

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی عددی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک حول یک سیلندر
دایروی

نگارنده: مرتضی نایبی پور

استاد راهنما

دکتر علی عباس نژاد

استاد مشاور

دکتر محمود نوروزی

بهمن ۱۳۹۷

تقدیم ہے

خدائی کہ آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و بہ کسانی کہ عشقان را در وجودم دید

شکر و قدردانی:

در اینجا لازم می‌دانم از همه کسانی که این جانب را در امر انجام این پایان نامه یاری نموده‌اند به خصوص جناب آقای دکتر علی عباس نژاد

، جناب آقای دکتر محمود نوروزی و جناب آقای علی مینانین که همواره از راهنمایی و مشاوره های آن بهره مند بوده‌ام شکر و قدردانی نمایم.

همچنین لازم می‌دانم از همه دوستانی که در این مدت این جانب را یاری نموده‌اند شکر نمایم.

اینجانب مرتضی نایبی پور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی عددی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک حول یک سیلندر دایروی تحت راهنمایی دکتر علی عباس نژاد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده 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 است و مقالات مستخرج بانام "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 بافت های 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 افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این تحقیق، مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک حول یک سیلندر دایروی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مدل‌سازی، از نرم‌افزار اوپن‌فوم استفاده شده است. برای حل مسئله از حلگر توسعه‌یافته رئوفوم و مدل لگاریتمی گزیکس بهره گرفته شده است. لزجت پلیمری و زمان رهایی از تنش، به صورت تابعی از دما تعریف شده است. برای نخستین بار، بررسی انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر با مدل لگاریتمی گزیکس پرداخته می‌شود. اثرات اعداد رینولدز، الاستیک، پرانتل و برینکمن و همچنین ضریب تحرک و نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل، بر روی مشخصه‌های جریان و حرارت مورد بررسی قرار گرفته شده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش مقادیر عدد استروهال، دامنه نوسانات ضریب برآ، ضریب پسا و ناسلت متوسط می‌شود. و با افزایش ضریب تحرک، مقدار عدد استروهال ثابت می‌ماند، و مقادیر دامنه نوسانات ضریب برآ، ضریب پسا و ناسلت متوسط به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شده است که افزایش لزجت پلیمری باعث افزایش مقادیر عدد استروهال، دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا می‌شود، درحالی‌که مقدار ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج می‌توان به کاهش مقدار ناسلت متوسط با افزایش عدد پرانتل و تاثیر زیاد عدد برینکمن بر روی مقدار ناسلت اشاره کرد.

کلید واژگان: سیال ویسکوالاستیک، سیلندر دایروی، اوپن‌فوم، انتقال حرارت، مدل لگاریتمی

گزیکس، حلگر توسعه‌یافته رئوفوم

۱- فصل اول: مقدمه و پیشینه تحقیق	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- سیالات غیرنیوتنی	۴
۱-۲-۱- سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان	۴
۲-۲-۱- سیالات غیرنیوتنی تابع زمان	۶
۳-۲-۱- سیالات ویسکوالاستیک	۶
۳-۱- توصیف جریان عبوری از روی سیلندر دایروی	۸
۴-۱- مروری بر مطالعات گذشته	۱۲
۵-۱- تحقیق حاضر	۲۱
۶-۱- نوآوری کار حاضر	۲۱
۷-۱- ساختار کلی	۲۱
۲- فصل دوم: روابط فیزیکی و فرآیند حل در نرم افزار اوپن فوم	۲۳
۱-۲- مقدمه	۲۴
۲-۲- معادلات حاکم	۲۴
۳-۲- نیروهای وارده بر روی سیلندر	۲۶
۱-۳-۲- نیروهای فشاری	۲۶
۲-۳-۲- نیروهای ناشی از خاصیت ویسکوز	۲۷
۳-۳-۲- محاسبه نیروی کل	۳۰
۴-۳-۲- ضرایب نیروهای برآ و پسا	۳۰
۴-۲- پارامترهای بی بعد در این تحقیق	۳۰
۵-۲- روابط لازم برای محاسبه ناسلت	۳۲
۶-۲- خواص سیال وابسته به دما	۳۳

۳۴	۷-۲- فرضیات مسئله
۳۴	۸-۲- شرایط مرزی و اولیه
۳۶	۹-۲- فرآیند حل در نرم افزار اوپن فوم
۳۷	۱-۹-۲- پیش پردازش
۳۷	۲-۹-۲- پردازش
۳۷	۳-۹-۲- پس پردازش
۳۷	۱۰-۲- معرفی حلگر مورد استفاده در این تحقیق
۴۰	۱۱-۲- گسسته سازی معادلات حاکم
۴۳	۳- فصل سوم: اعتبارسنجی و نتایج
۴۴	۱-۳- مقدمه
۴۴	۲-۳- هندسه مسئله
۴۵	۳-۳- استقلال حل از شبکه محاسباتی
۴۹	۴-۳- استقلال حل از گام زمانی
۵۱	۵-۳- اعتبار سنجی
۵۲	۱-۵-۳- اعتبارسنجی جریان
۵۴	۲-۵-۳- اعتبارسنجی انتقال حرارت
۵۵	۶-۳- مطالعه اثر پارامترها
۵۵	۱-۶-۳- بررسی خاصیت الاستیک بر مشخصه های جریان و حرارت
۶۰	۲-۶-۳- بررسی اثر رینولدز بر مشخصه های جریان و حرارت
۸۰	۳-۶-۳- بررسی اثر پراتل بر مشخصه های جریان و حرارت
۸۲	۴-۶-۳- بررسی اثر عدد برینکمن بر مشخصه های جریان و حرارت
۸۴	۵-۶-۳- بررسی اثر ضریب تحرک بر مشخصه های جریان و حرارت
۸۸	۶-۶-۳- بررسی اثر نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل بر مشخصه های جریان و حرارت
۹۷	۴- فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۹۸	۱-۴- مقدمه

۹۸.....نتیجه‌گیری ۲-۴

۹۹.....پیشنهادها ۳-۴

۱۰۱.....مراجع ۵-

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳: نتایج حاصل از پنج شبکه محاسباتی در $Pr = 200$, $De = 80$ و $Re = 100$ ۴۸
- جدول ۲-۳: مقایسه نتایج کار حاضر با کار الیویرا [۲۰] ۵۳
- جدول ۳-۳: مقایسه نتایج کار حاضر با کار بارتی و همکاران [۱۱] ۵۴
- جدول ۴-۳: نتایج حاصل از افزایش خاصیت الاستیک در $Re = 100$, $Pr = 200$, $Br = -100$, $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۵۶
- جدول ۵-۳: نتایج حاصل از افزایش عدد رینولدز در $De = 80$, $Pr = 200$, $Br = -100$, $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۶۱
- جدول ۶-۳: مقایسه نتایج سیال ویسکوالاستیک با سیال نیوتنی ۶۲
- جدول ۷-۳: تغییرات نیروهای پسا و برآ با افزایش رینولدز در $De = 80$, $Pr = 200$, $Br = -100$, $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۶۲
- جدول ۸-۳: نتایج حاصل از افزایش عدد پیرانتل در $De = 80$, $Re = 100$, $Br = -100$, $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۸۱
- جدول ۹-۳: نتایج حاصل از افزایش عدد برینکمن در $De = 80$, $Re = 100$, $Pr = 200$, $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۸۳
- جدول ۱۰-۳: نتایج حاصل از افزایش ضریب تحرک در $De = 80$, $Re = 100$, $Br = -100$, $Pr = 200$ و ۸۵
- جدول ۱۱-۳: نتایج حاصل از افزایش نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $De = 80$, $Re = 100$ ۸۹

شکل ۱-۱: تغییرات تنش برشی برحسب نرخ برش [۱]	۵
شکل ۲-۱: تغییرات لزجت برحسب نرخ برش [۱]	۵
شکل ۳-۱: طرح شماتیک جریان برشی ساده [۴]	۷
شکل ۴-۱: جریان عبوری از روی سیلندر در رینولدز کمتر از عدد ۴ [۵]	۸
شکل ۵-۱: جریان عبوری از روی سیلندر در رینولدز بین ۴ تا ۴۰ [۵]	۹
شکل ۶-۱: جریان عبوری از روی سیلندر در عدد رینولدز بین ۸۰ تا ۲۰۰ [۵]	۱۰
شکل ۷-۱: خطوط گردابه‌ای فون کارمن [۷]	۱۰
شکل ۸-۱: تغییرات عدد ناسلت نسبت به رینولدز برای اعداد برینکمن مختلف [۱۲]	۱۳
شکل ۹-۱: هندسه و شرایط مرزی در کار گلانی و دهیمن [۱۳]	۱۴
شکل ۱۰-۱: تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز [۱۳]	۱۵
شکل ۱۱-۱: تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد رینولدز و شاخص توانی برای شرایط مرزی دما ثابت [۲۲]	۱۸
شکل ۱-۲: نیروی فشاری وارد بر سیلندر [۳۴]	۲۷
شکل ۲-۲: مؤلفه‌های سرعت و سهم سرعت‌های مماسی [۳۴]	۲۸
شکل ۳-۲: نیروی ویسکوز و مؤلفه‌های برآیند سرعت مماسی در جهت پادساعت‌گرد [۳۴]	۲۹
شکل ۴-۲: سیلندر دایروی در یک جریان یکنواخت [۳۵]	۳۲
شکل ۶-۲	۳۶
شکل ۵-۲: فرآیند کلی تحلیل یک مساله در اوپن‌فوم	۳۶
شکل ۷-۲: الگوریتم حل کردن حلگر rheoFoam [۳۷]	۳۸
شکل ۱-۳: نمای شماتیک از هندسه مسئله [۲۰]	۴۴
شکل ۲-۳: شبکه‌بندی شبکه با ۱۰۰۰۰ المان	۴۵
شکل ۳-۳: شبکه‌بندی شبکه با ۸۶۰۰۰ المان	۴۶
شکل ۴-۳: بزرگنمایی شبکه با ۸۶۰۰۰ المان	۴۶
شکل ۵-۳: شبکه‌بندی شبکه با ۱۸۹۰۰۰ المان	۴۷
شکل ۶-۳: تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد برای ۵ شبکه در $Pr = 200$ و $De = 80$ و $Re = 100$	۴۸
شکل ۷-۳: تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان بی‌بعد برای ۵ شبکه در $Pr = 200$ و $De = 80$ و $Re = 100$	۴۹
شکل ۸-۳: نمودار تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد برای سه گام زمانی مختلف در $Pr = 200$ و $De = 80$ و $Re = 100$	۵۰
شکل ۹-۳: نمودار تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان بی‌بعد برای سه گام زمانی مختلف در $Pr = 200$ و $De = 80$ و $Re = 100$	۵۱
شکل ۱۰-۳: مقایسه تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد شده در $Re = 100$ و $De = 80$ و $L2 = 100$	۵۲

- شکل ۱۱-۳: مقایسه تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان بی‌بعد شده در $Re = 100$ و $De = 80$ و $L2 = 100$ ۵۳
- شکل ۱۲-۳: مقایسه تغییرات ناسلت متوسط نسبت به رینولدز در $Pr = 200$ با کار بارتی و همکاران [۱۱] ۵۵
- شکل ۱۳-۳: تغییرات ضریب برآ متوسط نسبت به افزایش خاصیت الاستیک در $Re = 100$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۵۷
- شکل ۱۴-۳: تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار الاستیک ۵۸
- شکل ۱۵-۳: تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار الاستیک ۵۹
- شکل ۱۶-۳: تغییرات تنش بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار الاستیک ۶۰
- شکل ۱۷-۳: نمودار تغییرات عدد استروهال نسبت به عدد رینولدز در $De = 80$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ۶۳
- شکل ۱۸-۳: نمودار تغییرات ضریب برآ متوسط نسبت به عدد رینولدز در $De = 80$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۶۴
- شکل ۱۹-۳: نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به رینولدز در $De = 80$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۶۵
- شکل ۲۰-۳: نمودار تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان برای مقدار رینولدزهای مختلف در $De = 80$ ۶۶
- شکل ۲۱-۳: نمودار تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان برای رینولدزهای مختلف در $De = 80$ ۶۷
- شکل ۲۲-۳: تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار رینولدزهای مختلف ۶۸
- شکل ۲۳-۳: تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار رینولدزهای مختلف ۶۹
- شکل ۲۴-۳: تغییرات تنش بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار رینولدزهای مختلف ۶۹
- شکل ۲۵-۳: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۶۰ ۷۰
- شکل ۲۶-۳: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ ۷۱
- شکل ۲۷-۳: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۵۰ ۷۱
- شکل ۲۸-۳: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۰ ثانیه ۷۲
- شکل ۲۹-۳: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۱ ثانیه ۷۳
- شکل ۳۰-۳: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۲ ثانیه ۷۳
- شکل ۳۱-۳: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۳ ثانیه ۷۴
- شکل ۳۲-۳: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۴ ثانیه ۷۴
- شکل ۳۳-۳: نمودار تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد در رینولدز ۱۰۰ در $De = 80$ ۷۷
- شکل ۳۴-۳: نمایش خطوط جریان حول سیلندر برای عدد رینولدز ۱ ۷۸
- شکل ۳۵-۳: نمایش گردابه‌های تشکیل شده در عدد رینولدز ۵ ۷۹
- شکل ۳۶-۳: نمایش گردابه‌های تشکیل شده در عدد رینولدز ۱۰ ۷۹
- شکل ۳۷-۳: نمایش گردابه‌های تشکیل شده در عدد رینولدز ۲۰ ۸۰
- شکل ۳۸-۳: نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به افزایش عدد پرانتل در $De = 80$ ، $Re = 100$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$ ۸۲
- شکل ۳۹-۳: نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به افزایش عدد برینکمن در $De = 80$ ، $Re = 100$ ۸۴

- شکل ۳-۴۰: تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف... ۸۶
- شکل ۳-۴۱: تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف... ۸۷
- شکل ۳-۴۲: تغییرات تنش بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف... ۸۸
- شکل ۳-۴۳: نمودار تغییرات استروهاال نسبت به نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $De = 80$ ، $Re = 100$ ۹۰
- شکل ۳-۴۴: نمودار تغییرات ضریب برآ متوسط نسبت به نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $De = 80$ ۹۱
- شکل ۳-۴۵: نمودار تغییرات ضریب پسا متوسط نسبت به نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $De = 80$ ۹۲
- شکل ۳-۴۶: نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $De = 80$ ۹۲
- شکل ۳-۴۷: تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار نسبت لزج‌های مختلف ۹۳
- شکل ۳-۴۸: تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار نسبت لزج‌های مختلف ۹۴
- شکل ۳-۴۹: تغییرات تنش بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار نسبت لزج‌های مختلف ۹۵

فهرست علائم

علائم لاتین

$A(m^2)$	مساحت
$a_c(m)$	عرض سلول
a_T	ضریب جابه‌جایی منحنی
Br	عدد برینکمن
Bn	عدد بینگهام
$c_p \left(\frac{m^2}{s^2 k}\right)$	ظرفیت گرمای ویژه در معادله انرژی
C_p	ضریب فشار
C_L	ضریب برآ
C_D	ضریب پسا
$d(m)$	قطر سیلندر
$D\left(\frac{m^2}{s}\right)$	ضریب نفوذ گرما در معادله انرژی
De	عدد دپورا
El	عدد الاستیک
$\eta_s \left(\frac{kg}{ms}\right)$	لزجت نیوتنی
$\eta_p \left(\frac{kg}{ms}\right)$	لزجت پلیمری

$\eta\left(\frac{kg}{ms}\right)$	مجموع لزجت پلیمری و نیوتنی
$F_D(N)$	نیروی پسا
$F_{fr}(N)$	نیروی اصطکاکی
$F_L(N)$	نیروی برآ
$F_v(N)$	نیروی لزج
$f\left(\frac{1}{s}\right)$	فرکانس
(k)	ثابت دمایی در ضریب جابه‌جایی منحنی
$h\left(\frac{kg}{s^3k}\right)$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
$K\left(\frac{kgm}{s^3k}\right)$	ضریب هدایت
L^2	پارامتر توسعه پذیری در مدل ساختاری
Nu	عدد ناسلت
n	شاخص مدل توانی
$p\left(\frac{m^2}{s^2}\right)$	فشار بر واحد چگالی
Pr	عدد پرانتل
$q''\left(\frac{kg}{s^3}\right)$	شار حرارتی بر واحد سطح در واحد زمان
Re	عدد رینولدز
St	عدد استروهل
$T(k)$	دما

$T_w(k)$	دمای دیوار
$T_{in}(k)$	دمای سیال ورودی
$T_{\infty}(k)$	دمای محیط
$t(s)$	زمان
$\tau_p(\frac{kg}{ms^2})$	تنش پلیمری
$\tau_p(\frac{kg}{ms^2})$	تنش نیوتنی
$U(\frac{m}{s})$	سرعت جریان
$U_{in}(\frac{m}{s})$	سرعت جریان ورودی
We	عدد وایزنبرگ
$z(m)$	ضخامت سلول

علائم یونانی

β	نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل
α	ضریب تحرک یا پویایی
$\lambda(s)$	زمان رهایی از تنش
$\rho(\frac{kg}{m^3})$	چگالی
$\eta(\frac{kg}{ms})$	لزجت
$\tau(\frac{kg}{ms^2})$	تنش برشی

$\dot{\gamma}(\frac{1}{s})$

نرخ برش

زیر نویس ها

fr

اصطکاکی

p

پلیمری

ref

مرجع

s

نیوتنی

tg

مماسی

v

لزوج

w

دیوار

∞

محیط

۱- فصل اول: مقدمه و پیشینه تحقیق

سیال نیوتنی^۱ سیالی است که در آن تنش تنها دارای رابطه خطی با نرخ برش است و در این سیال نسبت تنش برشی به نرخ برش را لزجت^۲ می‌گویند. 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 لزج داشت. از این تئوری روابط تحلیلی متنوعی برای جریان سیالات غیر چسبنده بدون اصطکاک در هندسه‌های مختلف ارائه گردید. روابط به‌دست‌آمده 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 فناوری، 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، پранتل نشان داد که چگونه می‌توان این دو شاخه از مکانیک سیالات را به یکدیگر پیوند داد. در سال ۱۹۰۴ وی نظریه لایه‌مرزی را مطرح نمود و طی آزمایش‌های بسیار ساده‌ای نشان داد که در جریان حول یک جسم، اثر لزجت و اصطکاک سیال در یک لایه بسیار نازک نزدیک سطوح قابل‌ملاحظه است، اما در ناحیه دور از جسم می‌توان از اثر لزجت 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 پیشرفت صنایع مختلف، مهندسان و دانشمندان با سیالاتی روبرو شدند که رفتار برشی آن‌ها با استفاده از مدل سیال نیوتنی قابل توصیف نبود. به‌طور خلاصه، انحرافات سیال از رفتار نیوتنی به شکل زیر قابل‌بیان هستند:

- وجود تنش تسلیم در ماده

^۱ Newtonian fluid

^۲ Viscosity

• وابستگی لزجت 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 گاه 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 است و علم رئولوژی روی چگونگی جریان یافتن سیالات و واکنش آن‌ها در برابر نیروهای مکانیکی بحث می‌کند. به مرور زمان دانش رئولوژی در جنبه‌های مختلف گسترش یافت 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 پوشش‌دهنده، 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 روان کار حفاری و ... گسترش یافته است. [۳] با توجه به وسعت صنایعی که با سیالات غیرنیوتنی^۳ روبرو هستند، مشخص است که شناخت علم رئولوژی از ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برخوردار است. در این میان، مطالعه سیالات ویسکوالاستیک^۴ به سبب پیچیدگی‌های حاکم بر رفتار فیزیکی و نیز کاربردهای گسترده صنعتی، نظامی و پزشکی از اهمیت خاصی برخوردار است.

^۱ Rheology

^۲ Rheos

^۳ Non newtonian fluids

^۴ Viscoelastic fluids

۱-۲- سیالات غیر نیوتنی

جریان سیالات غیر نیوتنی در علم مکانیک سیالات از اهمیتی ویژه‌ای برخوردار است. رابطه تنش و نرخ برش در سیالات نیوتنی از معادله (۱-۱) به دست می‌آید.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

η لزجت سیال نیوتنی است و مستقل از تنش برشی (τ) و نرخ برش ($\dot{\gamma}$) است و تنها به جنس ماده، دما و فشار بستگی دارد و در دما و فشار ثابت، لزجت این سیالات همواره مقداری ثابت است. از جمله سیالات نیوتنی می‌توان به گازها، مایعات آلی ساده، محلول نمک‌های غیر آلی با وزن مولکولی پایین، نمک‌ها و فلزات مذاب، اشاره کرد. سیالاتی که از این معادله پیروی نمی‌کنند سیالات غیر نیوتنی است. [۱] سیالات غیر نیوتنی عموماً به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند، که در ادامه توضیح هر یک آورده شده است.

۱-۲-۱- سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان

در این مواد لزجت فقط تابعی از نرخ برش است و معمولاً سیال نیوتنی تعمیم یافته^۱ گفته می‌شود. سیالات مستقل از زمان به دو گروه مواد دارای تنش تسلیم^۲ و مواد فاقد تنش تسلیم تقسیم می‌شوند. از جمله مواد دارای تنش تسلیم می‌توان به سیالات بینگهام^۳ اشاره کرد، در این سیالات تا حدی از تنش به نام تنش تسلیم، سیال مانند جامدات عمل نموده و از تنش تسلیم به بعد، سیال رفتار نیوتنی از خود بروز می‌دهد. سوسپانسیون شن در آب نمونه‌ای از این مواد است. سیالات فاقد تنش تسلیم به سیالات شبه پلاستیک^۴ و سیالات دایلاتانت^۵ تقسیم می‌شود. سیالات شبه پلاستیک

^۱ Generalized Newtonian Fluids

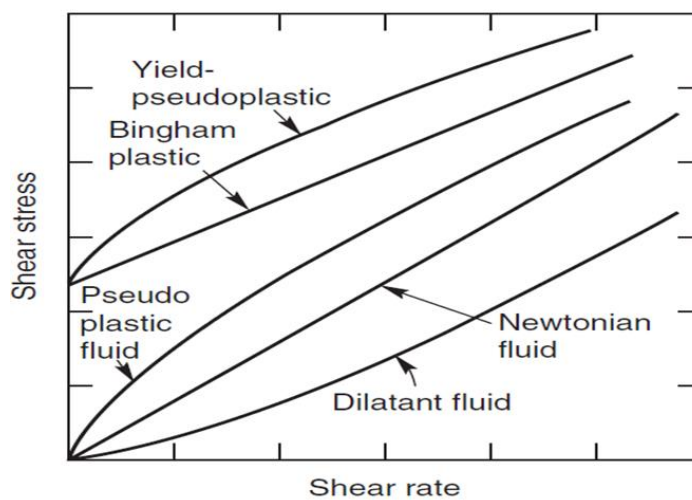
^۲ Yield Stress

^۳ Bingham Fluids

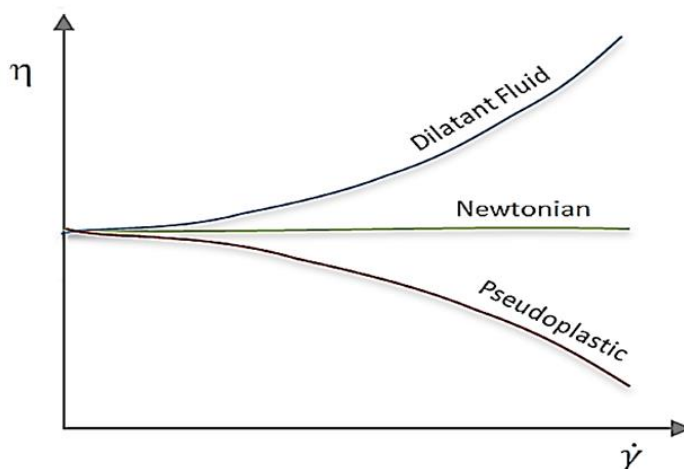
^۴ Pseudoplastic

^۵ Dilatant

مانند محلول‌ها و مذاب‌های پلیمری و سوسپانسیون‌های رنگ‌ها و خمیر کاغذ که لزجت ظاهری سیال با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد. در سیالات دایلاتنت نیز لزجت ظاهری سیال با افزایش نرخ برش افزایش می‌یابد. نشاسته، سوسپانسیون‌های میکا، توده و شن‌های ساحلی از جمله سیالات دایلاتنت است. شکل ۱-۱ رفتار تنش در برابر نرخ برش را برای انواع سیالات نمایش می‌دهد و در شکل ۲-۱ تغییرات لزجت بر حسب نرخ برش برای سیالات نیوتنی، شبه‌پلاستیک و دایلاتنت نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱: تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برش [۱]



شکل ۲-۱: تغییرات لزجت بر حسب نرخ برش [۱]

۱-۲-۲- سیالات غیرنیوتنی تابع زمان

سیالات غیرنیوتنی تابع زمان به دو گروه سیالات تیکسوتروپیک^۱ و سیالات رئوپکتیک^۲ تقسیم می‌شوند. تیکسوتروپی به پدیده کاهش لزجت ظاهری سیالات تحت تنش برشی ثابت با گذشت زمان گفته می‌شود. تیکسوتروپی نوعی کار نرمی است که در آن با حذف تنش برشی خارجی، لزجت به حالت قبل بازمی‌گردد. رئوپکسی به پدیده افزایش لزجت سیالات تحت تنش برشی ثابت با گذشت زمان گفته می‌شود. [۱]

۱-۲-۳- سیالات ویسکوالاستیک

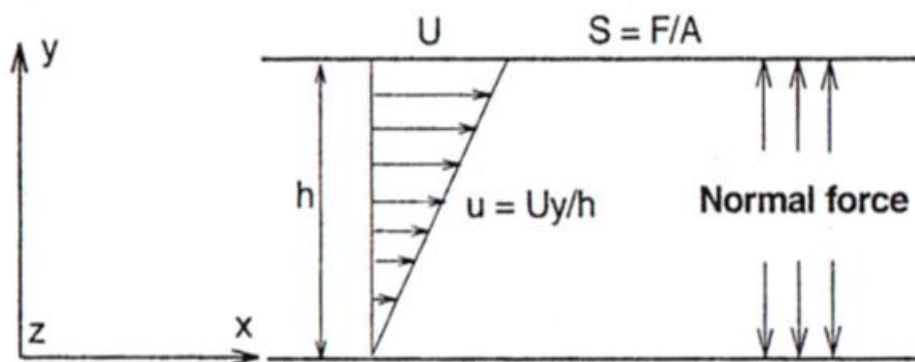
این دسته از سیالات هم خاصیت لزج و هم خاصیت الاستیک را هم‌زمان دارا می‌باشند. این مواد ممکن است در موقعیتی مانند سیال ویسکوز و در موقعیتی دیگر همچون جامد الاستیک قرار بگیرند. به‌عنوان مثال محلول‌های پلیمری، مذاب‌های پلیمری و صابون رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند. اکثر سیالات ویسکوالاستیک، بخش ویسکوز آن‌ها، شبه‌پلاستیک است. ساده‌ترین آزمایشی که در مورد رفتار سیال ویسکوالاستیک می‌توان به آن اشاره کرد، آزمایش جریان برشی است. در شکل ۱-۳ جریان سیال ویسکوالاستیک بین دو صفحه موازی نشان داده شده است که در آن صفحه بالایی با سرعت U حرکت می‌کند. اگر صفحه بالایی ناگهان متوقف شود، در مواد ویسکوالاستیک برخلاف سیالات نیوتنی، تنش برشی به‌طور آنی صفر نمی‌شود بلکه مدت‌زمانی طول می‌کشد تا تنش برشی صفر شود که به این بازه زمانی، زمان رهایی از تنش^۳ می‌گویند. همچنین برای سیال ویسکوالاستیک، چنانچه در حین حرکت صفحه بالایی تنش برشی به‌طور آنی قطع شود، صفحه بالایی کمی به عقب برمی‌گردد، درحالی‌که در سایر سیالات توقف صفحه بالایی نیز آنی است. درواقع

^۱ Thixotropic

^۲ Rheopetic

^۳ Stress Relaxation Time

بازگشت صفحه بالایی ناشی از خاصیت الاستیک ماده است و مدت زمانی که طول می کشد که با قطع تنش، تغییر شکل صفر شود، زمان تأخیر در تغییر شکل^۱ نام دارد. بنابراین می توان ادعا کرد که مواد ویسکوالاستیک دارای حافظه جهت دار از تغییر شکل های خود بوده و از حالت قبلی خود اطلاع دارند. [۴]



شکل ۱-۳: طرح شماتیک جریان برشی ساده [۴]

معمولاً برای بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک، از دو عدد بی بعد دبورا^۲ و وایزنبرگ^۳ استفاده می کنند. عدد دبورا، بر اساس نسبت زمان رهایی از تنش به زمان مشخصه جریان تعریف می شود و مطابق رابطه ی (۲-۱) بیان می شود. عدد وایزنبرگ، بر اساس نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک جامد به نیروی حاصل از لزجت سیال مطابق رابطه ی (۳-۱) بیان می شود.

$$De = \lambda f = \frac{\lambda}{T} \quad (۲-۱)$$

$$We = \lambda \dot{\gamma} \quad (۳-۱)$$

که در آن، λ زمان رهایی از تنش، T زمان مشخصه جریان، f فرکانس مشخصه جریان و $\dot{\gamma}$ نرخ

^۱ Strain Retardation Time

^۲ Deborah

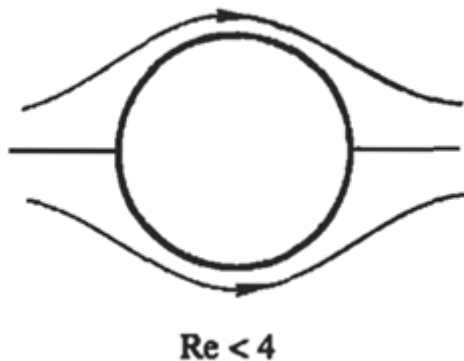
^۳ Weissenberg

برش جریان است. بنابراین در یک سیال بخصوص بالا بودن عدد وایزنبرگ به معنای غیرنیوتنی بودن این سیال است.

۱-۳- توصیف جریان عبوری از روی سیلندر دایروی

مطالعه جریان بر روی سیلندر، از موضوعات جالب توجه و کاربردی در دینامیک سیالات است و از جمله مسائل بنیادین در این عرصه محسوب می شود. این مسئله هیچ گونه محدودیتی در هندسه و شرایط مرزی اعمال شده ندارد. همچنین ساختار و الگوی جریان، به شدت تحت تأثیر عدد رینولدز^۱ (Re) بوده و تنوع تغییرات آن در رژیم های مختلف جریان زیاد است.

به طوری که در جریان خزشی^۲ سیال نیوتنی (رینولدز کمتر از ۴) به دلیل شرط عدم لغزش^۳ بر روی سیلندر، گردابه هایی^۴ به وجود می آیند که با توجه به فرض استوکس، این گردابه ها در جریان پخش شده و قدرت نفوذ و حرکت در جریان را ندارند. که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴: جریان عبوری از روی سیلندر در رینولدز کمتر از عدد ۴ [۵]

در اعداد رینولدز بین ۴ تا ۴۰، دو گردابه متقارن ایستا در پشت سیلندر به وجود می آید که با افزایش عدد رینولدز، اندازه آنها نیز بزرگ تر می گردد. رژیم جریان در این محدوده از اعداد رینولدز،

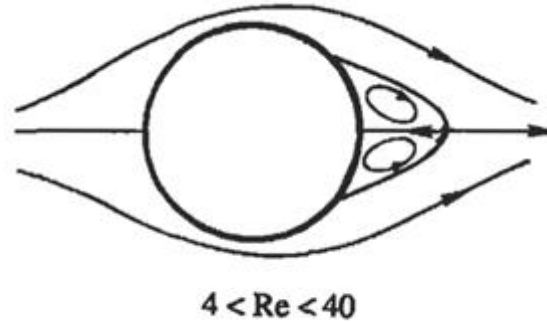
^۱ Reynolds number

^۲ Creeping flow

^۳ Non-slip

^۴ Vortices

کاملاً آرام^۱ است که در شکل ۱-۵ آورده شده است.



شکل ۱-۵: جریان عبوری از روی سیلندر در رینولدز بین ۴ تا ۴۰ [۵]

با زیاد شدن عدد رینولدز (بزرگتر از ۴۰) گردابه‌ها ناپایدار شده، شروع به نوسان می‌کنند. در این رژیم از جریان، ناحیه جریان برگشتی^۲ پشت سیلندر، شامل دو ردیف از گردابه‌ها است که به صورت متناوب، یکی در بالا و دیگری در پایین سیلندر به وجود می‌آیند. شماتیکی از این پدیده، به هنگام عبور جریان از سیلندر دایره‌ای در شکل ۱-۶ آورده شده است. به الگوی پیدایش دو ردیف از گردابه‌ها در ناحیه پشت سیلندر، پدیده فون کارمن^۳ اطلاق می‌گردد.

^۱ Laminar

^۲ Wake

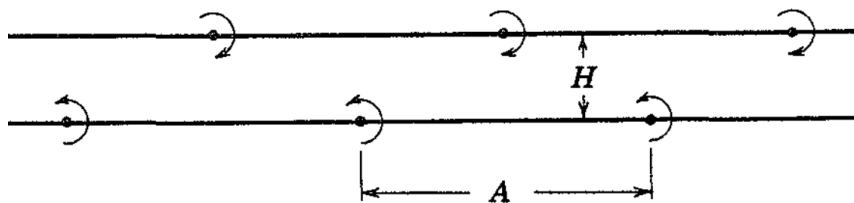
^۳ Von Kármán



$$80 < Re < 200$$

شکل ۶-۱: جریان عبوری از روی سیلندر در عدد رینولدز بین ۸۰ تا ۲۰۰ [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. [۶] که در شکل ۷-۱ نشان داده شده است.



شکل ۷-۱: خطوط گردابه‌ای فون کارمن [۷]

درواقع، هنگامی که عدد رینولدز جریان نیوتنی از حد مشخصی ($Re > 40$) فراتر رود، در اثر کوچک‌ترین شرایط ناپایداری، نقطه جدایش^۱ جریان حول جسم دستخوش تغییر شده و همین امر سبب می‌شود تا گردابه‌های متقارن که به شکل دنباله در پشت سیلندر به وجود آمده‌اند، در آستانه

^۱ Separation point

نوسان قرار گیرند (رینولدز بحرانی^۱). 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 به وجود 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 یا رزونانس^۲ در جسم به وجود 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، پرهایی را به صورت مارپیچ حول آن‌ها قرار می‌دهند. 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.

مسیر عبور گردابه‌های منظم در پشت جسم، سبب می‌شود تا اندازه‌گیری سرعت در ناحیه ویک جریان به‌طور غالب، نوسانی باشد. برای تعیین فرکانس جریان f_s از یک متغیر بی‌بعد تحت عنوان عدد استروهل^۳ (St) استفاده می‌شود، که به صورت رابطه (۴-۱) بیان می‌شود.

$$St = \frac{f_s d}{U_\infty} \quad (4-1)$$

که در رابطه بالا، d قطر سیلندر و U_∞ سرعت جریان آزاد است. یکی دیگر از موارد استفاده از پدیده فون کارمن در تعیین دبی جریان در خطوط نفت و گاز است که در حال حاضر، رویکرد کنونی صنعت به سمت آن است. بر مبنای این پدیده، جسم توپی شکلی را در مسیر جریان قرار داده و فرکانس گردابه‌های ایجادشده را از طریق فشارسنج‌های بسیار حساسی که در ناحیه جریان برگشتی در پشت جسم تعبیه‌شده، اندازه‌گیری می‌کنند. این دستگاه با نام تجاری

^۱ Critical Reynolds

^۲ Resonance

^۳ Strouhal number

ورتکس فلومتر مشهور است. از آنجایی که سرعت جریان متناسب با فرکانس تشکیل گردابه‌ها است، لذا می‌توان به وسیله ضرب سطح مقطع دستگاه در سرعت جریان به دست آمده، مقدار دبی گذرنده را محاسبه نمود. از جمله مزایای استفاده از دستگاه گردابه سنج جریان می‌توان به نداشتن جسم متحرک و هزینه نصب پایین آن اشاره نمود. این جریان‌سنج‌ها هیچ‌گونه قطعه متحرکی ندارند و تنها یک جسم توپی شکل در قسمت جلوی دستگاه و به صورت ثابت در مسیر جریان قرار می‌گیرد.

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 غیر نیوتنی است، لذا به منظور درک بهتر از چگونگی تأثیر خواص رئولوژیکی بر روی الگوی پیدایش گردابه‌های فون کارمن، مدل‌سازی این نوع از جریان نیز لازم و ضروری است.

۱-۴- مروری بر مطالعات گذشته

در این بخش مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص جریان و انتقال حرارت برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی حول سیلندر صورت گرفته است. مطالعات در خصوص جریان سیال نیوتنی بر روی سیلندر از حدود ۱۰۰ سال پیش آغاز شد. که از جمله معروف‌ترین این تحقیقات می‌توان به کارهای استروهل [۸] و فون کارمن [۹] اشاره نمود.

از جمله تحقیقات عددی می‌توان به کار چاکرابورتی و همکاران [۱۰] اشاره کرد که به مطالعه عددی جریان پایدار سیال نیوتنی تراکم ناپذیر پشت یک سیلندر دایروی در یک صفحه مستطیلی با استفاده از فلوننت^۱ برای مقادیر مختلف نسبت انسداد^۲ و عدد رینولدز بین ۰/۱ تا ۲۰۰ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش رینولدز برای مقدار ثابت نسبت انسداد، ضریب پسا^۳ کاهش می‌یابد. همچنین به این نتیجه رسیدند که ضریب پسا با کاهش نسبت انسداد، برای مقدار ثابت رینولدز افزایش می‌یابد.

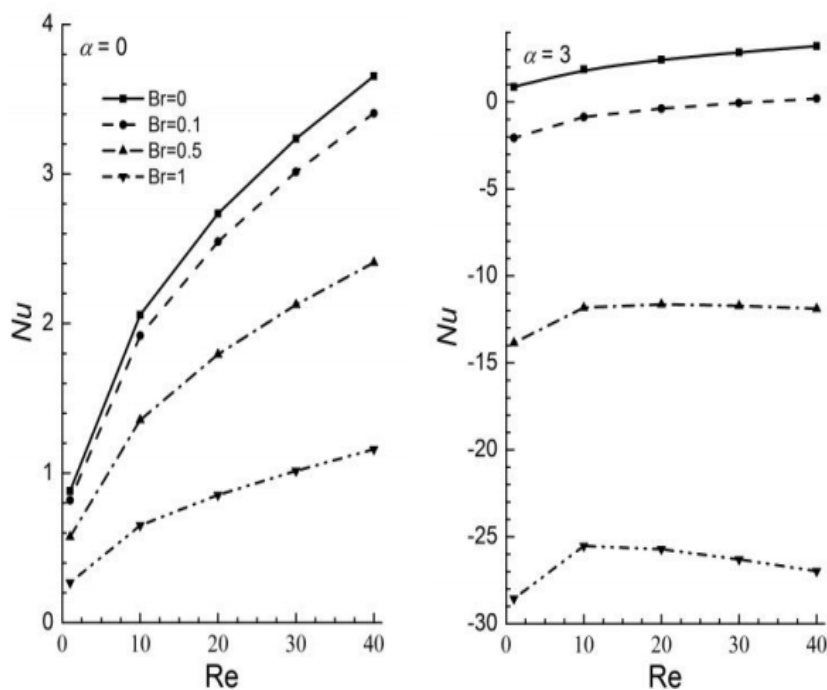
^۱ Fluent

^۲ Blockage

^۳ Drag

بررسی اثرات عدد پراتل و ۲ شرط مرزی حرارتی روی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری از یک سیلندر دایروی توسط بارتی و چاپرا [۱۱] پرداخته شد. و به این نتیجه رسیدند که با افزایش عدد رینولدز و پراتل، عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

در تحقیق دیگر سوارز و همکاران [۱۲] به بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بین یک سیلندر دوار و محیط سیال پیرامون پرداختند. این تحقیق برای اعداد رینولدز ($1 \leq Re \leq 40$) و سرعت چرخشی^۱ بی‌بعد ۰ تا ۳، اعداد پراتل^۲ (Pr) ۱ و ۱۰۰ و اعداد برینکمن^۳ ($0 \leq Br \leq 1$) مورد بررسی قرار گرفته است. و مشاهده کردند که با افزایش مقدار عدد برینکمن، مقدار عدد ناسلت^۴ محلی و متوسط کاهش می‌یابد، که در شکل ۸-۱ می‌توان این تغییرات را مشاهده کرد.



شکل ۸-۱: تغییرات عدد ناسلت نسبت به رینولدز برای اعداد برینکمن مختلف [۱۲]

^۱ Rotational velocities

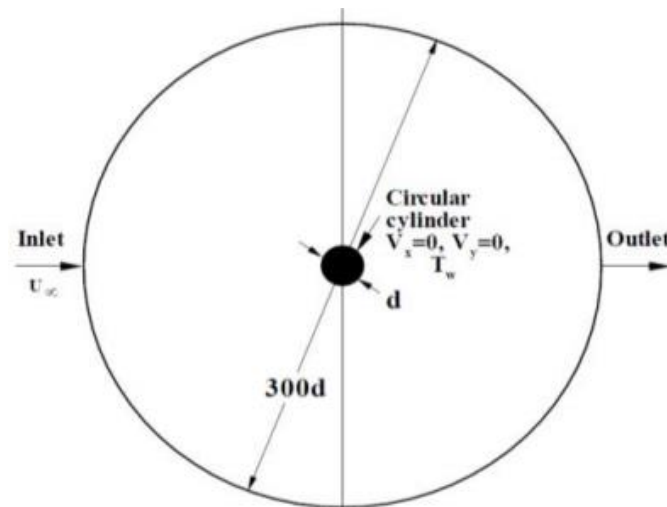
^۲ Prandtl number

^۳ Brinkman number

^۴ Nusselt number

دریافتند که نرخ انتقال حرارت، با افزایش اعداد پرانتل و رینولدز. و با کاهش مقدار عدد برینکمن و سرعت چرخشی، افزایش می‌یابد.

گلانی و دهیمن [۱۳] به بررسی جریان سیال و انتقال حرارت از یک سیلندر دایروی دوبعدی در محدوده جریان ناپایدار پرداختند. آن‌ها تأثیر عدد رینولدز روی مقادیر ضرایب پسا و برآ^۱، عدد استروهل و مشخصه‌های انتقال حرارت روی سیلندر دایروی برای عدد رینولدزهای ۵۰ تا ۱۸۰ و عدد پرانتل ۰/۷ مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی عددی آن‌ها با استفاده از روش حجم محدود مبتنی بر نرم‌افزار تجاری فلوئنت انجام گرفته‌شده است. هندسه و شرایط مرزی مورداستفاده در کار آن‌ها را می‌توان در شکل ۹-۱ مشاهده نمود.

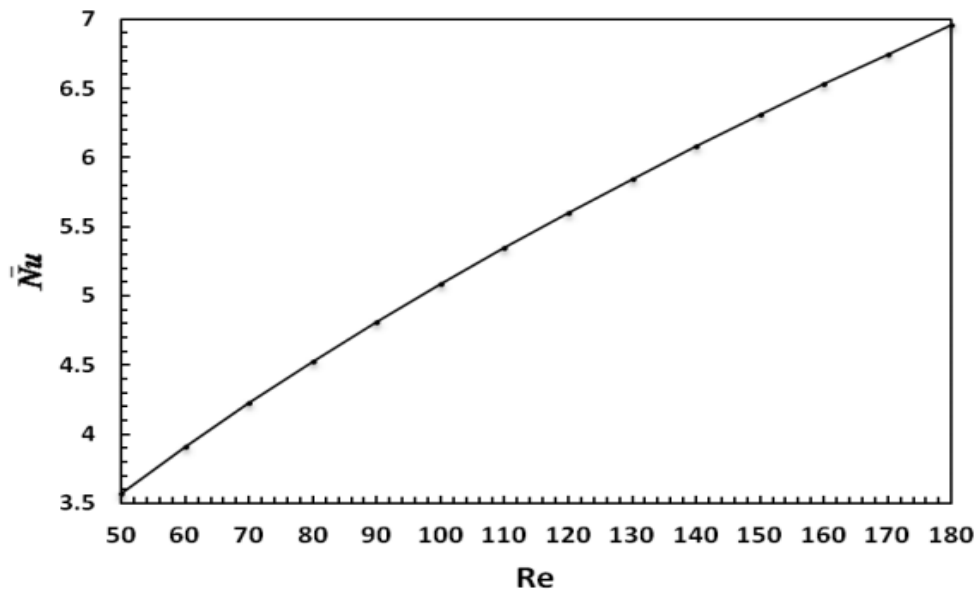


شکل ۹-۱: هندسه و شرایط مرزی در کار گلانی و دهیمن [۱۳]

آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب پسا کاهش و فرکانس حرکت گردابه ای افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده کردند که عدد ناسلت با افزایش مقدار عدد رینولدز برای مقدار

^۱ Lift

ثابت عدد پранتل (۰/۷) افزایش می‌یابد که در شکل ۱-۱۰ این تغییرات نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۰: تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز [۱۳]

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. می‌توان گفت که سهم تحقیقات صورت گرفته بر روی جریان عبوری از روی سیلندر برای جریان سیالات غیر نیوتنی از جمله سیالات ویسکوالاستیک در مقایسه با سیال نیوتنی بسیار کم و انگشت‌شمار است. لازم به ذکر است که به دلیل وجود خاصیت الاستیک و غیرخطی بودن لزجت نسبت به نرخ برش در سیالات ویسکوالاستیک، مدل‌سازی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر، خصوصاً در رینولدز بالاتر از رینولدز بحرانی بسیار پیچیده است. از این‌رو، تاکنون اکثر مطالعات انجام‌شده در خصوص جریان سیال غیرنیوتنی حول سیلندر، بیشتر بر پایه مشاهدات آزمایشگاهی بوده است.

گاد [۱۴] به بررسی تغییرات عدد استروهال با افزودن ماده پلیمری پلی ایزوبوتیلین^۱ در آب پرداخت. عدد رینولدز جریان در آزمایش وی ۲۴۰ و غلظت ماده پلیمری آن بین ۵ تا ۴۰ ppm

^۱ Polyisobutylene

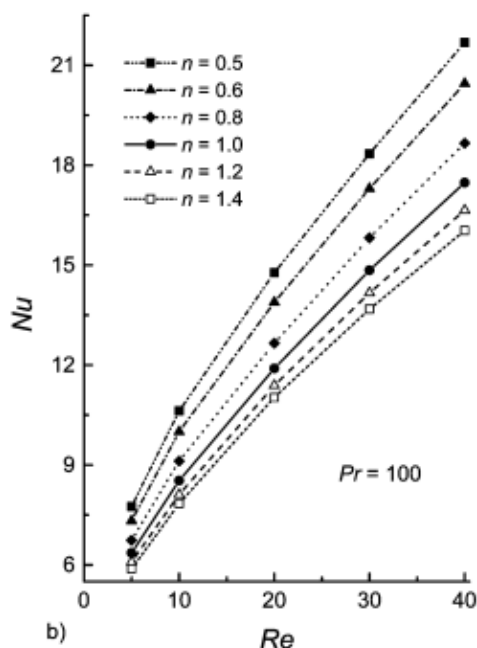
گزارش شده بود. او مشاهده کرد که فرکانس جریان به هنگام افزودن این ماده پلیمری به حلال نیوتنی کاهش می‌یابد. از دیگر مشاهدات وی این بود که با افزایش غلظت ماده پلیمری در آب، مقدار فرکانس جریان با کاهش بیشتری مواجه خواهد شد. آزمایشی مشابه، توسط کالاشنیکو و کودین [۱۵] در رینولدز ۴۰۰ و غلظت ۱۰۰ ppm انجام شد. آن‌ها نیز نشان دادند که فرکانس جریان در حضور ماده پلیمری به شدت کاهش می‌یابد. در آزمایش یوسی و همکاران [۱۶] شکل ناحیه جریان برگشتی برای حلال پلیمری با غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۴۰۰ ppm در رینولدز کمتر از ۳۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. ضمن تأیید نتایج کالاشنیک و کودین، آن‌ها نیز نشان دادند که با افزایش غلظت ماده پلیمری یا کاهش قطر سیلندر، مقدار عدد استروهال به شدت کاهش می‌یابد. از دیگر مطالعات آزمایشگاهی در این خصوص می‌توان به تحقیقات کودات و همکاران اشاره نمود. در دو تحقیق ارائه شده توسط وی، حلال پلیمری PEO از طریق حفره‌ای که در بالادست جریان سیال قرار گرفته است، به داخل آن هدایت می‌شود. در تحقیق کودات و لیبی [۱۷]، آن‌ها به بررسی جریان دوبعدی در رینولدز ۱۸۵ پرداختند و با وارد کردن حلال پلیمری با دو وزن مولکولی متفاوت، اثرات آن را بر مشخصه‌های جریان استخراج نمودند. آن‌ها مشاهده کردند 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، تأثیر محسوسی در مشخصات جریان مشاهده نشد. در تحقیق بعدی ارائه شده توسط کودات و کومار [۱۸]، تأثیرات خاصیت ویسکوالاستیکی سیال در تأخیر ناپایداری به صورت افزایش طول ناحیه جریان برگشتی ایجاد شده در پشت سیلندر مورد مطالعه قرار گرفت. در آزمایش انجام شده توسط کرسمن و همکاران [۱۹] برای جریان دوبعدی در عدد رینولدز ۴۰۰، آشکار شد که در حقیقت افزودنی‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا، به شدت فرکانس جریان را تحت تأثیر 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. از جمله تحقیقات عددی که به بررسی مشخصات جریان سیال ویسکوالاستیک در عبور از سیلندری ایستا می‌پردازد، می‌توان به کار الویرا [۲۰] اشاره نمود. مدل رئولوژیکی مورد استفاده در کار او، مدل FENE-CR بوده است. او به بررسی اثر خاصیت الاستیک، عدد رینولدز و پارامتر توسعه‌پذیری در مدل ساختاری پرداخت، مشاهده کرد که با افزایش خاصیت الاستیک، مقادیر دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا و عدد استروهل کاهش می‌یابد و همچنین مشاهده کرد که با افزایش عدد رینولدز، مقادیر استروهل و دامنه ضریب برآ افزایش و دامنه ضریب پسا کاهش می‌یابد. نوبرگا و همکاران [۲۱] به بررسی عددی و تئوری برای ارزیابی تأثیر خواص وابسته به دما روی مشخصه‌های حرارت و هیدرودینامیک جریان سیال ویسکوالاستیک برای معادله ساختاری فن تن تن^۱ پرداختند. سوارز و فریرا [۲۲] به بررسی عددی جریان تراکم ناپذیر سیال غیر نیوتنی از نوع مدل توانی^۲ بر روی سیلندر دایروی برای تعیین وابستگی ضرایب پسا و مشخصه‌های انتقال حرارت روی شاخص مدل توانی ($1/4 \leq n \leq 0/5$)، عدد پرانتل ($1 \leq pr \leq 100$) و عدد رینولدز ($5 \leq Re \leq 40$) پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ضریب پسا اصطکاکی با افزایش شاخص توانی، افزایش می‌یابد و با افزایش رینولدز کاهش می‌یابد. از جمله نتایج دیگر آن‌ها می‌توان به تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد رینولدز و شاخص توانی برای شرایط مرزی دما ثابت^۳ روی سیلندر برای مقدار پرانتل ۱۰۰ اشاره کرد که در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است.

^۱ Phan thien tanner

^۲ Power law

^۳ Constant temperature boundary condition



شکل ۱-۱: تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد رینولدز و شاخص توانی برای شرایط مرزی دما ثابت [۲۲]

دال و همکاران [۲۳] به مطالعه تأثیرات عدد رینولدز، عدد پرانتل، شاخص توانی و دو شرط مرزی حرارتی رایج روی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری از یک کره برای سیالات غیرنیوتنی مدل توانی در محدوده رینولدز ۵ تا ۲۰۰ در محدوده جریان پایدار پرداختند. تغییرات عدد ناسلت با زاویه از جلوی نقطه جدایش برای مقادیر مختلف عدد رینولدز، عدد پرانتل و شاخص توانی را به دست آوردند. و همچنین به این نتیجه رسیدند که عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز و عدد پرانتل و با کاهش شاخص توانی، افزایش می‌یابد. و به دست آوردن که مقدار عدد ناسلت همیشه برای شرط مرزی شار ثابت^۱ نسبت به شرط دما ثابت^۲ بالاتر است.

بارتی و همکاران [۲۴] به مطالعه عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری سیالات مدل توانی از یک سیلندر دایروی با استفاده از روش حجم محدود برای محدوده رینولدز ۵ تا ۴۰، شاخص توانی ۰/۶ تا ۲ و عدد پرانتل ۱ تا ۱۰۰۰ برای جریان پایدار پرداختند. از نتایج آن‌ها می‌توان به موارد زیر

^۱ UHF

^۲ CWT

اشاره کرد: (۱) عدد ناسلت محلی در جلوی سیلندر کاهش می‌یابد به طوری که رفتار سیال از رقیق برشی^۱ به غلیظ برشی^۲ تغییر می‌کند و بنابراین عدد پرانتل کاهش می‌یابد. (۲) مقادیر عدد ناسلت در جلوی نقطه جدایش وابستگی ضعیفی به شاخص توانی و شرایط مرزی حرارتی دارد. (۳) سیالات رقیق برشی انتقال حرارت بالاتری نسبت به سیالات نیوتنی و غلیظ برشی دارند. (۴) عدد ناسلت متوسط با افزایش در عدد رینولدز و پرانتل، افزایش می‌یابد.

ریچتر و همکاران [۲۵] 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. از جمله نتایج مهم موجود در این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. 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 است، سبب می‌شود که طول گردابه‌های ناحیه جریان برگشتی افزایش یابد. لازم به ذکر است که این موضوع، سبب به وجود آمدن پدیده کاهش پسا در جریان این‌گونه از سیالات می‌شود. از دیگر کارهای صورت گرفته در این تحقیق، بررسی تغییرات ضریب پسا و توزیع فشار حول سیلندر در اثر ازدیاد پارامتر کشسانی سیال ویسکوالاستیک است. مشاهده شد که ضریب پسا به شدت تحت تأثیر پارامتر کشسانی است. نوروزی و همکاران [۲۶-۲۷] به شبیه‌سازی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک حول یک سیلندر دایروی پرداختند، معادله ساختاری آنها معادله غیرخطی گزیکس و روش حل آنها حجم محدود در نظر گرفته شده است.

^۱ shear thinning

^۲ shear thickening

نیرمالکار و چابرا [۲۸] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در سیالات پلاستیک بینگهام از سیلندر دایروی در محدوده رینولدز ۱ تا ۴۰، عدد بینگهام ۰ تا ۱۰^۴ و پرانتل ۱ تا ۱۰۰ پرداختند. یکی از مشاهدات آن‌ها این بود که سطح تغییر شکل سیالات بینگهام، بالاتر و متعاقباً مقدار ضریب پسا هم بالاتر از سیالات نیوتنی به دست آمده است.

نوروزی و همکاران [۲۹] برای اولین بار به بررسی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک با معادله ساختاری گزیکس پشت یک سیلندر مربعی پرداختند. مقادیر جهانی مانند ضریب برآ، عدد استروهل، متغیرهای سینماتیکی و سینیتیکی مانند اختلاف تنش نرمال و خطوط جریان به منظور بررسی الگوی جریان را به دست آوردند. از جمله نتایجی که آن‌ها به دست آوردند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) الاستیسیته سیال منجر به کاهش در دامنه و فرکانس حرکت گردابه می‌شود. (۲) کاهش شدیدی در دامنه ضریب برآ نسبت به جریان نیوتنی اتفاق می‌افتد. (۳) عدد استروهل و دامنه برآ با افزایش نسبت لزجت افزایش می‌یابد. نوروزی و همکاران [۳۰] به مطالعه عددی جریان سیال ویسکوالاستیک آرام پشت یک سیلندر مربعی مایل با استفاده از معادله ساختاری گزیکس پرداختند. معادلات آن‌ها با استفاده از روش حجم محدود حل شده است. نتایج محاسباتی آن‌ها نشان داد که دامنه ضریب برآ و فرکانس گردابه در غلظت‌های پلیمری بالاتر خیلی بیشتر، افزایش می‌یابد. و عدد استروهل و ضریب برآ جریان ویسکوالاستیک پایین‌تر از موارد نیوتنی قرار می‌گیرند. و همچنین افزایش پارامتر تحرک، نرخ تغییرات فرکانس حرکت گردابه را کاهش می‌دهد و دنباله گسترش می‌یابد.

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

- 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 کشتی‌سازی 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 مناسب و ساختار پیچیده، تنوع، مرتبه غیرخطی و احیاناً کسری معادلات ساختاری موجود)، سبب بروز دشواری در مطالعات مربوط به این سیالات شده است. [۳۱]

۱-۵- تحقیق حاضر

در این تحقیق، جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در عبور از سیلندری ایستا با نرم‌افزار اوپن‌فوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا، میدان جریان به شکل آرام و توسعه‌یافته است. در این مطالعه، از مدل لگاریتمی گزیکس به‌عنوان معادله ساختاری سیال ویسکوالاستیک بهره گرفته شده است. خواص سیال از جمله لزجت پلیمری و زمان رهایی از تنش، وابسته به دما اعمال شده است. و همچنین از حلگر توسعه‌داده شده rheoFoam برای حل مسئله استفاده شده است.

۱-۶- نوآوری کار حاضر

در این تحقیق برای اولین بار با نظر گرفتن لزجت پلیمری و زمان رهایی از تنش به‌صورت تابعی از دما به بررسی انتقال حرارت جریان سیال ویسکوالاستیک با مدل لگاریتمی گزیکس حول سیلندر با نرم‌افزار اوپن‌فوم پرداخته شده است.

۱-۷- ساختار کلی

به‌طور خلاصه ساختار کلی تحقیق حاضر به‌صورت زیر است:

در فصل دوم، معادلات حاکم بر جریان و روابط لازم برای محاسبه نیروهای برآ و پسا و مقدار ناسلت و همچنین شرایط اولیه و مرزی مسئله ارائه می‌شود. و در ادامه این فصل فرآیند حل با

استفاده از نرم‌افزار اوپن‌فوم آورده می‌شود. در فصل سوم، استقلال حل از شبکه و گام زمانی و همچنین اعتبارسنجی ارائه می‌شود. و در ادامه این فصل نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر آورده می‌شود. و در فصل چهارم، بیان کلی نتایج به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود.

۲- فصل دوم: روابط فیزیکی و فرآیند حل در

نرم افزار اوپن فوم

۲-۱- مقدمه

در این فصل معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در دستگاه‌های مختصات کارتزین، بررسی نیروهای وارد بر سیلندر، روابط لازم برای محاسبه نیروها و ضرایب پسا و برا، تعریف پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده، روابط لازم برای محاسبه ناسلت، روابط برای خواص سیال وابسته به دما، فرضیات مسئله، شرایط اولیه و مرزی مسئله و در بخش آخر فرآیند حل در نرم‌افزار اوپن‌فوم ارائه می‌گردد.

۲-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای جریان آرام تراکم ناپذیر سیال ویسکوالاستیک شامل معادله پیوستگی، معادله بقای مومنتوم و معادله انرژی به ترتیب به صورت روابط (۱-۲)، (۲-۲) و (۳-۲) است که به ترتیب در زیر آورده شده است.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1-2)$$

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

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (K \nabla T) + \tau : \nabla u \quad (3-2)$$

در معادلات فوق u بردار سرعت، p معرف فشار بر واحد چگالی، T معرف دما، c_p ظرفیت گرمای ویژه، K ضریب هدایت و τ مجموع تنش حلال نیوتنی و ماده پلیمری بر واحد چگالی است. سهم تنش ناشی از حلال نیوتنی τ_s و تنش ناشی از خاصیت الاستیک ماده پلیمری τ_p را می‌توان به صورت معادله (۴-۲) از هم تفکیک نمود.

$$\tau = \tau_s + \tau_p \quad (4-2)$$

معادله ساختاری برای توصیف رابطه بین تنش و نرخ برش در حلال نیوتنی به صورت رابطه (۵-۲) است.

$$\tau_s = 2\eta_s \dot{\gamma} \quad (5-2)$$

که در آن η_s لزجت حلال نیوتنی و $\dot{\gamma}$ تانسور نرخ برش است و به صورت رابطه (۶-۲) بیان می‌شود.

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2}(\nabla u + |\nabla u|^T) \quad (6-2)$$

در این تحقیق سهم تنش ناشی از خاصیت الاستیک سیال ویسکوالاستیک با استفاده از حل معادله

ساختاری گزیکس رابطه (۷-۲) در نظر گرفته شده است. [۳۲]

$$\tau_p + \lambda_1 \tau_{p(1)} + \alpha \frac{\lambda_1}{\eta_p} (\tau_p \cdot \tau_p) = 2\eta_p \dot{\gamma} \quad (7-2)$$

در معادله فوق، $\tau_{p(1)}$ مشتق فوق همرفتی تانسور^۱ τ_p ، λ_1 زمان آسودگی^۲ از تنش و η_p لزجت ماده

پلیمری در نرخ برش صفر است. همچنین α ضریب پویایی^۳ یا تحرک در سیال ویسکوالاستیک

است. [۳۳]

مشتق فوق همرفتی برای تانسور تنش پلیمری به صورت رابطه (۸-۲) بیان می‌شود.

$$\tau_{p(1)} = \frac{D}{Dt} \tau_p - [\nabla u^T \cdot \tau_p] - [\tau_p \cdot \nabla u] \quad (8-2)$$

که در آن $(D/Dt) \tau_p$ مشتق مادی^۴ برای تنش پلیمری است که به صورت رابطه (۹-۲) بیان

می‌شود.

$$\frac{D}{Dt} \tau_p = \frac{\partial}{\partial t} \tau_p + u \cdot \nabla \tau_p \quad (9-2)$$

شکل بی‌بعد معادلات حاکم به صورت روابط (۱۰-۲)، (۱۱-۲) و (۱۲-۲) است.

^۱ Upper convected derivative

^۲ Relaxation Time

^۳ Mobility factor

^۴ Material derivative

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u}^* = 0 \quad (10-2)$$

$$\frac{\partial \vec{u}^*}{\partial t^*} + \vec{u}^* \cdot \vec{\nabla} \vec{u}^* = -\vec{\nabla} p^* + \frac{\beta}{Re} \vec{\nabla} \cdot \tau_p^* + \left(\frac{1-\beta}{Re} \right) \nabla^2 (\vec{u}^*) \quad (11-2)$$

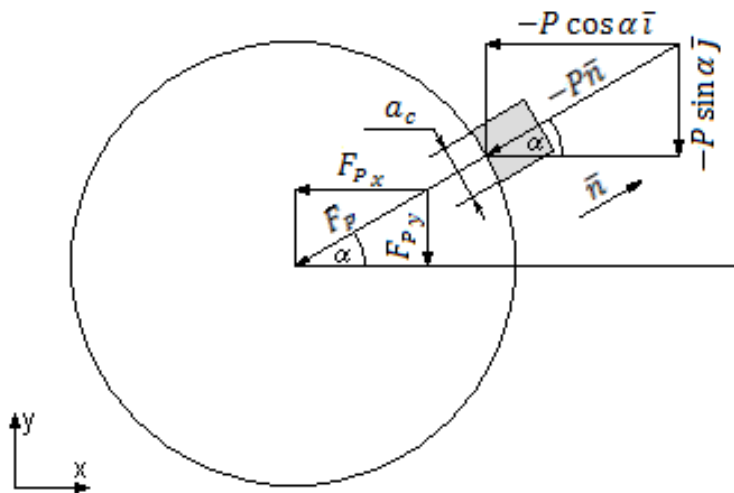
$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + \vec{u}^* \cdot \nabla T^* = \frac{1}{RePr} \nabla^2 (T^*) + \frac{Br}{RePr} \phi^* \quad (12-2)$$

۲-۳- نیروهای وارده بر روی سیلندر

هدف از ارائه این بخش، استخراج روابط ریاضی مورد استفاده برای محاسبه نیروهای برا و پسا بر روی سیلندر که در اثر نیروهای فشاری و ویسکوز سیال رخ می‌دهد، است. برای این کار مکانی بر روی سیلندر با زاویه α پادساعت‌گرد نسبت به محور افق در نظر گرفته شده است.

۲-۳-۱- نیروهای فشاری

نیروهای فشاری وارد بر روی یک سلول در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. بردار عمود بر سطح سیلندر به سمت بیرون و با n نشان داده شده است. ضخامت سلول برابر z و عرض سلول برابر a_c در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۱: نیروی فشاری وارد بر سیلندر [۳۴]

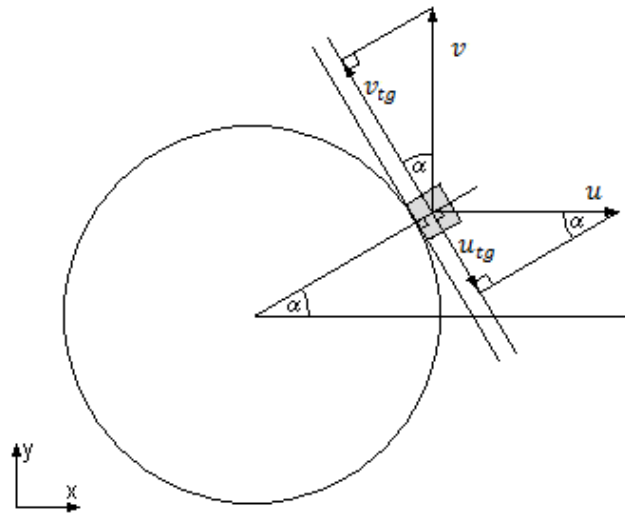
$$\bar{F}_{p_x} = -a_c z P \cos \alpha \quad (۱۳-۲)$$

$$\bar{F}_{p_y} = -a_c z P \sin \alpha \quad (۱۴-۲)$$

$$\bar{F}_p = -a_c z P \bar{n} \quad (۱۵-۲)$$

۲-۳-۲- نیروهای ناشی از خاصیت ویسکوز

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



شکل ۲-۲: مؤلفه‌های سرعت و سهم سرعت‌های مماسی [۳۴]

$$u_{tg} = u \sin \alpha \quad (۱۶-۲)$$

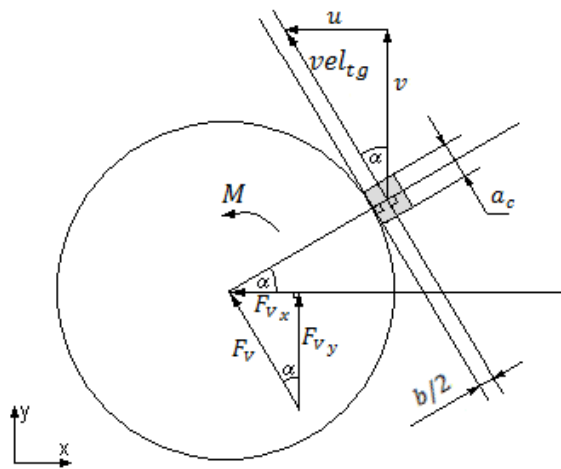
$$v_{tg} = v \cos \alpha \quad (۱۷-۲)$$

$$vel_{tg} = -u_{tg} + v_{tg} = -u \sin \alpha + v \cos \alpha \quad (۱۸-۲)$$

vel_{tg} ، سرعت نسبی مماسی است. در معادله (۱۸-۲) فرض بر این است که جریان به صورت پادساعت‌گرد از روی سیلندر عبور می‌کند. در شکل ۲-۳ بردار سرعت مماسی بر روی سیلندر به همراه مؤلفه‌های آن آورده شده است. در دستگاه مختصات کارتیزین، بردار سرعت مماسی که چرخش پادساعت‌گردی را تولید می‌کند، به صورت روابط زیر حاصل می‌شود.

$$\bar{u} = -vel_{tg} \sin \alpha \quad (۱۹-۲)$$

$$\bar{v} = vel_{tg} \cos \alpha \quad (۲۰-۲)$$



شکل ۲-۳: نیروی ویسکوز و مؤلفه‌های برآیند سرعت مماسی در جهت پادساعت‌گرد [۳۴]

نیروی ناشی از لزجت سیال، از حاصل ضرب تنش در سطح و به صورت رابطه (۲۱-۲) حاصل می‌شود.

$$F_{fr} = \bar{F}_V = \tau \times A = \eta \frac{\Delta vel}{\Delta y} A = \eta \frac{\Delta vel}{\frac{b}{2}} a_c z \quad (21-2)$$

در این معادله، F_{fr} یا \bar{F}_V معرف نیروی اصطکاکی یا لزج، τ تنش، A سطح سلول، Δy فاصله مرکز سلول تا سطح سیلندر که در اینجا برابر $\frac{b}{2}$ است، Δvel سرعت نسبی، z ضخامت سلول و η معرف لزجت است.

مؤلفه‌های عمودی و افقی این نیرو به صورت روابط (۲۲-۲) و (۲۳-۲) بیان می‌شوند.

$$F_{fr_x} = \eta \frac{\Delta vel}{\frac{b}{2}} a_c z \sin \alpha = \bar{F}_V \sin \alpha \quad (22-2)$$

$$F_{fr_y} = \eta \frac{\Delta vel}{\frac{b}{2}} a_c z \cos \alpha = \bar{F}_V \cos \alpha \quad (23-2)$$

۲-۳-۳- محاسبه نیروی کل

نیروهای فشاری کل با جمع کل نیروهای فشاری حول سیلندر حاصل می‌شود. به همین ترتیب نیروهای اصطکاکی نیز از جمع کل نیروهای اصطکاکی حول سیلندر به دست می‌آید. حاصل جمع هردوی این نتایج، نیروی کل وارد بر روی سیلندر از طرف سیال را خواهد داد.

۲-۳-۴- ضرایب نیروهای برآ و پسا

جهت محاسبه‌ی ضرایب نیروی پسا و نیروی برآ به ترتیب از روابط (۲-۲۴) و (۲-۲۵) استفاده شده است.

$$C_D = \frac{2F_D}{U^2 \rho A} \quad (۲-۲۴)$$

$$C_L = \frac{2F_L}{U^2 \rho A} \quad (۲-۲۵)$$

که در روابط بالا F_D نیروی پسا، F_L نیروی برآ، C_D ضریب پسا، C_L ضریب برآ، U سرعت جریان در ورودی، ρ چگالی جریان، A سطح مقطع عبور سیال، است.

۲-۴- پارامترهای بی‌بعد در این تحقیق

در این پژوهش جهت تعیین نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی ویسکوز از عدد بی‌بعد وایزنبرگ (we) رابطه (۲-۲۶)، به منظور تعیین نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز از عدد بی‌بعد رینولدز (Re) رابطه (۲-۲۷) و برای تعیین نسبت اندازه حرکت به نفوذ گرمایی از عدد بی‌بعد پرائنتل (Pr) رابطه (۲-۲۸) بهره گرفته شده است. و عدد برینکمن (Br) نشان‌دهنده‌ی انتقال گرما به طریق رسانش به سیال اطراف با ویسکوزیته معلوم است. که در رابطه (۲-۲۹) آورده شده است. و فرکانس جریان f_s نیز در قالب عدد بی‌بعد استروهل (St) در رابطه (۲-۳۰) تعریف شده است. و همچنین عدد الاستیک نسبت عدد وایزنبرگ به رینولدز در رابطه (۲-۳۱) آورده شده است.

$$We = \lambda \frac{U_{in}}{d} \quad (26-2)$$

$$Re = \frac{\rho U_{in} d}{\eta_0} \quad (27-2)$$

$$Pr = \eta_0 \frac{c_p}{k} \quad (28-2)$$

$$Br = \frac{\eta_0 U_{in}^2}{k(T_w - T_{in})} \quad (29-2)$$

$$St = \frac{f_s d}{U_{in}} \quad (30-2)$$

$$El = \frac{We}{Re} = \lambda \frac{\eta_0}{\rho d^2} \quad (31-2)$$

در روابط بالا λ زمان رهایی از تنش، U_{in} سرعت ورودی جریان، d قطر سیلندر، ρ چگالی جریان، η_0 ویسکوزیته کل، c_p ظرفیت گرمای ویژه، k ضریب هدایت، T_w دمای دیواره سیلندر و T_{in} دمای سیال است. پارامترهای بی بعد دیگر که به بررسی آنها پرداخته می شود عبارت است از: ضریب فشار (C_p)، ضریب پسا متوسط (\bar{C}_D)، ضریب برآ متوسط (ΔC_L) و تنش بی بعد (τ^*) که به ترتیب در رابطه های (۳۲-۲) تا (۳۵-۲) آورده شده است.

$$C_p = \frac{p - p_{in}}{0.5 * \rho * u_{in}^2} \quad (32-2)$$

$$\bar{C}_D = \frac{C_{Dmax} + C_{Dmin}}{2} \quad (33-2)$$

$$\Delta C_L = \frac{C_{Lmax} - C_{Lmin}}{2} \quad (34-2)$$

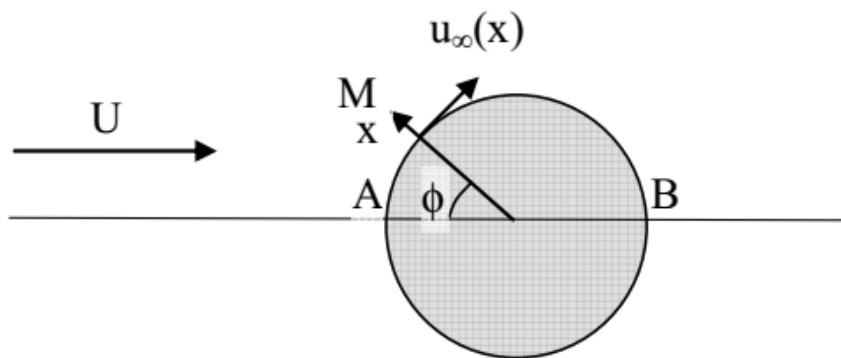
$$\tau^* = \frac{\tau}{0.5 * \rho * u_{in}^2} \quad (35-2)$$

۵-۲- روابط لازم برای محاسبه ناسلت

برای یک سیلندر دایروی به قطر d و دمای ثابت T_w در یک جریان با سرعت یکنواخت و دمای T_∞ ، ضریب انتقال حرارت محلی $(h(x))$ با شار حرارتی محلی مبادله شده بین سیلندر و سیال $(q''(x))$ تعریف می‌شود که در رابطه (۳۶-۲) می‌توان مشاهده کرد.

$$q''(x) = h(x)(T_w - T_\infty) \quad (۳۶-۲)$$

ضریب انتقال حرارت محلی به موقعیت نقطه M که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. به عدد رینولدز و عدد پرانتل وابسته است.



شکل ۴-۲: سیلندر دایروی در یک جریان یکنواخت [۳۵]

عدد ناسلت محلی از رابطه (۳۷-۲) به دست می‌آید.

$$Nu = \frac{h(x)d}{K} \quad (۳۷-۲)$$

که در رابطه بالا $h(x)$ ضریب انتقال حرارت محلی، d قطر سیلندر و K ضریب هدایت است.

نرخ کلی انتقال حرارت مبادله شده بین سیلندر و جریان از رابطه (۳۸-۲) به دست می‌آید.

$$\frac{q}{\pi d l_z} = \bar{h}(T_w - T_\infty) \quad (38-2)$$

که \bar{h} ضریب انتقال حرارت متوسط، l_z طول سیلندر در راستای سوم است.
عدد ناسلت متوسط از رابطه (39-2) به دست می آید.

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}d}{K} = \frac{\frac{q}{\pi d l_z} d}{K(T_w - T_\infty)} \quad (39-2)$$

عدد ناسلت متوسط به اعداد رینولدز و پرانتل وابسته است. [35]

۶-۲- خواص سیال وابسته به دما

در این تحقیق با استفاده از ضریب جابه‌جایی منحنی^۱ لزجت و زمان رهایی از تنش تابعی از دما تعریف شده است. که به ترتیب در روابط (40-2) و (41-2) تعریف شده است.

$$\eta(T) = \eta_0 a_T \quad (40-2)$$

$$\lambda(T) = \lambda_0 a_T \quad (41-2)$$

که ضریب جابه‌جایی منحنی (a_T) به صورت رابطه (42-2) تعریف شده است. [21]

$$a_T = \exp \left[\Gamma \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}} \right) \right] \quad (42-2)$$

که در رابطه بالا Γ ، ثابت دمایی در ضریب جابه‌جایی منحنی است که مقدار آن ۱۷۲۰ در نظر گرفته شده است. T_{Ref} دمای اولیه جریان است.

^۱ Shift factor

۷-۲- فرضیات مسئله

به منظور حل جریان سیال حول سیلندر تعدادی فرضیات به منظور ساده سازی حل ضروری است. در اینجا حل به صورت دوبعدی است تا هم بتوان در عملیات ریاضی و هم در محاسبات عددی، ساده سازی هایی را اعمال نمود. دما روی سیلندر مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. ضریب نفوذ گرما در معادله انرژی یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. 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 دوبعدی و آرام است.
۲. سیال ویسکوالاستیک و تراکم ناپذیر است.
۳. دما روی سیلندر مقدار ثابت در نظر گرفته شده است.
۴. ضریب نفوذ گرما در معادله انرژی یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است.
۵. رینولدز در نظر گرفته شده در محدوده ای است که جریان آرام نوسانی را مدل نماید.
۶. از اثرات شتاب جاذبه و نیروهای حجمی صرف نظر شده است.

۸-۲- شرایط مرزی و اولیه

در مرز ورودی، فرض بر این است که جریانی با سرعت یکنواخت وارد شده است. میدان تنش و گرادیان فشار در آن صفر است.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \tau = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad U_x = \text{constant}, \quad U_y = 0 \quad T = 350(k)$$

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

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial n} = 0, \quad U_x = 0, \quad U_y = 0, \quad T = 300(k)$$

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

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial x} = 0, \quad p = p_{atm} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

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.

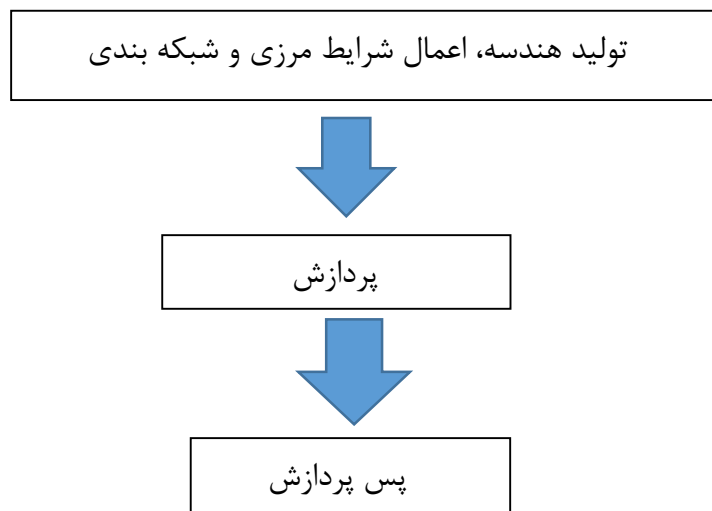
$$\frac{\partial U_x}{\partial y} = 0, \quad U_y = 0, \quad \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

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

مدل سازی، با محاسبه جریان دائمی که با سرعت یکنواخت از روی یک سیلندر ایستا عبور می‌کند، آغاز می‌گردد. شایان ذکر است که شرایط اولیه مسئله 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 بزرگ تر 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.

۹-۲- فرآیند حل در نرم افزار اوپن فوم

در این در این تحقیق از نرم افزار منبع باز اوپن فوم به منظور مدل سازی جریان و انتقال حرارت 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. فرایند حل هر مسئله در سه مرحله پیش پردازش ، اجرا و پس پردازش صورت می گیرد. فرآیند کلی تحلیل یک مسئله در اوپن فوم در شکل ۵-۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲: فرآیند کلی تحلیل یک مساله در اوپن فوم

۲-۹-۱- پیش پردازش

تعریف شبکه محاسباتی، شرایط مرزی و اولیه، خواص فیزیکی و متغیرهای محاسباتی، در این مرحله از حل انجام می‌شود. به‌طور خلاصه، یک نمونه مطالعاتی در نرم‌افزار اوپن‌فوم شامل سه پوشه به نام‌های "constant"، "system" و "0" است. در پوشه "0" مقادیر اولیه میدان‌های متغیر حل و همچنین مقادیر مرزی برای هر یک از صفحات مرزی آورده می‌شود. در پوشه "constant" تنظیماتی در خصوص خواص فیزیکی سیال انجام می‌شود. لازم به ذکر است که تعریف هندسه مسئله، 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 موردنیاز حل گر یعنی گام زمانی حل، زمان شروع و زمان نهایی حل، تلورانس، انتخاب روش حل دستگاه و همچنین تعیین نحوه گسسته‌سازی هر یک از عملگرهای دیفرانسیلی اعمال می‌گردد.

۲-۹-۲- پردازش

در این مرحله، محاسبات تکرار در هر گام زمانی حل برای میدان‌های متغیر انجام می‌شود. در این تحقیق از حلگر توسعه داده شده rheoFoam به منظور مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر استفاده شده است.

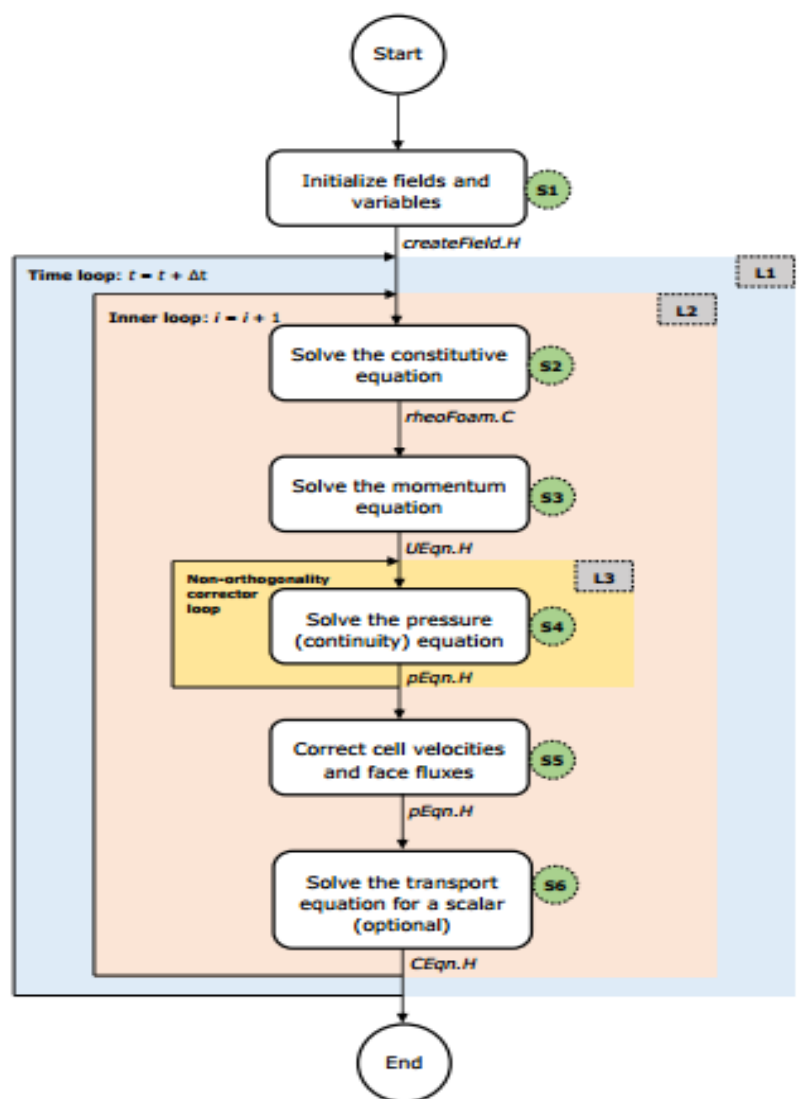
۲-۹-۳- پس پردازش

در این مرحله، اطلاعات حاصل از حل به نرم‌افزارهایی که توانایی نمایش اطلاعات به صورت گرافیکی را دارا می‌باشند، انتقال داده می‌شود. یک روش که مرسوم‌ترین و پرکاربردترین روش برای نمایش اطلاعات حاصل از حل در نرم‌افزار اوپن‌فوم نیز محسوب می‌شود، استفاده از نرم‌افزار paraview است.

۲-۱۰- معرفی حلگر مورد استفاده در این تحقیق

همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، در این تحقیق به منظور مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت

سیال ویسکوالاستیک از حلگر توسعه داده شده rheoFoam که معادله انرژی و پارامترهای مرتبط به آن اضافه شده، استفاده شده است. [۳۶] حلگر rheoFoam، معادلات ناویر استوکس تراکم ناپذیر، گذرا برای جریان‌های تک فاز سیالات ویسکوالاستیک را پیاده‌سازی می‌کند. در شکل ۷-۲ الگوریتم حل کردن حلگر rheoFoam نشان داده شده است.



شکل ۷-۲: الگوریتم حل کردن حلگر rheoFoam [۳۷]

معادله انرژی در گام ششم از الگوریتم، در پوشه CEqn.H قرار می‌گیرد. حلگر دارای سه حلقه

اصلی است: حلقه L1، برای پیشرفت زمان است. حلقه L2، یک حلقه درونی، که برای همگرایی حل در هر گام زمانی استفاده می‌شود. حلقه L3، به منظور به‌روزرسانی تصحیح صریح لاپلاسین فشار (در داخل هر گام زمانی و هر تکرار درونی)، پرهیز از مشکلات ثبات و کاهش خطا در محاسبات گذرا می‌تواند برای شبکه‌های غیر متعامد فعال شود. حلگر rheoFoam از یک فایل اصلی (rheoFoam.C) و پنج فایل مرتبط (createFields.H, createPPutil.H, UEqn.H, PEqn.H, CEqn.H) تشکیل شده است. [۳۷]

معادلات حاکم در مسئله مذکور عبارت‌اند از معادله پیوستگی، رابطه اندازه حرکت (یا مومنتم)، معادله انرژی و معادله ساختاری موردنظر

تعریف معادله پیوستگی رابطه (۱-۲) در نرم‌افزار اوپن‌فوم به‌صورت زیر است.

```
fvc::div(phi);
```

تعریف معادله اندازه حرکت رابطه (۲-۲) در نرم‌افزار اوپن‌فوم به‌صورت زیر است.

```
tmp<fvVectorMatrix> tUEqn
(
    fvm::ddt(U)
  + fvm::div(phi, U)
  ==
    fvOptions(U)
  + constEq.divTau(U)
);

fvVectorMatrix& UEqn = tUEqn.ref();

UEqn.relax();

fvOptions.constrain(UEqn);

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

fvOptions.correct(U);
```

تعریف معادله انرژی رابطه (۳-۲) در نرم‌افزار اوپن‌فوم به‌صورت زیر است.

```

volSymmTensorField tauPol = constEq.tau();

volSymmTensorField tauS = etaS*(twoSymm(fvc::grad(U)));

fvScalarMatrix TEqn
(
    fvm::ddt(T)
    + fvm::div(phi, T)
    - fvm::laplacian(D_,T)
    - ((tauPol+tauS) && fvc::grad(U))/(rhoInf*cp)
);

TEqn.relax();
TEqn.solve();

```

در این تحقیق ، لزجت پلیمری و زمان رهایی از تنش، تابعی از دما در نظر گرفته شده است که در نرم افزار اوپن فوم روابط آنها به صورت زیر تعریف شده است.

```

volScalarField T_ = T*(TWall_.value()-TRef_.value()+TRef_);
volScalarField etaPnew = etaP_*Foam::exp(Γ_*(1.0/T_-1.0/TRef_));
volScalarField lambdanew = lambda_*Foam::exp(Γ_*(1.0/T_-1.0/TRef_));

```

۲-۱۱- گسسته سازی معادلات حاکم

برای گسسته سازی جمله مشتق زمانی از روش کرانک نیکلسون استفاده شده است.

```

ddtSchemes
{
    default      CrankNicolson 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 عملگر دیورژانس با استفاده از روش‌های زیر گسسته شده‌اند.

```

divSchemes

```

```

{
  default          none;
  div(tau)         Gauss linear;
  div(grad(U))    Gauss linear;
  div(phi,U)      GaussDefCmpw cubista;
  div(phi,tau)    GaussDefCmpw cubista;
  div(phi,T)      GaussDefCmpw cubista;
}

```

و در گسسته سازی جملات شامل عملگر لاپلاسیان از روش Gauss linear corrected استفاده

شده است.

```

laplacianSchemes

```

```

{
  default          Gauss linear corrected;
  laplacian(eta,U) Gauss linear corrected;
  laplacian(D_,T)  Gauss linear corrected;
}

```

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

پیش شرط PCG انجام شده است. به منظور حل دستگاه معادلات حاصل برای میدان سرعت، دما و تنش

از روش PBiCG استفاده شده است. در نهایت جهت ارتباط میان مؤلفه‌های سرعت و فشار از الگوریتم

سیمپل استفاده شده است.

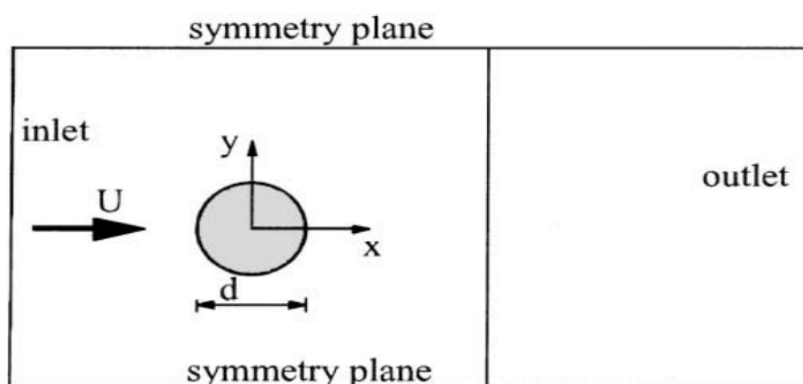
۳- فصل سوم: اعتبارسنجی و نتایج

۳-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج حاصل از حل عددی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر ارائه می‌شود. در ابتدای این فصل، هندسه مسئله، استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی و گام زمانی، سپس اعتبارسنجی کار حاضر با کارهای گذشته و در بخش نهایی این فصل، نتایج کار حاضر و مطالعه اثر پارامترهای مهم آورده می‌شود.

۳-۲- هندسه مسئله

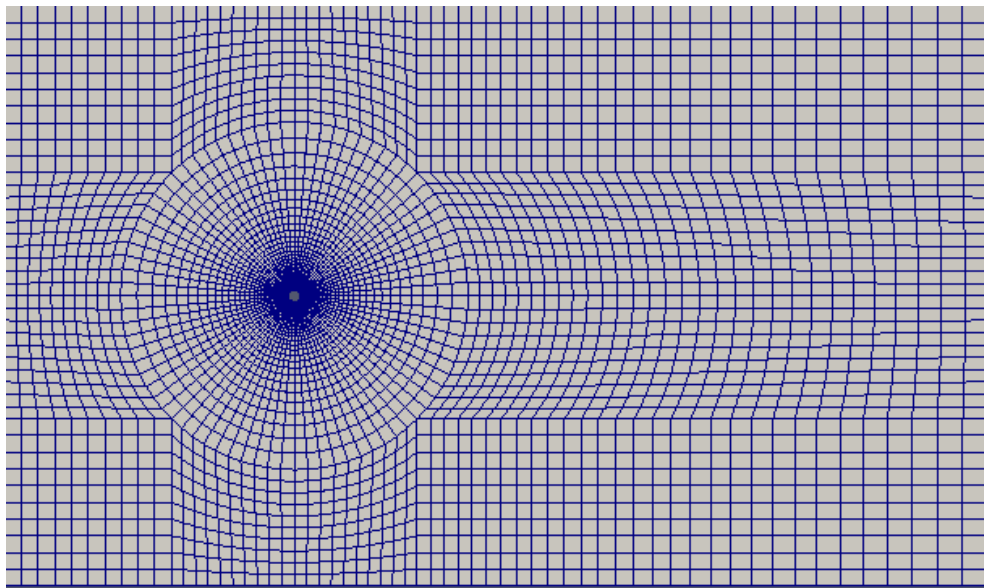
در شکل ۱-۳ نمای شماتیک از هندسه مسئله نشان داده شده است. فاصله صفحات بالا و پایین نسبت به مرکز سیلندر ۲۵ برابر قطر سیلندر و فاصله صفحه ورودی و خروجی نسبت به مرکز سیلندر به ترتیب ۲۵ و ۶۰ برابر قطر سیلندر در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، به دلیل وجود شرایط ناپایداری و غیرمتقارن بودن جریان، هندسه مسئله به صورت کامل در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، به منظور جلوگیری از تأثیر مرزهای بالایی و پایینی بر جریان، تا حد ممکن، فاصله مرزها تا سیلندر زیاد انتخاب شده است. به عبارتی دیگر، موقعیت قرارگیری صفحات مرزی نسبت به سیلندر طوری انتخاب گردیده که هیچ‌گونه اثری بر جریان نداشته، جریانی با مرزهای نامحدود را حول سیلندر مدل نماید.



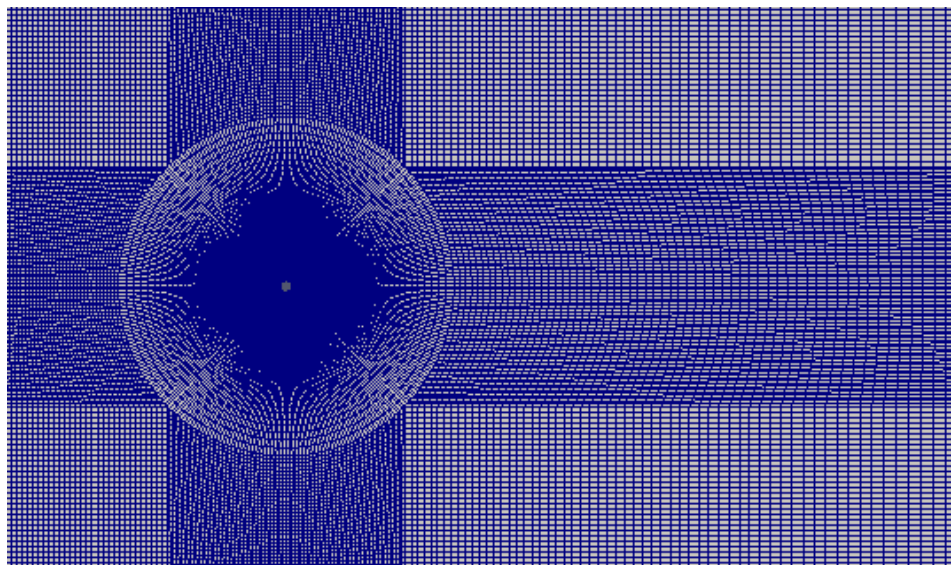
شکل ۱-۳: نمای شماتیک از هندسه مسئله [۲۰]

۳-۳- استقلال حل از شبکه محاسباتی

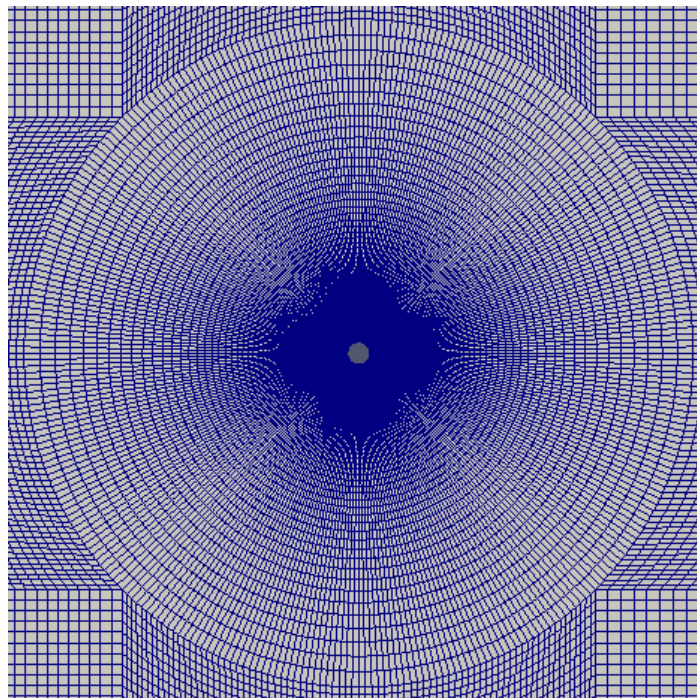
برای بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، پنج شبکه با تعداد المان مختلف که با blockMesh اوپن فوم ایجاد شده است، مورد بررسی قرار گرفته می شود. شبکه بندی سه شبکه با تعداد المان ۱۰۰۰۰، ۸۶۰۰۰ و ۱۸۹۰۰۰ به ترتیب در شکل ۲-۳، شکل ۳-۳ و شکل ۵-۳ آورده شده است.



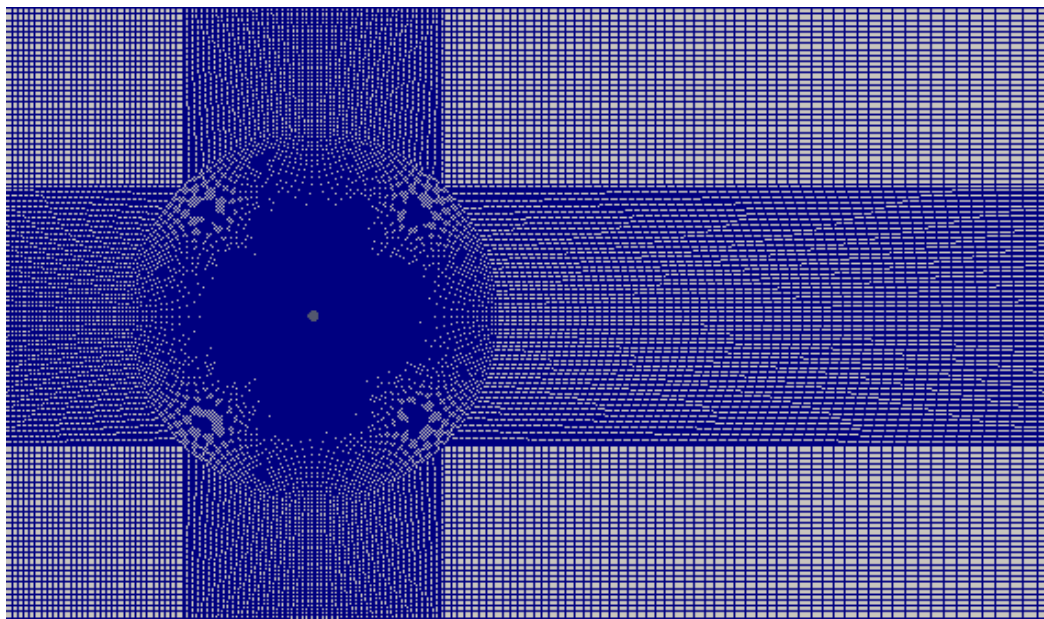
شکل ۲-۳: شبکه بندی شبکه با ۱۰۰۰۰ المان



شکل ۳-۳: شبکه‌بندی شبکه با ۸۶۰۰۰ المان



شکل ۳-۴: بزرگنمایی شبکه با ۸۶۰۰۰ المان



شکل ۳-۵: شبکه‌بندی شبکه با ۱۸۹۰۰۰ المان

نتایج حاصل از این شبکه‌ها برای مسئله با مدل لگاریتمی گزیکس با شرایط زیر، برای به‌دست آوردن شبکه‌ای مطلوب مورد مقایسه قرار گرفتند.

$$Re = 100, De = 80, Pr = 200$$

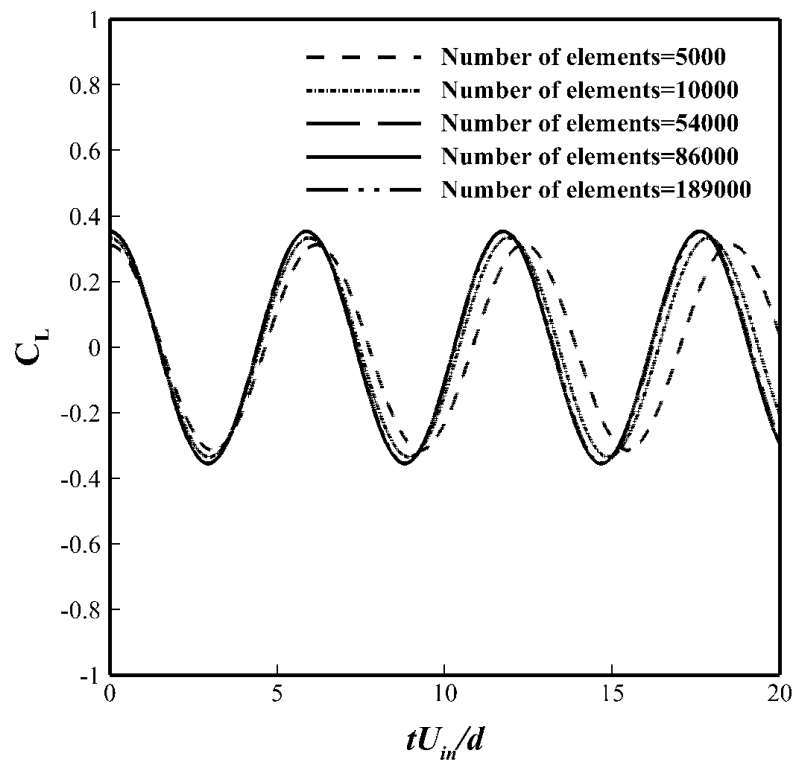
$$\alpha = 0.2$$

که α ، ضریب تحرک در معادله ساختاری گزیکس است. نتایج حاصل از این شبکه‌ها در جدول ۳-۱ آورده شده است.

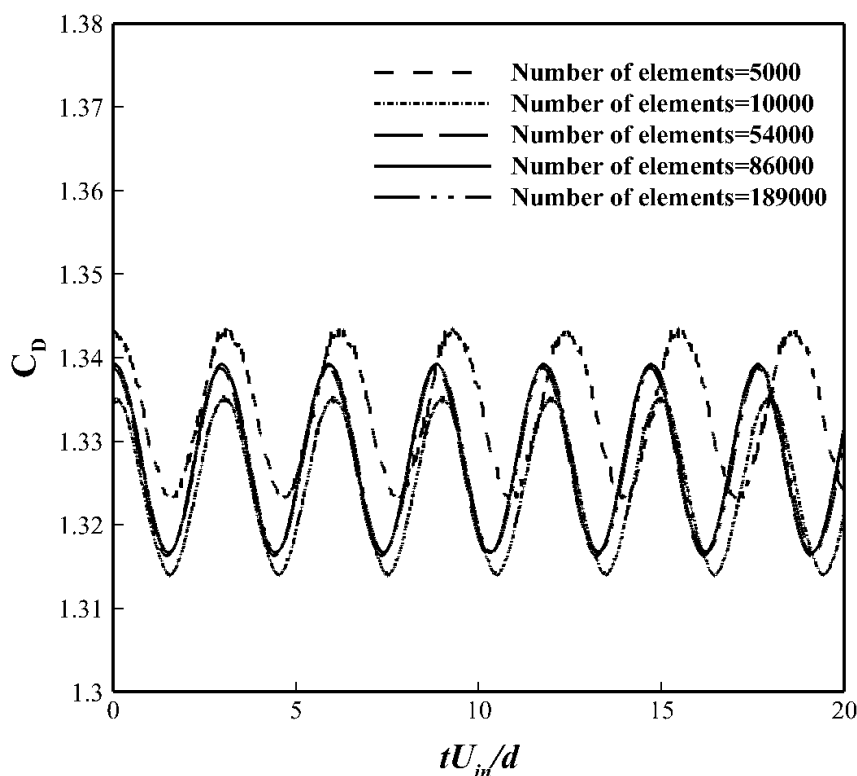
جدول ۱-۳: نتایج حاصل از پنج شبکه محاسباتی در $Pr = 200$ ، $De = 80$ و $Re = 100$

شبکه‌ها	تعداد المان	T	St	ΔC_L	C_{Dmax}	C_{Dmin}	\bar{C}_D
۱	۵۰۰۰	۶/۱۹	۰/۱۶۲	۰/۳۱۵۴۶۵	۱/۳۴۳۹	۱/۳۲۲۸	۱/۳۳۳۴
۲	۱۰۰۰۰	۵/۹۸	۰/۱۶۷	۰/۳۳۵۲۹	۱/۳۳۵۵	۱/۳۱۳۹	۱/۳۲۴۷
۳	۵۴۰۰۰	۵/۸۷	۰/۱۷	۰/۳۵۳۳۵	۱/۳۳۸۸	۱/۳۱۶۳	۱/۳۲۷۵۵
۴	۸۶۰۰۰	۵/۸۶	۰/۱۷۱	۰/۳۵۴۴۵	۱/۳۳۹۲	۱/۳۱۶۷	۱/۳۲۷۹۵
۵	۱۸۹۰۰۰	۵/۸۹	۰/۱۶۹	۰/۳۵۳۳۹	۱/۳۳۹	۱/۳۱۶۸	۱/۳۲۷۹

در جدول بالا T دوره تناوب، St عدد استروهال، ΔC_L دامنه ضریب برآ، C_{Dmax} بیشینه ضریب پسا، C_{Dmin} کمترین ضریب پسا و \bar{C}_D متوسط ضریب پسا است. نمودار تغییرات ضریب برآ و پسا برای پنج شبکه محاسباتی به ترتیب در شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۳-۶: تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد برای شبکه ۵ در $Pr = 200$ ، $De = 80$ و $Re = 100$



شکل ۳-۷: تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان بی‌بعد برای ۵ شبکه در $Pr = 200$ ، $De = 80$ و $Re = 100$

با بررسی نتایج حاصل از این شبکه‌ها در جدول ۳-۱، شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ می‌توان مشاهده کرد که از شبکه سوم با تعداد ۸۶۰۰۰ المان، نتایج تغییر چندانی نمی‌کند و می‌توان این شبکه را به‌عنوان شبکه مطلوب در نظر گرفت. در ادامه روند حل مسئله از این شبکه استفاده خواهد شد.

۳-۴- استقلال حل از گام زمانی

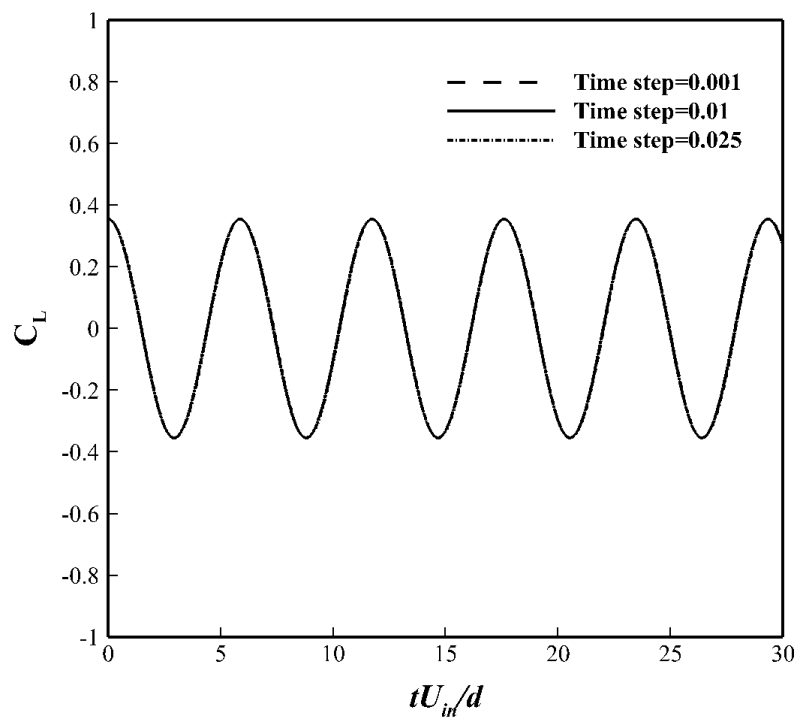
در بخش قبل، شبکه سوم با تعداد ۸۶۰۰۰ المان، شبکه مطلوب برای مسئله انتخاب گردید. حال با استفاده از این شبکه باید به گام زمانی مطلوب برای حل مسئله رسید. که در این قسمت نتایج حل برای گام‌های زمانی ۰/۰۲۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ برای رسیدن به گام زمانی مطلوب مورد مقایسه قرار گرفته‌شده است. در جدول ۳-۲ می‌توان نتایج حل برای این سه گام زمانی را مشاهده نمود.

جدول ۳-۲: نتایج حل از سه گام زمانی مختلف در $Pr = 200$ ، $De = 80$ و $Re = 100$

گام زمانی	T	ΔC_L	\bar{C}_D
۰/۰۲۵	۵/۸۸	۰/۳۵۵۱۵	۱/۳۲۸۳
۰/۰۱	۵/۸۷	۰/۳۵۴۵۴۵	۱/۳۲۸۰۵
۰/۰۰۱	۵/۸۶	۰/۳۵۴۴۴	۱/۳۲۷۷

همچنین نمودار تغییرات ضریب برآ و پسا برای سه گام زمانی مختلف به ترتیب در شکل ۳-۸ و

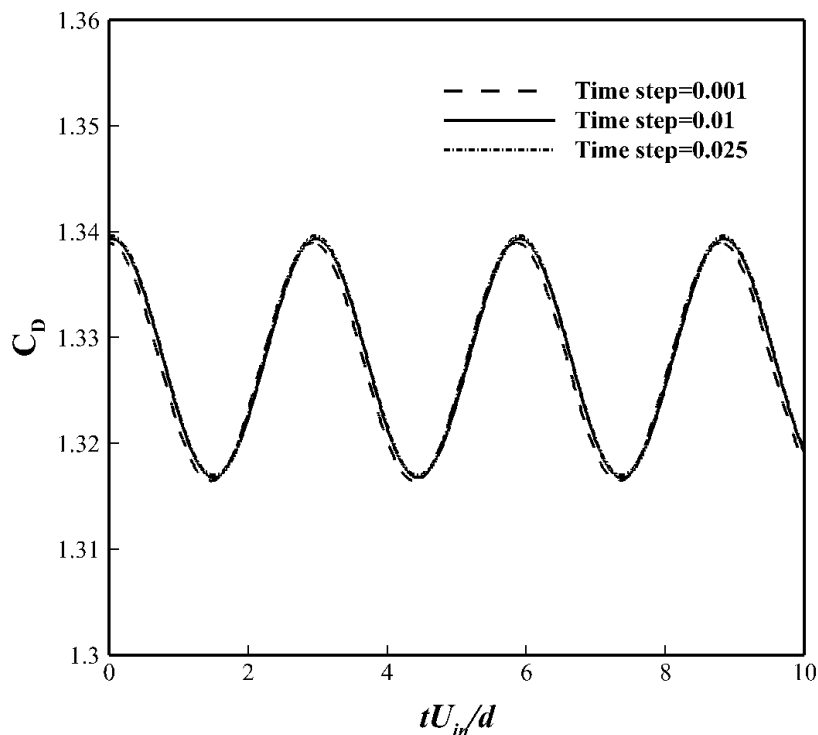
شکل ۳-۹ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸: نمودار تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد برای سه گام زمانی مختلف در $Pr = 200$ ، $De = 80$ و

$$Re = 100$$

مشاهده می‌شود که نمودار ضریب برآ نسبت به زمان برای سه گام زمانی بر هم منطبق شده است.



شکل ۳-۹: نمودار تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان بی‌بعد برای سه گام زمانی مختلف در $Pr = 200$, $De = 80$ و $Re = 100$

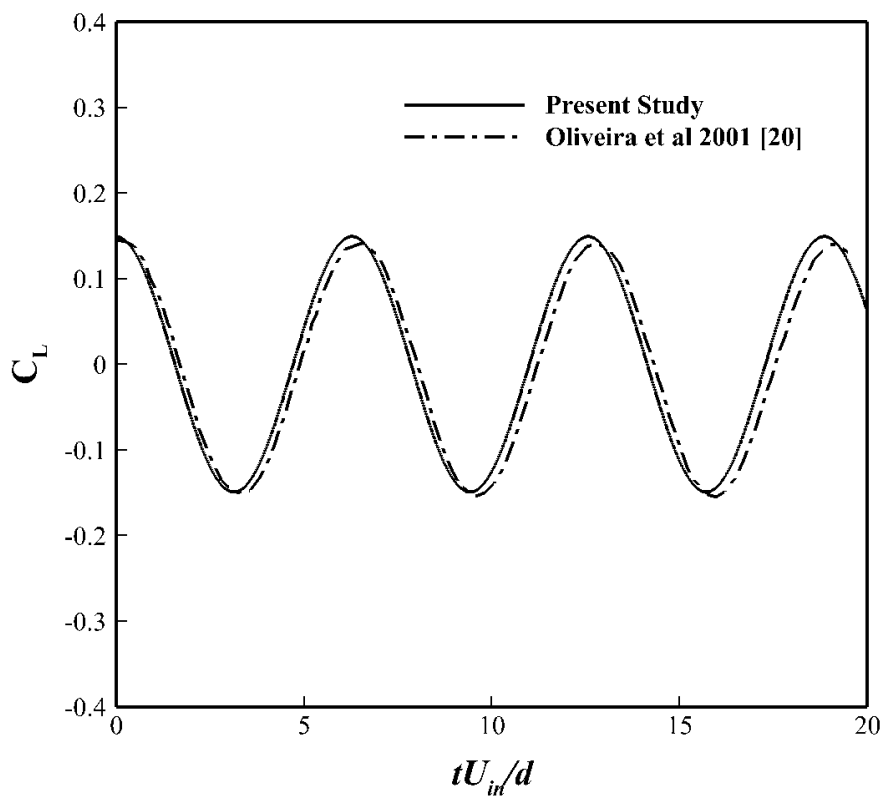
نمودار ضریب پسا نسبت به زمان نیز برای سه گام زمانی تقریباً بر هم منطبق شده است. مشاهده می‌شود که با انتخاب گام زمانی کوچک‌تر، تغییری در نتایج حاصل نمی‌شود، بدین منظور گام زمانی $0/01$ ثانیه به‌عنوان گام زمانی مطلوب برای تمامی محاسبات پیش رو لحاظ گردیده است.

۳-۵- اعتبار سنجی

اعتبار سنجی در کار حاضر ابتدا برای بخش جریان با کار الیویرا [۲۰] و برای بخش انتقال حرارت با کار بارتی و همکاران [۱۱] انجام گرفته شد که در ادامه هریک از اعتبارسنجی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

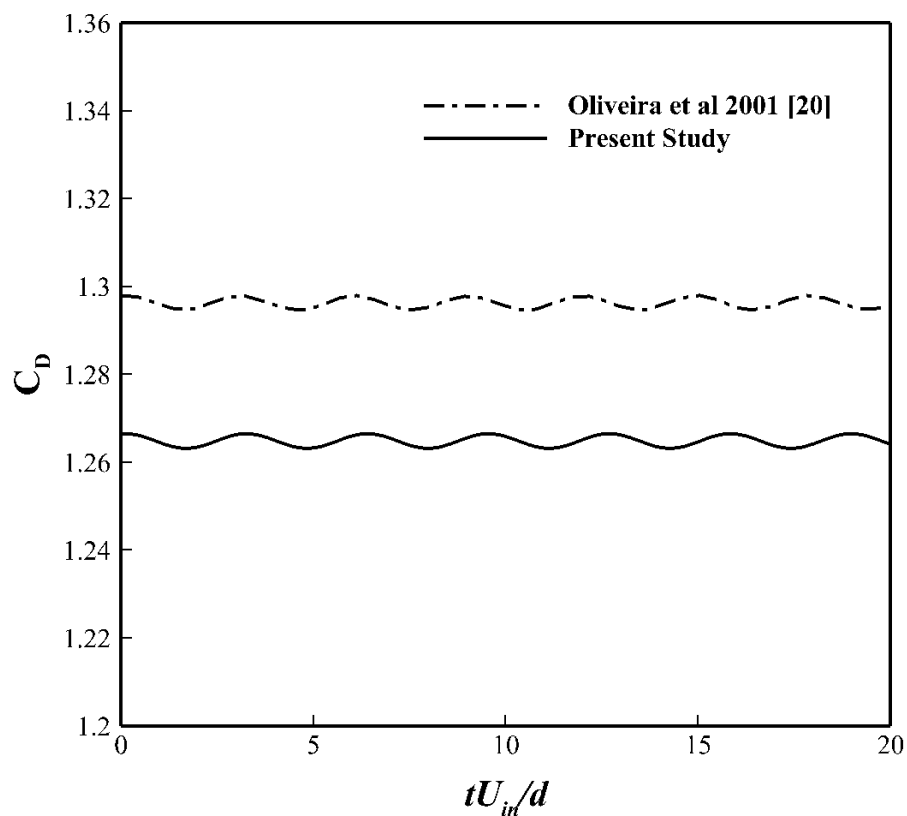
۳-۵-۱- اعتبارسنجی جریان

اعتبارسنجی بخش جریان با کار الیویرا که به بررسی جریان حول سیلندر با مدل ساختاری FENE-Cr پرداخته است، انجام گرفته شد. آن‌ها به بررسی جریان ویسکوالاستیک در رینولدز ۱۰۰ و عدد دבורا ۸۰ پرداختند. از جمله نتایج مهمی که مورد مقایسه قرار گرفت، تغییرات ضریب برآ و پسا نسبت به زمان بی‌بعد است. در شکل ۳-۱۰ و شکل ۳-۱۱ تغییرات ضریب برآ و پسا نسبت به زمان بی‌بعد در کار حاضر و الیویرا نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰: مقایسه تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد شده در $Re = 100$ و $De = 80$ و $L^2 = 100$

با کار الیویرا [۲۰]



شکل ۳-۱۱: مقایسه تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان بی‌بعد شده در $Re = 100$ و $De = 80$ و $L^* = 100$ با کار الیویرا [۲۰]

در جدول ۳-۲ مقایسه‌ای از نتایج کار حاضر و الیویرا نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: مقایسه نتایج کار حاضر با کار الیویرا [۲۰]

در صد خطا %	کار الیویرا [۲۰]	کار حاضر	
۰/۶	۰/۱۵۷۸	۰/۱۵۸۷	St
۰/۵	۰/۱۵	۰/۱۴۹۱۹	ΔC_L
۲/۴	۱/۲۹۶۲	۱/۲۶۴۸	\bar{C}_D

۳-۵-۲- اعتبارسنجی انتقال حرارت

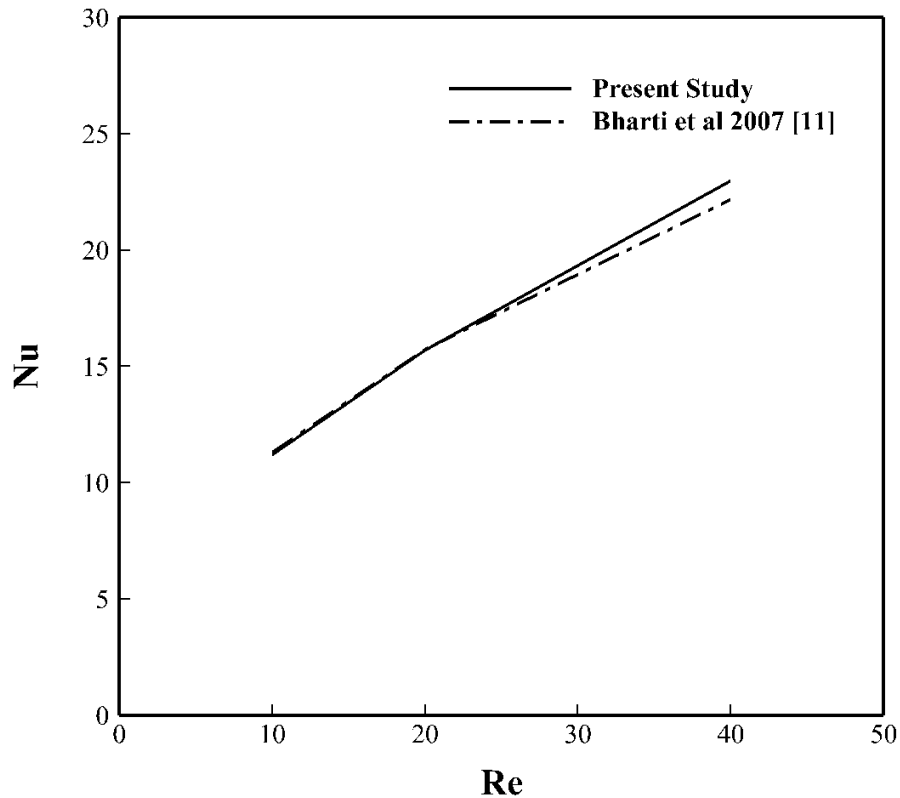
در ادامه کار به حلگر rheoFoam، معادله انرژی اضافه شد. برای اطمینان از حلگر جدید ساخته شده، با کار بارتی و همکاران، مورد اعتبار سنجی قرار گرفته شد. از جمله نتایج مهم کار بارتی و همکاران می توان به تغییرات عدد ناسلت متوسط نسبت به رینولدز در پرانتل مشخص اشاره کرد. در ادامه، این نتیجه مورد مقایسه و اعتبار سنجی قرار گرفته شد.

مقدار عدد ناسلت متوسط در $Pr = 200$ برای رینولدزهای مختلف به دست آورده شد. در جدول ۳-۳ مقایسه ای از این نتایج با کار بارتی و همکاران آورده شده است.

جدول ۳-۳: مقایسه نتایج کار حاضر با کار بارتی و همکاران [۱۱]

در صد خطا %	مقدار ناسلت متوسط در کار بارتی و همکاران [۱۱]	مقدار ناسلت متوسط در کار حاضر	
۰/۸۸	۱۱/۳۱	۱۱/۲۱	$Re = 10$
۰/۲۵	۱۵/۷۵	۱۵/۷۱	$Re = 20$
۳/۶	۲۲/۱۷	۲۲/۹۸	$Re = 40$

در شکل ۳-۱۲ می توان نمودار تغییرات ناسلت متوسط نسبت به رینولدز در $Pr = 200$ برای کار حاضر و کار بارتی و همکاران را مشاهده کرد.



شکل ۳-۱۲: مقایسه تغییرات ناسلت متوسط نسبت به رینولدز در $Pr = 200$ با کار بارتی و همکاران [۱۱]

۳-۶- مطالعه اثر پارامترها

در این بخش، تأثیر اعداد بی بعد مهم از جمله الاستیک، رینولدز، پرانتل و برینکمن و همچنین تأثیر نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل (β) و ضریب تحرک (α) در معادله ساختاری بر روی مشخصه‌های جریان و حرارت مورد بررسی قرار گرفته می‌شود.

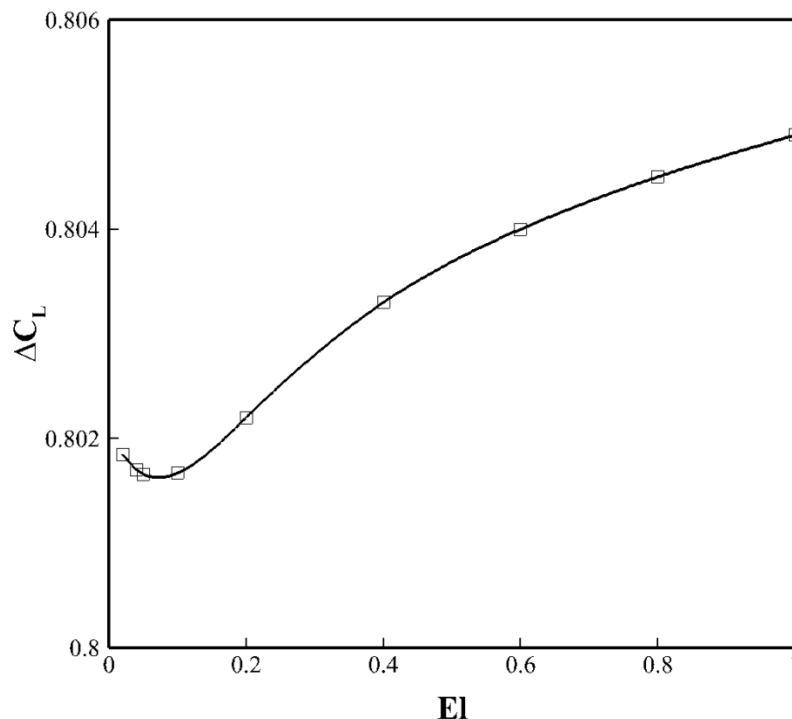
۳-۶-۱- بررسی خاصیت الاستیک بر مشخصه‌های جریان و حرارت

مشخصه‌های جریان و حرارت در $Re = 100$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ ، $\beta = 0/6$ با تغییر عدد الاستیک (EI) مورد بررسی قرار گرفته شده است. در جدول ۳-۴ می‌توان این تغییرات را مشاهده نمود.

جدول ۳-۴: نتایج حاصل از افزایش خاصیت الاستیک در $Re = 100$, $Pr = 200$, $Br = -100$, $\alpha = 0.5$ و $\beta = 0.6$

\bar{Nu}	\bar{C}_D	C_{Dmin}	C_{Dmax}	ΔC_L	St	T	EI
۱۳۸/۸۰	۱/۳۵۶۱	۱/۲۹۴۱	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۱۸۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۰۲
۱۳۸/۷۶۵	۱/۳۵۵۹	۱/۲۹۳۹	۱/۴۱۷۹	۰/۸۰۱۷	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۰۴
۱۳۸/۷۵	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۹	۱/۴۱۷۸	۰/۸۰۱۶۶	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۰۵
۱۳۸/۷۰	۱/۳۵۵۵	۱/۲۹۳۶	۱/۴۱۷۴	۰/۸۰۱۶۷	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۱
۱۳۸/۶۵	۱/۳۵۵۳	۱/۲۹۳۳	۱/۴۱۷۳	۰/۸۰۲۲	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۲
۱۳۸/۶۳	۱/۳۵۵۴	۱/۲۹۳۲	۱/۴۱۷۶	۰/۸۰۳۳	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۴
۱۳۸/۶۳	۱/۳۵۵۴	۱/۲۹۳	۱/۴۱۷۸	۰/۸۰۴	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۶
۱۳۸/۶۴	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۸
۱۳۸/۶۴	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۵	۱/۴۱۸۲	۰/۸۰۴۹	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۱

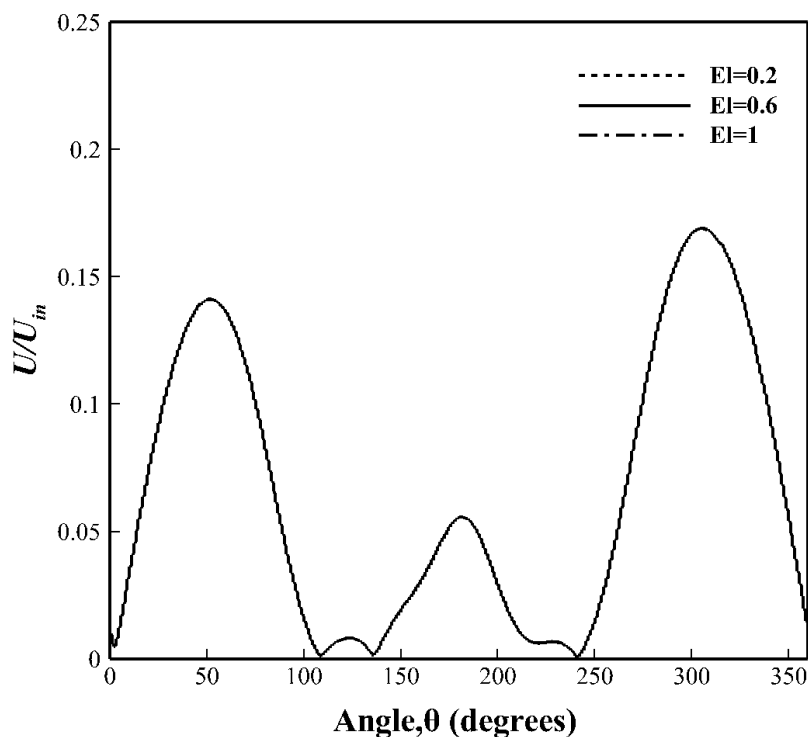
مشاهده می‌شود با افزایش خاصیت الاستیک، عدد استروهال تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند. دامنه نوسانات ضریب برآ از مقدار عدد الاستیک ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ سیر نزولی دارد سپس تا مقدار ۱ سیر صعودی پیدا می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت زمانی که مقدار زمان رهایی از تنش سیال ویسکوالاستیک از مقدار زمان ایجاد یک تناوب بیشتر باشد، دامنه نوسانات ضریب برآ افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۳-۱۳ نمودار تغییرات ضریب برآ نسبت به افزایش عدد الاستیک نشان داده شده است. دامنه نوسانات ضریب پسا تا مقدار عدد الاستیک ۰/۲ سیر نزولی دارد سپس تا مقدار ۱ سیر صعودی پیدا می‌کند. همچنین مقدار ناسلت متوسط نیز با افزایش خاصیت الاستیک تا مقدار الاستیک ۰/۶ سیر نزولی دارد سپس تا مقدار ۱ به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۱۳: تغییرات ضریب برآ متوسط نسبت به افزایش خاصیت الاستیک در $Re = 100$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ و $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$

در ادامه تغییرات سرعت بی‌بعد، ضریب فشار و تنش بی‌بعد حول سیلندر برای سه مقدار عدد الاستیک $0/2$ ، $0/6$ و 1 در زمانی که ضریب برآ بیشترین مقدار را دارد، مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. و زاویه شروع، از نقطه جلو سیلندر شروع شده و در جهت پادساعت‌گرد حول سیلندر ادامه پیدا می‌کند.

تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه در فاصله $0/005$ از سیلندر برای سه مقدار عدد الاستیک $0/2$ ، $0/6$ و 1 در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.

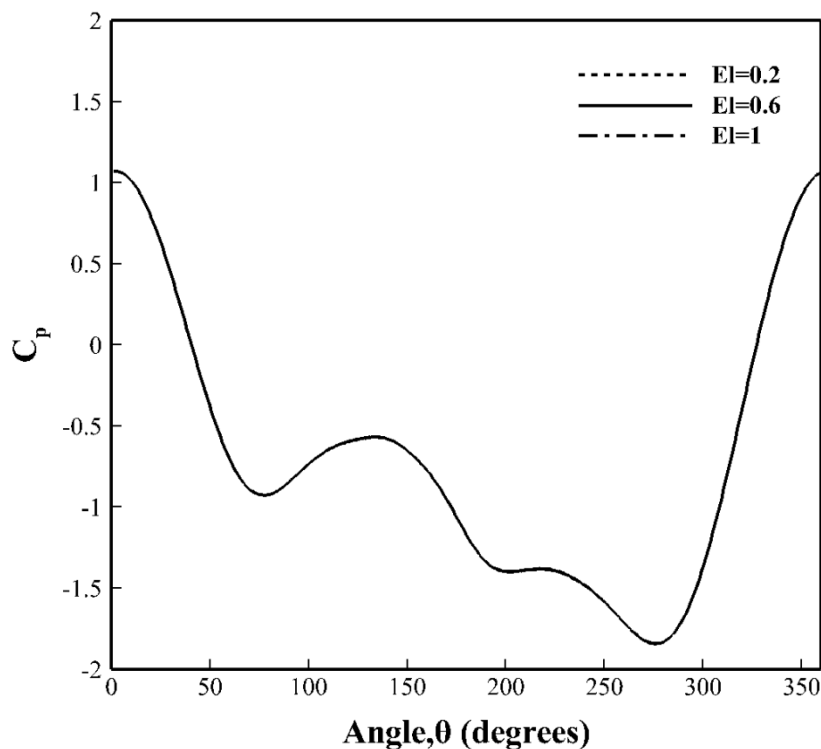


شکل ۳-۱۴: تغییرات سرعت بی بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار الاستیک

می توان مشاهده کرد که افزایش خاصیت الاستیک هیچ تأثیری روی سرعت جریان حول سیلندر ندارد و نمودار سرعت برای هر سه مقدار الاستیک بر هم منطبق شده است. در واقع افزایش خاصیت الاستیک، با افزایش زمان رهایی از تنش سیال ویسکوالاستیک همراه است. به همین خاطر انتظار نمی رود که تغییری روی سرعت جریان حول سیلندر با افزایش خاصیت الاستیک رخ دهد. ولی می توان مشاهده کرد که سرعت جریان در پشت سیلندر به کمترین مقدار خود می رسد، و در زاویه ۱۰۵، ۱۳۵ و ۲۴۵ درجه، سرعت جریان تقریباً به مقدار صفر می رسد.

تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار الاستیک ۰/۲، ۰/۶ و ۱ در شکل

۳-۱۵ نشان داده شده است.

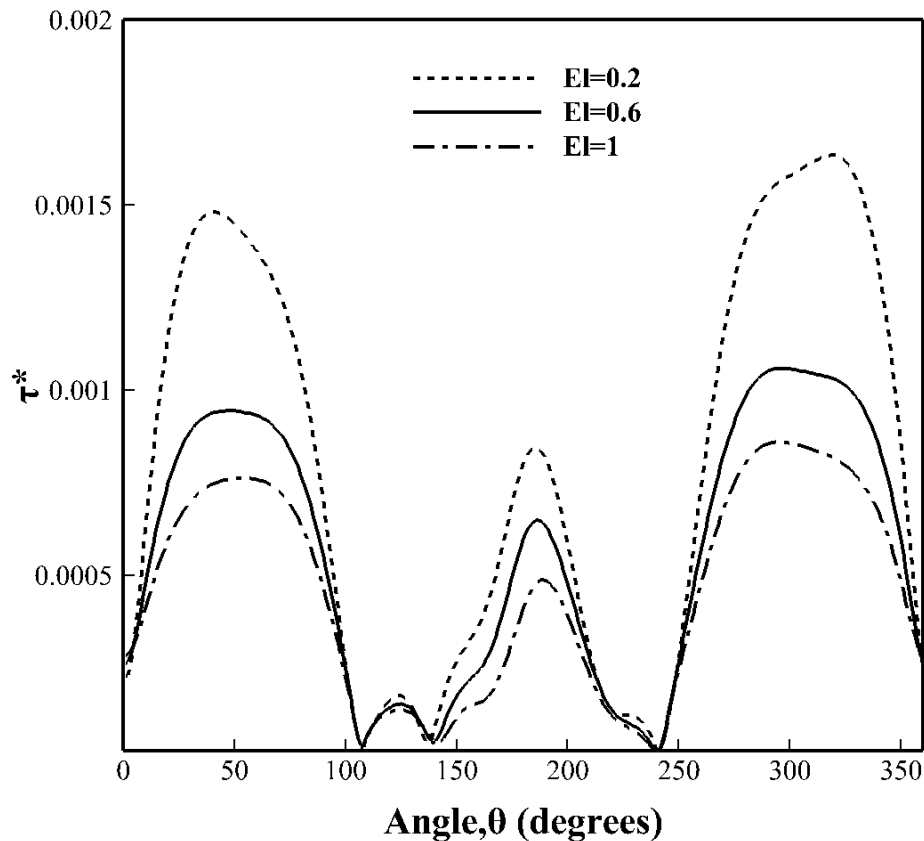


شکل ۳-۱۵: تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار الاستیک

می‌توان مشاهده کرد که افزایش خاصیت الاستیک هیچ تأثیری در فشار بوجود آمده حول سیلندر ندارد. و نمودار ضریب فشار برای هر سه مقدار الاستیک بر هم منطبق شده است. افزایش خاصیت الاستیک فقط با افزایش زمان رهایی از تنش سیال ویسکوالاستیک همراه است و انتظار نمی‌رود تغییری در سرعت و فشار جریان حول سیلندر رخ دهد. در شکل ۳-۱۵ می‌توان مشاهده نمود که فشار جریان حول سیلندر برای هر سه مقدار الاستیک در زاویه ۲۸۰ درجه به کمترین مقدار می‌رسد و در نقطه جلو سیلندر (نقطه سکون) بیشترین مقدار را دارد.

تغییرات تنش بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار الاستیک ۰/۲، ۰/۶ و ۱ در شکل

۳-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶: تغییرات تنش بی بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار الاستیک

می توان مشاهده کرد که با افزایش خاصیت الاستیک تنش ایجاد شده حول سیلندر کاهش می یابد. بنابراین با افزایش زمان رهایی از تنش سیال ویسکوالاستیک، تنش ایجاد شده حول سیلندر کاهش می یابد. همچنین تنش برای هر سه مقدار الاستیک در زاویه ۱۱۰، ۱۴۰ و ۲۴۰ به مقدار صفر می رسد.

۳-۶-۲- بررسی اثر رینولدز بر مشخصه های جریان و حرارت

مشخصه های جریان و حرارت در $De = 80$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ ، $\beta = 0/6$ با تغییر عدد رینولدز مورد بررسی قرار گرفته شده است. در جدول ۳-۵ می توان این تغییرات را مشاهده نمود.

جدول ۳-۵: نتایج حاصل از افزایش عدد رینولدز در $De = 80$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0.5$ و $\beta = 0.6$

\overline{Nu}	\overline{C}_D	C_{Dmin}	C_{Dmax}	ΔC_L	St	T	Re
۸۶/۴۶	۱/۳۳۵۲	۱/۳۲۶۳	۱/۳۴۴۱	۰/۳۲۰۳۶	۰/۱۶۶	۶/۰۳	۴۰
۱۰۷/۰۴۵	۱/۳۳۲۵	۱/۲۹۷۸	۱/۳۴۷۳	۰/۵۰۷۹	۰/۱۸۵	۵/۴۱	۶۰
۱۲۴/۳۶	۱/۳۳۶	۱/۲۹۲۳	۱/۳۷۹۷	۰/۶۷۲۷	۰/۱۹۷	۵/۰۸	۸۰
۱۳۸/۶۴	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۱۰۰
۱۴۹/۷۶	۱/۳۷۵۷	۱/۲۹۵۳	۱/۴۵۶۱	۰/۹۱۱	۰/۲۱۱	۴/۷۳	۱۲۰
۱۶۰/۷۱۵	۱/۴	۱/۲۹۷۲	۱/۵۰۳۷	۱/۰۲۴۳	۰/۲۱۷	۴/۵۹	۱۵۰

مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، دوره تناوب نوسانات کاهش و با توجه به رابطه عکس دوره تناوب با عدد استروهل، عدد استروهل افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا افزایش می‌یابد. در واقع افزایش رینولدز با افزایش و شدت گرفتن پدیده انتشار گردابه‌ها همراه است به همین خاطر انتظار می‌رود دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا افزایش و دوره تناوب نوسانات کاهش پیدا کند. و با افزایش عدد رینولدز و شدت گرفتن انتشار گردابه‌ها، انتقال حرارت از سیال به استوانه بیشتر می‌شود، بنابراین مقدار ناسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند.

مقادیر $\frac{\overline{Nu}}{Nu_0}$ و $\frac{\overline{C}_D}{C_{D0}}$ ، $\frac{\Delta C_L}{\Delta C_{L0}}$ که اندیس صفر مربوط به سیال نیوتنی است، در جدول ۳-۶ آورده

شده است.

جدول ۳-۶: مقایسه نتایج سیال ویسکوالاستیک با سیال نیوتنی

$\frac{\bar{Nu}}{\bar{Nu}_0}$	$\frac{\bar{C}_D}{\bar{C}_{D_0}}$	$\frac{\Delta C_L}{\Delta C_{L_0}}$	Re
۰/۹۵	۰/۹۲	۳/۷۳	۶۰
۰/۹۵	۰/۹۶	۲/۶۷	۸۰
۰/۹۵	۰/۹۹	۲/۳۵	۱۰۰
۰/۹۵	۱/۰۱	۲/۱۴	۱۲۰

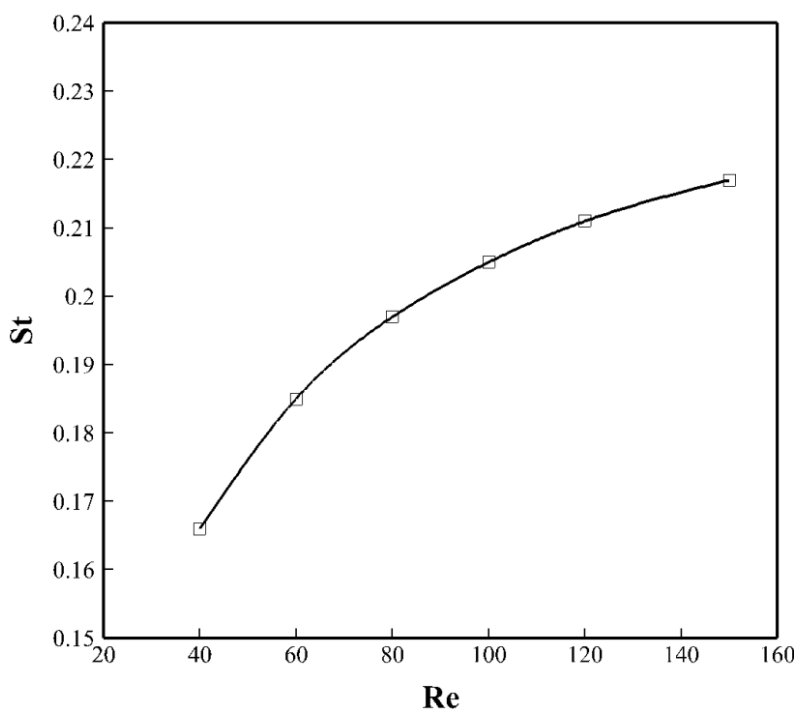
مشاهده می‌کنیم که با افزایش رینولدز، مقدار $\frac{\Delta C_L}{\Delta C_{L_0}}$ کاهش، مقدار $\frac{\bar{C}_D}{\bar{C}_{D_0}}$ افزایش و $\frac{\bar{Nu}}{\bar{Nu}_0}$ ثابت

می‌ماند. در ادامه نیروهای برآ و پسا به صورت مجزا (اصطکاک و فشاری) برای رینولدزهای مختلف در جدول ۳-۷ آورده شده است.

جدول ۳-۷: تغییرات نیروهای پسا و برآ با افزایش رینولدز در $\alpha = \text{Br} = -100$, $\text{Pr} = 200$, $\text{De} = 80$ و $\beta = 0/5$ و $0/6$

\bar{F}_{Lt} ($\times 10^{-4}$)	\bar{F}_{Dt} ($\times 10^{-4}$)	\bar{F}_{Lp} ($\times 10^{-4}$)	\bar{F}_{Dp} ($\times 10^{-4}$)	\bar{F}_{Lfr} ($\times 10^{-5}$)	\bar{F}_{Dfr} ($\times 10^{-4}$)	Re
۱/۶	۶/۷	۱/۴	۴/۹	۲/۱	۱/۷	۴۰
۲/۵	۶/۶	۲/۳	۵/۲	۲/۷	۱/۴	۶۰
۳/۴	۶/۷	۳/۱	۵/۴	۳/۲	۱/۲	۸۰
۴	۶/۷	۳/۷	۵/۶	۳/۳	۱/۱	۱۰۰
۴/۶	۶/۹	۴/۳	۵/۸	۳/۴۷	۱	۱۲۰
۵/۱	۷	۴/۸	۶/۱	۳/۴۹	۰/۹۵	۱۵۰

در جدول بالا \bar{F}_{Dfr} نیروی متوسط پسا اصطکاکی، \bar{F}_{Lfr} نیروی متوسط برآ اصطکاکی، \bar{F}_{Dp} نیروی متوسط پسا فشاری، \bar{F}_{Lp} نیروی متوسط برآ فشاری، \bar{F}_{Dt} نیروی متوسط پسا کل، \bar{F}_{Lt} نیروی متوسط برآ کل است. مشاهده می‌توان کرد که با افزایش رینولدز، نیروهای پسا و برآ افزایش می‌یابد. نمودار تغییرات عدد استروهل، ضریب برآ متوسط و مقدار ناسلت متوسط نسبت به عدد رینولدز به ترتیب در شکل ۳-۱۷، شکل ۳-۱۸ و شکل ۳-۱۹ آورده شده است.

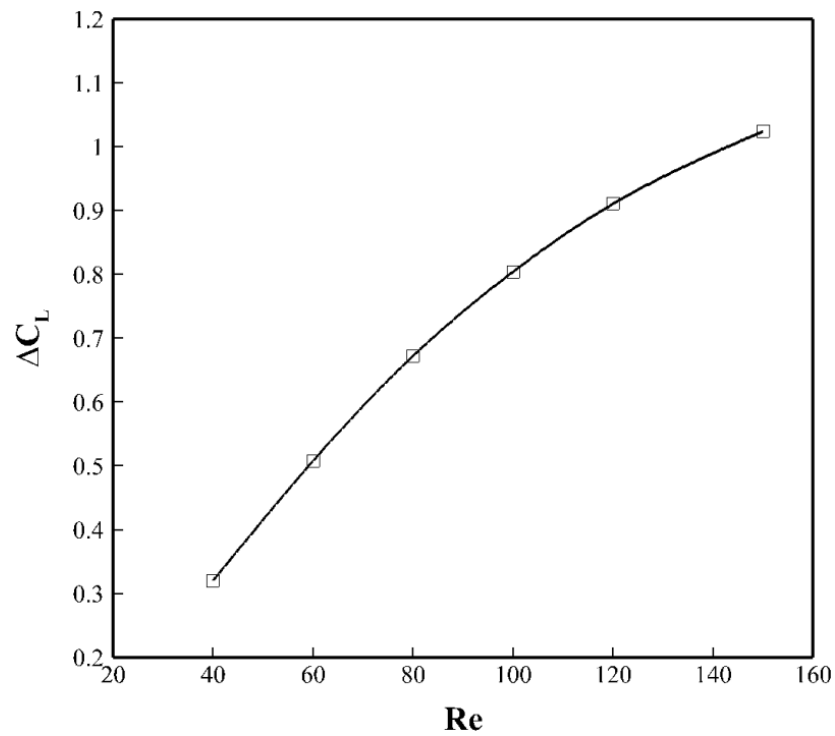


شکل ۳-۱۷: نمودار تغییرات عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز در $De = 80$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$.

$$\beta = 0/6 \text{ و } \alpha = 0/5$$

با توجه به رابطه مستقیم اعداد استروهل و رینولدز در شکل ۳-۱۷ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، عدد استروهل افزایش می‌یابد. افزایش عدد رینولدز با افزایش و شدت گرفتن پدیده انتشار گردابه‌ها همراه است که در واقع باعث کاهش دوره تناوب نوسانات و افزایش عدد استروهل می‌شود. این پدیده افزایش انتشار گردابه‌ای نیز موجب افزایش دامنه نوسانات ضریب برآ می‌شود که

در شکل ۱۸-۳ می‌توان این تغییرات را مشاهده نمود.

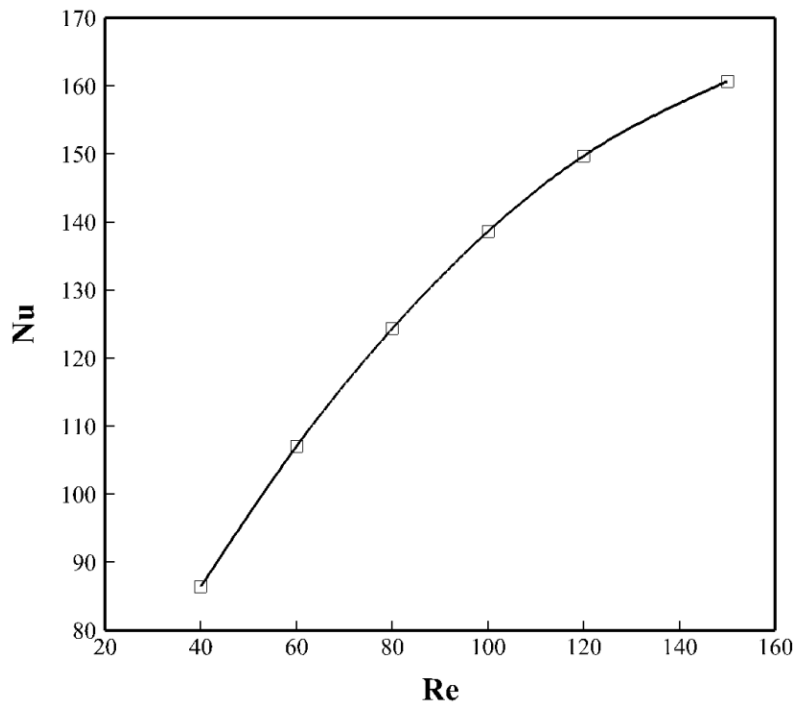


شکل ۱۸-۳: نمودار تغییرات ضریب برآ متوسط نسبت به عدد رینولدز در $De = 80$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$

با افزایش عدد رینولدز و شدت گرفتن انتشار گردابه‌ها، انتقال حرارت از سیال به استوانه بیشتر

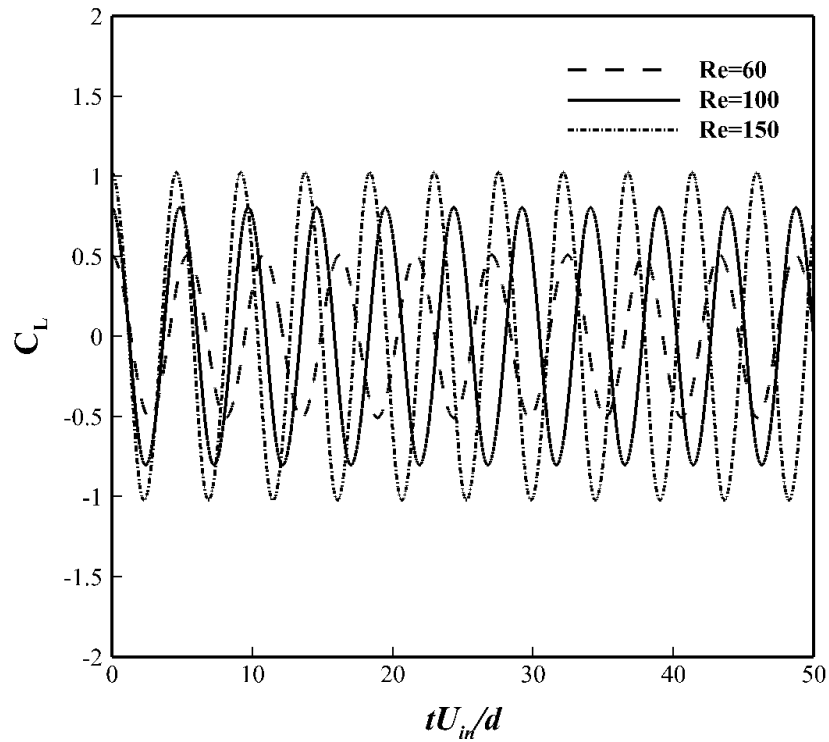
می‌شود، و بنابراین مقدار ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. در شکل ۱۹-۳ می‌توان این تغییرات را

مشاهده نمود.



شکل ۳-۱۹: نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به رینولدز در $De = 80$ ، $Pr = 200$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ و $\beta = 0/6$

همان‌طور که در بالا ذکر شد با افزایش عدد رینولدز، دامنه نوسانات ضریب برآ افزایش و دوره تناوب کاهش می‌یابد. در بازه ۵۰ ثانیه از نوسانات، نمودار تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد برای سه مقدار رینولدز ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در شکل ۳-۲۰ آورده شده است.



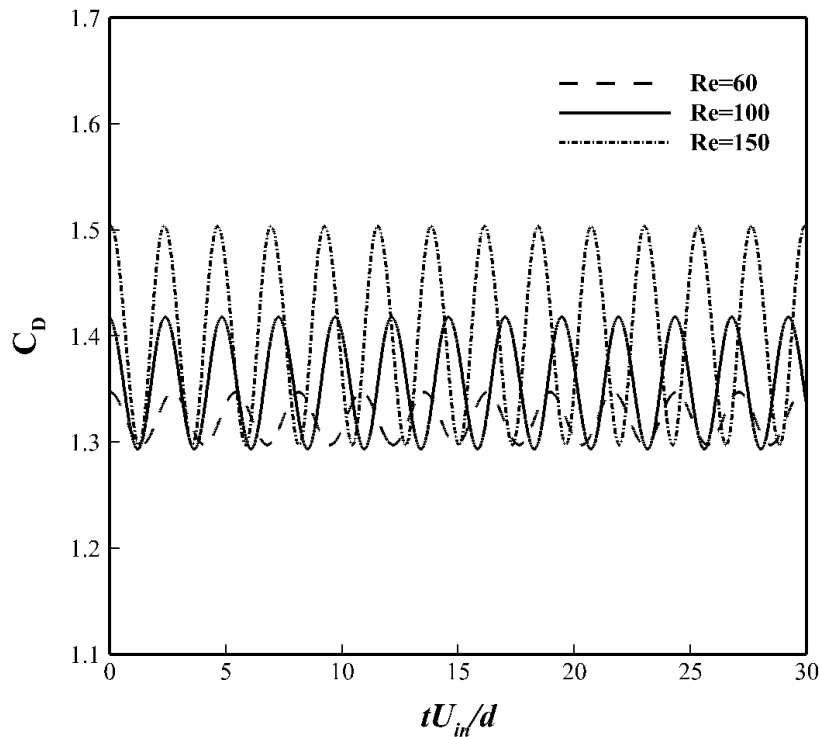
شکل ۳-۲۰: نمودار تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان برای مقدار رینولدزهای مختلف در $De = 80$ ،

$$\beta = 0/6 \text{ و } \alpha = 0/5, Br = -100, Pr = 200$$

در جدول ۳-۵ مشاهده شد که با افزایش عدد رینولدز، دامنه نوسانات ضریب پسا افزایش می‌یابد.

در بازه ۳۰ ثانیه از نوسانات، نمودار تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان برای سه مقدار رینولدز ۶۰،

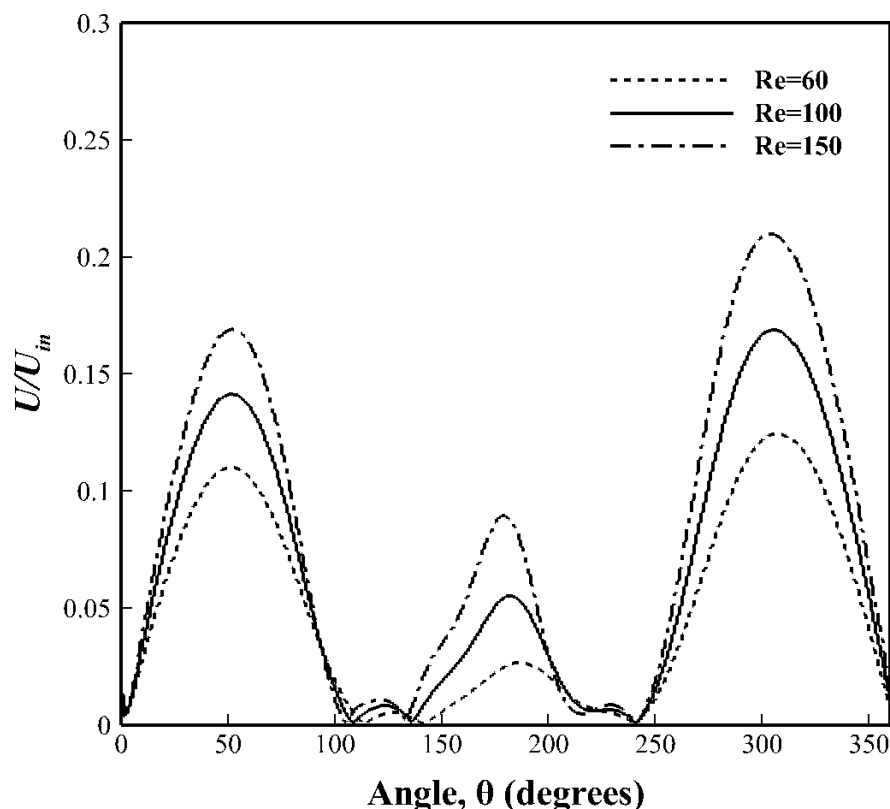
۱۰۰ و ۱۵۰ در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۱: نمودار تغییرات ضریب پسا نسبت به زمان برای رینولدزهای مختلف در $De = 80$.

$$\beta = 0.06 \text{ و } \alpha = 0.05, Br = -100, Pr = 200$$

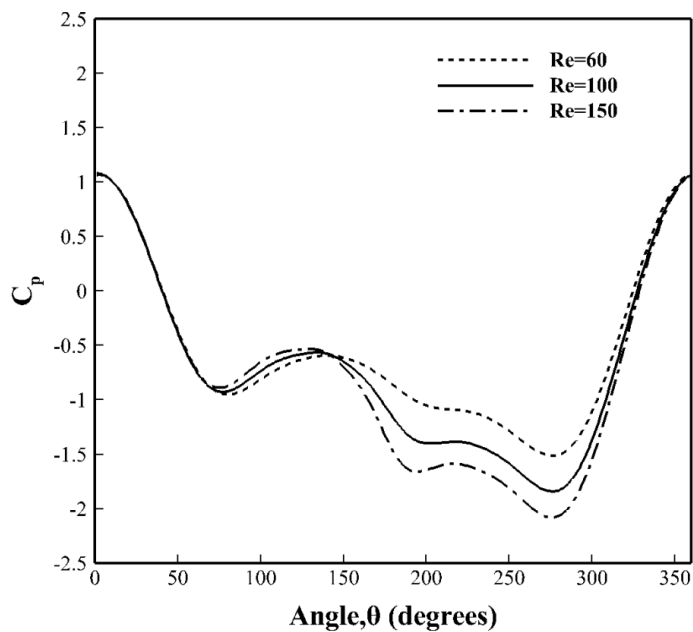
در ادامه تغییرات سرعت بی‌بعد، ضریب فشار و تنش بی‌بعد حول سیلندر برای سه مقدار رینولدز ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در زمانی که ضریب برآ بیشترین مقدار را دارد، مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. و زاویه شروع، از نقطه جلو سیلندر شروع شده و در جهت پادساعت‌گرد حول سیلندر ادامه پیدا می‌کند. تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه در فاصله ۰/۰۰۵ از سیلندر برای سه مقدار رینولدز ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۲: تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار رینولدزهای مختلف

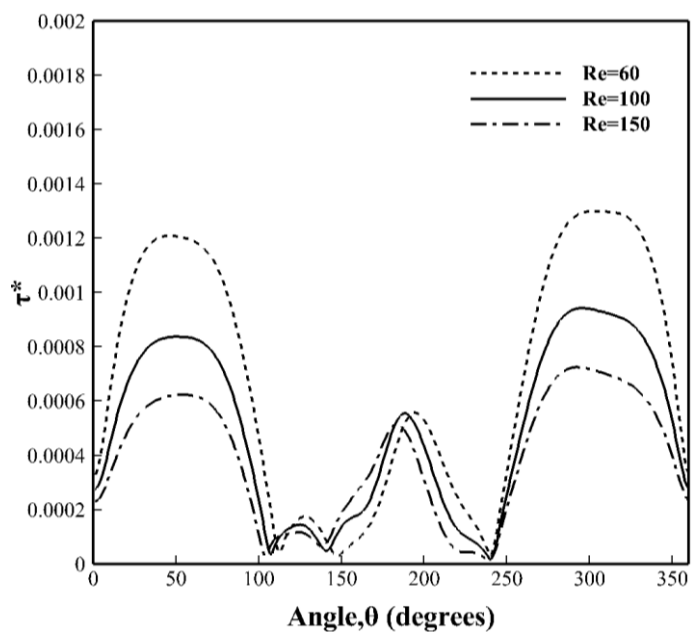
می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان حول سیلندر افزایش پیدا می‌کند. علت افزایش سرعت با افزایش رینولدز به این خاطر است که عدد رینولدز با سرعت جریان رابطه مستقیم دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که سرعت جریان در ناحیه پشت سیلندر به کمترین مقدار خود می‌رسد، و در بعضی زوایا سرعت جریان به مقدار صفر می‌رسد.

تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار رینولدز ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است. افت فشار بیشتری را در ناحیه پشت سیلندر با افزایش رینولدز می‌توان مشاهده کرد، در زاویه ۲۸۰ درجه مقدار فشار برای هر سه رینولدز به کمترین مقدار خود می‌رسد. و در جلو سیلندر (نقطه سکون) بیشترین مقدار خود را دارد.



شکل ۳-۲۳: تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار رینولدزهای مختلف

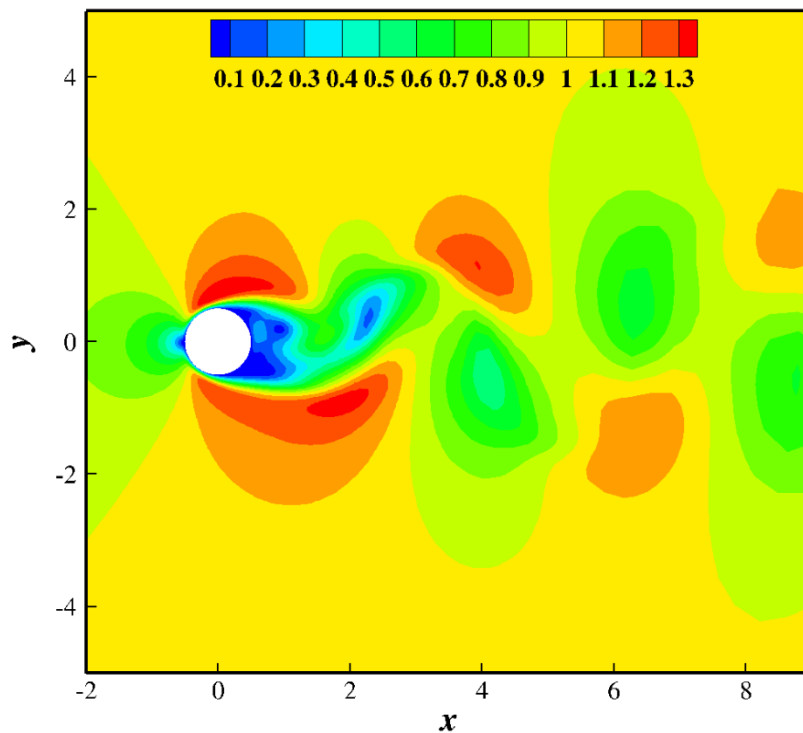
تغییرات تنش بی بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای سه مقدار رینولدز ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در شکل ۳-۲۴ آورده شده است.



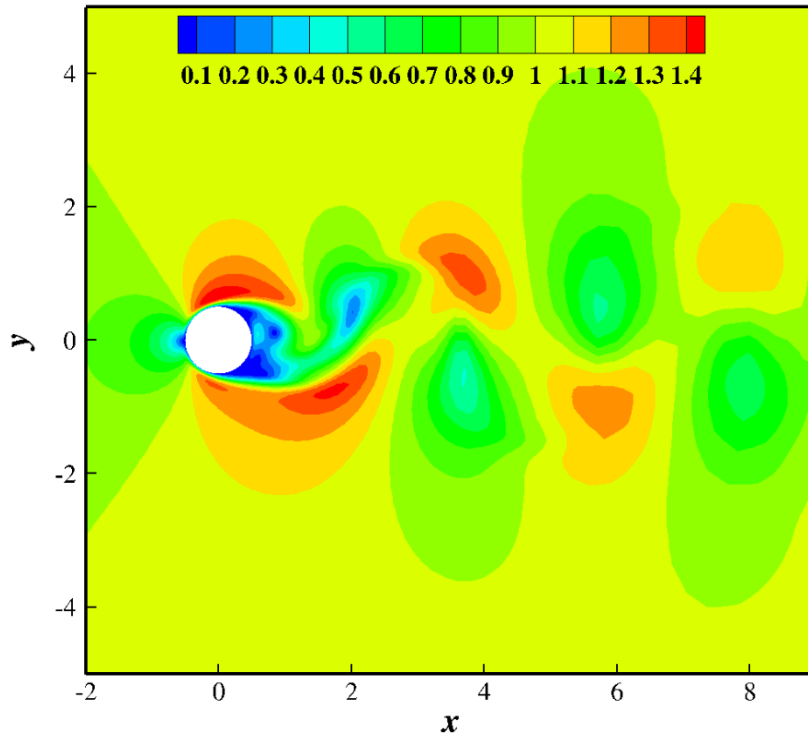
شکل ۳-۲۴: تغییرات تنش بی بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار رینولدزهای مختلف

مشاهده می‌توان کرد که با افزایش عدد رینولدز، تنش بوجود آمده حول سیلندر کاهش پیدا می‌کند. و در بعضی زوایا، تنش به مقدار صفر می‌رسد.

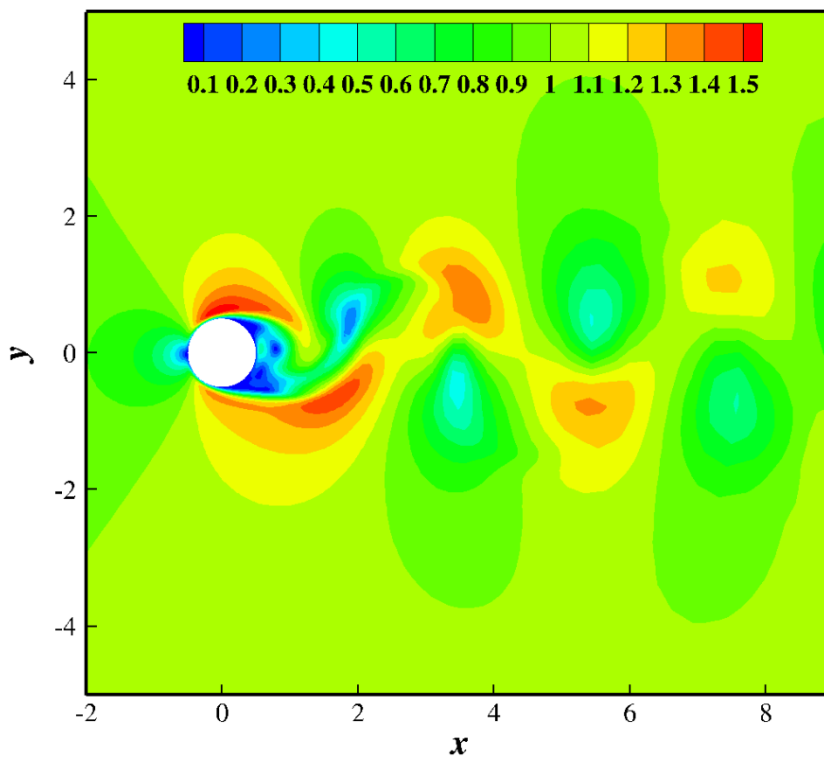
در زمانی که ضریب برآ بیشترین مقدار را دارد، کانتور اندازه سرعت برای سه مقدار رینولدز ۶۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ به ترتیب در شکل ۳-۲۵، شکل ۳-۲۶ و شکل ۳-۲۷ آورده شده است.



شکل ۳-۲۵: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۶۰

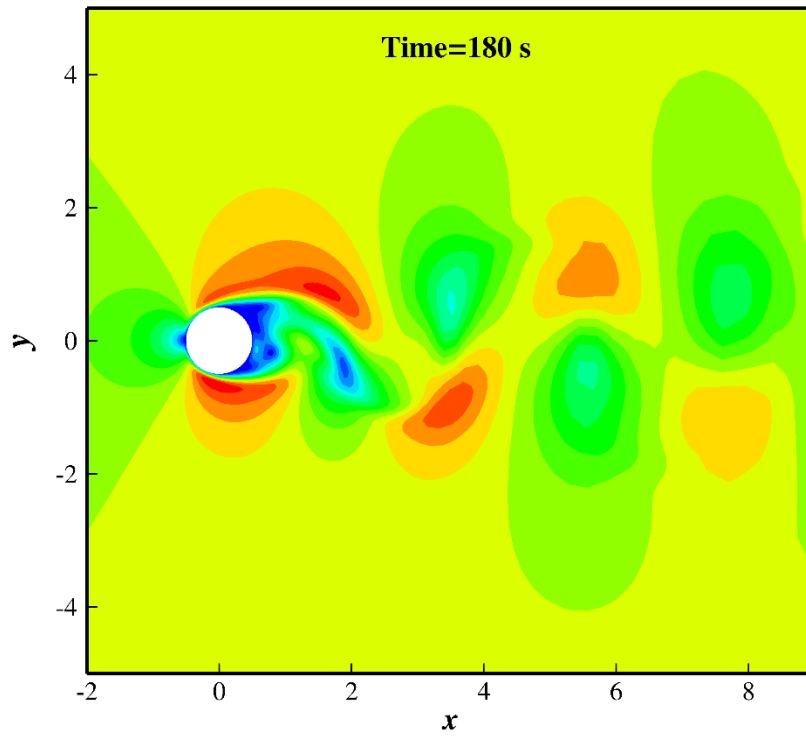


شکل ۳-۲۶: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰

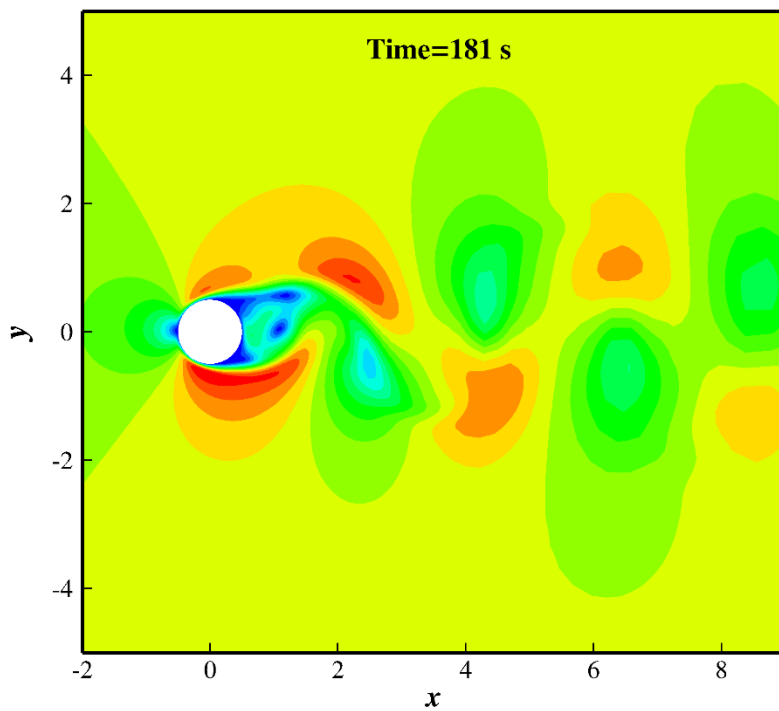


شکل ۳-۲۷: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۵۰

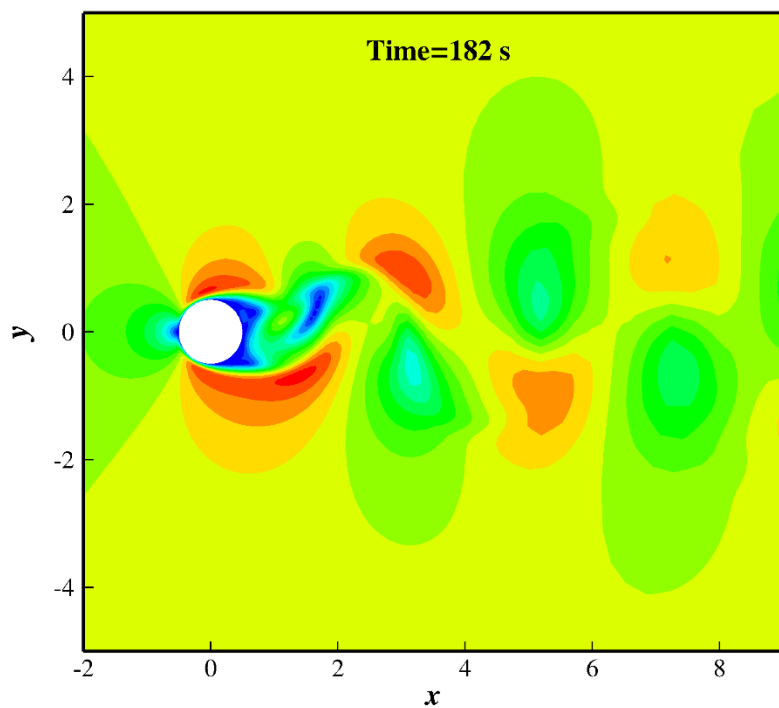
مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان افزایش می‌یابد و اندازه گردابه‌های تولیدی کاهش می‌یابد. کانتور اندازه سرعت در یک دوره تناوب برای رینولدز ۱۰۰ در زمان‌های ۱۸۰ تا ۱۸۴ ثانیه در شکل ۳-۲۸، شکل ۳-۲۹، شکل ۳-۳۰، شکل ۳-۳۱ و شکل ۳-۳۲ آورده شده است.



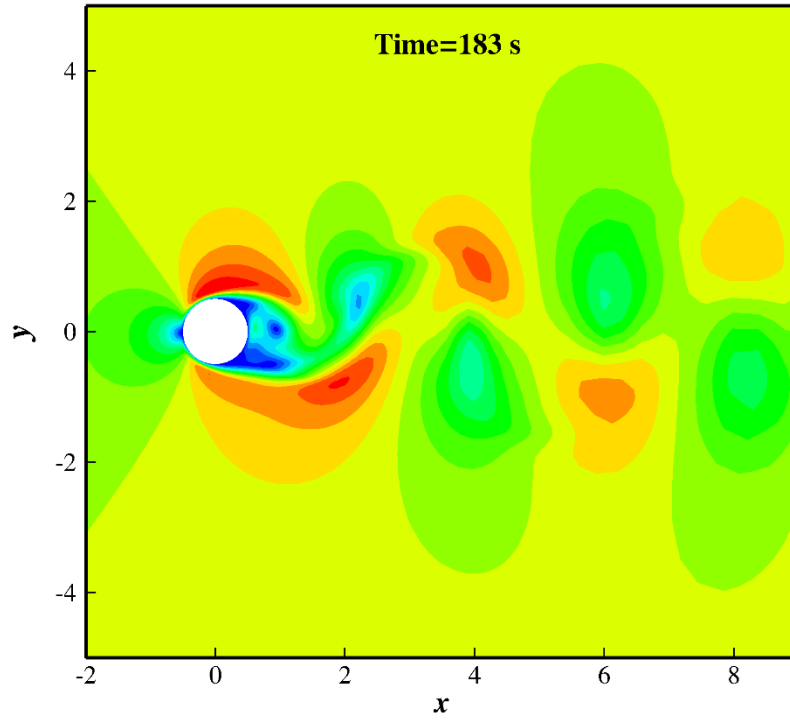
شکل ۳-۲۸: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۰ ثانیه



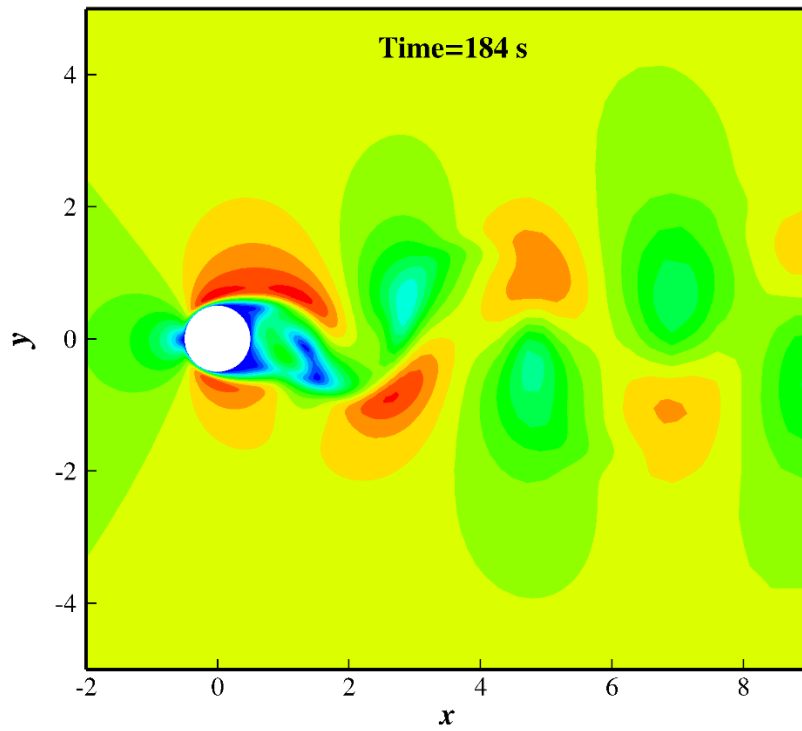
شکل ۳-۲۹: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۱ ثانیه



شکل ۳-۳۰: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۲ ثانیه



شکل ۳-۳۱: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۳ ثانیه



شکل ۳-۳۲: کانتور اندازه سرعت برای عدد رینولدز ۱۰۰ در زمان ۱۸۴ ثانیه

شکل ۳-۲۸ تا شکل ۳-۳۲ تغییرات ناحیه جدایش^۱، ناحیه کم‌سرعت^۲ و ناحیه پرسرعت^۳ را در یک سیکل جریان در زمان‌های ۱۸۰ تا ۱۸۴ نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۳-۲۸ همان‌طور که انتظار می‌رود یک ناحیه‌ی جدایش در پشت سیلندر ایجاد شده است. همچنین نواحی پرسرعت تقریباً مشابهی در بالا و پایین سیلندر قابل مشاهده است. افزایش و گسترش ناحیه‌ی پرسرعت در قسمت بالای سیلندر با کاهش این ناحیه‌ی پرسرعت در قسمت تحتانی آن همراه است (شکل ۳-۲۸)، گسترش و حرکت ناحیه‌ی پرسرعت بالای سیلندر به سمت پایین دست جریان منجر به تشکیل گردابه‌ای در جهت ساعت‌گرد^۴ می‌گردد (شکل ۳-۲۹)، هم‌زمان با تشکیل این گردابه‌ی ساعت‌گرد، دو گردابه در خلاف جهت یکدیگر (ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد^۵) از ناحیه کم‌سرعت پشت سیلندر شروع به جدایش می‌کنند (شکل ۳-۲۹)، این دو گردابه در شکل ۳-۳۰ با یکدیگر ادغام شده و تشکیل یک گردابه‌ی بزرگ‌تر پادساعت‌گرد کم‌سرعتی را می‌دهند، سپس این روند برای قسمت تحتانی سیلندر نیز به وقوع می‌پیوندد. در شکل ۳-۳۰ و شکل ۳-۳۱، افزایش و گسترش ناحیه‌ی پرسرعت در قسمت پایین سیلندر که با کاهش این ناحیه‌ی پرسرعت در قسمت بالای آن همراه است مشاهده می‌گردد. برخلاف ناحیه‌ی بالای سیلندر، گسترش و حرکت ناحیه‌ی پرسرعت پایین سیلندر به سمت پایین دست جریان منجر به تشکیل گردابه‌ای در جهت پادساعت‌گرد می‌گردد (شکل ۳-۳۲)، همچنین هم‌زمان با تشکیل این گردابه‌ی پادساعت‌گرد، دو گردابه در خلاف جهت یکدیگر دیگر از ناحیه کم‌سرعت پشت سیلندر شروع به جدایش می‌کنند (شکل ۳-۳۲)، همچنین برخلاف گذشته، این دو گردابه در شکل ۳-۳۲ با یکدیگر ادغام شده و تشکیل یک گردابه‌ی بزرگ‌تر ساعت‌گرد کم‌سرعتی را می‌دهند (شکل ۳-۳۰)، با توجه به شکل ۳-۲۸ تا شکل ۳-۳۲، در هر سیکل جریان، یک گردابه‌ی ساعت‌گرد، یک گردابه‌ی پادساعت‌گرد و دو گردابه‌ی ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد به ترتیب در

^۱ Region of Separation

^۲ Region of Low Velocity

^۳ Region of High Velocity

^۴ Clockwise Vortex

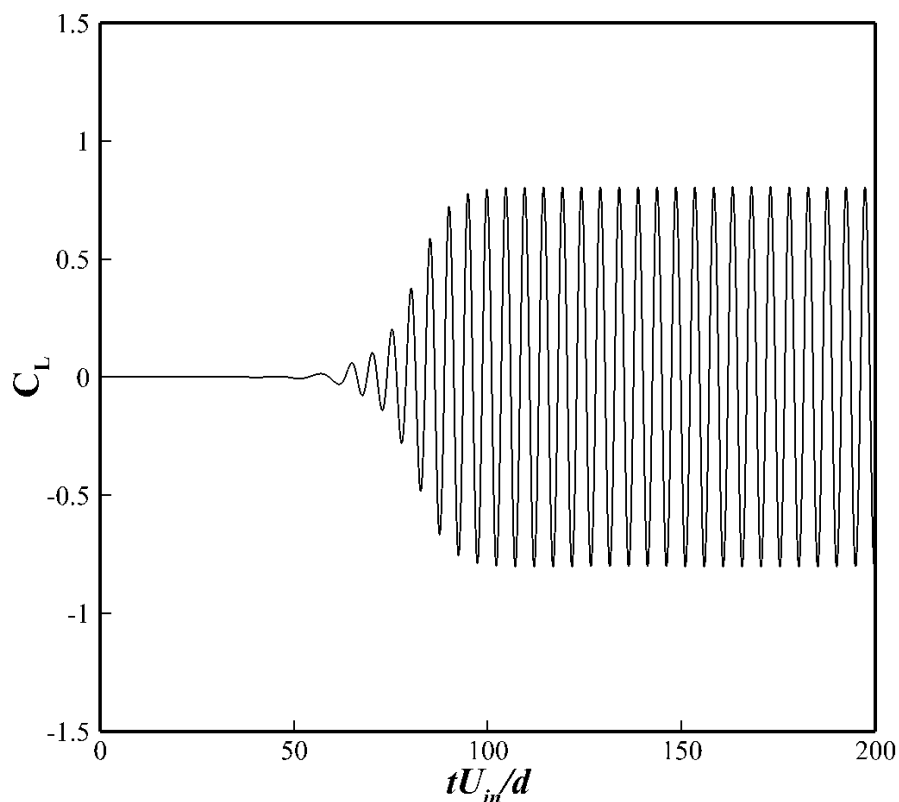
^۵ Counter-Clockwise Vortex

قسمت بالا، پایین و پشت سیلندر تشکیل و به سمت پایین دست جریان منتشر می‌شوند. درحالی‌که گردابه‌های ضعیف‌تر به سرعت دچار اضمحلال می‌شوند، گردابه‌های قوی‌تر به سمت پایین دست انتشار می‌یابند. گردابه‌های منتشرشده در هر سیکل، دو شاخه‌ی تقریباً موازی در قسمت بالا و پایین سیلندر را تشکیل می‌دهند و در این دو مسیر به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کنند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، با افزایش عدد رینولدز از ۶۰ به ۱۵۰، میانگین ضریب برا افزایش می‌یابد. این افزایش مقدار ضریب برا با توجه به شکل ۳-۲۵ تا شکل ۳-۲۷ که در آن افزایش عدد رینولدز منجر به کاهش اندازه گردابه‌های تولیدی می‌شود قابل توضیح است. همان‌طور که در شکل ۳-۲۸ تا شکل ۳-۳۲ مشاهده می‌گردد، گردابه‌های تشکیل‌شده با گذر زمان رشد کرده و ابعاد آن‌ها افزایش می‌یابد و سپس در زمانی مشخص (که بستگی به زاویه حمله و عدد رینولدز دارد) تجزیه شده، ابعاد آن کاهش می‌یابد و به پایین دست منتشر می‌گردند (پدیده انتشار گردابه^۱) و این اتفاق به صورت نوسانی ادامه خواهد داشت. در حقیقت عامل اصلی نوسانی بودن ضرایب برا و پسا، همین نوسانی بودن الگوی جریان و رفتار گردابه‌ها است. همچنین تغییرات ضریب برا با مطالعه رفتار گردابه‌ها پیرامون سیلندر قابل تفسیر است. در یک دوره‌ی تناوبی ضریب برا، هنگامی که گردابه‌ی اولیه^۲ از قسمت پایین سیلندر جدا می‌شود (با چرخش پادساعت‌گرد)، در قسمت بالای سیلندر یک گردابه‌ی ثانویه^۳ در جهت مخالف چرخش شروع به تشکیل شدن می‌کند. این رفتار جریان با توجه به شکل ۳-۳۳ در زمان ۱۸۳ و شکل ۳-۳۱، بیشینه مقدار ضریب برا را به دنبال خواهد داشت. سپس هنگامی که گردابه‌ی ثانویه رشد می‌کند، ضریب برا شروع به کاهش می‌کند، این رفتار نوسانی الگوی جریان و گردابه‌ها و متعاقباً رفتار نوسانی ضریب برا ادامه می‌یابد.

^۱ Vortex Shedding

^۲ Primary Vortex

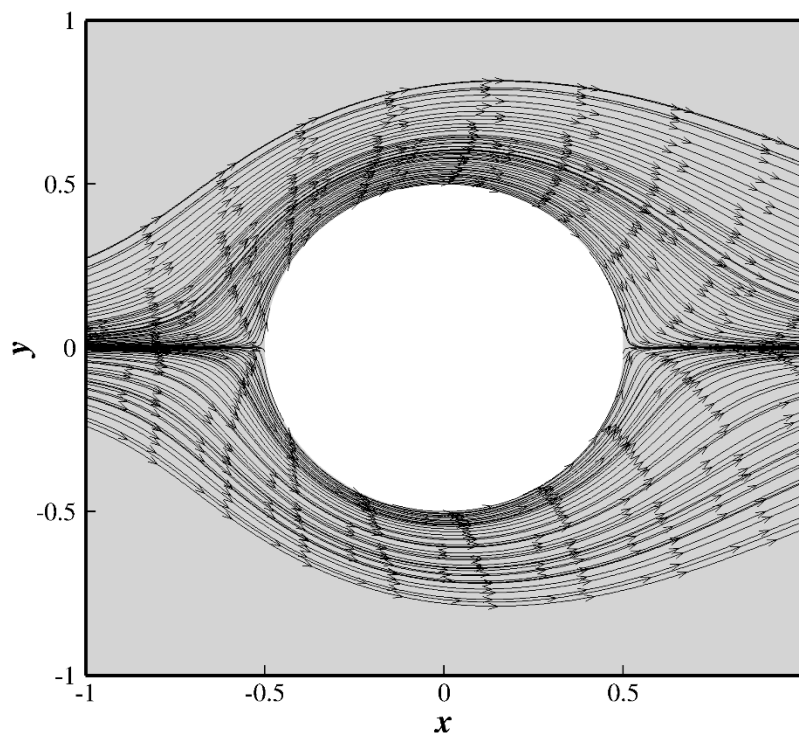
^۳ Secondary Vortex



شکل ۳-۳: نمودار تغییرات ضریب برآ نسبت به زمان بی‌بعد در رینولدز ۱۰۰ در $De = 80$.

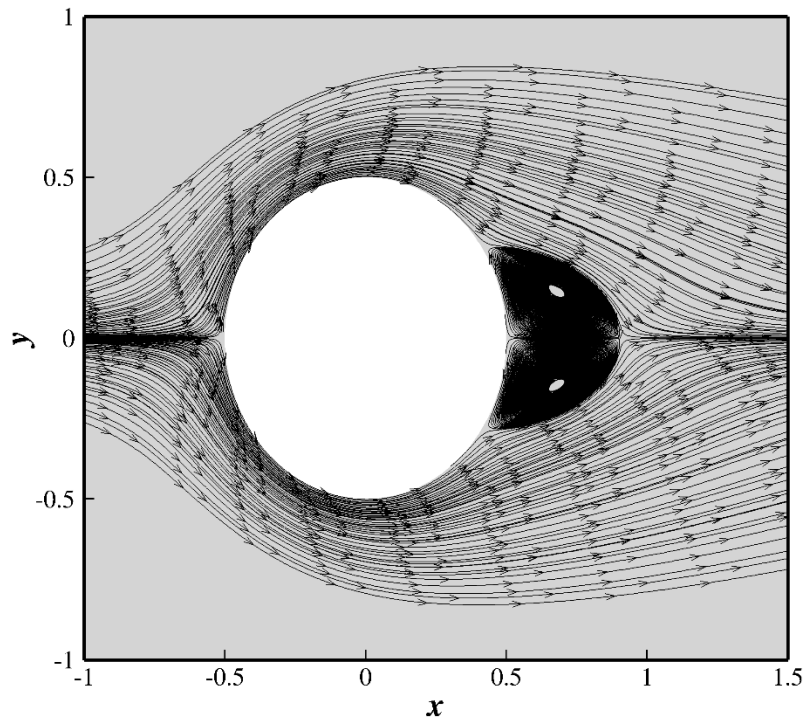
$$\beta = 0/6 \text{ و } \alpha = 0/5, Br = -100, Pr = 200$$

در مطالب ذکر شده، نتایج به دست آمده برای عدد رینولدزهای بزرگ‌تر از ۴۰ که انتشار گردابه‌ها داریم، آورده شده است. همان‌طور که در فصل اول بیان شد، در مقدار رینولدزهای کمتر از ۴ به دلیل شرط عدم لغزش بر روی سیلندر، گردابه‌هایی به وجود می‌آیند که با توجه به فرض استوکس، این گردابه‌ها در جریان پخش شده و قدرت نفوذ و حرکت در جریان را ندارند. اعداد رینولدز کمتر از ۴ مورد بررسی شده در این کار ۰/۵، ۱ و ۲ است. که مشاهده شد که گردابه در این رینولدزها در پشت سیلندر تشکیل نمی‌شود. برای نمونه خطوط جریان تشکیل شده در پشت سیلندر برای عدد رینولدز ۱ در شکل ۳-۳۴ نشان داده شده است.

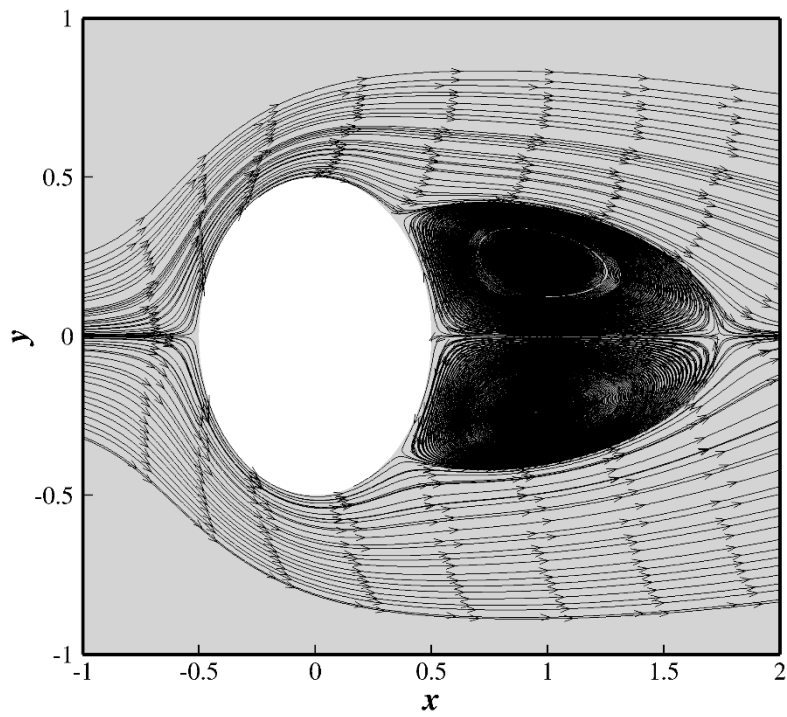


شکل ۳-۳۴: نمایش خطوط جریان حول سیلندر برای عدد رینولدز ۱

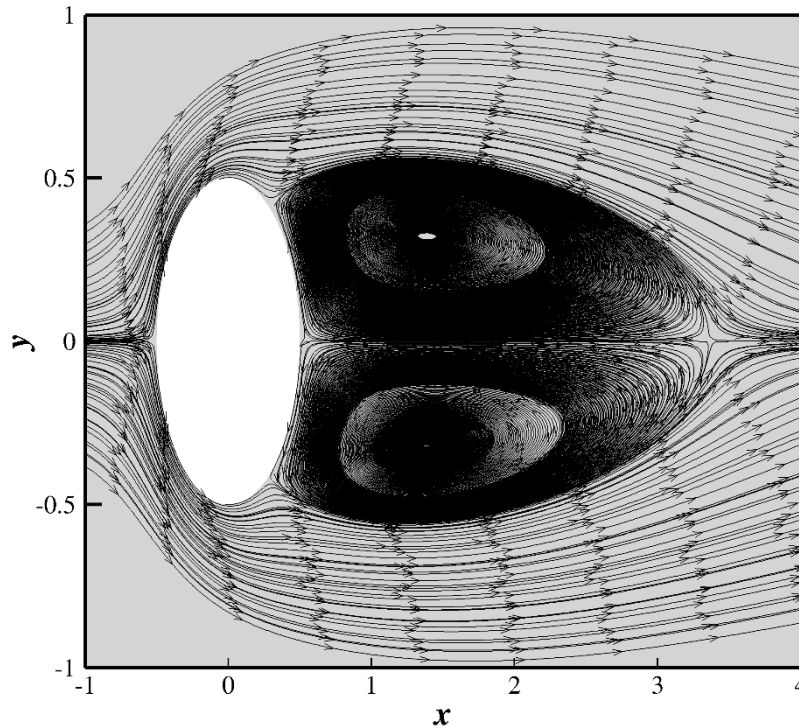
در فصل اول همچنین بیان شد که در اعداد رینولدز بین ۴ تا ۴۰، دو گردابه متقارن ایستا در پشت سیلندر به وجود می‌آید که با افزایش عدد رینولدز، اندازه آن‌ها نیز بزرگ‌تر می‌گردد. اعداد رینولدز بین ۴ تا ۴۰ بررسی شده در این کار، ۵، ۱۰ و ۲۰ است. که به ترتیب گردابه‌های متقارن ایستا تشکیل شده برای این اعداد رینولدز در شکل ۳-۳۵، شکل ۳-۳۶ و شکل ۳-۳۷ آورده شده است که می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عدد رینولدز طول گردابه‌های تشکیل شده در پشت سیلندر افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۳۵: نمایش گردابه‌های تشکیل شده در عدد رینولدز ۵



شکل ۳-۳۶: نمایش گردابه‌های تشکیل شده در عدد رینولدز ۱۰



شکل ۳-۳۷: نمایش گردابه‌های تشکیل شده در عدد رینولدز ۲۰

با توجه به شکل‌های آورده شده، طول گردابه‌های متقارن ایستا تشکیل شده در پشت سیلندر برای اعداد رینولدز ۵، ۱۰ و ۲۰ به ترتیب ۰/۹، ۱/۷۵ و ۳/۴ متر است.

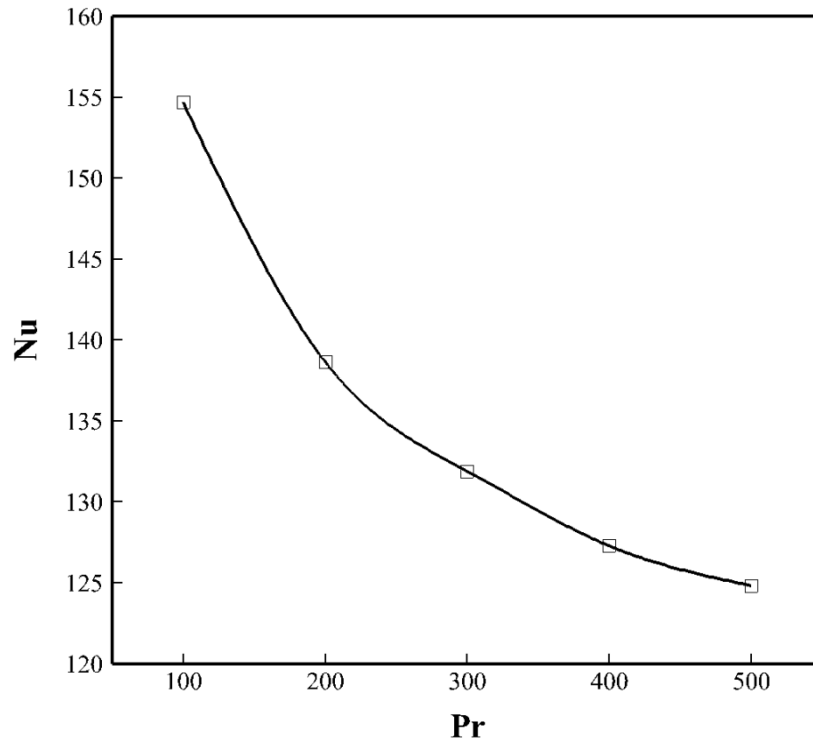
۳-۶-۳- بررسی اثر پرانتل بر مشخصه‌های جریان و حرارت

مشخصه‌های جریان و حرارت در $De = 80$ ، $Re = 100$ ، $Br = -100$ ، $\alpha = 0/5$ ، $\beta = 0/6$ با تغییر عدد پرانتل مورد بررسی قرار گرفته شده است. در جدول ۳-۸ می‌توان این تغییرات را مشاهده نمود.

جدول ۳-۸: نتایج حاصل از افزایش عدد پرانتل در $De = 80$, $Re = 100$, $Br = -100$, $\alpha = 0.5$ و $\beta = 0.6$

\overline{Nu}	$\overline{C_D}$	C_{Dmin}	C_{Dmax}	ΔC_L	St	T	Pr
۱۵۴/۶۸	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۱۰۰
۱۳۸/۶۴	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۲۰۰
۱۳۱/۸۹	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۳۰۰
۱۲۷/۲۸	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۴۰۰
۱۲۴/۸۲	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۵۰۰

مشاهده می‌شود که با افزایش عدد پرانتل، مقدار ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش عدد پرانتل، با توجه با ثابت ماندن عدد برینکمن، ظرفیت گرمای ویژه در معادله انرژی افزایش می‌یابد و سیال با افزایش ظرفیت گرمای ویژه، تمایل به مبادله گرما به دیوار سیلندر ندارد. به همین دلیل مشاهده می‌کنیم با افزایش پرانتل، انتقال حرارت از سیال به سیلندر کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش پرانتل، ضریب نفوذ گرما در معادله انرژی کاهش می‌یابد. در شکل ۳-۳۸ تغییرات ناسلت متوسط نسبت به عدد پرانتل را می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۳-۳۸: نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به افزایش عدد پرانتل در $Re = 100$, $De = 80$, $\beta = 0.06$ و $\alpha = 0.05$, $Br = -100$.

۳-۶-۴- بررسی اثر عدد برینکمن بر مشخصه‌های جریان و حرارت

مشخصه‌های جریان و حرارت در $Re = 100$, $De = 80$, $Pr = 200$, $\beta = 0.06$, $\alpha = 0.05$ با

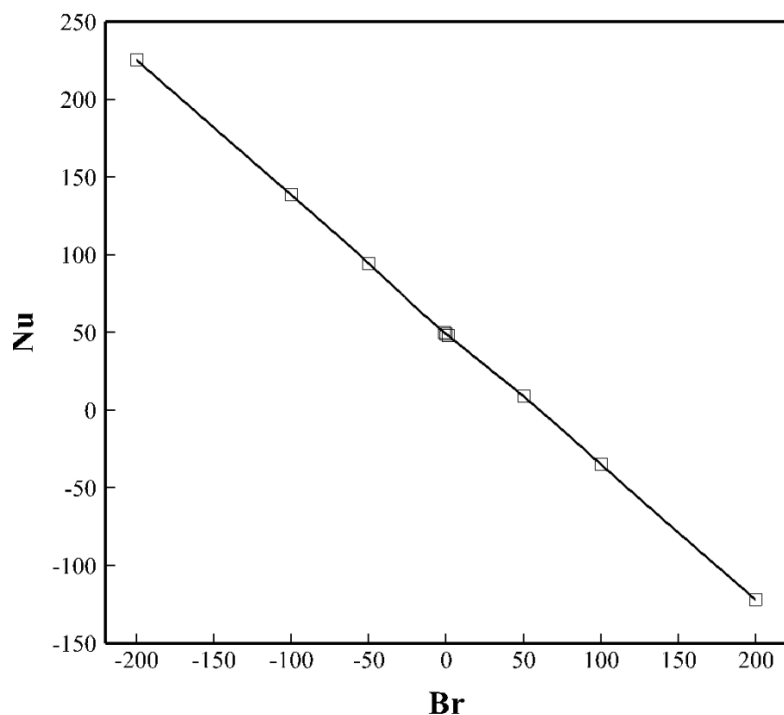
تغییر عدد برینکمن مورد بررسی قرار گرفته شده است. در جدول ۳-۹ می‌توان این تغییرات را مشاهده

نمود.

جدول ۳-۹: نتایج حاصل از افزایش عدد برینکمن در $De = 80$, $Re = 100$, $Pr = 200$, $\alpha = 0.5$ و $\beta = 0.6$

\overline{Nu}	\overline{C}_D	C_{Dmin}	C_{Dmax}	ΔC_L	St	T	Br
۲۲۵/۶۴	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	-۲۰۰
۱۳۸/۶۳	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	-۱۰۰
۹۴/۶۰	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	-۵۰
۵۰/۰۵	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	-۱
۴۹/۲۲	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰
۴۸/۴	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۱
۸/۹۷۵	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۵۰
-۱۷/۳	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۸۰
-۳۴/۷۷	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۱۰۰
-۱۲۱/۹۸	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۲۰۰

با ثابت بودن مقدار پرانتل، سرعت و اختلاف دما بین سیال و دیواره سیلندر، عدد برینکمن با توجه به معادله (۲-۲۹) در صورتی افزایش پیدا می‌کند که ظرفیت گرمای ویژه کاهش پیدا کند، از طرفی کاهش ظرفیت گرمای ویژه منجر به افزایش جمله تلفات لزج در معادله انرژی می‌شود. بنابراین وقتی که جمله تلفات لزج به معادله انرژی اضافه می‌شود، درواقع یک منبع حرارتی در داخل سیال ایجاد می‌شود. بنابراین هرچه مقدار برینکمن بیشتر شود، تولید گرما در داخل سیال بیشتر شده و انتقال حرارت بیشتر می‌شود. با توجه به داده‌های جدول ۳-۹ می‌توان مشاهده کرد از مقدار برینکمن ۲۰۰- تا ۲۰۰، مقدار ناسلت سیر نزولی دارد، به طوری که از برینکمن ۲۰۰- تا ۵۰ انتقال حرارت از سیال به دیواره سیلندر کاهش می‌یابد، در عدد برینکمنی بین ۵۰ و ۸۰، انتقال حرارتی بین سیلندر و سیال پیرامون نداریم و مقدار ناسلت صفر می‌شود. و از آن مقدار برینکمن به بعد، جهت انتقال حرارت تغییر کرده و از سمت دیواره سیلندر به سیال انتقال گرما داریم. در شکل ۳-۳۹ نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به افزایش عدد برینکمن نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۹: نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به افزایش عدد برینکمن در $Re = 100, De = 80$.

$$\beta = 0.6/\alpha = 0.5, Pr = 200$$

۳-۶-۵- بررسی اثر ضریب تحرک بر مشخصه‌های جریان و حرارت

مشخصه‌های جریان و حرارت در $Re = 100, De = 80, Pr = 200, Br = -100$ با $\beta = 0.6$

تغییر ضریب تحرک مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. که در جدول ۳-۱۰ می‌توان این تغییرات را

مشاهده نمود.

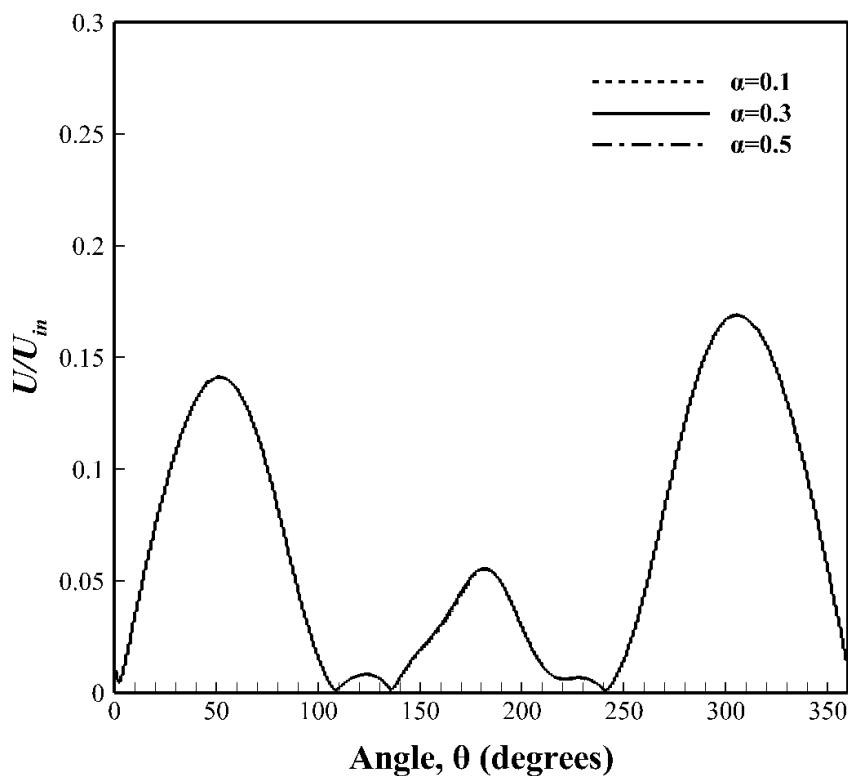
جدول ۳-۱۰: نتایج حاصل از افزایش ضریب تحرک در $De = 80$, $Re = 100$, $Br = -100$, $Pr = 200$ و

$$\beta = 0.6$$

\bar{Nu}	\bar{C}_D	C_{Dmin}	C_{Dmax}	ΔC_L	St	T	α
۱۳۸/۶۲	۱/۳۵۵۱	۱/۲۹۳۱	۱/۴۱۷۱	۰/۸۰۲۲۷	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۱
۱۳۸/۶۳	۱/۳۵۵۵	۱/۲۹۳۳	۱/۴۱۷۸	۰/۸۰۳۸۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۳
۱۳۸/۶۴	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۵

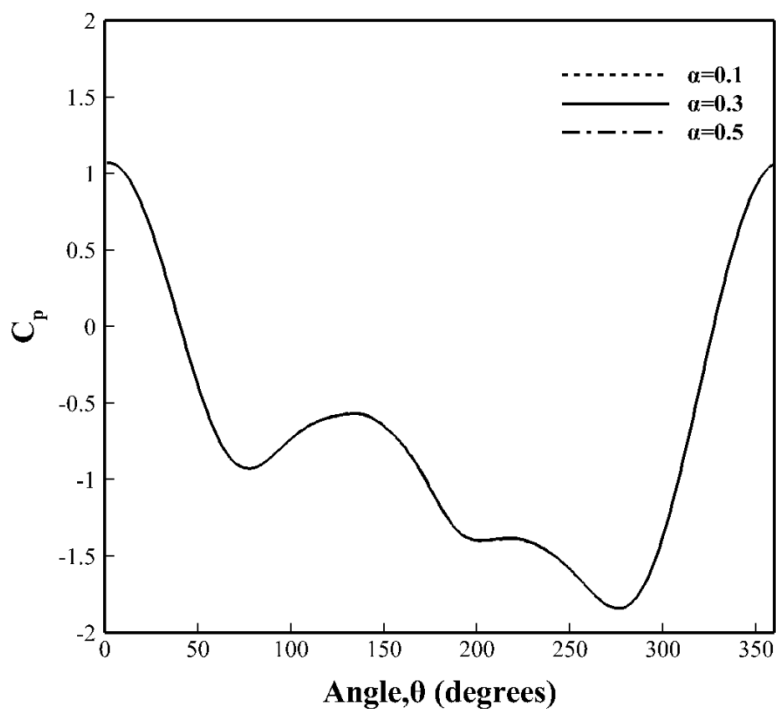
مشاهده می‌شود با افزایش ضریب تحرک، عدد استروهل تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند، دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. همچنین مقدار ناسلت متوسط هم به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد.

در ادامه تغییرات سرعت بی‌بعد، ضریب فشار و تنش بی‌بعد حول سیلندر برای سه مقدار ضریب تحرک ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ در زمانی که ضریب برآ بیشترین مقدار را دارد، مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. و زاویه شروع، از نقطه جلو سیلندر شروع شده و در جهت پادساعت‌گرد حول سیلندر ادامه پیدا می‌کند. تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه در فاصله ۰/۰۰۵ از سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف در شکل ۳-۴۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۰: تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف

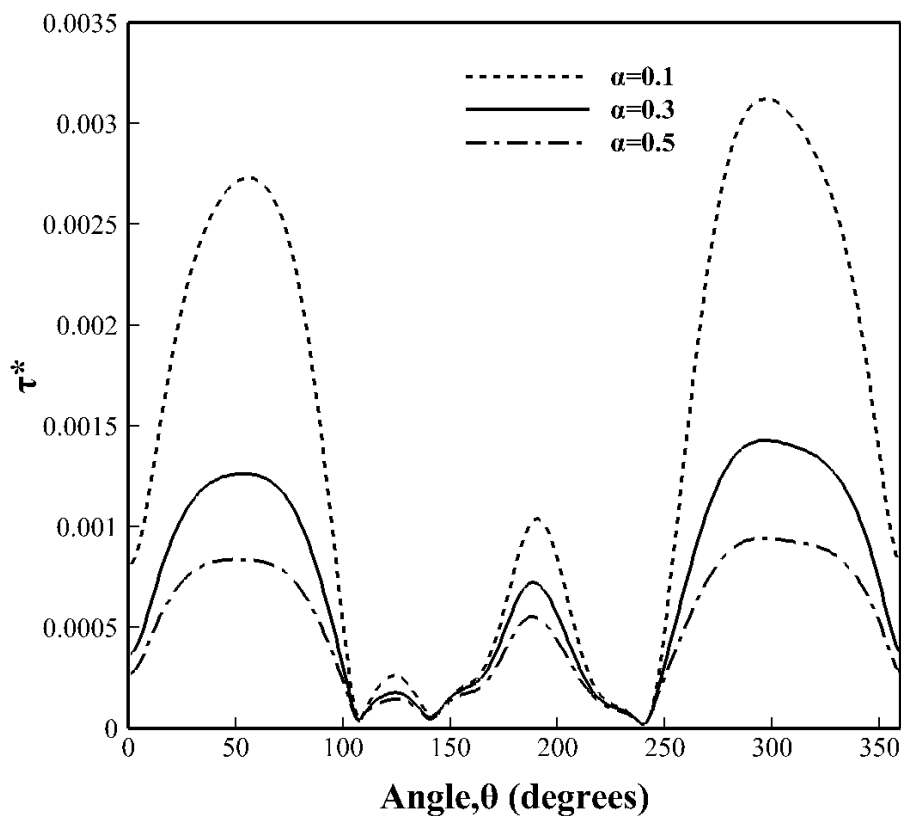
می‌توان مشاهده کرد که تغییرات سرعت حول سیلندر برای ضریب تحرک‌های مختلف بر هم منطبق است. بنابراین افزایش ضریب تحرک هیچ تأثیری در سرعت جریان حول سیلندر ندارد. تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف در شکل ۳-۴۱ آورده شده است.



شکل ۳-۴۱: تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف

مشاهده می‌توان کرد که تغییرات فشار حول سیلندر مشابه تغییرات سرعت برای ضریب تحرک‌های مختلف بر هم منطبق است. بنابراین افزایش ضریب تحرک، هیچ تأثیری روی فشار جریان حول سیلندر ندارد.

تغییرات تنش بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف در شکل ۳-۴۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۲: تغییرات تنش بی بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار ضریب تحرک‌های مختلف

می‌توان مشاهده کرد که تنش ایجادشده در پشت سیلندر به کمترین مقدار خود می‌رسد و با افزایش ضریب تحرک، تنش ایجادشده حول سیلندر کاهش پیدا می‌کند.

۳-۶-۶- بررسی اثر نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل بر مشخصه‌های جریان و حرارت

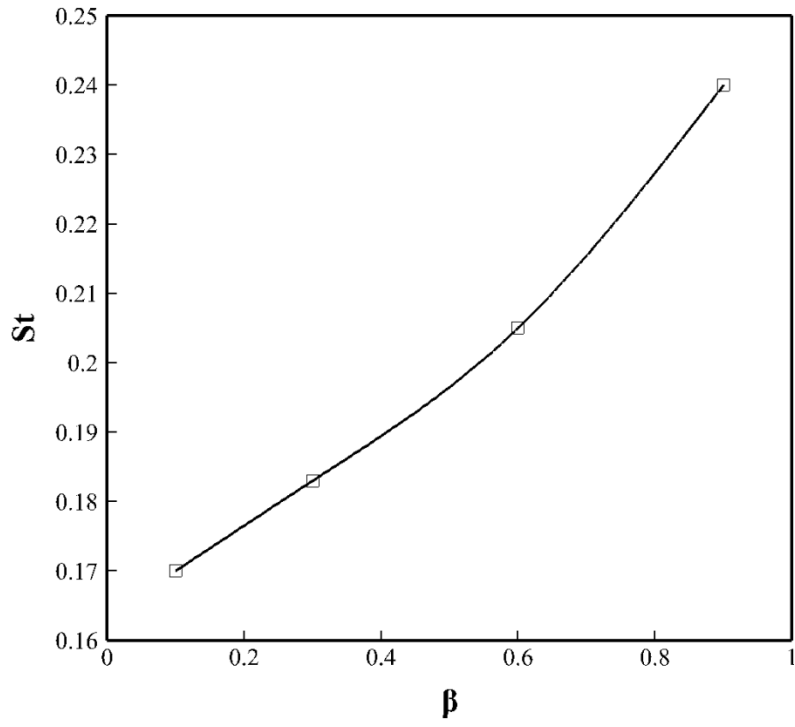
در این بخش، مشخصه‌های جریان و حرارت در $De = 80$ ، $Re = 100$ ، $Pr = Br = 100$ ، $\alpha = 0.6$ ، 200 با تغییر نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل (β) مورد بررسی قرار گرفته شده است. در جدول ۳-۱۱ می‌توان این تغییرات را مشاهده نمود.

جدول ۱۱-۳: نتایج حاصل از افزایش نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $Re = 100$ ، $De = 80$.

$$\alpha = 0.06 \text{ و } Pr = 200, Br = -100$$

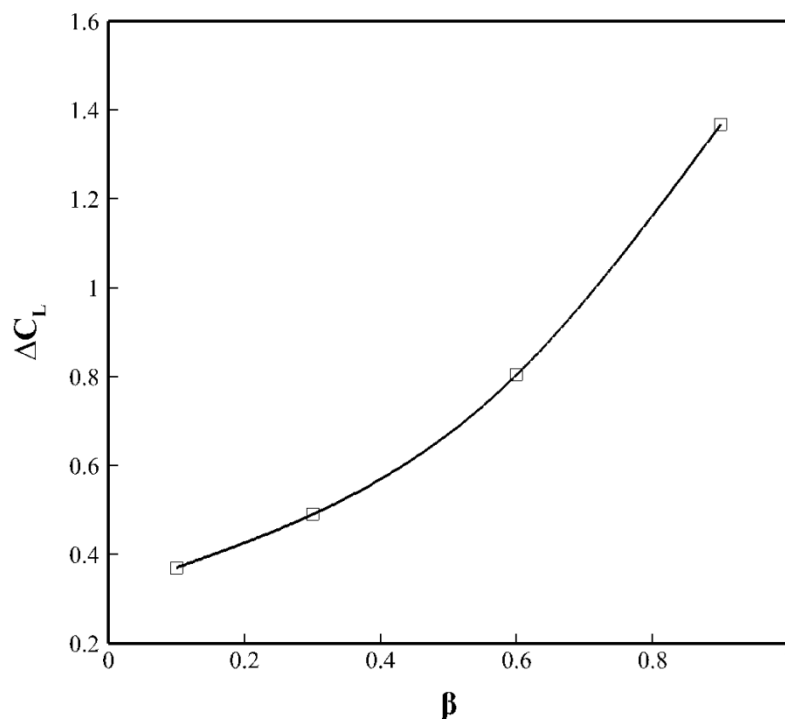
\overline{Nu}	\overline{C}_D	C_{Dmin}	C_{Dmax}	ΔC_L	St	T	β
۱۴۴/۷۴	۱/۳۳۱۸	۱/۳۱۹۴	۱/۳۴۴۲	۰/۳۷۰۷	۰/۱۷	۵/۸۴	۰/۱
۱۴۲/۵۲	۱/۳۲۵	۱/۳۰۲۲	۱/۳۴۸	۰/۴۹۰۵	۰/۱۸۳	۵/۴۶	۰/۳
۱۳۸/۶۴	۱/۳۵۵۸	۱/۲۹۳۴	۱/۴۱۸۱	۰/۸۰۴۵	۰/۲۰۵	۴/۸۸	۰/۶
۱۲۲/۰۷	۱/۴۷۳۸	۱/۲۵۶۹	۱/۶۹۰۷	۱/۳۶۸	۰/۲۴	۴/۱	۰/۹

مشاهده می‌شود که با افزایش لزجت پلیمری، دوره تناوب نوسانات کاهش و عدد استروهال افزایش و دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا با افزایش لزجت پلیمری افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به افزایش دامنه نوسانات، افزایش لزجت پلیمری با افزایش و شدت گرفتن پدیده انتشار گردابه‌ها همراه است. از دیگر مشاهدات می‌توان اشاره کرد که با افزایش لزجت پلیمری، مقدار ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. درواقع با افزایش لزجت پلیمری، لزجت نیوتنی کاهش می‌یابد، که منجر به کاهش تنش قسمت نیوتنی و کاهش ترم تلفات لزج در معادله انرژی می‌شود. بنابراین کاهش ترم تلفات لزج در معادله انرژی منجر به کاهش انتقال حرارت از سیال به دیواره سیلندر می‌شود. نمودار تغییرات استروهال، ضریب برآ متوسط، ضریب پسا متوسط و مقدار ناسلت متوسط نسبت به نسبت لزجت به ترتیب در شکل ۳-۴۳، شکل ۳-۴۴، شکل ۳-۴۵ و شکل ۳-۴۶ آورده شده است.



شکل ۳-۴۳: نمودار تغییرات استروهال نسبت به نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $Re = 100$, $De = 80$.

$$\alpha = 0/6 \text{ و } Pr = 200, Br = -100$$

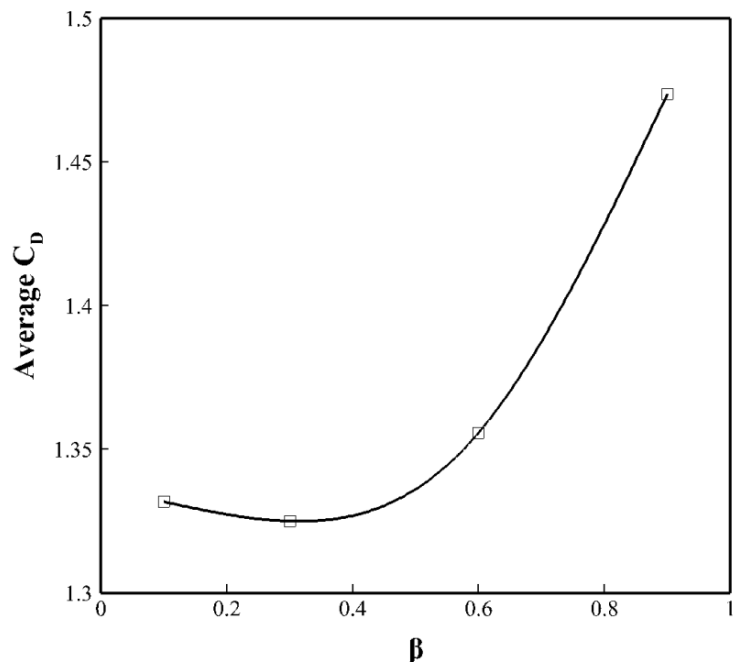


شکل ۳-۴۴: نمودار تغییرات ضریب برآ متوسط نسبت به نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $De = 80$.

$$\alpha = 0.06 \text{ و } Pr = 200, Br = -100, Re = 100$$

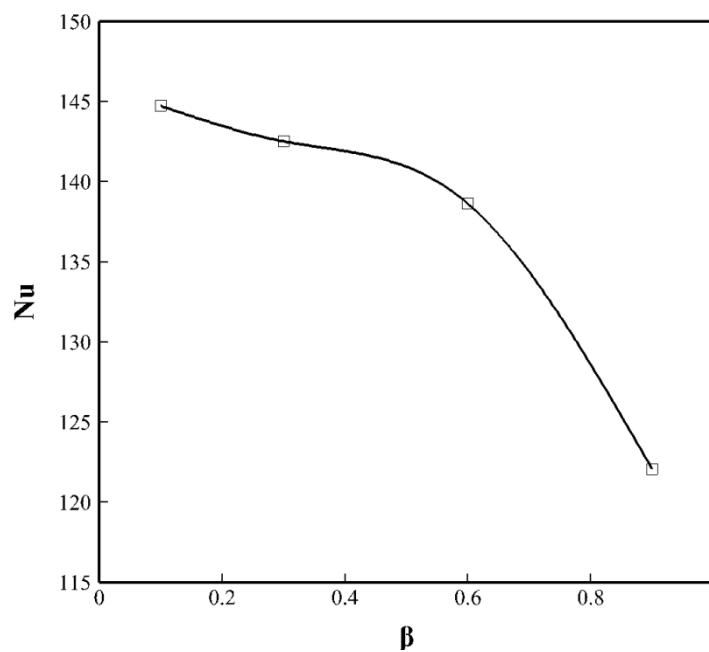
مشاهده می‌شود که افزایش لزجت پلیمری با افزایش و شدت گرفتن پدیده انتشار گردابه‌ها و

افزایش عدد استروهال و دامنه نوسانات ضریب برآ همراه است.



شکل ۳-۴۵: نمودار تغییرات ضریب پسا متوسط نسبت به نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $De = 80$.

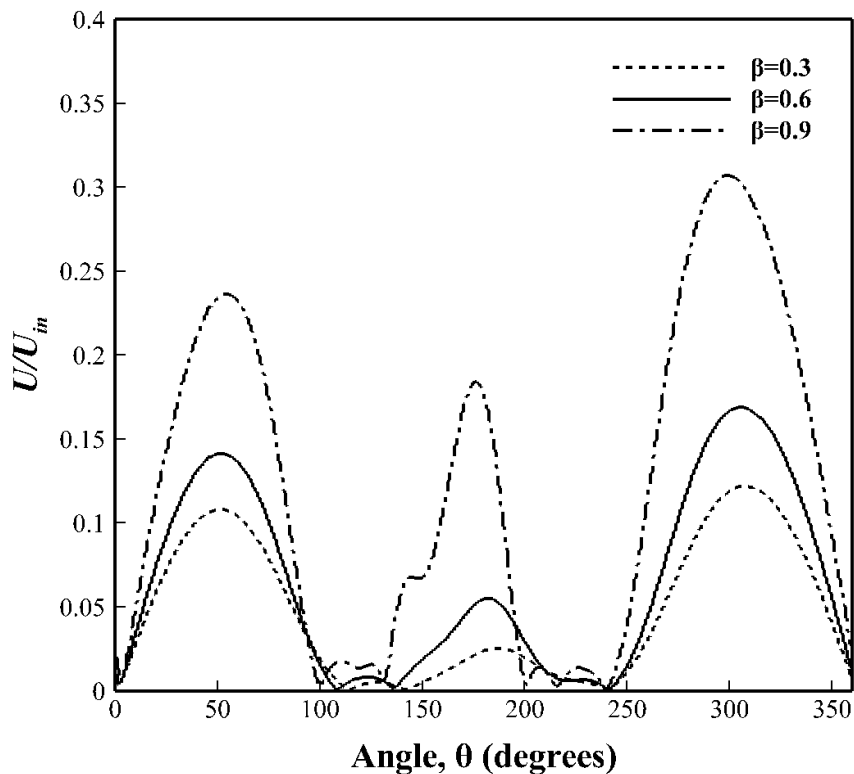
$$\alpha = 0/6 \text{ و } Pr = 200, Br = -100, Re = 100$$



شکل ۳-۴۶: نمودار تغییرات مقدار ناسلت متوسط نسبت به نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل در $De = 80$.

$$\alpha = 0/6 \text{ و } Pr = 200, Br = -100, Re = 100$$

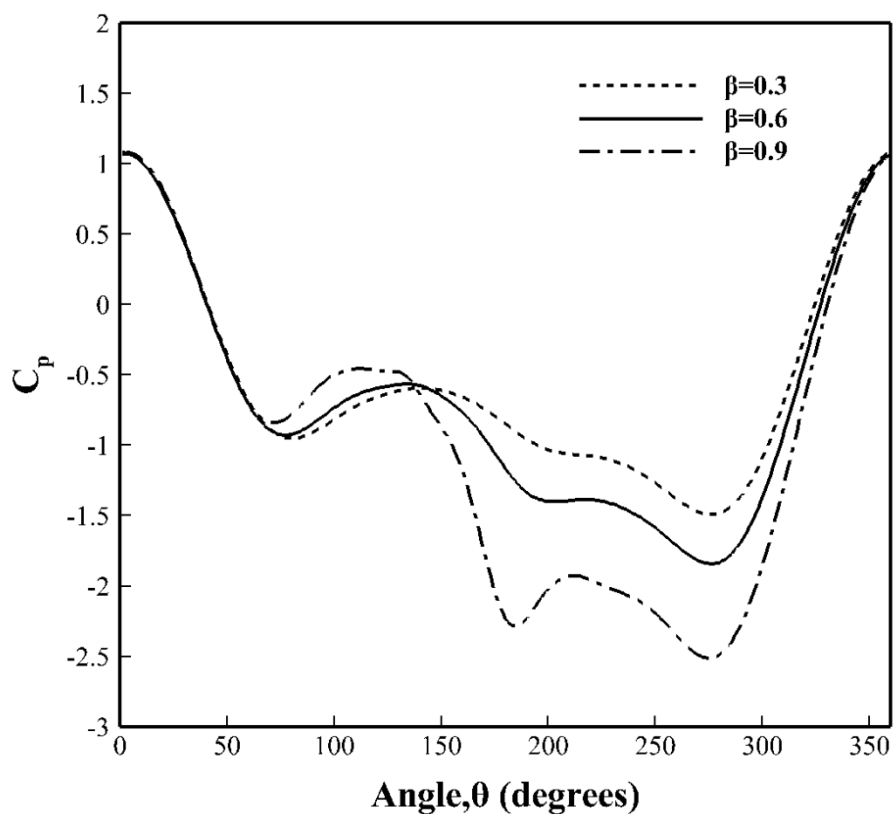
می‌توان مشاهده کرد که با افزایش لزجت پلیمری، دامنه نوسانات ضریب پسا افزایش و مقدار ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. در ادامه تغییرات سرعت بی‌بعد، ضریب فشار و تنش بی‌بعد حول سیلندر برای سه مقدار نسبت لزجت ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ در زمانی که ضریب برآ بیشترین مقدار را دارد، مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. و زاویه شروع، از نقطه جلو سیلندر شروع شده و در جهت پادساعت‌گرد حول سیلندر ادامه پیدا می‌کند. تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه در فاصله ۰/۰۵ از سیلندر برای مقدار نسبت لزجت‌های مختلف در شکل ۳-۴۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۷: تغییرات سرعت بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار نسبت لزجت‌های مختلف

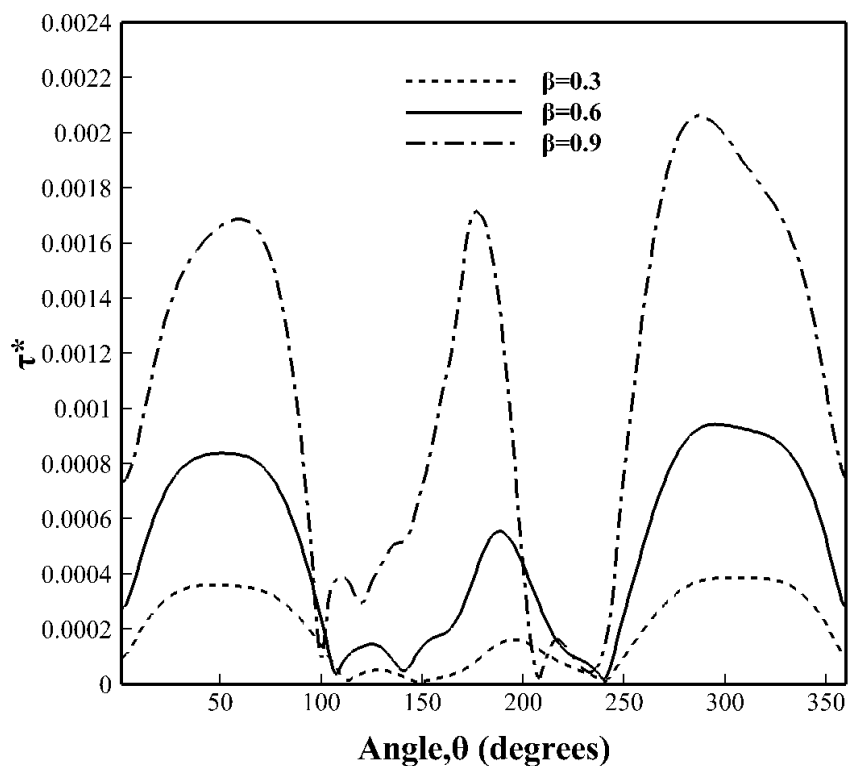
می‌توان مشاهده نمود که با افزایش لزجت پلیمری، سرعت حول سیلندر افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار نسبت سرعت برای هر سه نسبت لزجت در زاویه ۳۱۰ درجه اتفاق می‌افتد. که مقدار نسبت سرعت جریان در این زاویه برای نسبت لزجت‌های ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ به ترتیب ۰/۱۹، ۰/۲۸ و ۰/۵۵ است.

است. تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار نسبت لزج‌های مختلف در شکل ۴۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۴۸-۳: تغییرات ضریب فشار نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار نسبت لزج‌های مختلف

کاهش فشار بیشتری در قسمت پشت سیلندر با افزایش لزجت پلیمری مواجه‌ایم. در زاویه ۲۸۰ درجه کمترین مقدار فشار را برای هر سه نسبت لزجت مشاهده می‌کنیم. تغییرات تنش بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار نسبت لزج‌های مختلف در شکل ۴۹-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۹: تغییرات تنش بی‌بعد نسبت به زاویه حول سیلندر برای مقدار نسبت لزج‌های مختلف

می‌توان مشاهده کرد که افزایش لزجت پلیمری با افزایش تنش ایجادشده حول سیلندر همراه است. در زاویه ۲۸۰ درجه که در شکل ۳-۴۸ مشاهده شد که فشار کمترین مقدار خود را دارد ولی در نمودار تغییرات تنش حول سیلندر در این زاویه بیشترین مقدار تنش مشاهده می‌شود.

۴- فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، با استفاده از مدل ساختاری GiesekusLog به عنوان معادله ساختاری که لزجت پلیمری و زمان رهایی از تنش در این مدل، تابعی از دما در نظر گرفته شده است. و با حلگر توسعه یافته rheoFoam در نرم افزار اوپن فوم، بررسی عددی جریان و انتقال حرارت جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر پرداخته شده است. در این بخش به جمع بندی کلی نتایج حاصل از این تحقیق پرداخته می شود.

۴-۲- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر اعداد بی بعد مهم از جمله الاستیک، رینولدز، پرانتل و برینکمن و همچنین تأثیر نسبت لزجت پلیمری به لزجت کل (β) و ضریب تحرک (α) بر روی مشخصه های جریان و حرارت مورد بررسی قرار گرفته شد. از جمله دستاوردهای مهم این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- با افزایش خاصیت الاستیک، عدد استروهل تغییر نمی کند و ثابت می ماند. دامنه نوسانات ضریب برآ از مقدار الاستیک $0/02$ تا $0/05$ سیر نزولی دارد سپس تا مقدار الاستیک ۱ سیر صعودی پیدا می کند. دامنه نوسانات ضریب پسا تا مقدار الاستیک $0/2$ سیر نزولی دارد سپس تا مقدار الاستیک ۱ سیر صعودی پیدا می کند. همچنین مقدار ناسلت متوسط نیز با افزایش خاصیت الاستیک تا مقدار الاستیک $0/6$ سیر نزولی دارد سپس تا الاستیک ۱ به مقدار ناچیزی افزایش می یابد. افزایش خاصیت الاستیک تأثیری روی سرعت و فشار جریان حول سیلندر ندارد ولی تنش ایجاد شده حول سیلندر با افزایش خاصیت الاستیک، کاهش می یابد.
- با افزایش عدد رینولدز، مقادیر عدد استروهل، دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا و ناسلت متوسط، افزایش می یابد. همچنین با افزایش آن، سرعت جریان و افت فشار در ناحیه پشت سیلندر افزایش می یابد، در حالی که تنش ایجاد شده حول سیلندر با افزایش عدد رینولدز، کاهش می یابد.

- با افزایش عدد پرائتل، مقدار ناسلت متوسط، کاهش می‌یابد.
- از مقدار برینکمن ۲۰۰- تا ۲۰۰، مقدار ناسلت سیر نزولی دارد، به طوری که از برینکمن ۲۰۰- تا ۵۰ انتقال حرارت از سیال به دیواره سیلندر کاهش می‌یابد، در عدد برینکمنی ۵۰ و ۸۰، انتقال حرارتی بین سیلندر و سیال پیرامون نداریم و مقدار ناسلت صفر می‌شود. و از آن مقدار برینکمن به بعد، جهت انتقال حرارت تغییر کرده و از سمت دیواره سیلندر به سیال انتقال گرما داریم.
- با افزایش ضریب تحرک، عدد استروهال تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند، دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. همچنین مقدار ناسلت متوسط نیز به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. افزایش ضریب تحرک تأثیری روی سرعت و فشار جریان حول سیلندر ندارد ولی تنش ایجادشده حول سیلندر با افزایش ضریب تحرک، کاهش می‌یابد.
- با افزایش لزجت پلیمری، دوره تناوب نوسانات کاهش و عدد استروهال افزایش و دامنه نوسانات ضریب برآ و پسا افزایش می‌یابد. و همچنین با افزایش لزجت پلیمری، مقدار ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت لزجت پلیمری، سرعت جریان و تنش بوجود آمده حول سیلندر افزایش می‌یابد. و کاهش فشار در ناحیه پشت سیلندر با افزایش لزجت پلیمری، افزایش می‌یابد.

۴-۳- پیشنهادها

- موارد زیر جهت ادامه تحقیقات در زمینه‌ی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در عبور از روی سیلندر دایروی پیشنهاد می‌گردد:
- بررسی انتقال حرارت جریان سیال ویسکوالاستیک با مدل ساختاری گزیکس در حالت شار ثابت برای سیلندر دایروی

- بررسی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک برای چند تا سیلندر دایروی
- بررسی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک برای هندسه های دیگر
- بررسی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک برای جریان آشفته
- بررسی سه بعدی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک
- بررسی آزمایشگاهی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک
- بررسی انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک با مدل های ساختاری دیگر از جمله Fene

۵- مراجع

- [1] شیخی نارانی م، (۱۳۷۱) " بررسی خواص، جریان، انتقال حرارت و اختلاط سیالات غیرنیوتنی"، چاپ اول، جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، تهران.
- [2] R. B. (Robert B. Bird, *Dynamics of polymeric liquids*. Wiley, 1987.
- [3] A. I. Malkin, *Rheology fundamentals*. ChemTec Pub, 1994.
- [4] N. Phan-Thien, *Understanding Viscoelasticity*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [5] P. K. Kundu, I. M. Cohen, and D. R. Dowling, *Fluid mechanics*. Academic Press, 2012.
- [6] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [7] Y. C. (Yuan-cheng) Fung, *An introduction to the theory of aeroelasticity*. Dover Publications, 1993.
- [8] V. Strouhal, "Über eine besondere Art der Tonerregung," *Ann. Phys.*, vol. 241, no. 10, pp. 216–251, 1878.
- [9] T. V Karman, "Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt," *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Math. Klasse*, vol. 1912, pp. 547–556, 1912.
- [10] J. Chakraborty, N. Verma, and R. P. Chhabra, "Wall effects in flow past a circular cylinder in a plane channel: a numerical study," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 43, no. 12, pp. 1529–1537, 2004.
- [11] R. P. Bharti, R. P. Chhabra, and V. Eswaran, "A numerical study of the steady forced convection heat transfer from an unconfined circular cylinder," *Heat mass Transf.*, vol. 43, no. 7, pp. 639–648, 2007.
- [12] A. A. Soares, L. Caramelo, and A. Rouboa, "Effects of viscous heating on the heat transfer between a rotating cylinder and the surrounding fluid medium," in

Proceedings of 5th National Conference of Mechanics and Fluid, thermodynamics, and Energy, MEFTE, 2014, pp. 131–136.

- [13] R. Golani and A. K. Dhiman, “Fluid flow and heat transfer across a circular cylinder in the unsteady flow regime,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 8–19, 2014.
- [14] G. E. Gadd, “Effects of long-chain molecule additives in water on vortex streets,” *Nature*, vol. 211, no. 5045, p. 169, 1966.
- [15] V. N. Kalashnikov and A. M. Kudin, “Kármán vortices in the flow of drag-reducing polymer solutions,” *Nature*, vol. 225, no. 5231, p. 445, 1970.
- [16] H. USUI, T. SHIBATA, and Y. SANO, “Kármán vortex behind a circular cylinder in dilute polymer solutions,” *J. Chem. Eng. Japan*, vol. 13, no. 1, pp. 77–79, 1980.
- [17] O. Cadot and M. Lebey, “Shear instability inhibition in a cylinder wake by local injection of a viscoelastic fluid,” *Phys. Fluids*, vol. 11, no. 2, pp. 494–496, 1999.
- [18] O. Cadot and S. Kumar, “Experimental characterization of viscoelastic effects on two-and three-dimensional shear instabilities,” *J. Fluid Mech.*, vol. 416, pp. 151–172, 2000.
- [19] J. R. Cressman, Q. Bailey, and W. I. Goldburg, “Modification of a vortex street by a polymer additive,” *Phys. Fluids*, vol. 13, no. 4, pp. 867–871, 2001.
- [20] P. J. Oliveira, “Method for time-dependent simulations of viscoelastic flows: vortex shedding behind cylinder,” *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 101, no. 1–3, pp. 113–137, 2001.
- [21] J. M. Nóbrega, F. T. de Pinho, P. J. Oliveira, and O. S. Carneiro, “Accounting for temperature-dependent properties in viscoelastic duct flows,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 6–7, pp. 1141–1158, 2004.
- [22] A. A. Soares, J. M. Ferreira, and R. P. Chhabra, “Flow and forced convection heat transfer in crossflow of non-Newtonian fluids over a circular cylinder,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, no. 15, pp. 5815–5827, 2005.

- [23] S. D. Dhole, R. P. Chhabra, and V. Eswaran, "Forced convection heat transfer from a sphere to non-Newtonian power law fluids," *AIChE J.*, vol. 52, no. 11, pp. 3658–3667, 2006.
- [24] R. P. Bharti, R. P. Chhabra, and V. Eswaran, "Steady forced convection heat transfer from a heated circular cylinder to power-law fluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 5–6, pp. 977–990, 2007.
- [25] D. Richter, G. Iaccarino, and E. S. G. Shaqfeh, "Simulations of three-dimensional viscoelastic flows past a circular cylinder at moderate Reynolds numbers," *J. Fluid Mech.*, vol. 651, pp. 415–442, 2010.
- [26] M. Norouzi, S. R. Varedi, M. J. Maghrebi, and M. M. Shahmardan, "Numerical investigation of Viscoelastic shedding flow behind a circular cylinder," *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 197, pp. 31–40, 2013.
- [27] واردی ر، مغربی م، نوروزی م و شاه مردان م، (۱۳۹۲) " بررسی عددی جریان آرام و گذرای سیال ویسکوالاستیک از نوع گزیکس حول سیلندر دایروی " ، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، سال بیست و چهارم، شماره دو،
- [28] N. Nirmalkar and R. P. Chhabra, "Momentum and heat transfer from a heated circular cylinder in Bingham plastic fluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 70, pp. 564–577, 2014.
- [29] M. Norouzi, S. R. Varedi, and M. Zamani, "Numerical study of vortex shedding in viscoelastic flow past an unconfined square cylinder," *Korea-Australia Rheol. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 213–225, 2015.
- [30] M. Norouzi, S. R. Varedi, and M. Zamani, "Wake instability of viscoelastic flows past an unconfined inclined square cylinder," *Phys. Fluids*, vol. 28, no. 2, p. 23101, 2016.
- [31] نوروزی م، (۱۳۸۸)، رساله دکتری: " بررسی جریان و انتقال حرارت سیال ویسکوالاستیک در مجاری خمیده دارای مقطع مستطیلی و در حالت‌های ایستا و چرخان " ، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [32] H. N. A. Balasubramanya, S. Kohlstadt, "Viscoelasticity and Constitutive

Relations,” 2016.

- [33] J. L. Favero, A. R. Secchi, N. S. M. Cardozo, and H. Jasak, “Viscoelastic flow analysis using the software OpenFOAM and differential constitutive equations,” *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 165, no. 23–24, pp. 1625–1636, Dec. 2010.

- [34] واردی ر، (۱۳۹۰)، پایان نامه ارشد: " بررسی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک حول سیلندر"، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- [35] M. Favre-Marinet and S. Tardu, *Convective Heat Transfer*. John Wiley & Sons, 2013.

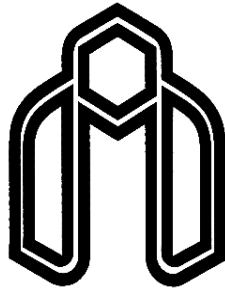
- [36] “How to add temperature to icoFoam - OpenFOAMWiki.” [Online]. Available: https://openfoamwiki.net/index.php/How_to_add_temperature_to_icoFoam. [Accessed: 16-Jan-2019].

- [37] M. A. A. Francisco Pimenta, *User Guide RheoTool*. 2018.

Abstract:

In the present thesis, a numerical investigation of flow field past a circular cylinder and the heat transfer of viscoelastic fluid around it, have been studied by means of the open-source code OpenFOAM. The rheoFoam developed solver and the GiesekusLog structural model have been employed to solve the problem which is the novelty of the proposed approach herein. The polymeric viscosity and the stress relaxation time are defined as a function of temperature. The effects of several important dimensionless numbers such as Reynolds, Prandtl, Elastic, and Brinkman numbers, as well as the mobility factor and polymeric viscosity to total viscosity ratio on the characteristics of flow and heat transfer have been examined. The results indicated that an increase in the Reynolds number may increase the values of the Strouhal number, the amplitude of the fluctuations of lift and drag coefficients, and the average Nusselt. However with the increase of the mobility coefficient, the Strouhal number will not experience any significant changes, and the values of the fluctuation amplitudes of lift and drag coefficients and also the average Nusselt, may increase to negligible values. It is also shown that the increase in polymer viscosity causes an increase in the Strouhal numbers and the amplitude of the fluctuations of lift and drag coefficients, while the average Nusselt value will surprisingly decrease. Among other results, the reduction of the average Nusselt value with the increase of Prandtl number and the high impact of Brinkman number on the Nusselt value, could be pointed out.

Keywords: Circular cylinder, Heat transfer, Viscoelastic fluid, OpenFOAM, rheoFoam developed solver, GiesekusLog structural model.



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Numerical study of flow and heat
transfer of viscoelastic fluid around a
circular cylinder**

By:

Morteza Nayebipour

Supervisor:

Dr. Ali Abbas Nejad

Advisor:

Dr. Mahmood Norouzi

January 2019