصلی در شبیه سازی عددی مساله ۷۰
- شکل ۵-۴ ساختار حل گر viscoelasticFluidFoam ۷۲
- شکل ۶-۴ ساختار پوشه Giesekus و فایل های موجود در هریک از پوشه ها ۷۷
- شکل ۱-۵ طرحواره ای از محدوده جریان به همراه ابعاد به کار گرفته شده ۹۰
- شکل ۲-۵ نمایش کامل شبکه های محاسباتی M-1 تا M-4 ۹۲
- شکل ۳-۵ بزرگ نمایی شبکه های محاسباتی در اطراف سیلندر ۹۳
- شکل ۴-۵ 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 روش های مرتبه اول و دوم در گسسته سازی 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 مولفه های 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 می باشد) 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 میدان های 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 تنش های 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) یزرگ نمایی 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-۱۴: 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 اویلری 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

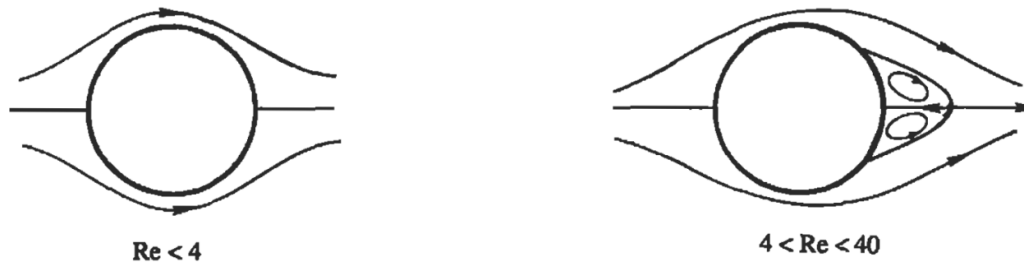
دانش رئولوژی دست یافتند. آن‌ها توانستند با اضافه نمودن مواد صابونی و ۱۰ تا ۵۰ ppm مواد پلیمری به بنزین، افت فشار انتقال این سیال را تا ۹۰٪ کاهش دهند! به این ترتیب استفاده از این مواد جهت کاهش نیروی پسا مورد توجه قرار گرفت که از آن جمله می‌توان به تزریق مواد پلیمری در بدنه اژدرها و ایجاد پوشش‌های پلیمری بر روی این جنگ‌افزار اشاره نمود. بعدها ثابت شد که با اضافه نمودن مواد پلیمری به سیال نیوتنی و تبدیل آن به یک محلول ویسکوالاستیک، نیروی پسای جریان مغشوش به شدت کاهش می‌یابد. استفاده از این خاصیت در جنبه‌های مختلف کاربردی، مورد توجه محققین قرار گرفته است [۳]. به مرور زمان دانش رئولوژی در جنبه‌های مختلف گسترش یافته و علاوه بر صنعت پلیمر به سایر صنایع نظیر صنعت نفت و پتروشیمی، مواد غذایی، نظامی، صنایع شیمیایی سبک و سنگین، تولید انواع لاستیک، رنگ، رزین و مواد پوشش دهنده (نظیر اپوکسی و ...)، تولید مواد آرایشی و بهداشتی، شوینده‌ها و صابون‌ها، مهندسی بیولوژی، تولید دارو (انواع سوسپانسیون‌ها و امولسیون‌ها)، صنعت چاپ، تولید کاغذ، تولید سیمان، صنایع هسته‌ای، فرآیندهای تخمیری، تولید سیمان، تولید مواد روانکار حفاری و ... گسترش یافته است. با توجه به وسعت صناعی که با سیالات غیرنیوتنی روبرو هستند، مشخص است که شناخت علم رئولوژی از ضرورتی اجتناب ناپذیر برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که به دلیل وجود پیچیدگی و تنوع خانواده‌های سیالات غیرنیوتنی، این شاخه از علم هنوز رشد چندانی نیافته و زمینه‌های فراوانی جهت مطالعه و تحقیق در علم رئولوژی وجود دارد. از این رو، از اوایل قرن بیستم تاکنون، دانش مکانیک سیالات غیر نیوتنی، موضوع بسیاری از تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی بوده است. در این میان، مطالعه سیالات ویسکوالاستیک به سبب پیچیدگی‌های حاکم بر رفتار فیزیکی و نیز کاربردهای گسترده صنعتی، نظامی و پزشکی از اهمیت خاصی برخوردار است.

۱-۲- توصیف جریان عبوری از روی سیلندر

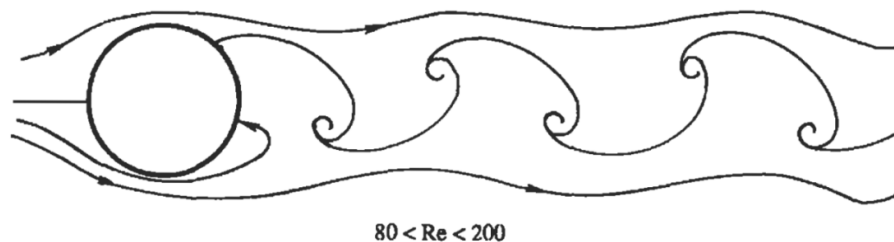
در این تحقیق، بیشتر به بررسی الگو و ساختار جریان نوسانی سیال ویسکوالاستیک در عبور از روی سیلندر ایستا پرداخته می‌شود. مطالعه جریان بر روی سیلندر، از موضوعات جالب توجه و کاربردی در دینامیک سیالات است و از جمله مسایل بنیادین در این عرصه محسوب می‌شود. این مساله هیچگونه محدودیتی در هندسه و شرایط مرزی اعمال شده ندارد. همچنین ساختار و الگوی جریان، به شدت تحت تاثیر عدد رینولدز بوده و تنوع تغییرات آن در رژیم‌های مختلف جریان زیاد می‌باشد. به طوریکه در جریان خزشی سیال نیوتنی ($Re < 4$)، به دلیل شرط عدم لغزش بر روی سیلندر، گردابه‌هایی بوجود می‌آیند که با توجه به فرض استوکس، این گردابه‌ها در جریان پخش شده و قدرت نفوذ و حرکت در جریان را ندارند. در اعداد رینولدز بین 4 تا 40، دو گردابه متقارن ایستا در پشت سیلندر بوجود می‌آید که با افزایش عدد رینولدز، اندازه آن‌ها نیز بزرگتر می‌گردد. رژیم جریان در این محدوده از اعداد رینولدز، کاملاً آرام می‌باشد (به شکل ۱-۱ رجوع شود). با زیاد عدد رینولدز ($Re > 40$)، گردابه‌ها ناپایدار شده، شروع به نوسان می‌کنند. در این رژیم از جریان، ناحیه جریان برگشتی^۱ پشت سیلندر، شامل دو ردیف از گردابه‌ها می‌باشد که به صورت متناوب، یکی در بالا و دیگری در پایین سیلندر بوجود می‌آیند. در شکل ۱-۲ شماتیکی از این پدیده، به هنگام عبور جریان از سیلندری مدور آورده شده است. به الگوی پیدایش دو ردیف از گردابه‌ها در ناحیه پشت سیلندر، پدیده فون کارمن^۲ اطلاق می‌گردد (زندگی‌نامه فون کارمن در پیوست ه آورده شده است).

¹ Wake

² Von Kármán



شکل ۱-۱ جریان عبوری از روی سیلندر در رینولدز کمتر از عدد ۴ و رینولدز بین ۴ تا ۴۰ [۴].



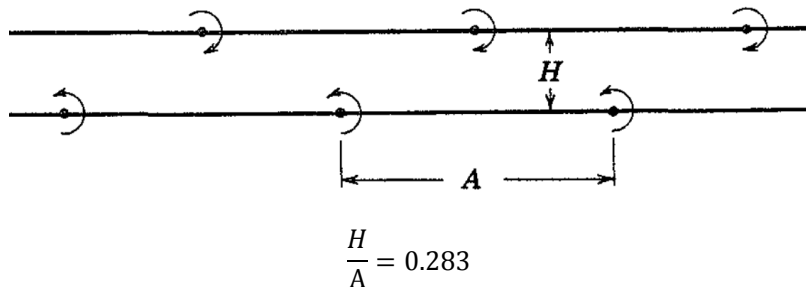
شکل ۲-۱ جریان عبوری از روی سیلندر در عدد رینولدز بین ۸۰ تا ۲۰۰ [۴].

این پدیده اولین بار توسط تئودور فون کارمن دانشمند مجاری الاصل و در سال ۱۹۱۲ کشف شد. در بیان اهمیت این موضوع همین بس که به افتخار او و به منظور به یادگار نگاه داشتن نامش، بر روی تمبرهای پستی آن کشور، تصویری از او قرار داده شد که خطوط گردابه‌ای جریان در زمینه آن عکس، نشان دهنده اهمیت کار او می‌باشد. در شکل ۳-۱ نمونه‌ای از این تمبر آورده شده است.



شکل ۳-۱ تمبر پستی کشور مجارستان، یادبود دانشمند مجاری تئودور فون کارمن، خطوط گردابه‌ای در زمینه عکس [۵].

فون کارمن با بررسی این پدیده دریافت که گردابه‌هایی که در امتداد دو ردیف تشکیل می‌شوند، تنها در صورتی پایدارند که اولاً جهت چرخش گردابه‌های یک ردیف در خلاف جهت چرخش گردابه‌های ردیف دیگر باشد و ثانیاً، فاصله عمودی گردابه‌ها به فاصله افقی بین آن‌ها، برابر 0.283 باشد (به شکل ۴-۱ رجوع شود) [۶]. لازم به ذکر است که گردابه‌های ایجاد شده با سرعتی کمتر از سرعت جریان آزاد در ناحیه ویک جریان حرکت می‌کنند.



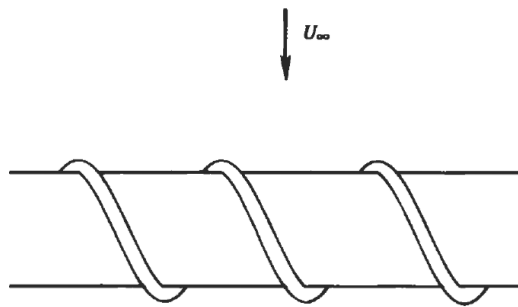
شکل ۴-۱ خطوط گردابه‌ای فون کارمن [۷].

در واقع، هنگامی که عدد رینولدز جریان نیوتنی از حد مشخصی ($40 < Re$) فراتر رود، در اثر کوچکترین شرایط ناپایداری^۱، نقطه جدایش جریان حول جسم دستخوش تغییر شده و همین امر سبب می‌شود تا گردابه‌های متقارن که به شکل دنباله در پشت سیلندر بوجود آمده‌اند، در آستانه نوسان قرار گیرند (رینولدز بحرانی^۲). در نتیجه این ناپایداری، الگوی متقارن ناحیه جریان برگشتی از بین می‌رود. در این هنگام توزیع فشار حول جسم دستخوش تغییر شده و سبب می‌شود که گردابه‌ها، به صورت متناوب، یکی در بالا و دیگری در پایین محور تقارن جسم بوجود آیند. این پدیده، نیروهای متناوب عمودی را بر جسم اعمال می‌کند که سبب مرتعش شدن جسم تحت فرکانس خاصی می‌شود. حال اگر فرکانس نوسان با فرکانس طبیعی جسم برابر گردد، تشدید

¹ Instability

² Critical Reynolds

یا رزونانس^۱ در جسم بوجود می‌آید. از مثال‌های معروف در این زمینه می‌توان به روش‌های محافظت از برج‌های خنک‌کن نیروگاه‌ها در برابر جریان باد اشاره نمود. در این سازه‌ها برای جلوگیری از تشکیل گردابه‌های تناوبی و پیشگیری از وقوع پدیده رزونانس، پره‌هایی را به صورت مارپیچ حول آن‌ها قرار می‌دهند (به شکل ۱-۵ رجوع شود). از دیگر موارد وقوع این پدیده، می‌توان به ارتعاش کابل‌های انتقال قدرت، برج‌هایی با ارتفاع بلند، پایه پل‌های مستغرق در آب و جریان در مبدل‌های حرارتی اشاره نمود [۴].



شکل ۱-۵ استفاده از پره‌های مارپیچی به منظور جلوگیری از ایجاد نوسان در گردابه‌ها در اثر عبور جریان هوا از روی میله استوانه‌ای [۴].

مسیر عبور گردابه‌های منظم در پشت جسم، سبب می‌شود تا اندازه‌گیری سرعت در ناحیه ویک جریان به طور غالب، نوسانی باشد. برای تعیین فرکانس جریان f_s ، از یک پارامتر بی‌بعد تحت عنوان عدد استروهل^۲ استفاده می‌شود که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود.

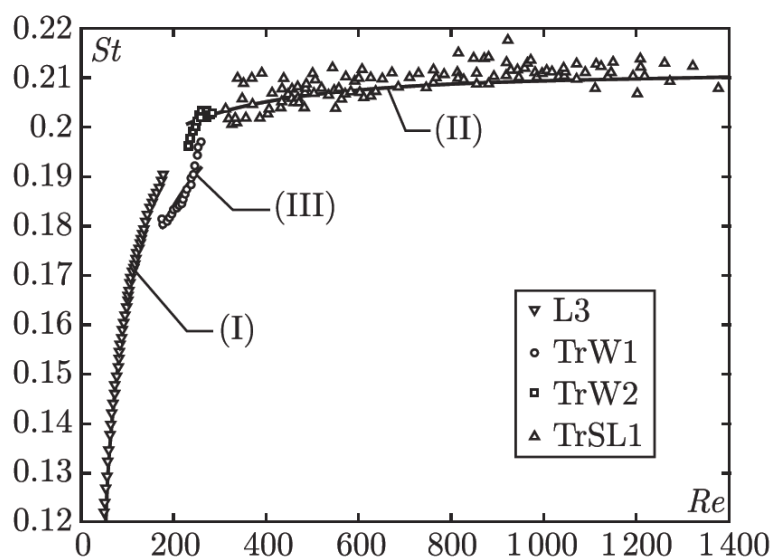
$$St = \frac{f_s d}{U_\infty} \quad (1-1)$$

که در این رابطه، d قطر سیلندر و U_∞ سرعت جریان آزاد می‌باشد [۴]. شایان ذکر است که تا عدد رینولدز ۱۹۰، گردابه‌های ایجاد شده در ناحیه پایین‌دست جریان، رفتاری منظم از خود نشان می‌دهند و در امتداد دو ردیف، با سرعتی کمتر از سرعت جریان آزاد حرکت می‌کنند. از عدد

¹ Resonance

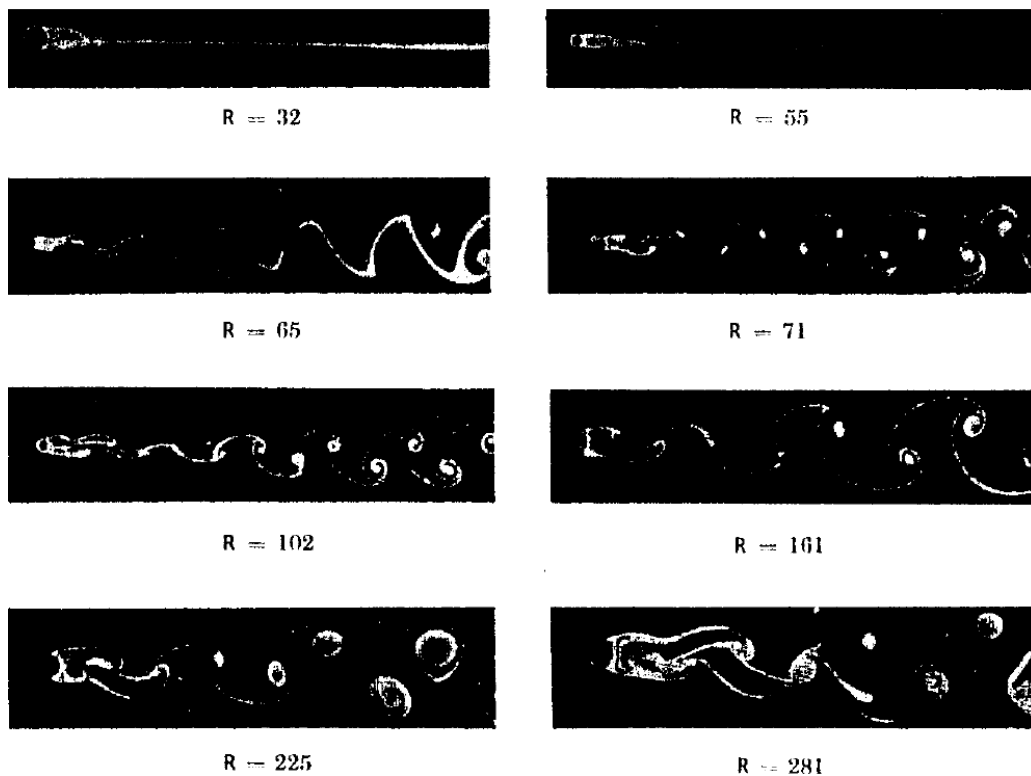
² Strouhal

رینولدز تقریبی ۱۹۰ تا حدود ۲۵۰، ناپایداری‌های گردابه‌ای سه بعدی مشاهده خواهد شد. این رژیم از جریان که رژیم جریان گذرا ناحیه ویک (wake-transition regime) نیز نامیده می‌شود، شامل دو ناحیه ناپیوسته در نمودار رینولدز نسبت به عدد استروهال می‌باشد. در شکل ۶-۱ نمودار تجربی عدد استروهال نسبت به عدد رینولدز برای جریان گذرنده از روی سیلندر دایروی آورده شده است. در این نمودار، هر نماد نشان دهنده یک نوع خاصی از رژیم جریان نوسانی می‌باشد که با علامت‌های I، II و III نشان داده شده است [۵].



شکل ۶-۱ نمودار استروهال به رینولدز [۵].

مطابق شکل ۶-۱ اولین ناپیوستگی که در آن نوسان گردابه‌های تشکیل شده با طول موجی به اندازه سه تا چهار برابر قطر سیلندر ایجاد می‌شود، به صورت تقریبی در عدد رینولدز ۱۹۰ رخ می‌دهد. به ناپیوستگی اول، مود A ناپایداری نیز اطلاق می‌شود. دومین ناپیوستگی نیز در رینولدز بین ۲۳۰ تا ۲۵۰ اتفاق می‌افتد که در مقیاسی ضعیف‌تر و با فرکانسی بالاتر از حالت اول ایجاد می‌شود [۵]. برای درک بیشتر موضوع، در شکل ۷-۱ جریان مواد نفتی عبوری از روی سیلندر ایستا در اعداد رینولدز مختلف آورده شده است [۶].



شکل ۱-۷ جریان مواد نفتی عبوری از روی سیلندر مدور در اعداد رینولدزهای مختلف [۶].

رژیم III نشان داده شده در شکل ۱-۶ رژیم جریان گذرا می‌باشد که در ابتدا و انتهای این رژیم، ناپیوستگی در نمودار مشاهده می‌شود. در این رژیم حرکت گردابه‌ها در ناحیه جریان برگشتی به صورت سه بعدی خواهد بود.

به طور تجربی، وابستگی عدد استروهل که یک عدد بی‌بعد برای تعریف فرکانس نوسانات جریان می‌باشد، به عدد رینولدز در ناحیه جریان آرام ($Re < 190$) که با نماد I در شکل ۱-۶ نشان داده شده است، به صورت رابطه (۲-۱) می‌باشد.

$$St = 0.2175 - \frac{5.1064}{Re} \quad (2-1)$$

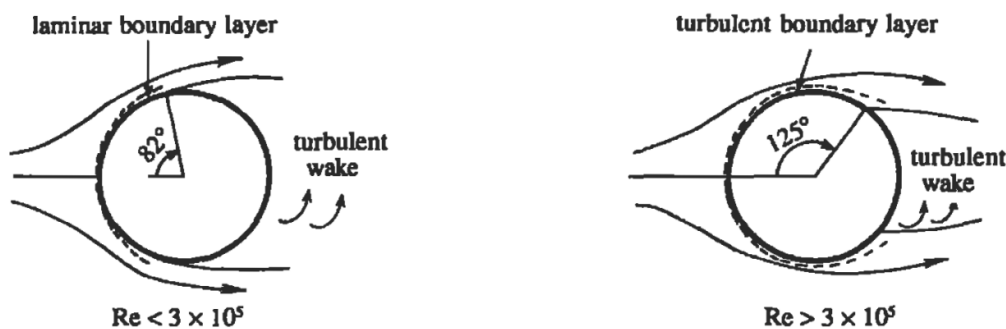
و برای مقادیر بالاتر عدد رینولدز مثلاً رینولدز ۴۰۰ و یا بالاتر، این رابطه به صورت رابطه (۳-۱) تعریف می‌شود [۵].

$$St = 0.212 - \frac{2.7}{Re} \quad (۳-۱)$$

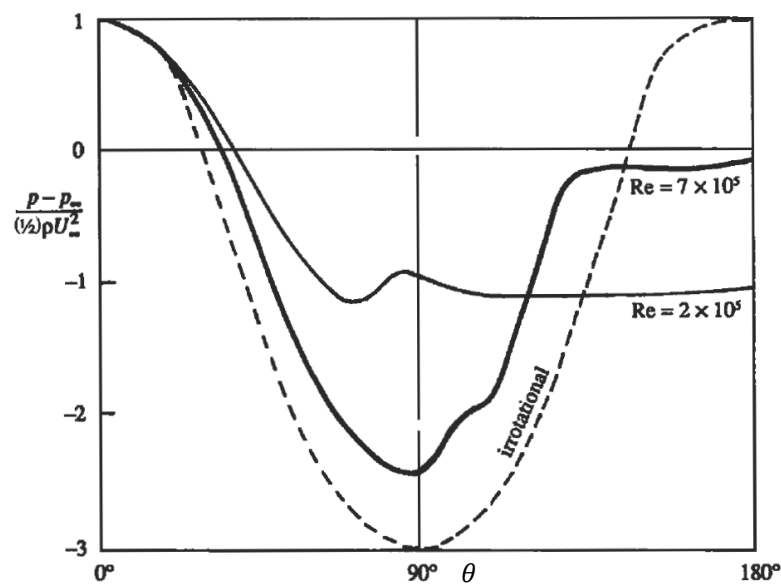
با برآزش نمودار از داده‌های تجربی، مقدار عدد استروهل برای جریان سیال نیوتنی در اعداد رینولدز بالا، برابر ۰.۲۱۲ حاصل می‌شود. برای مثال اگر سرعت جریان آزاد برابر $U_{\infty}=10 \text{ m/s}$ و قطر سیلندر ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شود، فرکانس متناسب با عدد استروهل $St=0.21$ برابر $f_s = 1050$ سیکل در ثانیه است. در عدد رینولدز زیر ۲۰۰، گردابه‌های ایجاد شده در ناحیه جریان برگشتی، آرام می‌باشند و تا فاصله بسیار زیادی در ناحیه پایین دست جریان امتداد پیدا خواهند کرد. در عدد رینولدز بالاتر از ۲۰۰، حرکت گردابه‌ها ناپایدار شده، به طوری که خطوط جریان در داخل خود ورتکس‌ها نیز نامنظم می‌شود. اگر چه فرکانس غالب در این رژیم از جریان همچنان برابر ۰.۲۱ می‌باشد. در اعداد رینولدزهای بالاتر، مثلاً رینولدز ۵۰۰۰، اغتشاشات در جریان غیر قابل مشاهده خواهد بود. ولی می‌توان گفت که جریان کاملاً مغشوش در ناحیه ویک جریان برقرار است. در عدد رینولدز کمتر از 3×10^5 ، لایه مرزی همچنان آرام است، اگرچه ناحیه جریان برگشتی همچنان مغشوش می‌باشد. همانطور که در شکل ۱-۸ مشاهده می‌شود لایه مرزی در این رژیم از جریان در زاویه تقریبی ۸۲ درجه نسبت به نقطه سکون از سطح جدا می‌شود. با توجه به شکل ۱-۹ دیده می‌شود که توزیع فشار در این رژیم از جریان در قسمت بعد از نقطه جدایش تقریباً ثابت می‌باشد و کمتر از فشار در ناحیه بالادست جریان است. از آنجایی که نیروی درگ در این رژیم، ناشی از غیر متقارن بودن توزیع فشار ایجاد شده به دلیل جدایش است، و از آنجایی که نقطه جدایش در این رژیم تقریباً ثابت می‌باشد، ضریب درگ نیز تقریباً در عدد ۱.۲ ثابت باقی می‌ماند (به شکل ۱-۱۰ رجوع شود).

در عدد رینولدز $Re_{cr} \approx 3 \times 10^5$ که به عدد رینولدز بحرانی در جریان بر روی سیلندر دایروی ایستا معروف است، لایه مرزی آرام، ناپایدار شده به طوری که در محدوده عدد رینولدز $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$ ، لایه مرزی آرام به لایه مرزی مغشوش انتقال خواهد یافت.

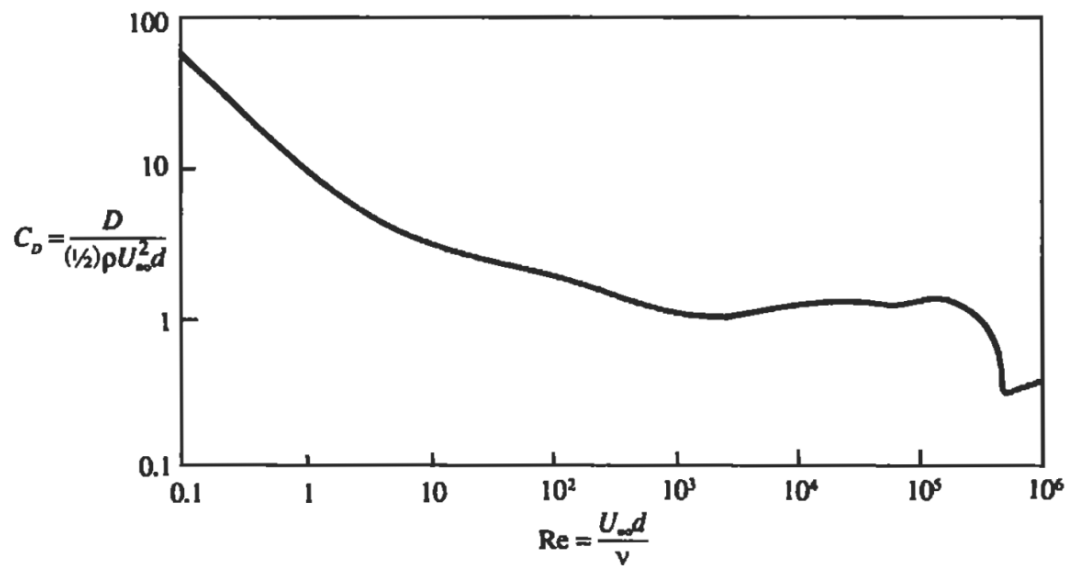
ماهیت‌های لایه مرزی آرام و مغشوش، تاثیر مهمی بر موقعیت نقطه جدایش اعمال می‌کند. در لایه مرزی مغشوش که انتقال اندازه حرکت بزرگ‌تر است، برای ایجاد جدایش، مقدار گرادیان فشار معکوس بیشتری نسبت به لایه مرزی آرام لازم می‌باشد. لذا لایه مرزی مغشوش بر گرادیان فشار معکوس غلبه خواهد کرد. از این رو، در مورد جریان سیال بر روی سیلندر باید گفت که نقطه جدایش لایه مرزی مغشوش در زاویه ۱۲۵ درجه نسبت به نقطه سکون می‌باشد که در نتیجه آن ناحیه جریان برگشتی باریک‌تر شده و توزیع فشار بسیار شبیه به جریان پتانسیل خواهد بود. شکل ۹-۱ توزیع فشار حول سیلندر را برای دو مقدار رینولدز، یکی در لایه مرزی آرام و دیگری در لایه مرزی مغشوش مورد مقایسه قرار می‌دهد. نتیجه انتقال از ناحیه لایه مرزی آرام به مغشوش، کاهش ناگهانی ضریب درگ از ۱.۲ به ۰.۳۳ می‌باشد. برای مقادیر رینولدز بزرگتر از 3×10^6 نقطه جدایش به آرامی به سمت بالا حرکت می‌کند که نتیجه آن افزایش ضریب درگ خواهد بود. این موضوع در شکل ۱۰-۱ نمایان می‌باشد. شایان ذکر است که عدد رینولدز بحرانی که در آن، لایه مرزی از حالت آرام به مغشوش انتقال می‌یابد، وابسته به دو فاکتور است؛ یکی شدت اغتشاش موجود در جریان و دیگری زبری سطح که افزایش هر یک سبب کاهش رینولدز بحرانی خواهد شد. همچنین لازم به ذکر می‌باشد که مقدار رینولدز بحرانی 3×10^6 ، برای جریان بر روی سیلندر، برای سطحی کاملاً صاف و با کمترین مقدار اغتشاش در جریان غالب بدست آمده است [۴].



شکل ۹-۱ لایه مرزی آرام و مغشوش در اعداد رینولدز زیر بحرانی و بالای بحرانی [۴].



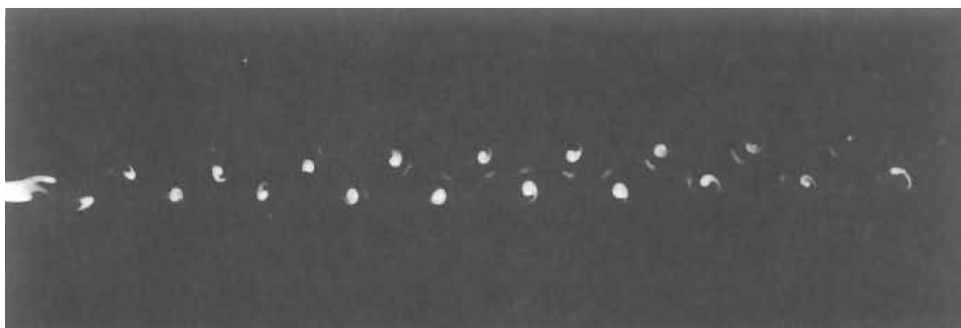
شکل ۹-۱ توزیع فشار روی سیلندر ایستا برای عدد رینولدز زیر بحرانی و بالای رینولدز بحرانی، زاویه شروع از نقطه سکون [۴].



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].

۱-۲-۲- موارد وقوع و استفاده از پدیده فون کارمن در صنعت

خطوط گردابه‌ای ایجاد شده در ناحیه جدایش جریان را می‌توان هم به صورت آزمایشگاهی ایجاد نمود و هم به وضوح در طبیعت مشاهده کرد. در شکل ۱-۱۱ خطوط گردابه‌ای فون کارمن در ناحیه پایین‌دست جریان در $Re=55$ به صورت آزمایشگاهی نشان داده شده که در آن از شیر چگالیده شده برای نمایش گردابه‌های ایجاد شده استفاده شده است.



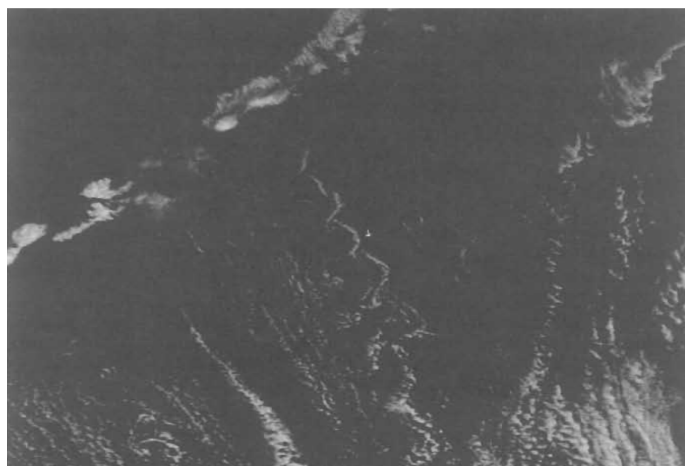
شکل ۱-۱۱ خطوط گردابه‌ای فون کارمن در ناحیه پایین‌دست جریان در $Re=55$ ، نمایش جریان با شیر چگالیده شده [۴].

امکان وقوع چنین پدیده‌ای حتی در جو زمین نیز وجود دارد. در شکل ۱-۱۲ عکس ماهواره‌ای از خطوط گردابه‌ای کاملاً توسعه یافته در اثر عبور جریان هوا با سرعت بالا بر فراز یک جزیره نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۲ 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].

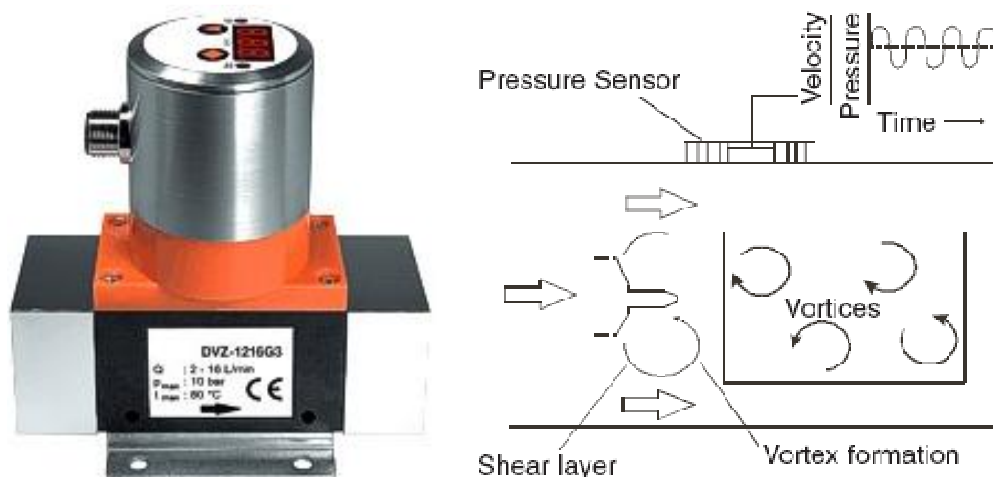
از دیگر مثال‌های برجسته در رابطه با وقوع پدیده فون کارمن می‌توان به عبور جریان هوا از قله کوه‌های بلند اشاره نمود. در شکل ۱-۱۳ عکس ماهواره‌ای ناحیه جریان برگشتی در چندین قله از یک رشته کوه آورده شده است که در آن وزش باد به سمت جنوب می‌باشد. الگوی جریان از طریق حرکت ابرها بر فراز قله کوه‌ها قابل مشاهده است. نشان داده شده است که حداقل برای دو قله، مشخصات جریان برگشتی از الگوی فون کارمن پیروی می‌کند.



شکل ۱-۱۳ وقوع پدیده فون کارمن در پایین دست جریان هوای عبوری بر فراز قله کوه‌ها [۴].

یکی دیگر از موارد استفاده از این پدیده در تعیین دبی جریان در خطوط نفت و گاز است که در حال حاضر، رویکرد کنونی صنعت به سمت آن می‌باشد. بر مبنای این پدیده، جسم توپی شکلی (Bluff body) را در مسیر جریان قرار داده و فرکانس گردابه‌های ایجاد شده را از طریق فشارسنج‌های بسیار حساسی که در ناحیه جریان برگشتی در پشت جسم تعبیه شده، اندازه‌گیری می‌کنند. این دستگاه با نام تجاری ورتکس فلومتر^۱ مشهور می‌باشد. در شکل ۱-۱۴ عکسی از این دستگاه به همراه شماتیکی از نحوه عملکرد آن آورده شده است [۸].

¹ Vortex Flowmeter



شکل ۱-۱۴ دستگاه ورتکس متر به منظور اندازه گیری دبی جریان [۸].

از آن جایی که سرعت جریان متناسب با فرکانس تشکیل گردابه‌ها است، لذا می‌توان بوسیله ضرب سطح مقطع دستگاه در سرعت جریان بدست آمده، مقدار دبی گذرنده را محاسبه نمود. از جمله مزایای استفاده از دستگاه ورتکس فلومتر می‌توان به نداشتن جسم متحرک و هزینه نصب پایین آن اشاره نمود. این جریان سنج‌ها هیچ‌گونه قطعه متحرکی ندارند و تنها یک جسم تویی شکل در قسمت جلوی دستگاه و به صورت ثابت در مسیر جریان قرار می‌گیرد. یکی دیگر از مواردی که استفاده از این دستگاه را به انواع دیگر برتری می‌دهد قابلیت استفاده از آن در اختلاف فشارهای بالا با نسبت ۱:۵۰ می‌باشد، در حالی که بازه کارایی اوریفیس‌مترها بین ۱:۳.۵ می‌باشد. لازم به ذکر است که دقت جریان سنج ورتکس فلومتر ۱٪ می‌باشد و در برخی از موارد، سازندگان آن میزان خطا را تنها ۰.۵٪ گزارش نموده‌اند که از بعد اندازه گیری، اهمیت فراوانی دارد. طول مستقیم مورد نیاز قبل و بعد از دستگاه برای دستیابی به دقت لازم در اندازه گیری دبی جریان، به ترتیب ۲۰ برابر و ۵ برابر قطر جسم تویی می‌باشد. شایان ذکر است که حساسیت دستگاه نسبت به سرعت پایین کم می‌باشد. به علاوه آنکه بدلیل حساسیت ورتکس فلومترها به پروفیل جریان، ایجاد هرگونه چرخش و یا پیچش در جریان، خطای اندازه گیری را بالا می‌برد [۸].

شایان ذکر است که این موضوع در بسیاری از فرایندهای تولید مواد غذایی، بهداشتی و صنایع دارویی و شیمیایی کاربردی گسترده دارد. از آنجایی که ماده اولیه در این صنایع، سیالات غیرنیوتنی می باشد، لذا به منظور درک بهتر از چگونگی تاثیر خواص رئولوژیکی بر روی الگوی پیدایش گردابه های فون کارمن، مدلسازی این نوع از جریان نیز لازم و ضروری به نظر می رسد.

فصل ۲:

مروری بر پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

از اوایل قرن بیستم تاکنون دانش مکانیک سیالات غیر نیوتنی، موضوع بسیاری از تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی بوده است. در این میان مطالعه سیالات ویسکوالاستیک به سبب پیچیدگی‌های حاکم بر رفتار فیزیکی و نیز کاربردهای گسترده صنعتی، نظامی و پزشکی از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف از این تحقیق، بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک بر روی سیلندر دایروی ایستا می‌باشد. در این فصل مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر صورت می‌گیرد. به این ترتیب ضمن بیان تاریخچه مربوط به تحقیقات پیشین می‌توان به میزان اهمیت تحقیق در این زمینه و نیز زمینه‌های فراروی پژوهشگران برای ادامه این تحقیقات پی برد. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از این مطالعات با تحقیق اخیر، جنبه‌های نوآوری و ضرورت مطالعه تحقیق حاضر آشکارتر می‌شود. در پایان این فصل، تحقیق حاضر معرفی شده و مشخصات کلی، اهداف، کاربردها و موارد نوآوری آن مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین در انتها مروری اجمالی بر ساختار کلی تحقیق حاضر صورت می‌گیرد.

۲-۲- تاریخچه

جریان بر روی سیلندر یکی از جریان‌های پایه و مهم در مبحث مکانیک سیالات محسوب می‌شود. تاکنون تحقیقات بسیار زیادی بصورت عددی و آزمایشگاهی در خصوص این نوع از جریان انجام شده که عمده این تحقیقات محدود به جریان سیالات نیوتنی بوده است و سهم اندکی از این تحقیقات متوجه سیالات غیرنیوتنی و به ویژه سیالات ویسکوالاستیک می‌باشد (در پیوست الف به معرفی سیالات ویسکوالاستیک پرداخته شده است).

بطور کلی، دلایل اصلی مربوط به تعداد اندک مطالعات مربوط به سیالات غیرنیوتنی در مقابل سیالات نیوتنی عبارتند از:

❖ یکی از دلایل استقبال گسترده از مطالعات مربوط به سیالات نیوتنی، مربوط به رفتار نیوتنی سیالاتی نظیر آب و هوا است. توسعه دانش مکانیک سیالات نیوتنی عمدتاً مرهون کاربرد این دو سیال در صنعت هوانوردی و کشتی سازی است. همچنین این دو سیال در سایر صنایع و جنبه‌های زندگی بشر نیز دارای کاربردهای متعددی هستند. به همین دلیل دانش مکانیک سیالات بر اساس سیالات نیوتنی پی‌ریزی شده و منظور از واژه سیال در علوم مرتبط با مکانیک سیالات (نظیر هیدرولیک، مورفولوژی، توربولانس، احتراق و ...)، سیال نیوتنی است.

❖ متعدد بودن خانواده‌های سیالات غیرنیوتنی و پیچیدگی رفتاری (فقدان معادله ساختاری^۱ مناسب و ساختار پیچیده، تنوع، مرتبه غیرخطی و احیاناً کسری معادلات ساختاری موجود)، سبب بروز دشواری در مطالعات مربوط به این سیالات شده است [۹].

جریان سیالات غیرنیوتنی بر روی سیلندر کاربردهای متنوعی در استخراج نفت و انتقال مشتقات و محصولات نفتی، تزریق مواد پلیمری، جریان زیست سیالات و انتقال مواد در صنایعی نظیر صنایع غذایی، شیمیایی (مانند تولید انواع مواد شوینده، آرایشی، بهداشتی، رنگ، رزین و ...)، صنایع نظامی و ... دارد. مطالعات در خصوص جریان سیال نیوتنی بر روی سیلندر از حدود ۱۰۰ سال پیش آغاز شد که از جمله معروف ترین این تحقیقات می‌توان به کارهای استروهل [۱۰]، هایمنز^۲ [۱۱] و فون کارمن [۱۲] اشاره نمود. همانطور که اشاره شد، کاربردهای جریان سیال نیوتنی در علوم هوانوردی و صنایع گوناگون سبب شده که مطالعاتی گسترده در خصوص این نوع از جریان صورت گیرد.

¹ Constitutive Equation

² Hiemenz

بدون اغراق می‌توان گفت که سهم تحقیقات صورت گرفته بر روی جریان عبوری از روی سیلندر برای جریان سیالات غیرنیوتنی از جمله سیالات ویسکوالاستیک در مقایسه با سیال نیوتنی بسیار کم و انگشت شمار می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل وجود خاصیت الاستیک و غیر خطی بودن ویسکوزیته نسبت به نرخ برش در سیالات ویسکوالاستیک، مدل‌سازی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر، خصوصاً در رینولدز بالاتر از رینولدز بحرانی بسیار پیچیده است. از این رو، تاکنون اکثر مطالعات انجام شده در خصوص جریان سیال غیرنیوتنی حول سیلندر، بیشتر بر پایه مشاهدات آزمایشگاهی بوده است. در برخی مشاهدات آزمایشگاهی صورت گرفته، تنها به بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت [۱۳، ۱۴]، اثرات ویسکوالاستیکی بر روی ضریب درگ [۱۵-۱۸] و همچنین تغییرات در خطوط جریان و پروفیل سرعت [۱۹-۲۱] پرداخته شده است. از آنجایی که تحقیق حاضر، تمرکز بیشتر بر روی پدیده نوسان گردابه‌ها در ناحیه جریان برگشتی می‌باشد، لذا در این قسمت سعی شده است تا بیشتر به بیان تاریخچه‌ای از کارهای انجام شده در خصوص جریان برگشتی سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر پرداخته شود.

گاد^۱ [۱۶] در سال ۱۹۶۶ به بررسی تغییرات عدد استروهال با افزودن ماده پلیمری پلی ایزوبوتیلن در آب پرداخت. عدد رینولدز جریان در آزمایش وی ۲۴۰ و غلظت ماده پلیمری آن بین ۵ تا ۴۰ ppm گزارش شده بود. او مشاهده کرد که فرکانس جریان به هنگام افزودن این ماده پلیمری به حلال نیوتنی کاهش می‌یابد. از دیگر مشاهدات وی این بود که با افزایش غلظت ماده پلیمری در آب، مقدار فرکانس جریان با کاهش بیشتری مواجه خواهد شد. آزمایشی مشابه، توسط کالاشنیکو^۲ و کودین^۳ [۲۲] در رینولدز ۴۰۰ و غلظت ۱۰۰ ppm انجام شد. آن‌ها نیز نشان دادند که فرکانس جریان در حضور ماده پلیمری به شدت کاهش می‌یابد. در آزمایش یوسی^۴ و همکاران

¹ Gadd

² Kalashnikov

³ Kudin

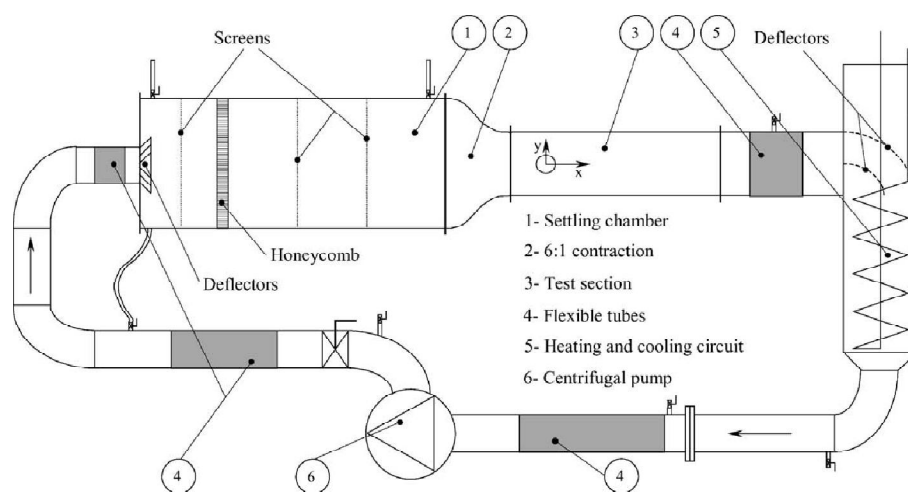
⁴ Usui

[۲۳] شکل ناحیه ویک جریان برای حلال پلیمری با غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۴۰۰ ppm در رینولدز کمتر از ۳۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. ضمن تایید نتایج کالاشنویک و کودین [۲۲]، آن‌ها نیز نشان دادند که با افزایش غلظت ماده پلیمری یا کاهش قطر سیلندر، مقدار عدد استروهمال به شدت کاهش می‌یابد. از دیگر مطالعات آزمایشگاهی در این خصوص می‌توان به تحقیقات کودات و همکاران^۱ [۲۴-۲۵] اشاره نمود. در دو تحقیق ارائه شده توسط وی، حلال پلیمری PEO از طریق حفره‌ای که در بالادست جریان سیال قرار گرفته بود، به داخل آن هدایت می‌شد. در تحقیق اول [۲۴]، او به بررسی جریان دو بعدی در رینولدز ۱۸۵ پرداخت و با وارد کردن حلال پلیمری با دو وزن مولکولی متفاوت، اثرات آن را بر مشخصه‌های جریان استخراج نمود. وی مشاهده کرد که با افزایش نرخ ورود ماده پلیمری با مولکول‌هایی با وزن مولکولی بالاتر، طول ناحیه ویک ایجاد شده در پشت سیلندر افزایش یافته و ضخامت این ناحیه کاهش می‌یابد. همچنین با وارد کردن ماده پلیمری با وزن مولکولی کمتر، حتی با ازدیاد نرخ ورود آن به سیال، تاثیر محسوسی در مشخصات جریان مشاهده نشد. در تحقیق بعدی [۲۵] ارایه شده توسط وی، تاثیرات خاصیت ویسکوالاستیکی سیال در تاخیر ناپایداری به صورت افزایش طول ناحیه جریان برگشتی ایجاد شده در پشت سیلندر مورد مطالعه قرار گرفت.

در آزمایش انجام شده توسط کرسمن^۲ و همکاران [۲۶] برای جریان دو بعدی در عدد رینولدز ۴۰۰، آشکار شد که در حقیقت افزودنی‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا، به شدت فرکانس جریان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از طرفی برای ماده پلیمری با وزن مولکولی پایین حتی با غلظت بالا، اثرات قابل ملاحظه‌ای در جریان مشاهده نشد. همچنین آن‌ها علت کاهش فرکانس جریان و کم شدن دامنه نوسان در حضور ماده پلیمری با وزن مولکولی بالا را به خاطر خاصیت الاستیک ماده پلیمری اضافه شده دانستند.

¹ Codat et al² Cressman

اخیرا، کولهو^۱ و پینهو^۲ [۲۷] با به کارگیری مواد پلیمری با خاصیت الاستیک کم و زیاد، به بررسی ناپایداری‌های ایجاد شده در ناحیه جریان برگشتی پرداختند. محدوده عدد رینولدز در نظر گرفته شده در کار آن‌ها بین ۵۰ تا ۹۰۰۰ بوده است. اندازه‌گیری‌ها در یک تونل آب که شماتیکی از آن در شکل ۱-۲ آورده شده است انجام شد. در این آزمایش از دو سیلندر به قطرهای ۱۹.۷ و ۱۰ میلیمتر استفاده شد. محل قرارگیری سیلندرها به ترتیب در فاصله ۷.۵ و ۱۵ برابر قطر سیلندر در پایین دست جریان در نظر گرفته شد.



شکل ۱-۲ شماتیک تونل آب از آزمایش انجام شده توسط پینهو [۲۷]

سرعت متوسط ماکزیمم برای تمامی سیالات کاری برابر ۲ متر بر ثانیه انتخاب شد که نرخ دبی جرمی $173 \text{ m}^3/\text{h}$ را تامین می‌کرد. در این آزمایش همچنین از یک مبدل حرارتی برای ثابت نگه داشتن دمای سیال کاری در حدود ۲۵ درجه سانتیگراد استفاده شد. از افزودنی‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا و پایین به منظور ایجاد سیالاتی با خاصیت الاستیک قوی و ضعیف استفاده شد و در انتها نتایج آن‌ها با هم مورد مقایسه قرار گرفت. سیالات با خاصیت الاستیک ضعیف به کار برده شده در کار وی به نام متیل هیدروکسیل سلولز با نام تجاری تیلوز با غلظت ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۶ درصد بود. همچنین برای ایجاد محلول آبی با خاصیت الاستیک بالا نیز از کربوکسی‌متیل سلولز

¹ Coelho

² Pinho

نمک سدیم (CMC) با وزن مولکولی 300000 kg/kmol و با غلظت ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ درصد وزن جرمی به کار گرفته شد. شایان ذکر است که همه سیالات مورد استفاده در این آزمایش، رفتار باریک شونده نسبت به نرخ برش از خود نشان می‌دهند. در آزمایش وی، داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های کاریو-یاسودا (معادله (۱-۲)) و مدل توانی ((۲-۲)) کاملاً مطابقت داشت. ثابت‌های مدل کاریو-یاسودا^۱ برای محلول‌های مورد استفاده در این آزمایش در جدول (۱-۲) و ثابت‌های مدل توانی^۲ در جدول (۲-۲) آورده شده است.

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 + \mu_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{n-1/a} \quad (1-2)$$

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2-2)$$

جدول (۱-۲) ثابت‌های مدل کاریو-یاسودا برای محلول‌های تیلوز و CMC

Solution	η_0 (Pa s)	η_{∞} (Pa s)	λ (s)	a	n	$\dot{\gamma}$ (s^{-1})	Average error (%)
0.4% CMC	0.15983	0.0008	0.06813	0.9909	0.5127	1-4000	0.99
0.3% CMC	0.10181	0.0008	0.04515	0.6343	0.5062	1-4000	1.1
0.2% CMC	0.03579	0.0008	0.02711	1.0431	0.5807	30-4000	1.5
0.1% CMC	0.01367	0.0008	0.01317	0.6671	0.5864	10-4000	0.72
0.6% Tylose	0.07047	0.0008	0.00720	1.0055	0.5584	5-4000	2.1
0.4% Tylose	0.02274	0.0010	0.00304	0.7413	0.6081	10-4000	0.88
0.3% Tylose	0.01074	0.0010	0.00095	0.6531	0.5941	10-4000	0.82
0.2% Tylose	0.00614	0.0008	0.00011	0.2903	0.6311	20-4000	0.53

جدول (۲-۲) ثابت‌های مدل توانی برای محلول‌های تیلوز و CMC

Parameters	0.4% CMC	0.3% CMC	0.2% CMC	0.1% CMC	0.6% Tylose	0.4% Tylose	0.3% Tylose	0.2% Tylose
n	0.543	0.583	0.644	0.724	0.580	0.717	0.793	0.880
K (Pa s^n)	0.491	0.268	0.110	0.032	0.526	0.080	0.031	0.009
$\dot{\gamma}$ (s^{-1})	10^2 to 4×10^3				10^3 to 4×10^3			

خاصیت الاستیکی سیالات از طریق تست نوسان و تست خزش تعیین شد. با استفاده از تست

خزش، زمان آسودگی از تنش برای برخی از محلول‌ها بدست آمد که در جدول (۳-۲) مقادیر حاصل آورده شده است.

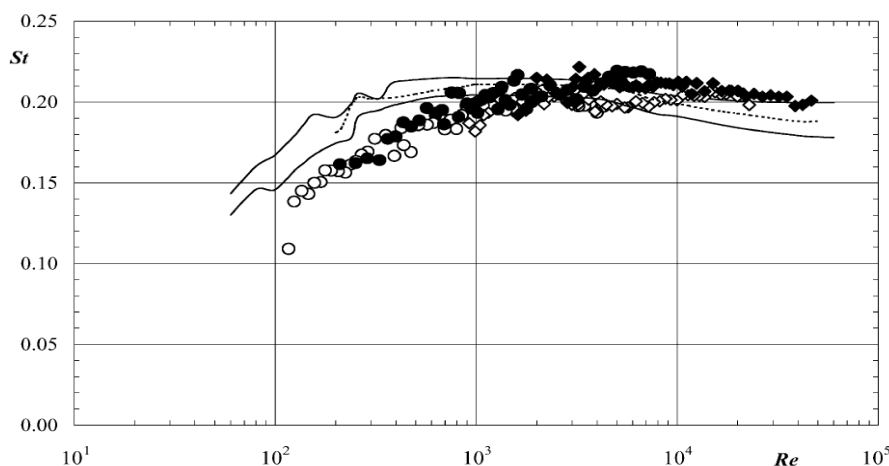
¹ Carreau-Yasuda

² Power-law

جدول (۳-۲) مان آسودگی از تنش بدست آمده از تست خزش در ۲۵ درجه سانتیگراد

	0.4% CMC	0.3% CMC	0.2% CMC	0.1% CMC	0.6% Tylose	0.4% Tylose
λ_e (s)	0.488	0.346	0.162	0.064	0.389	0.053
$\Delta\lambda_e/\lambda_e$ (%)	± 6	± 10	± 14	± 18	± 3	± 19

نتایج اندازه‌گیری عدد استروهل و طول ناحیه جریان برگشتی، ابتدا برای جریان سیال نیوتنی انجام شد و با نتایج تحقیقات پیشین مورد مقایسه قرار گرفت. در نمودار شکل ۲-۲ مقادیر عدد استروهل به صورت تابعی از عدد رینولدز برای دو قطر سیلندر ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر آورده شده است.



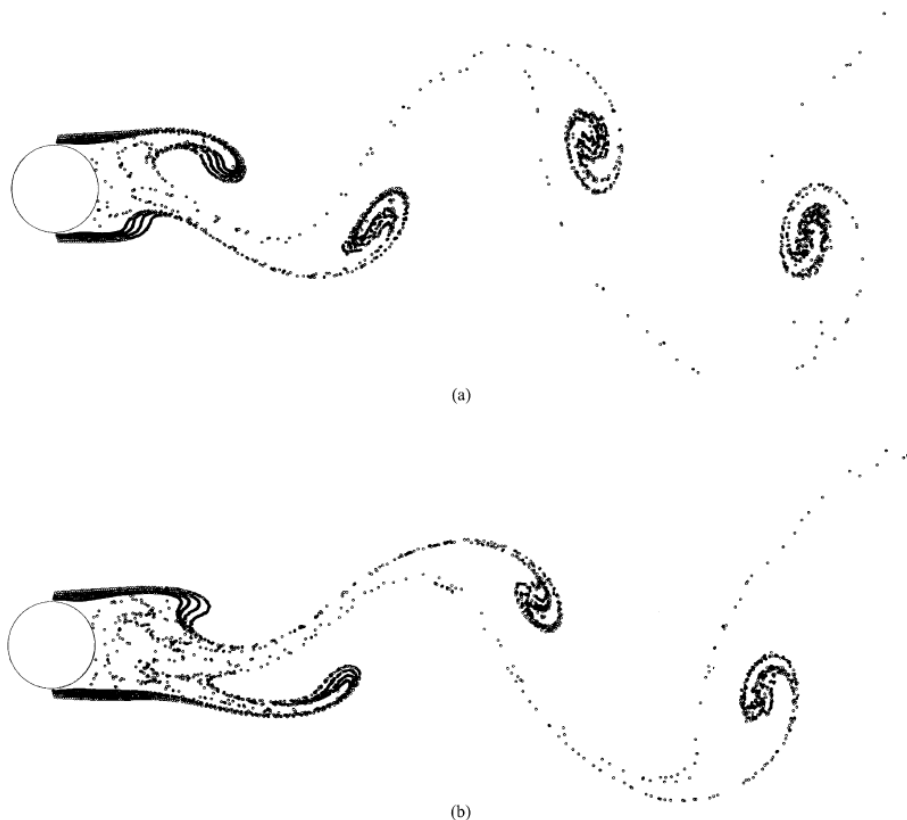
شکل ۲-۲ تغییرات عدد استروهل با عدد رینولدز برای جریان نیوتنی (○, ●)؛ محلول گریسلین در آب (◇, ◆)؛ نشانۀ توپر: سیلندر با قطر ۱۰ میلی‌متر، نشانۀ توخالی: سیلندر به قطر ۲۰ میلی‌متر، (—) یونال و راکول [29]، (---) نوربرگ [37]

نشان داده شد که افزایش خاصیت الاستیک سیال سبب کاهش رینولدز بحرانی در جریان سیال ویسکوالاستیک می‌شود. به طوری‌که برای محلول تیلوز ۰.۶٪، این کاهش بسیار محسوس گزارش شده است. در این تحقیق، خاصیت سودپلاستیک سیال ویسکوالاستیک به صورت غیر مستقیم به عنوان عاملی برای کاهش رینولدز بحرانی گزارش شده است.

همانطور که ذکر شد، به دلیل پیچیدگی‌های موجود در رابطه با مدل‌سازی جریان سیال ویسکوالاستیک، اکثر مطالعات انجام شده بر روی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر به صورت آزمایشگاهی بوده و بررسی‌های عددی در این خصوص بسیار کم و انگشت شمار می‌باشد.

از جمله تحقیقات عددی که به بررسی مشخصات جریان سیال ویسکوالاستیک در عبور از سیلندری ایستا می‌پردازد، می‌توان به کار الویرا^۱ [۲۸] در سال ۲۰۰۱ میلادی اشاره نمود. وی روش حجم محدود^۲ (FVM) را برای مدل‌سازی جریان سیال ویسکوالاستیک وابسته به زمان بکار برد و به منظور بالابردن دقت در محاسبات، از گسسته‌سازی مرتبه دوم در مکان و زمان استفاده نمود. مدل رئولوژیکی مورد استفاده در کار او، مدل FENE-CR بوده است. در جدول (۲-۳) خطوط رگه برای جریان نیوتنی و جریان ویسکوالاستیک آورده شده است. مشاهده می‌شود که ناحیه جریان برگشتی سیال ویسکوالاستیک بزرگتر از حالت نیوتنی می‌باشد. وی همچنین در قسمت دیگری از نتایج خود، به بررسی اثرات عدد رینولدز بر مشخصات جریان سیال ویسکوالاستیک و نیوتنی پرداخت. در جریان با اعداد رینولدز کم (هم برای جریان سیال نیوتنی و هم برای حالت ویسکوالاستیک)، مقادیر ضریب درگ محاسبه شده بیشتر از جریان با اعداد رینولدز بالا گزارش شده است. این در حالی است که فرکانس نوسانات برای هر دو جریان، روندی افزایشی نسبت به عدد رینولدز از خود نشان می‌دهد.

^۱ Oliveira^۲ Finite Volume



شکل ۲-۳ خطوط رگه (a) جریان نیوتنی (b) ویسکوالاستیک

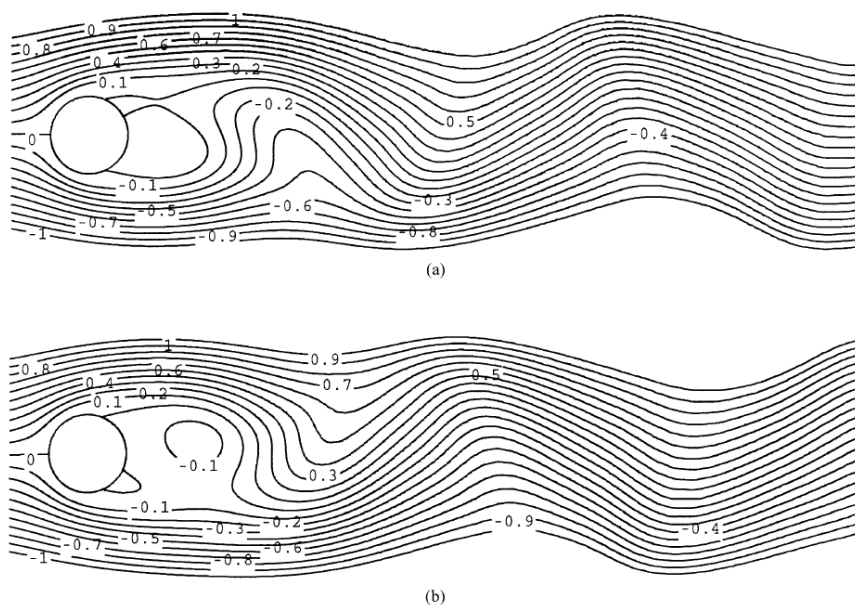
همچنین در بخش دیگری از این تحقیق، اثرات پارامتر کشیدگی^۱ بر مشخصات جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تغییرات پارامتر کشسانی سیال ویسکوالاستیک در بازه $L^2=100$ و $L^2=1200$ در $Re=100$ و $De=1$ در جدول (۲-۴) گزارش شده است. مطابق این جدول، دوره تناوب نوسانات جریان به مقدار خیلی کم افزایش یافته است، لذا فرکانس جریان نیز به مقدار ناچیزی، کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شده است که دامنه ضریب لیفت نیز با افزایش این پارامتر کاهش یافته است. این در حالی است که با افزایش این پارامتر، ضریب درگ نیز افزایش می‌یابد.

¹ Extensibility

جدول (۴-۲) نتایج حاصل با تغییرات پارامتر کشسانی در $Re=100$ و دپورا^۱ برابر ۱

L^2	δt	T_L	St	ΔC_L	$C_{D_{max}}$	$C_{D_{min}}$
100	0.05	6.0816	0.1644	0.2901	1.3806	1.3659
200	0.05	6.1150	0.1635	0.2790	1.3858	1.3721
300	0.05	6.1334	0.1630	0.2746	1.3903	1.3771
600	0.025	6.1643	0.1622	0.2673	1.4025	1.3897
900	0.025	6.1810	0.1618	0.2663	1.4133	1.4005
1200	0.025	6.1961	0.1614	0.2662	1.4221	1.4092

در شکل ۴-۲ خطوط جریان برای دو حالت پارامتر کشسانی کم و زیاد در $Re=100$ و $De=1$ آورده شده است که به وضوح نشان می‌دهد چطور این پارامتر، توزیع فشار حول سیلندر را دستخوش تغییر می‌کند. همچنین این شکل می‌تواند توجیه کننده افزایش ضریب درگ که در نتیجه انحراف در میدان فشار پشت سیلندر است، نیز باشد.



شکل ۴-۲ خطوط جریان حول سیلندر در عدد دپورا برابر ۱ و رینولدز برابر ۱۰۰ (a) $L^2=100$ ، (b) $L^2=1200$

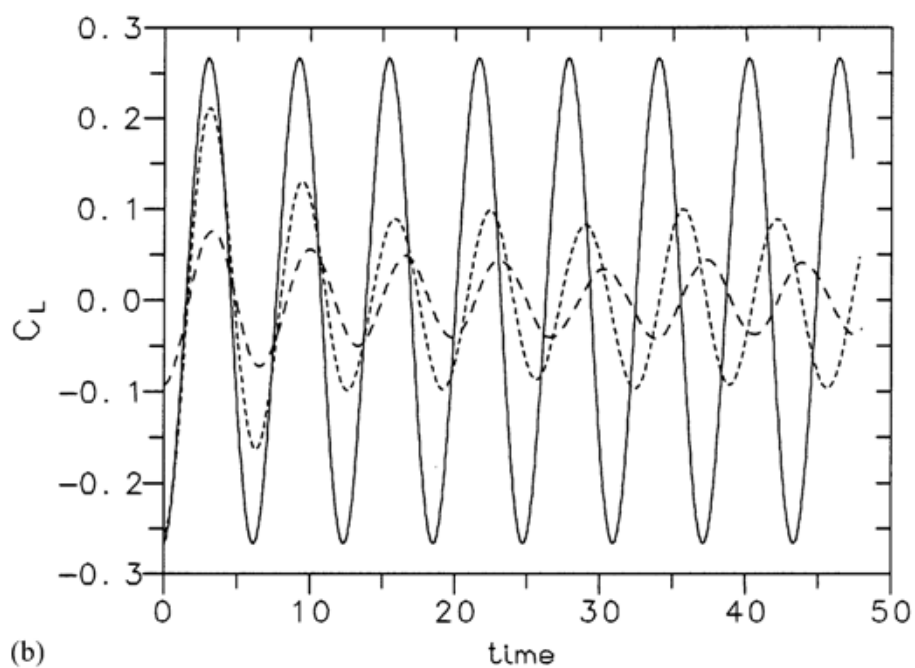
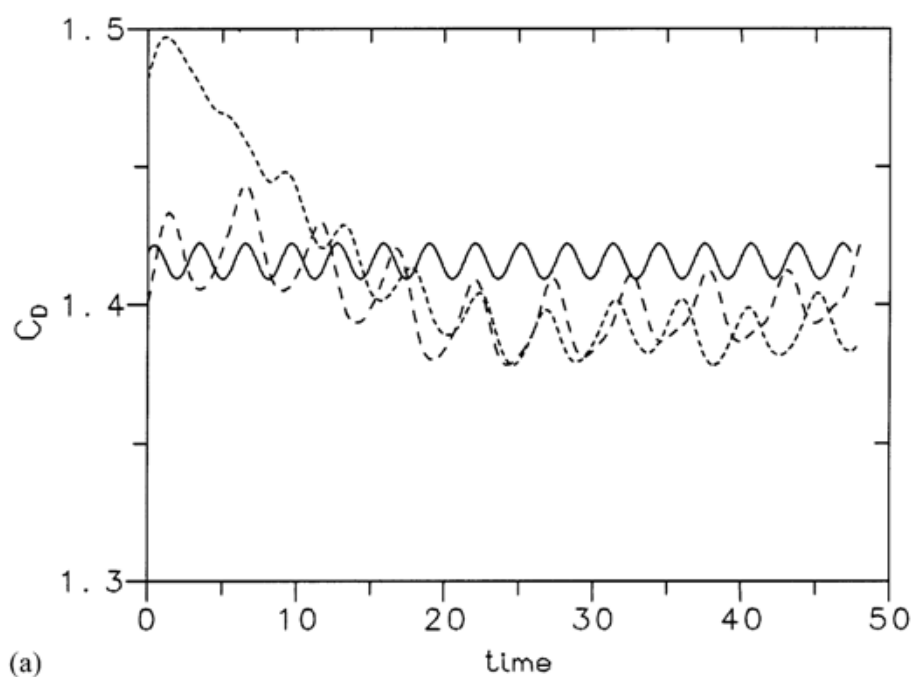
¹ Deborah Number

آنچه که بیشتر مورد توجه است، اثر افزایش خاصیت الاستیکی سیال بر روی مشخصات جریان در پارامتر کشسانی بالای سیال ویسکوالاستیک می‌باشد. در جدول (۲-۵) برای اعداد ۳ و ۱، $De=2$ خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در عدد کشسانی $L^2=1200$ گزارش شده است.

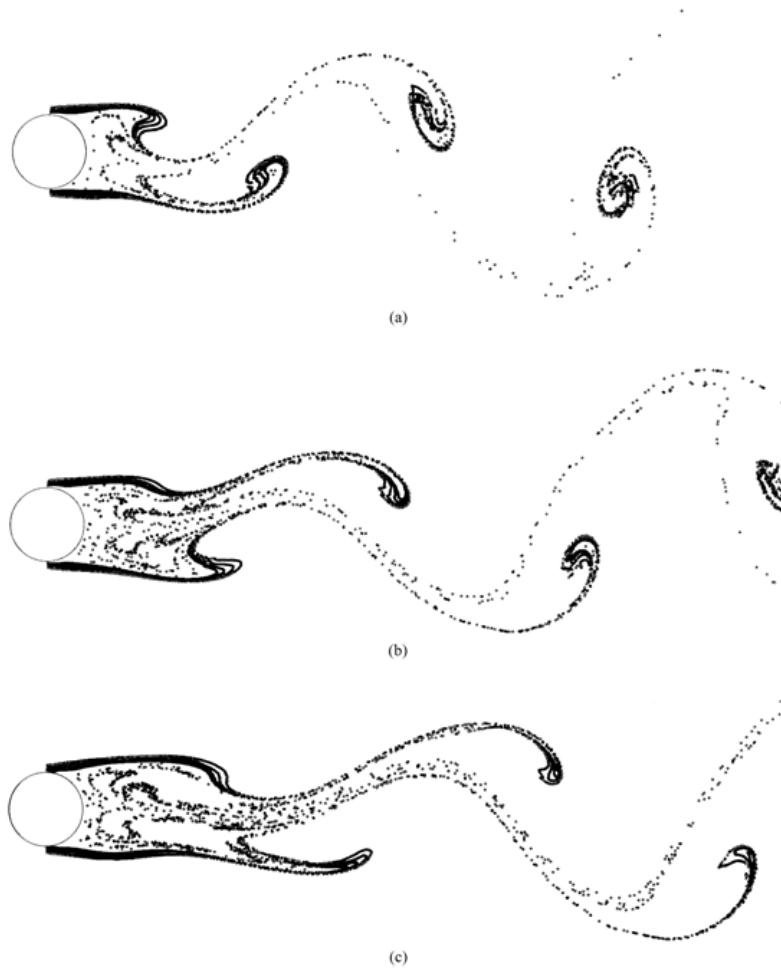
جدول (۲-۵) نتایج بدست آمده با تغییرات دبورا در $L^2 = 1200$

De	δt	T_L	St	ΔC_L	C_{Dmax}	C_{Dmin}
1	0.025	6.1961	0.1614	0.2662	1.4221	1.4092
2	0.0125	6.6235	0.1510	0.09594	1.4042	1.3832
3	0.0125	6.875	0.1454	0.041 ^a	1.413 ^a	1.387 ^a

هنگامی که دبورا از عدد ۱ تا ۳ افزایش می‌یابد ضریب لیفت به شدت کاهش می‌یابد. دوره تناوب افزایش یافته و فرکانس جریان کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب درگ با کاهشی چشمگیر مواجه شده است. در شکل ۲-۵ تغییرات ضریب درگ و لیفت نسبت به زمان برای سه عدد دبورای انتخابی آورده شده است. در حالیکه برای عدد دبورای ۱، تغییرات ضرایب لیفت و درگ کاملاً رفتار سینوسی از خود نشان می‌دهد، با افزایش این عدد، تغییرات نامنظمی در این ضرایب مشاهده می‌شود. به طوری که برای عدد دبورا برابر ۳، اگر چه دوره تناوب ثابت می‌ماند اما دیگر این تغییرات از رفتار سینوسی تبعیت نمی‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که برای این عدد، بیشینه مقادیر ضرایب لیفت و درگ ثابت نیست و در هر دوره تناوب تغییر می‌کند. خطوط رگه برای این سه عدد، شکل ۲-۶ آورده شده است. در این شکل، تعداد ذرات در واحد زمان برای هر سه یکسان می‌باشد.



شکل ۵-۲ 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 $De=3$.



شکل ۲-۶ نمایش خطوط رگه با افزایش الاستیسیته در پارامتر کشسانی بالا $L^2=1200$ و $Re=100$ و $De=1$ (a)، $De=2$ (b) و $De=3$ (c).

تغییرات در شکل ورتکس‌ها و افزایش طول ناحیه جریان برگشتی در پشت سیلندر در اعداد دבורای مختلف در این شکل بوضوح مشاهده می‌شود.

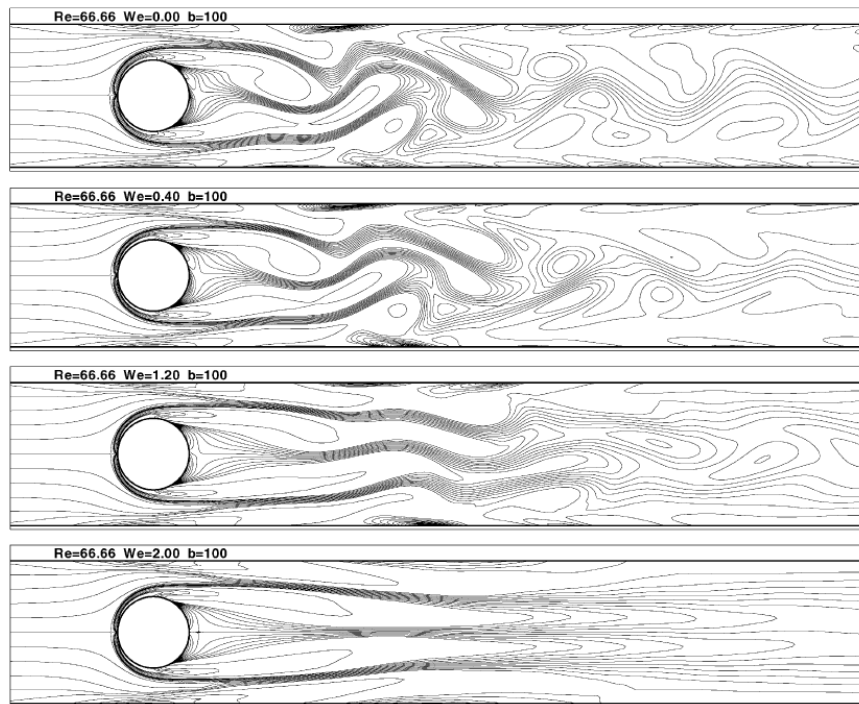
از دیگر تحقیقات عددی که به بررسی مشخصات جریان سیال ویسکوالاستیک در عبور از سیلندری ایستا می‌پردازد، می‌توان به کار ساهین^۱ و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۰۴ میلادی اشاره نمود. در کار او، از تحلیل پایداری خطی به منظور بررسی تاثیر نیروهای الاستیکی بر روی پایداری اینرسی جریان سیال MCR حول سیلندر دایره‌ای ایستا استفاده شد. وی در اعداد رینولدز پایین،

¹ Sahin

مشخصات جریان سیال حول سیلندر را استخراج نمودند. لازم به ذکر می‌باشد که او در کار خود از شرط عدم لغزش برای مرزهای بالایی و پایینی استفاده کرد. تاثیر افزودنی‌های پلیمری بر روی پایداری خطی جریان دو بعدی در عبور از یک سیلندر، هم با استفاده از روش مدل‌سازی مستقیم عددی (DNS) و هم مسایل مقدار ویژه تعمیم یافته از تئوری اغتشاشات مورد بررسی قرار گرفت. مدل رئولوژیکی FENE با فرض ویسکوزیته ثابت به عنوان معادله ساختاری سیال ویسکوالاستیک در کار او مورد استفاده قرار گرفت. نشان داده شده که افزودنی‌های پلیمری باعث پایداری جریان سیال در پشت سیلندر می‌شود. همچنین به طور خاص، نتایج آشکار می‌سازد که با افزایش پارامتر کشسان سیال ویسکوالاستیک، مقدار عدد رینولدز بحرانی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل در کار وی با نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی مطابقت داده شد. به طور کلی، خاصیت کشسان سیال ویسکوالاستیک برای مولکول‌هایی با وزن مولکولی بالا، در کاهش انرژی جنبشی جریان نوسانی ایجاد شده در پشت سیلندر نقش دارد. همچنین تاثیر الاستیسیته بر روی عدد استروهال، طول ناحیه ویک پشت سیلندر، ضرایب لیفت و درگ نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. تعدادی از نتایج مهم از کار وی در ادامه آورده شده است.

توزیع ورتیسیته در عدد رینولدز ثابت $Re = 66.6$ و وایزنبرگ^۱های متفاوت از صفر تا ۲ در شکل ۲-۷ آورده شده است. در عدد $We = 0$ ، به دلیل اغتشاشات بسیار ناچیز، گردابه‌های متقارن ایجاد شده در ناحیه جریان برگشتی، ناپایدار شده و مقدار عدد استروهال در این حالت برابر $St = 0.261$ محاسبه شده است. با افزایش عدد وایزنبرگ، قدرت نوسان گردابه‌ها به شدت افت می‌کند، به طوریکه در $We = 2$ نوسان گردابه‌ها کاملاً متوقف می‌شود.

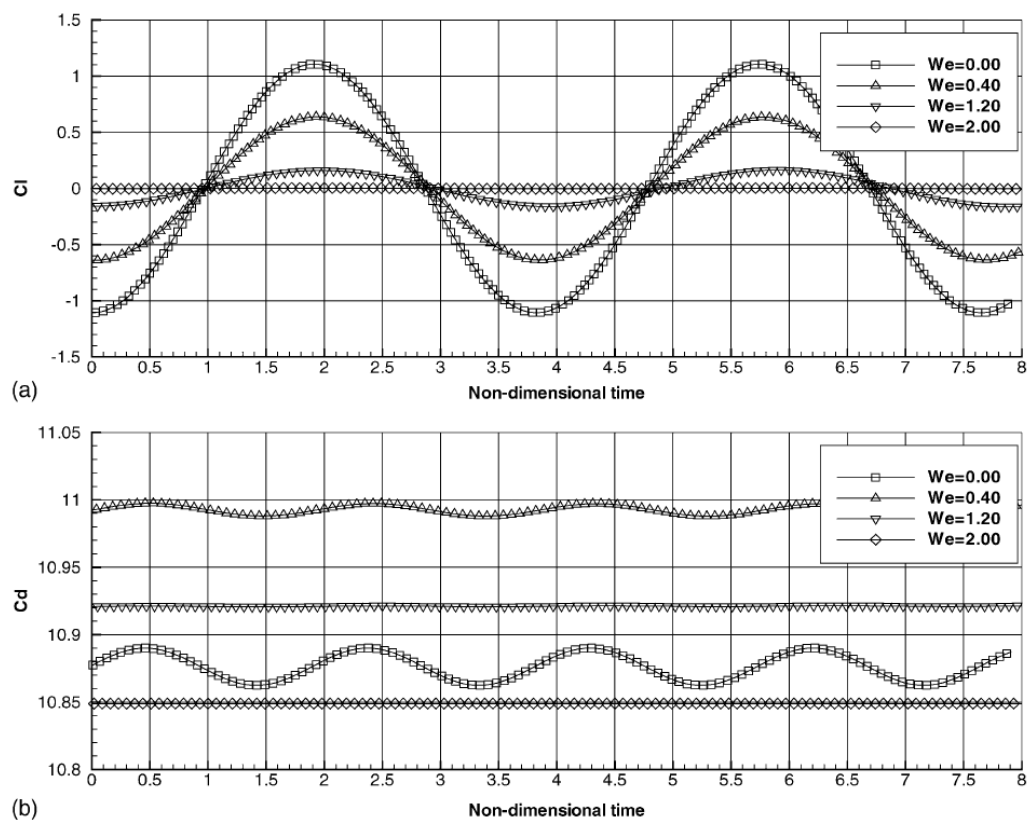
¹ Weissenberg Number



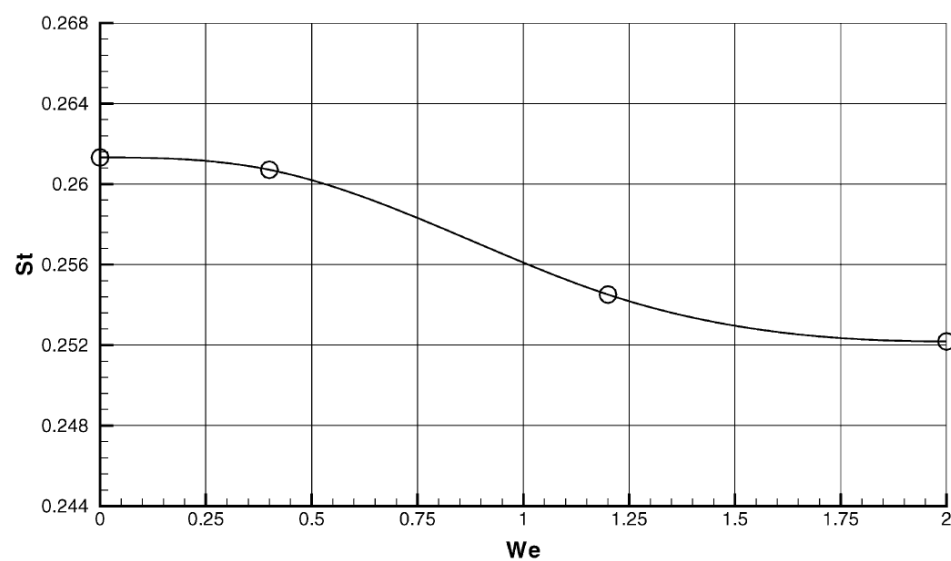
شکل ۲-۷ توزیع ورتیسیت در زمانی واحد برای سیال MCR در $Re = 66.66$ و $We = 0, 0.4, 1.2, 1.2, 2$.

در شکل ۲-۸ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد وایزنبرگ، دامنه ضرایب لیف و درگ کاهش یافته و تناوب نوسان جریان افزایش می‌یابد. این پدیده، آشکار می‌سازد که ویسکوالاستیسیته سبب افزایش پایداری جریان شده و خاصیت الاستیکی سیال ویسکوالاستیک با بزرگ شدن ناحیه جریان برگشتی پشت سیلندر سبب می‌شود تا گردابه‌ها با سرعت و قدرت کمتری در جریان وارد شوند.

در شکل ۲-۹ نمودار تغییرات عدد استروهل به صورت تابعی از عدد وایزنبرگ آورده شده است که به وضوح نشان می‌دهد چطور فرکانس جریان با افزایش عدد وایزنبرگ کاهش می‌یابد.



شکل ۸-۲ تغییرات زمانی ضرایب (a) لیفت (b) درگ برای سیال MCR، $We=0, 0.4, 1.2, 2$ و $Re=66.6$ و $b=100$



شکل ۹-۲ تغییرات عدد استروهل نسبت به وایزنبرگ برای سیال MCR در $Re=66.6$ و $b=100$

همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دوی این مطالعات، کاهش عدد استروهال، کاهش پسا و افزایش طول ناحیه ورتکس ایجاد شده در پشت سیلندر در مقایسه با افزایش عدد وایزنبرگ و قابلیت کشسانی سیال مشاهده شده است که با تحقیقات آزمایشگاهی پیشین سازگار می‌باشد.

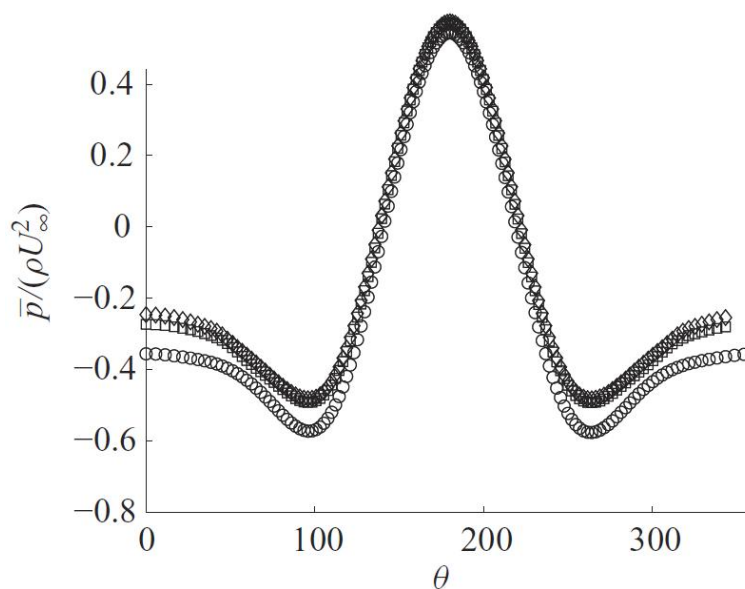
اخیراً، ریچتر^۱ و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۱۰ به بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۳۰۰ پرداختند. مدل مورد استفاده در کار آن‌ها نیز مدل FENE-P بوده است. نتایج بدست آمده در رینولدز ۱۰۰ با نتایج الویرا [۲۸] مورد ارزیابی قرار گرفت. از جمله نتایج مهم موجود در این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

توزیع فشار بی‌بعد بر روی سیلندر برای جریان سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در $Re=100$ و برای اعداد وایزنبرگ ۱۰ و ۸۰ در شکل ۲-۱۰ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش خاصیت الاستیک در جریان ویسکوالاستیک، توزیع فشار در پشت سیلندر نیز افزایش یافته است. این موضوع که به دلیل کاهش تنش برشی در جریان می‌باشد، سبب می‌شود که طول گردابه‌های ناحیه جریان برگشتی افزایش یابد. لازم به ذکر است که این موضوع، سبب بوجود آمدن پدیده کاهش درگ در جریان این گونه از سیالات می‌شود.

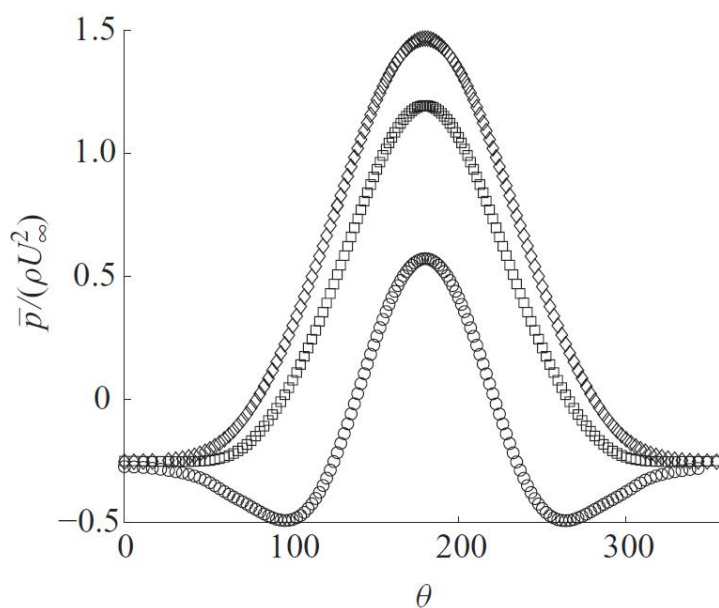
از دیگر کارهای صورت گرفته در این تحقیق، بررسی تغییرات ضریب درگ و توزیع فشار حول سیلندر در اثر ازدیاد پارامتر کشسانی سیال ویسکوالاستیک می‌باشد. مشاهده شد که ضریب درگ به شدت تحت تاثیر پارامتر کشسانی است، به نحوی که در عدد ثابت $We=10$ ، برای $L^2=10000$ مقدار ضریب درگ متوسط برابر $\bar{C}_D=2.7$ ، برای $L^2=100$ برابر $\bar{C}_D=1.25$ و برای جریان نیوتنی این مقدار برابر ۱.۳۴ می‌باشد. برای توضیح این موضوع، در شکل ۲-۱۱ نمودار توزیع فشار حول سیلندر برای مقادیر کم و زیاد پارامتر کشسانی، در مقایسه با حالت نیوتنی آورده شده است. به وضوح مشاهده می‌شود که افزایش درگ در ضریب درگ، به دلیل تغییراتی است که در توزیع فشار روی

¹ Richter

سطح سیلندر رخ می‌دهد.



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 می‌باشد) نماد دایره سیال نیوتنی، نماد مربع $We=10$ ، نماد لوزی $We=80$



شکل ۲-۱۱ توزیع فشار بی‌بعد بر روی سطح سیلندر در جریان سیال ویسکوالاستیک (زاویه شروع، از نقطه مقابل نقطه سکون، شروع شده و به صورت ساعتگرد می‌باشد) نماد دایره $L^2=100$ ، نماد مربع $L^2=10000$ ، نماد لوزی $L^2=22500$

همچنین لازم به ذکر می‌باشد که بخش دیگری از نتایج حاصل در کار آن‌ها، به بررسی الگوی سه بعدی جریان سیال ویسکوالاستیک در $Re = 300$ پرداخته شده است که بررسی آن در این تحقیق نمی‌گنجد.

۲-۳- تحقیق حاضر

در این تحقیق، جریان سیال ویسکوالاستیک در عبور از سیلندری ایستا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا، میدان جریان به شکل آرام و توسعه یافته می‌باشد و جریان فاقد هر گونه انتقال حرارتی است. سیال ویسکوالاستیک به صورت تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده و مساله به صورت دو بعدی می‌باشد. در این مطالعه برای نخستین بار، از مدل سه ثابت گزیکس^۱ [۳۱] به عنوان معادله ساختاری سیال ویسکوالاستیک بهره گرفته شده است. این مدل بر مبنای دیدگاه مولکولی استوار است. امتیاز اصلی این مدل آن است که قادر به ارائه رفتار توانی برای ویسکوزیته و ثابت‌های اختلاف تنش های نرمال^۲ می‌باشد. بنابراین می‌توان با استفاده از آن، اثرات اختلاف تنش نرمال اول و دوم بر جریان را نیز مشاهده نمود. شایان ذکر است که در معادلات ساختاری بکار گرفته شده در تحقیقات گذشته، ویسکوزیته نسبت به نرخ برش ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل‌های بکار گرفته شده، امکان بررسی اثر اختلاف تنش نرمال اول و دوم وجود ندارد. بنابراین توابع ویسکومتریکی مدل‌های رئولوژیکی بکار گرفته شده در تحقیقات پیشین، قادر نیستند رفتار سیال ویسکوالاستیک را با دقت بالایی مدل‌سازی نمایند (در پیوست ب انواع معادلات ساختاری خطی و غیر خطی آورده شده است).

در شکل ۲-۱۲ نمای شماتیک از هندسه مساله به همراه ابعاد آن نشان داده شده است. در این پژوهش، به دلیل وجود شرایط ناپایداری و غیر متقارن بودن جریان، هندسه مساله به صورت کامل

¹ Giesekus

² Stress differences

در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۲-۱۲ مشاهده می‌شود، به منظور جلوگیری از تاثیر مرزهای بالایی و پایینی بر جریان، تا حد ممکن، فاصله مرزها تا سیلندر زیاد انتخاب شده است. به عبارتی دیگر، موقعیت قرار گیری صفحات مرزی نسبت به سیلندر طوری انتخاب گردیده که هیچگونه اثری بر جریان نداشته، جریانی با مرزهای نامحدود را حول سیلندر مدل نماید.

در اینجا به منظور مدل‌سازی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک، از نرم افزار منبع با OpenFOAM^۱، که یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۲ است، استفاده شده است (معرفی نرم‌افزار OpenFOAM در پیوست پ آورده شده است). نرم افزار OpenFOAM توسط "OpenCFD Ltd" تحت مجوز عمومی گنو و در تاریخ ۱۱ دسامبر ۲۰۰۴ ایجاد شده و به صورت منبع باز و آزاد موجود می‌باشد. به علت آزاد یا باز بودن منبع کد مذکور امکان بررسی تمامی جنبه‌های کد نویسی از جمله تغییر و توسعه آن برای کاربر فراهم می‌باشد. هسته انعطاف پذیر و کارآمد OpenFOAM، از مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده توسط C++ ایجاد شده است که در قالب حل گر^۳هایی توانایی شبیه سازی انواع جریانات سیال را دارا می‌باشد. لازم به توضیح است که روش عددی در نظر گرفته شده در این نرم افزار، روش حجم محدود است. در این تحقیق، گسسته سازی ترم‌های مکانی و زمانی از مرتبه دو می‌باشد تا دقت بیشتری در حل معادلات حاکم حاصل شود. همچنین به منظور کوپلینگ میدان سرعت و فشار از الگوریتم تکرار SIMPLE^۴ استفاده شده است.

از موارد جالب توجه در تحقیق حاضر، بررسی اثرات اختلاف تنش نرمال اول و دوم در ناحیه جریان برگشتی می‌باشد. فرکانس جریان در قالب عدد بی‌بعد استروهل برای اعداد وایزنبرگ

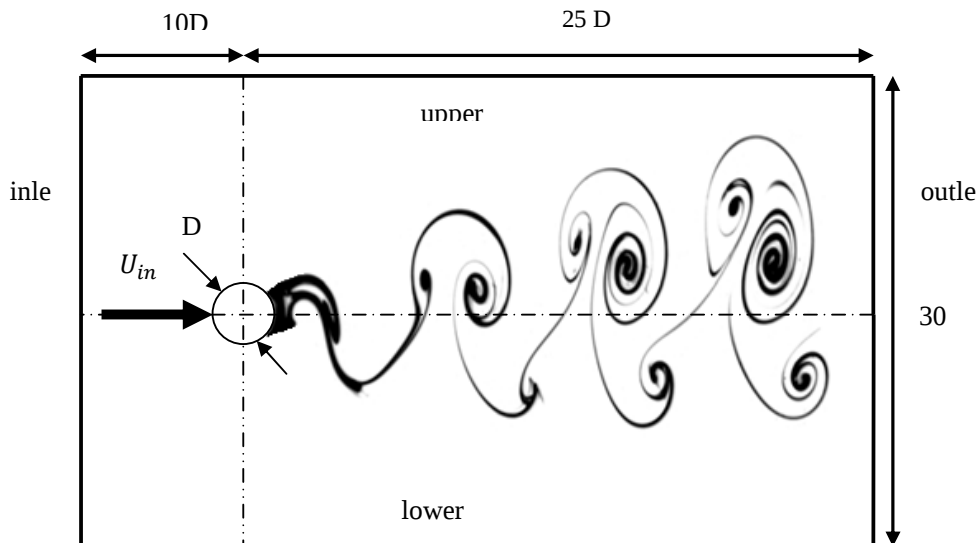
¹ Open Filed Operation and Manipulation

² Computational Fluid Dynamics

³ Solvers

⁴ Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations

مختلف استخراج شده است. همچنین اثرات خاصیت الاستیک سیال بر طول ناحیه جدایش، قبل از رسیدن به رینولدز بحرانی مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل ۲-۱۲ طرحواره هندسه مساله به همراه ابعاد آن در این پژوهش

۲-۴- جنبه‌های نوآوری

به طور خلاصه جنبه‌های نوآوری حاصل از تحقیق حاضر عبارتند از:

- هرچند تحقیقات انگشت شماری در خصوص جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر صورت گرفته، اما پژوهش حاضر نخستین تحقیقی محسوب می‌شود که در آن از مدل گزیکس به عنوان معادله ساختاری سیال ویسکوالاستیک بهره گرفته شده است.
- در این تحقیق جریان اینرسی سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر در محدوده وسیعی از عدد وایزنبرگ مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده خواهد شد که چطور خاصیت الاستیکی سیال ویسکوالاستیک، فرکانس و دامنه نوسانات را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین اثر این خاصیت از سیال، بر روی طول ناحیه جریان برگشتی قبل از رسیدن به رینولدز بحرانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- بررسی اثر عدد رینولدز بر مشخصات جریان از قبیل عدد استروهل و ضرایب لیفت و درگ جریان سیال ویسکوالاستیک با استفاده از مدل رئولوژیکی گزیکس و مقایسه آن با جریان سیال نیوتنی از دیگر نوآوری های این تحقیق محسوب می شود. نشان داده خواهد شد که نه تنها فرکانس جریان تحت تاثیر خاصیت الاستیک جریان کاهش می یابد، بلکه دامنه ضرایب لیفت و درگ نیز به شدت تحت تاثیر این پارامتر از سیال ویسکوالاستیک قرار می گیرد.
- یکی دیگر از جنبه های نوآوری تحقیق حاضر مطالعه اثر اختلاف تنش های نرمال بر فرکانس جریان نوسانی می باشد. در این تحقیق نشان داده می شود که افزایش اختلاف تنش های نرمال اول و دوم، فرکانس نوسان را کاهش داده و بر پایداری جریان می افزاید. حال آنکه در هیچ یک از تحقیقات پیشین به این موضوع پرداخته نشده است.

۲-۵- ساختار کلی

به طور خلاصه ساختار کلی تحقیق حاضر به قرار زیر می باشد :

- در فصل سوم، روابط فیزیکی حاکم بر جریان سیال ویسکوالاستیک در عبور از سیلندر دایروی و برخی روابط مورد نیاز ارائه می شود.
- در فصل چهارم، روش عددی به کار گرفته شده در تحقیق حاضر معرفی شده و نحوه گسسته سازی معادلات حاکم و همچنین اعمال شرایط مرزی با استفاده از نرم افزار OpenFOAM آورده شده است.
- در فصل پنجم نتایج حاصل از حل عددی ارائه شده است. در این فصل، ابتدا صحت نتایج حاصل از حل عددی ارزیابی شده و استقلال پاسخ های عددی از شبکه تحقیق می شود. در

ادامه، اثر پارمترهایی نظیر عدد رینولدز، عدد وایزنبرگ و ضریب تحرک مدل گزیکس بر مشخصه‌های جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- در فصل ششم نتیجه‌گیری از تحقیق اخیر و پیشنهادات جهت ادامه تحقیق حاضر ارائه می‌گردد.
- در بخش ضمیمه این تحقیق و در پیوست الف، به بررسی منشاء رفتار ویسکوالاستیک در محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری پرداخته شده و سپس معادلات ساختاری سیالات ویسکوالاستیک در پیوست ب معرفی گردیده است. در پیوست پ، به معرفی نرم افزار OpenFOAM پرداخته شده است و در ادامه، نحوه پیاده سازی الگوریتم SIMPLE در این نرم افزار آورده شده است. در پیوست ج، گریزی به معرفی انواع شرایط مرزی در نرم‌افزار OpenFOAM زده شده و پس از آن نحوه انجام عملیات ریاضی و عملگرهای تانسوری در این نرم افزار در پیوست چ آورده شده است.

فصل ٣:

معادلات حاکم

۳-۱- مقدمه

در این فصل معادلات حاکم بر جریان سیال ویسکوالاستیک در دستگاه‌های مختصات کارتزین ارائه می‌گردد. معادلات و روابط فیزیکی ارائه شده در این فصل برای مطالعه عددی جریان بر روی سیلندر به کار گرفته شده‌اند که نتایج حاصل از آن‌ها در فصل پنجم آمده است.

۳-۲- معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم برای جریان آرام تراکم ناپذیر سیال ویسکوالاستیک شامل معادله پیوستگی و معادله بقای مومنوم می‌باشد که به ترتیب در زیر آورده شده است.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1-3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla(u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2-3)$$

در معادلات فوق u بردار سرعت، p معرف فشار بر واحد چگالی و τ مجموع تنش حلال نیوتنی و ماده پلیمری بر واحد چگالی می‌باشد. سهم تنش ناشی از حلال نیوتنی τ_s و تنش ناشی از خاصیت الاستیک ماده پلیمری τ_p را می‌توان به صورت معادله (۳-۳) از هم تفکیک نمود [۳۲]:

$$\tau = \tau_s + \tau_p \quad (3-3)$$

معادله ساختاری برای توصیف رابطه بین تنش و نرخ برش در حلال نیوتنی به صورت رابطه (۴-۳) می‌باشد:

$$\tau_s = \eta_s \dot{\gamma} \quad (4-3)$$

که در آن η_s ویسکوزیته حلال نیوتنی و $\dot{\gamma}$ تانسور نرخ برش است و به صورت رابطه (۳-۵) بیان می شود.

$$\dot{\gamma} = \nabla u + |\nabla u|^T \quad (۳-۵)$$

در این تحقیق سهم تنش ناشی از خاصیت الاستیک سیال ویسکوالاستیک با استفاده از حل معادله ساختاری گزیکس رابطه (۳-۶) در نظر گرفته شده است.

$$\tau_p + \lambda_1 \tau_{p(1)} + a \frac{\lambda_1}{\eta_p} (\tau_p \cdot \tau_p) = \eta_p \dot{\gamma} \quad (۳-۶)$$

در معادله فوق، $\tau_{p(1)}$ مشتق فوق همرفتی تانسور^۱ τ_p ، λ_1 زمان آسودگی^۲ از تنش و η_p ویسکوزیته ماده پلیمری در نرخ برش صفر است. همچنین a ضریب پویایی^۳ یا تحرک در سیال ویسکوالاستیک می باشد که بیانگر رفتار غیر ایزوتروپیک برونی در هیدرودینامیک مولکولی ماده ویسکوالاستیک است. مشتق فوق همرفتی برای تانسور تنش پلیمری به صورت رابطه (۳-۷) بیان می شود.

$$\tau_{p(1)} = \frac{D}{Dt} \tau_p - [\nabla u^T \cdot \tau_p] - [\tau_p \cdot \nabla u] \quad (۳-۷)$$

که در آن $(D/Dt) \tau_p$ مشتق مادی^۴ برای تنش پلیمری است که به صورت رابطه (۳-۸) بیان می شود.

$$\frac{D}{Dt} \tau_p = \frac{\partial}{\partial t} \tau_p + u \cdot \nabla \tau_p \quad (۳-۸)$$

با قرار دادن $\tau_p = \tau - \tau_s = \tau + \eta_s \dot{\gamma}$ در معادله (۳-۶)، می توان این معادله را به فرم معادله (۳-۹) بازنویسی نمود.

$$\tau + \lambda_1 \tau_{(1)} + \alpha \frac{\lambda_1}{\eta_0} \{\tau \cdot \tau\} - \alpha \lambda_2 \{\gamma_{(1)} \cdot \tau + \tau \cdot \gamma_{(1)}\} = \eta_0 [\gamma_{(1)} + \lambda_{(2)} \gamma_{(2)} - \alpha \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1} \{\gamma_{(1)} \cdot \gamma_{(1)}\}] \quad (۳-۹)$$

¹ Upper convected derivative

² Relaxation Time

³ Mobility factor

⁴ Material derivative

در رابطه فوق، جملات $\gamma_{(1)}$ و $\gamma_{(2)}$ معرف مشتقات مرتبه اول و دوم همرفتی پاد همبسته تانسور نرخ برش^۱ هستند که به ترتیب بصورت روابط (۱۰-۳) و (۱۱-۳) بیان می‌شوند.

$$\gamma_{(1)} = \nabla u + \nabla u^T \quad (10-3)$$

$$\gamma_{(2)} = \frac{D\gamma_{(1)}}{Dt} - \{(\nabla u)^T \cdot \gamma_{(1)} + \gamma_{(1)}(\nabla u)\} \quad (11-3)$$

بنابراین می‌توان ویسکوزیته در نرخ برش صفر η_0 ، زمان رهایی^۲ از تنش λ_2 و پارامتر پویایی در سیال ویسکوالاستیک a را بر حسب α, η_s, η_p به صورت روابط (۱۲-۳) بیان نمود.

$$\eta_0 = \eta_s + \eta_p; \quad \lambda_2 = \lambda_1 \frac{\eta_s}{\eta_p}; \quad a = \frac{\alpha}{1 - (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})} \quad (12-3)$$

در این پژوهش جهت تعیین نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی ویسکوز از عدد بی بعد وایزنبرگ و به منظور تعیین نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز، از عدد بی بعد رینولدز بهره گرفته شده است. همچنین فرکانس جریان f_s نیز در قالب عدد بی بعد استروهل تعریف شده است. این اعداد به صورت روابط (۱۳-۳) بیان شده‌اند.

$$St = \frac{f_s D}{U_{in}} \quad We = \lambda_1 \frac{U_{in}}{D}, \quad Re = \frac{\rho U_{in} D}{\eta_0} \quad (13-3)$$

۳-۳- فرضیات مساله

به منظور حل جریان سیال حول سیلندر تعدادی فرضیات به منظور ساده‌سازی حل ضروری می‌باشد. در اینجا حل به صورت دو بعدی است تا هم بتوان در عملیات ریاضی و هم در محاسبات عددی، ساده‌سازی‌هایی را اعمال نمود. دما ثابت فرض شده است و هیچ منبع حرارتی وجود ندارد. در نتیجه این فرض، انبساط و یا انقباض حرارتی ناچیز فرض شده و ویسکوزیته نسبت به دما ثابت

¹ The first and second contravariant convected derivative of the shear rate tensor

² Retardation Time

می باشد. همچنین سیال تراکم ناپذیر فرض شده و ضریب تراکم پذیری در آن برابر صفر می باشد. رینولدزهای انتخابی برای جریان به نحوی است که جریان آرام نوسانی را مدل نماید. بنابراین به طور خلاصه می توان فرضیات اصلی در نظر گرفته شده در این پژوهش را به شرح زیر بیان نمود.

۱- جریان دو بعدی و آرام می باشد.

۲- سیال ویسکوالاستیک و تراکم ناپذیر می باشد.

۳- دما ثابت در نظر گرفته شده است، به طوریکه جریان به دما وابسته نمی باشد.

۴- رینولدز در نظر گرفته شده در محدوده ای می باشد که جریان آرام نوسانی را مدل نماید.

۵- از اثرات شتاب جاذبه و نیروهای حجمی صرفه نظر شده است.

ابعاد هندسه مساله به صورت تابعی از شعاع سیلندر در شکل ۲-۱۲ آورده شده است. در این تحقیق سعی گردیده که موقعیت قرارگیری و فاصله صفحات مرزی نسبت به سیلندر طوری باشد که هیچگونه اثری بر جریان نداشته باشند. برای این منظور مرزهای ورودی و خروجی به ترتیب در فاصله های 20R و 50R نسبت به مرکز سیلندر قرار گرفته و فاصله مرزهای بالایی و پایینی نسبت به مرکز سیلندر، ۳۰ برابر شعاع سیلندر در نظر گرفته شده است.

۳-۴- شرایط مرزی و شرایط اولیه

بر روی سطح سیلندر از شرط عدم لغزش استفاده شده است و گرادیان فشار و تنش بر روی آن صفر می باشد.

$$@ \text{Cylinder surface} : \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial n} = 0, \quad U_x = 0, \quad U_y = 0, \quad U_z = 0 \quad (3-14)$$

شایان ذکر است که به مانند سیال نیوتنی، در سیالات ویسکوالاستیک نیز اعمال شرط مرزی عدم لغزش بر روی دیوار جامد رایج است. به طور کلی اعمال این شرط برای جامدات ویسکوالاستیک چندان صحیح به نظر نمی‌رسد، اما برای سیالات ویسکوالاستیک در محدوده وسیعی از عدد دپورا این شرط با دقت قابل قبولی صادق است. در این تحقیق از مدل گزیکس به عنوان معادله ساختاری سیال ویسکوالاستیک استفاده شده است. این مدل در ناحیه ویسکومتریکی دیگرام پیپکین (در اعداد دپورای کوچک) صادق بوده و دارای جواب دقیقی در این ناحیه است. لذا در جریان این سیال، اعمال شرط مرزی عدم لغزش برای مولفه‌های سرعت کاملاً صحیح به نظر می‌رسد. در مرز ورودی، فرض بر این است که جریانی با سرعت یکنواخت وارد شده، میدان تنش و گرادیان فشار در آن صفر می‌باشد.

$$@ \text{Inlet boundary: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad \tau = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad U = cte \quad (15-3)$$

در مرز خروجی جریان، گرادیان سرعت و تنش برابر صفر می‌باشد و فشار برابر فشار اتمسفری در نظر گرفته شده است.

$$@ \text{Outlet boundary: } \frac{\partial U}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial n} = 0, \quad p = p_{atm} = cte \quad (16-3)$$

از شرط لغزش برای صفحات مرزی بالایی و پایینی استفاده شده است تا حتی الامکان، جریانی با مرزهای نامحدود را حول سیلندر بتوان مدل نمود.

$$@ \text{Upper \& Lower boundary: } \frac{\partial U}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (17-3)$$

به عبارتی دیگر با استفاده از این شرط مرزی، از تلفات مکانیکی بین سیال و دیواره‌ها صرف‌نظر شده و سیال در راستای این دو مرز، ایده‌آل فرض شده است. مدل‌سازی، با محاسبه

جریان دائمی که با سرعت یکنواخت از روی یک سیلندر ایستا عبور می‌کند، آغاز می‌گردد. شایان ذکر است که شرایط اولیه مساله کاملاً متقارن در نظر گرفته شده است؛ به نحوی که سیال در حال سکون است و نوسان در جریان به طور طبیعی رخ می‌دهد. در ابتدای مدل سازی، گردابه‌های بوجود آمده در اثر شرط عدم لغزش بر روی سیلندر در ناحیه پشت آن، کاملاً متقارن بوده و با افزایش گام زمانی بزرگ‌تر می‌شوند. بعد از گذشت تعدادی گام زمانی اولیه، مشاهده می‌شود که گردابه‌های متقارن، به صورت متناوب، یکی در بالا و دیگری در پایین سطح سیلندر شروع به نوسان می‌کنند. به نحوی که دو ردیف از گردابه‌ها در پشت سیلندر به وجود می‌آیند. حرکت منظم گردابه‌ها سرعت نسبی نوسانی را در ناحیه پایین دست جریان بوجود خواهد آورد که به صورت کاملاً سینوسی می‌باشد. رفتار سینوسی گردابه‌ها بدلیل چرخش گردابه‌ها در حین نوسان در دو جهت مخالف می‌باشد، به نحوی که در یک ردیف از گردابه‌ها، این چرخش در جهت مثلاًثاتی و در ردیف دیگر در جهت عکس مثلاًثاتی می‌باشد.

۳-۵- توابع ویسکومتریکی

همانطور که می‌دانیم سیالات ویسکوالاستیک موادی هستند که به طور توأمان خواص ویسکوز و الاستیک را دارا می‌باشند. از آنجا که در سیالات، تنش تابعی از نرخ برش و در جامدات تابعی از خود برش است، لذا این مواد دارای خواص همزمان جامد و سیال هستند. یکی از مهمترین تفاوت‌های سیالات ویسکوالاستیک با سایر سیالات، وجود اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم در این مواد است. 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 بروز خواص غیرایزوتروپیک در سیال می‌شود. لذا جهت حفظ این انحراف، میدان تنش نیز تحت تاثیر قرار گرفته و اختلاف تنش‌های نرمال پدید می‌آیند. چنانچه

سیال، تنها در یک جهت جریان داشته باشد و تغییرات سرعت فقط در یک جهت عمود بر جهت حرکت بوجود بیاید (مانند جریان کوئت)، در اینصورت طبق تعریف، جهت ۱ معرف جهت جریان اصلی، جهت ۲ معرف جهت تغییرات سرعت و جهت ۳ نیز معرف جهت راستگرد عمود بر جهات ۱ و ۲ است. در یک سیال ویسکوالاستیک اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم به شکل زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$(۱۸-۳)$$

$$(۱۹-۳)$$

بر این اساس ثابت‌های تنش‌های نرمال به شکل روابط (۲۰-۳) و (۲۱-۳) قابل بیان هستند [۲]:

$$\Psi_1 = \frac{N_1}{\dot{\gamma}^2} \quad (۲۰-۳)$$

$$\Psi_2 = \frac{N_2}{\dot{\gamma}^2} \quad (۲۱-۳)$$

که در روابط، Ψ_1 و Ψ_2 ثابت‌های تنش نرمال اول و دوم و $\dot{\gamma}$ نرخ برش است. اختلاف تنش‌های نرمال و ثابت‌های تنش نرمال همگی توابعی زوج از نرخ برش هستند. در حالت جریان پایدار، ویسکوزیته برای یک سیال ویسکوالاستیک به شکل رابطه (۲۲-۳) قابل تعریف است [۲]:

$$\eta = \frac{\tau_{12}}{\dot{\gamma}} \quad (۲۲-۳)$$

علاوه بر ویسکوزیته، ثابت‌های اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم نیز از جمله خواص رئولوژیکی سیال ویسکوالاستیک محسوب می‌شوند. شایان ذکر است که تقریباً در تمامی مواد پلیمری رفتار ویسکوزیته و ثابت‌های اختلاف تنش‌های نرمال بصورت نازک شونده^۱ (شبه پلاستیک) است. لذا اصولاً بسیاری از توابع ویسکومتریکی بصورت باریک شونده (کمتر شدن

^۱ Shear thinning

ویسکوزیته با ازدیاد نرخ برش) مدل شده‌اند. در این تحقیق از مدل رئولوژیکی، کاریو-یاسودا استفاده شده است. در این مدل، توابع ویسکومتریکی مربوط به ویسکوزیته و ضرایب اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم به شکل روابط (۲۳-۳) تعریف می‌شوند [۲]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tilde{\eta}(\dot{\gamma}) - \tilde{\eta}_{\infty}}{\tilde{\eta}_0 - \tilde{\eta}_{\infty}} &= \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{(n-1)/a} \\ \Psi_1(\dot{\gamma}) &= 2\lambda_1 (\tilde{\eta}_0 - \tilde{\eta}_{\infty}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{(n-1)/a} \\ \Psi_2(\dot{\gamma}) &= -\chi \Psi_1(\dot{\gamma}) \end{aligned} \right\} \rightarrow (23-3)$$

در روابط (۲۳-۳)، $\tilde{\eta}_0$ ویسکوزیته در نرخ برش صفر، $\tilde{\eta}_{\infty}$ ویسکوزیته در نرخ برش بی نهایت، λ ثابت زمانی مدل، λ_1 ثابت زمانی تاخیر سیال، χ نسبت ویسکوزیته، n توان پاورلو و a ثابت بی بعدی است که معرف ناحیه انتقال بین نرخ برش صفر و ناحیه پاورلو است. مقدار a برای بسیاری از محلول‌های پلیمری برابر ۲ گزارش شده است. همچنین در عمده محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری مقدار $\tilde{\eta}_{\infty}$ حدود 10^1 تا 10^4 بار از $\tilde{\eta}_0$ کوچکتر است، لذا در برخی از کاربردهای مهندسی مقدار $\tilde{\eta}_{\infty}$ برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. $\tilde{\eta}_{\infty}$ در واقع معرف بخش نیوتنی رفتار ماده است که معمولاً در محلول‌های پلیمری مقدار آن غیر صفر و کوچک است. به عنوان مثال برای یک محلول ویسکوالاستیک که بوسیله اختلاط یک ماده حل شونده پلیمری در حلال نیوتنی ایجاد شده، مقدار $\tilde{\eta}_{\infty}$ بیشتر معرف ویسکوزیته حلال است. مدل کاریو-یاسودا یک مدل پنج ثابته است که از انعطاف‌پذیری کافی برای برازش مناسب بر روی توابع ویسکومتریکی بسیاری از مواد ویسکوالاستیک برخوردار است. به طور کلی پس از جمع آوری داده‌های کافی آزمایشگاهی از رفتار رئولوژیکی ماده، می‌توان این مدل را بر روی داده‌ها برازش داد و ضرایب مربوطه را تعیین نمود. مدل کاریو-یاسودا در واقع تعمیم یافته مدل معروف کراس^۱ است. توابع ویسکومتریکی مربوط

¹ Cross

ویسکوزیته و ثابت‌های اختلاف تنش نرمال این مدل به صورت روابط (۳-۲۴) (۳-۲۵) آورده شده است [۳۳]:

$$\tilde{\eta}(\dot{\gamma}) = \tilde{\eta}_\infty + (\tilde{\eta}_0 - \tilde{\eta}_\infty) / [1 + \lambda \dot{\gamma}^{(1-n)}] \quad (۳-۲۴)$$

$$\Psi_1(\dot{\gamma}) = 2\lambda_1(\tilde{\eta}_0 - \tilde{\eta}_\infty) / [1 + \lambda \dot{\gamma}^{(1-n)}] \quad (۳-۲۵)$$

در مدل کراس، ویسکوزیته در نرخ برش صفر برابر $\tilde{\eta}_0$ و در نرخ برش بی نهایت برابر $\tilde{\eta}_\infty$ محاسبه می‌شود و بین این دو مقدار حدی، مدل کراس به مدل توانی نزدیک می‌شود. از جمله مزایای مدل کاریو-یاسودا نسبت به مدل کراس آن است که در این مدل رفتار رئولوژیکی غیرخطی به شکل دقیق‌تری محاسبه می‌گردد. مزیت دیگر هر دو مدل نسبت به مدل توانی، امکان محاسبه $\tilde{\eta}_\infty$ در این مدل‌ها است (در مدل توانی مقدار $\tilde{\eta}_\infty$ همواره برابر صفر محاسبه می‌شود).

۳-۶- تحلیل فرکانس جریان

جریان حول سیلندر برای اعداد رینولدز مورد مطالعه در این تحقیق، رفتار تناوبی از خود نشان می‌دهد. در اینجا رفتار تناوبی جریان در ناحیه پایین‌دست آن، از طریق محاسبه فرکانس نوسان‌ها، f_s و در قالب عدد بی بعد استروهال مطابق رابطه (۳-۲۶) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$St = \frac{f_s D}{u_\infty} \quad (۳-۲۶)$$

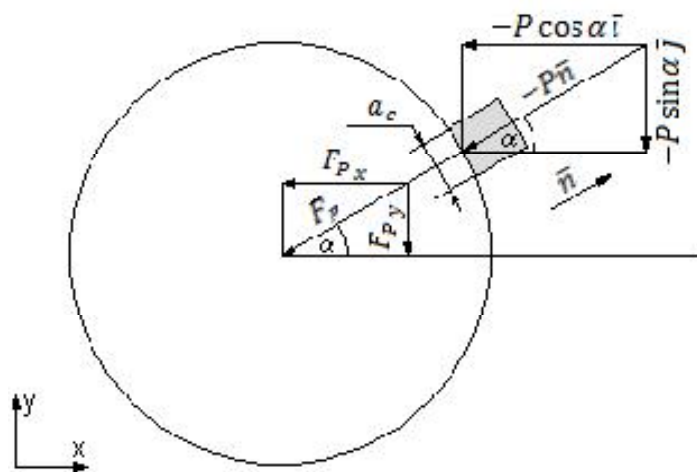
در رابطه فوق، D معرف قطر سیلندر و u_∞ سرعت جریان آزاد می‌باشد.

۳-۲- نیروهای وارده بر روی سیلندر

هدف از ارائه این بخش، استخراج روابط ریاضی مورد استفاده برای محاسبه نیروهای لیفت و درگ بر روی سیلندر که در اثر نیروهای فشاری و ویسکوز سیال زمینه رخ می‌دهد، می‌باشد. برای این کار مکانی بر روی سیلندر با زاویه α پادگرد نسبت به محور افق در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲-۱- نمایش نیروهای فشاری

نیروهای فشاری وارد بر روی یک سلول در شکل ۳-۱ نشان داده شده است (ناحیه سایه زده شده در شکل سلول مورد نظر می‌باشد). بردار عمود بر سطح سیلندر به سمت بیرون و با $\bar{n}$ نشان داده شده است. ضخامت سلول برابر z و عرض سلول برابر a_c در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱ نیروی فشاری وارد بر سیلندر

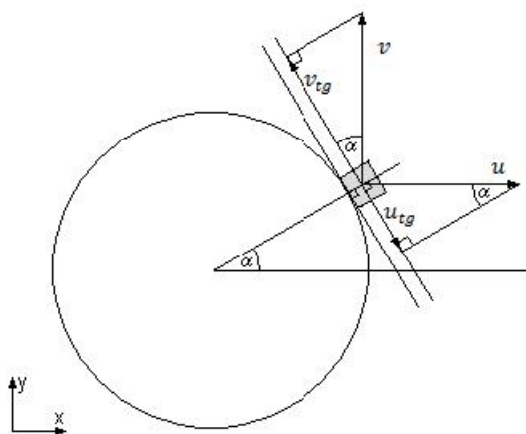
$$\bar{F}_{px} = -a_c z P \cos \alpha \quad (۳-۲۷)$$

$$\bar{F}_{py} = -a_c z P \sin \alpha \quad (۳-۲۸)$$

$$\bar{F}_p = -a_c z P \bar{n} \quad (۳-۲۹)$$

۳-۷-۲- نیروهای ناشی از خاصیت ویسکوز

به صورت پیش فرض، برای مولفه‌های سرعت عمودی و مماسی u و v ، سهم سرعت‌های مماسی هر یک بر روی سلول نشان داده شده در شکل ۳-۲ به ترتیب $-u_{tg}$ و v_{tg} می‌باشد. در شکل ۳-۲ بردارهای سرعت مربوط به هر یک آورده شده است. همچنین روابط موجود در ادامه ذکر شده است.



شکل ۳-۲ نمایش مولفه‌های سرعت و سهم سرعت‌های مماسی هر یک

$$u_{tg} = u \sin \alpha \quad (۳۰-۳)$$

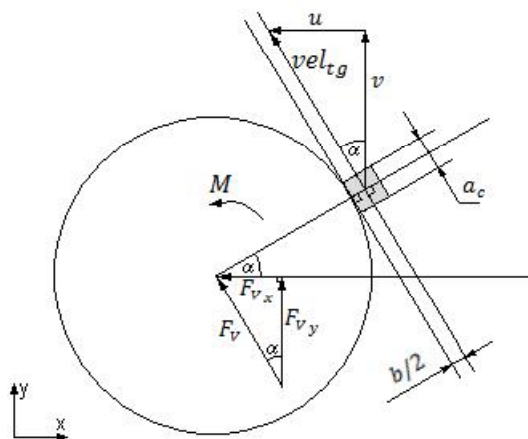
$$v_{tg} = v \cos \alpha \quad (۳۱-۳)$$

$$vel_{tg} = -u_{tg} + v_{tg} = -u \sin \alpha + v \cos \alpha \quad (۳۲-۳)$$

در معادله (۳۲-۳) فرض بر این است که جریان به صورت پادساعتگرد از روی سیلندر عبور می‌کند. در شکل ۳-۳ بردار سرعت مماسی بر روی سیلندر به همراه مولفه‌های آن آورده شده است. در دستگاه مختصات کارتزین، بردار سرعت مماسی که چرخش پادساعتگردی را تولید می‌کند، به صورت روابط زیر حاصل می‌شود.

$$\bar{u} = -vel_{tg} \sin \alpha \quad (۳۳-۳)$$

$$\bar{v} = vel_{tg} \cos \alpha \quad (3-34)$$



شکل ۳-۳ نیروی ویسکوز و مولفه‌های برآیند سرعت مماسی در جهت پادساعتگرد

نیروی ناشی از ویسکوزیته سیال، از حاصل ضرب تنش در سطح و به صورت رابطه (۳-۳۵) حاصل می‌شود.

$$F_{fr} = \bar{F}_V = \tau \times A = \eta \frac{\Delta vel}{\Delta y} A = \eta \frac{\Delta vel}{b/2} a_c z \quad (3-35)$$

در این معادله، F_{fr} یا $\bar{F}_V$ معرف نیروی اصطکاکی یا ویسکوز، τ تنش، A سطح سلول، Δy فاصله مرکز سلول تا سطح سیلندر که در اینجا برابر $b/2$ می‌باشد، Δvel سرعت نسبی، z ضخامت سلول و η معرف ویسکوزیته دینامیک می‌باشد. مولفه‌های عمودی و افقی این نیرو به صورت روابط (۳-۳۶) و (۳-۳۷) بیان می‌شوند.

$$F_{fr_x} = \eta \frac{\Delta vel}{b/2} a_c z \sin a = \bar{F}_V \sin a \quad (3-36)$$

$$F_{fr_y} = \eta \frac{\Delta vel}{b/2} a_c z \cos a = \bar{F}_V \cos a \quad (3-37)$$

۳-۷-۳- محاسبه نیروی کل

نیروهای فشاری کل با جمع کل نیروهای فشاری حول سیلندر حاصل می‌شود. در روابط (۳-۳۸) نیروهای درگ و لیفت فشاری آورده شده است.

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_{p \text{ total}} &= \sum_k \bar{F}_{p_k} \\ \bar{F}_{p \text{ drag}} &= \sum_k \bar{F}_{p_{x_k}} \\ \bar{F}_{p \text{ lift}} &= \sum_k \bar{F}_{p_{y_k}} \end{aligned} \right\} \quad (38-3)$$

به همین ترتیب نیروهای اصطکاکی نیز از جمع کل نیروهای اصطکاکی حول سیلندر بدست می‌آید. در روابط (39-3) نیروهای لیفت و درگ اصطکاکی آورده شده است.

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_{V \text{ total}} &= \sum_k \bar{F}_{V_k} \\ \bar{F}_{V \text{ total drag}} &= \sum_k \bar{F}_{V_{x_k}} \\ \bar{F}_{V \text{ lift}} &= \sum_k \bar{F}_{V_{y_k}} \end{aligned} \right\} \quad (39-3)$$

حاصل جمع هر دوی این نتایج، نیروی کل وارد بر روی سیلندر از طرف سیال را خواهد داد. روابط مربوط به محاسبه نیروی کل در معادلات (40-3) آورده شده است.

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_{\text{total}} &= \bar{F}_{p \text{ total}} + \bar{F}_{V \text{ total}} \\ \bar{F}_{\text{total drag}} &= \bar{F}_{p \text{ total drag}} + \bar{F}_{V \text{ total drag}} \\ \bar{F}_{\text{total lift}} &= \bar{F}_{p \text{ total lift}} + \bar{F}_{V \text{ total lift}} \end{aligned} \right\} \quad (40-3)$$

برای محاسبه نیروی درگ و ضریب درگ سیال ویسکوالاستیک به ترتیب از روابط (41-3)

(42-3) استفاده شده است [35].

$$F_x = \int_0^{2\pi} [(-p + \tau_{xx} + 2\eta_N D_{xx}) \cos \theta + (\tau_{xy} + 2\eta_N D_{xy}) \sin \theta]_{r=R} R d\theta \quad (41-3)$$

$$C_d = \frac{F_x}{4\pi\eta_0 U} \quad (42-3)$$

فصل ۴:

روش حل عددی با استفاده از نرم افزار

OpenFOAM

۴-۱- مقدمه

در این تحقیق از نرم افزار منبع باز OpenFOAM به منظور مدل سازی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر استفاده شده است. این نرم افزار از شیوه عددی حجم محدود برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می کند. شایان ذکر است که در این جا از گسسته سازی مرکزی مرتبه دوم برای مشتقات مکانی و تقریب پیشروی مرتبه دوم پسرو برای مشتق زمانی استفاده شده است.

در این فصل، ابتدا روش عددی بکارگرفته شده و الگوریتم حل بیان می شود. سپس به توصیف اجمالی در خصوص نرم افزار OpenFOAM پرداخته می شود. شناخت ساختار کلی و نحوه عملکرد این نرم افزار از اهداف این فصل می باشد. لازم به ذکر است که توضیحات کامل در ارتباط با این نرم افزار و ابزارهای موجود در آن، در راهنماهای منتشر شده توسط OpenCFD Limited موجود می باشد [۳۶، ۳۵]. همچنین به منظور آشنایی بیشتر با این نرم افزار می توان به کتاب "مدل سازی جریان سیالات و انتقال حرارت با استفاده از نرم افزار OpenFOAM" [۳۷] نیز رجوع نمود.

۴-۲- روش حل عددی

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر همدم عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنوم که شکل کلی این معادلات تانسوری به صورت روابط (۴-۱) و (۴-۲) می باشد.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۴-۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \tau_{ij} - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (۴-۲)$$

معادله (۱-۴) معادله پیوستگی و معادله (۲-۴)، معادله مومنتوم برای سرعت جهت i ام می‌باشد. همچنین $\frac{\partial}{\partial t}$ مشتق زمانی و $\frac{\partial}{\partial x_j}$ مشتق مکانی نسبت به مولفه j ام دستگاه مختصات کارتزین، τ_{ij} مجموع تانسور حلال نیوتنی و افزودنی پلیمری بر واحد چگالی و p نیز فشار بر واحد چگالی است.

همانگونه از مجموعه معادلات (۱-۴) و (۲-۴) پیداست، معادله پیوستگی تنها یک قید ریاضی برای حل جریان محسوب می‌شود و بیان می‌دارد که اگر از میدان فشار مناسبی در حل معادلات مومنتوم استفاده شود، میدان سرعت بدست آمده فاقد دیورژانس خواهد بود. بنابراین برای حل دستگاه معادلات حاصل، نیاز به معادله‌ای برای تکامل فشار وجود دارد. روش‌های مختلفی برای غلبه بر این مشکل به وجود آمده است که روش‌های پروجکشن (projection) جزء روش‌های بسیار پرکاربرد و متداول این میان می‌باشد.

۴-۲-۲- معادله تکامل فشار

همانطور که اشاره شد در حل جریان سیال به وسیله مجموعه معادلات (۱-۴) و (۲-۴)، نقش مجموعه معادلات (۲-۴) یعنی معادله مومنتوم، تکامل سرعت در زمان است. اما برای این کار نیاز به میدان فشار است. با این حال معادله پیوستگی در جریان تراکم ناپذیر تنها یک قید ریاضی محسوب می‌شود و به صورت صریح شامل عبارت فشار نیست. برای غلبه بر این مشکل، یکی از انتخاب‌ها، ترکیب معادلات مومنتوم و پیوستگی است. شکل معادله پیوستگی (دیورژانس برابر صفر) یکی از روشن‌ترین راه‌ها برای ترکیب این معادلات را پیشنهاد می‌کند و آن دیورژانس گرفتن از معادله مومنتوم مطابق رابطه (۳-۴) می‌باشد [۳۸].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j u_i) \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \tau_{ij} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (۳-۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_j) \right] = - \frac{\partial^2 P}{\partial x_i \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4-4)$$

با توجه به اینکه از معادله پیوستگی داریم $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$ ، بنابراین معادله (4-4) به صورت رابطه (4-5) بازنویسی می‌شود.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x_i \partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_j) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4-5)$$

معادله (4-5) به معادله پواسون فشار معروف است و برای حل آن لازم است از یک روش عددی مناسب استفاده شود. باید توجه داشت که اپراتور لاپلاسین که بر فشار عمل می‌کند حاصل ضرب دو اپراتور دیورژانس و گرادیان است که اپراتور گرادیان از معادله مومنوم و اپراتور دیورژانس از معادله پیوستگی می‌باشد. بنابراین در تخمین عددی اپراتور لاپلاسین باید سازگاری بین دو اپراتور در گسسته‌سازی‌ها حفظ شود. در غیر این صورت، موجب ارضا نشدن معادله پیوستگی توسط میدان سرعت بدست آمده خواهد شد. برای حفظ این سازگاری بهتر است که معادله پیوستگی توسط میدان سرعت بدست آید تا اینکه خود اپراتور لاپلاس گسسته شود.

۴-۲-۳- الگوریتم SIMPLE^۱ برای حل جریان تراکم ناپذیر

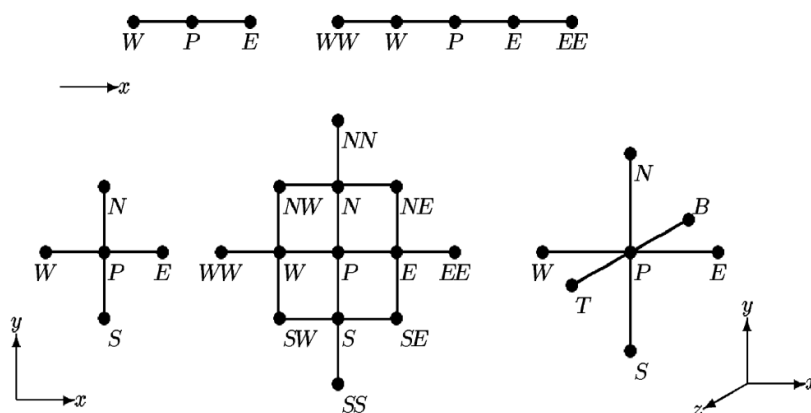
اگر معادله (4-2) به وسیله یک روش عددی دلخواه و مناسب گسسته شود، برای هر گره در شبکه محاسباتی به یک معادله جبری خواهیم رسید که در مجموع، تشکیل یک دستگاه معادلات را خواهند داد و با حل آن می‌توان مجهولات یعنی سرعت‌ها را بدست آورد. می‌توان معادله جبری حاصل را برای هر نقطه دلخواه P نشان داده شده در شکل 4-۱ و شکل 4-۲ به صورت کلی زیر نمایش داد :

^۱ Semi Implicit for Pressure Link Equation

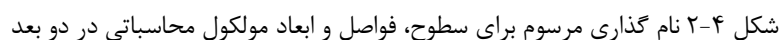
$$A_p^{u_i} u_{i,p}^{n+1} + \sum A_L^{u_i} u_{i,L}^{n+1} = S_{u_i}^{n+1} - \left(\frac{\delta p^{n+1}}{\delta x_i} \right)_p \quad (6-4)$$

که در آن i نشان دهنده جهت مورد نظر در نقطه P است؛ برای مثال $i=2$ یعنی سرعت در جهت y در نقطه P ، S نشان دهنده مجموع جملات در گام زمانی که در نهایت جمله چشمه را می‌سازند و L نشان دهنده نقاط همسایه P می‌باشد. دقت شود که در رابطه (۶-۴) شکل گسسته گرادیان فشار به شکل نمادین وارد شده است که برای تاکید بر مستقل بودن حل از نحوه گسسته سازی مکانی می‌باشد.

به دلیل غیر خطی بودن اتصال معادلات حاکم در رابطه (۶-۴)، این معادله را نمی‌توان مستقلاً حل نمود. زیرا ضریب A و احياناً جمله چشمه، شامل متغیر u_i^{n+1} می‌باشد. بنابراین روش‌های تکرار برای حل دستگاه حاصل، گزینه مناسبی می‌باشد. با توجه به اینکه مساله حاضر، ناپایا است، تکرارها باید در هر گام زمانی آنقدر انجام گردد که دستگاه کاملاً ارضا شود و سپس به گام زمانی بعد منتقل شود.



شکل ۴-۱ نام گذاری مرسوم برای مولکول محاسباتی در یک، دو و سه بعد.



n

یک گام

تکرار

محاسبه ضرایب
A و جمله S, تشکیل
و حل, دستگاه معادله

شکل ۳-۴ تکرارهای داخلی و خارجی در هر گام زمانی حل

با جایگزینی بالانویس $n+1$ به جای m که نشان دهنده تکرار خارجی می‌باشد، معادله را بازنویسی می‌کنیم. توجه شود که u_i^m تخمینی برای u_i^{n+1} در انتهای هر حلقه تکرار خارجی می‌باشد.

$$A_p^{u_i} u_{i,p}^{m*} + \sum A_L^{u_i} u_{i,L}^{m*} = S_{u_i}^{m-1} - \left(\frac{\delta p^{m-1}}{\delta x_i} \right)_p \quad (7-4)$$

عبارت سمت راست معادله (7-4) از مقادیر متغیرهای میدانی در تکرار خارجی قبل یعنی $m-1$ محاسبه می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد که معادلات مومنتوم عموماً به صورت پشت سر هم حل می‌شوند. یعنی ابتدا معادله مومنتوم در جهت x گسسته می‌شود و دستگاه معادلاتی شبیه معادله (7-4) را تشکیل می‌دهد. سپس معادله در جهت y حل می‌شود و نهایتاً در راستای z .

با نگاهی دقیق‌تر به معادله (7-4) در می‌یابیم از آن جا که در هر تکرار m ام برای محاسبه u_i^m از میدان فشار در تکرار قبل ($m-1$) استفاده می‌شود، میدان سرعت بدست آمده در معادله پیوستگی صدق نخواهد کرد. به همین دلیل از علامت $*$ برای سرعت محاسبه شده استفاده شده است. زیرا این سرعت، معادله پیوستگی را ارضا نمی‌کند و تنها یک پیش‌بینی محسوب می‌شود. می‌توان از رابطه (7-4) عبارت u_i^{m*} را مطابق رابطه (8-4) استخراج نمود.

$$u_{i,p}^{m*} = \frac{S_{u_i}^{m-1} - \sum A_L^{u_i} u_{i,L}^{m*}}{A_p^{u_i}} - \frac{1}{A_p^{u_i}} \left(\frac{\delta p^{m-1}}{\delta x_i} \right)_p \quad (8-4)$$

حال لازم است سرعت پیش‌بینی شده u_i^{m*} را تصحیح نمود. به منظور ساده‌سازی در کار، معادله (8-4) را می‌توان به شکل رابطه (9-4) نمایش داد.

$$u_{i,p}^{m*} = \tilde{u}_{i,p}^{m*} - \frac{1}{A_p^{u_i}} \left(\frac{\delta p^{m-1}}{\delta x_i} \right)_p \quad (9-4)$$

اگر میدان فشار در تکرار m ام در اختیار بود، عملاً معادله (9-4) به صورت معادله (10-4) در خواهد آمد.

$$u_{i,p}^m = \tilde{u}_{i,p}^{m*} - \frac{1}{A_p^{u_i}} \left(\frac{\delta p^m}{\delta x_i} \right)_p \quad (10-4)$$

حال می‌توان گفت $u_{i,p}^m$ سرعت‌های صحیحی هستند که در معادله پیوستگی صدق خواهند

کرد. یعنی خواهیم داشت : $\frac{\delta(u_i^m)}{\delta x_i} = 0$. با دیورژانس گرفتن از معادله (4-10)، رابطه (4-11) بدست خواهد آمد.

$$\frac{\delta \rho u_{i,p}^m}{\delta x_i} = \frac{\delta}{\delta x_i} (\rho \tilde{u}_{i,p}^{m*}) - \frac{\delta}{\delta x_i} \left[\frac{\rho}{A_p^{u_i}} \left(\frac{\delta p^{m-1}}{\delta x_i} \right)_p \right] \quad (11-4)$$

از آن‌جا که هدف، آن است که سرعت‌های $\rho \tilde{u}_{i,p}^{m*}$ در معادله پیوستگی صدق کنند، طرف چپ معادله (4-11) صفر می‌شود، معادله پواسون فشار به صورت (4-12) بدست می‌آید.

$$\frac{\delta}{\delta x_i} (\rho \tilde{u}_{i,p}^{m*}) = \frac{\delta}{\delta x_i} \left[\frac{\rho}{A_p^{u_i}} \left(\frac{\delta p^{m-1}}{\delta x_i} \right)_p \right] \quad (12-4)$$

همانطور که اشاره شد در گسسته سازی اپراتورهای عمل‌گر روی فشار باید دقت شود تا با یکدیگر سازگار باشند. زیرا یکی اپراتور گسسته گرادیان در معادله مومنتوم و دیگری اپراتور دیورژانس از معادله پیوستگی است که ترکیب آن‌ها لاپلاسیان را می‌سازد. لازم به یادآوری می‌باشد که روش‌هایی از این دست که در ابتدا میدان سرعت محاسبه می‌شود (البته میدان سرعت تخمینی معادله پیوستگی را ارضا نمی‌کند) و سپس به تصحیح آن می‌پردازند به روش‌های پروجکشن معروف می‌باشند. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، روش SIMPLE می‌باشد. در این روش به جای آن‌که از خود فشار در محاسبات استفاده شود از تصحیح فشار استفاده می‌گردد. همین امر در مورد سرعت‌ها نیز برقرار است. یعنی سرعت‌هایی که از حل دستگاه خطی حاصل از معادله مومنتوم و با کمک فشار در گام $m-1$ بدست آمده‌اند، به عنوان مقادیر مبنایی فرض می‌شوند که تصحیحی باید به آن‌ها اضافه شود.

$$u_i^m = u_i^{m*} + \bar{u} \quad (13-4)$$

$$p^m = p^{m-1} + \bar{p} \quad (14-4)$$

مقادیر (۴-۱۳) در روابط (۴-۱۴) و (۴-۱۳) در حقیقت همان تصحیحات می‌باشند که به مقادیر فشار و سرعت اولیه اضافه می‌شود. حال با جایگذاری معادلات (۴-۱۳) و (۴-۱۴) در معادله مومنوم (۴-۶)، طی فرایند زیر معادله پواسون تصحیح فشار حاصل می‌شود.

$$A_p^{u_i} (u_i^{m*} + \bar{u}_i)_{,p} + \sum A_L^{u_i} (u_i^{m*} + \bar{u}_i)_{,L} = S_{u_i}^{m-1} - \left[\frac{\delta}{\delta x_i} (p_i^{m*} + \bar{p}) \right]_p \quad (15-4)$$

$$(A_p^{u_i} u_{i,p}^{m*} + \sum A_L^{u_i} u_{i,L}^{m*}) + (A_p^{u_i} \bar{u}_{i,p} + \sum A_L^{u_i} \bar{u}_{i,L}) = \left[S_{u_i}^{m-1} - \frac{\delta p^{m-1}}{\delta x_i} \right] - \left[\frac{\delta \bar{p}}{\delta x_i} \right] \quad (16-4)$$

عباراتی که زیر آن‌ها خط کشیده شده توسط معادله (۴-۷) با هم حذف می‌شوند. لذا روابط (۴-۱۷) و (۴-۱۸) حاصل خواهد شد.

$$A_p^{u_i} \bar{u}_{i,p} + \sum A_L^{u_i} \bar{u}_{i,L} = - \frac{\delta \bar{p}}{\delta x_i} \quad (17-4)$$

$$\bar{u}_i = \tilde{\tilde{u}}_i - \frac{1}{A_p^{u_i}} \frac{\delta \bar{p}}{\delta x_i} \quad (18-4)$$

که در آن $\tilde{\tilde{u}}_i = - \frac{\sum A_L^{u_i} \bar{u}_{i,L}}{A_p^{u_i}}$ می‌باشد. همچنین از معادله پیوستگی داریم :

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \rho u_i^m = \frac{\delta}{\delta x_i} [\rho u_i^{m*} + \rho \bar{u}_i] = 0 \quad (19-4)$$

$$\frac{\delta}{\delta x_i} (\rho \bar{u}_i) = - \frac{\delta}{\delta x_i} [\rho u_i^{m*}] \quad (20-4)$$

حال اگر معادله (۴-۱۸) در ρ ضرب و از آن دیورژانس گرفته شود، رابطه (۴-۲۱) حاصل می‌شود.

$$\frac{\delta(\rho \bar{u}_i)}{\delta x_i} - \frac{\delta(\rho_i \bar{u}_{i,p})}{\delta x_i} = - \frac{\delta}{\delta x_i} \left[\frac{\rho}{A_p^{u_i}} \frac{\delta \bar{p}}{\delta x_i} \right] \quad (21-4)$$

که با استفاده از رابطه (۴-۲۰)، معادله زیر بدست خواهد آمد.

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \left[\frac{\rho}{A_p^{u_i}} \frac{\delta p}{\delta x_i} \right] = \frac{\delta}{\delta x_i} [\rho u_i^{m*}] + \frac{\delta}{\delta x_i} (\rho \tilde{u}_i) \quad (۲۲-۴)$$

معادله (۲۲-۴) پواسون تصحیح فشار می‌باشد. اما با توجه به این که این معادله شامل

عبارت (۲۳-۴) می‌باشد،

$$\frac{\delta}{\delta x_i} (\rho \tilde{u}_i) = \frac{\delta}{\delta x_i} \left[-\frac{\rho \sum A_L^{u_i} u_L''}{A_p^{u_i}} \right] \quad (۲۳-۴)$$

و از آنجا که در این مرحله $u_{i,L}''$ هنوز معلوم نیست، اولین راه غلبه بر این مشکل، صرفه نظر کردن از عبارت فوق در معادله (۲۲-۴) می‌باشد. بنابراین معادله پواسون برای تصحیحات فشار به شکل نهایی زیر در خواهد آمد.

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \left[\frac{\rho}{A_p^{u_i}} \frac{\delta p}{\delta x_i} \right] = \frac{\delta}{\delta x_i} [\rho u_i^{m*}] \quad (۲۴-۴)$$

این الگوریتم یعنی استفاده از معادله (۲۴-۴) برای محاسبه میدان تصحیح فشار، به الگوریتم SIMPLE معروف می‌باشد. بدلیل حذف یکی از جمله‌ها (معادله (۲۳-۴)) از معادله (۲۲-۴)، الگوریتم SIMPLE به سرعت همگرا نمی‌شود. برای غلبه بر این مشکل از ضرایب تخفیف در این الگوریتم استفاده می‌شود. به این مفهوم که تنها قسمتی از تصحیح محاسبه شده به متغیر اضافه می‌گردد.

$$u_i^m = u_i^{m*} + \alpha_u \tilde{u}_i \quad 0 \leq \alpha_u \leq 1 \quad (۲۵-۴)$$

$$p_i^m = p_i^{m-1} + \alpha_p \tilde{p} \quad 0 \leq \alpha_p \leq 1 \quad (۲۶-۴)$$

رابطه $\alpha_u = 1 - \alpha_p$ در حالت مقادیر بهینه و بین ضرایب زیر تخفیف سرعت و فشار برقرار

است. در نهایت مقادیر تصحیح از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$u''_{i,p} = -\frac{1}{A_p} \left[\frac{\delta \tilde{p}}{\delta x_i} \right]_p \quad (27-4)$$

به طور خلاصه می‌توان الگوریتم حل را به صورت زیر بیان نمود :

- ۱- با کمک مقادیر و به عنوان اولین حدس برای u_i^{n+1} و p_i^{n+1} حل آغاز می‌شود.
 - ۲- تشکیل و حل دستگاه مومنتوم خطی که منجر به محاسبه u_i^{m*} می‌شود.
 - ۳- به کمک u_i^{m*} معادله پواسون تصحیح فشار تشکیل و حل می‌شود.
 - ۴- مقادیر تصحیح سرعت‌ها محاسبه می‌شود.
 - ۵- فشارهای جدید محاسبه می‌شود.
 - ۶- مقادیر تنش با استفاده از معادله ساختاری در نظر گرفته شده حل محاسبه می‌شود.
 - ۷- بازگشت به گام ۲ تا زمانی که میزان تصحیحات ناچیز شوند.
 - ۸- ابتدای گام زمانی بعد بازگشت به مرحله ۱.
- شایان ذکر است که نحوه پیاده سازی الگوریتم بیان شده در نرم افزار OpenFOAM در پیوست ت آورده شده است.
- در ادامه، ابتدا به معرفی نرم افزار OpenFOAM پرداخته خواهد شد. سپس فرایند حل مساله در این نرم‌افزار به اختصار بیان می‌گردد. پس از آن، حل گر مورد استفاده در این مساله معرفی می‌شود و نمونه مطالعاتی به کار گرفته شده در این پژوهش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۳- معرفی نرم افزار منبع باز OpenFOAM

دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یکی از قسمت‌های مهم و ضروری در زمینه ابزارهای مهندسی به منظور مدل‌سازی فرایندهای مختلف، خود را به اثبات رسانیده و در حال حاضر، برای اهداف گوناگونی هم در صنعت و هم در محیط‌های آکادمیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل سازی پدیده های جریان سیالات به مهندسان و آنالیزورها این اجازه را می دهد که فرایندهای گوناگونی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و در صدد رفع نواقص احتمالی آن برآیند. شایان ذکر است که تقریبا اکثر نرم افزارهای موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی تحت مجوز شرکت خاصی بوده و بسیار گران قیمت نیز می باشد. علاوه بر آن، دستیابی کامل به کد عددی این گونه از نرم افزارها و اعمال تغییر و ویرایش آن توسط کاربر تقریبا غیر ممکن می باشد. از این رو، بهترین راه حل به منظور مرتفع کردن محدودیت های پیشرو، استفاده از نرم افزارهای منبع باز در رابطه با دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. نرم افزارهای کد باز، این اجازه را به کاربران می دهند که به کد عددی مدل خود دسترسی کامل داشته و بدون پرداخت هیچ گونه هزینه ای، آن را در زمینه کاری مورد نظر ارتقا داده و با نام خود، آن را در اختیار عموم قرار دهند. در واقع، نرم افزارهای کد باز، یک جعبه ابزار می باشند که به کاربر اجازه دستکاری و اعمال تغییر در آن داده می شود. در این میان، نرم افزار منبع باز OpenFOAM یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که قادر به مدل سازی هر نوع مساله شامل معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال از مسایل ساده تا بسیار پیچیده می باشد. از نمونه موارد قابل مدل سازی توسط این نرم افزار می توان مساله های مربوط به جریان های آرام و آشسته، تک فاز و چندفاز، انتقال حرارت، واکنش شیمیایی، الکترومغناطیس و مکانیک جامدات و همچنین به مساله های مربوط به معادلات اقتصادی نظیر قیمت گذاری و مالی اشاره نمود. شایان ذکر است که این نرم افزار، شامل کتابخانه هایی از پیش تعیین شده با کلید واژه های با معنا جهت فراخوانی هریک از فرایندهای حل می باشد. ساختار این نرم افزار بر پایه حل مسائل سه بعدی بنا نهاده شده و از تانسور با مرتبه های مختلف برای توصیف مشخصات فیزیکی مساله استفاده می کند. دیدگاه نرم افزار OpenFOAM ایجاد یک نمونه مطالعاتی و حل آن با استفاده از حل گری از پیش تعیین شده است که متناسب با نیاز کاربر و توسط شخص کاربری، تغییر می یابد.

هسته انعطاف پذیر و کارآمد OpenFOAM، از مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده توسط ++C ایجاد شده است. این مجموعه‌ها در ایجاد حل‌گرهایی برای شبیه‌سازی مسایل مطرح در مهندسی مکانیک و یا ایجاد کاربردها برای اعمال پیش پردازش و پس پردازش، همچنین به وجود آوردن کتابخانه‌هایی به منظور ایجاد جعبه ابزارهایی که در حل‌گرها/کاربردها قابل دسترسی باشند و یا برای مدل‌های فیزیکی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نرم افزار با تعدادی حل‌گر از پیش ساخته، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها، ارایه گردیده که می‌تواند به عنوان یک بسته شبیه‌سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در حالی که علاوه بر باز و آزاد بودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار و سلسله مراتب حل‌گرها، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها را نیز دارا می‌باشد. نرم افزار OpenFOAM از شیوه عددی حجم محدود (FVM) برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند که به هر شبکه بندی غیر ساختاریافته سه بعدی، سلول‌های چند وجهی نسبت داده می‌شود. در این نرم افزار، حل‌گرهای جریان سیال دریک چارچوب تکرار، سرعت- فشار، ضمنی توسعه یافته است. موازی سازی، جداکردن یا بخش بندی دامنه حل از مبانی OpenFOAM می‌باشد. بنابراین به طور کلی، حل‌گرها بدون نیاز به کدنویسی ویژه به منظور حل موازی قابل توسعه می‌باشند. علاوه بر آن، با تعریف ماژول‌های عمومی در این نرم افزار کدباز، امکان تعریف توابع مختلف به زبان قابل فهم مهندسی میسر شده است. برای مثال، معادله مومنوم برای جریان تراکم پذیر به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U U - \nabla \cdot \mu \nabla U = -\nabla p \quad (4-28)$$

و تعریف آن در در نرم افزار منبع باز OpenFOAM به صورت زیر صورت می‌گیرد :

solve

(

```
fvm::ddt(rho, U)
+fvm::div(phi, U)
-fvm::laplacian(mu, U)
==
-fvc::grad(p)
);
```

همانطور که مشاهده می‌شود، تعریف عملگرهای مختلف نظیر مشتق زمانی، دایورژانس، لاپلاسین و گرادین، مطابق آن چه که هست، در کد آورده شده است (انجام عملیات ریاضی و نحوه تعریف عملگرهای دیفرانسیلی در OpenFOAM در پیوست چ آورده شده است).

این نرم افزار با سیستم عامل ویندوز سازگار نیست و برای استفاده از آن لازم است از سیستم عامل‌های پایه لینوکس (Linux-based) استفاده نمود. به منظور استفاده همزمان از محیط ویندوز می‌توان از نرم افزارهای مجازی که امکان استفاده از چندین سیستم عامل را میسر می‌کنند، بهره جست. در این میان، نرم افزار VMware®Workstation به عنوان محبوب‌ترین نرم افزار به منظور برقراری همزمان دو سیستم عامل شناخته شده است. در این پژوهش از توزیع لینوکس کوبنتو (kubuntu) که نسخه "OpenFOAM-1.5-dev" نرم افزار OpenFOAM به صورت پیش فرض بر روی آن نصب شده، استفاده شده است. این مطلب بدان معناست که پس از ورود به محیط کاری لینوکس، نیازی به نصب برنامه OpenFOAM وجود ندارد. برای دستیابی به نسخه مورد نظر لینوکس، می‌توان با مراجعه به نشانی

<http://www.sourceforge.net/projects/openfoam-extend/files>

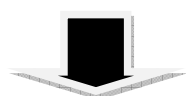
نسبت به دریافت نسخه‌ای از آن با حجم تقریبی ۱.۶ گیگا بایت، به صورت رایگان اقدام نمود [۳۹]. همچنین در این تحقیق، از نرم افزار VMware به منظور رابط میان دو سیستم عامل لینوکس و ویندوز استفاده شد. با استفاده از نشانی اینترنتی <http://www.vmware.com/products/player> می‌توان نسخه‌ای از این برنامه را با حجم تقریبی ۱۰۴ مگابایت، دریافت نمود [۴۰]. همانطور که

اشاره شد، به کمک این برنامه می‌توان سیستم عامل لینوکس مورد نظر را به صورت مجازی بر روی ویندوز نصب نمود.

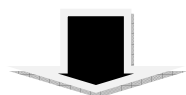
۴-۴- فرایند حل در نرم افزار OpenFOAM

فرایند حل هر مساله در سه مرحله پیش پردازش (pre-processing)، اجرا (run) و پس پردازش (post-processing) صورت می‌گیرد. طرح‌واره گام‌های کلی تحلیل یک مساله در شکل ۴-۴ آورده شده است. در ادامه به اختصار، به توضیح هریک از این مراحل پرداخته می‌شود.

تولید هندسه، اعمال شرایط مرزی و شبکه بندی



پردازش یا حل عددی مساله



پس پردازش

شکل ۴-۴ گام‌های اصلی در شبیه سازی عددی مساله

۴-۴-۲- پیش پردازش (pre-processing)

این مرحله از حل به عملیات مقدماتی پیش از حل دلالت دارد. تعریف شبکه محاسباتی، شرایط مرزی و اولیه، خواص فیزیکی و متغیرهای محاسباتی، در این مرحله از حل انجام می‌شود. به طور خلاصه، یک نمونه مطالعاتی در نرم افزار OpenFOAM شامل سه پوشه به نام‌های “0”، “constant” و “system” می‌باشد. در پوشه “0” مقادیر اولیه میدان‌های متغیر حل و همچنین

مقادیر مرزی برای هریک از صفحات مرزی آورده می‌شود. در پوشه “constant” تنظیماتی در خصوص خواص فیزیکی سیال و محیط (برای مثال شتاب جاذبه) انجام می‌شود. لازم به ذکر است که تعریف هندسه مساله، شبکه و صفحات مرزی و تعیین نوع شرط مرزی در زیرپوشه‌ای به نام “polyMesh” که در این پوشه قرار دارد انجام می‌گیرد. در پوشه “system” اطلاعات مورد نیاز حل گر یعنی گام زمانی حل، زمان شروع و زمان نهایی حل، تکرانس، انتخاب روش حل دستگاه و همچنین تعیین نحوه گسسته‌سازی هریک از عمل‌گرهای دیفرانسیلی اعمال می‌گردد.

۴-۴-۳- پردازش (solving)

در این مرحله، محاسبات تکرار در هر گام زمانی حل برای میدان‌های متغیر انجام می‌شود. حل‌گرهای متفاوتی برای جریان‌های مختلف به صورت پیش‌فرض و استاندارد در نرم افزار وجود دارد که از قابلیت توسعه در زمینه‌های مختلف برخوردار می‌باشند. در این تحقیق از حل‌گر viscoelasticFluidFoam به منظور مدل‌سازی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر استفاده شده است.

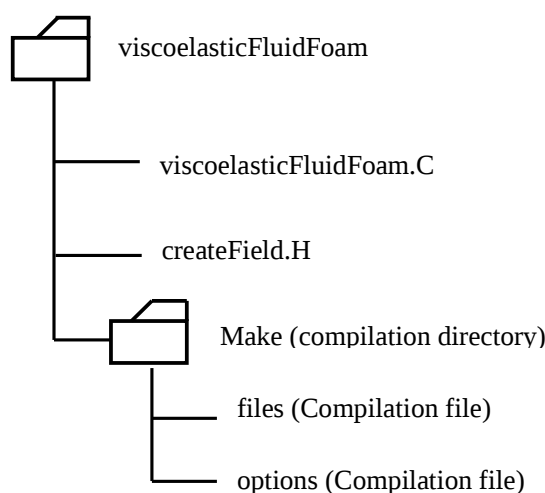
۴-۴-۴- پس پردازش (post-processing)

در این مرحله، اطلاعات حاصل از حل به نرم افزارهایی که توانایی نمایش اطلاعات به صورت گرافیکی را دارا می‌باشند، انتقال داده می‌شود. این کار در نرم افزار OpenFOAM از دو طریق قابل انجام می‌باشد. یک روش که مرسوم‌ترین و پرکاربردترین روش برای نمایش اطلاعات حاصل از حل نیز محسوب می‌شود، استفاده از نرم افزار paraview است که در نسخه لینوکس به کار گرفته شده در این پژوهش به صورت پیش‌فرض نصب می‌باشد. این نرم افزار قابلیت فراخوانی تمامی داده‌های حاصل از حل در نرم افزار OpenFOAM را دارد. روش دیگر، استفاده از ابزار “sample”

می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان اطلاعات حاصل از حل را به نرم افزارهای دیگر منتقل نمود. شایان ذکر است که در این پژوهش، از هر دو روش بسته به نوع نیاز، برای نمایش گرافیکی نتایج حل استفاده شده است.

۴-۵- معرفی حل گر مورد استفاده در این پژوهش

همانطور که در قسمت قبل اشاره شد، در این تحقیق به منظور مدل‌سازی جریان سیال ویسکوالاستیک از حل گر viscoelasticFluidFoam استفاده شده است. حل گر مذکور شامل یک فایل اصلی^۱ به نام viscoelasticFluidFoam.C و یک فایل فرعی^۲ به نام createField.H می‌باشد که در کد اصلی فراخوانده می‌شود. در این فایل، میدان‌های حل و مدل رئولوژیکی سیال ویسکوالاستیک خوانده می‌شود. ساختار حل گر مذکور در شکل ۴-۵ آورده شده است.



شکل ۴-۵ ساختار حل گر viscoelasticFluidFoam

^۱ Main source file

^۲ Header file

حل گر viscoelasticFluidFoam به منظور حل جریان آرام (Laminar) ناپایا یک سیال ویسکوالاستیک کاربرد دارد و در نرم افزار در آدرس زیر قرار گرفته است.

\$FOAM_APP/solvers/viscoelastic/viscoelasticFluidFoam

معادلات حاکم در مساله مذکور عبارتند از قانون پیوستگی، رابطه اندازه حرکت (یا مومنتم) و معادله ساختاری. قانون پیوستگی برای جریان تراکم ناپذیر ناپایا عبارت است از:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (29-4)$$

که در آن U معرف سرعت می باشد. تعریف معادله پیوستگی در نرم افزار OpenFOAM به صورت زیر می باشد.

fvc::div(phi)

این کد در فایل "continuityErrs.H" قرار دارد و این فایل در کد اصلی فراخوانده می شود. آدرس دستیابی به این فایل در زیر آورده شده است.

\$FOAM_SRC/finiteVolume/cfdTools/incompressible

تعریف معادله اندازه حرکت برای جریان سیال ویسکوالاستیک به صورت رابطه می باشد :

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau_s + \nabla \cdot \tau_p \quad (30-4)$$

همانطور که در فصل قبل بیان شد، ρ چگالی سیال، u بردار سرعت، p معرف فشار، τ_s سهم تنش حلال نیوتنی و τ_p تنش ناشی از ماده پلیمری می باشد. تعریف معادله اندازه حرکت در نرم افزار OpenFOAM به صورت زیر می باشد.

```
Tmp<fvVectorMatrix> Ueqn
(
(
fvm::ddt(U)
+ fvm::div(phi, U)
- Visco.divTau(U)
);
```

```
UEqn().relax();
```

```
solve(UEqn == -fvc::grad(p));
```

این کد در فایل "viscoelasticFluidFoam.C" می‌باشد و در آدرس زیر قرار گرفته است)

نحوه تعریف عملیات ریاضی و همچنین عمل‌گرهای دیفرانسیلی به ترتیب در پیوست چ آورده شده است).

```
$FOAM_APP/solvers/viscoelastic/viscoelasticFluidFoam
```

معادله ساختاری در نظر گرفته شده در این مساله مدل رئولوژیکی گزیکس می‌باشد. ابتدا لازم است تا مشتق مادی از درون آن استخراج گردد.

$$\tau_p + \lambda_k \tau_{p(1)} + \alpha_k \frac{\lambda_k}{\eta_{pk}} (\tau_{p(1)} \cdot \tau_{p(1)}) = 2\eta_p D \quad (31-4)$$

$$\tau_{p(1)} = (2\eta_p D - \tau_p - \alpha_k \frac{\lambda}{\eta_p} (\tau_p \cdot \tau_p)) / \lambda \quad (32-4)$$

مشتق فوق همرفتی برای تانسور تنش پلیمری به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\tau_{p(1)} = \frac{D}{Dt} \tau_p - [\nabla u^T \cdot \tau_p] - [\tau_p \cdot \nabla u] \quad (33-4)$$

که در آن $\tau_p (D/Dt)$ مشتق مادی برای تنش پلیمری است و رابطه آن به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{D}{Dt} \tau_p = \frac{\partial}{\partial t} \tau_p + u \cdot \nabla \tau_p \quad (34-4)$$

با جایگزاری روابط (33-4) و (34-4) در معادله (32-4) رابطه زیر نتیجه خواهد شد.

$$\frac{\partial}{\partial t} \tau_p + U \cdot \nabla \tau_p - [\tau_p \cdot \nabla U + (\tau_p \cdot \nabla U)^T] = \tau_p^\nabla = \frac{2\eta_p D - \tau_p - \alpha_k \frac{\lambda}{\eta_p} (\tau_p \cdot \tau_p)}{\lambda_k} \quad (35-4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \tau_p + U \cdot \nabla \tau_p = \frac{2\eta_p D - \tau_p - \alpha_k \frac{\lambda}{\eta_p} (\tau_p \cdot \tau_p)}{\lambda} + [\tau_p \cdot \nabla U + (\tau_p \cdot \nabla U)^T] \quad (36-4)$$

به منظور تعریف رابطه (۴-۳۶) در OpenFOAM از فرضیاتی استفاده شده است که به قرار زیر می‌باشد.

❖ تعریف تانسور گرادیان سرعت با عبارت L

```
volTensorField L = fvc::grad(U());
```

❖ حاصلضرب تنش در گرادیان سرعت با عبارت C

```
volTensorField C = tau_ & L;
```

❖ دو برابر تانسور نرخ تغییر شکل با عبارت $twoD$

```
volSymmTensorField twoD = twoSymm(L);
```

با توجه به ساده‌سازی‌های بیان شده در بالا، معادله ساختاری گزیکس به صورت زیر در نرم‌افزار OpenFOAM بیان شود.

```
// Stress transport equation
tmp<fvSymmTensorMatrix> tauEqn
(
    (
        fvm::ddt(tau_)
        + fvm::div(phi(), tau_)
        ==
        etaP_ / lambda_ * twoD
        + twoSymm( C
        - (alpha_ / etaP_) * ( tau_ & tau_
        - fvm::Sp(1/lambda_, tau_
    );
tauEqn().relax();
solve(tauEqn);
```

این کد در فایل Giesekus.C می‌باشد و این فایل در آدرس زیر در نرم افزار قرار دارد که در کد اصلی فراخوانده می‌شود.

```
$FOAM_SRC/transportModels/viscoelastic/viscoelasticLaws/Giesekus
```

۴-۶- ساختار نمونه مطالعاتی در این پژوهش

نمونه مطالعاتی^۱ بکار گرفته شده در این مساله که بر پایه آن به مدل سازی جریان سیال ویسکوالاستیک پرداخته شده است، نمونه "Giesekus" می باشد. این نمونه در نرم افزار OpenFOAM در آدرس زیر قرار گرفته است.

\$FOAM_TUTORIALS/viscoelasticFluidFoam/Giesekus

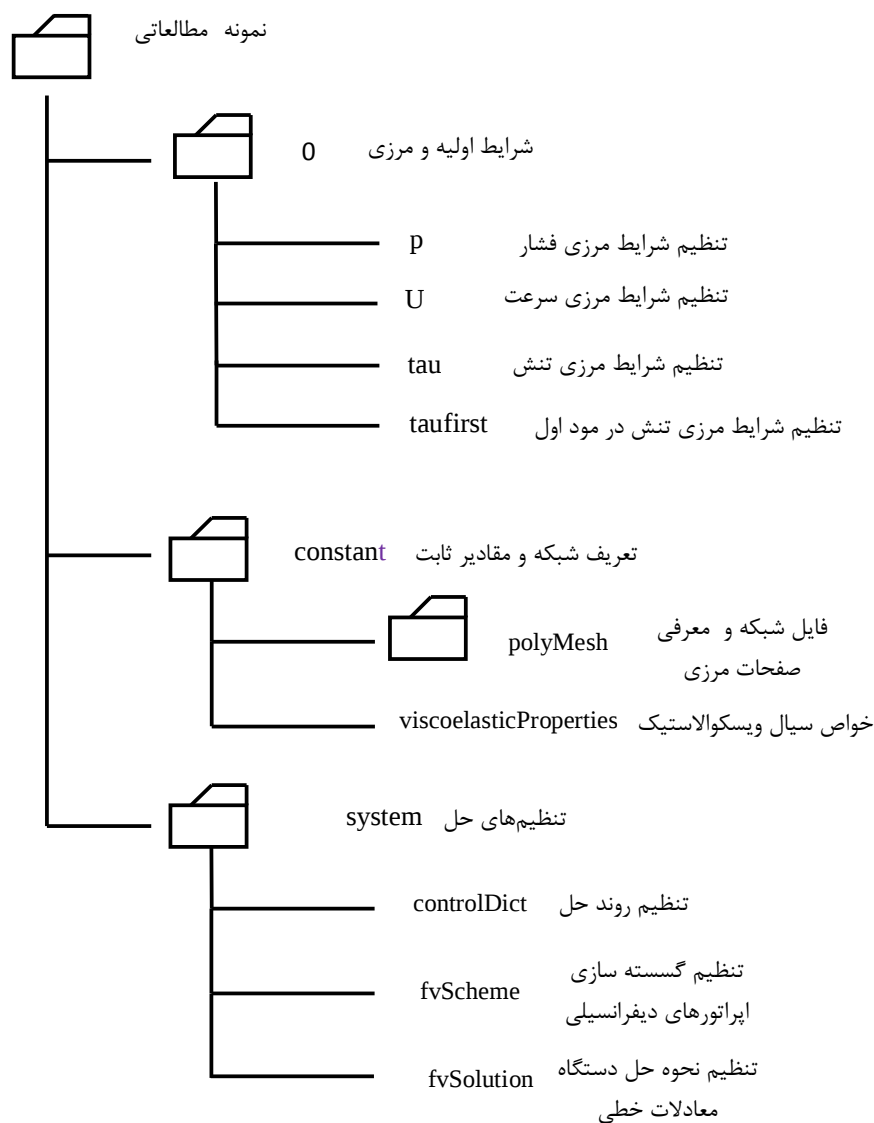
در داخل پوشه "Giesekus" سه زیرپوشه به نام های "0", "constant" و "system" وجود دارد که بعد از انجام مدل سازی، مطابق تنظیم هایی که برای مساله در نظر گرفته می شود، زیرپوشه هایی با نام های زمانی حل ایجاد خواهد شد. هر کدام از زیرپوشه هایی که با اعداد نام گذاری شده اند نمایان گر مقادیر پارامترهای حاصل از حل عددی در آن زمان می باشد. در نمودار درختی شکل ۴-۶ پوشه "Giesekus" آورده شده است. حل گر "viscoelasticFluidFoam" فایل های موجود در پوشه "Giesekus" را خوانده و حل را مطابق تنظیم هایی که در آن صورت گرفته است، اجرا می کند. در ادامه، به اختصار به بررسی هریک از این پوشه ها و فایل های موجود در آن ها پرداخته می شود.

۴-۶-۱- پوشه "0"، اعمال شرایط اولیه و مرزی مساله

برای حل مساله نیاز به تعیین شرایط مرزی برای تمامی صفحات مرزی می باشد. تعیین شرایط مرزی برای هریک از مرزها به دو قسم می باشد. یکی استفاده از شرط مرزی از نوع دریگله است که در این مورد، مقادیری برای میدان های وابسته بر روی مرز تعیین می گردد. دیگری نوع شرط مرزی نیومن می باشد که گرادیان متغیرها، عمود بر مرز توصیف می شود (معرفی انواع شرایط مرزی در نرم افزار OpenFOAM در پیوست ج آورده شده است). همانطور که در نمودار درختی

¹ Case study

شکل ۴-۶ پیداست، اعمال شرایط مرزی در نرم افزار OpenFOAM در پوشه "0" انجام می شود. این پوشه شامل ۴ فایل است که در هر فایل، مقادیر اولیه و مرزی در هریک از مرزها تعیین می شود. این فایل ها عبارتند از : p فشار، U سرعت، τ تنش، τ_{first} تنش در مود اول.



شکل ۴-۶ ساختار پوشه Giesekus و فایل های موجود در هریک از پوشه ها

□ فایل p، تنظیم شرایط اولیه و مرزی فشار

در فایل p مقادیر اولیه و مرزی فشار برای هریک از مرزها تعیین می‌شود. در این مساله، شرط اولیه فشار برابر فشار اتمسفر تعیین شده است. بر روی سطح سیلندر، گرادیان فشار صفر در نظر گرفته شده است. برای صفحات مرزی بالایی و پایینی از شرط لغزش یا تقارن استفاده شده است. برای این کار از شرط مرزی "symmetryPlane" در OpenFOAM استفاده شده است. با انتخاب این نوع از شرط مرزی، گرادیان عمود بر سطح تمامی میدان‌های متغیر برابر صفر منظور می‌شود. لذا می‌توان با استفاده از این نوع از شرط مرزی تا حد امکان اثرات مرزهای بالایی و پایینی را بر جریان کم نمود. همچنین گرادیان فشار در مرز ورودی برابر صفر و در مرز خروجی فشار برابر فشار اتمسفر می‌باشد. در زیر کد مربوط به تنظیم‌های فشار آورده شده است.

```
dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    CYLINDER
    {
        type      zeroGradient;
    }
    DOWN
    {
        type      symmetryPlane;
    }
    OUTLET
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 0;
    }
    UP
    {
        type      symmetryPlane;
    }
    INLET
    {
        type      zeroGradient;
    }
}
```

□ فایل U، تنظیم شرایط اولیه و مرزی سرعت

در فایل U مقادیر اولیه و مرزی سرعت برای هریک از مرزها تعیین می‌شود. شرایط اولیه مساله کاملاً متقارن در نظر گرفته شده است، به نحوی که فرض بر این است که سیال در حال سکون است و نوسان در جریان به صورت طبیعی رخ می‌دهد. بنابراین سرعت اولیه برابر صفر می‌باشد. بر روی سیلندر شرط عدم لغزش حاکم می‌باشد. برای صفحات مرزی بالایی و پایینی از شرط تقارن استفاده شده است به نحوی که بتوان جریان با مرزهای نامحدود را مدل نمود. در مرز ورودی از شرط مرزی سرعت یکنواخت و ثابتی در نظر گرفته می‌شود. در مرز خروجی نیز گرادیان سرعت برابر صفر در نظر گرفته شده است. در زیر کد مربوط به تنظیم‌های سرعت آورده شده است.

```
dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    CYLINDER
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform (0 0 0);
    }
    DOWN
    {
        type      symmetryPlane;
    }
    OUTLET
    {
        type      zeroGradient;
    }
    UP
    {
        type      symmetryPlane;
    }
    INLET
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform (0.017 0 0);
    }
}
```

□ فایل tau و taufirst، تنظیم شرایط اولیه و مرزی تنش

در دو فایل مذکور، مقادیر اولیه و مرزی تنش و همچنین مود اول تنش برای هریک از مرزها

تعیین می گردد. همانطور که در کد ارائه شده در زیر مشاهده می شود میدان تنش اولیه برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین گرادیان تنش بر روی سیلندر صفر است. همانند میدان های سرعت و فشار، برای مرزهای بالایی و پایینی از شرط تقارن استفاده شده است. در مرز ورودی، تانسور تنش برابر صفر لحاظ گردیده و در مرز خروجی، گرادیان تنش برابر صفر منظور شده است. کد مربوط به اعمال شرط مرزی تنش در زیر ارائه شده است. لازم به ذکر می باشد که تنها کد تنش tau در زیر آورده شده است و از آوردن کد taufirst به دلیل مشابه بودن خودداری شده است.

```
internalField    uniform (0 0 0 0 0 0);

boundaryField
{
    CYLINDER
    {
        type          zeroGradient;
    }
    DOWN
    {
        type          symmetryPlane;
    }
    OUTLET
    {
        type          zeroGradient;
    }
    UP
    {
        type          symmetryPlane;
    }

    INLET
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform (0 0 0 0 0 0);
    }
}
```

۴-۶-۲- پوشه "constant"، تعریف شبکه و مقادیر ثابت مساله

این پوشه همانطور که در نمودار درختی شکل ۴-۶ نیز مشاهده می‌شود، از یک پوشه به نام "polyMesh" و یک فایل به نام "viscoelasticProperties" تشکیل شده است. در فایل "viscoelasticProperties" خواص رئولوژیکی سیال ویسکوالاستیک شامل ویسکوزیته دینامیک حلال نیوتنی و افزودنی پلیمری، چگالی، زمان آسودگی از تنش و همچنین ضریب تحرک مدل گزیکس تعیین می‌شود. این مقادیر در کد زیر به ترتیب با η_S ، η_P ، λ و α نشان داده شده است.

```
rheology
{
    type multiMode;

    models
    (
        first
        {
            type Giesekus;
            rho      rho [1 -3 0 0 0 0 0] 803.87097;
            etaS      etaS [1 -1 -1 0 0 0 0] 0.002;
            etaP      etaP [1 -1 -1 0 0 0 0] 0.00487;
            lambda    lambda [0 0 1 0 0 0 0] 235.3;
            alpha     alpha [0 0 0 0 0 0 0] 0.5;
        }
    );
}
```

همانطور که مشاهده می‌شود، به عنوان یک نمونه مطالعاتی پایه در نظر گرفته شده، مقدار چگالی برابر 803.87 kg/m^3 ، ویسکوزیته دینامیک حلال نیوتنی و افزودنی پلیمری به ترتیب برابر 0.002 و 0.00487 kg/ms ، زمان آسودگی از تنش، 235.3 ثانیه و ضریب تحرک برابر 0.5 می‌باشد. این مقادیر در فایل createFields.H وارد شده و پس از آن، این فایل در کد فراخوانده می‌شود. در پوشه "polyMesh" اطلاعات شبکه وارد شده و نوع شرط مرزی برای هریک از مرزها تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که در این پژوهش از نرم افزار "Gambit" برای ایجاد شبکه

حول سیلندر استفاده شده است. تعیین نوع شرط مرزی و همچنین نام‌گذاری صفحات مرزی در فایل "boundary"، که بعد از فراخوانی شبکه در این پوشه ایجاد می‌گردد، انجام می‌شود. کد این فایل در زیر آورده شده است.

```
(
  CYLINDER
  {
    type            wall;
    nFaces          196;
    startFace       52269;
  }
  DOWN
  {
    type            symmetryPlane;
    nFaces          195;
    startFace       52465;
  }
  UP
  {
    type            symmetryPlane;
    nFaces          195;
    startFace       52660;
  }
  OUTLET
  {
    type            patch;
    nFaces          124;
    startFace       52855;
  }
  INLET
  {
    type            patch;
    nFaces          96;
    startFace       52979;
  }
  frontAndBackPlanes
  {
    type            empty;
    nFaces          52672;
    startFace       53075;
  }
)
```

برای سطح سیلندر شرط مرزی از نوع wall استفاده شده است. انتخاب این نوع از شرط مرزی در OpenFOAM بدان معناست که از آن سطح هیچ جریانی وارد و یا از آن خارج نمی‌شود. برای صفحات مرزی بالایی و پایینی، شرط مرزی از نوع symmetryPlane انتخاب شده است و نوع

شرط مرزی برای صفحات مرزی ورودی و خروجی جریان، patch می‌باشد. با انتخاب این نوع از شرط مرزی، در واقع این صفحات به عنوان صفحات مرزی برای OpenFOAM شناخته می‌شوند.

۴-۶-۳- پوشه system، تنظیم‌های حل

این پوشه شامل سه فایل به نام‌های "controlDict"، "fvSchemes" و "fvSolution" می‌باشد که برای تنظیم‌های فرایند حل به کار گرفته می‌شوند. در ادامه، به بیان هریک از فایل‌های موجود در این پوشه پرداخته می‌شود.

□ فایل controlDict، تنظیم روند حل

در این فایل تنظیم‌های مورد نیاز برای حل نمونه مورد نظر انجام می‌گیرد. برای مثال، زمان شروع و پایان، فاصله زمانی برای خروجی حل و گام زمانی در این فایل تنظیم می‌شود. در زیر قسمتی از کد موجود در این فایل آورده شده است. اولین خط در این کد، نام حل‌گرمورد استفاده را نشان می‌دهد. عبارت‌هایی که در چهار خط بعدی کد آورده شده است، به ترتیب مشخص کننده زمان شروع، زمان پایان و گام زمانی حل می‌باشد.

```
application      viscoelasticFluidFoam;
startFrom        latestTime;
startTime        0.0;
stopAt           endTime;
endTime          1500;
deltaT           0.028;
writeControl      runtime;
writeInterval     2;
```

همانطور که مشاهده می شود در این مساله، زمان شروع، از صفر، زمان پایان در ۱۵۰۰ ثانیه و گام زمانی برابر ۰.۰۲۸ ثانیه تعیین شده است. همچنین هر ۲ ثانیه یک بار، نتایج حل در آن زمان چاپ می شود.

□ فایل fvScheme، تنظیم گسسته سازی اپراتورهای دیفرانسیلی

در این فایل می توان روش های گسسته سازی هر یک از عمل گرهای دیفرانسیلی از قبیل گرادیان، دیورژانس، لاپلاسیان و کرل را تعیین نمود. در جدول (۴-۱) می توان لیست کلید واژه های موجود در OpenFOAM برای تعریف هر یک از عمل گرهای دیفرانسیلی را مشاهده نمود.

جدول (۴-۱) تعریف عمل گرهای دیفرانسیلی در نرم افزار OpenFOAM

عمل گرهای ریاضی	کلید واژه
interpolationSchemes	مقادیر درونیابی نقطه به نقطه
snGradSchemes	مولفه گرادیان عمود بر سطح هر سلول
gradSchemes	گرادیان
divSchemes	دیورژانس
laplacianSchemes	لاپلاسیان
timeSchemes	مشتق زمانی مرتبه اول و دوم
fluxRequired	میدان مورد نیاز برای تولید جریان

در ادامه نحوه گسسته سازی هر یک از این عمل گرها به همراه کد مربوطه آورده شده است. برای گسسته سازی جمله مشتق زمانی از روش کرانک نیکلسون (Crank Nicholson) استفاده شده است.

```

ddtSchemes
{
    default          CrankNicholson 1;
}

```

در گسسته سازی جملات شامل گرادیان سرعت و فشار از روش گوس خطی (اویلر) استفاده شده است.

```
gradSchemes
{
    default          Gauss linear;
    grad(p)          Gauss linear;
    grad(U)          Gauss linear;
}
```

جملات شامل عمل گر دیورژانس با استفاده از روش Gauss upwind گسسته شده‌اند.

```
divSchemes
{
    default          none;
    div(phi,U)       Gauss upwind;
    div(phi,taufirst) Gauss upwind;
    div(tau)         Gauss linear;
}
```

و در گسسته سازی جملات شامل عمل گر لاپلاسیان از روش Gauss linear corrected استفاده شده است.

```
laplacianSchemes
{
    default          none;
    laplacian(etaPEff,U) Gauss linear corrected;
    laplacian(etaPEff+etaS,U) Gauss linear corrected;
    laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear corrected;
}
```

❑ فایل fvSolution، تنظیم حل دستگاه معادلات خطی

همه تنظیم‌های مربوط به حل گر به علاوه میزان خطا و مقدار خطای نسبی و همچنین نحوه حل دستگاه معادلات خطی برای هریک از میدان‌های حل، در فایل "fvSolution" انجام می‌شود. در نرم افزار منبع باز OpenFOAM، برای حل دستگاه معادلات حاصل از گسسته سازی، روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن میان، می‌توان به روش حذفی گوس، تجزیه LU و... اشاره کرد. در جدول (۴-۲) کلیدواژه انواع روش‌های حل دستگاه معادلات خطی که به طور عمده در OpenFOAM مورد استفاده قرار می‌گیرد آورده شده است. شایان ذکر می‌باشد که به منظور حل تکراری دستگاه معادلات خطی از روش گرادیان مزدوج استفاده می‌شود.

جدول (۴-۲) انواع روش‌های حل دستگاه معادلات خطی

کلید واژه	توضیحات
PBiCG	Preconditioned Bi -Conjugate Gradient solver for asymmetric lduMatrices using a run-time selectable preconditioner.
BICCG	Diagonal incomplete LU preconditioned BiCG solver derived from the general preconditioned BiCG solver PBiCG but with the choice of preconditioner pre-selected. This solver is present for backward-compatibility and the PBiCG solver should be used for preference.
ICCG	Incomplete Cholesky preconditioned CG solver derived from the general preconditioned CG solver PCG but with the choice of preconditioner pre-selected. This solver is present for backward-compatibility and the PCG solver should be used for preference.
PCG	Preconditioned Conjugate Gradient solver for symmetric lduMatrices using a run-time selectable preconditioner
GAMG	Geometric Agglomerated algebraic MultiGrid solver

در ادامه، نحوه حل دستگاه معادلات مربوط به هریک از میدان‌های حل به همراه کد مربوطه آورده شده است.

حل دستگاه معادلات برای میدان فشار در این پژوهش با استفاده از روش گرادیان مزدوج

پیش شرط PCG انجام شده است و تمامی تنظیم‌های مرتبط با این روش در زیر آورده شده است.

```
p CG
{
    preconditioner
    {
        type            AMG;
        cycle            W-cycle;
        policy           AAMG;
        nPreSweeps       0;
        nPostSweeps      2;
        groupSize        4;
        minCoarseEqns    20;
        nMaxLevels       100;
        scale            off;
        smoother         ILU;
    }
    tolerance           1e-07;
    relTol              0.0;
    minIter             0;
    maxIter             800;
};
```

به منظور حل دستگاه معادلات حاصل برای میدان سرعت از روش BiCG استفاده شده است.

```
U BiCGStab
{
    preconditioner
    {
        type          Cholesky;
    }
    minIter           0;
    maxIter           1000;
    tolerance         1e-6;
    relTol            0.0;
};
```

همچنین حل دستگاه معادلات برای میدان‌های تنش نیز با استفاده از روش BiCGStab انجام

شده است. در زیر، تنها روش حل دستگاه میدان تنش مود اول آورده شده است. شایان ذکر است

که برای میدان تنش نیز از همین روش برای حل دستگاه معادلات استفاده شده است.

```
taufirst BiCGStab
{
    preconditioner
    {
        type          Cholesky;
    }
    minIter           0;
    maxIter           1000;
    tolerance         1e-6;
    relTol            0.0;
};
```

تنظیمات مربوط به الگوریتم تکرار PISO در زیر آورده شده است. همچنین ضرایب تخفیف

برای هر یک از میدان‌های حل در ادامه این کد آورده شده است.

```
PISO
{
    momentumPredictor yes;
    nCorrectors      2;
    nNonOrthogonalCorrectors 1;
    pRefCell         0;
    pRefValue        0;
}
relaxationFactors
{
    p                0.3;
    U                0.5;
   taufirst          0.3;
}
```

همانطور که مشاهده می‌شود برای میدان‌های فشار و تنش از ضریب تخفیف 0.3 و برای

میدان سرعت از ضریب تخفیف 0.5 استفاده شده است.

فصل ۵:

نتایج عددی

۵-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج حاصل از حل عددی برای شبیه سازی جریان سیال ویسکوالاستیک عبوری از روی سیلندر ایستا ارائه می شود. بر پایه نتایج حاصل از حل عددی، فیزیک جریان تشریح می گردد و سپس در ادامه، منشا و علل اثر پارامترهای مختلف بر روی جریان سیال بررسی می شود.

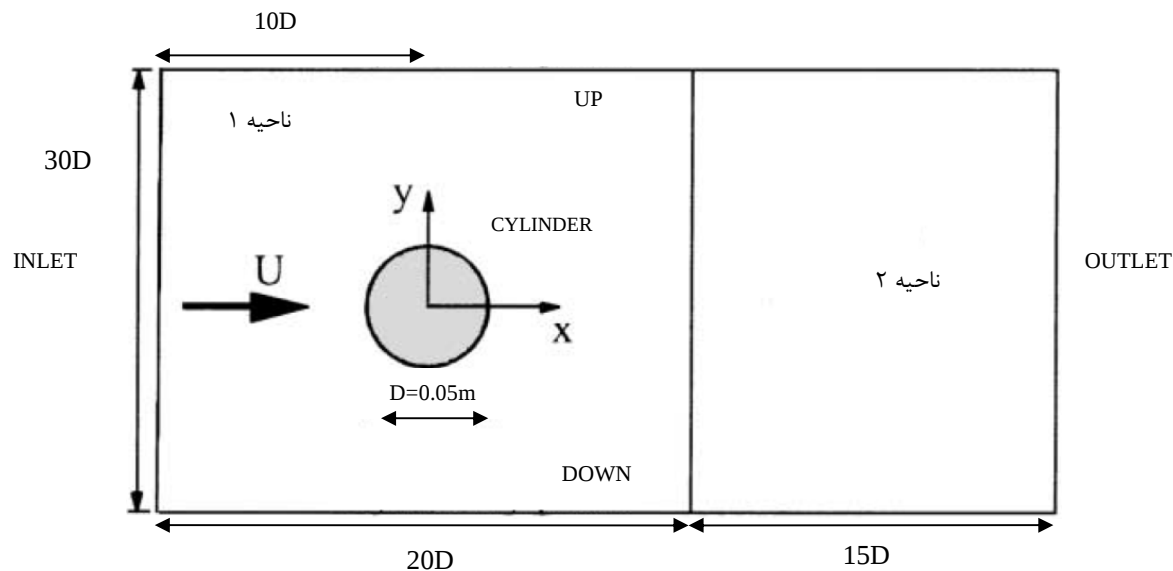
در ابتدای این فصل، استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی بررسی شده و صحت نتایج حاصل از حل عددی ارزیابی می گردد. جهت ارزیابی صحت نتایج، این نتایج عددی با برخی نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود مقایسه شده است. در ادامه، اثر پارامترهای مختلفی نظیر عدد رینولدز، عدد وایزنبرگ، ضریب تحرک در مدل گزیکس و اختلاف تنش های نرمال اول و دوم بر میدان سرعت، مورد بررسی قرار می گیرد و در مورد مکانیزم اثر هر یک از این پارامترها بر جریان بحث می شود.

۵-۲- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه و صحت نتایج

استقلال و عدم وابستگی حل به شبکه محاسباتی جهت مطالعه جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر، در این قسمت مورد بررسی قرار می گیرد. به منظور تعیین میزان حساسیت و همچنین دستیابی به شبکه ای مطلوب برای حل، چهار شبکه محاسباتی به کار گرفته شده و نتایج حاصل از حل هر یک از آنها با یکدیگر مقایسه شده است. دستگاه مختصات مرجع در مرکز سیلندر و محور x در راستای جریان اصلی^۱ می باشد. شایان ذکر است که به دلیل صرف جویی در زمان پردازش و همچنین امکان مقایسه نتایج حل با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود، از مشخصات سیال نیوتنی

¹ Main Flow

جهت تعیین بهبود شبکه بر حل استفاده شده است. برای این منظور، رینولدز جریان برابر ۱۰۰ و عدد وایزنبرگ برابر صفر لحاظ شده است. ابعاد هندسه مساله به صورت تابعی از شعاع سیلندر در شکل ۵-۱ آورده شده است. در این تحقیق سعی گردیده که موقعیت قرارگیری و فاصله صفحات مرزی نسبت به سیلندر طوری انتخاب گردد که هیچگونه اثری بر جریان نداشته باشند؛ به طوریکه بتوان جریانی با مرزهای نامحدود را حول سیلندر مدل نمود. برای این منظور مرزهای ورودی و خروجی به ترتیب در فاصله‌های $20R$ و $50R$ نسبت به مرکز سیلندر انتخاب شده است و فاصله مرزهای بالایی و پایینی نسبت به مرکز سیلندر، ۳۰ برابر شعاع سیلندر در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که اگر فاصله بین مرزهای بالایی و پایینی تا سیلندر کم باشد، مقدار ضرایب لیفت و درگ بدست آمده در مقایسه با جریان با مرزهای نامحدود بیشتر خواهد بود.



شکل ۵-۱ طرحواره ای از محدوده جریان به همراه ابعاد به کار گرفته شده

شبکه‌ها به صورت بی سازمان می‌باشد و در هر یک از آنها اندازه سلول‌ها حول سیلندر نسبت به سایر مرزها ریزتر انتخاب شده است. مشخصات این شبکه‌ها در جدول (۵-۱) آورده شده است.

برای ارزیابی بهبود شبکه بر حل، تعداد سلول ها حول سیلندر تا رسیدن به شبکه ای مطلوب از ۲۲ عدد تا ۱۲۵ عدد به ترتیب افزایش داده شده است.

جدول (۵-۱) مشخصات شبکه‌های محاسباتی

شبکه	تعداد سلول حول سیلندر	تعداد سلول در ناحیه ۱	تعداد سلول در ناحیه ۲	تعداد کل سلول
M-1	۲۲	108364	16906	125270
M-2	۴۵	133602	16906	150508
M-3	۹۰	208368	16906	225274
M-4	۱۲۵	294110	16906	311016

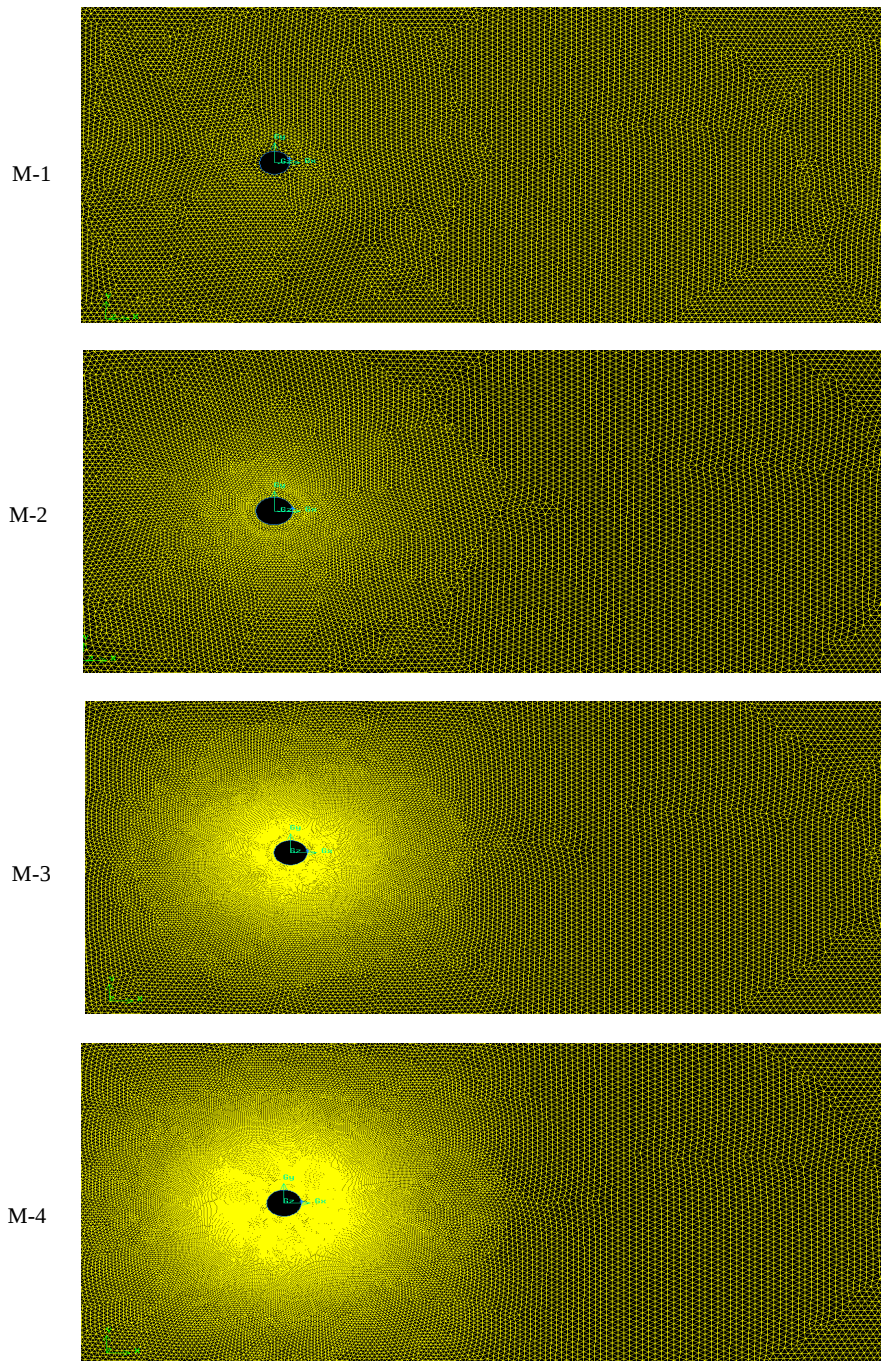
در شکل ۵-۲ نمایی کلی از شبکه‌های محاسباتی به کار گرفته شده جهت دستیابی به شبکه‌ای مطلوب آورده شده است. همچنین در شکل ۵-۳ نیز نمایی از سلول های اطراف سیلندر در هر یک از شبکه‌های محاسباتی آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای آنکه بتوان ارزیابی و درک مناسبی از گرادیان تنش و نیروهای اعمال شده بر سیلندر داشت، تعداد سلول ها حول سیلندر به ترتیب از شبکه M-1 تا M-4 افزایش داده شده است.

لازم به ذکر است که در این قسمت جهت صرف‌جویی در زمان محاسبه، از گسسته سازی مرتبه اول اوپلر برای جمله مشتق زمانی استفاده شده است. مقدار عدد کورانت^۱ برابر ۰.۵ و گام زمانی^۲ حل برای تمامی شبکه‌های به کار گرفته شده در این قسمت برابر ۰.۰۵ ثانیه می‌باشد. شرایط اولیه مساله کاملاً متقارن در نظر گرفته شده است؛ به نحوی که در ابتدای حل، فرض بر

¹ Courant Number

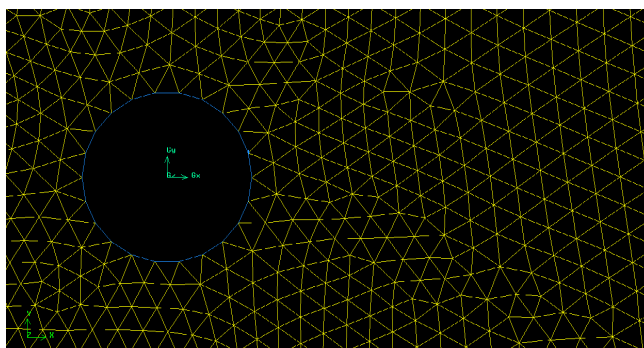
² Time Step

این است که سیال در حال سکون می‌باشد و با گذشت زمان، نوسان‌ها در جریان به صورت طبیعی رخ می‌دهد.

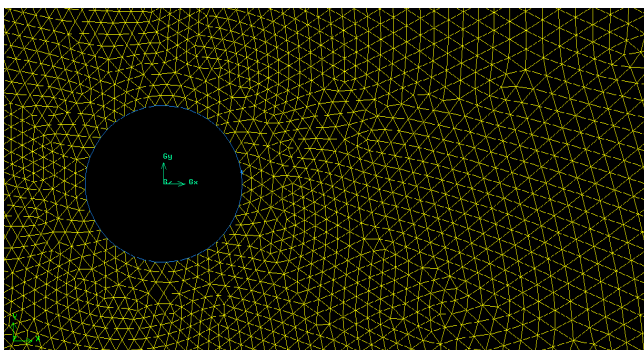


شکل ۵-۲ نمایش کامل شبکه‌های محاسباتی M-1 تا M-4

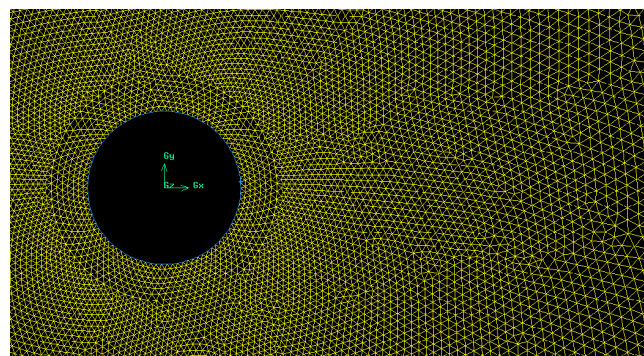
M-1



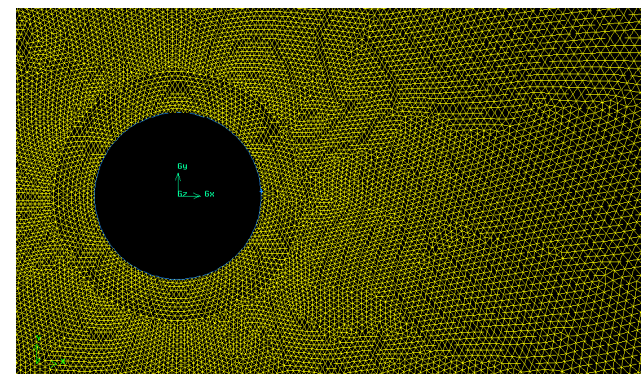
M-2



M-3

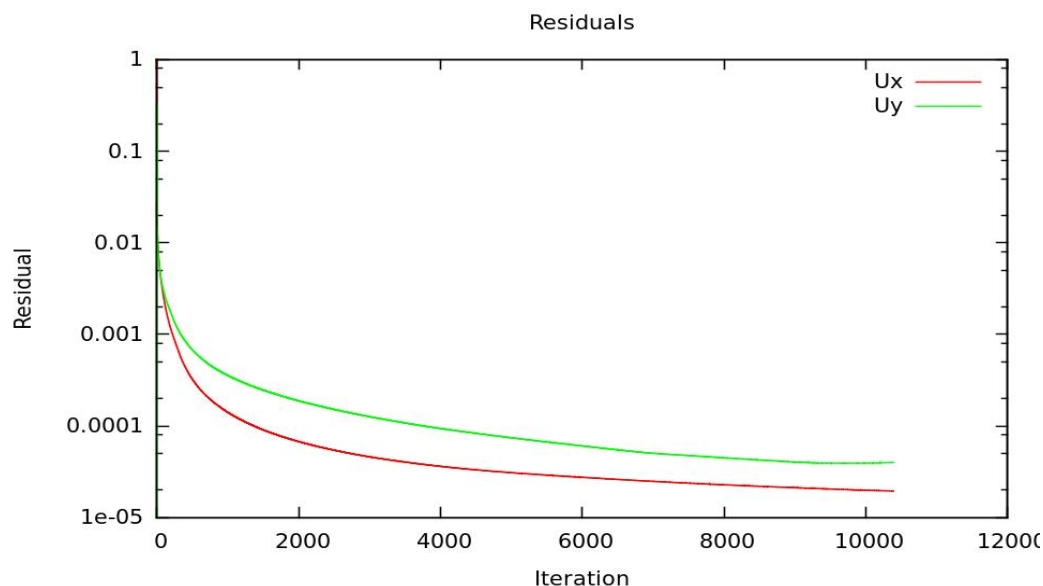


M-4



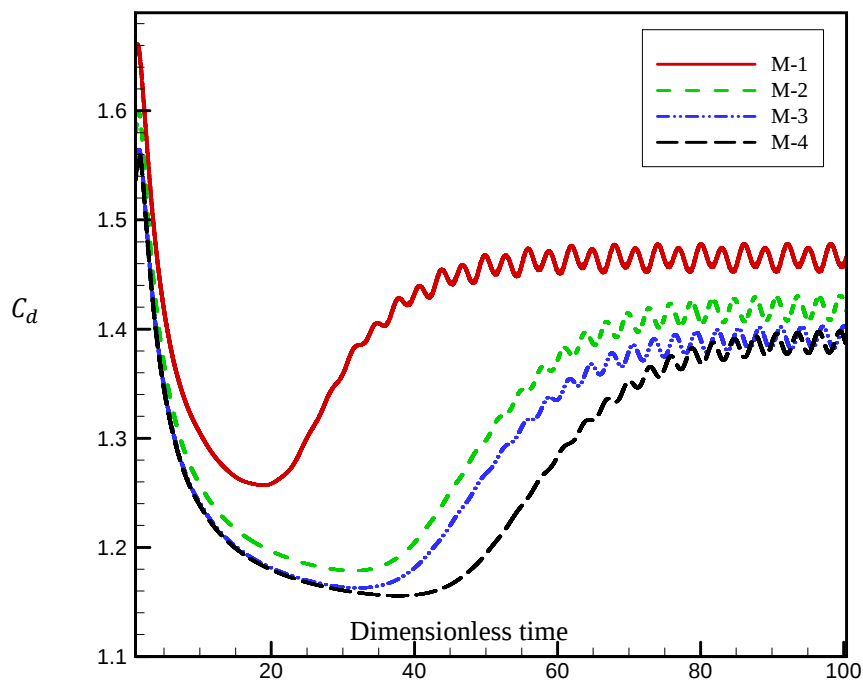
شکل ۳-۵ بزرگ‌نمایی شبکه‌های محاسباتی در اطراف سیلندر

در شکل ۵-۴ نمونه‌ای از تاریخچه همگرایی هر یک از میدان‌های متغیر برای شبکه M-4 آورده شده است.

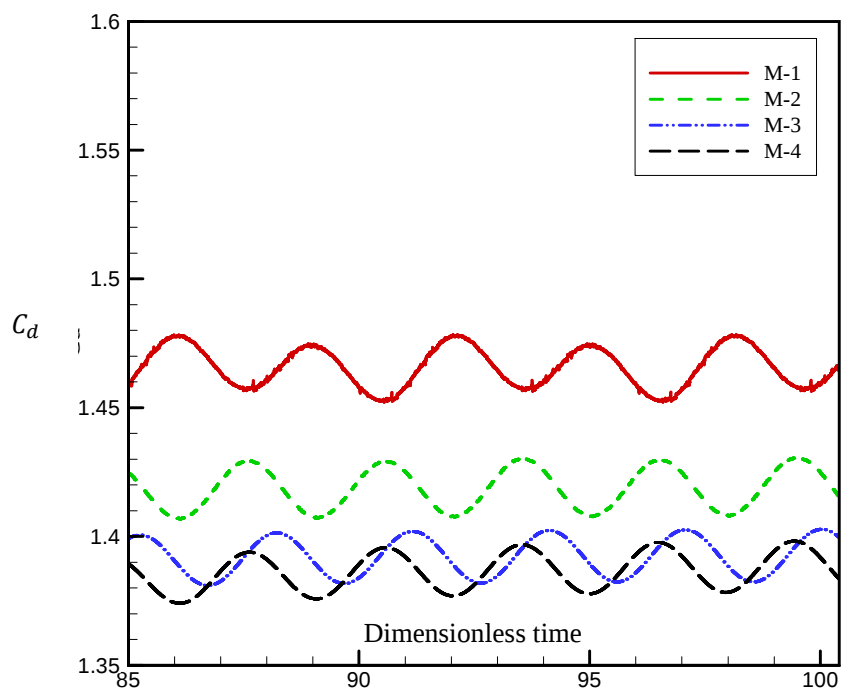


شکل ۵-۴ نمونه‌ای از تاریخچه همگرایی برای شبکه M-4 برای هر یک از مولفه‌های سرعت

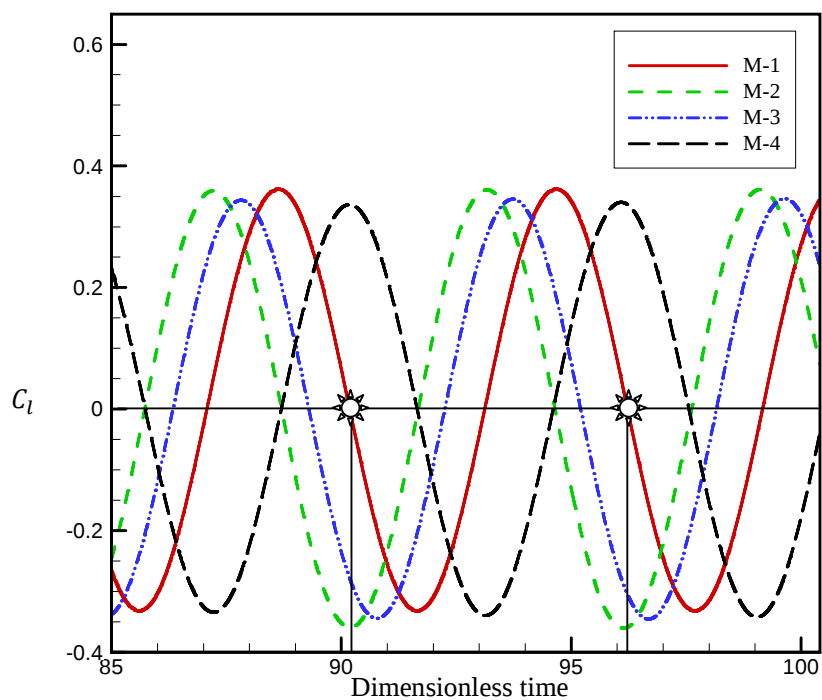
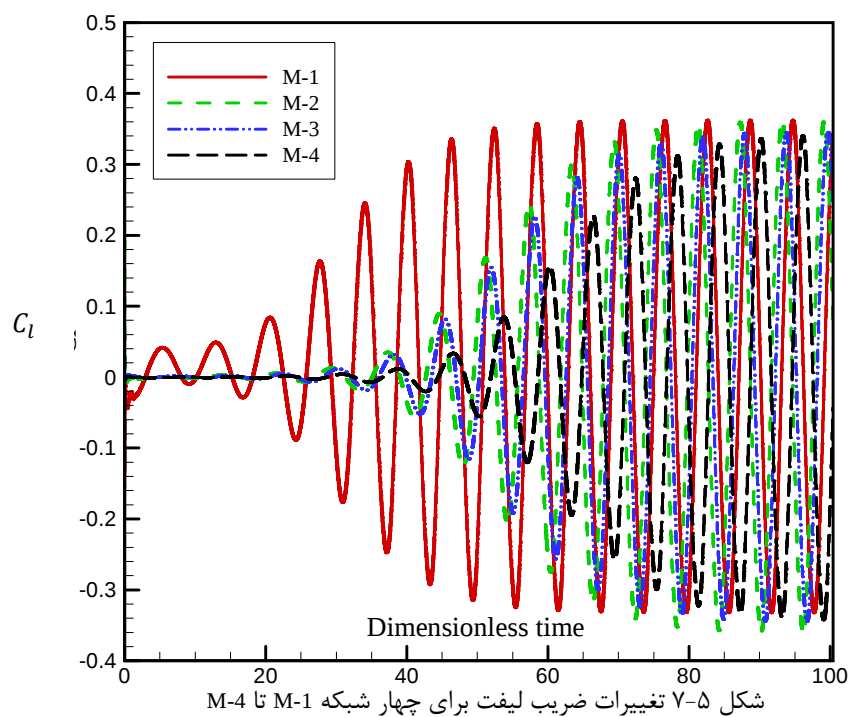
در ابتدای مدل‌سازی، گردابه‌های بوجود آمده در اثر شرط عدم لغزش بر روی سیلندر در ناحیه جریان برگشتی تشکیل شده در پشت آن کاملاً متقارن بوده و با افزایش گام زمانی بزرگ‌تر می‌شوند. بعد از گذشت تعدادی گام زمانی اولیه، مشاهده می‌شود که گردابه‌های متقارن، به صورت متناوب یکی در بالا و دیگری در پایین سطح سیلندر شروع به نوسان می‌کنند، به نحوی که دو ردیف از گردابه‌ها در پشت سیلندر به وجود می‌آیند. حرکت منظم گردابه‌ها سرعت نسبی را در ناحیه پایین‌دست جریان بوجود خواهد آورد که به صورت نوسانی می‌باشد. همانطور که در اشکال زیر مشاهده می‌شود، با رسیدن به رژیم کاملاً توسعه یافته از جریان تناوبی، نوسانات ایجاد شده در ضرایب لیفت و درگ کاملاً رفتار سینوسی از خود نشان می‌دهند.



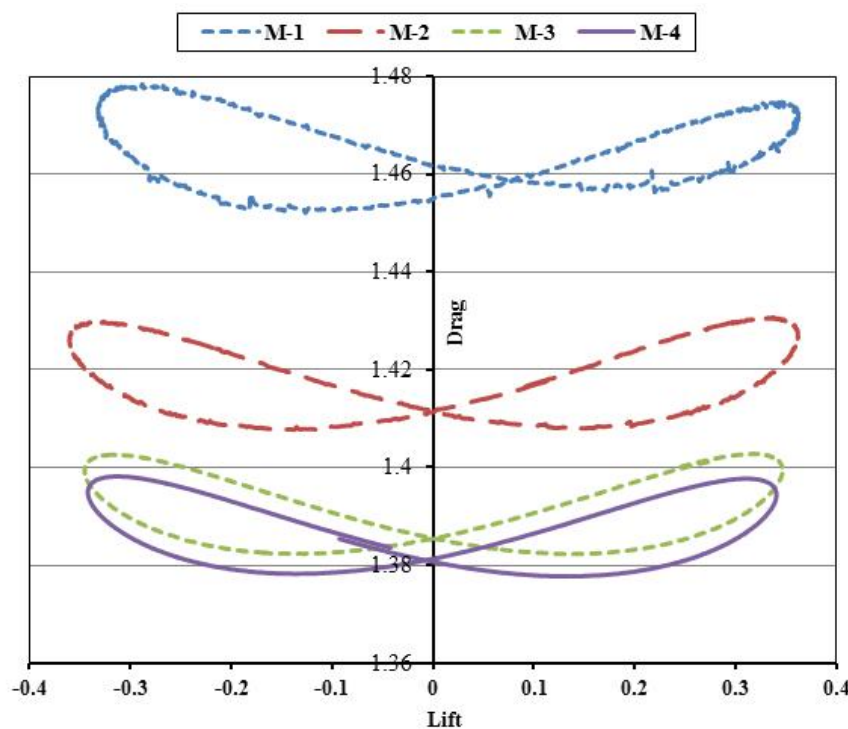
شکل ۵-۵ تغییرات ضریب درگ برای چهار شبکه M-1 تا M-4



شکل ۵-۶ بزرگ‌نمایی تغییرات ضریب درگ در محدوده نوسانی برای چهار شبکه M-1 تا M-4



رفتار سینوسی گردابه‌ها را به این صورت می‌توان توجیه نمود که چرخش گردابه‌ها در حین نوسان در دو جهت مخالف می‌باشد، به نحوی که در یک ردیف از گردابه‌ها، این چرخش در جهت مثلثاتی و در ردیف دیگر در جهت عکس مثلثاتی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود محدوده تغییرات ضرایب درگ و لیفت برای چهار شبکه مورد بررسی، به ترتیب بین ۱.۳۶ تا ۱.۴۷ و ۰.۴- تا ۰.۴ می‌باشد. قبل از رسیدن به رینولدز بحرانی، ضریب لیفت، صفر است که پس از شروع نوسان در جریان، این ضریب نیز بین یک مقدار مثبت و منفی تغییر می‌کند. در شکل ۵-۹ نیز تغییرات ضریب درگ بر حسب ضریب لیفت آورده شده است. در این نمودار، شبکه M-4 با خط پررنگ و شبکه‌های دیگر با نقطه چین، خط فاصله و خط نقطه فاصله مشخص شده‌اند.



شکل ۵-۹ نمودار ضریب درگ بر حسب ضریب لیفت

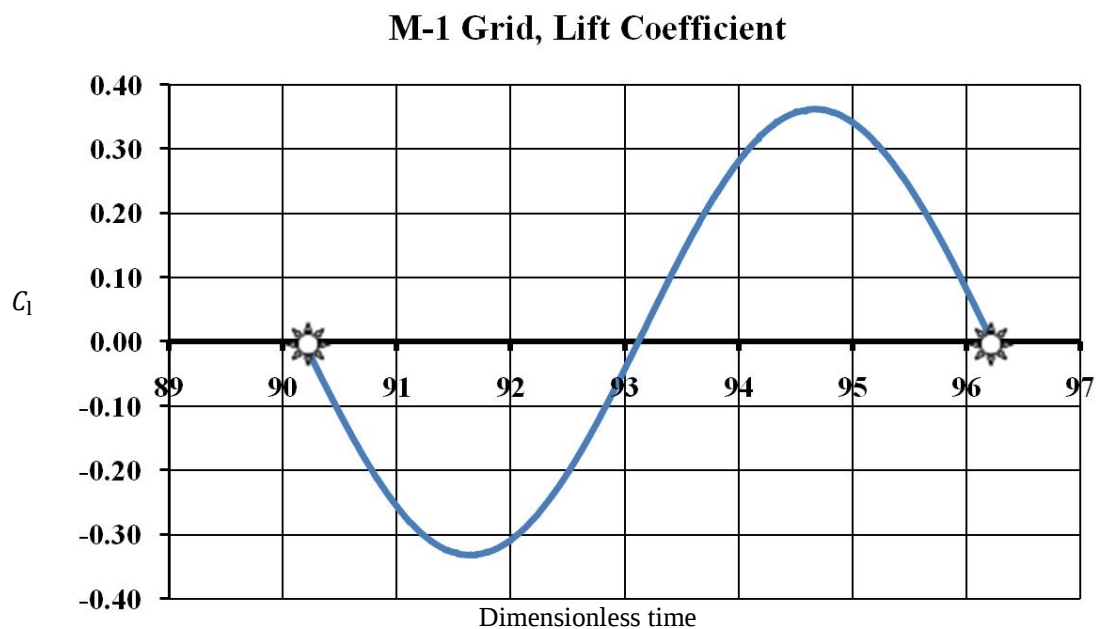
نتایج بدست آمده از حل چهار شبکه محاسباتی در جدول (۵-۲) لیست شده است. در این جدول، زمان ایجاد یک نوسان کامل $T(s)$ ، متوسط ضرایب لیفت و درگ و نیز عدد استروهال برای

جریان سیال نیوتنی ($We=0$) و در رینولدز ۱۰۰ محاسبه گردیده و متوسط خطای ضریب درگ اندازه‌گیری شده با کار الویرا [۲۸] مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول (۵-۲) نتایج بدست آمده از شبکه‌های مختلف

شبکه	T(s)	St	ΔC_L	$\bar{C}_d$	Oliveira [28] %
M-1	۶.۰۴۲	۰.۱۶۵	۰.۳۴۷۲	۱.۴۶۵۲	٪۶.۴۹
M-2	۶.۰۵۲	۰.۱۶۴۴	۰.۳۷۰۳	۱.۴۱۹۷	٪۳.۴۹
M-3	۶.۰۷۵	۰.۱۶۴۶	۰.۳۴۴۷	۱.۳۹۳	٪۱.۶۴
M-4	۶.۰۹۷	۰.۱۶۴	۰.۳۰۱۵	۱.۳۸۸	٪۱.۲۸

در جدول فوق، ضریب درگ به صورت $C_d = \frac{F_x}{0.5\rho U^2 d}$ و ضریب لیفت به صورت $C_l = \frac{F_y}{0.5\rho U^2 d}$ تعریف می‌گردد که در آن F_x و F_y مولفه‌های نیرو بر روی سیلندر می‌باشد. همچنین متوسط ضریب لیفت به صورت $\Delta C_l = \frac{1}{2}(C_{l\max} - C_{l\min})$ و متوسط ضریب درگ به صورت $\bar{C}_d = \frac{1}{2}(C_{d\max} + C_{d\min})$ محاسبه شده است. در دوره تناوب یک نوسان برای شبکه M-1 آورده شده است. نحوه محاسبه زمان یک نوسان کامل، فرکانس جریان و همچنین متوسط ضریب لیفت برای شبکه M-1 در ادامه آورده شده است.



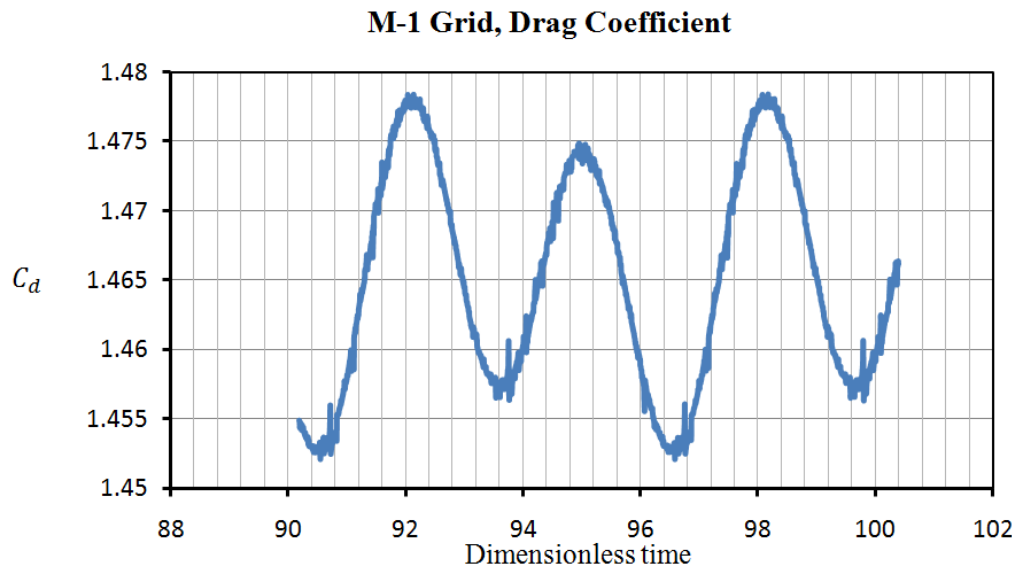
شکل ۵-۱۰ محاسبه زمان دوره تناوب و فرکانس جریان

$$T = \frac{T_2 - T_1}{n} = \frac{96.2253 - 90.183296}{1} = 6.042$$

$$fr = St = \frac{1}{T} = \frac{1}{6.042} = 0.165$$

$$\Delta C_l = \frac{C_{l\max} - C_{l\min}}{2} = \frac{0.362255 - (-0.332296)}{2} = 0.3472$$

همچنین ضریب نحوه محاسبه ضریب درگ متوسط $\bar{C}_d$ در زیر آورده شده است.



شکل ۵-۱۱ محاسبه متوسط ضریب درگ

$$\bar{C}_d = \frac{C_{d \max} - C_{d \min}}{2} = \frac{1.4784 - 1.45209}{2} = 1.4652$$

با توجه به نمودارهای ضرایب لیفت و درگ ارایه شده در بالا می‌توان دریافت که مقادیر حاصل از شبکه‌های M-1، M-2 و M-3، به سمت شبکه M-4 میل می‌کند. همچنین با مقایسه مقادیر ضریب درگ با نتایج حاصل از کار الویرا [۲۸] برای جریان سیال نیوتنی در $Re=100$ ، مشاهده می‌شود که در شبکه سوم مقدار خطا کمتر از ۱.۶۴٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان اینگونه ادعا نمود که در این تعداد گره، حل عددی تقریباً مستقل از شبکه است. پرواضح است که با افزایش تعداد سلول‌ها، خطا در حل عددی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در شبکه M-4 با افزایش تعداد سلول‌ها از ۹۰ به ۱۲۰ عدد، این مقدار خطا به ۱.۲۸٪ کاهش یافته است. اما باید توجه داشت که این امر به افزایش شدید زمان و حجم محاسبات منجر می‌شود. لذا در این پژوهش جهت اجتناب از هر گونه وابستگی تحلیل به شبکه، تمامی محاسبات بر مبنای شبکه M-3 انجام شده است.

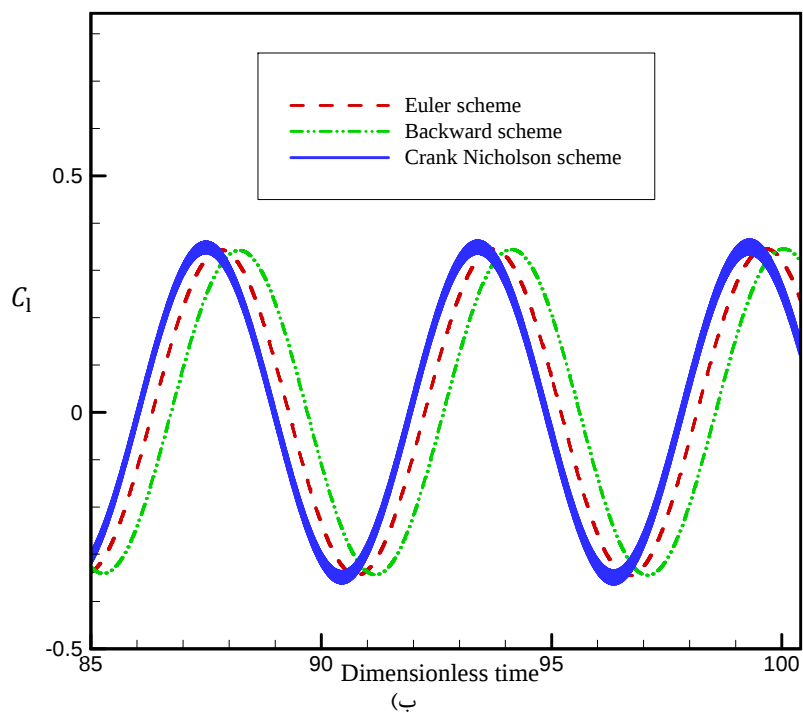
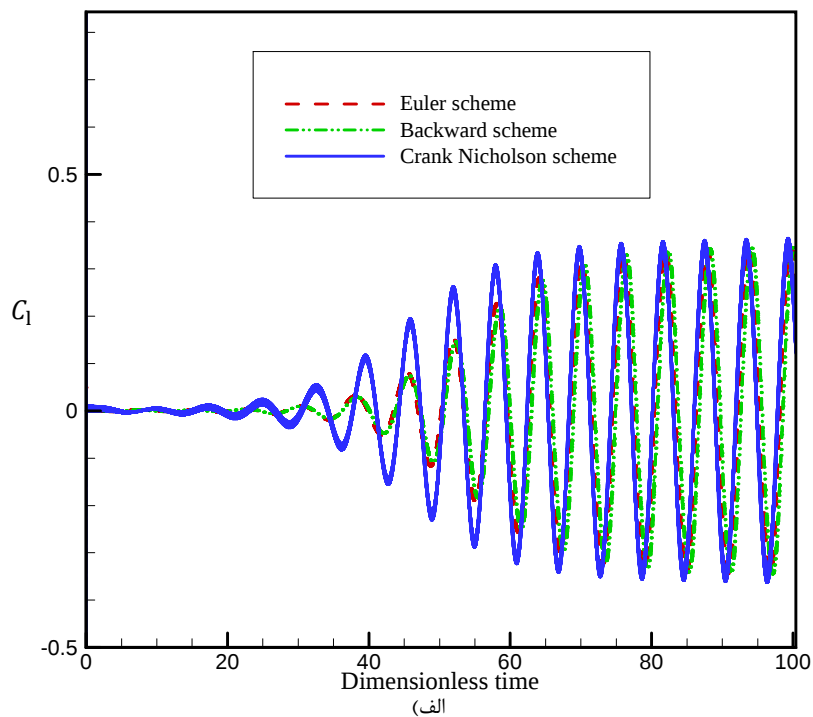
۵-۳- تاثیر گسسته سازی جمله مشتق زمانی و گام زمانی بر حل

در قسمت قبل برای دستیابی به شبکه ای مناسب، گام زمانی حل برابر ۰.۰۵ ثانیه انتخاب شد و به منظور تسریع در روند حل و صرفجویی در زمان، از گسسته سازی مرتبه اول اویلر برای جمله مشتق زمانی استفاده گردید. در نهایت شبکه M-3 به عنوان شبکه مرجع برای تمامی محاسبات پیشرو انتخاب گردید. در این قسمت، روش های مختلف گسسته سازی جمله مشتق زمانی بر روی شبکه M-3 بکار گرفته می شود و میزان تاثیر آن بر روی نتایج حل استخراج می گردد. برای این منظور، روش گسسته سازی مرتبه اول اویلر با روش های گسسته سازی مرتبه دوم کرانک نیکلسون^۱ و پسرو^۲ مقایسه شده است. همچنین تاثیر انتخاب گام زمانی مناسب بر روند حل در هر یک از این روش ها مورد بررسی قرار می گیرد.

در شکل ۵-۱۲ تغییرات ضریب لیفت با انتخاب روش های مختلف گسسته سازی جمله مشتق زمانی در گام زمانی برابر ۰.۰۵ ثانیه آورده شده است. همانطور که در نمودارهای این شکل مشاهده می شود و همچنین با توجه به مقادیر متوسط ضریب لیفت و درگ ارایه شده در جدول (۵-۳) می توان به این نتیجه رسید که با انتخاب روش گسسته سازی مرتبه دوم پسرو برای مشتق زمانی به جای مرتبه اول اویلر، میزان خطا در مقایسه با کار الویرا [۲۸] کاهش یافته است.

¹ Backward

² Crank Nicholson



شکل ۵-۱۲ مقایسه نتایج ضریب لیفت با استفاده از روش های مرتبه اول و دوم در گسسته سازی جمله مشتق زمانی الف) کل زمان حل ب) بزرگنمایی تغییرات ضریب لیفت در محدوده نوسانی

جدول (۳-۵) متوسط ضرایب لیفت و درگ برای گسسته سازی مرتبه اول و دوم جمله مشتق زمانی

روش گسسته سازی	$\bar{C}_d$	ΔC_L	Oliveira[28] %
مرتبه اول اویلر (Euler)	۱.۳۹۳	۰.۳۴۴۷۵	٪۱.۶۴
مرتبه دوم پسرو (Backward)	۱.۳۸۹۶	۰.۳۴۳۸	٪۱.۴۰۳
مرتبه دوم کرانک-نیکلسون (Crank Nicholson)	۱.۳۹۴۶	۰.۳۶۱۶	٪۱.۷۵

همچنین به منظور تعیین گام زمانی مناسب، حل با استفاده از گام‌های زمانی ۰.۰۲۵ ثانیه و ۰.۰۱۲۵ ثانیه نیز انجام شده است. با استفاده از این کار می‌توان به اثر انتخاب گام زمانی مناسب بر حل پی برد. شایان ذکر است که هر دو روش گسسته سازی اویلر و پسرو برای جمله مشتق زمانی در این قسمت مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج مقدار متوسط ضرایب لیفت و درگ در جدول (۴-۵) آورده شده است.

جدول (۴-۵) اثرات انتخاب گام زمانی بر نتایج حل

گام زمانی	مرتبه دوم پسرو (Backward)		اویلر (Euler)	
	$\bar{C}_d$	ΔC_L	$\bar{C}_d$	ΔC_L
۰.۰۵	۱.۳۸۹۶	۰.۳۴۳۸	۱.۳۹۳	۰.۳۴۴۷۵
۰.۰۲۵	۱.۳۸۹	۰.۳۴۵	۱.۳۹۱	۰.۳۴۴۷
۰.۰۱۲۵	۱.۳۸۹۱	۰.۳۴۸	۱.۳۹۲	۰.۳۴۴۱

مشاهده می‌شود که با انتخاب گام زمانی کوچکتر، تغییری در نتایج حاصل نمی‌شود. لذا به منظور صرف‌جویی در وقت و هزینه، بزرگ‌ترین گام زمانی یعنی همان ۰.۰۵ ثانیه برای تمامی محاسبات پیش‌رو لحاظ گردیده است.

به طور خلاصه می‌توان گفت که در این قسمت ابتدا با چهار شبکه مختلف، عدم وابستگی حل به شبکه، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت شبکه M-3 به عنوان شبکه مرجع انتخاب شد. سپس با اعمال روش های مختلف گسسته سازی مرتبه اول و دوم بر روی جمله مشتق زمانی، روش گسسته سازی مرتبه دوم پس‌رو به عنوان بهترین روش برای گسسته سازی جمله مشتق زمانی انتخاب شد. در نهایت به منظور بررسی اثر گام زمانی بر حل، مقدار آن برای روش های مختلف گسسته سازی مرتبه اول و دوم جمله مشتق زمانی برای دو بار متوالی نصف و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که تقریباً هیچگونه تغییری در مقادیر متوسط ضرایب لیفت و درگ در اثر نصف کردن گام زمانی حل ایجاد نمی‌شود. لذا بزرگترین گام زمانی یعنی ۰.۰۵ ثانیه به عنوان گام زمانی مرجع برای تمامی محاسبات آتی لحاظ شده است.

۵-۴- بحث و نتایج

در این قسمت، نتایج حاصل از حل عددی برای شبیه سازی جریان سیال ویسکوالاستیک عبوری از روی سیلندر دایروی ارایه می‌شود. بر پایه نتایج حاصل از حل عددی، فیزیک این جریان تشریح می‌گردد و سپس در ادامه، به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی جریان پرداخته می‌شود. همانطور که در فصول قبل نیز بدان اشاره شد، در این پژوهش برای نخستین بار از مدل سه ثابته گزیکس به عنوان معادله ساختاری سیال ویسکوالاستیک در مدلسازی جریان ویسکوالاستیک حول سیلندر استفاده شده است. این مدل غیر خطی که بر مبنای دیدگاه مولکولی استوار است، از توانایی برجسته ای در توصیف ویسکوزیته در ناحیه توانی و همچنین اثر اختلاف تنش‌های نرمال برخوردار است و توابع ویسکومتریکی در این مدل کامل می‌باشد. لازم به یادآوری است که در این

پژوهش، به دلیل وجود شرایط ناپایداری و غیر متقارن بودن جریان، هندسه مساله به صورت کامل در نظر گرفته شده است.

۵-۴-۱- مطالعه جریان

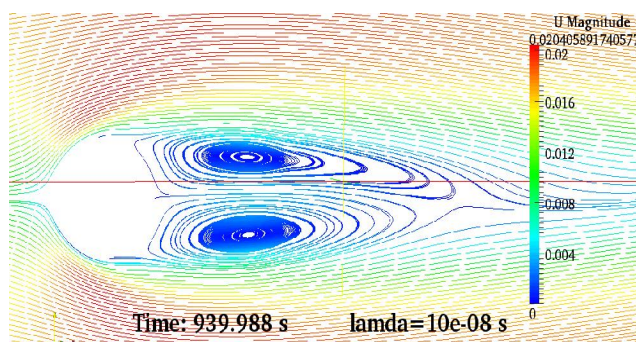
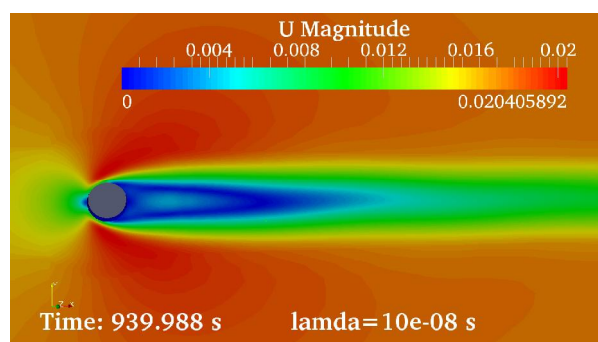
مشاهدات تجربی آشکار می‌سازد که افزودن حتی مقدار کمی ماده پلیمری به حلال نیوتنی، سبب کاهش فرکانس جریان، افزایش طول ناحیه جریان برگشتی، تغییر در شکل گردابه ها و همچنین کاهش ضرایب لیفت و درگ نسبت به حالت نیوتنی می‌گردد. در این قسمت ابتدا به مقایسه جریان سیال ویسکوالاستیک و نیوتنی پرداخته و سپس اثر پارامترهای مختلف بر جریان مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۵-۴-۲- مقایسه جریان سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک

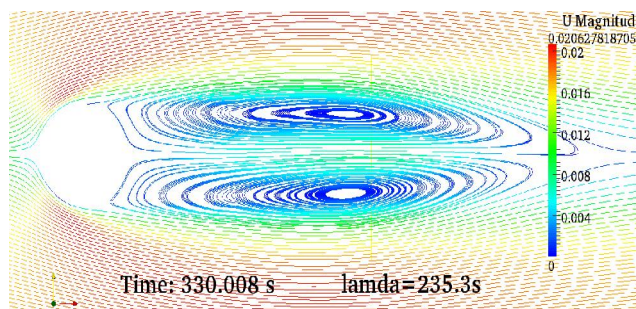
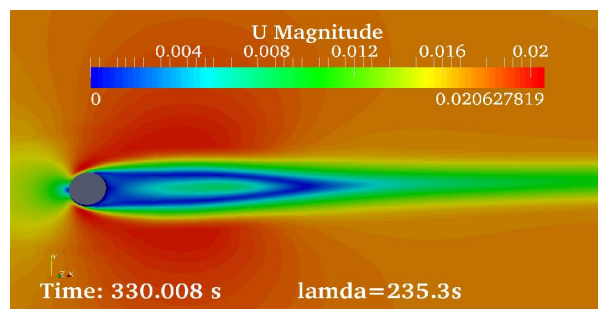
در این قسمت با مدل‌سازی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر و با به کارگیری مدل رئولوژیکی گزیکس، به مقایسه جریان سیال ویسکوالاستیک در عدد وایزنبرگ انتخابی $We = 80$ و جریان سیال نیوتنی خالص قبل و بعد از رینولدز بحرانی پرداخته شده و نتایج حاصل با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

در شکل ۵-۱۳ بزرگی میدان سرعت و خطوط جریان برای دو سیال نیوتنی ($We=0$) و ویسکوالاستیک ($We=80$) که در آستانه نوسان قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. در این شکل طول ناحیه جریان برگشتی برای سیال ویسکوالاستیک به مراتب بزرگتر از سیال نیوتنی می‌باشد. همچنین زمان شروع نوسان در جریان سیال ویسکوالاستیک زودتر از جریان سیال نیوتنی اتفاق افتاده است. در واقع، ازدیاد خاصیت الاستیک سیال، ناپایداری در جریان را تشدید نموده که در

نتیجه آن، رینولدز بحرانی جریان کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است که مقدار زمان آسودگی از تنش λ ، برای سیال نیوتنی $s \cdot 10^{-8}$ در نظر گرفته شده است. در حالی که این مقدار برای سیال ویسکوالاستیک برابر $s \cdot 235.3$ لحاظ شده است. در شکل ۵-۱۴ توزیع مولفه‌های سرعت محوری و عمودی (U_x و U_y) در هر دو سیال ویسکوالاستیک و نیوتنی به صورت مقایسه‌ای آورده شده است. در این شکل محدوده تغییرات میدان هر یک از مولفه‌های سرعت مربوط به جریان سیال ویسکوالاستیک در مقایسه با جریان نیوتنی بیشتر است.

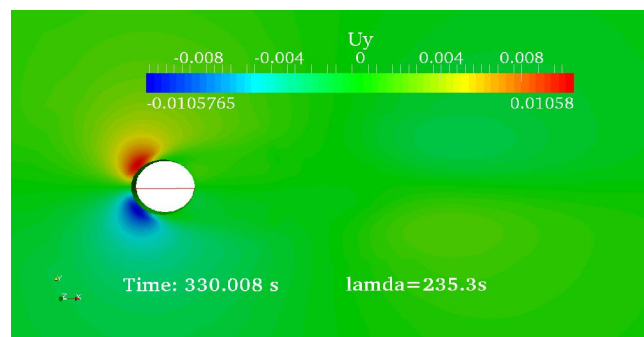
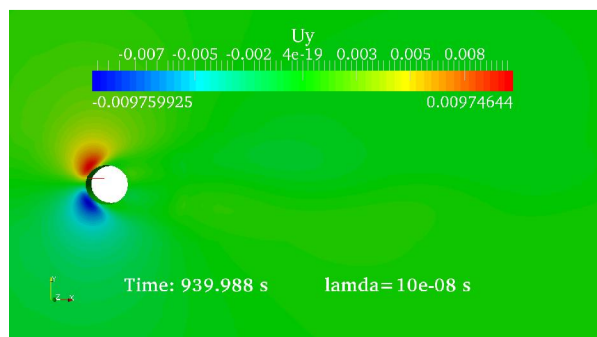
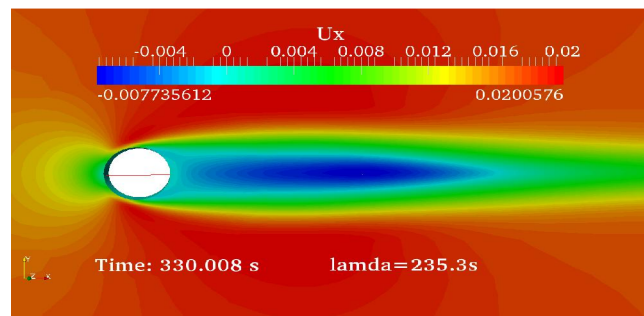
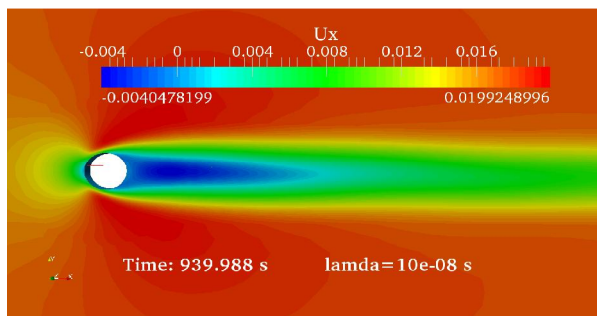


(الف)



(ب)

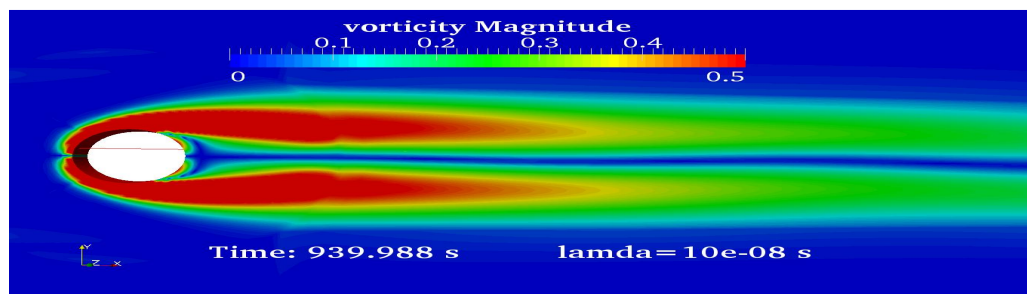
شکل ۵-۱۳ بزرگی میدان سرعت و خطوط جریان (الف) سیال نیوتنی (ب) سیال ویسکوالاستیک



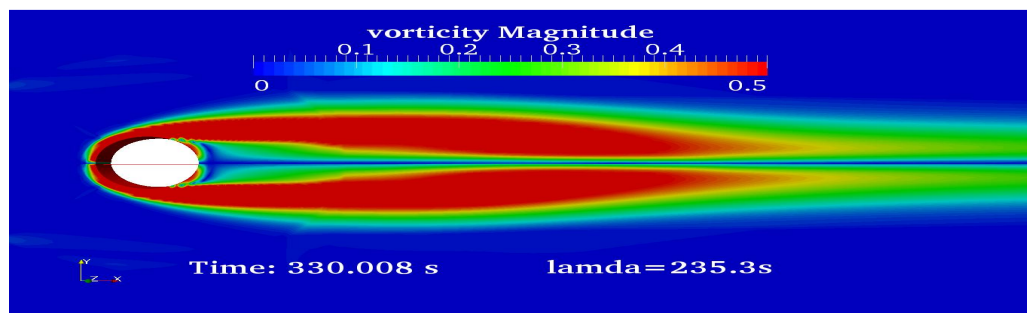
(ب)

(الف)

شکل ۵-۱۴ توزیع مولفه های میدان سرعت الف) جریان ویسکوالاستیک ($We=80$) ب) جریان نیوتنی

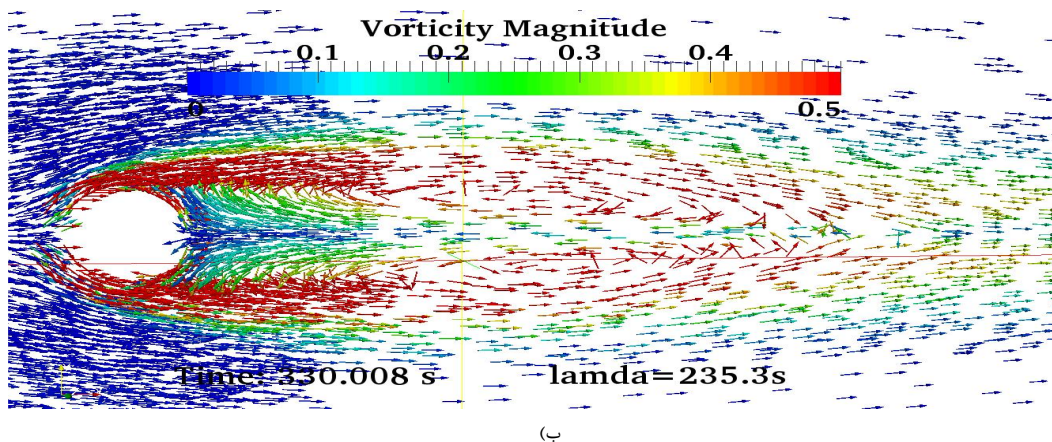
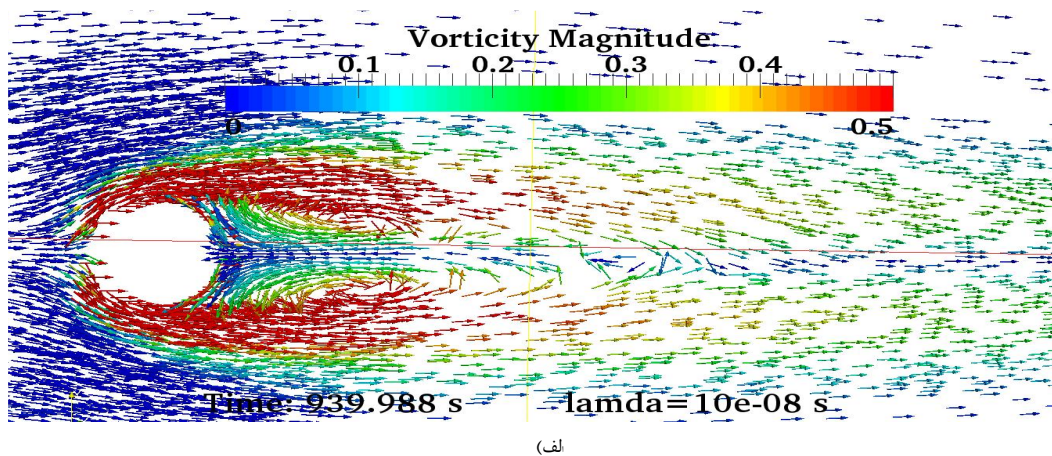


(الف)



(ب)

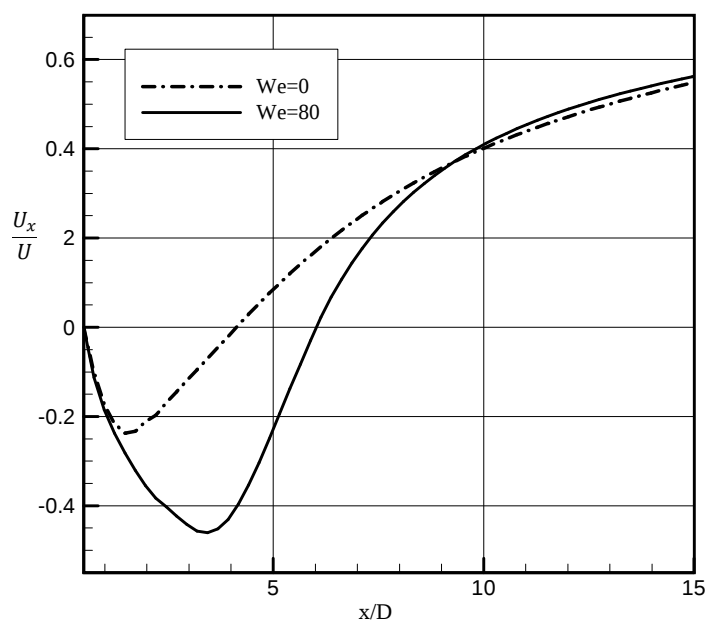
شکل ۵-۱۵ توزیع میدان ورتیسیتیه الف) جریان سیال نیوتنی ب) جریان سیال ویسکوالاستیک ($We=80$)



شکل ۵-۱۶ بردارهای سرعت الف) جریان سیال نیوتنی ب) جریان سیال ویسکوالاستیک ($We=80$)

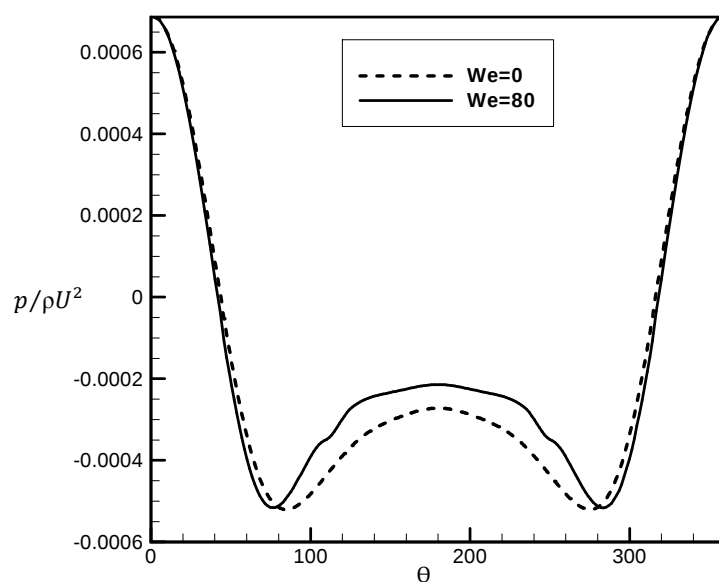
با اندازه گیری فاصله بین نقطه انتهایی سیلندر تا نقطه ای که سرعت محوری در آن به صفر می‌رسد، می‌توان طول ناحیه گردابه تشکیل شده در پشت سیلندر را محاسبه نمود.

در شکل ۵-۱۷ تغییرات سرعت محوری در ناحیه پشت سیلندر برای حالت نیوتنی و ویسکوالاستیک آورده شده است. این طول، برای جریان سیال نیوتنی برابر $L = 4.05D$ و برای جریان سیال ویسکوالاستیک با عدد وایزنبرگ 80 برابر $L = 6.01D$ اندازه گیری شده است.



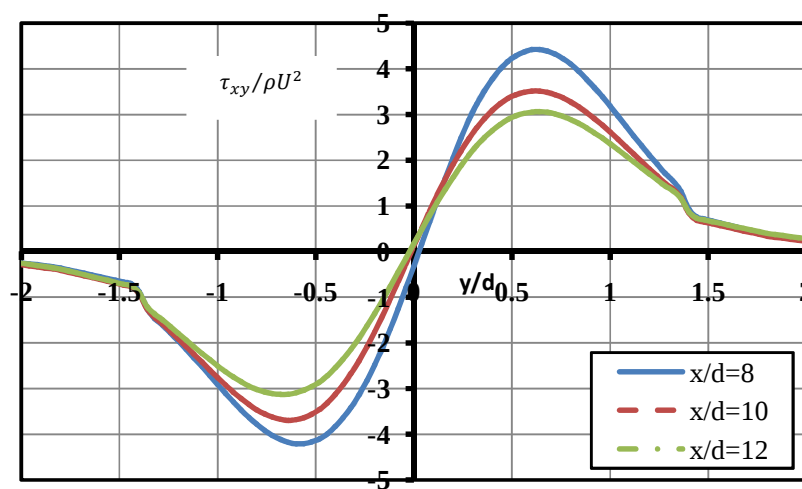
شکل ۵-۱۷ تغییرات سرعت محوری برای جریان سیال نیوتنی ($We = 0$) و ویسکوالاستیک ($We = 80$)

افزایش طول ناحیه گردابه در پشت سیلندر، در اثر تغییر در توزیع فشار روی سطح سیلندر رخ می‌دهد. برای این منظور در شکل ۵-۱۸ توزیع فشار برای حالت نیوتنی و ویسکوالاستیک آورده شده است. مشاهده می‌شود که توزیع فشار در جریان سیال ویسکوالاستیک، نسبت به حالت پایه نیوتنی، با افزایشی نسبی همراه است. این موضوع به دلیل کاهش تنش برشی است که در اثر خاصیت الاستیک سیال ویسکوالاستیک رخ داده و سبب بوجود آمدن پدیده کاهش درگ در جریان این گونه از سیالات می‌شود.

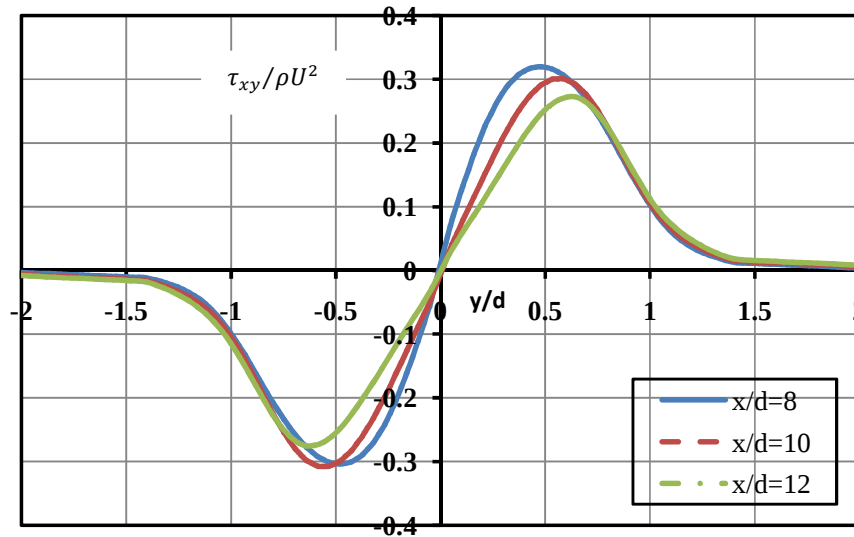


شکل ۵-۱۸ توزیع فشار بر روی سطح سیلندر برای جریان سیال ویسکوالاستیک ($We = 80$) و نیوتنی (زاویه شروع، از نقطه سکون شروع شده و به صورت ساعتگرد می‌باشد)

با رسم تغییرات تنش برشی در ناحیه پایین دست هر دو جریان ویسکوالاستیک و نیوتنی می‌توان میزان نرخ برش در جریان آن دو را مورد مقایسه قرار داد. برای این منظور، در شکل ۵-۱۹ نمودار تغییرات تنش برشی در مقاطع عرضی مختلف در ناحیه پایین دست جریان برای جریان سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک آورده شده است.



(الف)



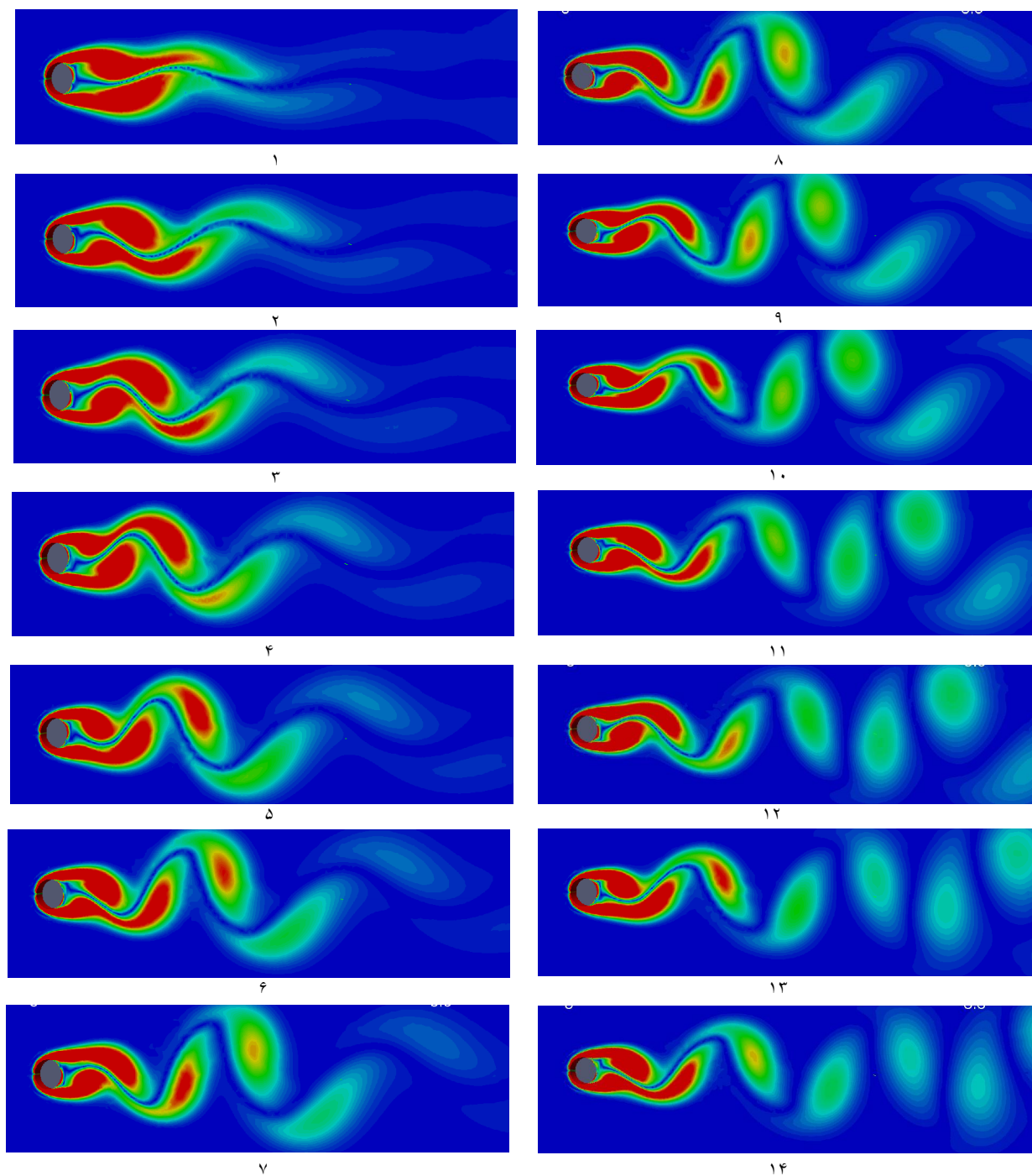
(ب)

شکل ۵-۱۹ نمودار تغییرات مولفه برشی تانسور تنش در مقاطع عرضی ناحیه پایین دست جریان (الف) جریان سیال نیوتنی، (ب) جریان سیال ویسکوالاستیک

شکل ۵-۱۹ الف، مقادیر تنش برشی τ_{xy} در مقاطع عرضی $X/D = 8, 10, 12$ می باشد. این نمودار برای جریان سیال ویسکوالاستیک و نیوتنی پیش از رسیدن به رینولدز بحرانی و شروع نوسان در جریان است. مشاهده می شود که مرتبه بزرگی تنش برشی جریان سیال نیوتنی یک درجه از سیال ویسکوالاستیک بیشتر می باشد. این موضوع را می توان به رفتار باریک شونده ویسکوزیته نسبت به نرخ برش در سیال ویسکوالاستیک نسبت داد.

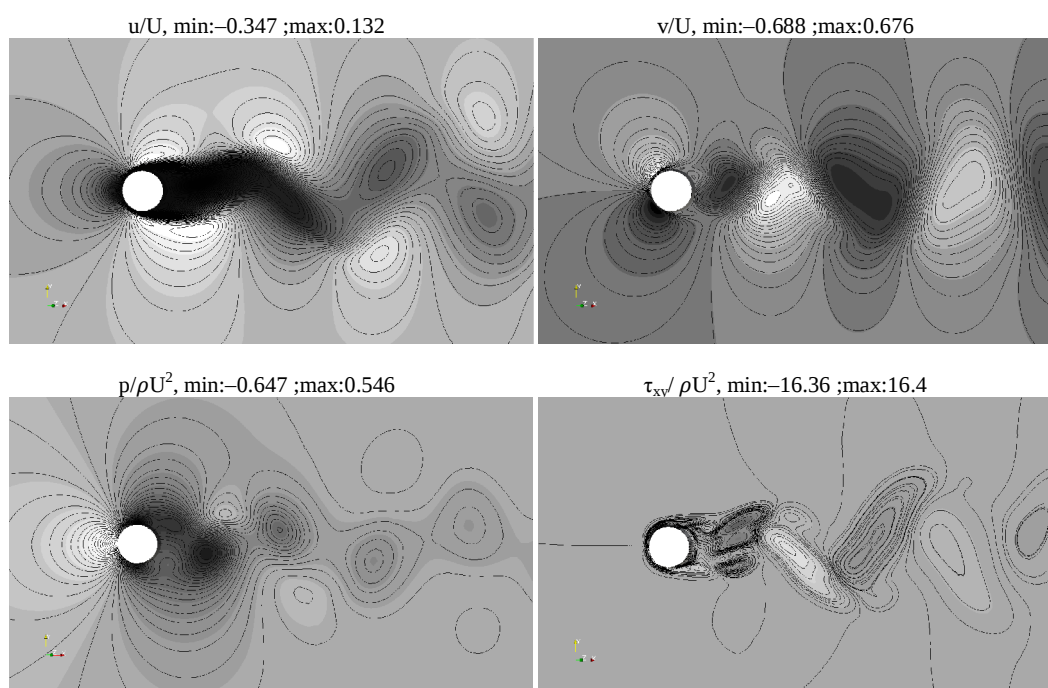
همانطور که در فصل دوم نیز اشاره گردید، به دلیل وجود خاصیت الاستیک و غیر خطی بودن ویسکوزیته نسبت به نرخ برش در سیالات ویسکوالاستیک، مدل سازی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر، خصوصا در رینولدزی بالاتر از رینولدز بحرانی بسیار پیچیده می باشد. از این رو، تاکنون اکثر مطالعات انجام شده در خصوص جریان سیال غیرنیوتنی حول سیلندر بیشتر بر پایه مشاهدات آزمایشگاهی بوده است. لذا در این قسمت به بررسی الگو و ساختار جریان نوسانی سیال ویسکوالاستیک در عبور از سیلندر ایستا پرداخته شده است.

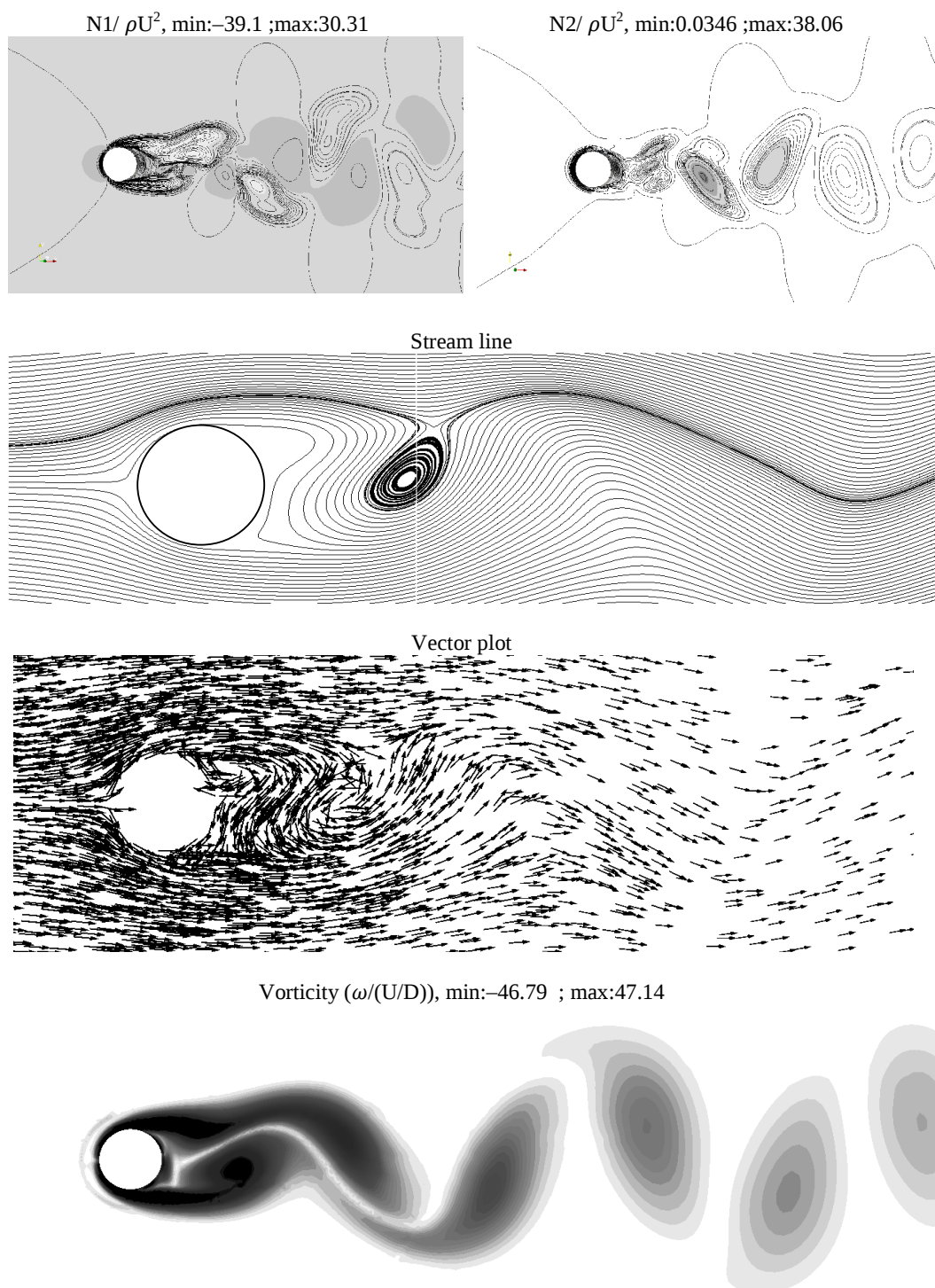
در شکل ۵-۲۰ توزیع میدان ورتیسسته سیال ویسکوالاستیک از لحظه شروع نوسان تا رسیدن به حالت دایمی از جریان نوسانی آورده شده است



شکل ۵-۲۰ توزیع میدان ورتیکال از لحظه شروع نوسان در جریان تا رسیدن به جریان نوسانی دایمی

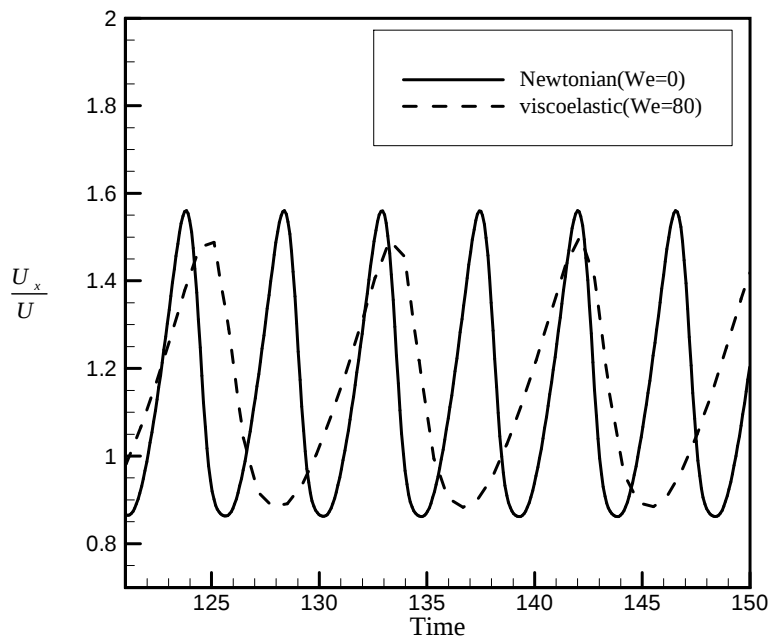
در واقع، هنگامی که عدد رینولدز از حد مشخصی فراتر رود، در اثر کوچکترین شرایط ناپایداری، نقطه جدایش جریان حول جسم دستخوش تغییر شده و همین امر سبب می‌شود تا گردابه‌های متقارن که به شکل دنباله در پشت سیلندر بوجود آمده‌اند، در آستانه نوسان قرار گیرند. در نتیجه این ناپایداری، الگوی متقارن جریان از بین می‌رود. در این هنگام توزیع فشار حول جسم دستخوش تغییر شده و سبب می‌شود که گردابه‌ها، به صورت متناوب، یکی در بالا و دیگری در پایین محور تقارن جسم بوجود آیند. در شکل ۵-۱۱ توزیع هر یک از مولفه‌های سرعت، فشار، تنش برشی، اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم، خطوط جریان، بردارهای سرعت و همچنین میدان ورتیسیسته به صورت بی بعد در $Re=100$ و $We=80$ و $\alpha=0.5$ به همراه مقادیر ماکزیمم و مینیمم هر یک از میدان‌ها آورده شده است.





شکل ۵-۲۱ توزیع میدان‌های متغیر برای جریان سیال گزیکس حول سیلندر در $Re=100$ ، $We=80$ و $\alpha=0.5$

در شکل ۵-۲۲ تغییرات سرعت محوری نسبت به زمان برای یک نقطه در ناحیه جریان برگشتی سیال ویسکوالاستیک ($We=80$) و جریان نیوتنی ($We=0$) آورده شده است. با مقایسه توزیع میدان‌های سرعت سیال ویسکوالاستیک و نیوتنی در این شکل می‌توان دریافت که دامنه نوسان در جریان سیال ویسکوالاستیک، نسبت به حالت نیوتنی کمتر می‌باشد. بعلاوه آنکه کاهش محسوسی در فرکانس جریان نیز مشاهده می‌شود. دلیل چنین موضوعی را می‌توان به خاصیت الاستیک سیال ویسکوالاستیک ربط داد.

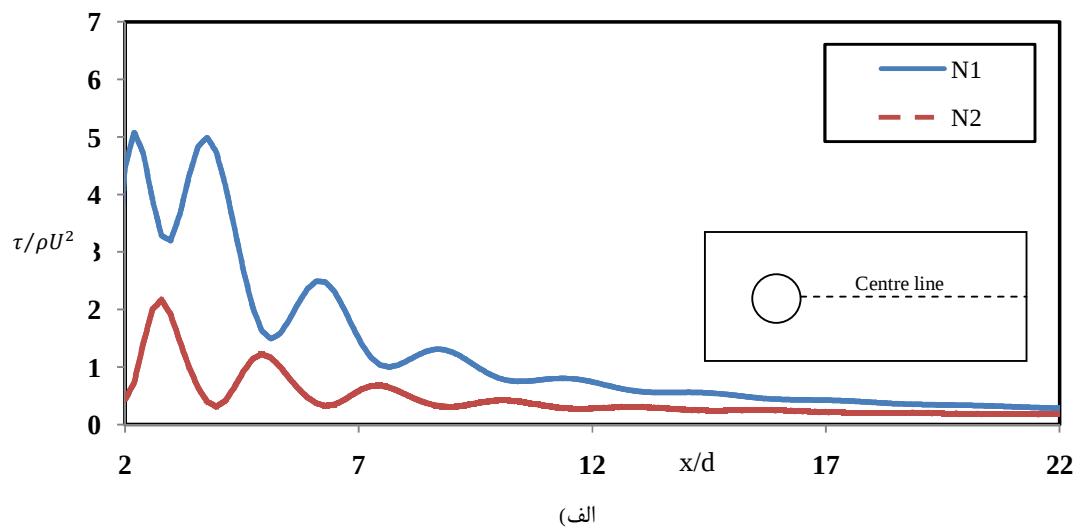


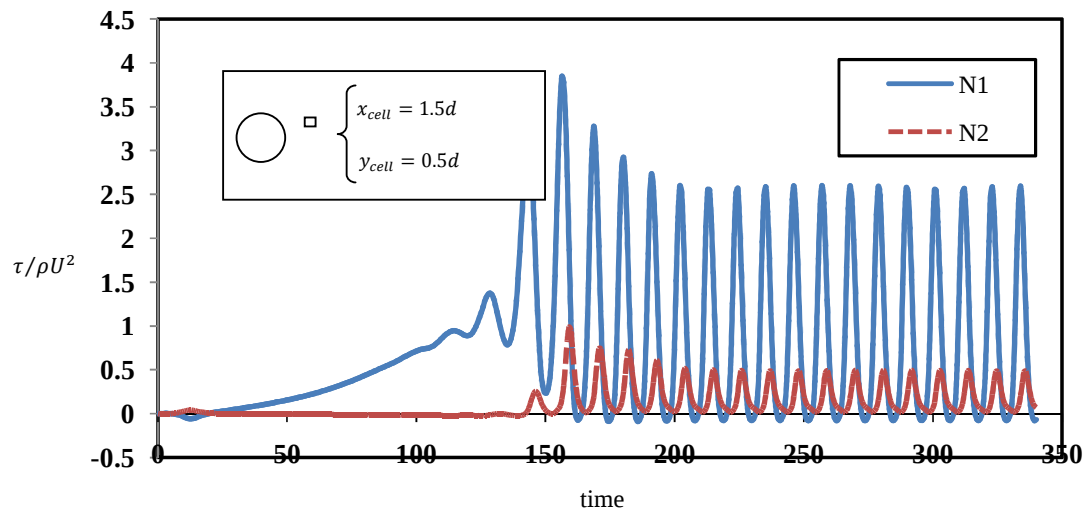
شکل ۵-۲۲ سرعت محوری در یک نقطه نسبت به زمان

شایان ذکر می‌باشد که زمان شروع در شکل ۵-۲۲ در یکی از لحظاتی که جریان نوسانی در آن به حالت پایدار رسیده، انتخاب شده است. محور عمودی نیز در این نمودار با استفاده از سرعت ورودی جریان به صورت بی‌بعد در آمده است. مشاهده می‌شود که دامنه و فرکانس جریان در سیال ویسکوالاستیک نسبت به سیال نیوتنی کمتر می‌باشد. همچنین کاهش دامنه نسبت به فرکانس با شدت بیشتری رخ می‌دهد. لازم به ذکر می‌باشد که مقدار فرکانس محاسبه شده برای جریان سیال نیوتنی $St = 0.1646$ و برای جریان سیال ویسکوالاستیک برابر $St = 0.1578$

اندازه‌گیری شده است. وجود خاصیت الاستیک در سیال ویسکوالاستیک سبب بوجود آمدن اختلاف تنش‌های نرمال می‌شود. تاثیر این موضوع را می‌توان روی توزیع فشار حول سیلندر جستجو نمود. در واقع وجود اختلاف تنش‌های نرمال سبب می‌شود که فشار در قسمت جلوی سیلندر یا در نقطه سکون کاهش پیدا کرده و در قسمت پشت سیلندر با افزایش نسبی همراه باشد. به این ترتیب اختلاف فشار بین قسمت جلو و پشت سیلندر کم می‌شود. این کاهش سبب بزرگ‌تر شدن ناحیه جریان برگشتی ایجاد شده در پشت سیلندر می‌گردد.

همچنین اختلاف تنش‌های نرمال بوجود آمده در ناحیه ویک جریان سیال ویسکوالاستیک در راستای خط مرکزی و در یک سلول در ناحیه پایین دست جریان در شکل ۵-۲۳ آورده شده است. در این شکل، N1 بیانگر اختلاف تنش نرمال اول و N2 معرف اختلاف تنش نرمال دوم می‌باشد. نمودار الف شکل ۵-۲۳، تغییرات اختلاف تنش‌های نرمال در خط تقارن هندسه در لحظه‌ای دلخواه و پس از بوجود آمدن جریان نوسانی در آن را نشان می‌دهد و نمودار ب همین شکل، مبین اختلاف تنش‌های نرمال در یک سلول در ناحیه ویک جریان نسبت به زمان است. لازم به ذکر است که مقادیر زمانی و مکانی و همچنین تنش، به صورت بی بعد وارد گردیده است.





(ب)

شکل ۵-۲۳ تغییرات اختلاف تنش‌های نرمال (الف) در امتداد محور تقارن، (ب) در یک نقطه نسبت به زمان

از نمودارهای شکل ۵-۲۳ می‌توان دریافت که اثرات اختلاف تنش نرمال اول بر جریان و همچنین دامنه تغییرات آن، به مراتب بیشتر از اختلاف تنش نرمال دوم می‌باشد. ضمن اینکه همانطور که مشاهده می‌شود این دو، اثری متضاد بر جریان دارند. به طوری که در ناحیه ای که اختلاف تنش نرمال اول، مقدار ماکزیمم خود را داراست، اختلاف تنش نرمال دوم، در کمترین مقدار خود می‌باشد.

۵-۴-۳- اثر پارامترهای مختلف بر جریان

در این قسمت به بررسی اثرات پارامترهای مختلف عدد رینولدز و عدد وایزنبرگ بر جریان پرداخته شده است. در انتها با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها و اعمال تغییر در ضریب تحرک مدل گزیکس، اثرات آن بر مشخصه‌های جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۴-۳-۱- بررسی اثر خاصیت الاستیک بر مشخصه‌های جریان در قالب عدد وایزنبرگ

در جدول (۵-۵) خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در اثر افزایش خاصیت الاستیک سیال ویسکوالاستیک در قالب عدد بی بعد وایزنبرگ آورده شده است. با افزایش عدد وایزنبرگ از صفر تا ۸۰ در $Re = 100$ و $\alpha = 0.5$ ، مشاهده می‌شود که دوره تناوب نوسانات جریان، افزایش می‌یابد. این در حالی است که فرکانس جریان نیز در قالب عدد استروهل با همان نسبت کاهش می‌یابد.

جدول (۵-۵) اثر افزایش خاصیت الاستیک بر مشخصه‌های جریان

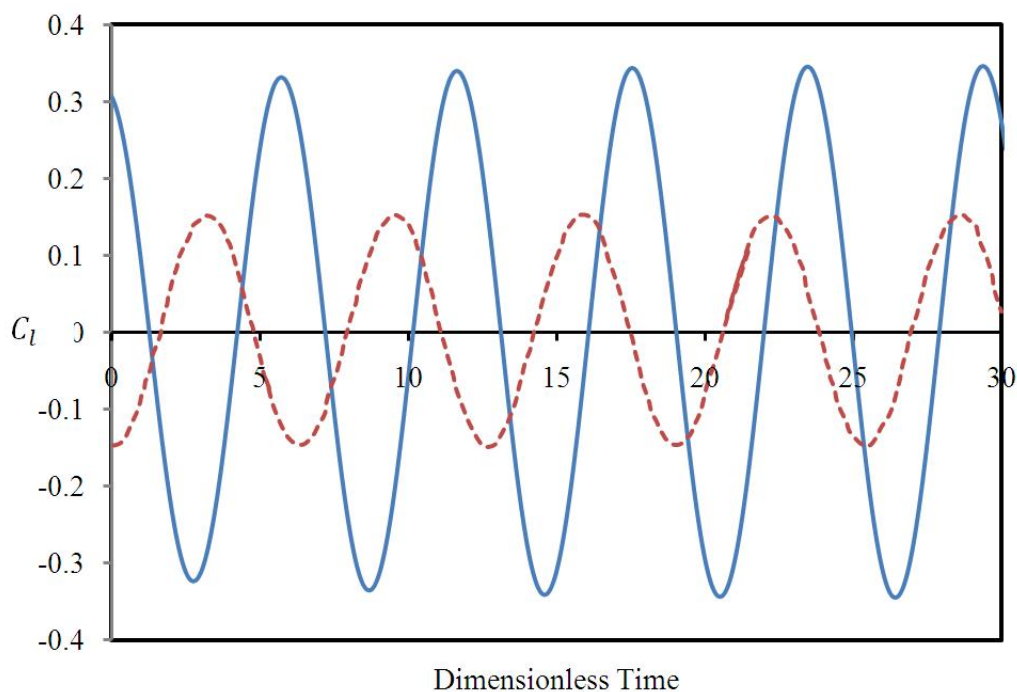
We	St	ΔC_L	$\bar{C}_d$	$C_{d \max}$	$C_{d \min}$
0	0.1646	0.3425	1.3701	1.3800	1.3603
5	0.1567	0.1878	1.3235	1.3266	1.3204
10	0.1554	0.1669	1.3098	1.3121	1.3074
20	0.1551	0.1565	1.3022	1.3041	1.3002
40	0.1552	0.1521	1.2983	1.3001	1.2965
60	0.1553	0.1507	1.2970	1.2957	1.2952
80	0.1554	0.1500	1.2962	1.2979	1.2945

با توجه به جدول (۵-۵) مشاهده می‌شود که برای مقادیر وایزنبرگ بالاتر از ۲۰ تغییرات ایجاد شده در عدد استروهل و ضرایب لیفت و درگ محسوس نمی‌باشد. علت ثابت ماندن عدد استروهل از یک عدد وایزنبرگ مشخص به بعد را می‌توان به زمان آسودگی از تنش سیال ویسکوالاستیک ربط داد. بدین صورت که زمان ایجاد یک تناوب، بعد از وایزنبرگ ۲۰، از زمان

آسودگی از تنش سیال ویسکوالاستیک کمتر می‌باشد. لذا انتظار نمی‌رود تغییری در فرکانس جریان بوجود آید. در واقع هنگامی که زمان آسودگی از تنش، λ ، از زمان دوره تناوب بیشتر باشد، می‌توان گفت که عملاً تغییری در فرکانس جریان در اثر افزایش خاصیت الاستیک رخ نخواهد داد.

در شکل ۵-۲۴ تغییرات ضریب لیفت نسبت به زمان برای سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در

$We = 80$ و $Re = 100$ و $\alpha = 0.5$ آورده شده است.



شکل ۵-۲۴ تغییرات ضریب لیفت برای دو حالت جریان نیوتنی (خط پر) و ویسکوالاستیک (خط چین) در $Re=100$ و $We=80$.

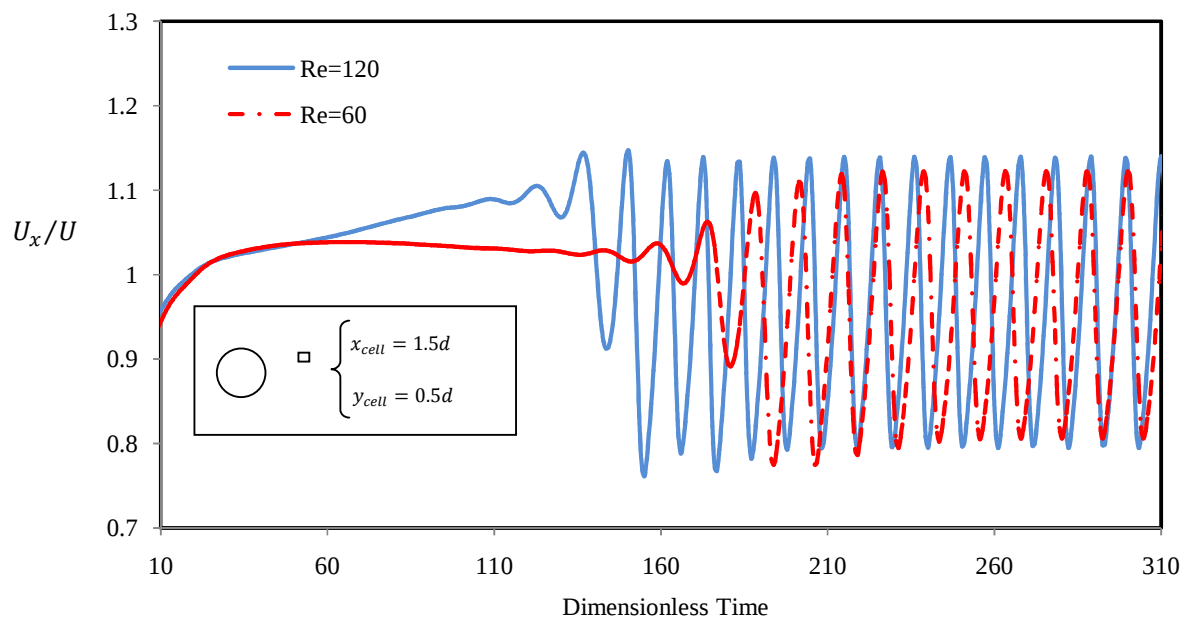
لازم به ذکر است که در این نمودار، زمان شروع از لحظه‌ای انتخاب شده است که رژیم جریان به حالت کاملاً توسعه یافته از جریان تناوبی رسیده باشد. هر دو نمودار رفتار کاملاً سینوسی جریان را نشان می‌دهند که دامنه و دوره تناوب در آن ثابت باقی می‌ماند. با اندازه‌گیری دامنه نوسانات و فرکانس هر دو جریان، مشاهده می‌شود که شدت کاهش دامنه در قیاس با فرکانس جریان با نرخ

بیشتری رخ می‌دهد. در واقع کاهش مقدار ماکزیمم و مینیمم ضرایب لیفت و درگ در مقابل افزایش خاصیت الاستیک جریان در مقایسه با فرکانس مشهودتر می‌باشد.

۵-۴-۳-۲- بررسی اثر رینولدز بر مشخصه‌های جریان

در این قسمت به بررسی اثر عدد رینولدز بر مشخصه‌های جریان از قبیل عدد استروهل و ضرایب لیفت و درگ پرداخته شده است. در شکل ۵-۲۵ تغییرات سرعت محوری یک سلول در ناحیه ویک جریان سیال ویسکوالاستیک برای دو عدد رینولدز $Re=60$ و $Re=120$ آورده شده است. همانطور که انتظار می‌رود شروع نوسانات در جریان با افزایش عدد رینولدز زودتر رخ داده و دامنه نوسانات نیز با ازدیاد عدد رینولدز بیشتر شده است. همچنین نتایج حاصل از افزایش عدد رینولدز در محدوده بین ۵۰ تا ۱۲۰ بر مشخصه‌های هر دو جریان نیوتنی و ویسکوالاستیک ($We=80, \alpha=0.5$) در جدول (۵-۵) آورده شده و اثرات آن برای هر دو جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

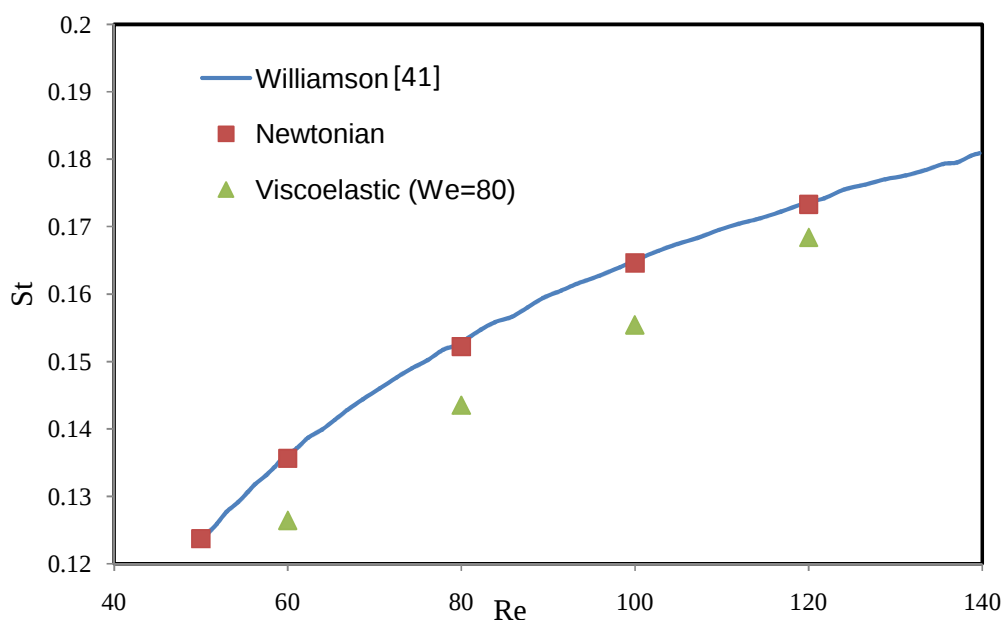
شایان ذکر است که نتایج حاصل از افزایش عدد رینولدز در جریان سیال نیوتنی با تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط ویلیامسون [۴۱] مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۵-۲۶ مقادیر عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز برای هر دو جریان سیال ویسکوالاستیک و نیوتنی آورده شده است. تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی در این نمودار مشاهده می‌شود. این مقایسه بر روش عددی به کار گرفته شده در این پژوهش صحت می‌گذارد.



شکل ۵-۲ تغییرات سرعت محوری یک سلول در ناحیه ویک جریان سیال ویسکوالاستیک

جدول (۵-۶) تاثیر از یاد عدد رینولدز بر مشخصه های جران سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک

Re	St	ΔC_L	$C_{d \max}$	$C_{d \min}$	$\bar{C}_d$
Newtonian					
50	0.1237	0.0602	1.4764	1.4761	1.4762
60	0.1356	0.1360	1.4403	1.4382	1.4392
80	0.1435	0.2516	1.3998	1.3905	1.3952
100	0.1646	0.3425	1.38	1.3603	1.3896
120	0.1733	0.4256	1.3741	1.3415	1.3578
Viscoelastic (We=80, $\alpha=0.5$)					
50	0	0	1.4783	1.4783	1.4783
60	0.1264	0.0252	1.4010	1.4010	1.4010
80	0.1435	0.0901	1.3328	1.3317	1.3322
100	0.1554	0.1500	1.2979	1.2945	1.2962
120	0.1684	0.2106	1.2833	1.2756	1.2794



شکل ۵-۲۶ مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از تحقیقات پیشین

همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر بدست آمده فرکانس جریان سیال ویسکوالاستیک به دلیل وجود خاصیت الاستیک سیال، کمتر از جریان سیال نیوتنی در همان عدد رینولدز می‌باشد. لازم به ذکر است که هیچگونه اطلاعات آزمایشگاهی و یا عددی برای مقایسه نتایج جریان سیال ویسکوالاستیک وجود ندارد

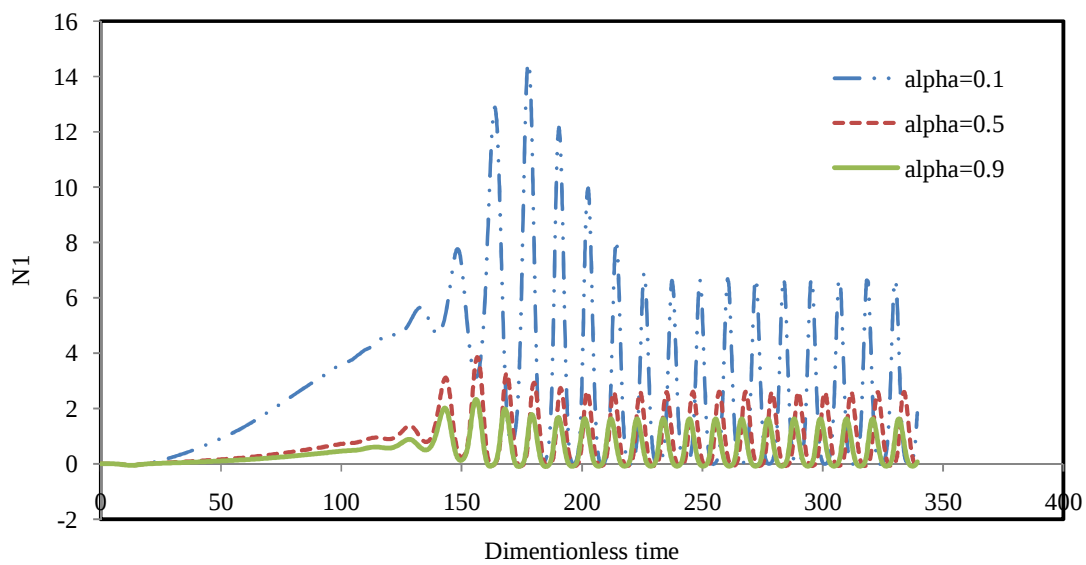
با مقایسه نتایج جریان سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در هر یک از اعداد رینولدز انتخابی، مشاهده می‌شود که نه تنها فرکانس جریان تحت تاثیر خاصیت الاستیک جریان کاهش می‌یابد، بلکه دامنه ضرایب لیفت و درگ نیز به شدت تحت تاثیر این پارامتر از سیال ویسکوالاستیک قرار می‌گیرد. به نحوی که در عدد رینولدز ۱۲۰، مقدار ضریب لیفت برای جریان ویسکوالاستیک تقریباً به نصف مقدار خود در جریان سیال نیوتنی می‌رسد.

۵-۴-۳- بررسی پارامتر ضریب تحرک بر فرکانس و پایداری جریان

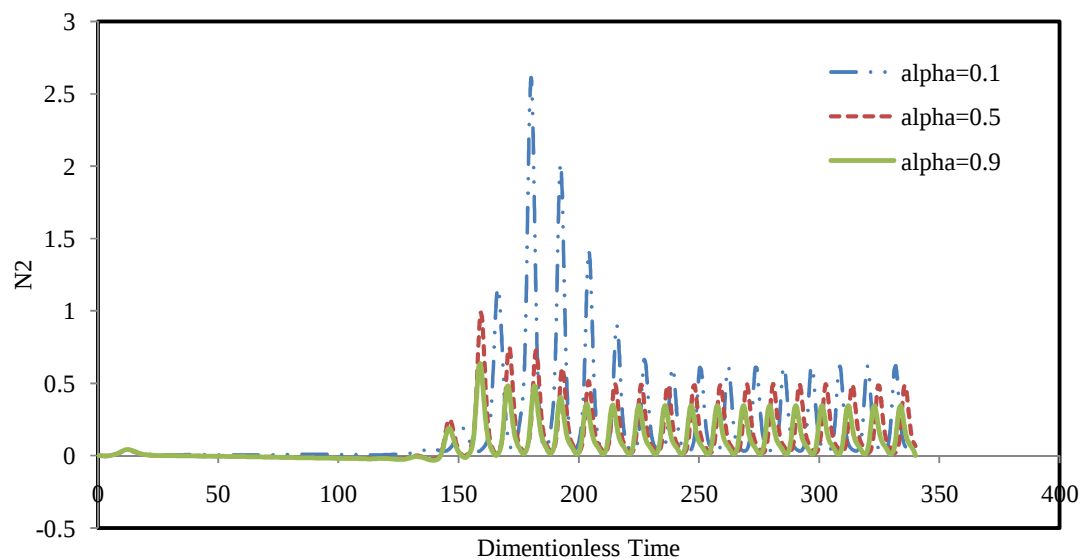
به طور کلی، جریان برشی در مواد ویسکوالاستیک، آرایش و موقعیت مولکول‌ها را تحت تاثیر قرار داده و کشیدگی و همراستا شدن مولکول‌های طویل پلیمری در راستای خطوط جریان را در پی دارد که این امر سبب بروز خواص غیر ایزوتروپیک در سیال می‌شود. لذا جهت حفظ این انحراف، میدان تنش نیز تحت تاثیر قرار گرفته و اختلاف تنش‌های نرمال پدید می‌آید.

از آنجایی که ضریب پویایی یا تحرک در مدل گزیکس رفتار غیر ایزوتروپیک برونی در هیدرودینامیک مولکولی ماده ویسکوالاستیک را لحاظ می‌کند، لذا در این قسمت از تحقیق به بررسی اثرات این ویژگی از سیالات ویسکوالاستیک بر مشخصه‌های جریان پرداخته می‌شود. برای این منظور با استفاده از نمونه پایه در نظر گرفته شده برای جریان سیال ویسکوالاستیک ($Re=100$ و $We=80$)، مقدار ضریب تحرک که در مدل گزیکس در محدوده بین صفر و یک تعریف می‌شود، افزایش داده شده و تاثیر آن بر روی فرکانس و پایداری جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

ابتدا اثرات ازدیاد این ضریب بر روی اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۵-۲۷ تغییرات اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم نسبت به زمان در یک سلول در ناحیه ویک جریان سیال ویسکوالاستیک آورده شده است.



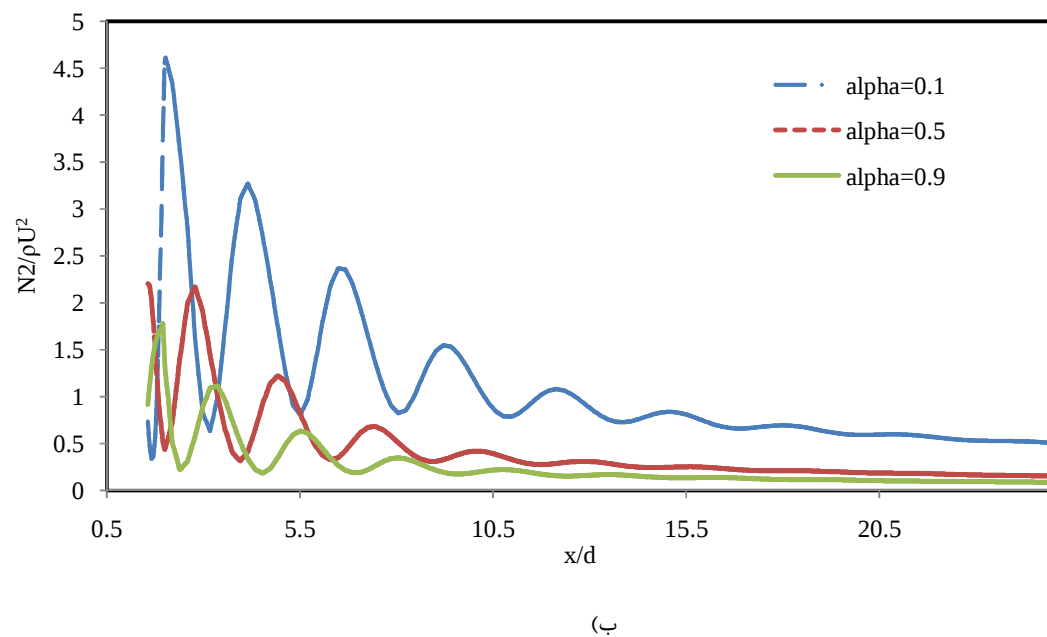
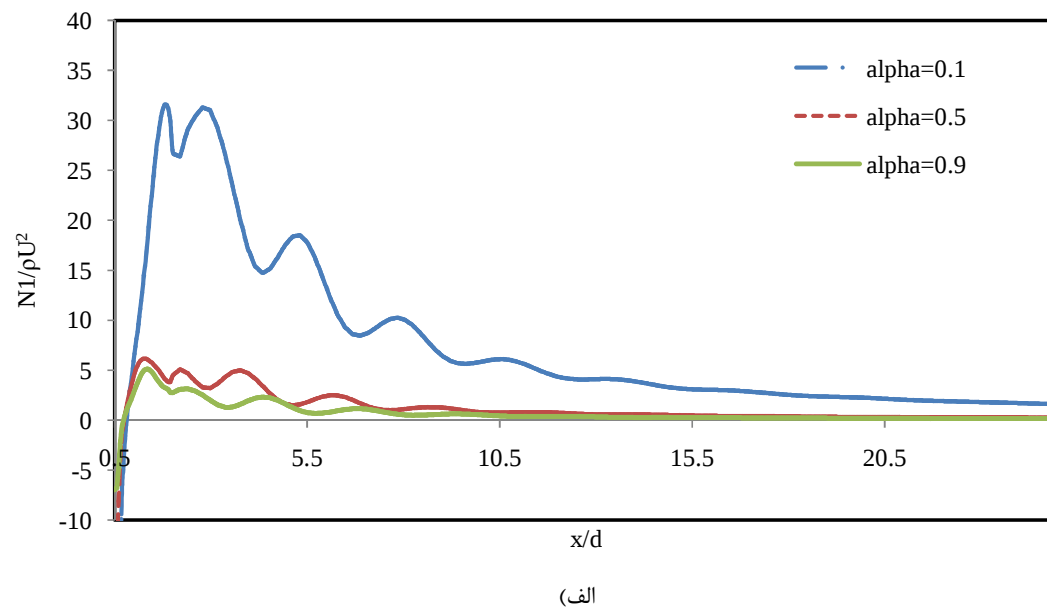
(الف)



(ب)

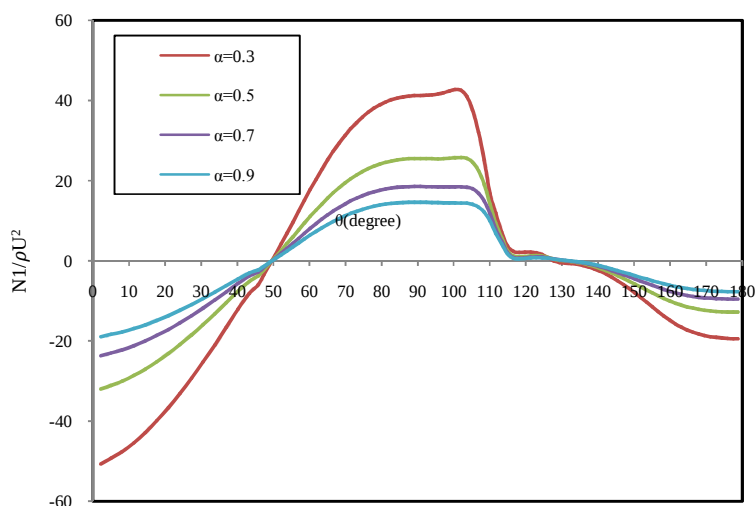
شکل ۵-۲۷ تاثیر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر تغییرات اختلاف تنش های نرمال در یک سلول در ناحیه ویک جریان نسبت به زمان

مشاهده می‌شود که ازدیاد ضریب تحرک در مدل گزیکس سبب کاهش اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم شده است. همچنین در شکل ۵-۲۸ نیز تغییرات اختلاف تنش‌های نرمال در خط مرکزی از سیلندر تا مرز خروجی آورده شده است.

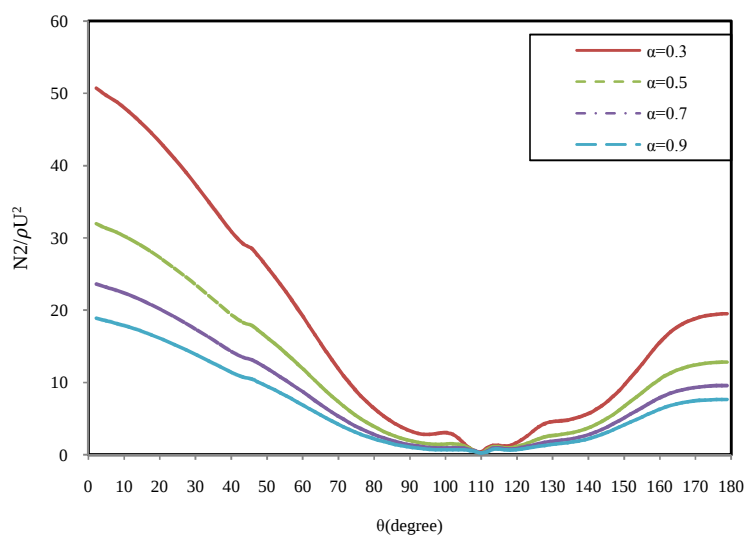


شکل ۵-۲۸ تاثیر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر تغییرات اختلاف تنش‌های نرمال در خط مرکزی از سیلندر تا مرز خروجی

در نمودارهای این شکل نیز مشاهده می‌گردد که ازدیاد این پارامتر سبب کاهش مقدار اختلاف تنش‌های نرمال می‌شود. در شکل ۵-۲۹ تغییرات اختلاف تنش‌های نرمال بر روی سطح سیلندر با افزایش ضریب تحرک در مدل گزیکس آورده شده است.



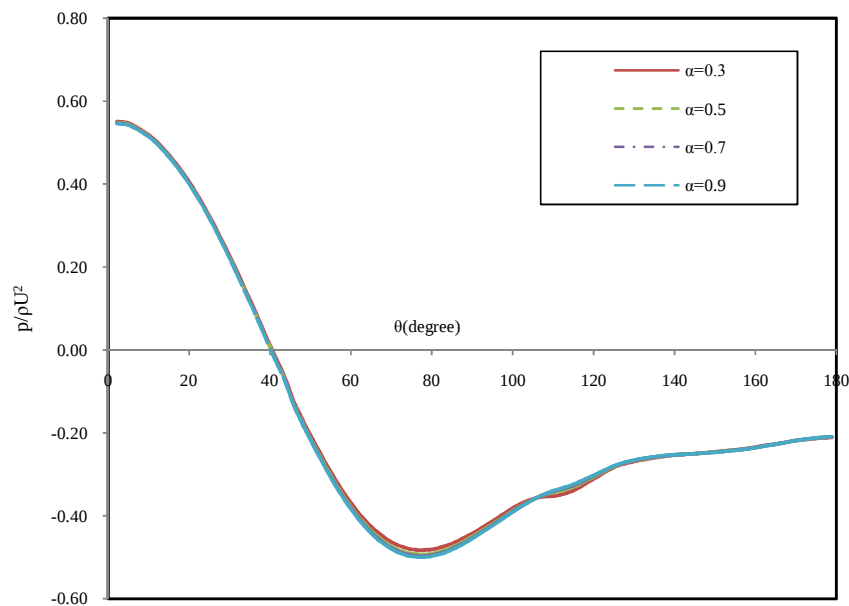
الف)



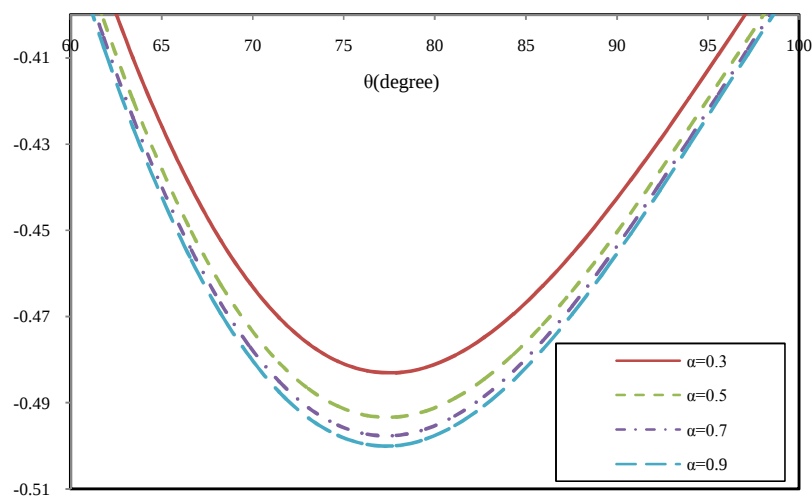
ب)

شکل ۵-۲۹ تاثیر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر تغییرات اختلاف تنش‌های نرمال و تنش برشی بر روی سطح سیلندر

بنابراین با افزایش ضریب تحرک اختلاف تنش های نرمال کاهش می یابد. کاهش در اختلاف تنش نرمال توزیع فشار حول سیلندر را تحت تاثیر قرار می دهد. برای این منظور در شکل ۵-۳۰ نمودار توزیع فشار برای برای مقادیر مختلف ضریب تحرک آورده شده است.



(الف)



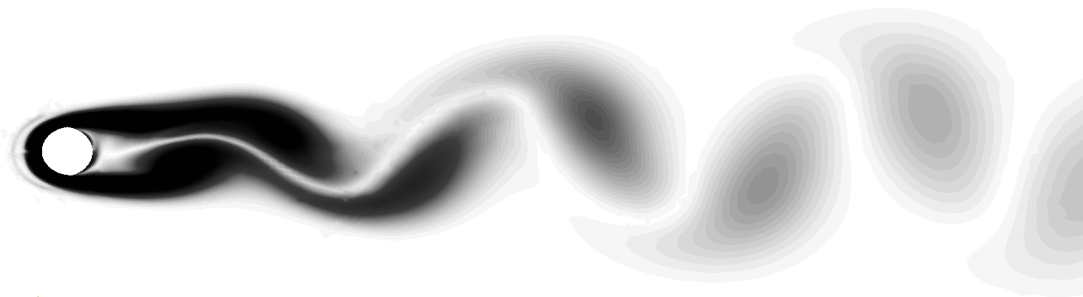
(ب)

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

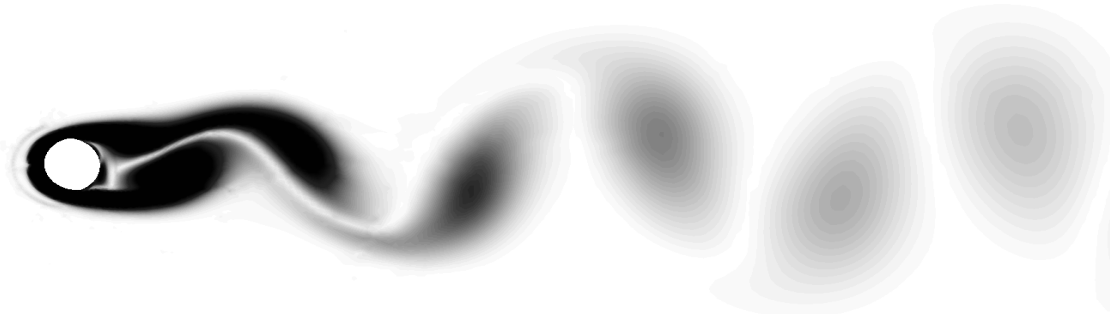
مشاهده می شود که توزیع فشار حول سیلندر با افزایش بیشتری در پشت سیلندر همراه است. این موضوع سبب می گردد تا طول ناحیه جریان برگشتی ایجاد شده کاهش یابد. در شکل ۳۱-۵ توزیع میدان ورتیسیته برای دو مقدار کم و زیاد ضریب تحرک $\alpha=0.1, 0.9$ آورده شده است.

Vorticity ($\omega/(U/D)$)

$\alpha=0.1$, min:-44.61; max: 45.91

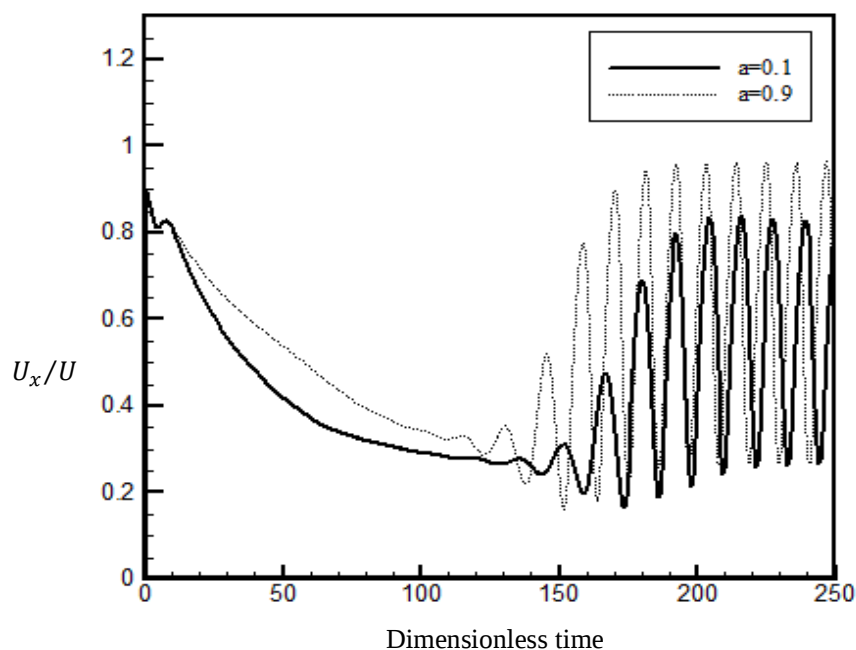


$\alpha=0.9$, min:-47.38; max:47.14



شکل ۳۱-۵ توزیع میدان ورتیسیته برای مقادیر ضریب تحرک $\alpha=0.1$ و $\alpha=0.9$

همچنین نمودار سرعت محوری یک سلول در ناحیه ویک جریان در ضریب تحرک $\alpha=0.1, 0.9$ آورده شده است.



شکل ۵-۳۲ تاثیر ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک بر تغییرات سرعت محوری یک سلول در ناحیه ویک

مشاهده می‌شود که با ازدیاد این پارامتر در مدل گزیکس، فرکانس جریان زیاد می‌گردد. علاوه بر آن افزایشی محسوس در دامنه نوسانات رخ می‌دهد. از دیگر موارد می‌توان به زمان ایجاد نوسان در جریان اشاره نمود. در واقع با افزایش این پارامتر در مدل رئولوژیکی گزیکس، مشاهده می‌شود که نوسانات در جریان زودتر بوجود می‌آید.

فصل ۶:

نتیجه‌گیری

۶-۱- مقدمه

در این بخش، نتایج حاصل از تحقیق اخیر برای جریان سیال ویسکوالاستیک عبوری از سیلندر دایروی ارائه می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، مطالعه جریان بر روی سیلندر، از جمله مسائل کلاسیک و پایه در دینامیک سیالات محسوب می‌شود که دارای کاربردهای متنوعی در صنایع گوناگون می‌باشد. تاکنون تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بیشماری در خصوص این جریان صورت گرفته که عمده این تحقیقات در مورد 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.

به منظور مدل‌سازی این نوع جریان، از نرم افزار منبع باز OpenFOAM که یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌باشد، استفاده شده است. این نرم افزار از شیوه عددی حجم محدود (FVM) برای حل معادلات استفاده می‌کند. در این جا 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 شبیه سازی عددی، صحت نتایج حاصل از حل عددی ارزیابی گردید و استقلال پاسخ‌های عددی از شبکه تحقیق شد. اثر پارمترهای عدد رینولدز، عدد وایزنبرگ و همچنین ضریب تحرک در مدل گزیکس بر الگوی گردابه‌های فون کارمن مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد 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 سبب افزایش ناپایداری در جریان

شده و رینولدز بحرانی را کاهش می‌دهد. از دیگر نوآوری‌های تحقیق حاضر، بررسی رفتار غیرایزوتروپیک برونین در هیدرودینامیک مولکولی ماده ویسکوالاستیک در قالب ضریب تحرک مدل گزیکس بر فرکانس گردابه‌های فون کارمن می‌باشد.

از جمله دستاوردهای مهم این پژوهش به طور خلاصه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود :

- در یک عدد رینولدز ثابت، با افزایش خاصیت الاستیک جریان، طول دنباله ایجاد شده در پشت سیلندر تا قبل از رسیدن به رینولدز بحرانی، افزایش می‌یابد. به عبارتی خاصیت الاستیک سیال سبب تضعیف تانسور تنش می‌شود و بر پایداری جریان می‌افزاید.
- خاصیت الاستیک جریان، باعث کاهش فرکانس و دامنه نوسانات جریان می‌شود. لازم به ذکر است که کاهش دامنه نوسانات نسبت به فرکانس جریان، محسوس‌تر می‌باشد.
- در ناحیه جدایش جریان و پس از عبور از رینولدز بحرانی، اختلاف تنش‌های نرمال اثرات متضادی نسبت به هم بر جریان اعمال می‌کنند. بدان معنا که در ناحیه‌ای از جریان که اختلاف تنش نرمال اول در آن مقدار حداکثر خود را دارا می‌باشد، اختلاف تنش نرمال دوم، در کمترین مقدار خود قرار دارد.
- خاصیت الاستیک سیال ویسکوالاستیک سبب افزایش نسبی فشار در ناحیه پشت سیلندر شده که نتیجه آن، وقوع پدیده کاهش درگ در این گونه از سیالات می‌باشد.
- مطابق انتظار، شروع نوسانات در هر دو جریان نیوتنی و ویسکوالاستیک با افزایش عدد رینولدز زودتر رخ داده و دامنه نوسانات نیز با ازدیاد عدد رینولدز بیشتر شده است. رشد فرکانس جریان نسبت به عدد رینولدز در جریان سیال ویسکوالاستیک نسبت به جریان نیوتنی با نرخ کمتری همراه است. این موضوع به دلیل وجود خاصیت الاستیک سیال ویسکوالاستیک می‌باشد. همچنین با مقایسه نتایج جریان سیال نیوتنی و ویسکوالاستیک در هر یک از اعداد رینولدز انتخابی، مشاهده می‌شود که نه تنها فرکانس جریان تحت

تأثیر خاصیت الاستیک جریان کاهش می‌یابد، بلکه دامنه ضرایب لیفت و درگ نیز به شدت تحت تأثیر این پارامتر از سیال ویسکوالاستیک قرار می‌گیرد. به نحوی که در عدد رینولدز ۱۲۰، مقدار ضریب لیفت برای جریان ویسکوالاستیک تقریباً به نصف مقدار خود در جریان سیال نیوتنی می‌رسد.

- با افزایش ضریب تحرک در مدل گزیکس، مقدار اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم کاهش می‌یابد. در نتیجه آن طول ناحیه جریان برگشتی کاهش یافته و فرکانس جریان افزایش می‌یابد

۶-۲- پیشنهادات

موارد زیر جهت ادامه تحقیقات در زمینه جریان سیال ویسکوالاستیک در عبور از روی سیلندر دایروی ایستا پیشنهاد می‌گردد:

- استفاده از مدل‌های رئولوژیکی دیگر نظیر فان-تین (PTT) و مقایسه نتایج حاصل با مدل رئولوژیکی به کار گرفته شده در این پژوهش.
- بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک در اعداد رینولدز بالاتر و مقایسه جریان سه بعدی ایجاد شده در ناحیه پایین دست جریان با جریان سیال نیوتنی
- بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر مربعی و مقایسه آن با جریان نیوتنی
- بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک در عبور از روی سیلندر دایروی چرخان.
- بررسی توانان انتقال حرارت و جریان سیال ویسکوالاستیک در عبور از سیلندر دایروی.

پیوست‌ها

پیوست الف

مقدمه ای بر سیالات ویسکوالاستیک

الف - مقدمه

در این قسمت مروری اجمالی بر مکانیک سیالات غیرنیوتنی و بویژه سیالات ویسکوالاستیک صورت می‌گیرد. در اینجا ضمن طبقه بندی سیالات غیر نیوتنی، در مورد برخی رفتارهای خاص این سیالات (بعضاً متضاد نسبت به سیالات نیوتنی) بحث می‌شود. در ادامه منشا رفتار ویسکوالاستیک در مواد پلیمری بررسی شده و آزمایشات مرسوم جهت تعیین خواص این مواد معرفی می‌گردد. در پایان بحث مفصلی بر روی معادلات ساختاری مواد ویسکوالاستیک انجام می‌شود [۹].

الف - ۱ - طبقه بندی سیالات ویسکوالاستیک

سیال نیوتنی، ماده ای است که در آن تنش برشی بدون وجود تنش تسلیم (صفر بودن تنش برشی در نرخ برش صفر) تنها تابعی خطی از نرخ برش است. بر این اساس سیال غیرنیوتنی را می‌توان به سادگی بصورت سیالی که فاقد رفتار نیوتنی است، تعریف نمود. به طور کلی سیالات غیر نیوتنی به خانواده های متعددی دسته بندی می‌شوند. این خانواده ها عبارتند از :

۱. سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان

۲. سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان

۳. سیالات ویسکوالاستیک

در ادامه هر یک از این خانواده ها معرفی شده و در مورد خواص این سیالات بحث می‌شود.

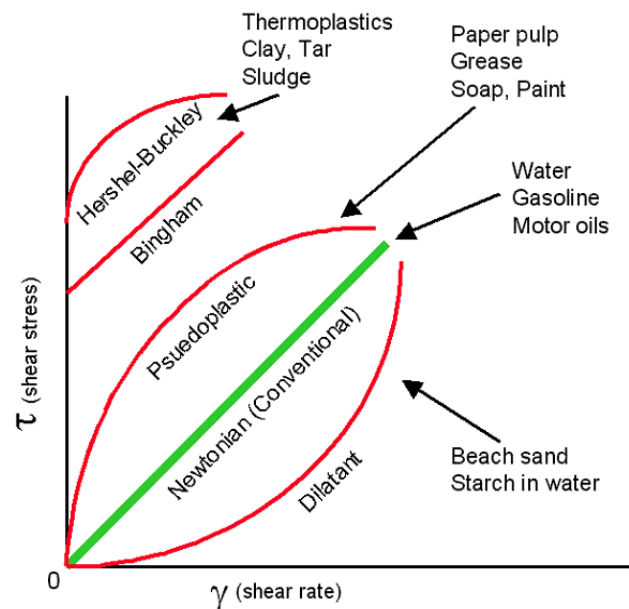
الف - ۱-۱ - سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان

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 (الف-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. معروف ترین این دسته از مواد، پلاستیک بینگهام است. در واقع پلاستیک بینگهام یک سیال نیوتنی دارای تنش تسلیم است (ویسکوزیته آن ثابت است). نمونه هایی از سیالات دارای تنش تسلیم عبارتند از: برخی پلاستیکهای مذاب، گل حفاری چاه نفت، مخلوط آب و شن، دوغ آبهای گچ و ماسه، شکلات مایع، کرم های طبی، خمیر دندان، بتن تازه، مارگارین و گریسها. سیالاتی که فاقد تنش تسلیم هستند، به دو دسته سیالات شبه پلاستیک^۱ و سیالات دایلاتنت^۲ تقسیم می‌شوند. این سیالات بصورت سیالات نیوتنی تعمیم یافته^۳ نیز نامیده می‌شوند.

^۱ Pseudoplastic

^۲ Dilatant

^۳ Generalized Newtonian fluids



شکل ۶-۱: شکل الف-۱: منحنی های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات مستقل از زمان [۴۲]

تاکنون مدل‌های متعددی به عنوان قانون پایه برای این مواد ارائه شده است، اما پرکاربردترین و ساده ترین مدل حاکم بر آنها مدل توانی است که در آن تنش برشی تابعی از توان n ام نرخ برش است. یکی از اشکالات این مدل، پیش بینی ویسکوزیته صفر در نرخ برش بی نهایت برای سیالات شبه پلاستیک است. از جمله مدل هایی که این مشکل مدل پاورلو را بر طرف می نمایند می توان به مدل کراس، مدل کاریو-یاسودا و راینر-فیلیپوف^۱ اشاره نمود. شایان ذکر است که با ازدیاد ثابت های این مدل ها رفتار وابستگی تنش به نرخ برش بهتر مدل می شود. در سیالات شبه پلاستیک، ویسکوزیته در نرخهای برش کوچک و بسیار زیاد تقریباً خطی است. شیب منحنی تنش در برابر نرخ کرنش در شدتهای برش زیاد، به ویسکوزیته در برش بینهایت (η_{∞}) و در شدتهای برش کم به ویسکوزیته در برش صفر (η_0) موسوم است. در این مواد، نرخ افزایش تنش در برابر شدت برش، مقداری منفی است (ویسکوزیته تابعی نزولی از شدت برش است). به عبارت دیگر چنانچه از مدل توانی به عنوان قانون پایه برای مواد شبه پلاستیک استفاده شود، در این صورت n مقداری کوچکتر از یک خواهد بود.

¹ Reiner-Philippoff

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 سیالات دایلاتنت با افزایش شدت برش، ویسکوزیته سیال افزایش می‌یابد و چنانچه از مدل توانی به عنوان قانون پایه برای آنها استفاده شود، در این صورت n مقداری بزرگتر از یک خواهد بود. در بین مواد زیر رفتار سیال دایلاتنت مشاهده شده است: برخی سوسپانسیونهای آبی اکسید تیتانیوم، برخی محلولهای پودر ذرت - شکر، برخی محلولهای بوراکس - صمغ عربی، نشاسته، سیلیکات پتاسیوم، شن مرطوب ساحل و بعضی رنگها.

الف - ۱-۲ - سیالات غیر نیوتنی تابع زمان

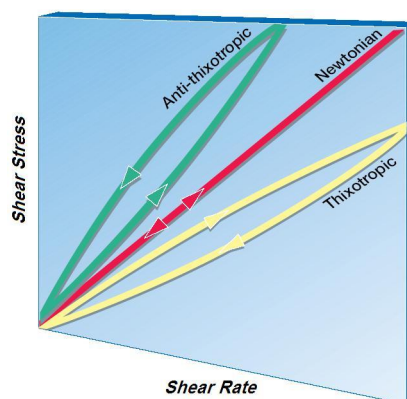
در بعضی از سیالات غیر نیوتنی، علاوه بر اینکه ویسکوزیته تابعی از شدت برش است، تابعی از زمان نیز می‌باشد. به عبارت دیگر در این سیالات، در حین یک نرخ برش ثابت، ساختمان مولکولی ماده بطور مداوم در حال تغییر است و لذا مقدار ویسکوزیته و تنش برشی نیز تابعی از زمان خواهد بود. بطور کلی این مواد به دو دسته سیالات تیکسوتروپیک^۱ و سیالات رئوپکتیک^۲ (آنتی تیکسوتروپیک^۳) تقسیم می‌شوند. در سیالات تیکسوتروپیک، چنانچه ماده در معرض یک شدت برش ثابت و دمای معین قرار داده شود، تنش برشی یک کاهش برگشت پذیر نسبت به زمان پیدا 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، بتدریج 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

¹ Thixotropic

² Rheoplectic

³ Antithixotropic

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 ترمیم بوجود 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 تشکیل یک ساختار را پیدا می‌کنند. بنابراین تحت برش ثابت و در شرایط ایزوترمال، یک افزایش برگشت پذیر در تنش برشی و ویسکوزیته آنها مشاهده می‌شود. در بعضی سیالات نظیر سوسپانسیونهای رسی بنتونیت، سوسپانسیونهای وانادیوم پنتا اکسید، خمیر گچ و سوسپانسیونهای رقیق اولئات آمونیوم رفتار رئوپکتیک مشاهده شده است. در شکل الف-۲ منحنی تنش در برابر نرخ برش برای مواد رئوپکتیک و تیکسوتروپیک نشان داده شده است.



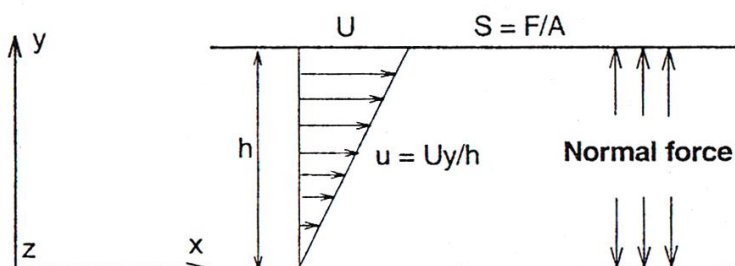
شکل ۶-۲: منحنی های تنش برشی در برابر نرخ برش برای سیالات غیر نیوتنی تابع از زمان [۳]

الف - ۱-۳- سیالات ویسکوالاستیک

الف- ۱-۳- معرفی سیالات ویسکوالاستیک

سیالات ویسکوالاستیک موادی هستند که به طور توانمان خواص ویسکوز و الاستیک را دارا می‌باشند. از آنجا که در سیالات تنش تابعی از نرخ برش و در جامدات تابعی از خود برش است، لذا این مواد دارای خواص همزمان جامد و سیال هستند.

آزمایش معروفی که به بررسی رفتار جریان مواد ویسکوالاستیک می‌پردازد، آزمایش جریان کوئت (جریان برشی ساده) است. مطابق شکل الف-۳، چنانچه یک سیال ویسکوالاستیک بین دو صفحه تخت موازی قرار گیرد و صفحه بالایی با سرعت ثابت U حرکت نماید، یک جریان برشی ساده ایجاد می‌شود. اگر عمل برش دهی قطع و حرکت صفحه بالایی بطور ناگهانی متوقف شود، برخلاف سیالات نیوتنی که در آنها تنش بطور آنی صفر می‌شود، در مواد ویسکوالاستیک کاهش تنش برشی دارای بازه زمانی یا به عبارت دیگر دارای زمان آسودگی از تنش است.



شکل ۳-۶- الف-۳: طرح شماتیک جریان برشی ساده (جریان کوئت)

همچنین برای سیال ویسکوالاستیک، چنانچه در حین حرکت صفحه بالایی، تنش برشی بطور آنی قطع شود (نیروی روی صفحه قطع و صفحه به حال خود رها گردد)، صفحه بالایی تا حدی به عقب بر می‌گردد، در حالیکه در سایر سیالات توقف صفحه بالایی نیز آنی است. در واقع بازگشت صفحه بالایی ناشی از خاصیت الاستیک ماده است، اما این بازگشت نسبت به مواد

الاستیک (با خواص الاستیک یکسان) کندتر است که این موضوع ناشی از وجود مکانیزم ویسکوز در این مواد است. بر این اساس ادعا می‌شود که این مواد دارای یک حافظه^۱ جهت دار از تغییر شکل‌های خود بوده و از حالت قبلی خود آگاه هستند. 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 و برابر فشار استاتیکی است اما در جریان کوئت یک سیال ویسکوالاستیک اختلافی بین تنش‌های نرمال مشاهده می‌شود. 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 بروز خواص غیرایزوتروپیک در سیال می‌شود. لذا جهت حفظ این انحراف، میدان تنش نیز تحت تاثیر قرار گرفته و اختلاف تنش‌های نرمال پدید می‌آیند. چنانچه سیال تنها در یک جهت جریان داشته باشد و تغییرات سرعت تنها در یک جهت عمود بر جهت حرکت بوجود بیاید (مانند جریان کوئت)، در اینصورت طبق تعریف، جهت ۱ معرف جهت جریان اصلی، جهت ۲ معرف جهت تغییرات سرعت و جهت ۳ نیز معرف جهت راستگرد عمود بر جهات ۱ و ۲ است. در یک سیال ویسکوالاستیک اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22} \quad (\text{الف-۱})$$

$$N_2 = \sigma_{22} - \sigma_{33} \quad (\text{الف-۲})$$

بر این اساس ثابت‌های تنش‌های نرمال به شکل زیر قابل بیان هستند.

$$\Psi_1 = \frac{N_1}{\dot{\gamma}^2} \quad (\text{الف-۳})$$

¹ Memory

$$\Psi_2 = \frac{N_2}{\dot{\gamma}^2} \quad (\text{الف-۴})$$

که در روابط (الف-۳) و (الف-۴)، Ψ_1 و Ψ_2 ثابت های تنش نرمال اول و دوم و $\dot{\gamma}$ نرخ برش است. اختلاف تنشهای نرمال و ثابتهای تنش نرمال همگی توابعی زوج از نرخ برش هستند. در حالت جریان پایدار، ویسکوزیته برای یک سیال ویسکوالاستیک به شکل زیر قابل تعریف است.

$$\eta = \frac{\sigma_{12}}{\dot{\gamma}} \quad (\text{الف-۵})$$

علاوه بر ویسکوزیته، ثابت های اختلاف تنش های نرمال اول و دوم نیز از جمله خواص رئولوژیکی سیال ویسکوالاستیک محسوب می‌شوند. شایان ذکر است که تقریباً در تمامی مواد پلیمری رفتار ویسکوزیته و ثابت های اختلاف تنش های نرمال بصورت نازک شونده^۱ (شبه پلاستیک) است. تقریباً در همه مواد مقدار N_1 از N_2 بزرگتر است. همچنین N_1 مقداری مثبت و N_2 اغلب دارای مقداری منفی است. در بیشتر کاربردهای عملی، معمولاً مقدار N_2 اندازه گیری نمی‌شود و از نظر بزرگی مقدار آن ۱۰٪ مقدار N_1 در نظر گرفته می‌شود. به مانند ویسکوزیته، می‌توان توابعی را بر روی توزیع ثابت های اختلاف تنش های نرمال برازش نمود. برای این منظور می‌توان از توابعی نظیر مدل پاورلو، کراس، کاریو-یاسودا، اولدروید و ... استفاده کرد. وجود اختلاف تنشهای نرمال سبب بروز رفتارهای متفاوت و بعضاً متضاد سیالات ویسکوالاستیک نسبت به سایر سیالات می‌شود که در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود.

الف - ۲- برخی پارامترهای مهم در جریان سیالات ویسکوالاستیک

قبل از بیان معادلات پایه و ارائه مدل های حاکم بر رفتار سیالات ویسکوالاستیک لازم است که دو عدد بی بعد معروف مربوط به این سیالات معرفی شوند. این دو شامل عدد دבורا و عدد وایزنبرگ

¹ Shear thinning

هستند. چنانچه λ مقیاس زمان مشخصه ماده، T زمان مشخصه جریان، ω فرکانس مشخصه جریان و $\dot{\gamma}$ نرخ برش جریان باشد، در اینصورت :

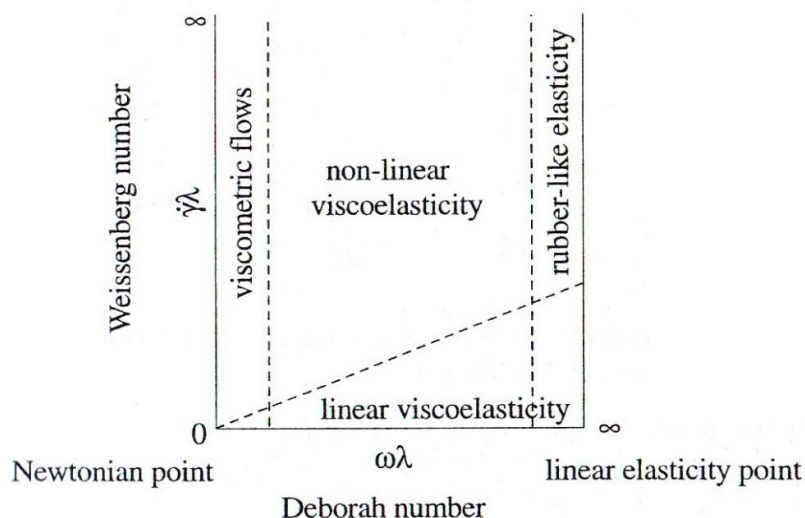
$$De = \lambda \omega \quad \text{OR} \quad \lambda / T \quad (\text{عدد دپورا}) \quad (\text{الف-۵})$$

$$Wi = \lambda \dot{\gamma} \quad (\text{عدد وایزنبرگ}) \quad (\text{الف-۶})$$

مقیاس زمان مشخصه برای یک ماده ویسکوالاستیک همان زمان آسودگی از تنش است. این زمان برای گازها و مایعات نیوتنی عددی بسیار کوچک (کوچکتر از 10^{-6} تا 10^{-4} ثانیه) و برای جامدات الاستیک عدد بزرگی (بزرگتر از 100 ثانیه) است [۳]. بنابراین زمان مشخصه برای یک سیال ویسکوالاستیک در حد وسط این محدوده می‌گنجد. عدد دپورا بصورت نسبت زمان آسودگی از تنش به زمان مشخصه تعریف می‌شود. بنابراین برای یک زمان مشخصه معین (یا نسبت مقیاس طولی به مقیاس سرعت معین)، عدد دپورا در گازها و مایعات نیوتنی عددی بسیار کوچک و در جامدات الاستیک عدد بسیار بزرگی است.

عدد وایزنبرگ بر اساس نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی حاصل از ویسکوزیته تعریف می‌شود. این عدد بر اساس روابط مختلفی تعریف شده که رابطه (الف-۶) متداول ترین 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 دپورا برای یک ماده مشخص مقدار کوچک داشته باشند، ماده شانس جریان یافتن را پیدا می‌کند و بالعکس. معمولاً از دیاگرام پیپکین^۱ برای مشخص نمودن وضعیت ویسکوالاستیک ماده استفاده می‌شود. در شکل الف-۱۴ این دیاگرام نشان داده شده است. مطابق شکل محور افقی بر حسب عدد دپورا و محور قائم بر حسب عدد وایزنبرگ است. این دیاگرام ابزار مناسبی جهت انتخاب یک قانون پایه برای یک ماده مشخص است.

¹ Pipkin's Diagram



شکل ۴-۶ شکل الف-۱۴: دیاگرام پیپکین [۴۳]

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 کوچک، 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 و با استفاده از دیاگرام پیپکین می توان معادله ساختاری مناسب را برای هر ماده ای تعیین نمود.

پیوست ب

معادلات ساختاری

ب- مقدمه

منظور از معادله ساختاری ، معادله ای است که قادر به بیان رابطه بین تنش و تغییر شکل یک ماده مشخص باشد. در این بخش مروری اجمالی بر معادلات ساختاری سیالات ویسکوالاستیک صورت می‌گیرد. بطور کلی برای مواد ویسکوالاستیک می‌توان بی نهایت معادله ساختاری در نظر گرفت! این معادلات می‌توانند به اشکال متنوعی رابطه ای بین بسط مشتقات/انتگرالهای تنش و نرخ برش را در بر بگیرند می‌توان معادلات ساختاری را به دو دسته معادلات خطی و غیر خطی نیز تقسیم نمود. در ادامه در مورد این معادلات بحث شده و تعدادی از معروف ترین این معادلات معرفی می‌گردد [۹].

ب-۱- تقسیم بندی معادلات ساختاری

ب-۱-۱- مدل های ویسکوالاستیک خطی

مدل های ویسکوالاستیک خطی بر پایه تلفیق خواص جامدات خطی و سیالات نیوتنی ارائه شده اند. به عبارتی این مدل ها از ترکیب های مختلف مجموعه ای از فنرها و دمپرهای خطی حاصل شده اند. لذا معادله ساختاری هر مدل ویسکوالاستیک خطی به شکل زیر قابل بیان است.

$$(1 + \lambda_1 \frac{\partial}{\partial t} + \lambda_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots + \lambda_n \frac{\partial^n}{\partial t^n}) \tau_{ij} = \eta_0 (1 + \xi_1 \frac{\partial}{\partial t} + \xi_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots + \xi_m \frac{\partial^m}{\partial t^m}) \gamma_{ij} \quad (\text{ب-۱})$$

در رابطه (ب-۱)، مقادیر λ_i و ξ_i بترتیب زمان آسودگی از تنش و زمان تاخیر سیال از مرتبه i بوده و η_0 ویسکوزیته در نرخ برش صفر، τ_{ij} تنش برشی و γ_{ij} نرخ برش است. همچنین مقادیر m و n بصورت $n=m$ یا $n=m+1$ با هم رابطه دارند. بنابراین با انتخاب اختیاری مقادیر m و n می‌توان مدل ویسکوالاستیک جدیدی را برای یک ماده تشکیل داد. وجود n زمان رهایی از تنش و m زمان تاخیر مبین وجود مولکول‌ها در اندازه‌ها و احیاناً انواع مختلف در سیال است که سبب ایجاد ثابت‌های زمانی متنوعی شده است. در اینجا ثابت‌های زمانی مرتبه پایین از ثابت‌های زمانی مرتبه بالا غالب‌تر هستند. همچنین به ازای $\lambda_i = \xi_i = 0$ مدل مشابه سیالات نیوتنی خواهد بود. مقدار نرخ برش (γ_{ij}) نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{ب-۲})$$

که در رابطه (ب-۲)، u سرعت و x جهت مختصات است. مدل‌های ویسکوالاستیک خطی برای شبیه‌سازی جریان محلول‌های رقیق پلیمری و سوسپانسیون‌های رقیق ذرات کروی جامد در سیالات نیوتنی بسیار مناسب هستند. اصولاً پاسخ این مدل‌ها برای تغییر شکل‌های کوچک با فیزیک جریان سازگار بوده اما پاسخ آن برای تغییر شکل‌های بزرگ پرخطا است. استفاده از این مدل‌ها در محاسبات مربوط به تجهیزات رئومتر و برای تغییر شکل‌های کوچک متداول است.

همچنین استفاده از این مدل‌ها برای تحلیل پدیده خزش در مکانیک جامدات بسیار کارساز بوده و به دلیل سادگی به عنوان یک پاسخ تقریبی برای بسیاری از مواد ویسکوالاستیک به کار می‌روند.

• مدل ماکسول

یکی از اولین و معروفترین مدل‌های ویسکوالاستیک خطی مدل ماکسول است. در این مدل قانون پایه بر اساس یک فنر و دمپر سری تعریف می‌شود. مدل ماکسول به شکل زیر قابل بیان است [۴۴]:

$$\tau_{ij} + \frac{\eta}{\mu} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} = \eta \gamma_{ij} \quad (\text{ب-۳})$$

در رابطه (ب-۳)، η ویسکوزیته و μ مدول صلبیت (مدول برشی) ماده است. مطابق مدل ماکسول ماده دارای زمان آسودگی از تنش و فاقد زمان رهایی از تغییر شکل است. به عبارت دیگر در این مدل با توقف برش دهی، نرخ تغییر شکل در سرتاسر ماده بطور آنی صفر خواهد شد. بنابراین مدل ماکسول برای تغییر شکل‌های کوچک محلولهای پلیمری رقیق (مواد ویسکوالاستیک دارای خواص ویسکوز و الاستیک تقریباً خطی) که دارای زمان رهایی از تغییر شکل کوچک هستند، مناسب است.

• مدل کلوین-ویت

در مدل کلوین-ویت، رفتار سیال ویسکوالاستیک بر اساس یک فنر و دمپر موازی خطی شبیه سازی شده است [۴۴]. رابطه بین تنش و نرخ برش در این مدل به شکل زیر قابل بیان است.

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} = \mu \left(\gamma_{ij} + \frac{\eta}{\mu} \frac{\partial \gamma_{ij}}{\partial t} \right) \quad (\text{ب-۴})$$

رفتار این مدل بر عکس مدل ماکسول است و هرچند در این مدل یکی از زمانهای رهایی از تغییر شکل لحاظ شده اما مدل دارای زمان آسودگی از تنش نیست. از مدل کلوین-ویت عموماً برای مدل سازی پدیده خزش و ریکویل استفاده می‌شود. البته استفاده مستقیم از این مدل برای

شبیه سازی های عددی چندان مرسوم نبوده و معمولاً جهت ارائه رفتار کامل تری از یک ماده ویسکوالاستیک از المان کلوین-ویت در ارتباط با سایر المان های ویسکوالاستیک استفاده می‌شود.

• مدل برگرز

در مدل برگرز یک المان ماکسول با یک المان کلوین-ویت سری شده است [۴۴]. مدل برگرز به شکل زیر قابل بیان است.

$$\tau_{ij} + (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \lambda_1 \lambda_2 \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial t^2} = (\eta_1 + \eta_2) \gamma_{ij} + (\lambda_1 \eta_2 + \lambda_2 \eta_1) \frac{\partial \gamma_{ij}}{\partial t} \quad (\text{ب-۵})$$

مسلم است که مدل برگرز رفتار کاملتری را از یک ماده ویسکوالاستیک ارائه می‌کند. در حالت خاصی از مدل برگرز، چنانچه یکی از فنرها یا دمپرهای المان ماکسول حذف شود، مدل جدیدی به نام مدل جفریز حاصل می‌شود.

$$\tau_{ij} + \lambda_1 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} = \eta (\gamma_{ij} + \lambda_2 \frac{\partial \gamma_{ij}}{\partial t}) \quad (\text{ب-۶})$$

مدل جفریز مدل ساده و نسبتاً مناسبی برای بررسی رفتار یک ماده ویسکوالاستیک است زیرا در آن یک زمان آسودگی از تنش و یک زمان رهایی از تغییر شکل لحاظ شده است. همین ویژگی سبب شده تا از آن به عنوان رابطه پایه در توسعه مدل غیر خطی اولدریوید-بی استفاده شود.

• مدل ماکسول توسعه یافته

مدل ماکسول توسعه یافته از طریق موازی کردن تعداد متناهی از المانهای ماکسول بدست می‌آید. اصولاً یک ماده پلیمری از تعداد زیادی از مولکولهای رشته ای با طولهای مختلف و احیاناً ساختارهای فضایی متنوع تشکیل شده که سبب ایجاد زمانهای مختلف آسودگی از تنش در این مواد می‌شود. به همین دلیل این مدل برای ایجاد زمانهای متعدد آسودگی از تنش ایجاد شده

است. می‌توان نشان داد که در مدل ماکسول توسعه یافته ضریب الاستیک و ویسکوزیته معادل (تابعی از زمان هستند) به شکل زیر قابل تعریف است [۴۲]:

$$\mu(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i \exp(-t / \lambda_i) \quad (\text{ب-۷})$$

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n \eta_i (1 - \exp(-t / \lambda_i)) \quad (\text{ب-۸})$$

به طور مشابه، مدل کلون-ویت توسعه یافته نیز از طریق سری کردن المان‌های کلون-ویت قابل تعریف است (جهت ایجاد زمانهای رهایی از تغییر شکل مختلف).

ب-۱-۲- مدل‌های ویسکوالاستیک غیر خطی

مدل‌های ویسکوالاستیک خطی روابط دیفرانسیلی ساده‌ای را بین تنش و نرخ برش پیش‌بینی می‌کنند. این مدل‌ها دارای مشکلاتی هستند. ولی 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 در ابتدا تحلیل جریان با استفاده از مدل‌های خطی انجام شود و پاسخهای حاصل از آن به عنوان فرض اولیه در مدل‌های غیر خطی به کار رود.

همانگونه که پیشتر در بخش پیشتر گفته شد، از اوایل دهه ۵۰ میلادی مدل‌هایی ایجاد شدند که تا حد امکان از اشکالات مدل‌های ویسکوالاستیک خطی مبرا باشند و رفتار فیزیکی بهتری را مدل‌سازی نمایند. در ادامه برخی از معروفترین این مدل‌ها معرفی می‌شوند.

• مدل کریمینال-اریکسون-فیلبی^۱

مدل کریمینال اریکسون فیلبی مدل مناسبی برای شبیه سازی جریانهای برشی دائمی سیالات ویسکوالاستیک است. معادله ساختاری این مدل به شکل زیر است.

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\gamma_{(1)} - \frac{1}{2}\Psi_1(\dot{\gamma})\gamma_{(2)} + \Psi_2(\dot{\gamma})\{\gamma_{(1)} \cdot \gamma_{(1)}\} \quad (\text{ب-۹})$$

از جمله مزایای این مدل می‌توان به امکان اعمال مستقیم توابع رئولوژیک وابسته به نرخ برش تعمیم یافته (شامل ویسکوزیته و ثابت های اختلاف تنش نرمال اول و دوم) در مدل اشاره نمود. پاسخ های این مدل در ناحیه ویسکومتریکی دیاگرام پیپکین (اعداد دبورای کوچک و محدوده وسیعی از اعداد وایزنبرگ) دقیق بوده و استفاده از آن جهت محاسبات صنعتی رایج است.

• مدل گزیکس

مدل سه ثابتۀ گیئسکاس [۳۱] بر مبنای دیدگاه مولکولی بدست آمده است. امتیاز اصلی این مدل آن است که قادر به ارائه رفتار پاورلو برای ویسکوزیته و ثابت های اختلاف تنش های نرمال است. معادله ساختاری این مدل به شکل زیر است:

$$\tau + \lambda \tau_{(1)} - (\alpha \lambda / \eta_0)(\tau \cdot \tau) = \eta_0 \dot{\gamma} \quad (\text{ب-۱۰})$$

مورد گیئسکاس در جهات مختلفی برای ارائه رفتار الاستیک غیر هوکی و مودهای مختلف (مدل گزیکس دارای چند مود^۲) توسعه یافته است. در تحقیق حاضر از این مدل به عنوان معادله ساختاری استفاده شده است.

^۱ Criminale-Eriksen-Filbey model (CEF model)

^۲ Multi-mode Giesekus model

• مدل کارتیس-برد^۱

این مدل نیز یک مدل انتگرالی بر اساس حافظه جریان سیال بوده که از تئوری مولکولی حاصل شده است. این مدل اصولاً برای مذاب‌های پلیمری طراحی شده و معادله آن بصورت زیر است.

$$\tau = NnkT \left\{ \frac{1}{3} \delta - \int_{-\infty}^t \mu(t-t') A^{(2)} dt' - \frac{1}{2} \varepsilon \gamma : \int_{-\infty}^t \nu(t-t') A^{(4)} dt' \right\} \quad (\text{ب-۱۱})$$

در رابطه فوق، N تعداد ذرات در زنجیره‌های مولکولی، n عدد دانسیته زنجیره‌ها، μ و ν توابع حافظه، $A^{(2)}$ مشتق مرتبه دوم و $A^{(4)}$ مشتق مرتبه چهارم تانسور $\gamma^{[0]}$ است. این مدل قادر به ارائه صورت واقعی تری از توابع رئولوژیکی است.

ب-۱-۳- تعدادی دیگر از معادلات ساختاری غیر خطی

• مدل اولدروید-بی (Oldroyd-B)

$$\tau_{pk} + \lambda_k \tau_{pk}^{\nabla} = 2\eta_{pk} D \quad (\text{ب-۱۲})$$

• مدل فان تین تنر (Phan-thien-Tanner)

$$\left(1 + \frac{\varepsilon_k \lambda_k}{\eta_{pk}} \text{tr}(\tau_{pk})\right) \tau_{pk} + \lambda_k \tau_{pk}^{\nabla} = 2\eta_{pk} D \quad (\text{ب-۱۳})$$

• مدل فنه-سی-آر (FENE-CR)

$$\left(\frac{L_k^2 + \frac{\lambda_k}{\eta_{pk}} \text{tr}(\tau_{pk})}{(L_k^2 - 3)} \right) \tau_k + \lambda_k \tau_{pk}^{\nabla} = 2 \left(\frac{L_k^2 + \frac{\lambda_k}{\eta_{pk}} \text{tr}(\tau_{pk})}{(L_k^2 - 3)} \right) \eta_{pk} D \quad (\text{ب-۱۴})$$

¹ Curtiss-Bird

ب-۲- نحوه انتخاب معادله ساختاری

بطور کلی برای بررسی تحلیلی یا عددی یک مساله خاص توصیه می‌شود که معادله ساختاری‌ای انتخاب گردد که دارای شرایط زیر باشد:

۱. حتی‌المکان ساده و تعداد ثابت‌های آن کم باشد.
۲. ضرایب و ثابت‌های معادله موجود بوده و یا اندازه‌گیری و تعیین آنها حتی‌الامکان ساده باشد.
۳. ترجیحاً با اصول مکانیک محیط‌های پیوسته سازگار باشد.
۴. قادر به ارائه خواص مورد نظر باشد (مثلاً ارائه اثر اختلاف تنش نرمال دوم).
۵. برای شرایط عمومی مساله طراحی شده باشد (برای مثال از مدل‌هایی که برای مسائل جریانهای دائمی طراحی شده اند نمی‌توان در شرایط غیردائم استفاده نمود).
۶. ترجیحاً توسط مراجع معتبری برای حل مساله مورد نظر و یا مسائل مشابه توصیه شده باشد.

پیوست پ

معرفی نرم‌افزار OpenFOAM

پ - مقدمه

دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یکی از قسمت های مهم و ضروری در زمینه ابزارهای مهندسی به منظور مدل سازی فرایندهای مختلف، خود را به اثبات رسانیده و در حال حاضر، برای اهداف گوناگونی هم در صنعت و هم در محیط های آکادمیک مورد استفاده قرار می گیرد. مدل سازی پدیده های جریان سیالات به مهندسان و آنالیزورها این اجازه را می دهد که فرایندهای گوناگونی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و در صدد رفع نواقص احتمالی آن برآیند. شایان ذکر است که تقریباً اکثر نرم افزارهای موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی تحت مجوز شرکت خاصی بوده و بسیار گران قیمت نیز می باشد. علاوه بر آن، دستیابی کامل به کد عددی این گونه از نرم افزارها و اعمال تغییر و ویرایش آن توسط کاربر تقریباً غیر ممکن می باشد. از این رو، بهترین راه حل به منظور مرتفع کردن محدودیت های پیشرو، استفاده از نرم افزارهای منبع باز در رابطه با دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. نرم افزارهای کد باز، این اجازه را به کاربران می دهند که به کد عددی مدل خود دسترسی کامل داشته و بدون پرداخت هیچ گونه هزینه ای، آن را در زمینه کاری مورد نظر ارتقا داده و با نام خود آن را در اختیار عموم قرار دهند. در واقع، نرم افزارهای کد باز، یک جعبه ابزار می باشند که به کاربر اجازه دستکاری و اعمال تغییر در آن داده می شود. در شکل پ-۱ لیستی از پرکاربردترین نرم افزارهای منبع باز در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی جمع آوری شده است. بدیهی است که بسته های نرم افزاری متعددی در این رابطه وجود دارد که در این لیست آورده نشده است.

در این میان، نرم افزار منبع باز OpenFOAM یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی است که قادر به مدل سازی هر نوع مساله شامل معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال از مسایل ساده تا بسیار پیچیده می باشد. از نمونه موارد قابل مدل سازی توسط این نرم افزار می توان مساله های مربوط به جریان های آرام و آشفته، تک فاز و چندفاز، انتقال حرارت، واکنش شیمیایی، الکترومغناطیس و مکانیک جامدات و همچنین به مساله های مربوط به معادلات اقتصادی نظیر قیمت گذاری و مالی اشاره نمود.

- | | |
|--|--------------------------------------|
| • ADFC | • Featflow |
| • Applied Computational Fluid Dynamics | • Femwater |
| • CFD2k | • FreeFEM |
| • Channelflow | • Gerris Flow Solver |
| • Code_Saturne | • IMTEK Mathematica Supplement (IMS) |
| • COOLFluid | • iNavier |
| • Diagonalized Upwind Navier Stokes | • ISAAC |
| • Dolfyn | • Kicksey-Winsey |
| • Edge | • MFIX |
| • ELMER | • NaSt2D-2.0 |
| • FDS | • NEK5000 |
| • NUWTUN | • NSC2KE |
| • OpenFlower | • SLFCFD |
| • OpenFOAM | • SSIIM |
| • OpenFVM | • Tochnog |
| • PETSc-FEM | • Typhon solver |
| • PP3D | • PRIN-3D |

شکل ۵-۶ شکل پ-۱ لیستی از پرکاربردترین نرم افزارهای منبع باز در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی

نرم افزار OpenFOAM توسط "OpenCFD Ltd" تحت مجوز عمومی گنو و در تاریخ ۱۱ دسامبر ۲۰۰۴ ایجاد شده و به صورت منبع باز و آزاد موجود می باشد. این مطلب بدان معناست که کد آن به صورت رایگان در اختیار همه قرار دارد و به سهولت از شبکه جهانی اینترنت قابل دریافت است. به علاوه به علت آزاد یا باز بودن منبع کد مذکور امکان بررسی تمامی جنبه های کد نویسی از جمله تغییر و توسعه آن برای کاربر فراهم خواهد بود. در طول این مدت (تا سال ۲۰۱۱)،

OpenFOAM هفت مرتبه به روز رسانی شده و بیش از نیم میلیون خط کد در طول این مدت بدان اضافه گردیده و بسیاری از ایرادات آن مرتفع شده است، به طوریکه می‌توان گفت که آخرین نسخه آن تحت عنوان OpenFOAM-2.0.0 به عنوان نسخه ای محبوب نزد کاربران تبدیل گشته است.

هسته انعطاف پذیر و کارآمد OpenFOAM، از مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده توسط C++ ایجاد شده است. این مجموعه‌ها در ایجاد حل‌گرهایی برای شبیه سازی مسایل مطرح در مهندسی مکانیک و یا ایجاد کاربردها برای اعمال پیش پردازش و پس پردازش، همچنین به وجود آوردن کتابخانه‌هایی به منظور ایجاد جعبه ابزارهایی که در حل‌گرها/کاربردها قابل دسترسی باشند و یا برای مدل‌های فیزیکی، مورد استفاده قرار گرفته اند. این نرم افزار با تعدادی حل‌گر از پیش ساخته، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها، ارایه گردیده که می‌تواند به عنوان یک بسته شبیه سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در حالی که علاوه بر باز و آزاد بودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار و سلسله مراتب حل‌گرها، مثال‌های کاربردی و کتابخانه‌ها را نیز دارا می‌باشد. نرم افزار OpenFOAM از شیوه عددی حجم محدود برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند که به هر شبکه بندی غیر ساختار یافته سه بعدی، سلول‌های چند وجهی نسبت داده می‌شود. در این نرم افزار، حل‌گرهای جریان سیال در یک چارچوب تکرار، سرعت-فشار، ضمنی توسعه یافته است. موازی سازی، جداکردن یا بخش بندی دامنه حل از مبانی OpenFOAM می‌باشد. بنابراین به طور کلی، حل‌گرها بدون نیاز به کدنویسی ویژه حل موازی قابل توسعه می‌باشند. علاوه بر آن، با تعریف ماژول‌های عمومی در این نرم افزار کدباز، امکان تعریف توابع مختلف به زبان قابل فهم مهندسی میسر شده است. برای مثال، معادله مومنوم برای جریان تراکم پذیر به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U U - \nabla \cdot \mu \nabla U = -\nabla p$$

و تعریف آن در در نرم افزار منبع باز OpenFOAM به صورت زیر صورت می‌گیرد :

```
solve
(
    fvm::ddt(rho, U)
+fvm::div(phi, U)
-fvm::laplacian(mu, U)
==
-fvc::grad(p)
);
```

همانطور که مشاهده می‌شود، تعریف عملگرهای مختلف نظیر مشتق زمانی، دیورژانس،

لاپلاسین و گرادیان، مطابق آن چه که هست، در کد آورده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که نرم

افزار OpenFOAM از زبان برنامه نویسی C++ بهبود یافته استفاده می‌کند توسعه دهندگان

OpenFOAM شامل یک گروه ۲۰ نفره می‌باشد که توسط یک هسته ۵ نفری اداره می‌شود. هسته

این گروه در جدول (پ-۱) معرفی شده است.

جدول (پ-۱) هسته گروه توسعه دهنده OpenFOAM



Prof. Hrvoje Jasak

Born: 2nd March 1970 in Zagreb, Croatia

Full professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Zagreb, Croatia

Private E-mail Address:

h.jasak@dial.pipex.com



Dr. Hakan Nilsson

Associate professor, Chalmers University of Technology in Sweden.

Private E-mail Address:

hani@chalmers.se



Dr. Bernhard Gschaider

**ICE Strömungsforschung GmbH,
Hauptplatz Leoben, Austria**



Dr. Henrik Rusche

Born: 4th October 1970

Associate professor, University of Hannover, Germany.

Private E-mail Address:

[henrik.\[deleteThis\]rusche@web.de](mailto:henrik.[deleteThis]rusche@web.de)



Dr. Hoger Marschall

Associate professor, Technische Universität München.

Private E-mail Address:

marschall@csi.tu-darmstadt.de

پ-۱- نرم افزارهای منبع باز یا آزاد

در سال‌های نخست توسعه رایانه‌ها، نرم افزار و سخت افزار به همراه هم اجزایی شناخته شده بود و نرم افزارها به عنوان بخشی مستقل یا مجزا از سخت افزار مورد بحث نبوده اند. به تدریج با توسعه و رشد کاربرد سخت افزار رایانه‌ها، نرم افزارها نیز، از نظر تنوع و کارایی رشد بسیاری پیدا کردند. در اینجا مساله نرم افزار تجاری، رایگان و آزاد به تدریج مفهوم یافته و برای هر یک از آن‌ها تعاریفی ارایه گردید. تعریف‌ها و بیان‌های مختلفی از نرم افزار منبع باز، آزاد یا همان اوپن سورس ارایه شده است اما به طور اجمالی می‌توان نرم‌افزار آزاد را نرم افزاری دانست که آزادی‌هایی را برای کاربران خود ایجاد می‌نماید. نرم افزار آزاد در مورد آزادی کاربران برای اجرا، کپی، توزیع، بررسی، تغییر و بهبود دادن نرم‌افزار می‌باشد. به طور دقیق‌تر نرم‌افزار آزاد به چهار نوع آزادی برای کاربران یک نرم‌افزار اشاره دارد که عبارتند از:

- ✓ آزادی جهت اجرای برنامه برای هر منظوری که به اصطلاح آزادی صفرم نامیده می‌شود.
- ✓ آزادی جهت مطالعه و بررسی چگونگی عملکرد برنامه و تغییر آن برای نیاز خود که آزادی اول نامیده شده، دسترسی به کد منبع یک پیش‌شرط برای این آزادی عمل می‌باشد.
- ✓ آزادی جهت توزیع مجدد کپی یا نسخه‌هایی از آن، که آزادی دوم خوانده می‌شود.
- ✓ آزادی جهت بهبود برنامه و انتشار این تغییرات برای عموم که به اصطلاح آزادی سوم نامیده شده و در این مورد نیز دسترسی به کد منبع یک پیش‌شرط برای این آزادی می‌باشد.

باید توجه داشت که یک نرم افزار آزاد ممکن است رایگان نباشد و تنها وجود شرایط بالا است که یک نرم افزار را به عنوان منبع باز یا آزاد تعیین می‌کند. به بیان دیگر در صورتی برنامه‌ای یک نرم‌افزار آزاد به شمار می‌آید که کاربران آن، همه این آزادی‌ها را داشته باشند. البته برخی از قوانین درباره نحوه توزیع نرم‌افزار آزاد وجود دارد. به طور مثال طبق برخی از

قوانین نمی‌توان محدودیت‌هایی به نرم افزار آزاد اضافه کرد تا آزادی‌های اولیه برای دیگران از بین برود. این قانون در واقع سبب حفظ آزادی یک نرم افزار و توسعه آن با همان ویژگی‌ها برای تمام افراد می‌شود. در پروژه گنو، از قانون "کپی‌لفت" برای حفاظت قانونی از این آزادی‌ها برای تمامی افراد استفاده می‌گردد. هر چند نرم‌افزارهای آزاد غیر کپی‌لفتی نیز وجود دارند. یک نمونه از سیستم عامل آزاد با منبع باز، **لینوکس** است که در ادامه اشاره‌ای مختصر به آن می‌شود.

پ-۲- توزیع‌های گنو / لینوکس

لینوکس یک سیستم عامل آزاد و متن باز است که تحت مجوز یا قانون گنو (GNU/GPL) منتشر شده است. این سیستم عامل در سال ۱۹۹۱ در دانشگاه هلسینکی فنلاند توسط دانشجویی به نام لینوس تروالدز نوشته شد. گنو/لینوکس با همکاری افراد زیادی در سرتاسر جهان ایجاد شده، توسعه یافته است. توزیع‌های فراوانی از لینوکس وجود دارد که از نرم افزارهای آزاد همراه با هسته لینوکس تشکیل می‌شوند. همه این توزیع‌ها از یک هسته واحد به نام لینوکس استفاده می‌کنند. در واقع لینوکس از تعدادی کد تشکیل یافته که ارتباط بین سخت افزار و نرم افزارها را برقرار می‌کند و یک توزیع لینوکس شامل این هسته از کدهای اولیه و تعداد زیادی نرم افزار متن باز می‌باشد. باز بودن متن گنو/لینوکس باعث شده تا عده فراوانی از سرتاسر جهان توسط اینترنت بر روی این سیستم عامل کار کنند که نتیجه آن سیستم عاملی قدرتمند و رایگان است. امنیت بالا از ویژگی‌های مهم باز بودن متن این سیستم عامل می‌باشد. از معروفترین توزیع‌های لینوکس می‌توان به ردهت (Redhat)، دبیان (debian)، سوزه (Suse) و اوبونتو (Ubuntu) اشاره کرد. سیستم عامل اوبونتو از محبوب ترین توزیع‌های کد باز لینوکس است که نسخه گرافیکی آن، کوبونتو نام دارد.

پ-۲-۱- انتخاب سیستم عامل یا توزیع لینوکس مناسب

برای استفاده از نرم افزار OpenFOAM روش‌های مختلفی وجود دارند که عبارتند از:

(۱) استفاده مستقیم از نرم افزار بر روی سیستم عامل ویندوز (که محدود به استفاده از

ویرایش‌های مخصوصی از نرم افزار و تنها برخی از امکانات نرم افزار است).

(۲) استفاده از نرم افزار بر روی سیستم عامل ویندوز با استفاده از برنامه‌هایی که محیط

لینوکس را در محیط ویندوز شبیه سازی می‌کنند، (که لازم است محدودیت‌های نرم افزار

میانی و تسلط بر آن مورد توجه قرار گیرد).

(۳) استفاده از نرم افزار در محیط لینوکس که به کمک یک نرم افزار به صورت مجازی بر روی

سیستم عامل ویندوز نصب شده است.

(۴) استفاده از نرم افزار بر روی سیستم عامل لینوکس

با توجه به مشکلات متداول، بیشتر از دو گزینه آخر استفاده می‌شود. برای کار با نرم افزار

در محیط لینوکس (خواه نصب شده به صورت مجازی در محیط ویندوز و خواه به صورت

مستقیم) لازم است تا توزیع مناسبی از لینوکس انتخاب گردد. در حالت کلی می‌توان

نسخه‌های مختلفی از لینوکس را به کار برد. اما در عمل دو انتخاب برای توزیع لینوکس

مناسب وجود دارد. اول اینکه از توزیع‌هایی از لینوکس که نرم افزار مذکور به طور پیش فرض

و از قبل در آن‌ها نصب شده اند استفاده گردد و انتخاب دوم استفاده از توزیع‌هایی از لینوکس

است که نرم افزار بر روی آن‌ها نصب نشده است. در خصوص انتخاب اول بعد از نصب لینوکس

نیاز به هیچ گونه تنظیمی وجود ندارد. حال اینکه در حالت دوم لازم است اولاً با مراجعه به

سایت نرم افزار OpenFOAM از سازگاری توزیع مورد نظر لینوکس با آن اطمینان یابیم و

ثانیاً مراحل نصب و تنظیم‌های نرم افزار را در نسخه لینوکس مورد نظر اجرا نماییم. شایان ذکر

است که قابلیت کار به صورت زنده یا "Live" ویژگی جدید و بسیار مهمی است که در برخی

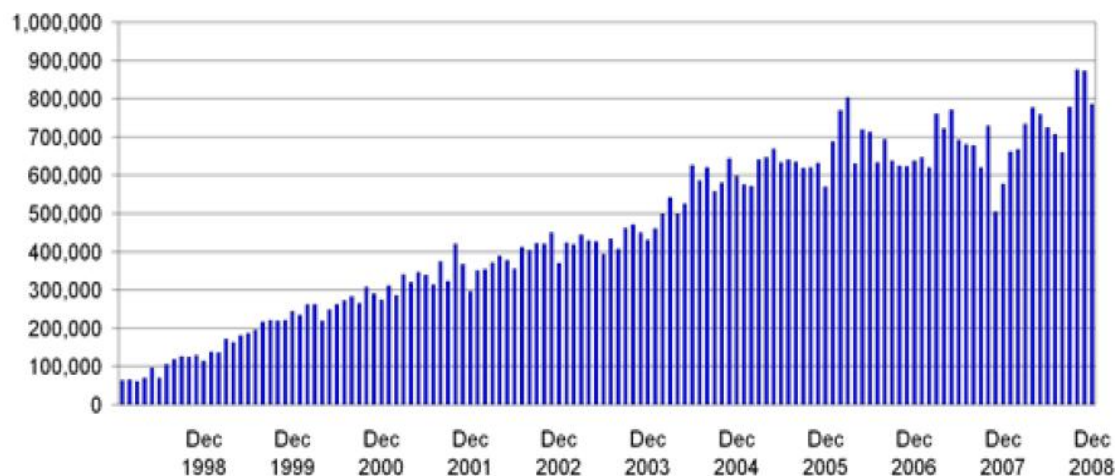
نسخه‌های لینوکس وجود دارد و به کمک آن می‌توان بدون نصب لینوکس، با نرم افزارهای موجود در آن کار کرد.

پ-۳- مقایسه بین نرم افزار های کد باز و نرم افزارهای تجاری

به سختی می‌توان به طور دقیق بیان نمود که چه تعداد افراد در جهان از نرم افزار های تجاری در رابطه با دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌کنند و چه تعداد دیگر از افراد، از نرم افزار های منبع باز در این رابطه بهره می‌گیرند. این کار نیازمند تحقیقاتی جامع و مطالعه وسیع بر جامعه آماری می‌باشد. یک پیشنهاد خوب برای برطرف کردن این مشکل، استفاده از اطلاعات در دسترس در سایت cfd-online می‌باشد. این سایت از طریق لینک [۴۶]:

<http://www.cfd-online.com>

قابل دسترس می‌باشد. در این سایت فروم های مختلفی وجود دارد که به صورت طبقه بندی شده، به بررسی موضوعات مختلف در رابطه با تمامی نرم افزار های دینامیک سیالات محاسباتی می‌پردازد و در آن افراد سوالات و پاسخ های خود را به اشتراک عموم می‌گذارند. تعداد افرادی که علاقه مند به مسائل مربوط به دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشند را می‌توان از طریق تعداد پست هایی که در بازه زمانی مشخص در این سایت به اشتراک گزارده می‌شود، پیدا نمود. لازم به ذکر می‌باشد که سال ۲۰۰۸ میلادی یکی از سال های موفق برای این سایت محسوب می‌شود. در این سال تعداد خوانندگان صفحات مربوط به این وب سایت بر اساس ای پی آدرس هر کاربر، رکورد جدیدی از خود به جای گذاشت. در شکل پ-۲ تعداد صفحات اینترنتی ایجاد شده در این وب سایت در ۱۱ سال اخیر و در یک ماه از هر سال آورده شده است.

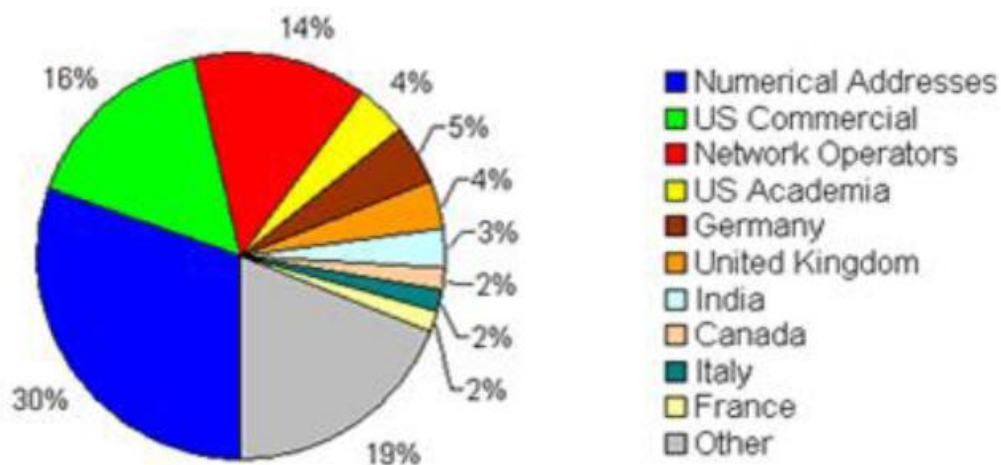


شکل ۶-۶-۲ تعداد صفحات اینترنتی ایجاد شده در هر ماه در ۱۱ سال گذشته

پ-۳-۱- درصد مشارکت کشور های مختلف

بازدیدکنندگان سایت cfd-online از کشور های مختلف دنیا می‌باشد. نمودار دایره ای نشان داده

در شکل پ-۳-۳ تعداد مشارکت افراد در کشور های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۷-۳ درصد مشارکت کشورهای مختلف در وب سایت دینامیک سیالات محاسباتی

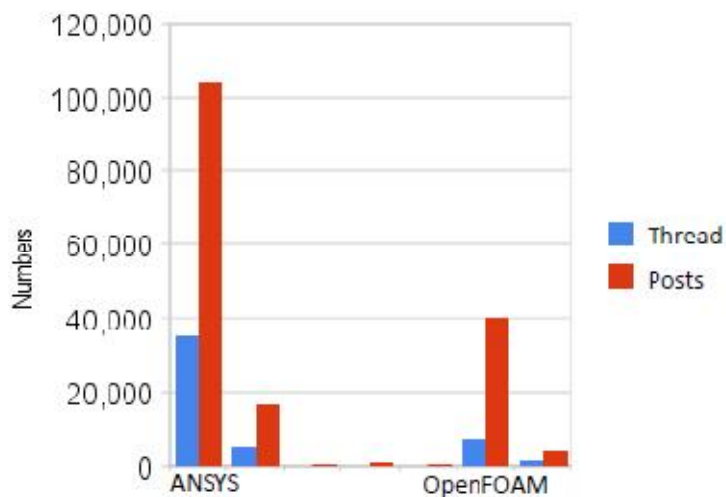
پ-۳-۲- بررسی تعداد موضوعات مورد بحث

در جدول (پ-۲) تعداد موضوعات مطرح شده در رابطه با نرم افزار های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی آورده شده است. به منظور بررسی مقایسه ای از لحاظ تعداد فعالیت های انجام شده در رابطه با افزار های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی، تعداد فروم های ثبت شده و پست های مربوط به آن نرم افزار تا تاریخ ۱۱ اکتبر ۲۰۰۹ آورده شده است.

جدول (پ-۲) فروم های ثبت شده در سایت CFD online و پست های مطرح شده در تاریخ ۱۱ اکتبر ۲۰۰۹

Software User Forums	Type	Threads	Posts
ANSYS (CFX and Fluent)	Commercial	35,102	103,988
CD-adapco	Commercial	5,000	16,694
FloEFD, FloWorks & FloTHERM	Commercial	118	434
FLOW-3D	Commercial	240	1,093
NUMECA	Commercial	223	586
OpenFOAM	OpenSource	7,039	39,913
Phoenix	Shareware	1,288	3,778
Total		49,010	166,486

این اطلاعات همچنین در نمودار میله ای نشان داده شده در زیر آورده شده است.



شکل ۸-۶ مقایسه تعداد فروم ها و پست های موجود در ارتباط با دو نرم افزار ANSYS و OpenFOAM

از جدول (پ-۲) و شکل پ-۴ می‌توان به راحتی در یافت که نرم افزار ANSYS در رنکین مشارکت، با اختلاف بسیار زیادی نسبت به سایرین و در رتبه اول قرار دارد. شایان ذکر می‌باشد که نرم افزار ANSYS خود به تنهایی شامل دو نرم افزار در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی به نام های CFX و Fluent می‌باشد. مشاهده می‌شود که نرم افزار OpenFOAM در این رده بندی، مکان دوم را به خود اختصاص داده است و نرم افزار های دیگر در فاصله ای بسیار زیاد نسبت به این دو نرم افزار قرار گرفته اند. نکته بسیار مهم که در این رابطه باید بدان اشاره نمود آن است که شروع مشارکت در رابطه با نرم افزار Fluent از سال ۹۸ میلادی یعنی حدود ۱۳ سال پیش بوده، در حالی که آغاز به کار نرم افزار OpenFOAM در این وب سایت از سال ۲۰۰۵ یعنی حدود ۶ سال پیش می‌باشد. از این رو، بسیار مشکل بتوان رابطه ای دقیق برای میزان مشارکت و علاقه مندی افراد در زمینه نرم افزار های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی بیان کرد، ولی از اطلاعات ارایه شده، می‌توان به رشد قابل ملاحظه و چشمگیر درصد مشارکت و علاقه مندی افراد در استفاده از نرم افزار منبع باز OpenFOAM اذعان نمود.

پ-۳-۳- مقایسه توانمندی های نرم افزار های تجاری و منبع باز

در این قسمت توانمندی های نرم افزار منبع باز با نرم افزار های تجاری مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد. برای سهولت در قیاس، یک نماینده از هر دو گروه از نرم افزارهای موجود برگزیده می‌شود. از نرم افزار های تجاری، نرم افزار ANSYS Fluent به دلیل عمومیت و عملکرد بالا و از نرم افزار های منبع باز، نرم افزار OpenFOAM به دلیل پیشرفت چشمگیر آن در مقایسه با نرم افزار های دیگر منبع باز انتخاب می‌گردد. مقایسه از جنبه های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و در جداول زیر نتایج مربوطه آورده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که در این مقایسه، از نسخه ۱.۴.۱ نرم افزار OpenFOAM که مربوط به سال ۲۰۰۷ می‌باشد، استفاده شده است. در حالی که جدیدترین نسخه این نرم افزار با نسخه ۲.۰.۰ می‌باشد و قابلیت های بسیار زیادی به آن اضافه

گردیده است.

- مقایسه از جنبه نصب نرم افزار

جدول (پ-۳) نصب نرم افزار در سیستم عامل های مختلف

	OpenFOAM	ANSYS Fluent
Operating system compatability	Unix Linux MS Windows (built with MinGW C++ as a set of native windows applications, which improves performance and eliminates the need for Unix emulations). MacOSX	Unix Linux MS Windows MacOS
Installation	Not Easy	Easy
License	Free under GNU license	Expensive
Software upgrading	No Cost	Need cost

- مقایسه از لحاظ تنظیمات عمومی

جدول (پ-۴) تنظیمات دستی و ملاحظات عمومی

	OpenFOAM	ANSYS Fluent
Parallelisation	Yes	Yes
Scripting	Yes (C++)	Yes (but not good)
Solution monitoring	Yes	Yes
On-the-fly post-processing	Yes (PyFoam)	Yes
Adjustment of parameters during solving	Yes (easy)	Yes (could be better)
Discretization	FVM	FVM & FEM (CFX)

• جداول مدل‌های فیزیکی و شرایط مرزی

جدول (پ-۵) مدل‌های فیزیکی موجود در OpenFOAM و Fluent

	OpenFOAM	ANSYS Fluent
Change in Density		
Incompressible flow	Yes	Yes
compressible flow	Yes	Yes
Chemistry		
Transient global/elementary reactions	Yes	Yes
Steady global/elementary reactions	No	Yes
Thermodynamics		
Conduction	Yes	Yes
Convection	Yes	Yes
Radiation	Yes	Yes
Particle Flow		
Particle tracking	Yes	Yes
Evaporation	Yes	Yes
Particle Combustion	Yes	Yes
Multiphase Flow		
VOF	Yes	Yes
Euler - euler	Yes	Yes
Euler - lagrange	Yes	Yes
Phase Change		
Due to cavitation (pressure)	Yes	Yes
Due to heat transfer (temperature)	No	Yes
Movement by Torque	No	Yes
Direct simulation Monte-Carlo (DSMC)	Yes	Yes

جدول (پ-۶) شبکه و انواع شرایط مرزی

	OpenFOAM	ANSYS Fluent
Mesh		
Polyhedral (tets, hex etc.)	Yes	Yes
2D and axi-symmetric	Yes (manipulated by 3D with 1 cell thick)	Yes
Dynamic Mesh	Yes	Yes
MRF (multi reference frame)	Yes (has a new approach General Grid Interface (GGI))	Yes
Exterior/interior wall	Yes	Yes
Interior face	No	Yes
Porous jump	No	Yes
Porous zone	Yes	Yes
Pressure outlet, pressure inlet, velocity inlet	Yes	Yes
Mass flow inlet	Yes	Yes
Exhaust fan, inlet vent, outlet vent, intake fan	No	Yes
Outflow, pressure far field	No	Yes

• جداول تنظیمات حل گر

جدول (پ-۷) حل گر ها و روش های حل در OpenFOAM و Fluent

	OpenFOAM	ANSYS Fluent
Graphical user interface (GUI)	Not yet (It makes OpenFOAM is not popular for ordinary user)	Yes
Laminar flow, transient, and steady state	Yes	Yes
Turbulence models		
k-e, k-w, (wall functions)	Yes	Yes
Large Eddy Simulation	Yes	Yes
Detached eddy simulation Spalart-Allmaras	Yes	Yes
Direct Numerical Simulation	Yes	Yes
Numerical Interpolation scheme		
Spatial 1. order upwind (upwind)	Yes	Yes
Spatial 2. order upwind (Quick)	Yes	Yes
Time 1. order (Euler)	Yes	Yes
Time 2. order (CrankNicholson)	Yes	Yes
Pressure velocity coupling		
Simple	Yes	Yes
PISO	Yes	Yes
Coupled (Pimple)	Yes	Yes

• پس پردازش

جدول (پ-۸) پس پردازش در OpenFOAM و Fluent

	OpenFOAM	ANSYS Fluent
Data Conversion	foamDataToFluent foamToEnsignt foamToEnsigntParts foamToFieldview9 foamToGMV foamToVTK smapToFoam	Fluent to CFX
Loop Calculation	Yes	Yes
Patch (average and integration)	Yes	Yes
Sample & Probe	Yes	Yes
Stress Component	Yes	Yes
Velocity Field (Mach, Co, enstrophy, vorticity)	Yes	Yes
Wall Function (Grad, Heat Flux, Shear stress, yPlusLES, yPlusRAS) and so on	Yes	Yes

هر ساله همایش ها و کارگاه هایی در زمینه نرم افزار منبع باز OpenFOAM در کشور های مختلف برگزار می شود که در آن به موضوعات مختلفی از قبیل حل مسائل فیزیکی خاص در زمینه توربوماشین ها و صنایع تولید برق، جریان های چند فازی در رابطه با صنایع نفت و گاز، تکنولوژی توربین بادی و تحقیقات در زمینه انتخاب بهترین مدل های توربولانسی برای آن پرداخته می شود.

در جدول (پ-۹) لیست همایش های برگزار شده و در حال برگزاری آورده شده است.

جدول (پ-۹) همایش های برگزار شده در نقاط مختلف دنیا

Conferences	Places and Dates
First OpenFOAM International Conference	UK, 26th/27th November 2007 London
Second OpenFOAM International Conference	Berlin, 4th/5th December 2008
Third OpenFOAM International Conference	Barcelona, 12th/13th November 2009
Fourth OpenFOAM International Conference	, 4th/5th November 2010 Munich
Fifth OpenFOAM International Conference	Paris, 3rd/4th November 2011

همچنین در این راستا، کارگاه هایی به صورت حرفه ای به منظور توسعه و رفع مشکلات نرم افزار در کشور های مختلف برگزار می گردد. در جدول (پ-۱۰) لیست مکان هایی که از سال ۲۰۰۶ اقدام به برگزاری چنین کارگاه هایی کرده اند آورده شده است.

جدول (پ-۱۰) کارگاه های برگزار شده در نقاط مختلف دنیا

Workshops	Places and Dates
First OpenFOAM Workshop	Zagreb, January 26-28, 2006.
Second OpenFOAM Workshop	Zagreb, June 7-9, 2007
Third OpenFOAM Workshop	Milano, July 9-11, 2008
Fourth OpenFOAM Workshop	Montreal, June 1-4, 2009
Fifth OpenFOAM Workshop	Göteborg, June 21-24 2010

تاکنون کشور های متعددی از موسسات و دانشگاه های مختلف با صرف انرژی و تلاش های فراوان، سعی در بهبود و توسعه نرم افزار OpenFOAM داشته اند. در این میان می توان به تلاش کشورهای مختلف از جمله آلمان، سوئد، دانمارک، ایتالیا، هند، چین و برزیل اشاره نمود. همانطور

که ذکر شد توسعه نرم افزارهای کد باز دینامیک سیالات محاسباتی از رشد بسیار سریعی برخوردار است و چشم انداز بسیار خوبی برای آنها در آینده می‌توان متصور بود. تحقیقات پیوسته و پیگیری های متعدد در رابطه با نرم افزار های منبع باز دینامیک سیالات محاسباتی، سبب توسعه روزافزون این گونه از نرم افزار ها شده است. پیش‌بینی می‌شود که در زمان کوتاهی، نرم افزار های منبع باز، نه تنها تمامی توانمندی های نرم افزار های تجاری موجود را در خود داشته باشند بلکه امکانات بیشتری در جهت مدلسازی انواع جریانات در اختیار کاربر قرار دهد. هر چند بدلیل کمبود منابع راهنمایی مناسب، این گونه از نرم افزار ها با حمایت کمی از جانب کاربران مواجه شده است، لذا تحقیقات و تلاش بیشتر در این زمینه به منظور آشنایی هر چه بیشتر کاربران با این گونه از نرم افزارها لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

در این رهگذر، سهم ناچیز استفاده و توسعه این گونه از نرم افزارها در کشور ما سبب شده تا در امکان استفاده از این توانمندی جهانی، رشد کمتری داشته باشیم. امکانات گسترده نرم افزار منبع باز شبیه سازی OpenFOAM و امکان استفاده از آن، هم برای مخاطبان دانشگاهی در رشته‌های مهندسی مکانیک، عمران، شیمی، زمین شناسی، نفت و همچنین علاقمندان به شبیه سازی‌های رایانه‌ای به ویژه در زمینه مسایل دینامیک سیالات مهندسی و انتقال حرارت و هم استفاده از آن در صنایع گوناگون، می‌تواند به عنوان محرکی قوی تلقی گردد که استفاده از آن را بیشتر از پیش برای همگان آشکار می‌سازد.

پیوست ت

معرفی و بیان الگوریتم SIMPLE در نرم افزار OpenFOAM

ت - مقدمه

یکی از الگوریتم‌های رایج در حل عددی به روش حجم محدود، الگوریتم "SIMPLE" (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) می‌باشد که به منظور حل معادلات غیر خطی و کوپل شده ناویر استوکس، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانطور که می‌دانیم معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر در حالت کلی، معادله اندازه حرکت و پیوستگی می‌باشد. معادله پیوستگی عبارتست از [۳۶]:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (\text{ت-۱})$$

و معادله غیر خطی اندازه حرکت نیز به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \vec{U}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \vec{U}) = -\nabla p \quad (\text{ت-۲})$$

حل این دو معادله با هم به دلیل آنکه معادله صریحی برای فشار در دسترس نیست مقدور نمی‌باشد. یکی از دیدگاه‌های رایج در این رابطه، استخراج یک معادله برای فشار از طریق گرفتن دیورژانس از معادله اندازه حرکت و جایگزینی آن در معادله پیوستگی است. برای این منظور ابتدا لازم است که معادله غیر خطی اندازه حرکت، به فرم خطی تقریب زده شود. این تقریب به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi U) = \nabla \cdot (\nu \nabla U) - \nabla p \quad (\text{ت-۳})$$

در معادله فوق، ϕ شار سطحی می‌باشد. پس از گسسته سازی هر یک از جملات موجود در معادله اندازه حرکت که به روش های مختلف می‌تواند صورت گیرد، می‌توان این معادله را به صورت فرم نیمه گسسته زیر بیان نمود.

$$\alpha_p U_p = H(U) - \nabla p \quad (\text{ت-۴})$$

در رابطه فوق، α_p ضریب سرعت مرکز سلول و $H(U)$ شامل جملات گسسته شده زمانی و دیفیوژن و چشمه است که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$H(U) = -\sum_n a_n U_n + \frac{U^0}{\Delta t} \quad (\text{ت-۵})$$

با تقسیم فرم نیمه گسسته معادله اندازه حرکت بر α_p ، رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$U_p = \frac{H(U)}{\alpha_p} - \frac{\nabla p}{\alpha_p} \quad (\text{ت-۶})$$

برای محاسبه شار سطوح، لازم است تا میدان سرعت از مرکز سلول بر روی سطوح درونیابی شود. برای این منظور رابطه زیر را خواهیم داشت.

$$U_f = \left[\left(\frac{1}{\alpha_p} \right) (H(U) - \nabla p) \right]_f = \left(\frac{H(U)}{\alpha_p} \right)_f - \frac{(\nabla p)_f}{(\alpha_p)_f} \quad (\text{ت-۷})$$

بنابراین شار به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\phi = S.U_f = S. \left[\left(\frac{1}{\alpha_p} \right) (H(U) - \nabla p) \right]_f \quad (\text{ت-۸})$$

در رابطه فوق، S بردار خارجی سطح می‌باشد. همچنین با انتگرال گیری از معادله پیوستگی رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\nabla.U = \int \nabla.U dV = \sum_f S.U_f = 0 \quad (\text{ت-۹})$$

حال با گرفتن دیورژانس از معادله نیمه گسسته اندازه حرکت و با توجه به رابطه پیوستگی، معادله زیر که حالت کلی معادله پواسون فشار است حاصل خواهد شد.

$$\nabla U_f = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \left(\frac{1}{\alpha_p} \nabla p \right) = \nabla \cdot \left(\frac{H(U)}{\alpha_p} \right) \quad (\text{ت-۱۰})$$

پیاده سازی الگوریتم "SIMPLE" برای جریان تراکم ناپذیر ناپایا در زیر آورده شده است.

(۱) گسسته سازی معادله خطی شده اندازه حرکت

$$Ueq: \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi U) - \nabla \cdot (\nu \nabla U) \quad (\text{ت-۱۱})$$

این گسسته سازی در OpenFOAM به صورت زیر انجام می‌پذیرد.

```
fvVectorMatrix UEqn
(
    fvm::ddt(U)
    + fvm::div(phi, U)
    - fvm::laplacian(nu, U)
);
```

نکته! جهت گسسته سازی میدان برداری سرعت، همانطور که در کد بالا مشاهده می‌شود از

کلاس fvVectorMatrix استفاده شده است. لازم به ذکر است که از کلاس‌های fvScalarMatrix

و fvTensorMatrix به ترتیب، برای تعریف میدان‌های اسکالر و تانسوری استفاده می‌شود.

(۲) حل معادله گسسته شده با فرض گرادیان فشار معلوم بدست آمده از زمان قبلی، در طرف

دوم معادله، جهت بدست آوردن سرعت میانی انجام می‌شود.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi U) - \nabla \cdot (\nu \nabla U) = -\nabla p \quad (\text{ت-۱۲})$$

کد آن در OpenFOAM به صورت زیر تعریف می‌شود.

```
solve (UEqn == -fvc::grad(p));
```

۳ محاسبه سرعت در مرکز سلول ها با صرف نظر کردن از گرادیان فشار به صورت رابطه زیر می باشد،

$$U = (1/A)(H(U) - \nabla p) \Rightarrow U = (1/A)H(U) \quad (\text{ت-۱۳})$$

کد آن در OpenFOAM به صورت زیر تعریف می شود.

```
volScalarField rUA = 1.0/UEqn( ).A( );
U = rUA*UEqn( ).H( );
```

۴ محاسبه میدان شار به صورت حاصلضرب داخلی میدان سرعت درونیایی شده روی سطوح سلول و بردارهای سطح به صورت زیر می باشد،

$$\phi = \text{interpolation} * S = U_f * S$$

کد آن در OpenFOAM به صورت زیر می باشد.

```
phi = (fvc::interpolate(U) & mesh.Sf( ))
      + fvc::ddtPhiCorr(rUA, U, phi);
adjustPhi(phi, U, p);
```

۵ حل معادله پواسون فشار با فرض آنکه تاثیر گرادیان فشار در محاسبه شار ناچیز باشد.

$$\nabla \cdot ((1/A) \nabla p) = \nabla \cdot (\phi) \quad (\text{ت-۱۴})$$

کد آن در OpenFOAM به صورت زیر می باشد.

```
fvScalarMatrix pEqn
(
    fvm::laplacian(rUA, p) == fvc::div(phi)
);
pEqn.setReference(pRefCell, pRefValue);
pEqn.solve( );
```

۶ تصحیح میدان شار توسط میدان فشار حاصل از حل معادله پواسون به صورت رابطه زیر است،

$$\phi = \phi - pflux \quad (\text{ت-۱۵})$$

که کد آن در OpenFOAM به صورت زیر تعریف می‌گردد.

```
if (nonOrth == nNonOrthCorr)
{
    phi -= pEqn.flux();
}
```

(۷) میدان سرعت توسط میدان فشار تصحیح می‌شود.

$$U = U - \nabla p / A \quad (\text{ت-۱۶})$$

که کد آن در OpenFOAM به صورت زیر تعریف می‌گردد.

```
U -= rUA*fvc::grad(p);
```

(۸) شرایط مرزی تصحیح می‌شود.

```
U.correctBoundaryConditions();
```

(۹) مراحل فوق آنقدر تکرار می‌شود تا حل همگرا گردد.

پیوست ج

معرفی انواع شرایط مرزی در OpenFOAM

ج - تقسیم‌بندی شرایط مرزی در OpenFOAM

تعیین نوع شرط مرزی در نرم افزار OpenFOAM در فایل "boundary" و "blockMeshDict" نمونه مورد مطالعه صورت می‌گیرد. شرایط مرزی در OpenFOAM به سه دسته تقسیم می‌شود که به قرار زیر می‌باشد [۳۵].

(۱) نوع پایه‌ای

(۲) نوع مقدماتی

(۳) نوع ترکیبی

انتخاب شرط مرزی پایه‌ای (BaseType) به طور کلی بر پایه هندسه مساله استوار است. در این نوع از شرط مرزی، برای هر یک از مرزها در فایل "boundary" که در پوشه <constant polyMesh قرار دارد کلید واژه‌ای اختصاص می‌یابد. به نحوی که شرایط جریان در هندسه مساله مورد نظر ارضا شود. دو نوع مقدماتی (PrimitiveType) و ترکیبی (DerivedType) نیز با استفاده از کلید واژه‌هایی، در فایل "0" به تعیین شرایط حاکم بر مساله در مرزها می‌پردازد.

• شرط مرزی از نوع "Base Type"

کلید واژه‌های مورد استفاده برای تعیین این نوع از شرط مرزی در OpenFOAM در جدول (ج-۱) آورده شده است.

جدول (ج-۱) انواع شرط مرزی پایه‌ای برای تعریف مرزهای هندسه

تعریف	کلیدواژه
patch	شرط عمومی
symmetryPlane	صفحه متقارن
empty	صفحات جلویی و عقبی هندسه دو بعدی
wedge	صفحات برشی جلویی و پشتی برای هندسه متقارن محوری
wall	دیوار
processor	مرز تعیین شده برای تقسیم شبکه بین پردازنده‌ها

در ادامه به توضیح مختصر راجع به هر یک از انواع شرط مرزی نوع "baseType" پرداخته شده است.

Patch

انتخاب این نوع از شرط مرزی در مرزها، تنها برای مشخص کردن آن صفحه به عنوان مرز می‌باشد و اطلاعاتی راجع به جریان در اختیار نمی‌گذارد.

wall

این نوع شرط مرزی، مرز بسته‌ای را برای صفحه مرزی تعریف می‌کند به طوری که در آن هیچگونه ورودی و خروجی جریان وجود ندارد.

symmetryPlane

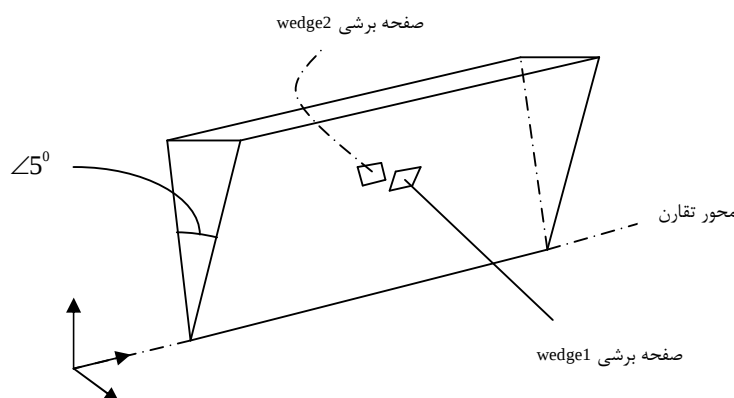
این نوع از شرط مرزی برای صفحات متقارن کاربرد دارد.

empty

اغلب هندسه مسایل در OpenFOAM به صورت سه بعدی تعریف می‌شود. برای حل مسایل در حالت دو بعدی و یا یک بعدی، می‌توان با تعیین شرط مرزی "empty" برای هر مرزی که صفحه آن عمود بر مرزهای انتخابی می‌باشد، حل را به صورت دو یا یک بعدی انجام داد.

wedge

در حالت تقارن محوری برای نمونه دو بعدی، شرط مرزی برای صفحات برشی از نوع "wedge" انتخاب می‌شود. همانطور که در شکل زیر مشاهده می‌شود برای صفحات برشی که با هم زاویه 5 درجه می‌سازند این نوع از شرط مرزی به کار گرفته شده است.



شکل ۶-۹ شکل ج-۱ استفاده از شرط مرزی wedge برای صفحات برشی در هندسه متقارن محوری

Processor

اگر کد در حالت موازی و بر روی تعدادی از پردازنده اجرا شود لازم است که شبکه مورد نظر تقسیم شود تا هر پردازنده تعداد برابری از سلولها را مورد پردازش قرار دهد. مرز بین قسمت‌های مختلف شبکه تقسیم شده از نوع "processor" تعریف می‌شود.

- شرط مرزی از نوع "Primitive type"

انواع شرط مرزی از نوع مقدماتی (Primitive) در جدول (ج-۲) با ذکر کلید واژه و همچنین توضیح مختصری از آن جهت استفاده در مرزها آورده شده است.

جدول (ج-۲) انواع شرط مرزی مقدماتی برای میدان‌های متغیر

کلید واژه	توصیف شرط مرزی برای میدان متغیر	نوع شرط مرزی
value	مقداری برای میدان تعیین شود.	fixedValue
gradient	گرادیان عمود بر میدان تعیین شود.	fixedGradient
*	گرادیان عمود بر میدان، صفر باشد.	zeroGradient
*	میدان برای صفحه مرزی، از میدان‌های دیگر بدست آید.	calculated
refValue	ترکیبی از شرط مرزی fixedvalue/fixedGradient وابسته به مقدار valueFraction	mixed
refGradient		
valueFraction	شرط ترکیبی با valueFraction	directionMixed
value		

• شرط مرزی از نوع "Derived type"

انواع مختلفی از این نوع شرایط مرزی در OpenFOAM وجود دارد. تعداد بسیاری از آن در جدول (ج-۳) لیست شده است. برای دستیابی به لیست کامل آن می‌توان به آدرس زیر در نرم افزار رجوع نمود.

\$FOAM_SRC/finiteVolume/fields/fvPatchFields/derived

جدول (ج-۳) انواع شرط مرزی ترکیبی برای میدان‌های متغیر

شرط مرزی ترکیبی از fixedValue		
نوع شرط مرزی	توصیف شرط مرزی	کلیدواژه تعیین داده
movingWallVelocity	مرز متحرک	value
pressureInletVelocity	با مشخص بودن فشار در ورودی، مقدار سرعت از جریان قابل حصول می‌باشد.	value
pressureDirectInletvelocity	با مشخص بودن فشار در ورودی، مقدار سرعت از جریان در راستای ورودی (inletDirection) قابل حصول می‌باشد.	value
		inletDirection
surfaceNormalFixedValue	تعیین یک بردار عمود بر صفحه مرزی با مقدار آن	value
totalPressure	فشار کل ... می‌باشد. هنگامی که سرعت تغییر کند نتیجتاً فشار نیز تغییر می‌کند.	P0
turbulentInlet	محاسبه تغییرات نوسانی بر پایه مقدار متوسط	referenceField
		fluctuationScale
نوع استخراجی از fixedGradient/zeroGradient		
fluxCorrectedVelocity	مولفه‌های عمود بر بردار سرعت در ورودی، از جریان عبوری محاسبه می‌شود.	value
wallBuoyantPressure	بر اساس گرادیان فشار اتمسفری، فشار fixedGradient انتخاب می‌گردد.	*
نوع استخراجی از mixed		
inletOutlet	مقادیر بین سرعت و فشار بین fixedValue و zeroGradient در جهت بردار سرعت تغییر می‌کند.	inletValue,value
outletInlet	مقادیر بین سرعت و فشار بین fixedValue و zeroGradient در جهت بردار سرعت تغییر می‌کند.	outletValue,value
pressureInletOutletVelocity	ترکیبی از pressureInletVelocity و inletOutlet	value
pressureDirectedInletOutletVelocity	ترکیبی از pressureDirectedInletVelocity و inletOutlet	value
pressureTransmissive	امواج فشاری مافوق صوت با فشار p انتشار می‌یابد.	pInf
supersonicFreeStream	ضربات شوک به صورت مورب به محیط اطراف انتشار یابد.	pInf,Tinf,Uinf

پیوست چ

نحوه انجام عملیات ریاضی و عمل‌گرهای تانسوری در نرم‌افزار OpenFOAM

نحوه به کار گیری عملیات ریاضی و توابع در نرم‌افزار، به ترتیب در جداول زیر آورده شده است.

دقت شود که در این جداول، عبارات a و b نمایان‌گر تانسور از مرتبه دلخواه و s اسکالر و T

نشان‌دهنده تانسور و N تعداد عناصر تانسور را نشان می‌دهد [۳۶].

جدول (چ-۱) عملیات ریاضی در نرم‌افزار OpenFOAM

عملیات ریاضی	توضیح	توصیف ریاضی	تعریف در OpenFOAM	شرط
جمع	$a_i + b_i$	$a + b$	$a + b$	*
تفریق	$a_i - b_i$	$a - b$	$a - b$	*
ضرب اسکالر در بردار	Sa_i	Sa	$S*a$	*
تقسیم بردار به اسکالر	a_i / s	a / S	S / a	*
ضرب داخلی	$a_i b_i$	$a.b$	$a \& b$	a, b تانسور مرتبه یک به بالا
ضرب خارجی	$\varepsilon_{ijk} a_j b_k$	$a \times b$	$a^{\wedge} b$	a, b تانسور مرتبه یک
ضرب دوتایی	$a_i b_j$	$a \otimes b$	$a * b$	a, b تانسور مرتبه یک به بالا
ضرب داخلی برای دو تانسور	$a_{ij} b_{ij}$	$a : b$	$a \&\& b$	a, b تانسور مرتبه دو به بالا
مربع بزرگی بردار	$a_i a_i$	$ a ^2$	$\text{magSqr}(a)$	*
بزرگی بردار	$\sqrt{a_i a_i}$	$ a $	$\text{mag}(a)$	*
توان بردار	$(a_i)^n$	a^n	$\text{pow}(a, n)$	$n = 0, 1, \dots, 4$
متوسط مولفه‌های تانسوری	$\overline{a_i}$	$\overline{a}$	$\text{cmptAv}(a)$	$i = 1, \dots, N$
ماکزیمم مولفه‌های بردار	$\max(a_i)$	$\max(a)$	$\max(a)$	$i = 1, \dots, N$
مینیمم مولفه‌های بردار	$\min(a_i)$	$\min(a)$	$\min(a)$	$i = 1, \dots, N$
ضرب مولفه‌های تانسوری	$C_i = a_i b_i$	$C = \text{scale}(a, b)$	$\text{scale}(a, b)$	*
تبدیلات تانسوری	$a^* = T_{ij} a_i$	$a^* = Ta$	$\text{transform}(T, a)$	*

جدول (چ-۲) تعریف توابع در نرم‌افزار OpenFOAM

توابع	نمایش ریاضی	تعریف در OpenFOAM
تابع علامت	$\text{sgn}(s)$	$\text{sign}(s)$
مثبت بولی	$s \geq 0$	$\text{pos}(s)$
منفی بولی	$s < 0$	$\text{neg}(s)$
حد	اسکالر n $\text{limit}(s, n)$	$\text{limit}(s, n)$
جذر	$\sqrt{s}$	$\text{sqrt}(s)$
تابع نمایی	$\exp s$	$\exp(s)$
لگاریتم	$\ln s$	$\log(s)$
لگاریتم بر مبنای ۱۰	$\log_{10}^s$	$\log10(s)$
سینوس	$\sin s$	$\sin(s)$
کسینوس	$\cos s$	$\cos(s)$
تانژانت	$\tan s$	$\tan(s)$
آرک سینوس	$a \sin s$	$a \sin(s)$
آرک کسینوس	$a \cos s$	$a \cos(s)$
آرک تانژانت	$a \tan s$	$a \tan(s)$
سینوس هیپربولیک	$\sinh s$	$\sinh(s)$
کسینوس هیپربولیک	$\cosh s$	$\cosh(s)$
تانژانت هیپربولیک	$\tanh s$	$\tanh(s)$
آرک سینوس هیپربولیک	$a \sinh s$	$a \sinh(s)$
آرک کسینوس هیپربولیک	$a \cosh s$	$a \cosh(s)$
آرک تانژانت هیپربولیک	$a \tanh s$	$a \tanh(s)$
تابع خطا	$\text{erf } s$	$\text{erf}(s)$
مکمل تابع خطا	$\text{erfc } s$	$\text{erfc}(s)$
لگاریتم تابع گاما	$\ln \Gamma s$	$\lg \text{amma}(s)$
تابع بسل نوع یک از مرتبه صفر	$J_0 s$	$j0(s)$
تابع بسل نوع یک از مرتبه یک	$J_1 s$	$j1(s)$
تابع بسل نوع دو از مرتبه صفر	$Y_0 s$	$y0(s)$
تابع بسل نوع دو از مرتبه یک	$Y_1 s$	$y1(s)$

در معادلات حاکم بر جریان، از عملگرهایی نظیر گرادیان، دیورژانس، لاپلاسین و غیره استفاده می‌شود. بدین منظور چگونگی نحوه تعریف این عملگرها در نرم افزار OpenFOAM در این قسمت آورده شده است. همچنین یادآوری می‌شود که تنظیمات مربوط به چگونگی گسسته سازی این عملگرها جهت حل عددی، در فایل "fvScheme" نمونه مطالعاتی مورد نظر قرار دارد. عملیات ریاضی بر روی تانسور مرتبه دوم و همچنین نحوه تعریف عملگرهای دیفرانسیلی موجود در معادلات به ترتیب در جداول زیر آورده شده است [۳۶].

جدول (چ-۳) عملیات تانسوری بر روی تانسور مرتبه دو در نرم افزار OpenFOAM

نام عملگر	نمایش ریاضی	تعریف در OpenFOAM
ترانهاده تانسور	T^T	$T.T()$
تانسور قطری	$diag\ T$	$diag\ (T)$
مجموع عناصر قطر تانسور	$tr\ T$	$tr\ (T)$
تانسور انحرافی	$dev\ T$	$dev\ (T)$
تانسور متقارن	$symm\ T$	$symm\ (T)$
تانسور پادمتقارن	$skew\ T$	$skew\ (T)$
دترمینان تانسور	$\det\ T$	$\det\ (T)$
کوفکتور	$cof\ T$	$cof\ (T)$
معکوس تانسور	$inv\ T$	$inv\ (T)$
بردار دوگان تانسور پادمتقارن	$*\ T$	$*\ T$

جدول (چ-۴) تعریف عملگرهای دیفرانسیلی در نرم افزار OpenFOAM

fvm::/fvc::	نمایش ریاضی	Implicit/Explicit	عملگر
Laplacian (phi)	$\nabla^2 \phi$	Imp/Exp	لاپلاسین
Laplacian (Gamma, phi)	$\nabla \cdot \Gamma \nabla \phi$		
ddt (phi)	$\frac{\partial \phi}{\partial t}$	Imp/Exp	مشتق زمانی
ddt (rho, phi)	$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}$		
d2dt (rho, phi)	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \frac{\partial \phi}{\partial t})$	Imp/Exp	مشتق دوم زمانی
div (psi, scheme)	$\nabla \cdot (\psi)$	Imp/Exp	جمله جابه جایی
div (psi, phi, word)	$\nabla \cdot (\psi \phi)$		
div (psi, phi)			
div (chi)	$\nabla \cdot x$	Exp	دیورژانس
grad (chi)	$\nabla \cdot x$	Exp	گرادیان
gGrad (phi)	$\nabla \cdot (\psi \phi)$		
lsGrad (phi)			
snGrad (phi)			
snGradCorrection (phi)			
sqrGradGrad (phi)	$ \nabla \nabla \phi ^2$	Exp	مربع گرادیان گرادیان
curl (phi)	$\nabla \times \phi$	Exp	کرل
Sp (rho, phi)	$\rho \phi$	Imp	چشمه
SuSp (rho, phi)		Imp/Exp	

در معادلات با مشتقات جزئی، هر جمله توسط دو کلاس به نام‌های "fvm" (finite Volume Method) و "fvc" (finite Volume Calculus) تعریف می‌گردد. این دو کلاس مشخص می‌کند که در گسسته سازی جملات معادله مورد نظر، از مقادیر معلوم در زمان قبلی (Explicit) بهره گرفته شود یا به صورت مجهول در زمان جاری (Implicit) گسسته سازی انجام شود. بدین ترتیب، اگر از کلاس "fvc" در مقابل نام یک عملگر استفاده شود، محاسبات به صورت "Explicit" انجام خواهد شد و اگر کلاس حل بر پایه "fvm" باشد محاسبات به صورت "Implicit" انجام می‌شود. برای مثال، معادله دیفیوژن در حالت گذرا به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \kappa \nabla^2 \phi \quad (\text{ج-۱})$$

برای حل این معادله به صورت "Implicit"، به صورت زیر عمل می‌شود.

```
Solve(fvm::ddt(phi) == kappa*fvm::laplacian(phi))
```

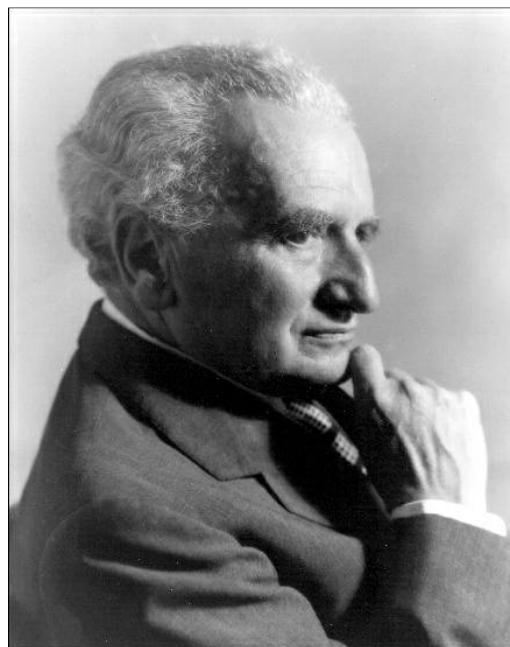
همانطور که مشاهده می‌شود برای گسسته سازی جمله لاپلاسیان به صورت "Implicit"، از کلاس "fvm" استفاده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که برای گسسته سازی جمله لاپلاس به صورت "Explicit" نیز، به صورت زیر عمل می‌شود.

```
Solve(fvm::ddt(phi) == kappa*fvc::laplacian(phi))
```

که در واقع از کلاس "fvc" برای گسسته سازی جمله لاپلاس به صورت "Explicit" استفاده شده است.

پیوست ه

زندگی‌نامه تئودور فون کارمن (۱۸۸۱-۱۹۶۳)



تئودور فون کارمن در ۱۱ می سال ۱۸۸۱ در بوداپست مجارستان به دنیا آمد. مادرش هلن کن^۱ و پدرش مورکارمن^۲ استاد فلسفه بود. شاگرد سابق پدر، به تئودور در خانه درس می‌داد. سه برادر بزرگتر تئودور دریافتند که او در شش سالگی یک نابغه ریاضی است، چرا که محاسبات سنگینی را ذهنی انجام می‌داد. اما پدرش از ترس اینکه فرزندش آدم عجیبی شود و کارش به انجام حقه‌های ریاضی بکشد، به اصرار، تئودور را چند سال از ریاضیات دور نگه داشت و او را مجبور به مطالعه جغرافیا، تاریخ و ادبیات کرد. تئودور در سن نه سالگی وارد مدرسه مینتا گیمناسیون^۳ در بوداپست شد که مخصوص تحصیل بچه‌های باهوش بود. کارمن پس از پایان تحصیلات در مینتا، جایزه

¹ Helen kohn

² More Karman

³ Minta Gymnasium

اوتوس^۱ را به عنوان بهترین دانش‌آموز در ریاضیات و علم در کل مجارستان دریافت کرد. اکنون بهترین زمان بود که کارمن به مطالعه ریاضیات که به شدت به آن علاقه داشت بپردازد. اما پدرش نظر دیگری داشت و او را به تحصیل دروس مهندسی در پلی‌تکنیک پالاتین جوزف^۲ در بوداپست- که بعدها به دانشگاه فنی بوداپست تبدیل شد- فرستاد. در همان سال آغاز تحصیل، پدرش دچار مشکلات عصبی شد و همین امر باعث گشت که کارمن به هیچ وجه نتواند مخالف نظر پدرش عمل نماید. او در سال ۱۹۰۲ از پلی‌تکنیک در رشته مهندسی مکانیک فارغ‌التحصیل شد. عنوان رساله او این بود: «حرکت یک میله سنگین که در انتهای مدور خود توسط یک صفحه افقی نگه داشته می‌شود». جالب این است که با اینکه کارمن دارای استعداد فوق‌العاده‌ای در زمینه تئوری بود، اما آزمایشگر ماهر نبوده. با اینکه شاید بتوان گفت پدر کارمن او را از مسیر اصلی شکوفایی استعدادش منحرف کرد، اما تئودور همواره به جنبه ریاضیاتی مهندسی علاقه وافری داشت نه به بخش عملی آن.

پس از فارغ‌التحصیلی، کارمن مجبور شد به خدمت سربازی برود و یک سال را در قسمت توپخانه ارتش مجارستان بگذراند. سپس در ۱۹۰۳ به عنوان استادیار رشته هیدرولیک در پلی-تکنیک منصوب شد و سه سال بعد را در همین منصب گذراند. کارمن طی این سال‌ها مسئولیت دیگری نیز داشت و به عنوان مشاور کارخانه سازنده لوکوموتیو آلمان فعالیت می‌کرد. تحقیقات او در این زمان در مورد سیالات و فشردگی سازه‌ها که کاربردهای گسترده‌ای داشتند، بود. یکی از مهمترین کارهای او، مقاله‌ای است که در سال ۱۹۰۶ با عنوان «تئوری کمانش و آزمایشات فشار بر روی ستون‌های بلند و باریک» به چاپ رسید.

¹ Eotvos

² Palatine Joseph

در سال ۱۹۰۶، او توانست یک بورسیه دو ساله را از طرف آکادمی علوم مجارستان کسب کند و در نتیجه بوداپست را ترک و برای انجام مطالعات خود راهی گوتینگن^۱ شد، جایی که به شدت تحت تأثیر کلاین^۲، هیلبرت^۳ و البته پرانتل قرار گرفت. وی در مارس ۱۹۰۸ سفری کوتاه به پاریس داشت. در آنجا با مشاهده پروازهای هوانوردی، به آیرودینامیک علاقمند شد و تصمیم به استفاده از استعداد ریاضی خود در آن گرفت. تحقیقات او در این زمان شامل مدل‌های ریاضی کمانش سازه‌های بزرگ با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی یک پرس هیدرولیکی بزرگ بود که توسط شرکت کراپ^۴ به گوتینگن اهدا شده بود. کارمن به علت همین تحقیق، مدرک دکترای خود را در سال ۱۹۰۸ دریافت کرد.

با ساخته شدن یک تونل باد برای شرکت هواپیمایی زپلین^۵ در گوتینگن، کارمن فرصت ورود به آیرودینامیک را بدست آورد. در سال ۱۹۱۱، با استفاده از نتایج حاصل از تونل باد، تحلیلی را از گردابه‌های پشت یک جسم انجام داد که اکنون به خیابان گردابه کارمن معروف است. این نام از آنجا ناشی می‌شود که گردابه‌ها در دو طرف ردیف دوگانه و در آرایشی مشابه چراغ‌های دو طرف یک خیابان، قرار می‌گیرند. البته این تنها موضوع تحقیق کارمن در آن دوران نبود. او به همراه ماکس بورن^۶ به مطالعه اتم‌های ارتعاشی نیز پرداخت. آن‌ها در این تحقیق مهم از تحلیل سه‌بعدی فوریه و شرایط مرزی متناوب استفاده کردند. کارمن در سال ۱۹۱۲ کرسی مکانیک را در کالج شمنیتز^۷ در اسلواکی پذیرفت. اما از آنجا که این کالج در آن زمان چندان مجهز نبود و محققان فعالی نیز نداشت، بعد از یک ترم تدریس به گوتینگن بازگشت. در سال ۱۹۱۳ کارمن ریاست

¹ Göttingen

² Klein

³ Hilbert

⁴ Krupp

⁵ Zeppelin

⁶ Max Born

⁷ Schemnitz

مؤسسه هوانوردی در آخن آلمان را بر عهده گرفت و کرسی مکانیک و هوا- فضا را نیز در دانشگاه فنی آخن پذیرفت. او در آنجا یک تیم تحقیقاتی بسیار قوی با تجهیزات مجهز از جمله یک تونل باد، تشکیل داد. او به کار تئوری در زمینه طراحی هواپیما می‌پرداخت و دانشجویان و همکارانش کارآمدی طرح‌های او را با آزمایش، بررسی می‌کردند.

با آغاز جنگ جهانی اول در ۱۹۱۴، کارمن به خدمت نظامی در ارتش مجارستان فرا خوانده شد و با توجه به تخصصش، به طراحی هواپیماهای نظامی و هلی‌کوپتر پرداخت. با پایان یافتن جنگ، کارمن برای بهبود وضع تدریس علم، در مجارستان باقی ماند. اما در سال ۱۹۱۹ به علت مسائل سیاسی که در آن زمان گریبانگیر مجارستان شده بود، به آخن بازگشت و با حمایت مالی شرکت‌های تولیدکننده هواپیما در آلمان به مطالعه مقاومت سیالات، اغتشاش و لیفت به منظور طراحی بهتر هواپیماها پرداخت.

در پی دعوت رئیس مؤسسه کالیفرنیا، کارمن برای ارائه مشاوره در طراحی یک تونل باد، در ۱۹۲۶ راهی آمریکا شد. از سال ۱۹۲۸ او شش ماه از سال را در آمریکا و شش ماه دیگر را در آخن سپری می‌کرد تا اینکه در سال ۱۹۳۰ به او پیشنهاد ریاست تمام وقت آزمایشگاه هوا- فضا در مؤسسه تکنولوژی کالیفرنیا شد. کارمن به رغم علاقه خود به آخن و به دلیل حوادث سیاسی آلمان، پیشنهاد را پذیرفت و مادر و خواهر کوچکترش را نیز با خود به آمریکا برد، ضمن اینکه کارمن هیچ‌گاه ازدواج نکرد.

در سال ۱۹۳۳، مؤسسه علوم هوا- فضای آمریکا به تحقیقات او در زمینه مکانیک سیالات، تئوری اغتشاش و پرواز مافوق صوت ادامه داد. کارمن نیز به بررسی کاربرد ریاضیات در مهندسی، ساختار هواپیماها و فرسایش خاک می‌پرداخت. کارهای او منجر به تحقیق در مورد موشک‌ها شد و هنگامی که مشاهده شد آلمان موشک‌های پیشرفته‌ای را برای مقاصد نظامی در طول جنگ جهانی دوم داراست، دولت آمریکا نیز بودجه بسیار زیادی را برای تحقیقات در مورد موشک در نظر گرفت.

در نوامبر سال ۱۹۴۴، از این بودجه برای تأسیس آزمایشگاه رانش جت به ریاست کارمن استفاده شد. این آزمایشگاه بعدها در برنامه‌های فضایی، بسیار مورد استفاده قرار گرفت.

در سال ۱۹۴۹ کارمن از هر دو مقام ریاست خود استعفا کرد و استاد بازنشسته در کالتک^۱ شد، هرچند همچنان به عنوان مشاور نیروی هوایی آمریکا و ناتو^۲ کار می‌کرد و در کنفرانس‌های بین‌المللی هوا-فضا بسیار فعال بود.

کارمن در طول زندگی خود افتخارات زیادی کسب کرد. او نشان لیاقت آمریکا را در ۱۹۴۶ و مدال طلایی فرانکلین را در ۱۹۴۸ دریافت کرد و اولین کسی بود که مدال ملی علم را در ۱۹۶۳ دریافت نمود. وی همچنین افتخارات زیادی از فرانسه، واتیکان، آلمان، یونان، بریتانیا، اسپانیا و هلند دریافت کرد.

کارمن فردی دوست‌داشتنی، شوخ‌طبع و نسبت به دوستانش بسیار وفادار بود. او معتقد بود دانشمندان نباید دولت‌ها را مجبور و حتی متقاعد کنند که از تصمیمات آنها پیروی نمایند. سرانجام تئودور فون کارمن در ۷ می سال ۱۹۶۳ در آخن آلمان دار فانی را وداع گفت [۴۷].

¹ Caltech

² Nato

مراجع

منابع و مراجع

- [۱] شیخی نارانی (۱۳۷۱) "بررسی خواص، جریان، انتقال حرارت و اختلاط سیالات غیر نیوتنی"، چاپ اول، جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر، تهران.
- [2] Bird, B. R., Armstrong, R. C., and Hassager, O. (1987). **"Dynamics of Polymer Liquids"**, Vol. 1, Second Edition, John Wiley & Sons. Huio.
- [3] Malkin, A. Y. (1994), **"Rheology Fundamentals"**, First Edition, Chem. Tech. Publishing, Toronto.
- [4] Kundu, P., Cohen. I. (2004) **"Fluid Mechanics"**, Second Edition, Amsterdam, Boston.
- [5] Aref, H. (2006), **"Vortex Dynamics of Wakes"**, Proceeding of the IUTAM Symposium on Hamiltonian dynamics", Vol. 6, Moscow, Russia.
- [6] Schlichting, H., Gersten, K., Krause, H., Oertel, C. (2004). **"Boundary-layer Theory"**, 8th edition Springer.
- [7] Fung, Y. C. **"An Introduction to the theory of aeroelasticity"**, New York, 1993.
- [8] [Online] http://www.omega.com/literature/transactions/volume4/T9904-09-ELEC.html#elec_3
- [۹] محمود نوروزی (۱۳۸۸)، رساله دکتری، "بررسی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در مجاری خمیده دارای مقطع مستطیلی و در حالت های ایستا و چرخان"، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [10] V. Strouhal, Ann. Über eine besondere Art der Tonerregung Phy. Chem. (Leipzig) Neue Folge Bd 5(216) (1878) 10.
- [11] K. Hiemenz, Die Grenzschicht an einem in dem gleichförmigen Flüssigkeitsstrom eingetauchten geraden Kreiszylinder, Ph.D. Thesis, University of Göttingen, Germany.
- [12] T. von Karman, Über den Mechanismus dem Widerstands, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt, Gottingen Nachr. Math. Phys. KI. 12 (1912) 509.
- [13] D.F. James, A.J. Acosta. **"The laminar flow of dilute polymer solutions around circular cylinder"**, J. Fluid Mech. 42 (1970) 269-288.
- [14] D.F. James, O.P. Gupta, **"Drag on circular cylinders in dilute polymer solutions"**, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 67 (1971) 62-73.
- [15] J. M. Broadbent, B. Mena, **"Slow flow of an elastic-viscous fluid past cylinders and spheres"**. Chem. Eng. H. 8 (1974) 11-19.
- [16] G. E. Gadd, **"Effects of long-chain molecule additives in water on vortex streets"**, Nature 211 (1966) 169-170.

- [17] B. Mena, B. Caswell, **"Slow flow of an elastic-viscous fluid past an immersed body"**, Chem. Eng. J. 8 (1974) 125-134.
- [18] T. Sarpkaya, P. G. Rainey, R. E. Kell, **"Flow of dilute polymer solutions about circular cylinders"**, J. Fluid Mech. 57 (1973) 177-208.
- [19] A. Koniuta, P. M. Adler, J. M. Piau, **"Flow of dilute polymer solutions around circular cylinders"**, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 7 (1980) 101-106.
- [20] O. Manero, B. Mena, **"On the flow of viscoelastic liquids past a circular cylinder, Non-Newtonian Fluid Mech"**. 9 (1981) 379-387.
- [21] J. S. Ultman, M. M. Denn, **"Slow viscoelastic flow past submerged objects"**, Chem. Eng. J. 2 (1971) 81-89.
- [22] V. N. Kalashnikov, A.M. kudin, **"Karman vortices in the flow of drag reduction polymer solotions"**. Nature 225 (1970) 445-446.
- [23] H. Usui, T. Shibata, Y. Sano, **"Karman vortex behind a circular cylinder in dilute polymer solotions"**. Chem. Eng. Jpn. 13 (1980) 77-79.
- [24] O. Codat, M. Lebey, **"Shear instability inhibition in a cylinder wake by local injection of a viscoelastic fluid"**. Phys. Fluids 11, (1999) 494-496.
- [25] O. Codat, S. Kumar, **"Experimental Characterization of Viscoelastic Effects on Two-and Three-Dimensional Shear Instabilities"**. J. Fluid Mech, (2000) 151-172.
- [26] J. R. Cressman, Q. Bailey, **"Goldburg, Modification of a vortex street by a polymer additive"**, Phys. Fluids 13 (2001) 867-871.
- [27] P.M. Coelho, F.T. Pinho, **"Vortex shedding in cylinder flow of shear thinning fluids II. Flow characteristics"**. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 110, (2003) 177-193.
- [28] P. J. Oliveira, **"Method for time-dependent simulations of viscoelastic flows: vortex shedding behind cylinder"**, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 101 (2001) 113-137.
- [29] M. Sahin, R.G. Owens, **"On the effects of viscoelasticity on two-dimensional vortex dynamics in the cylinder wake"**. J. Non-newtonian Fluid Mech, 123 (2004) 21-139.
- [30] D. Richter, G. Iaccarino, E. Shaqfeh, **"Simulations of three-dimentional viscoelastic flows past a circular cylinder at moderate Reynolds numbers"**. J. Fluid Mech, (2010) 1-28.
- [31] H. Giesekus, **"A simple constitutive equation for polymer fluids based on the concept of deformation-dependent tensorial mobility"**. J. Non-newtonian Fluid Mech, 11 (1982) 69-109.
- [32] R. B. Bird and J. M. Wiest, **"Constitutive equations for polymeric liquids"**, Annu. Rev. Fluid Mech. 27 (1995) 169-193.
- [33] M. M. Cross, **"Rheology of non-Newtonian Fluids: A New Flow Equation for Pseudoplastic Systems"**, Journal of Colloid Science, 20 (1965) 417-437.

- [34] H. S. Dou, N. P. Thien, “**Viscoelastic flow past a confined cylinder: Instability and velocity inflection**”, J. Chemical Engineering Science, 62 (2007) 3909-3929.
- [35] The Open Source CFD Toolbox OpenFOAM, “**User Guide**”, GNU Free Documentation License, 2010.
- [36] The Open Source CFD Toolbox OpenFOAM, “**Programmers Guide**”, GNU Free documentation, 2009.
- [37] علی سررشته‌داری، سید رسول واردی (۱۳۹۰)، تالیف کتاب، “**مدل‌سازی جریان سیالات و انتقال حرارت با استفاده از نرم افزار OpenFOAM**”، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [38] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, “An Introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method” Longman, Harlow, UK, 1995.
- [39] H. Nilsson, H. jak. source forge. OpenFOAM extensions. [Online] <http://www.sourceforge.net/projects/openfoam-extend/files> .
- [40] VMware. [Online] <http://www.vmware.com/products/player>.
- [41] C. H. K. Williamson, “**Oblique and parallel modes of vortex dislocations due to a point disturbance in a planer wake**”, J. Fluid Mech. 206 (1989) 579.
- [42] Malkin, A. Y. (1994), “**Rheology Fundamentals**”, First Edition, Chem. Tech. Publishing, Toronto.
- [43] Huilgol, R. R. and Phan-Thien, N. (1997), “**Fluid Mechanic of Viscoelasticity**”, First Edition, Elsevier.
- [44] Phan-Thien, N. (2002), “**Understanding Viscoelasticity**”, First Edition, Springer, Berlin.
- [45] Tanner, R. I. (2000), “**Engineering Rheology**”, Second Edition, Oxford University Press, London.
- [46] [Online] <http://www.cfd-online.com>
- [47] [Online] www.bookrags.com/biography/theodore-von-karman/

Abstract

The study of flow around a circular cylinder is an interesting and practical topic in fluid dynamics that nominated as a benchmark problem of the computational flow communities. This problem has no singularity, either in the geometry or in the boundary condition. Also, cylinder flow is rich in physical effects such as shear layers, recirculation regions, boundary layer and vortex dynamics. The present work represents the numerical investigation for time-dependent inertial viscoelastic flows around a bluff body. The simulation is performed by a parallelized finite volume method (FVM) using second order in both the spatial and the temporal discretization. Here, The Giesekus rheological model is used as a constitutive equation of viscoelastic flow. Since the viscoelastic functions of the Giesekus rheological model are perfect and is found to have the ability for describing the normal stress differences, it is used as a constitutive equation. The results for the viscoelastic flow are compared with those for a Newtonian flow. Frequency of the vortex shedding is shown to be attenuated by elasticity of the fluid, while the recirculation region behind the cylinder is elongated before reaching the critical Reynolds number. These results are in agreement with recent experimental and numerical observations. Our particular interest is the effect of mobility parameter on the stability of two dimension viscoelastic flows past a confined cylinder. In particular, our results reveal that the greater the maximum mobility parameters, the larger the value of the vortex shedding frequency. Thus, the stabilization brought to bear by the presence of the Giesekus would appear to depend strongly upon the mobility parameters of the polymer solution.

Keywords: Time-dependent, Viscoelastic flow, Giesekus, Vortex shedding, Frequency.



Shahrood University of Technology
Engineering Department

Numerical Investigation of Viscoelastic Flow around a Circular Cylinder

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Science**

By:
Seyyed Rasoul Varedi

Supervisor:
Dr. Mohammad Javad Maghrebi
Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

Advisor:
Dr. Mahmood Norouzi

Jan 2011