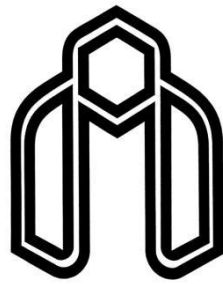


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه: تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی اثر افزودنی‌های پلیمری بر جریان سیال روانکار مته‌های

حفاری نفت

محمدامیر حسنی

استاد راهنما:

دکتر محمود نوروزی

بهمن ۱۳۹۳

چکیده

مطالعه و بررسی جریان سیال در فضای بین دو استوانه (فضای آنالوس) از جمله مسائل پایه‌ای و کاربردی در مکانیک سیالات به شمار می‌رود. در فرآیند حفاری چاه‌های نفت و گاز، سیال حفاری پس از خروج از سر مته و دربرگرفتن کنده‌های حاصل از حفاری، در فضای آنالوس جریان پیدا می‌کند و با طی مسیر چاه، از سر چاه به بیرون منتقل می‌شود.

در این تحقیق به مطالعه‌ی عددی جریان ماریپچ سیال ویسکوالاستیک در عبور از فضای بین دو استوانه‌ی هم مرکز عمودی همراه با چرخش استوانه‌ی داخلی، پرداخته می‌شود. در اینجا برای نخستین بار جهت بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک در هندسه مذکور از مدل ویسکوالاستیک گزیکس، به عنوان معادله ساختاری حاکم استفاده شده است. در این جا با مینیمم‌سازی تابع اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر به دست آمده از روابط موجود با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌توان طیف ثابت‌های زمانی سیال و لزجت‌های مربوط به آن‌ها را به دست آورد. جهت بهینه‌سازی این تابع خطا و پیدا کردن ضرایب یا همان ثوابت مسئله، از الگوریتم تکاملی ژنتیک استفاده شده است. همچنین برای پیدا کردن طیف ضرایب تحرک (α) با حل معادلات دیفرانسیل از روش رانج کوتای تطبیقی مرتبه‌ی چهار موجود در نرم‌افزار متلب و جهت به دست آوردن ضرایب تحرک بهینه از الگوریتم تکاملی (PSO) استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی جریان از نرم افزار منبع باز اوپن فوم که یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می باشد، استفاده شده است. این نرم‌افزار از شیوه‌ی عددی حجم محدود (FVM) جهت حل معادلات با مشتقات جزئی استفاده می‌کند.

بر پایه‌ی شبیه‌سازی عددی، استقلال حل عددی از تعداد المان‌ها (شبکه) مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین جهت اعتباردهی به حل عددی و بررسی درستی عملکرد کد نوشته شده در نرم‌افزار، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از حل تحلیلی معادله‌ی گزیکس با حل عددی آن جهت به دست آوردن مقادیر مؤلفه‌ی سرعت محوری در هندسه‌ای مشابه هندسه مذکور (بدون چرخش استوانه داخلی) انجام شده است. در تحقیق حاضر اثر اعداد رینولدز، تیلور، وایزنبرگ و ضریب تحرک (α) بر روی جریان سیال حفاری در فضای آنالوس مورد بررسی قرار گرفته است. با مشاهده‌ی تأثیر اعداد بی‌بعد مذکور بر روی میزان افت فشار محوری سیال، می‌توان به راهی برای کاهش انرژی مورد نیاز برای فرستادن سیال حفاری در فضای آنالوس دست یافت.

کلمات کلیدی: سیال حفاری، فضای آنالوس، اوپن فوم، معادله‌ی ساختاری گزیکس، سیال ویسکوالاستیک، افزودنی‌های پلیمری

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	ت
فهرست علائمونشانها	س
فصل ۱- مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
فصل ۲- مروری بر پیشینه‌ی تحقیق	۱۳
۱-۲- مقدمه	۱۴
۲-۲- تاریخچه	۱۵
۳-۲- تحقیق حاضر	۴۹
۴-۲- جنبه‌های نوآوری	۵۱
فصل ۳- معادلات حاکم	۵۳
۳-۱- مقدمه	۵۴
۲-۳- معادلات حاکم بر جریان	۵۴
۳-۳- بی‌بعد سازی معادلات حاکم	۵۷
۳-۳- ۱-بی‌بعد سازی معادله‌ی پیوستگی	۵۷
۳-۳- ۲-بی‌بعد سازی معادله‌ی ممنتوم	۵۸
۳-۳- ۳-بی‌بعد سازی معادله‌ی ساختاری گزیکس	۵۹
۴-۳- فرضیات مسئله	۶۰
۵-۳- به دست آوردن ثوابت معادله‌ی گزیکس	۶۱
۶-۳- هندسه، شرایط مرزی و شرایط اولیه‌ی مسئله	۶۸
۷-۳- روش حل عددی	۶۸
۷-۳- ۱- معادله‌ی تکامل فشار	۶۹
۷-۳- ۲- الگوریتم PISO برای حل جریان تراکم ناپذیر	۷۰
فصل ۴- نتایج حل عددی	۷۳
۱-۴- مقدمه	۷۴
۲-۴- مطالعه‌ی استقلال حل عددی از شبکه‌بندی و صحت نتایج	۷۴
۳-۴- بررسی توسعه یافتگی پارامترهای جریان و رسیدن جریان به حالت دائمی	۷۶

۷۸.....	۴-۴-اعتبار سنجی حل عددی
۷۹.....	۴-۵-بحث و نتایج
۸۰.....	۴-۵-۱- تأثیر پارامتر α بر میدان سرعت محوری سیال
۸۱.....	۴-۵-۲- تأثیر پارامتر α بر میدان سرعت چرخشی سیال
۸۲.....	۴-۵-۳- تأثیر پارامتر α بر میدان تنش در فضای آنالوس
۸۳.....	۴-۵-۴- تأثیر پارامتر α بر ضریب اصطکاک پوسته‌ای استوانه‌ای چرخان داخلی
۸۴.....	۴-۵-۵- تأثیر پارامتر α بر ضریب افت داریسی - ویسباخ
۸۴.....	۴-۵-۶- تأثیر خاصیت الاستیک بر میدان سرعت محوری در قالب عدد وایزنبرگ
۸۷.....	۴-۵-۷- تأثیر عدد وایزنبرگ بر میدان سرعت چرخشی
۸۹.....	۴-۵-۸- تأثیر عدد وایزنبرگ بر میدان تنش در فضای آنالوس
۹۱.....	۴-۵-۹- تأثیر عدد وایزنبرگ بر ضریب افت داریسی - ویسباخ
۹۲.....	۴-۵-۱۰- تأثیر عدد وایزنبرگ بر ضریب اصطکاک پوسته‌ای استوانه‌ای داخلی
۹۳.....	۴-۵-۱۱- تأثیر عدد رینولدز بر میدان سرعت محوری
۹۵.....	۴-۵-۱۲- تأثیر عدد رینولدز بر میدان سرعت چرخشی
۹۶.....	۴-۵-۱۳- تأثیر عدد رینولدز بر ضریب افت داریسی - ویسباخ
۹۷.....	۴-۵-۱۴- تأثیر عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک پوسته‌ای استوانه‌ای داخلی
۹۸.....	۴-۵-۱۵- تأثیر عدد رینولدز بر میدان تنش در فضای آنالوس
۱۰۰.....	۴-۵-۱۶- تأثیر عدد تیلور بر میدان سرعت محوری سیال
۱۰۲.....	۴-۵-۱۷- تأثیر عدد تیلور بر میدان جریان چرخشی
۱۰۳.....	۴-۵-۱۸- تأثیر عدد تیلور بر ضریب افت داریسی - ویسباخ
۱۰۴.....	۴-۵-۱۹- تأثیر عدد تیلور بر ضریب اصطکاک پوسته‌ای استوانه‌ای داخلی
۱۰۵.....	۴-۵-۲۰- تأثیر عدد تیلور بر میدان تنش در فضای آنالوس

۱۱۱..... فصل ۵-نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۱۲.....	۵-۱-مقدمه
۱۱۲.....	۵-۲-نتایج و دستاوردهای پژوهش

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: رابطه‌ی بین ساختار درونی گل حفاری با خواص مشاهده شده در آن [۲].....	۳
جدول ۱-۲: مقایسه‌ی بین دبی‌های نتایج آزمایشگاهی ژیشنگو یینگ هو [۱۷] با دبی‌های حاصل از حل تئوریک به ازای ۰.۶۷۱۳	
۱۷..... $R = ۰.۰۶۶$ و $K = ۰.۳۶۳$ ، $n =$	۱۷
جدول ۱-۳: ترکیبات تشکیل دهنده‌ی گل حفاری مورد مطالعه [۲۸].....	۶۵
جدول ۲-۳: طیف لزجت و ثابت رهایی از تنش سیال حفاری مورد مطالعه [۶۷]	۶۷
جدول ۳-۳: طیف ضرایب تحرک (α) سیال مورد مطالعه..... [۶۷]	۶۷
جدول ۱-۴: تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده در هر مرحله شبکه بندی [۷۴]	۷۴

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱: شماتیکی از تجهیزات و فرایند حفاری [۱].....
۲۲	شکل ۱-۲: تأثیر پارامتر بی‌بعد $\varepsilon^{1/2}De$ بر روی میزان نسبت سرعت‌ها به ازای نسبت شعاع‌های مختلف دو استوانه [۲۳]
۲۳	شکل ۲-۲: تأثیر پارامتر $\varepsilon^{1/2}De$ بر روی نسبت موقعیت شعاعی ذره‌ای از سیال با تنش صفر در جریان سیال ویسکوالاستیک به موقعیت شعاعی در جریان سیال نیوتنی $R^*/(R_*)_N$ [۲۳]
۲۴	شکل ۳-۲: منحنی سرعت بی‌بعد محوری بر حسب موقعیت شعاعی به ازای دبوراهای مختلف [۲۳].....
۲۵	شکل ۴-۲: نمودار تنش نرمال محوری τ_{zz} و تنش برشی τ_{rz} بر حسب شعاع و به ازای دبوراهای مختلف [۲۳].....
۲۶	شکل ۵-۲: نمودار نسبت پارامتر بی‌بعد fRe در حالت ویسکوالاستیک به مقدار آن در حالت نیوتنی، بر حسب پارامتر بی‌بعد $\varepsilon^{1/2}De$ و به ازای نسبت شعاع‌های مختلف [۲۳]
۲۷	شکل ۶-۲: نمودار سرعت بی‌بعد محوری بر حسب شعاع و به ازای نسبت شعاع $k = 0.5$ ، $Re = 1000$ و $Ta = 1000$
۲۸	شکل ۷-۲: نمودار سرعت بی‌بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای εDe^2 های مختلف و نسبت شعاع $k = 0.5$ ، $Re = 1000$ و $Ta = 1000$ [۹]
۲۸	شکل ۸-۲: نمودار سرعت بی‌بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای $k = 0.5$ ، $Re = 1$ و $Ta = 10000$ [۹]
۲۹	شکل ۹-۲: نمودار سرعت بی‌بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای εDe^2 های مختلف و $k = 0.5$ ، $Re = 1$ و $[Ta] = 1000$..
۲۹	شکل ۱۰-۲: نمودار سرعت بی‌بعد محوری بر حسب شعاع و $k = 0.5$ ، $Re = 10$ و $Ta = 10$
۳۰	شکل ۱۱-۲: نمودار سرعت بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای εDe^2 های مختلف و $k = 0.5$ ، $Re = 1$ و $[Ta] = 10$
۳۱	شکل ۱۲-۲: نمودار سرعت بی‌بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای وایزنبرگ های مختلف و $\alpha = 0.2$ ، $k = 0.5$ ، $[Ta] = 10$
۳۱	شکل ۱۳-۲: نمودار سرعت بی‌بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای مقادیر مختلف α و $Wi = 1$ ، $[k] = 0.5$ ، $[Ta] = 10$
۳۲	شکل ۱۴-۲: نمودار مقدار مؤلفه‌ی تنش $\tau_{r\theta}$ بر حسب شعاع و به ازای مقادیر مختلف عدد وایزنبرگ و $k = 0.5$ ، $\alpha = 0.4$
۳۳	شکل ۱۵-۲: نمودار مقدار مؤلفه‌ی تنش نرمال شعاعی بر حسب شعاع و به ازای مقادیر مختلف عدد وایزنبرگ و $k = 0.5$ ، $\alpha = 0.4$ [۲۴]
۳۴	شکل ۱۶-۲: نمودار سرعت بی‌بعد محوری بر حسب شعاع و به ازای عدد دبورای ۱ و ضرایب تحرک مختلف [۲۵]
۳۵	شکل ۱۷-۲: نمودار تنش نرمال شعاعی بی‌بعد بر حسب شعاع و به ازای عدد دبورای ۱ و ضرایب تحرک مختلف [۲۵]
۳۸	شکل ۱۸-۲: تست نوسانی مشاهده‌ی رابطه‌ی بین نرخ برش و تنش بر حسب زمان و به ازای دامنه‌ی نوسان ۱۰ درصد [۲۹]
۳۸	شکل ۱۹-۲: تست مشاهده‌ی رابطه‌ی بین نرخ برش و تنش بر حسب زمان به ازای دامنه‌ی نوسان ۱۰۰ درصد [۲۹]
۳۹	شکل ۲۰-۲: نمودار تنش بر حسب کرنش در شش سیکل نوسانی مختلف و به ازای دامنه‌ی ۱۰ درصد [۲۹]
۳۹	شکل ۲۱-۲: نمودار تنش بر حسب کرنش در شش سیکل نوسانی و به ازای دامنه‌ی ۱۰۰۰ درصد [۲۹]
۴۱	شکل ۲۲-۲: نمودار سرعت محوری بی‌بعد بر حسب شعاع و به ازای نسبت شعاع‌های k مختلف و $[De] = 1$
۴۱	شکل ۲۳-۲: نمودار سرعت محوری بی‌بعد بر حسب شعاع و به ازای اعداد دبورای مختلف و $\varepsilon = 0.25$ ، $k = 0.25$ ، $[De] = 1$
۴۲	شکل ۲۴-۲: نمودار مؤلفه‌ی تنش نرمال محوری بی‌بعد بر حسب شعاع و به ازای اعداد دبورای مختلف و $[De] = 0.25$ ، $[k] = 0.25$

- شکل ۲-۲۵: نمودار سرعت محوری بی‌بعد بر حسب شعاع و به ازای وایزنبرگ‌های مختلف و $[\alpha] = 0.1$ ۴۳
- شکل ۲-۲۶: نمودار افت فشار محوری سیال بر حسب عدد دبور و به ازای ضرایب تحرک مختلف $[31]$ ۴۳
- شکل ۲-۲۷: نمودار سرعت بی‌بعد محوری بر حسب شعاع و به ازای ضرایب تحرک مختلف و $[31De] = 1$ ۴۴
- شکل ۲-۲۸: نمودار وابستگی ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ با عدد رینولدز جریان، در سیال حاوی صمغ Guar با غلظت - های مختلف $[33]$ ۴۶
- شکل ۲-۲۹: نمودار تغییرات فشار در راستای محور جریان بر حسب میزان دبی و به ازای غلظت‌های متفاوت و زبری $3\text{-in.} \times 3$ ۴۷
- شکل ۲-۳۰: نمودار تغییرات افت فشار بر حسب دبی برای محلول‌هایی با غلظت‌های مختلف و زبری $3\frac{1}{2}\text{-in.} \times 1\frac{3}{4}$ ۴۷
- شکل ۲-۳۱: شماتیکی از هندسه مسئله و شرایط مرزی ۵۱
- شکل ۳-۱: نمودار لزجت بر حسب نرخ برش برای ۳ نوع سیال حفاری پلیمری $[28]$ ۶۶
- شکل ۳-۲: نمودار وابستگی پارامترهای رئولوژیکی سیال مورد مطالعه بر حسب فرکانس نوسان $[28]$ ۶۶
- شکل ۴-۱: شبکه‌بندی هندسه آنالوس از نماهای مختلف ۷۵
- شکل ۴-۲: نمودار سرعت کل بر حسب شعاع (مقطع $A - A'$) به ازای شبکه‌بندی‌های مختلف ۷۶
- شکل ۴-۳: منحنی مؤلفه‌های مختلف تنش بر حسب موقعیت محوری Z در شعاع $r = 0.1$ (cm) ۷۷
- شکل ۴-۴: منحنی سرعت محوری سیال بر حسب موقعیت Z در شعاع $r = 0.1$ و به ازای زمان‌های مختلف حل ۷۸
- شکل ۴-۵: مقایسه‌ی بین منحنی‌های سرعت حاصل از حل عددی با حل تحلیلی صورت گرفته توسط محققان ۷۹
- شکل ۴-۶: نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع و به ازای مقادیر مختلف α و $Re = 45$ ، $Ta = 38$ ۸۰
- شکل ۴-۷: نمودار سرعت چرخشی بر حسب شعاع و به ازای ضرایب مختلف α و $Re = 45$ ، $Ta = 38$ ۸۱
- شکل ۴-۸: توزیع تنش کل به ازای $Wi = 750$ ، $Re = 45$ ، $Ta = 38$ و الف) $\alpha = 0.2$ ب) $\alpha = 0.3$ پ) $\alpha = 0.4$ ۸۲
- شکل ۴-۹: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای بر حسب ضریب تحرک α و به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف ، $Re = 45$ ، $Ta = 38$ ۸۳
- شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ با ضریب تحرک به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف و $Re = 45$ ، $Ta = 38$ ۸۴
- شکل ۴-۱۱: نمودار سرعت محوری بر حسب موقعیت شعاعی به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف و $Re = 45$ ، $Ta = 38$ و $\alpha = 0.5$ ۸۵
- شکل ۴-۱۲: نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع و به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف و $\alpha = 0.2$ ، $Re = 45$ ، $Ta = 38$ ۸۶
- شکل ۴-۱۳: نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع و به ازای وایزنبرگ‌های مختلف و $Ta = 0$ ، $\alpha = 0.5$ ، $Re = 45$ ۸۷
- شکل ۴-۱۴: نمودار سرعت چرخشی بر حسب موقعیت شعاعی به ازای وایزنبرگ‌های مختلف و $Ta = 38$ ، $\alpha = 0.5$ ۸۹
- شکل ۴-۱۵: توزیع تنش کل به ازای $\alpha = 0.5$ ، $Re = 45$ ، $Ta = 38$ و الف) $Wi = 1$ ب) $Wi = 10$ پ) $Wi = 100$ ۹۰
- ت) $Wi = 1000$ ۹۰

- شکل ۴-۱۶: نمودار تغییرات لزجت برشی با عدد وایزنبرگ به ازای مقادیر مختلف $[\alpha]$ ۹۱
- شکل ۴-۱۷: نمودار تغییرات ضریب افت اصطکاکی با عدد وایزنبرگ به ازای ضرایب مختلف α و $Re = 45$ ، $Ta = 38$ ۹۲
- شکل ۴-۱۸: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای با عدد وایزنبرگ به ازای ضرایب مختلف α و $Re = 45$ ، $Ta = 38$ ۹۳
- شکل ۴-۱۹: نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع به ازای رینولدزهای مختلف و $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$ ، $Ta = 38$ ۹۴
- شکل ۴-۲۰: نمودار سرعت چرخشی بر حسب شعاع به ازای اعداد رینولدز مختلف و $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$ ، $Ta = 38$ ۹۵
- شکل ۴-۲۱: نمودار تغییرات ضریب افت اصطکاکی f بر حسب عدد رینولدز به ازای اعداد تیلور مختلف و $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$... ۹۶
- شکل ۴-۲۲: منحنی تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای با عدد رینولدز به ازای اعداد تیلور مختلف و $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$ ۹۸
- شکل ۴-۲۳: توزیع تنش برشی τ_{xy} به ازای $Ta = 38$ ، $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$ و الف) $Re = 18$ ب) $Re = 27.2$ پ) $Re = 36.2$ ۹۸
- ت) $Re = 45$ ۹۹
- شکل ۴-۲۴: توزیع تنش نرمال τ_{zz} به ازای $Ta = 38$ ، $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$ و الف) $Re = 18$ ب) $Re = 27.2$ ۱۰۰
- پ) $Re = 36.2$ ۱۰۰
- شکل ۴-۲۵: نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع به ازای تیلورهای مختلف و $Re = 18$ ، $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$ ۱۰۱
- شکل ۴-۲۶: منحنی سرعت محوری بر حسب موقعیت شعاعی به ازای اعداد تیلور مختلف $Re = 45$ ، $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۷: نمودار سرعت چرخشی بر حسب شعاع به ازای اعداد تیلور مختلف و $Re = 45$ ، $\alpha = 0.5$ ، $Wi = 750$ ۱۰۳
- شکل ۴-۲۸: منحنی تغییرات ضریب افت اصطکاکی داریسی- ویسباخ بر حسب عدد تیلور به ازای اعداد رینولدز مختلف و $\alpha = 0.5$ ، ۱۰۴
- $Wi = 750$ ۱۰۴
- شکل ۴-۲۹: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای بر حسب عدد تیلور به ازای اعداد رینولدز مختلف و $\alpha = 0.5$ ، ۱۰۵
- $Wi = 750$ ۱۰۵
- شکل ۴-۳۰: توزیع میدان تنش τ_{yz} به ازای $Re = 18$ ، $Wi = 750$ ، $\alpha = 0.5$ و الف) $Ta = 6$ ب) $Ta = 24.1$ پ) ۱۰۶
- $Ta = 38$ ۱۰۶
- شکل ۴-۳۱: توزیع میدان تنش τ_{yz} به ازای $Re = 45$ ، $Wi = 750$ ، $\alpha = 0.5$ و الف) $Ta = 6$ ب) $Ta = 24.1$ پ) $Ta = 38$ ۱۰۷
- ۱۰۷
- شکل ۴-۳۲: توزیع میدان تنش τ_{zz} به ازای $Re = 18$ ، $Wi = 750$ ، $\alpha = 0.5$ و الف) $Ta = 6$ ب) $Ta = 24.1$ ۱۰۸
- پ) $Ta = 38$ ۱۰۸
- شکل ۴-۳۳: توزیع میدان تنش τ_{zz} به ازای $Re = 45$ ، $Wi = 750$ ، $\alpha = 0.5$ و الف) $Ta = 6$ ب) $Ta = 24.1$ ۱۰۹

فهرست علائم و نشانه‌ها

سرعت جریان سیال ورودی به آنالوس	$U_{in} (m/s)$
سرعت در راستای محور X	$u_x (m/s)$
سرعت در راستای محور Y	$u_y (m/s)$
سرعت در راستای محور Z	$u_z (m/s)$
سرعت مرجع	$u_{ref} (m/s)$
سرعت چرخش استوانه‌ی داخلی	$\omega (rad/s)$
عدد رینولدز، تعمیم یافته جریان	Re
عدد تیلور، تعمیم یافته جریان	Ta
عدد وایزنبرگ	Wi
زمان	$t (s)$
عدد الاستیک	El
عدد فرود	Fr
فشار سیال	$P (N/m^2)$
زمان مشاهده	$t_{exp} (s)$
اختلاف تنش‌های نرمال اول	$N_1 (N/m^2)$
اختلاف تنش‌های نرمال دوم	$N_2 (N/m^2)$
ضریب اصطکاک پوسته‌ای	C_d
ضریب افت اصطکاکی دارسی - ویسباخ	f
شتاب گرانش	$g (m/s^2)$

علائم یونانی

لزجت برشی	$\eta (N \cdot s/m^2)$
لزجت برشی در نرخ برش صفر	$\eta_0 (N \cdot s/m^2)$
کرنش	γ
نرخ برش	$\dot{\gamma} (\frac{1}{s})$
تنش برشی وارده در صفحه X و Y	$\tau_{x,y} (N/m^2)$
تنش برشی وارده در صفحه Y و Z	$\tau_{y,z} (N/m^2)$
تنش برشی وارده در صفحه X و Z	$\tau_{x,z} (N/m^2)$
تنش محوری در راستای محور X	$\tau_{xx} (N/m^2)$
تنش محوری در راستای محور Y	$\tau_{yy} (N/m^2)$
تنش محوری در راستای محور Z	$\tau_{zz} (N/m^2)$

چگالی سیال	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$
ضریب تحرک سیال	α
ثابت زمانی رهایی از تنش	$\lambda \text{ (s)}$
ثابت زمانی تأخیر سیال	$\lambda_1 \text{ (s)}$
ثابت اختلاف تنش نرمال اول	$\Psi_1 \text{ (N.s}^2\text{/m}^2\text{)}$
ثابت اختلاف تنش نرمال دوم	$\Psi_2 \text{ (N.s}^2\text{/m}^2\text{)}$

فصل ۱

مقدمه

در سال ۱۸۵۹ برای اولین بار، نفت از چاهی به عمق ۶۹.۵ فوت در پنسیلوانیای آمریکا فوران کرد. نام کلنل دریک^۱ در تاریخ جستجوی نفت، هم‌زمان با حفر این چاه ثبت شد. این واقعه سرآغازی برای صنعت حفاری نفت می‌باشد. در آغاز قرن بیستم آنتونی لوکاس^۲ هم‌زمان با کشف میدان نفتی اسپیندل‌تاپ^۳ در تگزاس، روش حفاری دورانی را به تمام جهان نشان داد. او در این نوع حفاری از ترکیب مته چرخان و تزریق مداوم گل از سر مته بهره برد. از آن زمان تاکنون روش حفاری دورانی با پیشرفت تکنولوژی، به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در حفاری چاه‌های نفت، عموماً از گل حفاری^۴ استفاده می‌شود. گل حفاری از طریق لوله‌ی حفاری، با فشار زیاد به داخل چاه فرستاده می‌شود. گل از میان حفره‌های مته در ته چاه خارج شده، خرده‌سنگ‌هایی که توسط مته کنده شده را در برگرفته و به همراه آن‌ها فضای آنالوس را طی کرده و به سطح زمین باز می‌گردد. سپس گل حفاری الک و صاف شده و دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حین حفاری، گل حفاری نقش عمده‌ای را بر عهده دارد. امروزه حفاری‌های بزرگ و گسترده به خاطر پیشرفت‌های تکنیکی در ماهیت فیزیکی و شیمیایی گل حفاری، با بازده و کیفیت بالایی انجام می‌پذیرند. در شکل ۱-۱ شماتیکی از تجهیزات حفاری نشان داده می‌شود.

از وظایف مهم گل حفاری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- انتقال قطعات خرده سنگ به سطح چاه

۲- معلق نگه داشتن قطعات خرده سنگی در زمان توقف گردش سیال حفاری

۳- روانکاری و خنک کاری سر مته

۴- استحکام بخشیدن به دیواره چاه

^۱ Colonel Drake

^۲ Anthony Francis Lucas

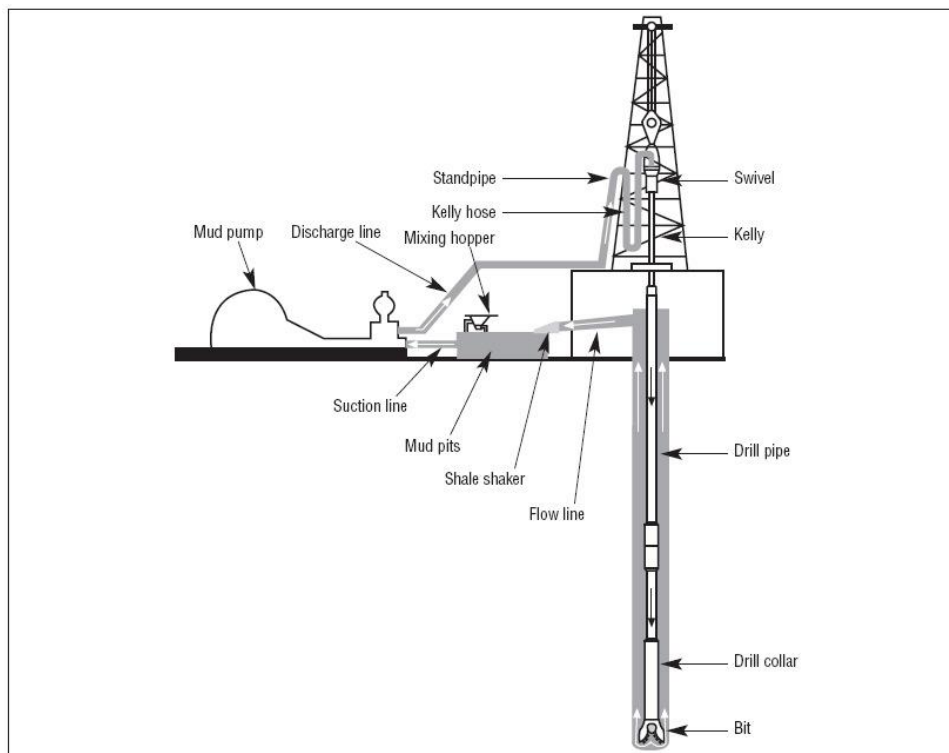
^۳ Spindletop

^۴ Drilling mud

۵- جلوگیری از جریان یافتن سیال موجود در سازندهای پیرامون چاه به درون چاه

۶- انتقال دهنده نیرو به موتور داخل چاه

۷- ارائه دهنده اطلاعات زمین شناسی [۱].



شکل ۱-۱ شماتیکی از تجهیزات و فرایند حفاری [۱].

گل‌های حفاری در انواع و اقسام متفاوتی هستند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به گل حفاری پایه آبی^۱ و گل حفاری پایه روغنی^۲ اشاره کرد. امروزه اهمیت گل حفاری به جایی رسیده که جهت بهبود خواص رئولوژیکی^۳ آن، علاوه بر افزودن مواد پلیمری طبیعی و اصلاح شده از نوع صنعتی آن نیز استفاده می‌شود. تجارب حفاری نشان می‌دهد که گل حفاری بنتونیتی با وجود کنترل و ایجاد خواص رئولوژی مناسب، در شرایط خاصی قادر به حفظ خواص مطلوب نبوده و بعضاً موجب ایجاد اشکالاتی در حفاری و کاهش بازده آن می‌گردد. همچنین جهت افزایش سرعت حفاری نیاز به گلی است که در

^۱ Water-based drilling mud

^۲ Oil-based drilling mud

^۳ Rheological

سرعت‌های برشی بالا و حرارت زیاد (در انتهای ستون حفاری و نازل‌های سر مته) از کم‌ترین گرانروی^۱ برخوردار باشد و در فضای حلقوی نیز با یک گرانروی بهینه‌بتواند کنده‌های حفاری را به بیرون چاه هدایت کند و هنگام توقف عملیات حفاری، با حفظ گرانروی و لزجت خود، از ریزش و بازگشت کنده‌ها به پشت‌سر مته جلوگیری کند. گل حفاری ایده‌آل هم‌چنان باید در برابر آلودگی‌های مختلف به خصوص کلسیم و منیزیم پایدار باشد. محدودیت‌های فراوان و عدم کارایی مناسب گل‌های حفاری بنتونایتی موجب شده سیالات جایگزین دیگری مورد توجه قرار بگیرند. از این‌رو امروزه استفاده از گل‌های حفاری پلیمری مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفته که علاوه بر ایجاد گرانروی در سیستم، در برابر آلودگی‌های مختلف پایدار بوده و به خوبی افت صافی و هرزروی گل را کنترل می‌کنند. گل‌های پلیمری ممکن است فقط از پلیمرها و مواد وزن‌افزا^۲ ساخته شده باشند و یا برای رسیدن گرانروی گل به مقداری مناسبو قدرت ژله‌ای مطلوب و به دلیل کاهش هزینه و بهبود وضعیت افت صافی^۳، از مقداری بنتونایت پیش‌هیدراته^۴ استفاده شود. قدرت ژله‌ای، خاصیت بندش مولکولی و الکتروشیمیایی موقتی است که هنگام سکون در گل ایجاد شده و با معلق نگه داشتن مواد کنده شده یا وزن افزا، از ته‌نشین شدن آن‌ها جلوگیری کند. استفاده از پلیمرها در سیال حفاری برای اولین بار از سال ۱۹۳۷ آغاز شد. وقتی جهت کنترل ویژگی نفوذ، ذرات نشاسته به گل بنتونایت^۵ اضافه گردید. این توسعه به سرعت با معرفی کربوکسیل متیل گلوکز^۶ (CMC)، تانن‌ها^۷ و کوبراچوولینگوسولفانات^۸ ادامه یافت. در سال‌های اخیر دامنه و تنوع پلیمرهای مورد استفاده در گل حفاری به طور مداوم افزایش یافته و توانایی استفاده از پلیمرهایی با ویژگی‌های خاص برای متناسب بودن با هدفی ویژه، اطمینان

¹ Viscosity

² Weighting material

³ Lost circulation

⁴ Prehydrated

⁵ Bentonite

⁶ Carboxymethylcellulose

⁷ Tanan

⁸ Quebracho-Lignosulfonates

می‌دهد که پلیمرهای جدید مشکلات آینده حفاری را برطرف کنند. از افزودنی‌های پلیمری شناخته شده و معروف می‌توان به نشاسته، صمغ زانتان^۱ و کربوکسی متیل سلولز (CMC) اشاره کرد [۲].

رابطه کلی بین آثار پلیمر و مشخصات اصلی آن به صورت جدول ۱-۱ قابل نمایش است.

جدول ۱-۱ رابطه‌ی بین ساختار درونی گل حفاری با خواص مشاهده شده در آن [۲].

تأثیر گذار روی	مشخصات اصلی
گرانروی	وزن مولکولی
استحکام ژل	وزن مولکولی و ساختار شاخه‌ای زیاد
گرانروی در محلول نمکی	وزن مولکولی زیاد و نوع غیریونی یا به شدت آنیونی جانشین شده
گسستگی ذرات گل	وزن مولکولی کم دارای بار منفی در محیط قلیایی
به هم پیوستگی ذرات گل	وزن مولکولی با گروه‌های باردار برای جذب روی سطح ذرات رسی
فعال کننده سطحی	وجود گروه‌های آب دوست و غیر آب دوست روی یک مولکول
کاهش هرزروی آب	تشکیل ذرات کلونیدی از طریق پل بستن با ذرات جامد

تاکنون تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بسیاری در خصوص جریان سیال حفاری در هندسه مذکور صورت گرفته که اکثر آن‌ها در خصوص سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی ویسکوز مانند پاورلو^۲ و هرشل بالکی^۳ بوده است و تنها سهم اندکی از این تحقیقات متوجه سیالات ویسکوالاستیک می‌باشد. از لحاظ رئولوژیکی، در سیالات حفاری که در آن‌ها از مواد پلیمری به عنوان افزودنی استفاده شده، در محدوده‌های خاصی از نرخ برش، سیال به هنگام تغییر شکل توانمند از خود رفتار ویسکوز و الاستیک نشان می‌دهند و از اینرو سیالاتی ویسکوالاستیک تلقی می‌شوند. در حالت کلی نوع پاسخ و رفتار یک ماده به هنگام تغییر شکل به دو پارامتر زمان انجام آزمایش یا به اصطلاح زمان مشاهده و ثابت زمانی ماده^۴ (زمان رهایی از تنش ماده) بستگی دارد. ثابت زمانی رهایی از تنش، خاصیتی از ماده است که به

¹ Xanthan gum

² Power-law

³ Herschel-bulkley

⁴ Relaxation time

سرعت بازیابی ساختار مولکولی مواد مربوط می‌گردد. این پارامتر معمولاً از روی تست رهایی از تنش^۱ با اعمال یک کرنش اولیه و محاسبه زمان از بین رفتن تنش در ماده محاسبه می‌شود [۳].

عدد دبورا^۲ برای اولین بار توسط رینر [۴] پیشنهاد داده شد. این عدد توسط رابطه‌ی (۱-۱) و به صورت نسبت زمان رهایی از تنش به زمان اجرای آزمایش تعریف می‌گردد.

$$De = \lambda / t_{exp} \quad (1-1)$$

اگر عدد دبورا خیلی کوچکتر از یک شود، رفتار ماده شبیه مایعات نیوتنی و اگر بسیار بزرگتر از یک باشد رفتار ماده جامد گونه است و در اعداد دبورای میانی، ماده از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان می‌دهد. زمان مشاهده در تست‌های برشی و نوسانی، برابر عکس نرخ برش هستند. بنابراین در تست‌های برشی و نوسانی، عدد دبورا به ترتیب به صورت روابط (۱-۱) و (۲-۱) تعریف می‌شود.

$$De = \lambda / t_{exp} = \lambda \gamma_0 \omega \quad (2-1)$$

که در این روابط ω فرکانس تست نوسانی و γ_0 دامنه نوسان می‌باشند [۵].

با توجه به توصیفی که از عدد دبورا شد، نحوه‌ی پاسخ و عکس‌العمل سیالات حفاری به تغییر شکل، آن‌ها را به سه دسته‌ی ویسکوز، الاستیک و ویسکوالاستیک دسته‌بندی می‌کند. این طبقه‌بندی به زمان مشاهده آزمایش و زمان رهایی از تنش ماده بستگی دارد. در جریان‌های یکنواخت برشی، مانند جریان‌های توسعه یافته در کانال‌ها و جریان‌های ویسکومتریک با تنش برشی ساده، زمان مشخصه برای فرایند تغییر شکل (t_{exp}) مقداری نامحدود است و زمان رهایی از تنش ماده (λ) در مقابل آن عدد ناچیزی است. در این حالت عدد دبورا صفر می‌شود. بنابراین عدد دبورا به تنهایی قابلیت شناسایی اثرات ناشی از خواص ویسکوالاستیک سیال را ندارد [۶]. عدد بی‌بعد وایزنبرگ^۳ (We)

¹ Relaxation test

² Deborah number

³ Weissenberg number

توسط وایت [۶] در سال ۱۹۴۸ ارائه گردید. این عدد نشان دهنده‌ی نسبت نیروهای الاستیک به نیروهای ویسکوز است و به صورت رابطه‌ی (۳-۱) ارائه می‌گردد.

$$We = \frac{\lambda U}{L} \quad (3-1)$$

L و U به ترتیب سرعت و طول مشخصه جریان سیال می‌باشند. عدد وایزنبرگ به صورت We و گاهی برای اشتباه نشدن با عدد وبر به صورت Wi نشان داده می‌شود. با توجه به یکنواخت و توسعه- یافته بودن جریان سیالدر هندسه‌ی آنالوس، از عدد وایزنبرگ به عنوان پارامتر تعیین کننده‌ی خاصیت الاستیک استفاده می‌شود. علاوه بر این، جهت بررسی خاصیت الاستیک سیال، از پارامتر بی‌بعد دیگری به نام عدد الاستیک^۱ (El) نیز استفاده می‌شود. عدد الاستیک از تقسیم عدد وایزنبرگ بر عدد رینولدز به صورت رابطه‌ی (۵-۱) قابل محاسبه است.

$$El = \frac{Wi}{Re} \quad (4-1)$$

در حین گردش گل حفاری در درون چاه، گل محدوده گسترده‌ای از نرخ‌های برشی را تجربه می‌کند. به طوری که نرخ برش در لوله‌ی حفاری در حدود $10^3 (s^{-1})$ ، آنالوس در حدود $10^2 (s^{-1})$ و در سر نازل مته تقریباً $10^5 (s^{-1})$ است. اثرات ویسکوالاستیک، در سیالات حفاری پلیمری که زمان رهایی از تنش بالایی دارند، کاملاً قابل مشاهده می‌باشد [۵]. خاصیت الاستیک سیال حفاری، تأثیر بسزایی در الگوی جریان و میزان افت فشار آن در حین عبور از فضای آنالوس دارد. برای مدل‌سازی و توصیف رفتار سیالات حفاری که از خود اثرات الاستیک نشان می‌دهند، مخصوصاً هنگامی که تحت نرخ‌های برش بالا قرار می‌گیرند و ساختار مولکولی آن‌ها دچار تغییرات اساسی می‌شود، باید از مدل‌های ویسکوالاستیک غیرخطی استفاده کرد. همچنین سیال حفاری به همراه کنده‌های حاصله از گردش مته، ساختاری ژلی شکل تشکیل می‌دهند که این ژل در حین تغییر شکل‌های ناچیز از خود رفتاری

¹ Elastic number

ویسکوالاستیک نشان می‌دهد. به وجود آمدن فشار ماکزیمم لحظه‌ای^۱ و تأخیر در ایجاد این فشار، از شواهد دیگر خاصیت ویسکوالاستیک سیال حفاری می‌باشد. برای برآورده‌سازی وظایف پیچیده سیال حفاری، مانند انتقال و معلق‌سازی ذرات جامد و جلوگیری از ته نشینی ذرات سنگین مانند وزن دهنده‌ها (باریت)، سیال حفاری باید ساختاری ژلی شکل تشکیل دهد که برآورده‌سازی این خاصیت با ویسکوالاستیک شدن سیال همراه می‌باشد [۷].

اطلاعات ویسکوالاستیک یک سیال حفاری، از داده‌های مهم این سیال، در شناسایی و تعیین قدرت ساختار ژلی شکل^۲ آن به شمار می‌آیند و مقادیر این داده‌ها در طبقه‌بندی و شناسایی گل حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این اطلاعات، نه تنها ضرایب یک معادله‌ی ساختاری ویسکوالاستیک را تعیین می‌کنند، بلکه اطلاعات ارزشمندی را درباره‌ی ساختار مولکولی سیالات حفاری، در اختیار محققان قرار می‌دهند. اطلاعات و داده‌های ویسکوالاستیک به دست‌آمده از آزمایش‌ها، کلید اصلی در توسعه‌ی معادلات ساختاری می‌باشد. پارامترهای رئولوژیکی یک سیال، با اجرای تست‌های استاندارد دینامیکی بر روی آن، به دست می‌آیند. این تست‌ها برای شناسایی خواص فیزیکی و ساختمان داخلی سیال مناسب هستند. از خواص مهم سیال می‌توان به لزجت برشی ماده در نرخ برش صفر^۳ و قدرت ساختار ژل اشاره کرد. از تست‌های رئولوژیکی مهم نیز می‌توان به تست رهایی از تنش، تست خزش^۴، تست نوسانی مدول‌های ذخیره و اتلاف انرژی برحسب فرکانس زاویه‌ای نوسان^۵، تست افزایش دامنه به ازای فرکانس ثابت^۶ و تست افزایش فرکانس نوسان به ازای دامنه کرنش ثابت^۷، اشاره کرد. در تست رهایی از تنش، ماده تحت یک کرنش اولیه مشخص در محدوده‌ی ویسکوالاستیک خطی قرار می‌گیرد و تنش ماده بر حسب زمان مشاهده می‌شود. مدت زمانی که طول

¹ Surge pressure

² Gel strenght

³ Zero shear viscosity

⁴ Creep test

⁵ Storage and Loss module oscillation test

⁶ Oscillatory Amplitud Sweep Test

⁷ Oscillatory Frequency Sweep Test

می‌کشد تا مقدار تنش در ماده به صفر یا مقدار ثابتی برسد، ثابت زمان رهایی از تنش ماده نامیده می‌شود. در تست‌خزش، ماده تحت یک تنش ثابت، تحت مدت زمانی طولانی قرار می‌گیرد و جابجایی آن نسبت به زمان مشاهده می‌شود. تست تغییرات دامنه نوسان ماده به ازای یک فرکانس نوسان ثابت، نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی ویسکوالاستیک خطی^۱ ماده برای آن فرکانس نوسانی خاص است. در محدوده‌ی ویسکوالاستیک خطی، مقادیر مدول ذخیره (G') و اتلاف انرژی (G'') در یک فرکانس خاص، با تغییر دامنه‌ی نوسان آزمایش تغییری نمی‌کنند و به نوعی مستقل از کرنش وارده هستند. با ورود به ناحیه ویسکوالاستیک غیرخطی^۲، ماده از لحاظ ساختار مولکولی درونی دچار نوعی شکست و تغییر ساختار می‌شود. ورود به این ناحیه، معادل با نقطه شکست دینامیکی^۳ ماده است. تست تغییرات فرکانس نوسان به ازای یک دامنه ثابت، جهت مشاهده‌ی خواص وابسته به زمان ماده، مانند لزجت در نرخ برش صفر (η_0) و میزان قدرت ساختار ژل در حالت استاتیک ماده، به کار می‌رود. همچنین مشاهده‌ی خواص وابسته به زمان ماده، برای پیش‌بینی نوع ماده و به دست آوردن وزن مولکولی آن می‌باشد. از اطلاعات به دست آمده توسط تست‌های آزمایشگاهی مذکور، می‌توان میزان قابلیت حمل و معلق‌سازی ذرات کنده شده و میزان ته‌نشینی استاتیکی ذرات باریت موجود در گل را پیش‌بینی کرد. خواص ویسکوالاستیک سیال، رابطه‌ی نزدیکی با خواص رئولوژیکی آن در نرخ برش‌های پایین دارد. در نرخ‌های برش پایین، همانند نرخ‌های برش خیلی بالا، لزجت با تغییرات نرخ برش تغییر چندانی نمی‌کند و منحنی نمودار لزجت بر حسب نرخ برش در این ناحیه، خطی افقی است. ویسکومترهای فن^۴ ۳۵ و چندلر^۵ ۳۵ که تست‌های یکنواخت برشی را انجام می‌دهند، قادر به محاسبه‌ی لزجت در نرخ برش‌های پایین نیستند و محدوده‌ی کاری آنها بین نرخ برش های (5.1 s^{-1}) تا (1022 s^{-1}) می‌باشد. تعیین پارامتر مهمی هم‌چون لزجت در نرخ برش صفر، توسط تست‌های ویسکوالاستیک قابل تعیین

¹Linear Viscoelastic Range

²Non-linear Viscoelastic Range

³ Dynamic failure

⁴Fann viscometer

⁵Chandler viscometer

است. در حالت کلی این پارامتر را می‌توان با استفاده از تست خزش، تست رهایی از تنش و سایر تست های نوسانی نیز تعیین کرد [۵].

یکی از پارامترهای مهم مورد مطالعه در شبیه‌سازی جریان گل در آنالوس، میزان گشتاور وارده بر لوله‌ی انتقال دهنده‌ی گل^۱ (انتقال دهنده‌ی گل از مخزن گل به سر مته) می‌باشد. برای تعیین و مطالعه‌ی وابستگی بین خواص گل حفاری و پارامترهای جریان با میزان گشتاور وارده بر این لوله، از پارامتر بدون بعد ضریب اصطکاک پوسته‌ای (C_d) استفاده می‌شود. این پارامتر برای توصیف نیروی درگ و مقاومت لوله‌ی چرخان داخل آنالوس (در محیط حاوی جریان گل حفاری) به کار رفته و به صورت رابطه‌ی (۵-۱) تعریف می‌شود.

$$C_d = \frac{\tau_{wall}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (5-1)$$

در رابطه‌ی (۶-۱)، τ_{wall} نشان دهنده‌ی تنش‌های برشی وارده بر دیواره‌ی مجاور به جریان سیال است. در اینجا تغییرات ضریب درگ بر روی سطح استوانه‌ی چرخان داخلی، به ازای پارامترهای گوناگون مورد بررسی قرار می‌گیرد.

یکی دیگر از پارامترهای مهم مورد مطالعه در جریان گل حفاری در آنالوس، میزان افت فشار گل در حین عبور از فضای آنالوس می‌باشد. برای مطالعه‌ی تأثیر خواص سیال و پارامترهای جریان بر روی میزان افت فشار، از پارامتر بدون بعد ضریب افت اصطکاک داریسی - ویسباخ^۲ (f) استفاده می‌شود. در مکانیک سیالات برای توصیف میزان افت‌های اصطکاک سیال در داخل کانال‌ها و لوله‌ها، از این پارامتر بی‌بعد استفاده می‌گردد. در هندسه‌ی آنالوس، رابطه‌ی بین این ضریب با میزان افت فشار سیال به صورت رابطه‌ی (۶-۱) می‌باشد [۸].

¹ Drill pipe

² Darcy-Wiesbach Friction factor

$$f = \frac{\frac{\partial p}{\partial z} \delta}{\rho u^2} \quad (۱-۶)$$

برای به دست آوردن منحنی‌های سرعت و تنش در هر نوع سیالی، باید چهار معادله‌ی اساسی حل شوند. این معادلات شامل قوانین پایستگی جرم^۱، پایستگی ممنتوم^۲، معادله انرژی^۳ و معادله ساختاری^۴ حاکم بر سیال می‌باشند. این معادلات در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جریان سیال، حل می‌گردند و نتایج حاصله، منحنی‌ها و کانتورهای سرعت، فشار، تنش و مشاهده‌ی خطوط جریان در هندسه‌ی مورد نظر می‌باشند.

^۱Mass continuity

^۲ Conservation of momentum

^۳ Conservation of energy

^۴ Constitutive equation

فصل ۲

مروری بر پیشینه تحقیق

تقریباً از ابتدای قرن بیستم میلادی تاکنون، علم مکانیک سیالات غیر نیوتنی از اهمیت و توجه خاصی از سوی محققان برخوردار بوده است. آزمایش‌های صورت گرفته بر روی سیالات حفاری نیز نشان دهنده‌ی غیر نیوتنی بودن این سیالات و بعضاً ویسکوالاستیک بودن آن‌ها به عنوان زیر شاخه‌ای از سیالات غیر نیوتنی بوده است. از سوی دیگر، اهمیت بالای حفاری در حوزه‌ی صنعت نفت و گاز و نقش ویژه‌ی سیالات حفاری در این صنعت موجب شده مدل‌سازی جریان سیال حفاری به عنوان سیالی غیر نیوتنی و ویسکوالاستیک مورد توجه محققین و دانشمندان بسیار یقین‌ار بگردد [۹]. هدف از این تحقیق، مطالعه و بررسی جریان ویسکوالاستیک گل حفاری در فضای آنالوس و تأثیر افزودنی‌های پلیمری (عامل افزایشدهی خاصیت الاستیک سیال) بر روی پارامترهای جریان و دنبال آن کیفیت فرایند حفاری می‌باشد. در این فصل، مروری بر تحقیقات گذشته در زمینه جریان سیالات غیر نیوتنی و خصوصاً ویسکوالاستیک در فضای آنالوس، صورت می‌گیرد. به این ترتیب، علاوه بر بیان تاریخچه‌ی مربوط به تحقیقات پیشین، می‌توان به میزان اهمیت تحقیق در این زمینه و نیز زمینه‌های فراروی پژوهشگران جهت ادامه‌ی این تحقیقات پی برد. همچنین با مقایسه‌ی نتایج حاصل از این مطالعات با نتایج تحقیق حاضر، زمینه‌های نوآوری و ضرورت مطالعه‌ی تحقیق حاضر آشکارتر می‌شود. در انتهای این فصل، تحقیق حاضر معرفی شده و ویژگی‌های کلی، اهداف، کاربردها و موارد نوآوری آن مورد بحث قرار می‌گیرد.

جریان سیال حفاری در فضای آنالوس از اهمیت خاصی در صنعت حفاری برخوردار است و تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در این رابطه به شکل‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی انجام شده است. در اکثر این تحقیقات، سیال حفاری با مدل‌های غیرنیوتنی ویسکوز بدون تنش تسلیم، هم‌چون مدل پاورلو و مدل‌های غیرنیوتنی ویسکوز با تنش تسلیم، مانند مدل هرشل بالکی توصیف شده است. در واقع سهم اندکی از این تحقیقات متوجه سیالات ویسکوالاستیک بوده است. به طور کلی دلایل اصلی عدم استفاده از مدل‌های ویسکوالاستیک را می‌توان پیچیده بودن مدل‌های ویسکوالاستیک نسبت به سایر مدل‌های غیرنیوتنی و غیرخطی بودن ترم تنش در برخی از مدل‌های ویسکوالاستیک دانست [۵]. نخستین مقاله چاپ شده در ارتباط با جریان سیال غیرنیوتنی در فضای آنالوس، مربوط به تحقیقات گوتگین و ولارویچ [۱۰] می‌باشد که راه حلی تحلیلی (با کمی تقریب) را برای جریان محوری سیال بینگهام^۱ در فضایی بین دو استوانه ارائه کردند. اولین حل تحلیلی دقیق برای جریان محوری سیال بینگهام در هندسه آنالوس، توسط لایرد [۱۱] ارائه گردید و یک سال بعد از آن، برد و فردریکسون [۱۲] راه حلی تحلیلی و دقیق را برای سیالات بینگهام و پاورلو در هندسه مذکور ارائه کردند. لازم به ذکر است که در تمامی این موارد، جریان محوری سیال در فضای بین دو استوانه‌ی ساکن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای اولین بار، ریولین [۱۳] از مدل‌های غیرنیوتنی برای شبیه‌سازی جریان محوری سیال در فضای بین دو استوانه (همراه با چرخش استوانه داخلی) استفاده کرد. سپس ریگی و گالیلی [۱۴] با مدل کراس^۲ و بترا و عیسی [۱۵] با مدل سیال ساتربای^۳، به شبیه‌سازی این جریان پرداختند. فیلیپ و دیوید [۱۶] با بررسی جریان مارپیچ سیال پاورلو در فضای آنالوس، به رابطه‌ی بین دبی جریان سیال و میزان افت فشار آن دست یافتند. جریان یافتن سیال به شکل مارپیچ در فضای

¹Bingham Fluid

²Cross model

³Sutterby

آنالوس، در نتیجه‌ی وجود گرادیان^۱ فشار محوری در فضای آنالوس و نیروی درگ پیچشی ناشی از چرخش استوانه‌ی داخلی می‌باشد و به دلیل غیرنیوتنی بودن سیال و وابستگی لزجت به میدان سرعت سیال، آثار این دو جریان از قانون جمع آثار تبعیت نمی‌کنند. در تحقیق آن‌ها، از آثار ورود و خروج جریان سیال در ابتدا و انتهای فضای آنالوس، به دلیل طول گسترده‌ی آن صرف‌نظر شده و جریان سیال از پایین به داخل فضای آنالوس فرستاده می‌شود. همچنین آن‌ها با استفاده از آنالیز بی‌بعد، حل‌نیمه تشابهی^۲ را برای محدوده‌ی گسترده‌ای از پارامترهای دینامیکی و رئولوژیکی سیال و همچنین پارامترهای مربوط به هندسه‌ی مسئله ارائه کردند. در کار آن‌ها از هیچ حل عددی استفاده نشده و در چند نمودار مختلف، به ازای افت فشارهای گوناگون و مشخص، وابستگی بین نسبت شعاع‌های دو استوانه، پارامتر رئولوژیکی مدل پاورلو و گشتاور وارده بر استوانه‌ی داخلی، به تصویر کشیده شده است. همچنین آن‌ها مقایسه‌ای را بین نتایج حل خود با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی ژیشنگ و یوانگ [۱۷]، انجام دادند که نتایج این مقایسه در جدول (۲-۱) قابل مشاهده می‌باشد.

¹ Gradient

² Quasisimilarity

جدول ۱-۲ مقایسه‌ی بین دبی‌های نتایج آزمایشگاهی ژیشنگو یینگ هو [۱۷] با دبی‌های حاصل از

حل تئوریک به ازای $n = ۰.۶۷۱۳$ ، $R = ۰.۰۶۶$ و $K = ۰.۳۶۳$.

شماره‌ی آزمایش	پارامترهای حل تئوری	مقدار پارامترها	دبی آزمایشگاهی	دبی تئوریک محاسبه شده	درصد- اختلاف دبی‌ها
۱	$\frac{\partial P}{\partial L}$	$(\frac{pa}{m})$ -۴۷.۵۶۴	۰.۰۰۱۱۸۷	۰.۰۰۱۲۰۵	۱.۵
	ω	۱.۰۴۷ $(\frac{rad}{s})$			
۲	$\frac{\partial P}{\partial L}$	-۴۷.۰۶۰ $(\frac{pa}{m})$	۰.۰۰۱۱۸۷	۰.۰۰۱۱۹۶	۰.۸
	ω	۲.۰۹۴ $(\frac{rad}{s})$			
۳	$\frac{\partial P}{\partial L}$	- $(\frac{pa}{m})$ ۴۶.۶۵۴	۰.۰۰۱۱۸۷	۰.۰۰۱۱۸۸	۰.۱
	ω	۳.۱۴۱ $(\frac{rad}{s})$			
۴	$\frac{\partial P}{\partial L}$	- $(\frac{pa}{m})$ ۴۶.۱۶۸	۰.۰۰۱۱۸۷	۰.۰۰۱۱۸۱	۰.۵
	ω	۴.۱۸۸ $(\frac{rad}{s})$			

۱.۲	۰.۰۰۱۱۷۳	۰.۰۰۱۱۸۷	- $(\frac{pa}{m})_{45.712}$	$\frac{\partial P}{\partial L}$	۵
			۵.۲۳۵ $(\frac{rad}{s})$	ω	
۲.۱	۰.۰۰۱۱۶۲	۰.۰۰۱۱۸۷	- $(\frac{pa}{m})_{45.082}$	$\frac{\partial P}{\partial L}$	۶
			۶.۲۸۲ $(\frac{rad}{s})$	ω	
۱.۷	۰.۰۰۱۱۵۷	۰.۰۰۱۱۸۷	- $(\frac{pa}{m})_{43.935}$	$\frac{\partial P}{\partial L}$	۷
			۸.۳۷۶ $(\frac{rad}{s})$	ω	

در جدول ۱-۲، n توان معادله‌ی پاورلو، R شعاع استوانه‌ی بیرونی و κ نسبت شعاع استوانه‌ی داخلی به استوانه‌ی خارجی می‌باشد. همچنین درصد انحراف دبی تئوری به دست آمده با دبی آزمایشگاهی به صورت رابطه‌ی (۱-۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\text{درصد انحراف} = 100 \left| 1 - \frac{Q_{theor}}{Q_{exp}} \right| \quad (1-2)$$

ژیشنگ و یوانگ در کار آزمایشگاهی خود با استفاده از یک دبی ثابت و همچنین سرعت دورانی مشخص، میزان افت فشار سیال را در فضای آنالوس محاسبه کردند. فیلیپ و دیوید با استفاده از حل نیمه تشابهی و در نظر گرفتن افت فشار به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی به عنوان داده‌ی ورودی استفاده از پارامترهای مورد نیاز در حل، میزاندبی متناظر با این افت فشار را به دست آوردند. همان-

طور که در جدول ۱-۲ مشاهده می‌شود، مقایسه بین میزان دبی‌های نشان‌دهنده دقت خوب حل صورت گرفته در این مقاله می‌باشد. در بین مقالات متعدد ارائه شده در زمینه جریان سیالات غیرنیوتنی در فضای آنالوس، تنها سهم اندکی متوجه سیالات ویسکوالاستیک بوده است. در این میان بهاتانگر [۱۸] برای نخستین بار از مدل ویسکوالاستیک ریولین - اریکسون^۱، جهت توصیف جریان محوری سیال با عدد رینولدز پایین ($Re = 1$) در فضای بین دو استوانه هم مرکز (بدون چرخش استوانه‌ی داخلی)، استفاده کرد. در تحقیق وی علاوه بر جریان محوری، جریانی از استوانه داخلی وارد فضای آنالوس شده و از استوانه‌ی بیرونی خارج می‌گردد. حل انجام شده برای به دست آوردن منحنی-های سرعت و تنش در راستای شعاعی بین دو استوانه، حلی تحلیلی بوده و در آن از روش تقریبی حساب اغتشاشات^۲ استفاده شده است. همچنین در تحقیق آنها، رابطه‌ای برای به دست آوردن میزان افت فشار محوری، ارائه شده و مقایسه‌ای کامل بین رفتار جریان ویسکوالاستیک با جریان سیال نیوتنی، صورت پذیرفته است. برای حالتی که استوانه‌ی داخلی بچرخد، جریان سیال ترکیبی از حالت جریان محوری و جریان دورانی است. دیرکس و شووالتر [۱۹] با فرض چرخش استوانه داخلی، به حل جریان مارپیچ محلول پلی‌ایزوبوتیلن^۳ در هندسه‌ی مذکور پرداختند و در نهایت دریافتند که با استفاده از مدل غیرالاستیک پاورلو و به دست آوردن ضرایب این مدل بوسیله منحنی‌های آزمایشگاهی، می‌توان به پیش‌بینی رفتار جریان متقارن سیال پرداخت. آنها با استفاده از اطلاعات و نتایج آزمایشی که قبلاً توسط ترانجام شده بود، به مقایسه‌ی بین این حل آزمایشگاهی با حل خود پرداختند. در آزمایش مذکور، تر [۲۰] محلول پلی‌ایزوبوتیلن (۳ درصد وزنی) را با دبی ۲۰.۹ گالن بر دقیقه از پایین وارد فضای بین دو استوانه کرد. در اینجا، سیال پس از طی مسیری مارپیچ از فضای بالای استوانه خارج می‌گردد.

¹ Rivlin-Eriksen

² Perturbation Method

³ Polyisobutylene

مشخصات دستگاه آزمایشگاهی به صورت زیر می باشد:

$$R_i = 3.785 \text{ cm}$$

$$R_o = 5.065 \text{ cm}$$

$$\omega = 100 \text{ rpm}$$

R_i شعاع استوانه‌ی درونی، R_o شعاع استوانه‌ی بیرونی و ω سرعت چرخش استوانه‌ی داخلی می باشد. ثوابت معادله‌ی پاورلو از روی نمودار لزجت-نرخ برش سیال استخراج می شوند. ضریب $k=44$ و توان معادله‌ی پاورلو $n=0.77$ می باشد. میزان دبی سیال در آزمایش ۲۰.۹ گالن در دقیقه و تغییرات فشار در راستای محور $819 \text{ dyne/sq.cm./cm}$ - می باشد. دیرکس و شووالتر با قرار دادن این افت فشار در روابط دبی- افت فشار حاصل شده از معادله‌ی پاورلو و حل این روابط با استفاده از شرایط رئولوژیکی سیال و شرایط مسئله، به دبی متناظر با این افت فشار دست یافتند. دبی به دست آمده، ۲۰.۷ گالن در دقیقه می باشد که تنها ۰.۲ گالن در دقیقه با حالت آزمایشگاهی تفاوت دارد و این نشان دهنده‌ی دقت خوب مدل پاورلو در استخراج رابطه‌ی بین دبی و افت فشار سیال می باشد. کالونی [۲۱] و کولشرستا [۲۲] با استفاده از مدل ویسکوالاستیک اولدروید- بی^۱ به حل تحلیلی جریان پرداختند. کولشرستا در تحقیق خود به حل تحلیلی جریان مارپیچ سیال همگن ایده آل و غیر قابل تراکم ویسکوالاستیک، در فضای بین دو استوانه پرداخت. هندسه‌ی مسئله از دو استوانه‌ی هم مرکز با طول بینهایت تشکیل شده است که با سرعت‌های زاویه‌ای ω_1 و ω_2 می چرخند و گرادیان فشار محوری باعث جابجایی سیال در راستای عمودی می گردد. رفتار ویسکوالاستیک سیال با سه پارامتر ویسکوزیته (η)، ثابت زمانی رهایی از تنش (λ) و ثابت زمانی تأخیر سیال (λ_1) می توان نشان داد. وی در تحقیق خود با استفاده از معادله‌ی ساختاری اولدروید- بی و اعمال اندکی ساده سازی در حل تحلیلی، به استخراج روابطی برای تعیین مقادیر سرعت محوری و شعاعی در فضای بین دو استوانه و همچنین میزان افت فشار سیال در راستاهای محوری و شعاعی پرداخت. پینهو و الیویرا [۲۳] از مدل فن تین-

¹ Oldroyd - B

تنر ساده شده^۲ که مدلی غیرخطی است، برای حل تحلیلی جریان محوری سیال، در فضای بین استوانه‌ای هم‌مرکز و ساکن بهره گرفتند. آن‌ها با حل این مسئله، عباراتی را برای توزیع سرعت و تنش در راستای شعاعی استوانه‌ها و در ناحیه توسعه یافته‌ی جریان ارائه کردند و همچنین توانستند مقدار ضریب افت اصطکاک دارسی- ویسباخ را بر حسب اعداد رینولدز، دبور و نسبت شعاع بین دو استوانه ارائه کنند. تحقیقات صورت گرفته در این مقاله حاکی از این است که رابطه‌ی بین میزان افت فشار جریان محوری ودبی سیال تا حد زیادی تابع موقعیت شعاعی نقطه‌ای از جریان است که در آن نرخ برش صفر می‌باشد و مقدار افت فشار تابعیت کمی با خاصیت الاستیک سیال دارد. همچنین به ازای یک دبی مشخص از جریان سیال نیوتنی، میزان افت فشار مستقل از نسبت شعاع دو استوانه خواهد بود. رابطه‌ی فن‌تین- تنر ساده شده به صورت رابطه‌ی (۲-۲) قابل نمایش است.

$$(1 + \frac{\varepsilon \lambda}{\eta} \text{tr}(\tau)) \tau + \lambda \tau_{(1)} = 2\eta D \quad (2-2)$$

در رابطه‌ی (۲-۲)، $\tau_{(1)}$ نشان دهنده‌ی مشتق همرفتی تانسور تنش می‌باشد که به صورت رابطه‌ی (۳-۲) قابل تعریف است.

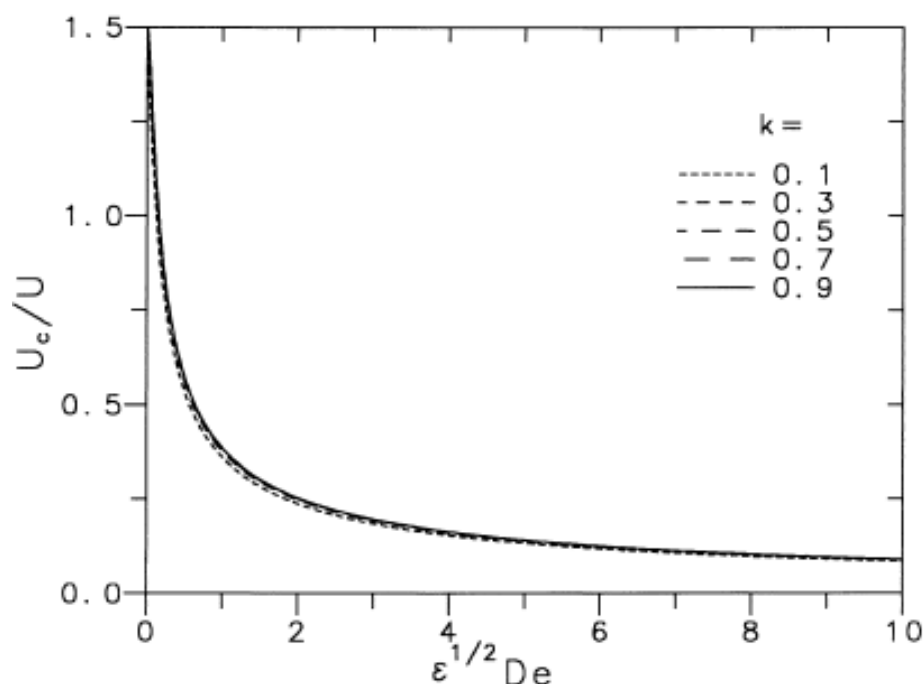
$$\tau_{(1)} = \frac{Du}{Dt} - \tau \cdot \nabla u - \nabla u^t \cdot \tau \quad (3-2)$$

پارامتر ε در رابطه‌ی (۲-۲) توصیف‌کننده‌ی رفتار کششی سیال در راستای اعمال نیرو می‌باشد و وجود این پارامتر مانع از در نظر گرفته شدن لزجت کششی بینهایت در سیال می‌شود. در واقع سیال در راستای محوری اعمال نیرو تغییر طول پیدا می‌کند و این پارامتر وابسته به لزجت کشسانی ماده است. پدیده بینهایت شدن لزجت کششی در مدل‌هایی هم‌چون مدل توسعه یافته ماکسول^۱ کاملاً قابل مشاهده است. با استفاده از حل تحلیلی صورت گرفته نتایج ارزشمندی حاصل می‌گردد. در این مقاله پارامتری به نام سرعت مشخصه به صورت رابطه‌ی (۴-۲) تعریف می‌گردد که در آن

¹ Generalized Maxwell model

$(\frac{\partial p}{\partial z})$ تغییرات فشار سیال در راستای محوری، δ ضخامت فضای بین دو استوانه و η لزجت سیال می- باشد. به طور مثال رابطه‌ی بین افت فشار و نسبت سرعت مشخصه به سرعت متوسط سیال $(\frac{U_c}{U})$ ، به صورت تابعی از عدد بی بعد $\epsilon^{1/2} De$ (معرف خواص الاستیک و قابلیت کشسانی سیال) به صورت نمودار شکل ۱-۲ ارائه شده است.

$$U_c = \frac{-\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right) \delta^2}{8 \eta} \quad (۴-۲)$$

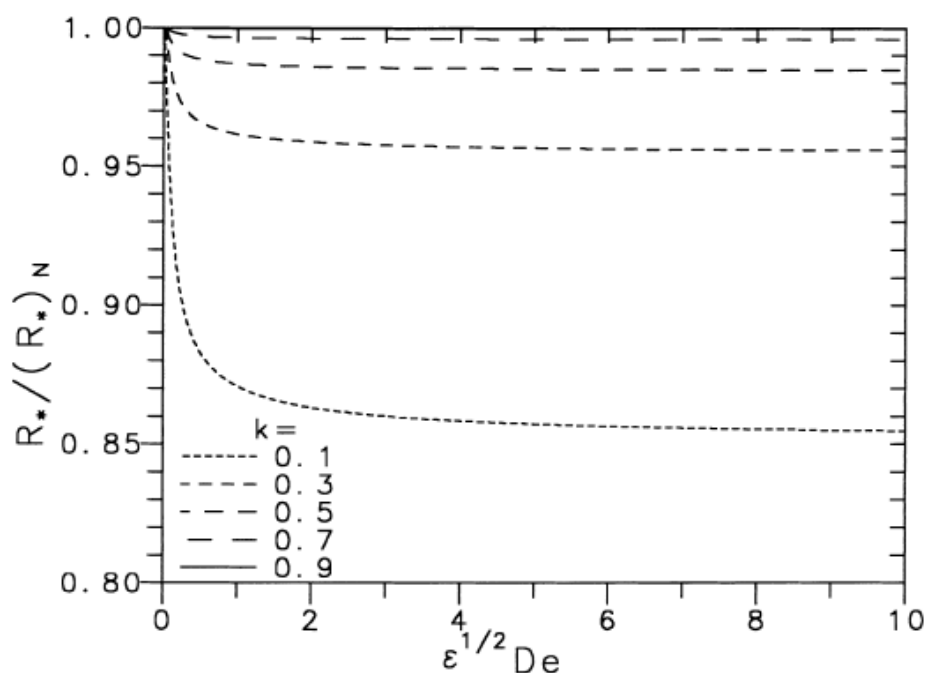


شکل ۱-۲ تأثیر پارامتر بی بعد $\epsilon^{1/2} De$ بر روی میزان نسبت سرعت‌ها به ازای نسبت شعاع‌های

مختلف دو استوانه [۲۳].

K نیز نسبت شعاع استوانه‌ی داخلی به خارجی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱-۲ مشاهده می- شود، با افزایش خاصیت الاستیک سیال، میزان افت فشار در راستای محور آنالوس کاهش می‌یابد و این کاهش فشار تقریباً مستقل از نسبت شعاع استوانه‌ها می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم دیگر،

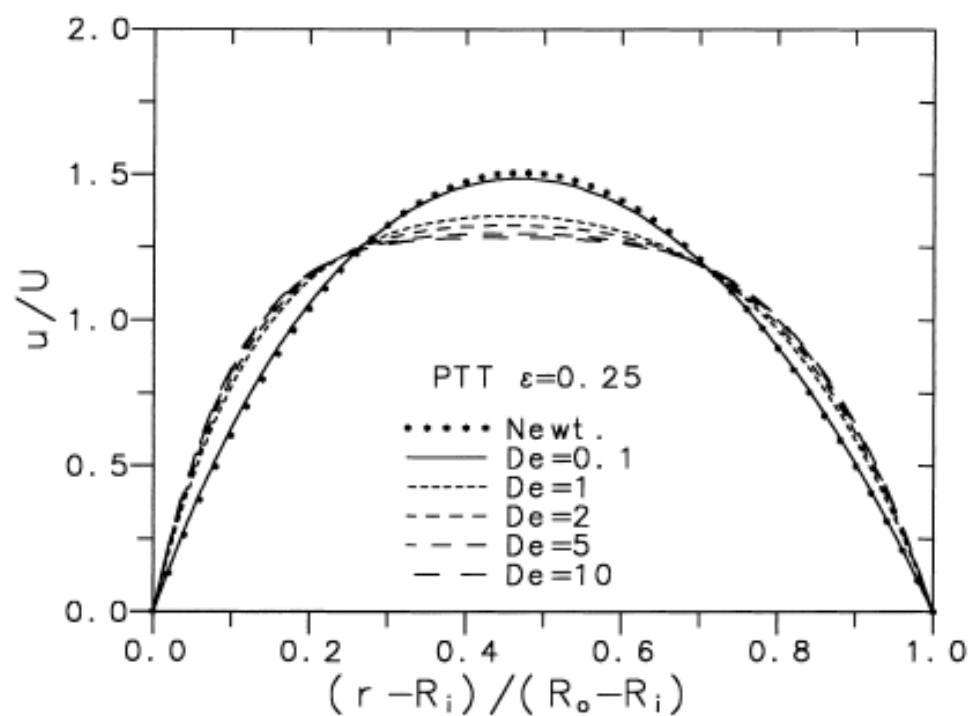
موقعیت شعاعی نقطه‌ای است که تنش برشی در آن صفر می‌گردد. در این مقاله این پارامتر با R_* نشان داده شده است. همچنین هنگامی که سیال نیوتنی باشد، این پارامتر با $(R_*)_N$ قابل نمایش است. در شکل ۲-۲، تأثیر خواص الاستیک سیال بر روی مقدار R_* به ازای نسبت شعاع‌های گوناگون نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ تأثیر پارامتر $\varepsilon^{1/2} De$ بر روی نسبت موقعیت شعاعی ذره‌ای از سیال با تنش صفر در

جریان سیال ویسکوالاستیک به موقعیت شعاعی در جریان سیال نیوتنی $[R_*/(R_*)_N]$.

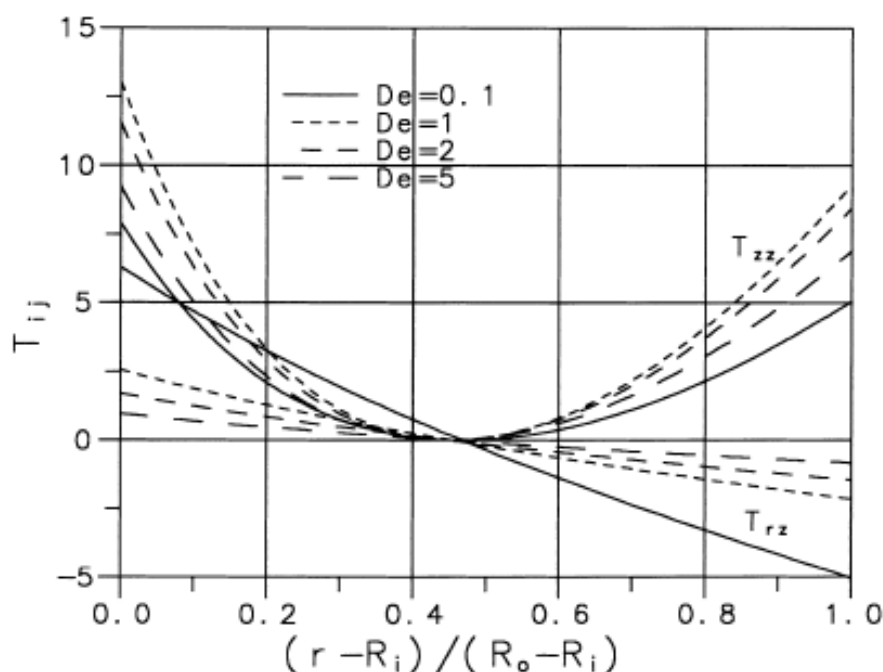
همان‌طور که از شکل بالا استنباط می‌شود، با افزایش خاصیت الاستیک و نسبت شعاع استوانه‌ای خارجی به داخلی، انحراف مقدار R_* از $(R_*)_N$ بیشتر خواهد بود و موقعیت مکانی نقطه‌ای که در آن تنش برشی صفر می‌شود به سمت استوانه‌ای داخلی متمایل می‌گردد. با استفاده از حل تحلیلی صورت گرفته در این مقاله، وابستگی منحنی سرعت محوری به عدد دپورا نشان داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-۲ مشاهده می‌شود به ازای ضریب کشسانی ε مشخص، با افزایش خاصیت الاستیک سیال، منحنی سرعت در مرکز مسطح‌تر می‌شود.



شکل ۳-۲ منحنی سرعت بی بعد محوری بر حسب موقعیت شعاعی به ازای دبوراهای مختلف [۲۳].

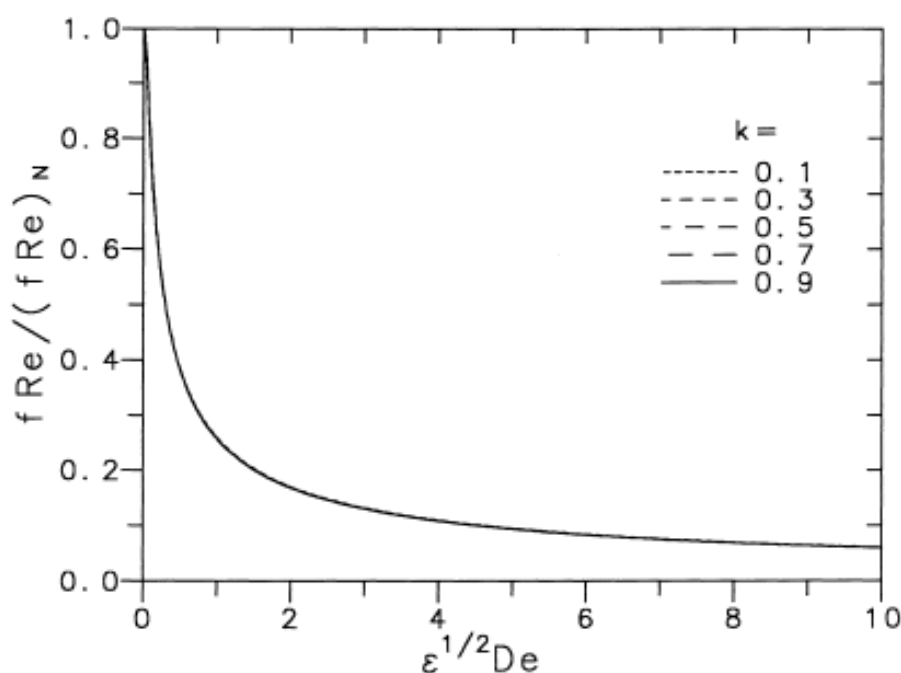
علاوه بر این، منحنی های مؤلفه های تنش بر حسب موقعیت شعاعی نیز ارائه شده اند. در شکل ۴-۲

نمودار تنش های برشی T_{rz} و T_{zz} بر حسب شعاع و دبوراهای مختلف آورده شده است.



شکل ۲-۴ نمودار تنش نرمال محوری T_{zz} و تنش برشی T_{rz} بر حسب شعاع و به ازای دبوراهای مختلف [۲۳].

همان‌طور که در منحنی شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد دבורا در محدوده‌ی ۰ تا ۵، میزان تنش نرمال محوری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین قدر مطلق تنش برشی T_{rz} با افزایش عدد دבורا کاهش می‌یابد. مقدار fRe نیز با افزایش خاصیت الاستیک سیال، کاهش می‌یابد. این روند کاهشی در نمودار شکل ۲-۵ قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای نسبت شعاع‌های گوناگون، با افزایش خاصیت الاستیک سیال، انحراف پارامتر fRe از مقدار مربوط به جریان سیال نیوتنی آن $(fRe)_N$ ، افزایش می‌یابد و این انحراف مستقل از نسبت شعاع دو استوانه است.



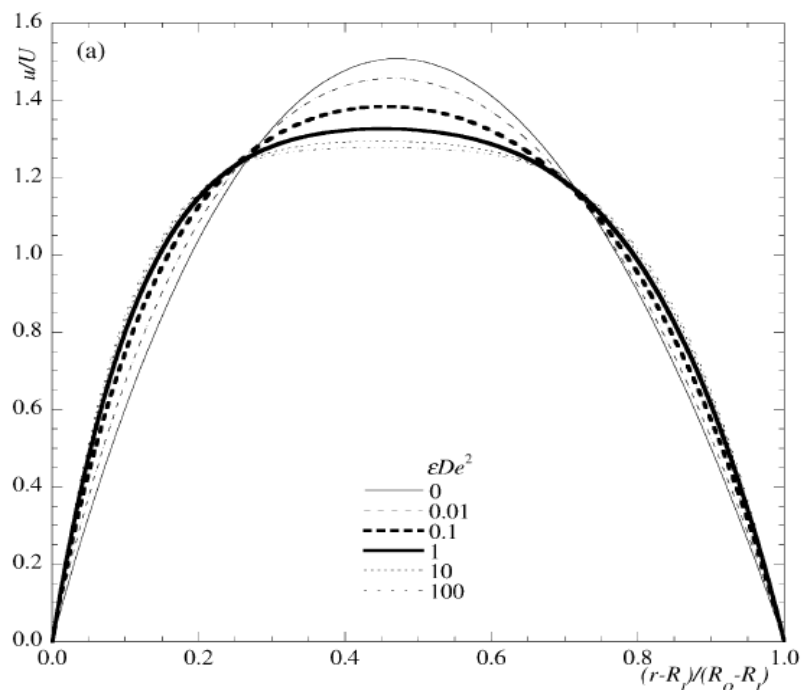
شکل ۵-۲ نمودار نسبت پارامتر بی بعد fRe در حالت ویسکوالاستیک به مقدار آن در حالت نیوتنی، بر حسب

پارامتر بی بعد $\epsilon^{1/2} De$ و به ازای نسبت شعاع های مختلف [۲۳].

حل های تحلیلی بسیاری برای جریان چرخشی بین دو استوانه (بدون جریان محوری)، در مجلات مربوط به مبحث یاتاقان و روانکاری آورده شده است. پینهو و کروز [۹] در جهت گسترش حل های تحلیلی گذشته، حلی تحلیلی را برای یافتن مقادیر سرعت، تنش و ضریب اصطکاک در هندسه ی مذکور ارائه نمودند. در تحقیق آنها استوانه ی داخلی می چرخد و معادله ی ساختاری استفاده شده، معادله ی ساده شده یفن تین- تنر^۱ می باشد. در مدل ساده شده ی فن تین- تنر، ضریب صفر در نظر گرفته می شود. علاوه بر ارائه ی روابط مربوط به سرعت های محوری و شعاعی و همچنین سه مؤلفه ی تنش برشی و دو مؤلفه ی تنش نرمال در فضای آنالوس، روابطی نیز برای نشان دادن ارتباط بین ضریب افت اصطکاکیدارسی- ویسباخ مربوط به جریان محوری (fRe) و ضریب اصطکاک پوسته ای استوانه ی چرخان داخلی (c_m) با اعداد بی بعد رینولدز، تیلور و (ϵDe^2) ارائه شدند. این محققان با استفاده از حل تحلیلی، منحنی های سرعت بر حسب پارامتر (ϵDe^2) را به ازای موقعیت های شعاعی

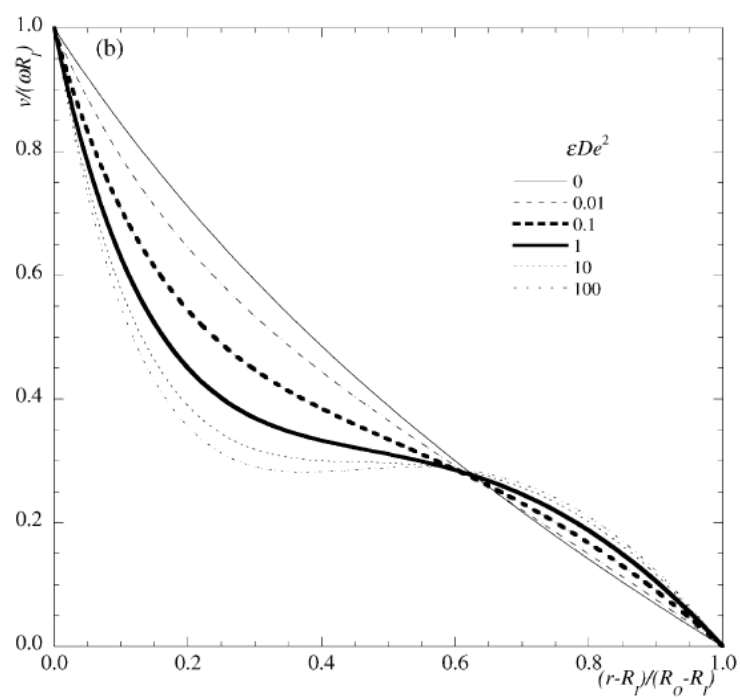
¹Phan-Thien Tanner

گوناگون ترسیم کردند. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شده بود، با افزایش خاصیت الاستیک، منحنی سرعت محوری در مرکز تخت‌تر می‌شوند. هم‌چنین با استفاده از حل تحلیلی صورت گرفته، منحنی-های سرعت شعاعی بر حسب موقعیت‌های شعاعی، به ازای (εDe^2) های متفاوت ارائه می‌گردند. این منحنی‌ها در شکل‌های ۲-۶ تا ۲-۱۱ نشان داده می‌شوند.

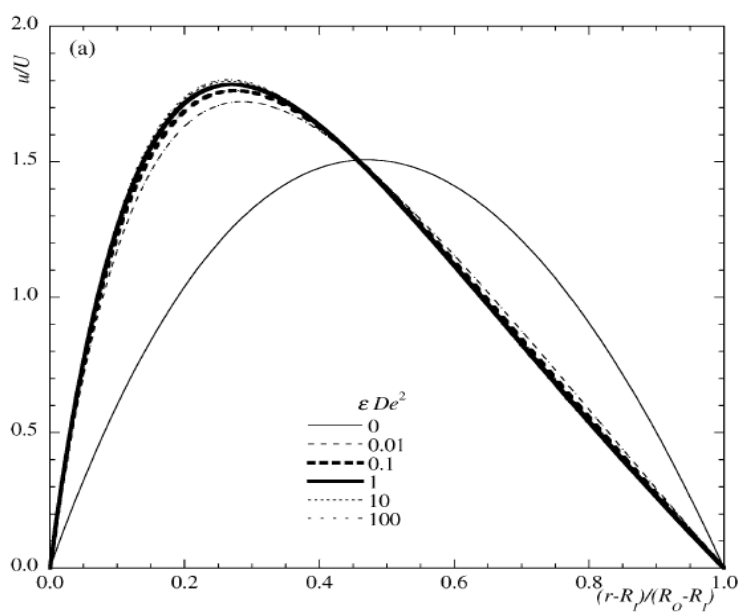


شکل ۲-۶ نمودار سرعت بی‌بعد محوری بر حسب شعاع و به ازای نسبت شعاع $k = 0.5$

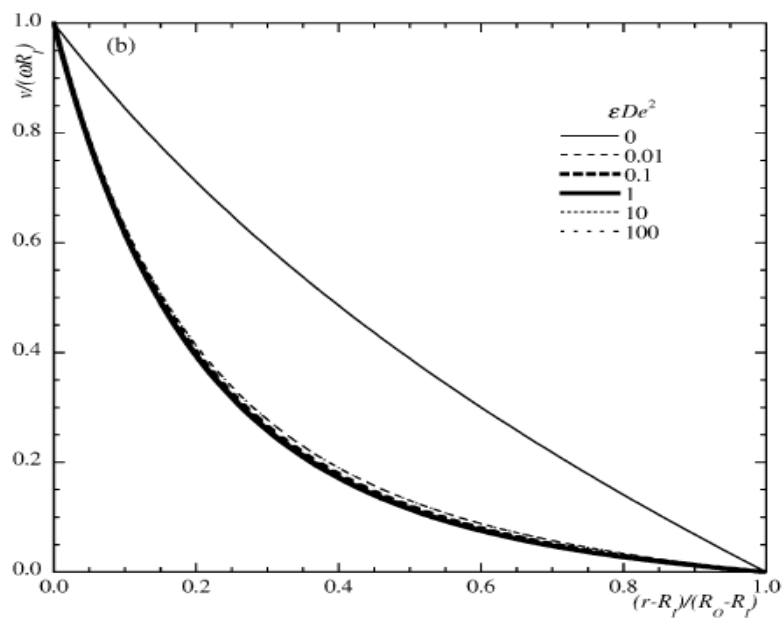
$$Re = 1000 \text{ و } [\eta Ta] = 1000.$$



شکل ۷-۲ نمودار سرعت بی بعد چرخش بر حسب شعاع و به ازای εDe^2 های مختلف و
نسبت شعاع $k=0.5$ ، $Re=1000$ و $[^9Ta] = 1000$.

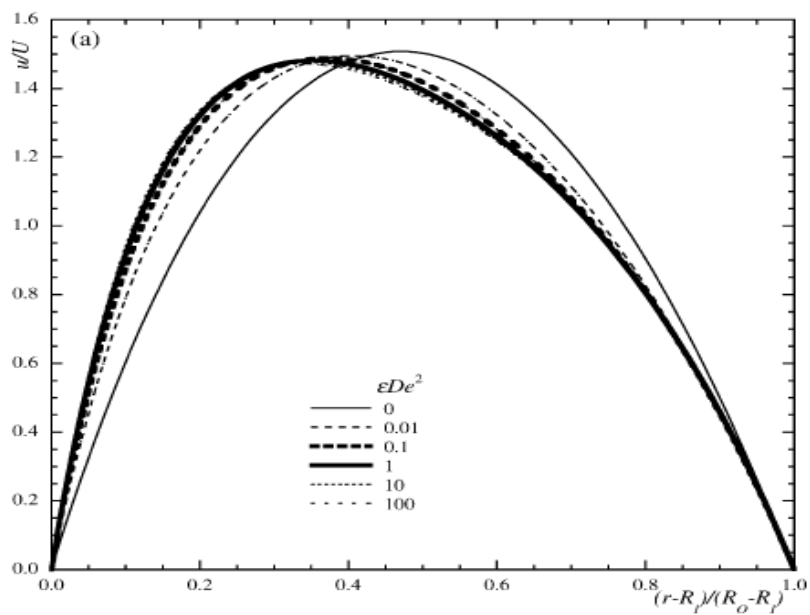


شکل ۸-۲ نمودار سرعت بی بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای $k=0.5$ ، $Re=1$ و $[^9Ta] = 10000$.

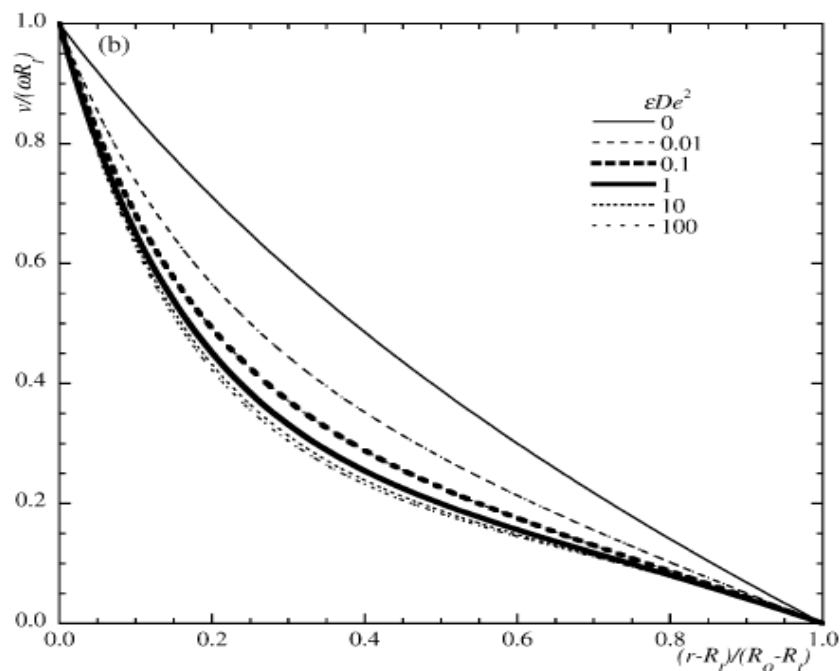


شکل ۹-۲ نمودار سرعت بی‌بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای εDe^2 های مختلف و

$$[Ta] = 10000, Re = 1, k = 0.5.$$



شکل ۱۰-۲ نمودار سرعت بی‌بعد محوری بر حسب شعاع و $k = 0.5, Re = 10, [Ta] = 10$.



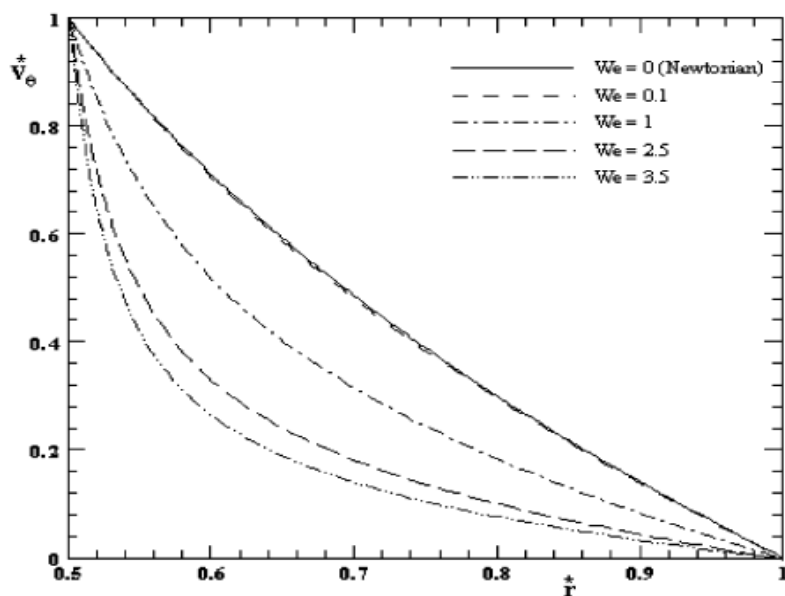
شکل ۱-۲ نمودار سرعت بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای $De^2 \varepsilon$ های مختلف و

$$[Ta] = 10, Re = 1, k = 0.5.$$

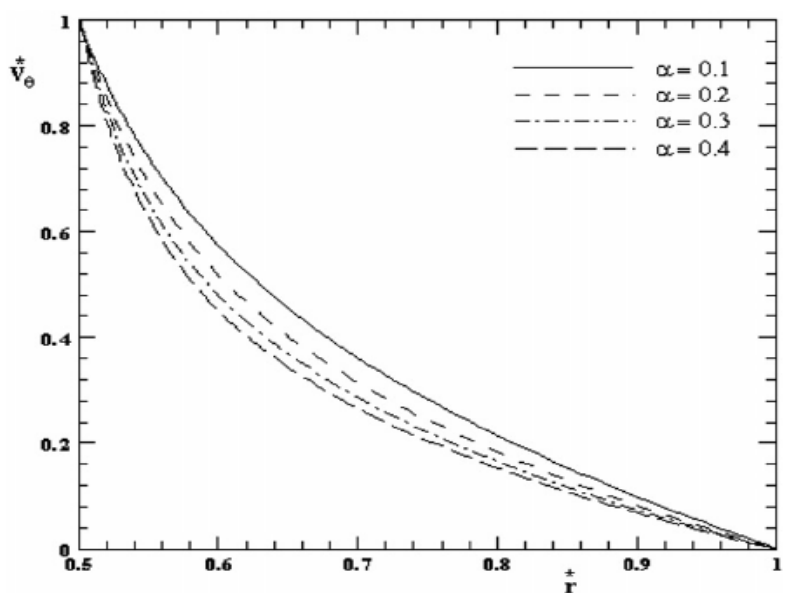
در این میان مقالاتی نیز بوده‌اند که جریان سیال ویسکوالاستیک را در فضای بین دو استوانه هم‌مرکز، در حالتی بررسی کرده‌اند که تنها علت حرکت سیال، چرخش استوانه‌ی داخلی می‌باشد. تخت روانچی و همکاران [۲۴] حلی تحلیلی- تقریبی را برای جریان چرخشی سیال ویسکوالاستیک با استفاده از مدل غیر خطی گزیکس^۱ ارائه کرده‌اند. تقریب به کار رفته جهت تعیین تنش‌های نرمال در جهت شعاعی می‌باشد. در مقاله مذکور، تأثیر پارامترهایی همچون عدد وایزنبرگ، نسبت شعاع‌های دو استوانه و ضریب تحرک، بر روی توزیع شعاعی سرعت و ضریب اصطکاک پوسته‌ای بررسی می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش خاصیت الاستیک سیال، میزان تغییرات سرعت در نزدیکی استوانه‌ی داخلی افزایش می‌یابد. همچنین میزان ضریب اصطکاک پوسته‌ای با افزایش خاصیت الاستیک سیال، کاهش می‌یابد.

¹ Giesekus

در شکل‌های ۱۲-۲ و ۱۳-۲ تأثیر پارامترهایی همچون عدد وایزنبرگ و ضریب تحرک (α) بر روی منحنی سرعت چرخشی نشان داده می‌شوند.

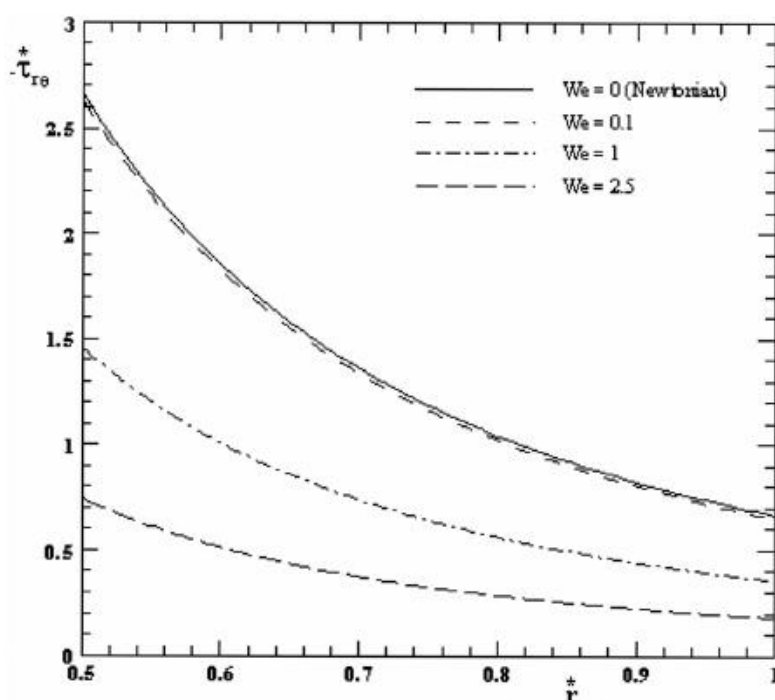


شکل ۱۲-۲ نمودار سرعت بی‌بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای وایزنبرگ‌های مختلف و $\alpha = 0.2$ و $\alpha = 0.5$ [۲۴k].



شکل ۱۳-۲ نمودار سرعت بی‌بعد چرخشی بر حسب شعاع و به ازای مقادیر مختلف α و $Wi = 1$ و $\alpha = 0.5$ [۲۴k].

همچنین تأثیر خاصیت الاستیک سیال بر روی مقدار بی‌بعد تنش برشی $\tau_{r\theta}$ در شکل ۲-۱۴ نشان داده می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش عدد وایزنبرگ رفتار باریک‌شوندگی لزجت با نرخ برش^۱، افزایش یافته که این امر در این‌جا باعث کاهش مقدار تنش $\tau_{r\theta}$ شده است.



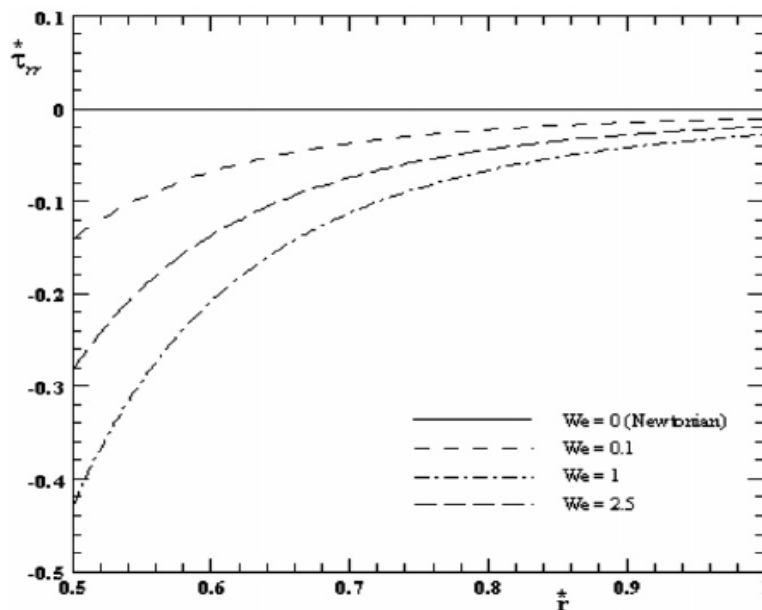
شکل ۲-۱۴ نمودار مقدار مؤلفه‌ی تنش $\tau_{r\theta}$ بر حسب شعاع و به ازای مقادیر مختلف عدد

وایزنبرگ و $k = 0.5$, $[\alpha] = 0.4$.

همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت در نزدیکی استوانه‌ی داخلی با افزایش عدد وایزنبرگ و ضریب تحرک افزایش می‌یابد. در قسمت بحث و نتیجه‌گیری این مقاله اشاره می‌شود که با افزایش اعداد وایزنبرگ و ضریب تحرک سیال، خاصیت باریک‌شوندگی لزجت با نرخ برش، افزایش می‌یابد و لذا تغییرات سرعت در نواحی با تنش برشی زیاد، افزایش خواهد یافت. اما برای تنش‌های نرمال شعاعی رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ مشاهده می‌

¹ Shear-thinning

شود، ابتدا با افزایش عدد وایزنبرگ میزان تنش نرمال τ_{rr} ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علت پیش آمدن این روند، تأثیرپذیری مقدار این تنش به مقدار عدد وایزنبرگ و همچنین پدیده‌ی باریک شوندگیسیال است.

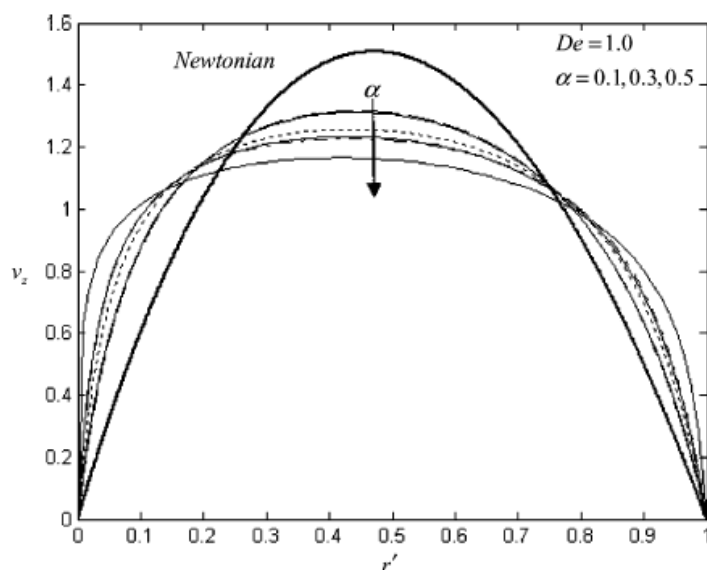


شکل ۲-۱۵ نمودار مقدار مؤلفه‌یتنش نرمال شعاعی بر حسب شعاع و به ازای مقادیر مختلف عدد

وایزنبرگ و $k = 0.5$, $\alpha = 0.4$ [۲۴].

مصطفایان و همکاران [۲۵] به حل تحلیلی جریان محوری سیال در فضای بین دواستوانه، با استفاده از مدل گزیکس پرداختند و با تقریبی مناسب، رابطه‌ای را برای تنش نرمال شعاعی ارائه دادند و در نهایت به روابطی برای توزیع سرعت و فشار در راستای شعاعی بین دو استوانه دست یافتند. در واقع استفاده از تقریب جهتساده‌سازی انتگرال‌گیری، برای به دست آوردن یکی از تنش‌های برشی می‌باشد. این محققین در حالتی دیگر از تقریب مذکور استفاده نکردند و با گرفتن انتگرال به شکل عددی، به حلی متفاوت با حالت قبل دست یافتند و مقایسه‌ای را نیز بین دو حل به انجام رساندند. در حل آن‌ها محدوده‌ی خاصی برای عدد دبورا جهت اعتبار حل وجود ندارد ولی ضریب تحرک (α) بین صفر تا نیم در نظر گرفته شده تا حل از لحاظ فیزیکی معتبر باشد. در تحقیق آن‌ها، به طوری

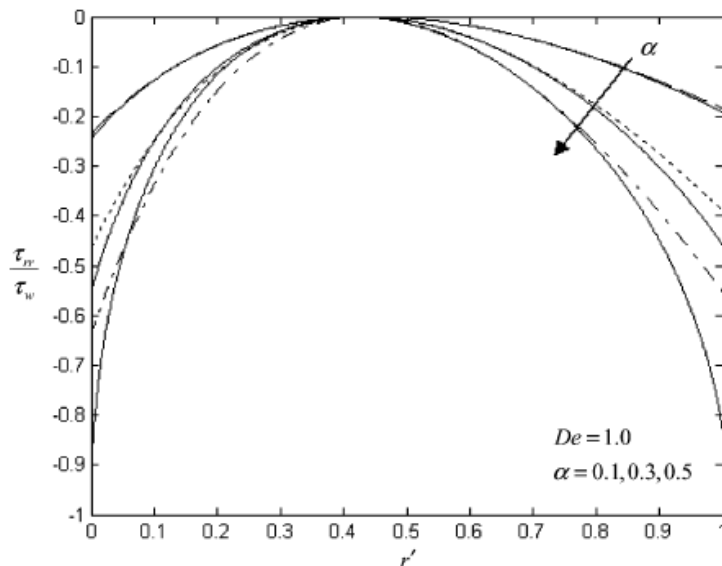
مفصل، تأثیر خواص سیال، پارامترهای جریان و هندسه مسئله بر روی میدان سرعت و تنش موجود در فضای آنالوس، بررسی می‌گردد. استفاده از مدل گزیکس باعث می‌شود که خاصیت باریک شونده لزوجت با نرخ برش و اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم سیال به خوبی توصیف شود. همچنین کارایی مدل گزیکس، پیش‌بینی افزایش ناگهانی مقدار تنش برشی سیال در ابتدای حرکت آن است. در شکل ۱۶-۲ منحنی سرعت محوری سیال بر حسب موقعیت شعاعی برای حالت حل صریح (توسط انتگرال عددی) و همچنین حل تقریبی آورده شده است. منحنی‌های خط‌چین مربوط به حل صریح و منحنی‌های ممتد مربوط به حل تقریبی هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای ضریب تحرک صفر، منحنی سرعت سیال مانند حالت نیوتنی می‌باشد و با افزایش این پارامتر سیال از حالت نیوتنی بیشتر خارج شده و خاصیت باریک شونده لزوجت با نرخ برش، افزایش می‌یابد. در نتیجه، همان‌طور که در شکل نیز کاملاً مشخص است، شیب منحنی سرعت در نزدیک دیواره با افزایش پارامتر α افزایش می‌یابد و در مرکز فضای بین دو استوانه نیز، منحنی سرعت مسطح‌تر می‌شود.



شکل ۱۶-۲ نمودار سرعت بی‌بعد محوری بر حسب شعاع و به ازای عدد دبورای ۱ و ضرایب

تحرک مختلف [۲۵].

همچنین در این مقاله تأثیر ضریب تحرک سیال (α) بر رویتنش نرمال شعاعی τ_{rr} بررسی شده است. این وابستگی در شکل ۲-۱۷ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲-۱۷ نمودار تنش نرمال شعاعی بی بعد بر حسب شعاع و به ازای عدد دیورای ۱ و ضرایب

تحرک مختلف [۲۵].

در شکل ۲-۱۷، τ_w تنش برشی τ_{rz} واقع بر روی دیواره می باشد و به ازای عدد دیورای ثابت، قدر مطلق نسبت تنش نرمال شعاعی به تنش برشی در نزدیکی دیواره، با افزایش ضریب تحرک افزایش می یابد.

هایتائو و هوی جین [۲۶] در مقاله ی خود به حل تحلیلی جریان ماریپیچ سیال ویسکوالاستیک در فضای بین دو استوانه پرداختند. حل مذکور برای حالت گذرای جریان سیال استو هندسه ی مسئله شامل دو استوانه ی غیر هم مرکز تودرتو می باشد که طولی بی نهایت دارند. آنها از معادله ی ساختاری اولدروید برای حل تحلیلی خود بهره بردند. حل تحلیلی دقیق با استفاده از انتگرال های تبدیل مانند انتگرال تبدیل وبر^۱، لاپلاس^۲ و هنکل^۳ صورت می پذیرد. در نتایج حل نیز تأثیر ضرایب معادله ی

^۱Weber transform converts integral

^۲Laplace transform converts integral

^۳Henkle transform converts integral

ساختاری بر روی منحنی‌های سرعت نشان داده می‌شود. منرس و همکاران [۲۷] در مقاله خود تأثیر افزودن کربوکسی متیل سلولز (CMC) را بر روی ویسکوزیته‌ی پلاستیک^۱ و ویسکوزیته‌ی ظاهری^۲ سیال حفاری پایه آبی، مورد بررسی قرار دادند. در سیال حفاری موجود، از بنتونیت به عنوان چگالی دهنده استفاده شده است. در این آزمایش، از ده ترکیب مختلف بنتونیت و (CMC) با غلظت‌های گوناگون استفاده شده است. در این‌جا از مدل‌های رگرسیونی جهت تحلیل اثر غلظت (CMC) بر روی خواص رئولوژیک سیال استفاده شده است. در واقع این کار جهت بهینه‌سازی خواص گل حفاری صورت می‌پذیرد. مطالعه‌ی صورت گرفته بر روی سه نمونه با درصدهای مختلف بنتونیت می‌باشد. بنتونیت موجود ابتدا در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شده و سپس خرد و به ذراتی با قطر تقریبی ۷۴ میکرومتر تبدیل می‌شوند. (CMC) مورد استفاده در این مقاله از دو نوعا جرم مولی پایین و جرم مولی بالا می‌باشد. میزان خلوص (CMC) نیز ۹۵ درصد می‌باشد. بنتونیت موجود با کربنات کلسیم با درصد وزنی ۵.۳ درصد فعال شده و به ترکیب سدیم بنتونیت تبدیل می‌شود. سپس CMC به آرامی به آن افزوده می‌گردد. ترکیب موجود با اعمال دستورالعمل‌خاص آزمایشگاهی ساخته می‌شود و سپس ویسکوزیته‌ی ظاهری (AV) و ویسکوزیته‌ی پلاستیک (PV) توسط ویسکومتر فن اندازه‌گیری می‌شود. مقداری که در دستگاه با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه خوانده می‌شود، ویسکوزیته‌ی ظاهری و تفاوت این مقدار با ویسکوزیته‌ی ظاهری در سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه، ویسکوزیته‌ی پلاستیک نامیده می‌شود. با توجه به مقادیر به دست آمده، رابطه‌ای ریاضی بین مقدار ویسکوزیته با درصد وزنی (CMC) و بنتونیت، ارائه می‌گردد. روابط به دست آمده مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. مکسی [۲۸] با انجام تست‌های دینامیکی و ویسکومتریکی بر روی شش سیال حفاری مختلف، به استخراج نمودارهای لزجت بر حسب نرخ برش و لزجت بر حسب فرکانس زاویه‌ای پرداخت. در واقع تست‌های ویسکومتریکی قابلیت محاسبه‌ی لزجت برشی سیال در نرخ برش‌های بسیار پایین را ندارند و اهمیت بالای این پارامتر در محاسبات هیدرولیک سیال حفاری، اجرای تست‌های دینامیکی را اجتناب‌ناپذیر

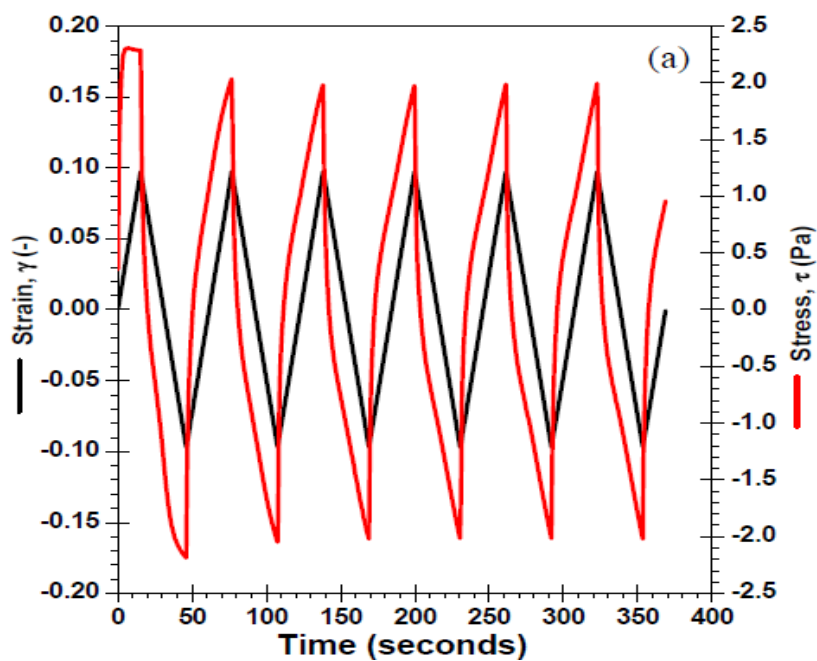
¹ Plastic viscosity

² Apparent viscosity

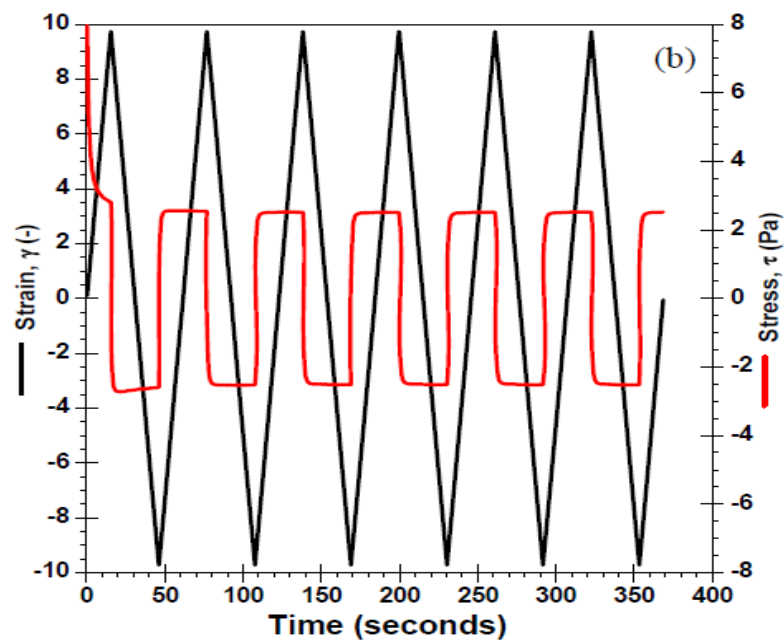
می‌کند. وی با استفاده از تست‌های دینامیکی، مدول‌های ذخیره و اتلاف انرژی بر حسب فرکانس‌های زاویه‌ای گوناگون را به دست آورد. همچنین رفتار وابسته به زمان سیال با مشاهده تغییر پارامترهایی مانند مدول‌های ذخیره و اتلاف انرژی به ازای فرکانس و دامنه‌ی ثابت صورت می‌پذیرد. به دلیل توقف‌های موجود در فرایند حفاری و وابسته به زمان بودن رفتار اکثر سیالات حفاری، مشاهده‌ی آزمایشگاهی رفتار وابسته به زمان آن‌ها، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار محققان قرار می‌دهد. مشاهده‌ی نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، حاکی از افزایش یا عدم تغییر چندان مدول ذخیره و اتلاف انرژی به ازای تغییرات فرکانس آزمایش است. همچنین در تمامی تست‌ها، لزجت دینامیکی با افزایش فرکانس نوسان کاهش می‌یابد که این نشان از خاصیت باریک شونده‌ی لزجت با نرخ برش در تمامی سیالات مورد آزمایش در این تحقیق دارد. مکسیو هالیبرتون [۲۹] در مقاله‌ی خود آزمایشات گوناگونی را جهت تعیین قدرت ساختار ژلی شکل سیال حفاری به انجام رساندند. سیال حفاری به همراه خرده‌سنگ‌های حاصل از دوران سر مته، پس از توقف حفاری ساختاری ژلی شکل تشکیل می‌دهند. میزان قدرت این ساختار ژلی شکل رابطه‌ی نزدیکی با خواص ویسکوالاستیک سیال حفاری دارد. آنها در آزمایشات خود با استفاده از تست‌های دینامیکی، منحنی‌های نرخ برش و تنش نوسانی را بر حسب زمان رسم کردند. این آزمایش‌ها به ازای دامنه‌های نوسان پایین و بالا انجام می‌پذیرد. منحنی شکل ۲-۱۸ مربوط به حالتی است که دامنه‌ی نوسان تقریباً کوچک باشد و رفتار تنش سیال از حالت خطی مغایرت کمی دارد و سیال در محدوده‌ی ویسکوالاستیک خطی قرار دارد. شکل ۲-۱۹ مربوط به تست نوسانی تنش با دامنه‌ی نوسان بزرگ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رفتار تنش سیال از حالت خطی خارج شده و سیال در محدوده‌ی ویسکوالاستیک غیر خطی^۱ (LAOS) می‌باشد. همچنین نمودار هیستریزیس^۲ تنش بر حسب کرنش نیز به صورت شکل‌های ۲-۲۰ و ۲-۲۱ ارائه می‌شود.

^۱ Large Amplitude Oscillatory Shear

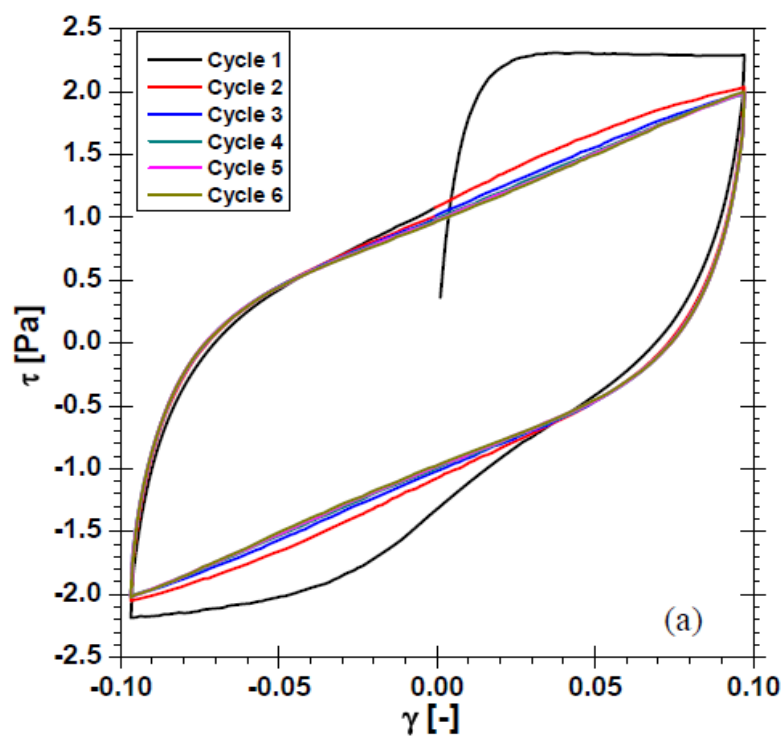
^۲ Hysteresis



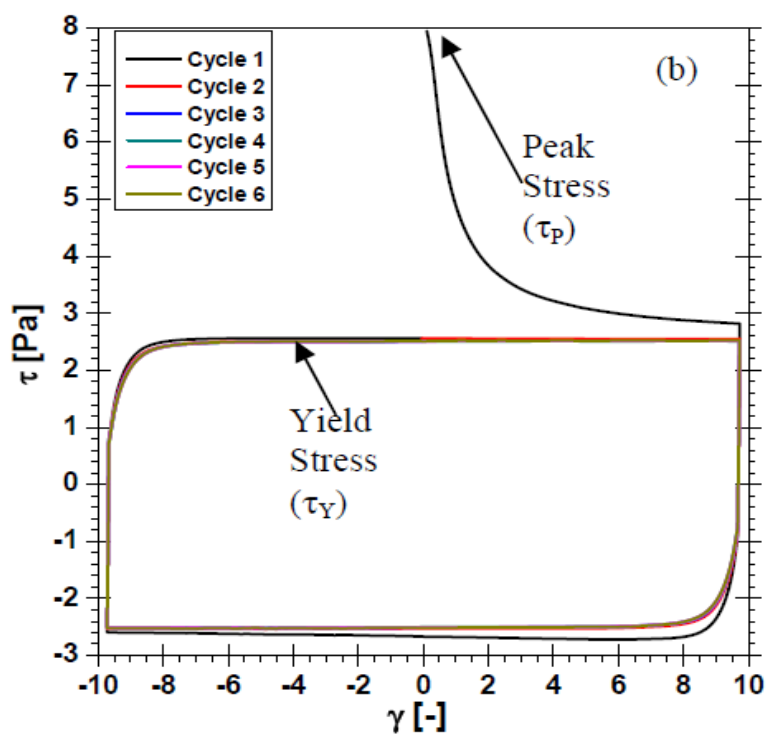
شکل ۲-۱۸ تست نوسانی مشاهده‌ی رابطه‌ی بین نرخ برش و تنش بر حسب زمان وبه ازای دامنه‌ی نوسان ۱۰ درصد [۲۹].



شکل ۲-۱۹ تست مشاهده‌ی رابطه‌ی بین نرخ برش و تنش بر حسب زمان به ازای دامنه‌ی نوسان ۱۰۰۰ درصد [۲۹].



شکل ۲-۲۰ نمودار تنش بر حسب کرنش در شش سیکل نوسانی مختلف و به ازای دامنه‌ی ۱۰ درصد [۲۹].

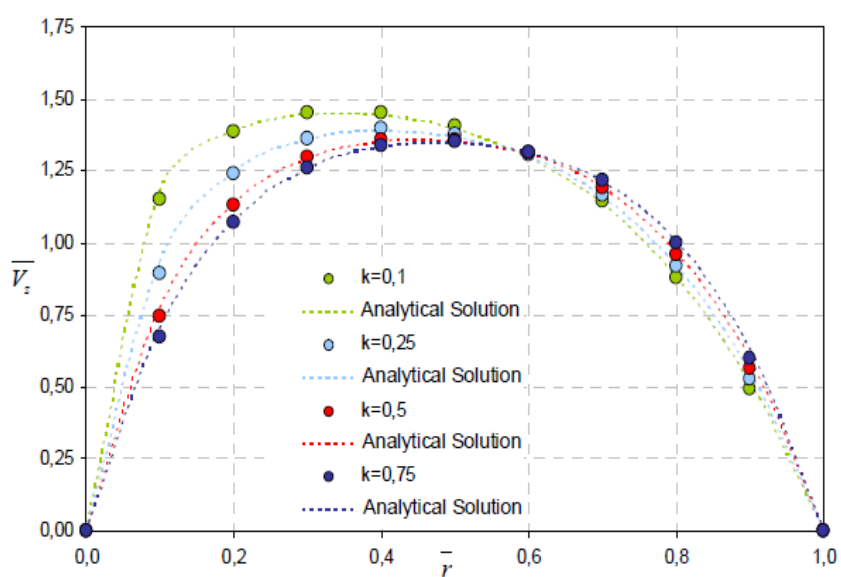


شکل ۲-۲۱ نمودار تنش بر حسب کرنش در شش سیکل نوسانی و به ازای دامنه‌ی ۱۰۰۰ درصد [۲۹].

با افزایش دامنه‌ی نوسان، رفتار غیرخطی سیال افزایش می‌یابد و نمودار هیستریزیس از حالت بیضی شکل خارج می‌گردد. در حالت ویسکوالاستیک غیر خطی، مقادیر مدول‌های ذخیره و اتلاف انرژی در تست دینامیکی به دامنه نوسان، وابسته هستند. مقدار تنش مورد نیاز برای جریان یافتن سیال و شکستن حالت ژلی شکل آن، مشخص کننده‌ی مقدار انرژی مورد نیاز جهت شکستن ساختار داخلی ماده می‌باشد. در واقع اطلاع از قدرت ساختار ژل شکل سیال حفاری و در اختیار داشتن نمودارهای تنش بر حسب کرنش آن در تست‌های نوسانی، کمک زیادی به استخراج پارامترها و ضرایب موجود در معادلات ساختاری سیال ویسکوالاستیک می‌کند.

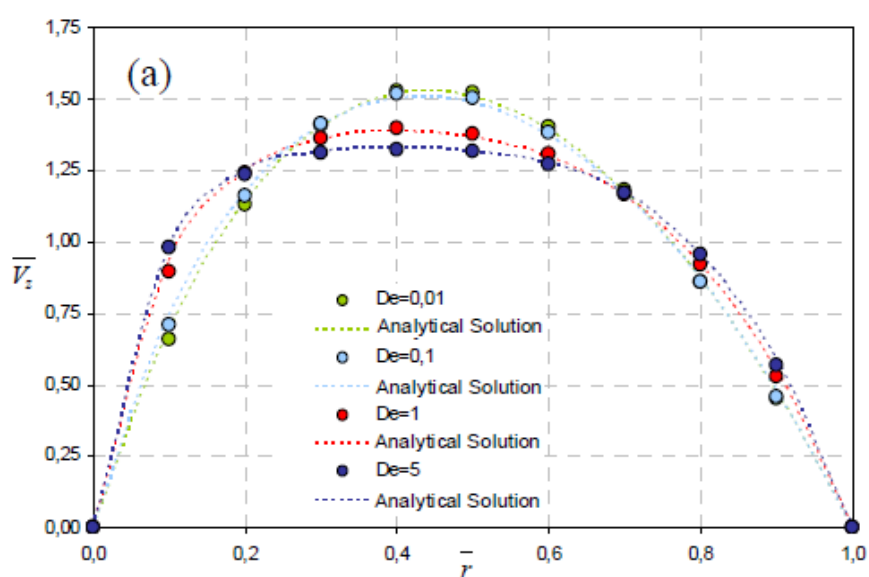
ویلینگتون و همکاران [۳۰] در مقاله‌ی خود به شبیه‌سازی جریان سیال ویسکوالاستیک حفاری در فضای آنالوس پرداختند. هندسه‌ی آن‌ها دو استوانه‌ی تو در توی هم‌مرکز می‌باشد که سیال به صورت محوری از فضای بین دو استوانه عبور می‌کند. در اینجا از چرخش استوانه‌ی داخلی صرف نظر شده است و شبیه‌سازی با استفاده از مدل فن‌تین-تنر (PTT) انجام گرفته است. گسسته‌سازی این معادله-ی ساختاری توسط روش حجم محدود^۱ بوده و حل توسط نرم‌افزار PHOENIX-CFD انجام شده است. در این مقاله تأثیر پارامترهای رئولوژیک و ابعاد آنالوس بر روی رفتار جریان سیال بررسی می‌شود و نتایج به دست آمده تحلیل و با نتایج حل تحلیلی مقایسه می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۲-۲۲ مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت شعاع‌های دو استوانه، سرعت ماکزیمم به سمت استوانه‌ی داخلی متمایل می‌گردد. در شکل ۲-۲۳ وابستگی میدان سرعت محوری سیال به عدد دבורا در یک نسبت شعاع معین نشان داده شده است. با افزایش عدد دבורا منحنی سرعت محوری تخت‌تر شده و موقعیت شعاعی سرعت ماکزیمم به سمت استوانه‌ی داخلی نزدیک می‌گردد. همچنین همان‌طور که در شکل ۲-۲۴ دیده می‌شود، با افزایش عدد دבורا، ابتدا مقدار تنش‌های نرمال محوری افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

¹ Finite volume



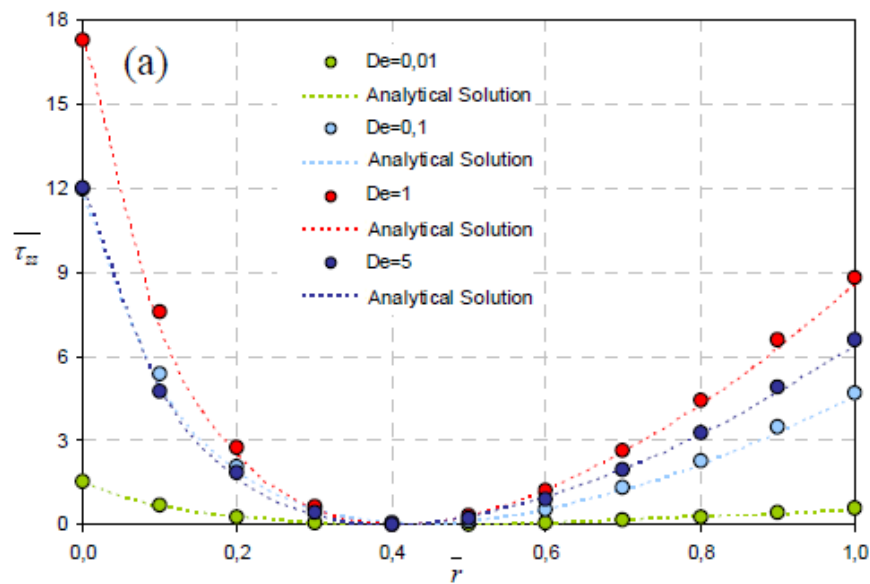
شکل ۲-۲۲ نمودار سرعت محوری بی‌بعد بر حسب شعاع و به ازای نسبت شعاع‌های (k) مختلف و $De=1$

$$[\gamma_0 = \varepsilon] \cdot 0.25$$



شکل ۲-۲۳ نمودار سرعت محوری بی‌بعد بر حسب شعاع و به ازای اعداد دبروار مختلف و

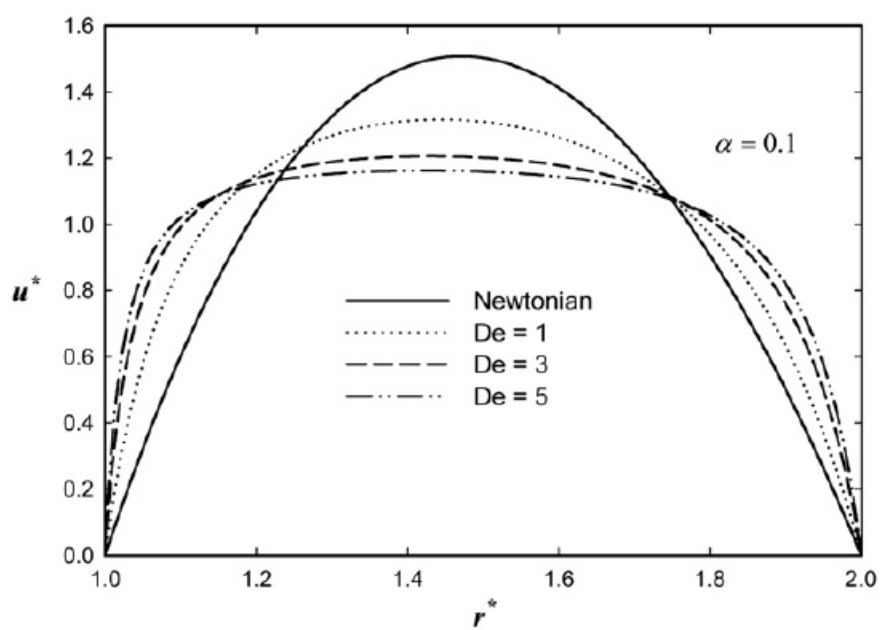
$$[\gamma_0 k] = 0.25, \varepsilon = 0.25$$



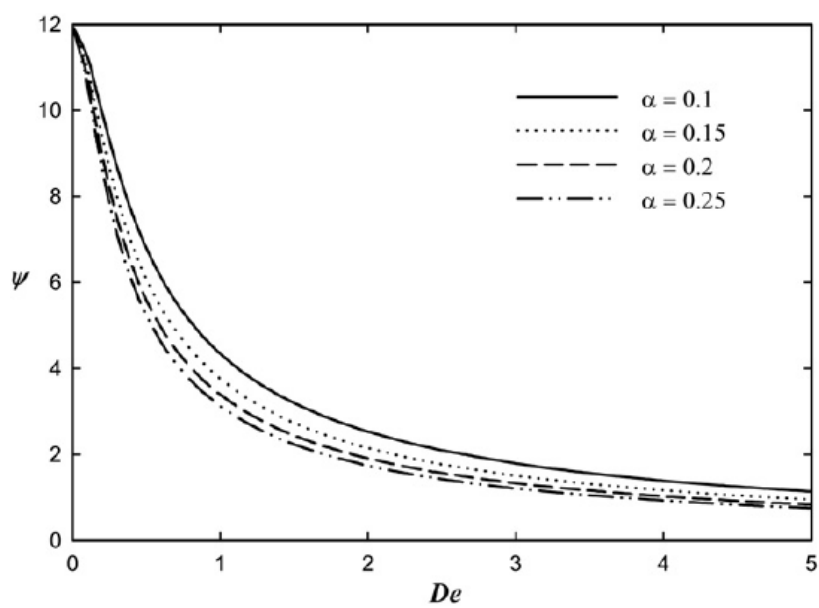
شکل ۲-۲۴ نمودار مؤلفه‌ی تنش نرمال محوری بی‌بعد بر حسب شعاعو به ازای اعداد دבורای مختلف و

$$[3 \cdot k] = 0.25, \varepsilon = 0.25$$

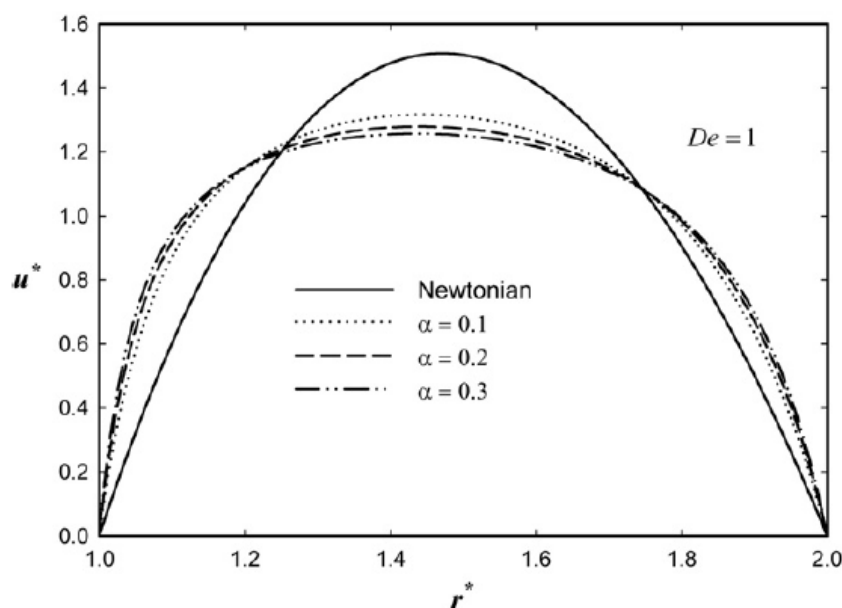
مؤید محسنی ورشیدی [۳۱] با استفاده از معادله‌ی ساختاری گزیکس به حل تحلیلی جریان محوری سیال ویسکوالاستیک در فضای بین دو استوانه پرداختند. حل تحلیلی آن‌ها برای حالت جریان دائم، آرام و توسعه‌یافته سیال ویسکوالاستیک می‌باشد. ثابت زمانی تأخیر سیال نیز در این مسئله صفر در نظر گرفته شده است. در اینجا تأثیر عدد دבורا و ضریب تحرک (α) بر روی سرعت و میزان افت فشار محوری بررسی می‌گردد که نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر بالای این پارامترها می‌باشند. در حین حل نیز ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته که می‌توان حل را تحلیلی دقیق دانست. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای دבורا و ضریب تحرک (α) بر روی منحنی سرعت محوری بی‌بعد، به صورت شکل‌های ۲-۲۵ و ۲-۲۷ آورده شده است. همچنین در شکل ۲-۲۶، تأثیر پارامترهای ضریب تحرک (α) و عدد دבורا بر روی میزان افت فشار محوری سیال (Ψ) نشان داده می‌شود. در اینجا پارامتر Ψ نشان‌گر تغییرات فشار در راستای محوری می‌باشد.



شکل ۲۵-۲ نمودار سرعت محوری بی‌بعد بر حسب شعاع و به ازای وایزنبِrg های مختلف و $\alpha = 0.1$ [۳۱].



شکل ۲۶-۲ نمودار افت فشار محوری سیال بر حسب عدد دیورا و به ازای ضرایب تحرک مختلف [۳۱].



شکل ۲-۲۷ نمودار سرعت بی بعد محوری بر حسب شعاع و به ازای ضرایب تحرک مختلف و $[De] = ۱$.

ایدا سندولد [۷] ساختار ژلی سیال حفاری را با انجام آزمایش‌های گوناگون بر روی آن بررسی کرد. در واقع هدف اصلی این وی، بررسی رفتار سیال حفاری در نرخ‌های برش پایین و به نوعی رفتار آن در حالت ویسکوالاستیک می‌باشد. مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی تشکیل ژل، می‌تواند عملی در راستای بهینه کردن مدل‌سازی هیدرولیک سیال حفاری و همچنین ارزیابی پدیده‌هایی همچون هدرروی سیال حفاری در سازند چاه، ته نشینی باریت و انتقال ذرات کنده شده باشد. وی در این پایان‌نامه تمامی تست‌های دینامیکی، همچون تست مشاهده‌ی تغییرات مدول‌های ذخیره و اتلاف انرژی به ازای دامنه‌های نوسان متفاوت و فرکانس ثابت، تست مشاهده‌ی تغییرات مذکور به ازای فرکانس متغیر و دامنه‌ی ثابت، تست خزش و رهایی از تنش را به انجام رساند. رفتار وابسته به دما و زمان سیال حفاری و همچنین میزان تنش تسلیم این سیال نیز مورد توجه قرار گرفت.

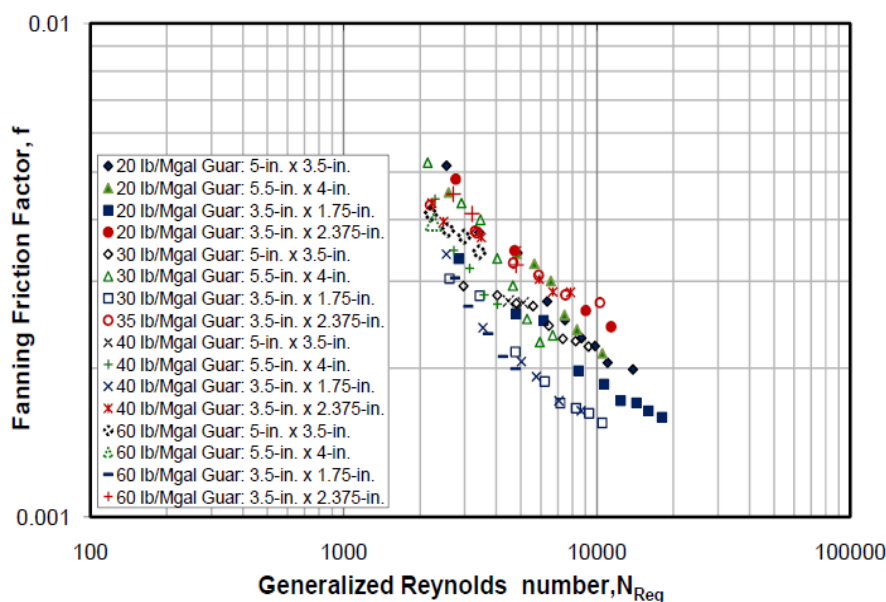
اسکودر و همکاران [۳۲] به شبیه‌سازی عددی جریان سیال غیرنیوتنی در فضای بین دو استوانه پرداختند و سپس نتایج به دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. شبیه‌سازی آنها بر روی سیالی باریک شونده با نرخ برش صورت گرفته و جریان سیال، آرام، توسعه یافته و پایدار می-

باشد. شبیه‌سازی هم برای حالت بدون چرخش استوانه و هم همراه با چرخش استوانه‌ی داخلی انجام شده است و مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی، مدل غیر الاستیک هرشل - بالکی می‌باشد. سیال مورد استفاده در آزمایش حاوی مواد پلیمری می‌باشد و این عامل سبب ویسکوالاستیک شده سیال می‌گردد. با اینکه مدل مورد استفاده، مدلی غیر الاستیک است و در حالت کلی توانایی در نظر گرفتن لزجت‌های کششی و اختلاف تنش‌های نرمال را ندارد، اما تا حد نسبتاً خوبی می‌تواند به محاسبه‌ی میدان سرعت در هندسه‌ی مورد نظر بپردازد.

اوگوگبو [۳۳] در رساله‌ی دکتری خود، به شبیه‌سازی عددی جریان سیال پاورلو در فضای بین دو استوانه‌ی غیر هم‌مرکز و همچنین مطالعه‌ی آزمایشگاهی این جریان پرداخت. حل عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت^۱ انجام شده و مدل مورد استفاده، مدل غیر الاستیک پاورلو می‌باشد. در اینجا تأثیر نسبت شعاع‌های دو استوانه بر روی منحنی سرعت و میزان افت فشار محوری سیال، بررسی شده است. همچنین اثر غلظت ماده‌ی پلیمری (صمغ گوار)^۲ بر روی میزان افت فشار سیال مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ (f) (fanning friction factor)، با افزایش عدد رینولدز تعمیم یافته جریان می‌باشد.

^۱ Fluent software

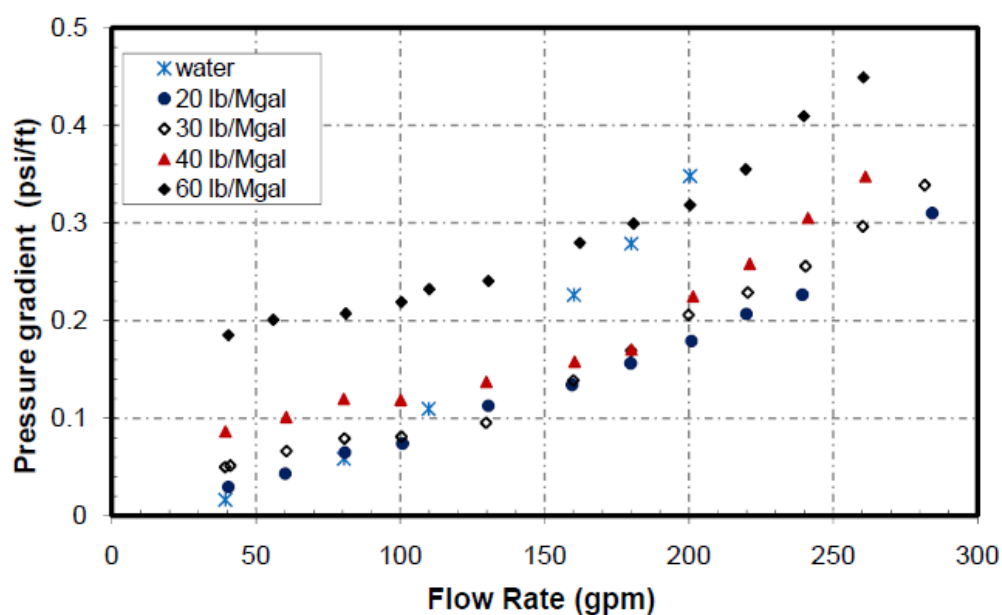
^۲ Guar



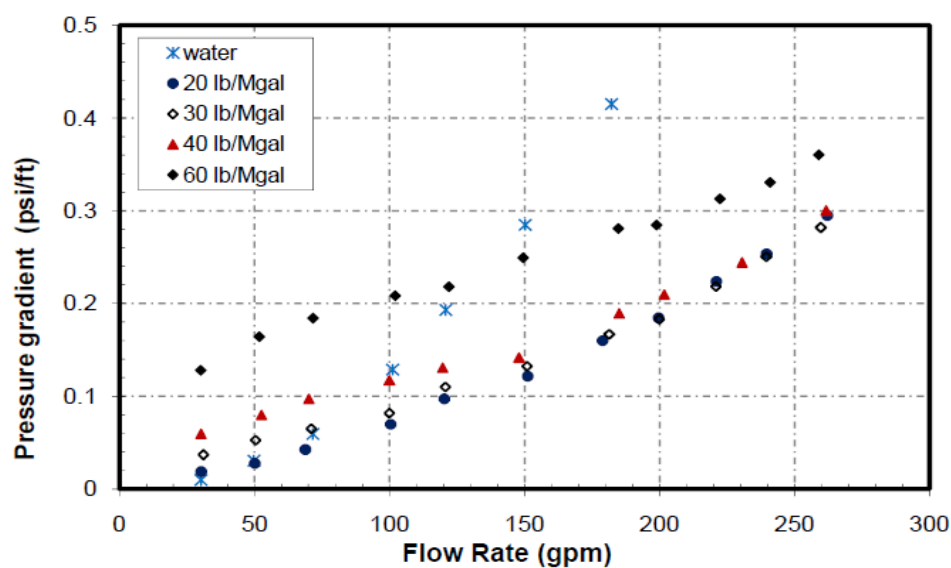
شکل ۲-۲۸ نمودار وابستگی ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ با عدد رینولدز جریان، در سیال

حاوی صمغ Guar با غلظت‌های مختلف [۳۳].

همان‌طور که در شکل ۲-۲۸ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز جریان، ضریب اصطکاک مودی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش غلظت ماده‌ی پلیمری Guar از ۲۰ (ib/Mgal) به ۶۰ (ib/Mgal) افت فشار برای حالت 5-in. x 3 ½-in. افزایش می‌یابد. اما با تغییر میزان زبری سطح، شرایط تغییر می‌یابد بطوری که در حالت 3 ½-in. x 1 ¾-in. که استوانه‌ها از زبری بالاتری برخوردار هستند، این رفتار مشاهده نمی‌شود. علاوه بر این، به طور جالبی مشاهده می‌شود که در غلظت‌های ۳۰، ۴۰ و ۶۰ (ib/Mgal) ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ، وابستگی زیادی به میزان غلظت Guar ندارد و با افزایش میزان غلظت، وابستگی ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ به زبری استوانه‌ها کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۲-۲۹ و ۲-۳۰ نیز وابستگی افت فشار محوری با دبی جریان، نشان داده می‌شود.



شکل ۲۹-۲ نمودار تغییرات فشار در راستای محور جریان بر حسب میزان دبی و به ازای غلظت‌های متفاوت و زبری [۳۳5 -in. x 3 ½ -in].



شکل ۳۰-۲ نمودار تغییرات افت فشار بر حسب دبی برای محلول‌هایی با غلظت‌های مختلف و زبری [۳۳3 ½ -in. x 1 ¾ -in].

بینه بو[۵] در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود به بررسی و توصیف خواص ویسکوالاستیک سیال حفاری پرداخت. در این پایان‌نامه تست‌های برشی یکنواخت برای به دست آوردن لزجت و اختلاف تنش‌های نرمال اول صورت پذیرفته است. این کار جهت مشاهده‌ی رفتار ویسکوالاستیک غیر خطی

سیال صورت می‌پذیرد. در واقع پارامتر اختلاف تنش‌های نرمال اول و محاسبه ضریب اختلاف تنش - های نرمال، جهت به دست آوردن پارامترهای الاستیک سیال حفاری صورت می‌پذیرد. همچنین تست‌های دینامیکی از جمله تست خزش، تست رهایی از تنش و تست‌های نوسانی بر روی سیال انجام می‌پذیرند. انجام تست‌های نوسانی، جهت مشاهده‌ی پاسخ ویسکوالاستیک سیال در محدوده‌ی خطی و تست‌های خزش و رهایی از تنش نیز برای به دست آوردن ضریب خزش و مدول‌های رهایی از تنش انجام می‌گیرد. همچنین وابستگی‌های دمایی و زمانی سیالات حفاری گوناگون نیز مورد آزمایش و مطالعه قرار می‌گیرد. کالین و همکاران [۳۴] به محاسبه‌ی ضرایب غیرخطی معادله‌ی ساختاری گزیکس پرداختند. محاسبه‌ی این ضرایب در ارتباط نزدیک با رفتار غیرخطی سیال ویسکوالاستیک در تست نوسانی تنش برشی می‌باشد. سیال مورد مطالعه محلولی پلیمری بر پایه‌ی ماده‌ی پلیمری پلی‌اکریل - آمید^۱ می‌باشد. در اینجا از تست‌های نوسانی تنش بر حسب زمان در محدوده‌ی ویسکوالاستیک غیر خطی استفاده شده است و به جای استفاده از نمودار لزجت - نرخ برش برای محاسبه‌ی ضریب تحرک و نشان دادن رفتار غیر خطی، از هارمونیک سوم سری فوریه تنش استفاده شده است. در واقع روش مورد استفاده در این مقاله از دقت بالاتری برخوردار است. در تست آزمایشگاهی، کرنش برشی اعمالی به سیال به صورت نوسانی و پاسخ تنش آن نیز به صورت نوسانی می‌باشد. در واقع پاسخ تنش به این کرنش برشی را می‌توان به صورت سری فوریه نوشت که ضرایب این سری فوریه نشان‌دهنده‌ی رفتار غیر خطی سیال ویسکوالاستیک می‌باشند. با استفاده از رابطه‌ی بین مدول‌های ذخیره و اتلاف انرژی با فرکانس زاویه‌ای نوسان در محدوده‌ی دامنه‌های نوسان پایین و با برون‌یابی نمودار آزمایشگاهی لزجت - نرخ برش توسط بهینه‌سازی خطای بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر رابطه‌ی موجود، ضرایب (η_i, λ_i) موجود در معادله‌ی ساختاری گزیکس محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از این ضرایب و جای‌گذاری آن در معادله‌ی گزیکس، باز هم با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، برون‌یابی نمودار تنش-زمان انجام می‌شود تا ضرایب تحرک (α) به دست آیند. برای آزمودن

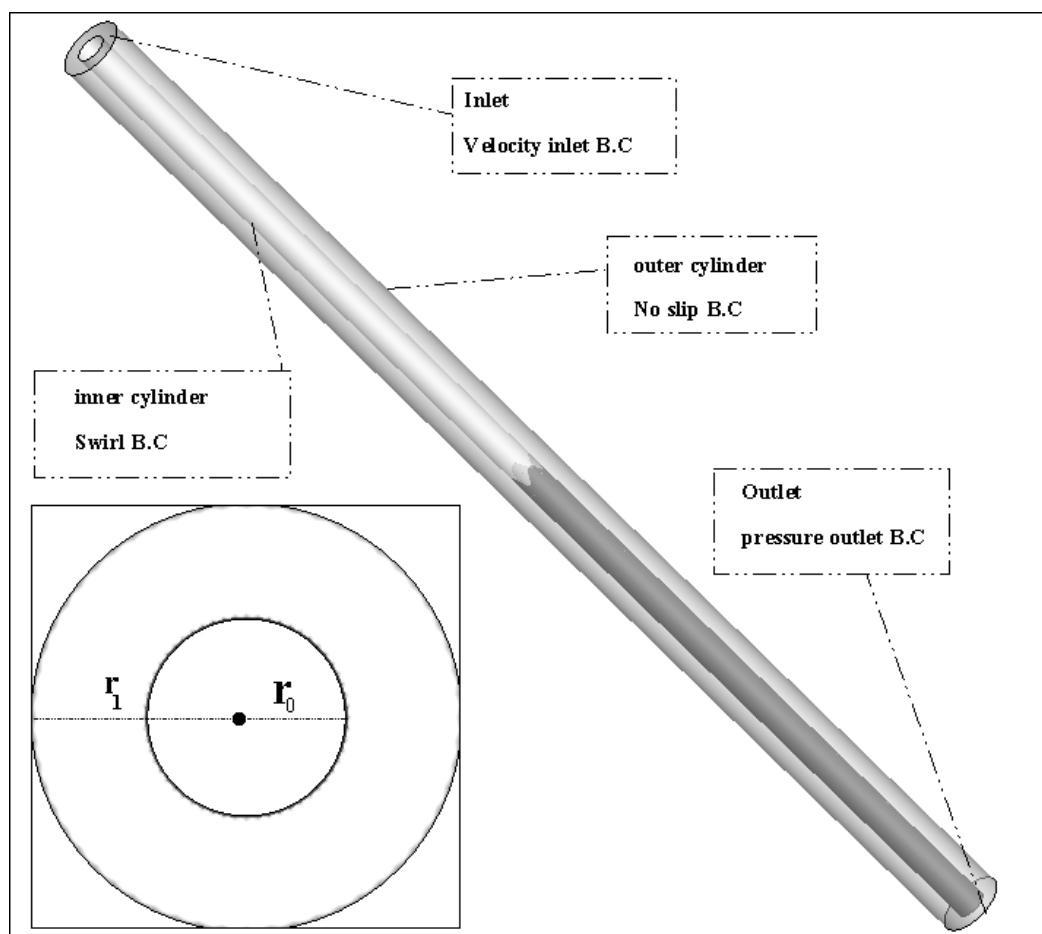
¹ Polyacrylamide

میزان دقت حل انجام شده، با استفاده از جای‌گذاری ضرایب به دست‌آمده در معادله‌ی گزیکس، نمودارلزجت-نرخ برش سیال با استفاده از فرمول، با نمودار آزمایشگاهی لزجت - نرخ برش آن مقایسه شده که این مقایسه حاکی از توانایی بالای روش به کار رفته در این مقاله می‌باشد.

۲-۳- تحقیق حاضر

در این تحقیق، جریان سیال حفاری در فضای آنالوس مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا جریان سیال آرام و دائمی می‌باشد و پدیده‌ی انتقال حرارت در آن مورد بررسی قرار نگرفته‌است. هندسه‌ی مسئله سه بعدی است و سیال نیز ویسکوالاستیک و تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده‌است. در این تحقیق برای اولین بار از مدل ویسکوالاستیک گزیکس جهت حل عددی جریان مذکور استفاده شده‌است. استخراج مدل گزیکس بر پایه تئوری‌های مولکولی بوده و از جمله برتری‌های این مدل، توصیف اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم و همچنین توصیف رفتار توانی تغییرات لزجت با نرخ برش می‌باشد [۳]. لازم به ذکر است، حل‌های عددی پیشین اکثراً با استفاده از مدل‌های غیرنیوتنی ویسکوز انجام شده‌اند که توانایی بررسی اختلاف تنش‌های نرمال و خواص الاستیک سیال را ندارند.

در شکل ۲-۳۱ نمایی کلی از هندسه مسئله آورده شده‌است. ابعاد هندسه‌ی مسئله با توجه به ابعاد واقعی چاه‌های نفت و گاز می‌باشد و از لحاظ طول هندسه در راستای محوری، طولی لحاظ شده که جریان به حالت توسعه یافتگی کامل برسد و لازم به ذکر است که هندسه مسئله به صورت با سازمان‌مشبندی شده و از حل مسئله با استفاده از تقارن هندسه اجتناب شده‌است. از لحاظ شرایط مرزی، در محل ورود جریان به فضای آنالوس از شرط مرزی گرادیان فشار صفر استفاده شده و با توجه به دبی معمول گل حفاری در فضای آنالوس یک سرعت ورودی برای جریان در نظر گرفته شده و در خروجی نیز از شرط مرزی فشار خروجی برابر فشار اتمسفر استفاده می‌شود. استوانه‌های داخلی و خارجی نیز دیواره‌های غیر قابل نفوذ به حساب می‌آیند و استوانه‌خارجی ثابت و استوانه‌ی داخلی با سرعت مشخصی (با توجه به سرعت‌های معمول حفاری) در چرخش است.



شکل ۲-۳۱ شماتیکی از هندسه‌ی مسئله و شرایط مرزی

در اینجا برای مدل‌سازی عددی جریان سیال ویسکوالاستیک حفاری، از نرم‌افزار منبع‌باز اوپن فوم^۱، که یک جعبه‌ابزار دینامیک سیالات محاسباتی^۲ (CFD) است، استفاده شده‌است. به دلیل منبع‌باز^۳ بودن کدهای این نرم‌افزار، امکان تغییر و توسعه‌ی آن‌ها برای کاربران وجود دارد. کدهای این نرم‌افزار با زبان برنامه‌نویسی ++C نوشته می‌شوند و مجموعه‌ی این کدها قابلیت ایجاد حل‌گرهایی متفاوت برای شبیه‌سازی جریان‌های گوناگون را دارند. روش عددی مورد استفاده در این نرم‌افزار، روش حجم

¹ Open Foam

² Computational Fluid Dynamics

³ Open source

محدود می‌باشد و در این جا گسسته‌سازی‌های ترم‌های زمانی و مکانی از مرتبه‌ی می‌باشد و جهت حل هم‌زمان معادلات سرعت و فشار از الگوریتم تکرار پیزو^۱ استفاده می‌شود.

۲-۴- جنبه‌های نوآوری

از لحاظ جنبه‌های نوآوری تحقیق حاضر، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تاکنون اکثر مدل‌سازی‌های عددی انجام گرفته بر روی جریان سیال حفاری در فضای آنالوس، با استفاده از مدل‌های غیر نیوتنی ویسکوز بوده و پژوهش حاضر، نخستین تحقیقی محسوب می‌شود که در آن برای تحلیل جریان مارپیچ سیال حفاری از مدل ویسکوالاستیک غیر خطی گزیکس به عنوان معادله‌ی ساختاری استفاده شده است. در حل‌های تحلیلی مسئله مذکور که تاکنون با مدل‌های ویسکوالاستیک انجام گرفته‌اند، جهت ساده‌سازی حل از تقریب‌هایی استفاده شده است که باعث شده مدل نتواند به خوبی رفتار جریان سیال را تحلیل کند.

- به دلیل اثر گذاری متقابل جریان‌های محوری و چرخشی بر روی یکدیگر و دشوار شدن حل جریان ویسکوالاستیک در این حالت، در حل‌های صورت گرفته معمولاً از چرخش استوانه‌ی صرف نظر می‌شود. اما در اینجا با در نظر گرفتن جریان مارپیچ سیال در آنالوس، تأثیر متقابل این دو جریان بر روی هم در نظر گرفته می‌شود.

- میزان اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم سیال در حین جریان، توصیف کننده‌ی بعضی از خواص ویسکوالاستیک سیال می‌باشد و معادله ساختاری استفاده شده نیز قابلیت تعریف این پارامترهای مهم را دارد و می‌توان در خروجی حل عددی، در هر مقطع از هندسه‌ی مذکور مقادیر این پارامترها را مشاهده کرد. در صورتی که مدل‌های غیرنیوتنی ویسکوز و حتی اکثر مدل‌های ویسکوالاستیک، قابلیت تبیین توأم اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم را ندارند.

¹Pressure implicit with splitting of operator

فصل ۳

معادلات حاکم

۳-۱- مقدمه

در این فصل، معادلات حاکم بر جریان سیال ویسکوالاستیک با استفاده از مدل گزیکس در دستگاه مختصات کارتزین^۱ ارائه می‌گردد. در مطالعه و حل عددی جریان سیال ویسکوالاستیک در فضای آنالوس، از این معادله‌ها و روابط استفاده شده است.

۳-۲- معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان آرام و تراکم‌ناپذیر سیال ویسکوالاستیک شامل معادلات بقای جرم (رابطه‌ی (۳-۱))، بقای ممنتوم (رابطه‌ی (۳-۲)) و معادله‌ی ساختاری مربوط به مدل گزیکس (رابطه‌ی (۳-۶)) می‌باشند که به ترتیب در ادامه توضیح داده خواهند شد.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۳-۱)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla(u) \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (۳-۲)$$

در معادلات بالا، u بردار سرعت و p و τ به ترتیب نشان دهنده‌ی تنش و فشار وارده بر المان سیال می‌باشند. تنش کل را می‌توان به تنش‌های نیوتنی و پلیمری به صورت رابطه‌ی (۳-۳) تفکیک کرد. τ_s تنش ناشی از حلال نیوتنی و τ_p تنش پلیمری ناشی از خاصیت الاستیک حل‌شونده پلیمری می‌باشد.

$$\tau = \tau_s + \tau_p \quad (۳-۳)$$

¹ Cartesian coordinates

در حلال نیوتنی، رابطه‌ی بین تنش و نرخ کرنش به صورت رابطه‌ی (۳-۴) می‌باشد. که در رابطه‌ی مذکور، η_s لزجت مربوط به حلال نیوتنی و $\dot{\gamma}$ تانسور نرخ برش است. تانسور نرخ برش به صورت رابطه‌ی (۳-۵) قابل نمایش است.

$$\tau_s = \eta_s \dot{\gamma} \quad (۳-۴)$$

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

رابطه‌ی تنش با کرنش مربوط به حل‌شونده‌ی پلیمری که در ارتباط با خاصیت الاستیک سیال است، به صورت رابطه‌ی (۳-۶) قابل نمایش است.

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

در معادله‌ی ساختاری مذکور، τ_p تانسور تنش پلیمری، $\tau_{p(1)}$ مشتق همرفتی تانسور^۱ α, τ_p ضریب تحرک سیال ویسکوالاستیک، λ ثابت زمانی رهایی از تنش سیال و η_p لزجت ماده پلیمری در نرخ برش صفر می‌باشد. لازم به ذکر است ضریب α نشان‌دهنده‌ی میزان رفتار غیر ایزوتروپیک برونی^۲ در ساختار مولکولی ماده است. مشتق همرفتی تانسور تنش به صورت رابطه‌ی (۳-۷) تعریف می‌شود:

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

در رابطه‌ی بالا، $\frac{D}{Dt} \tau_p$ مشتق مادی^۳ تنش مربوط به محلول پلیمری است که به صورت رابطه‌ی (۳-۸) تعریف می‌گردد.

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

^۱ Upper convected derivative

^۲ Anisotropic Brownian motion

^۳ Material derivative

همچنین می‌توان به جای τ_p در معادله‌ی ساختاری، از معادل آن که در رابطه‌ی (۹-۳) آمده، استفاده کرد.

$$\tau_p = \tau - \tau_s \quad (۹-۳)$$

با قرار دادن رابطه‌ی (۹-۳) در رابطه‌ی (۶-۳)، می‌توان آن را به صورت رابطه‌ی (۱۰-۳) نوشت.

$$\tau + \lambda_1 \tau_{(1)} + \alpha \frac{\lambda_1}{\eta_0} \{\tau \cdot \tau\} - \alpha \lambda_2 \{\gamma_{(1)} \cdot \tau + \tau \cdot \gamma_{(1)}\} = \eta_0 [\gamma_{(1)} + \lambda_{(2)} \gamma_{(2)} - \alpha \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1} \{\gamma_{(1)} \cdot \gamma_{(1)}\}] \quad (۱۰-۳)$$

در رابطه‌ی (۱۰-۳)، $\gamma_{(1)}$ و $\gamma_{(2)}$ مشتقات مرتبه‌ی اول و دوم همرفتی تانسور نرخ برش^۱ هستند که به ترتیب به صورت روابط (۱۱-۳) و (۱۲-۳) قابل بیان هستند.

$$\gamma_{(1)} = \nabla u + \nabla u^T \quad (۱۱-۳)$$

$$\gamma_{(2)} = \frac{D\gamma_{(1)}}{Dt} - \{(\nabla(u))^T \cdot \gamma_{(1)} + \gamma_{(1)}(\nabla(u))\} \quad (۱۲-۳)$$

در رابطه‌ی (۱۰-۳)، η_0 لزجت برشی سیال در نرخ برش صفر می‌باشد. این لزجت حاصل جمع لزجت‌های مربوط به حلال نیوتنی و حل‌شونده‌ی پلیمری می‌باشد که به صورت رابطه‌ی (۱۳-۳) نشان داده می‌شود.

$$\eta_0 = \eta_s + \eta_p \quad (۱۳-۳)$$

^۱The first and second contravariant convected derivative of the shear rate tensor

λ_2 ثابت زمانی تأخیر سیال^۱ و a پارامتر پویایی سیال، به ترتیب به صورت رابطه‌های (۳-۱۴) و (۳-۱۵) تعریف می‌شوند.

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1 \eta_s}{\eta_p} \quad (۳-۱۴)$$

$$a = \frac{\alpha}{1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)} \quad (۳-۱۵)$$

۳-۳- بی‌بعد سازی معادلات حاکم

در این بخش معادلات پیوستگی، ممنتوم و معادله‌ی ساختاری مورد استفاده در این پایان‌نامه، با استفاده از تعریف پارامترهای بی‌بعد، بی‌بعد سازی می‌گردند.

۳-۳-۱- بی‌بعد سازی معادله‌ی پیوستگی

معادله‌ی پیوستگی به صورت رابطه‌ی (۳-۱۶) نشان داده می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u) = 0 \quad (۳-۱۶)$$

با توجه به فرض تراکم ناپذیری سیال، رابطه‌ی (۳-۱۶) به صورت رابطه‌ی (۳-۱۷) ساده می‌شود. همچنین پارامتر سرعت مرجع به صورت رابطه‌ی (۳-۱۸) تعریف می‌گردد.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (۳-۱۷)$$

^۱ Retardation Time

$$u_{ref} = \sqrt{U_{in}^2 + (R_i \omega)^2} \quad (۱۸-۳)$$

با تعریف مؤلفه‌های سرعت بی‌بعد به صورت روابط (۱۹-۳)، شکل بی‌بعد شده معادله‌ی

پیوستگی به صورت رابطه‌ی (۲۰-۳) نشان داده می‌شود.

$$u_x^* = \frac{u_x}{u_{ref}}; u_y^* = \frac{u_y}{u_{ref}}; u_z^* = \frac{u_z}{u_{ref}}; \quad x^* = \frac{x}{\delta}; \quad y^* = \frac{y}{\delta}; \quad z^* = \frac{z}{\delta} \quad (۱۹-۳)$$

$$\frac{\partial u_x^*}{\partial x^*} + \frac{\partial u_y^*}{\partial y^*} + \frac{\partial u_z^*}{\partial z^*} = 0 \quad (۲۰-۳)$$

۳-۳-۲- بی‌بعد سازی معادله‌ی ممنتوم

معادله‌ی ممنتوم به صورت رابطه‌ی (۲۱-۳) قابل نمایش است.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (۲۱-۳)$$

$$1 < i < 3 \quad ; \quad 1 < j < 3$$

علاوه بر پارامترهای بی‌بعد که در رابطه‌ی (۱۹-۳) تعریف شد، جهت بی‌بعد سازی معادله‌ی ممنتوم،

نیاز به تعریف روابط (۲۲-۳) می‌باشد.

$$t^* = \frac{t u_{ref}}{\delta}; \quad P^* = \frac{P \delta}{u_{ref} \eta_0}; \quad \tau_{ij}^* = \frac{\tau_{ij} \delta}{u_{ref} \eta_0}; \quad Fr = \frac{u_{ref}^2}{g \delta}; \quad Re = \frac{\rho u_{in} \delta}{\eta} \quad (۲۲-۳)$$

با جای‌گذاری روابط (۱۹-۳) و (۲۲-۳) در معادله‌ی ممنتوم (رابطه‌ی (۲۱-۳)) و انجام عملیات ریاضی

لازم جهت تولید اعداد بی‌بعد رینولدز و فرود در این معادله، معادله‌ی ممنتوم به فرم بی‌بعد رابطه‌ی

(۲۲-۳) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_j^*}{\partial x_j^*} = \frac{1}{Fr} - \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} - \frac{\partial \tau_{ij}^*}{\partial x_j^*} \right) \quad (22-3)$$

۳-۳-۳- بی بعد سازی معادله‌ی ساختاری گزیکس

برای بی بعد کردن معادله‌ی گزیکس (رابطه‌ی (۳-۶))، علاوه بر پارامترهای بی بعد ارائه شده در بخش‌های قبلی، پارامترهای بی بعد دیگری طبق رابطه‌ی (۳-۲۳) ارائه می‌گردند.

$$u^* = \frac{u}{U_{ref}}; \quad \dot{\gamma}^* = \frac{\dot{\gamma} \delta}{U_{ref}}; \quad \tau_p^* = \frac{\tau_p \delta}{\eta_0 U_{ref}} \tau_s^* = \frac{\tau_s \delta}{\eta_0 U_{ref}}$$

$$Wi = \frac{U_{ref} \lambda}{\delta}; \quad Ta = \frac{\rho^2 \omega^2 \delta^3 R_i}{\eta^2}; \quad \beta = \frac{\eta_p}{\eta_0} \quad (23-3)$$

با جای گذاری روابط (۳-۲۳) در معادله‌ی گزیکس (رابطه‌ی (۳-۶)) و معادله‌ی مربوط به جمله تنش نیوتنی (رابطه‌ی (۳-۴))، این معادلات بی بعد می‌گردند. شکل بی بعد معادلات مذکور به صورت روابط (۳-۲۴) و (۳-۲۵) نمایش داده می‌شود.

$$\tau_p^* + Wi \tau_{p(1)}^* + \frac{\alpha}{\beta} Wi (\tau_p^* \cdot \tau_p^*) = \beta \dot{\gamma}^* \quad (24-3)$$

$$\tau_s^* = (1 - \beta) \dot{\gamma}^* \quad (25-3)$$

در روابط ارائه شده، ρ چگالی سیال، U_{in} سرعت ورودی محوری سیال به فضای آنالوس، δ فاصله‌ی بین دو استوانه، R_i شعاع استوانه‌ی داخلی، ω سرعت چرخش استوانه‌ی داخلی و η لزجت موثر سیال می‌باشد. برای به دست آوردن لزجت مؤثر، ابتدا باید نرخ برش موجود در فضای آنالوس را محاسبه کرد و باتوجه به مقدار این نرخ برش و نمودار لزجت بر حسب نرخ برش، مقدار لزجت مربوطه

را تعیین کرد. برای تعیین این کرنش برشی باید اثر کرنش حاصل از جریان محوری را با کرنش حاصل از جریان چرخشی به گونه‌ای ترکیب کرد. این کار به صورت رابطه‌ی (۲۶-۳) صورت می‌پذیرد.

$$\dot{\gamma}_{total} = \left(\frac{1}{2}\right) \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2} \quad (26-3)$$

در رابطه‌ی (۲۶-۳)، $\dot{\gamma}_1$ نرخ برش حاصل از جریان محوری، $\dot{\gamma}_2$ نرخ برش حاصل از چرخش چرخشی سیال و $\dot{\gamma}_{total}$ مجموع اثر دو نرخ برش جریان محوری و چرخشی می‌باشد. این پارامترها در هندسه‌ی مورد نظر به صورت روابط (۲۷-۳) تعریف می‌شوند.

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{U_{in}}{2\delta}; \quad \dot{\gamma}_2 = \frac{R_i W_i}{\delta} \quad (27-3)$$

۳-۴- فرضیات مسئله

به منظور مدل‌سازی جریان سیال حفاری در فضای آنالوس، در نظر گرفتن فرضیاتی ساده‌کننده برای حل ضروری می‌باشد. در اینجا برای جریان ورودی به فضای آنالوس که از پایین وارد می‌شود، یک پروفیل سرعت یک‌نواخت بر حسب فاصله‌ی شعاعی در نظر گرفته می‌شود. حل جریان در فضای سه-بعدی و به صورت گذرا (unsteady) می‌باشد. در واقع مدت زمانی طول می‌کشد تا رفتار سیال مستقل از زمان گردد. دما نیز ثابت در نظر گرفته شده و هیچ منبع تولید حرارت وجود ندارد زیرا با در نظر گرفتن وجود منبع حرارتی باید وابستگی لزجت با دما نیز لحاظ شود که در این تحقیق از آن صرف-نظر شده است. همچنین سیال تراکم‌ناپذیر فرض شده است و ضریب تراکم‌پذیری آن صفر است. سرعت در نظر گرفته شده برای جریان در فضای آنالوس در محدوده‌ی جریان آرام می‌باشد و نیروی جاذبه نیز در آن لحاظ گردیده است.

از مهم‌ترین تفاوت‌های سیال ویسکوالاستیک با سایر سیالات، تعریف پارامتری به نام اختلاف تنش‌های نرمال در سیال ویسکوالاستیک است. در واقع هنگامی که سیال ویسکوالاستیک تحت برش قرار می‌گیرد، آرایش مولکولی آن دستخوش تغییر شده و با کشیدگی و هم‌راستا شدن زنجیره‌های طولیل پلیمری آن در راستای برش، شاهد بوجود آمدن رفتارهای غیرهمگون در سیال، مانند پدیده‌ی اختلاف تنش‌های نرمال هستیم. هنگامی که سیال در یک جهت جریان داشته باشد و تغییرات سرعت تنها در جهت عمود بر جهت جریان باشد، جهت ۱ نشان دهنده‌ی جهت جریان اصلی، جهت ۲ نشان دهنده‌ی جهت تغییرات سرعت و جهت ۳ نیز نشان دهنده‌ی جهت راستگرد عمود بر جهات ۱ و ۲ است. این اختلاف تنش‌ها به صورت روابط (۲۸-۳) قابل نمایش هستند:

$$N_1 = \tau_{11} - \tau_{22}; \quad N_2 = \tau_{22} - \tau_{33} \quad (28-3)$$

که N_1 و N_2 به ترتیب اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم می‌باشند. همچنین ثوابت این اختلاف تنش‌های نرمال به صورت روابط (۲۹-۳) تعریف می‌گردند.

$$\Psi_1 = \frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\dot{\gamma}_{21}^2}; \quad \Psi_2 = \frac{\tau_{22} - \tau_{33}}{\dot{\gamma}_{21}^2} \quad (29-3)$$

۳-۵- به دست آوردن ثوابت مدل گزیکس

قبل از مدل‌سازی جریان سیال، ابتدا باید ضرایب معادله‌ی ساختاری استفاده شده را تعیین نمود. این ضرایب نشان دهنده‌ی خواص رئولوژیکی سیال مورد نظر می‌باشند و با استفاده از تحلیل نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آیند. این ضرایب شامل لزجت برشی سیال در نرخ برشی صفر η_0 ، ثابت زمانی رهایی از تنش سیال (λ) و ضریب تحرک سیال (α) می‌باشند. معادله گزیکس را می‌توان تک مود^۱ و یا

^۱Single mode

چند مود^۱ حل کرد. ایده‌ی مدل گزیکس چند حالتی، الهام گرفته از مدل ویسکوالاستیک خطی ماکسول توسعه یافته^۲ (Generalized Maxwell model) می‌باشد و در آن تنش پلیمری اعمال شده را می‌توان به صورت مجموعی از تنش‌ها در مودهای مختلف (رابطه‌ی (۳-۳۰)) نوشت [۳].

$$\tau_p = \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (3-30)$$

در سری موجود در رابطه‌ی (۳-۳۰)، n تعداد حالت‌ها (مودها) می‌باشد. در این صورت به جای این‌که یک ثابت زمانی رهایی از تنش و یک لزجت داشته باشیم، طیفی از آن‌ها را داریم. زمانی که n برابر یک باشد، معادله گزیکس تک مود می‌باشد. در واقع به دلیل پاسخ‌های متفاوت یک سیال در تست‌های رهایی از تنش به ازای دامنه‌های کرنشی متفاوت، این نیاز احساس می‌شود که یک طیف از ثابت‌های زمانی داشته باشیم. از لحاظ ساختار مولکولی در یک ماده‌ی پلیمری یا ماده‌ای که در آن پلیمر به صورت ماده‌ی حل‌شده وجود دارد، بی‌نظمی در ساختار زنجیره‌ی پلیمری از لحاظ تفاوت در طول زنجیره‌ها و به دنبال آن وزن مولکولی متفاوت در آن‌ها وجود دارد. با این توصیف، ارائه یک طیف برای ثابت زمانی رهایی از تنش صحیح‌تر به نظر می‌رسد. در هر مود، یک ثابت زمانی رهایی از تنش و یک لزجت به عنوان وزن این ثابت زمانی می‌باشد. منظور از وزن هر ثابت زمانی در هر مود، ارزش آن مود از لحاظ تنش نسبت داده شده به آن مود است. برای روشن‌تر شدن موضوع می‌توان به تست نوسانی ماده در فرکانس‌های متفاوت اشاره کرد. در فرکانس‌های پایین، ماده دارای زمان رهایی از تنش بالا و در فرکانس‌های زیاد ماده دارای زمان رهایی از تنش کم است. از اینرو اختصاص دادن یک طیف رهایی از تنش به ماده منطقی‌تر به نظر می‌رسد. علاوه بر این، افزایش تعداد مودها به انطباق بهتر منحنی آزمایشگاهی با رابطه‌های (۳-۳۳) و (۳-۳۴) کمک می‌کند و خطای انطباق را کاهش می‌دهد. البته باید توجه داشت که کاهش خطای مینیمم‌سازی با افزایش تعداد مودها ادامه‌دار نیست و

¹ Multi mode

² Generalized Maxwell model

حد مشخصی دارد. بعد از آن خطا در حد ثابتی باقی می‌ماند. بعضی اوقات افزودن تعداد مودها منجر به منفی شدن مدول الاستیک (G) یک یا چند مودمی گردد که نشان دهنده‌ی غیر فیزیکی بودن جواب‌های به دست آمده برای طیف ثابت‌های رهایی از تنش و لزجت‌ها است. لزجت پلیمری سیال از جمع لزجت‌های مودهای مختلف آن و به صورت رابطه‌ی (۳-۳۱) به دست می‌آید.

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (3-31)$$

هم‌چنین می‌توان به این مجموعه λ به دست آمده، یک λ متوسط به صورت رابطه‌ی (۳-۳۲) نسبت داد.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \eta_i} \quad (3-32)$$

برای پیدا کردن مجموعه‌های η و λ با استفاده از مدل توسعه‌یافته‌ی ماکسول، باید از معادلات (۳-۳۳) و (۳-۳۴) که مدول‌های ذخیره و اتلاف انرژی را توسط جملاتی از سری برحسب η و ω بسط می‌دهند، استفاده کرد [۳].

$$G' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (3-33)$$

$$G'' = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i \omega}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (3-34)$$

با مینیمم سازی خطای حاصل از انطباق منحنی آزمایشگاهی G' و G'' با استفاده از رابطه‌ی (۳-۳۵) مقادیر مناسب برای مجموعه‌ی η و λ ها به دست می‌آید. در واقع این یک مینیمم‌سازی غیرخطی^۱ است، زیرا در این سری‌ها ضرایب مجهول η و λ در یکدیگر ضرب می‌شوند. این امر سبب شده دسته جواب‌های متنوعی برای η و λ بوجود بیاید و مسئله تا حدی دارای شرایط ناهنجار^۲ می‌گردد.

$$f_{min} = \sum_{i=1}^m \left[\left(G'(\omega) - G'_{calc}(\omega) \right)^2 + \left(G''(\omega) - G''_{calc}(\omega) \right)^2 \right] \quad (3-35)$$

ابتدا تصور می‌گردید که به دست آوردن این پارامترها از روی داده‌های آزمایشگاهی تا حدی مشکل ساز باشد، اما تحقیقات بعدی مشخص کرد که اگر انطباق منحنی‌های G' و G'' و به دنبال آن بهینه‌سازی خطای این انطباق‌ها باهم صورت بگیرد، مشکلی از لحاظ ناهنجار بودن حلا ایجاد نمی‌شود. با اینکه ممکن است دسته جواب‌های متفاوتی بوجود آیند، اما همگی آنها خواص فیزیکی ماده را یکسان توصیف می‌کنند. برای اطمینان از این قضیه می‌توان ثابت‌های زمانی رهایی از تنش را که به صورت گسسته به دست آمده‌اند به حالت پیوسته تبدیل کرد. مشاهده می‌شود که دسته جواب‌های متمایزی که برای طیف‌های η و λ به دست آمده‌اند، همگی به تابع پیوسته‌ی رهایی از تنش یکسانی تبدیل می‌گردند. می‌توان برای اطمینان بیشتر، از تابع پیوسته‌ی رهایی از تنش به دست آمده برای محاسبه‌ی مدول الاستیسیته بر حسب زمان و به دنبال آن توابع G' و G'' بر حسب ω (فرکانس نوسان) استفاده کرد. در عمل باید توابع G' و G'' به دست آمده با منحنی آزمایشگاهی آن مطابقت داشته باشند [۳۵]. در این پایان‌نامه، روش به کار رفته در یافتن پارامترهای (η_i, λ_i) ، مشابه روش استفاده شده توسط برد [۳] می‌باشد. در روش وی، محدوده‌ی مجاز در نظر گرفتن λ_i ها با استفاده از روابط (۳-۳۶) تعیین می‌گردد.

$$\lambda_{max} \omega_{min} > 1; \quad \lambda_{max} \omega_{min} < 1 \quad (3-36)$$

با توجه به این که اطلاعات آزمایشگاهی موجود برای این سیال حفاری در محدوده‌ی فرکانسی $0.1 < \omega < 1000$ می‌باشد، محدوده‌ی λ بین 0.001 تا 100 ثانیه به دست می‌آید. تعداد مودها (i) به نوعی تعیین می‌گردد که بهترین بهینه‌سازی خطا صورت بگیرد. در روش برد، مقادیر λ_i ها به صورت مقادیری از پیش تعیین شده در الگوریتم بهینه‌سازی خطا قرار می‌گیرند و η_i ها به عنوان پارامترهای مجهول تعیین می‌گردند. مقادیر λ_i ها به گونه‌ای تعیین می‌شوند که نسبت بین هر دو λ متوالی عدد

¹ Nonlinear Optimization

² ill posed

ثابتی گردد. به طور مثال در اینجا با در نظر گرفتن ۶ مود، کمترین مقدار تابع خطا در بهینه‌سازی حاصل می‌گردد و رابطه‌ی (۳-۳۷) بین مقادیر λ_i ها حاکم است.

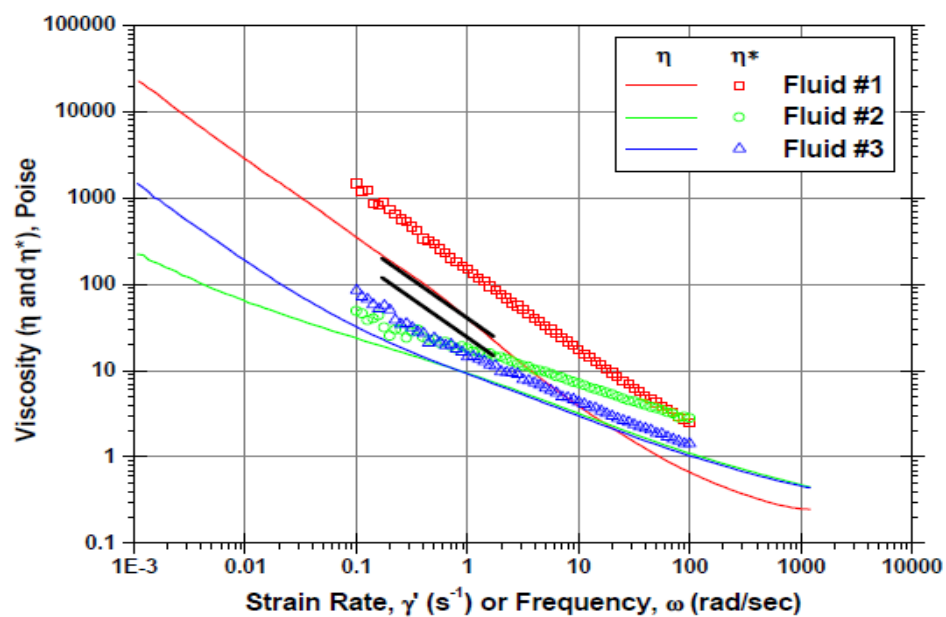
$$\frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} = 10 \quad (3-37)$$

مدل‌سازی صورت گرفته در این پایان‌نامه بر اساس اطلاعات مربوط به یک سیال حفاری پایه آبی است که توسط یکی از کمپانی‌های نفتی امریکایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به ترکیبات سازنده‌ی این سیال حفاری و میزان درصد هر یک از این اجزا در جدول ۳-۱ آمده‌است.

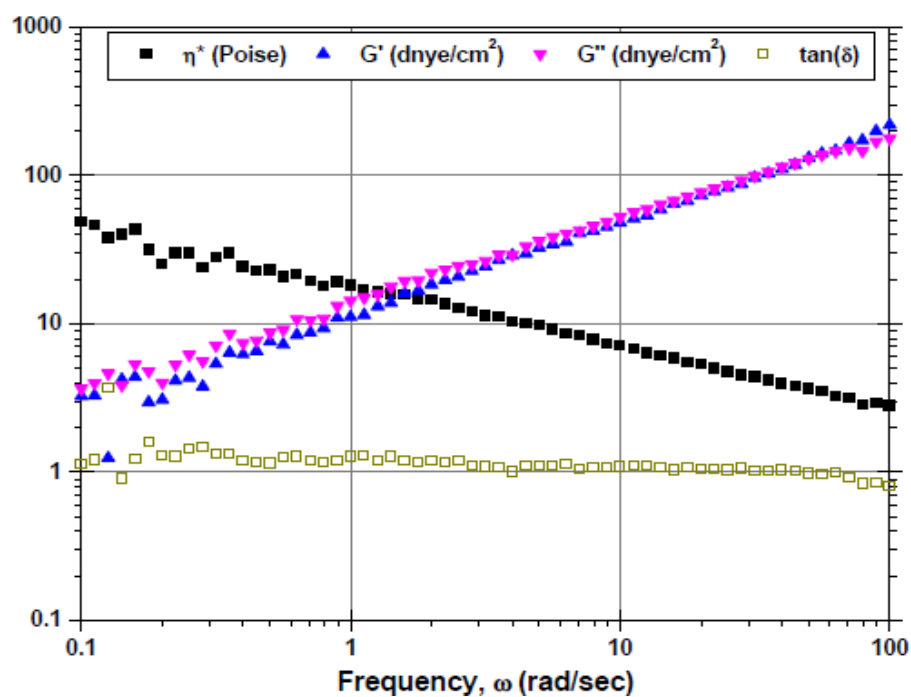
جدول ۳-۱ ترکیبات تشکیل دهنده‌ی گل حفاری مورد مطالعه [۲۸].

پتاسیم فرمات	۰.۹۶۸۵ (bbl)
صمغ زانتان	۰.۵ (ib/bbl)
کروبوکسی متیل سلولز	$(ib/bbl)^2$
نشاسته	$(ib/bbl)^2$
کلسیم کربنات	$(ib/bbl)^{10}$
اکسید فلزی	$(ib/bbl)^{20.68}$
ذرات کننده شده	$(ib/bbl)^{10}$

در جدول ۳-۱ هر bbl معادل ۰.۱۵۸ مترمکعب و هر ib/bbl معادل ۲.۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. وابستگی لزجت برشی سیال با نرخ برش، در نمودار شکل ۳-۱ و وابستگی مدول‌های ذخیره و اتلاف انرژی گل حفاری مورد نظر در نمودار شکل ۳-۲ نمایش داده می‌شود. لازم به ذکر است، سیال مورد مطالعه‌ی ما سیال شماره‌ی ۲ می‌باشد [۳۱].



شکل ۳-۱ نمودار لزجت بر حسب نرخ برش برای ۳ نوع سیال حفاری پلیمری [۲۸].



شکل ۳-۲ نمودار وابستگی پارامترهای رئولوژیکی سیال مورد مطالعه بر حسب فرکانس نوسان [۲۸].

با بهینه‌سازی تابع رابطه‌ی (۳-۳۵)، مقادیر η_i ها به دست می‌آیند. در اینجا این بهینه‌سازی توسط الگوریتم تکاملی ژنتیک صورت گرفته است. مقادیر به دست آمده، در جدول ۳-۲ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۳-۲ طیف لزجت و ثابت رهایی از تنش سیال حفاری مورد مطالعه

i	$\lambda_i (s)$	$\eta_i (pa.s)$
۱	۱۰۰	۱۹.۲۳۸
۲	۱۰	۲.۷۱۳
۳	۱	۱.۲۶۲
۴	۰.۱	۰.۵۲۳
۵	۰.۰۱	۰.۲۸۹
۶	۰.۰۰۱	۰.۰۱۸

حال نوبت تعیین α_i ها یا همان ضرایب تحرک موده‌های مختلف می‌باشد. برای این کار، ضرایب (λ_i, η_i) در معادله‌ی ساختاری گزیکس قرار داده می‌شوند. سپس با استفاده از منحنی آزمایشگاهی تست ویسکومتریک تنش-نرخ برش، ضرایب α_i به گونه‌ای توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین می‌گردند که منحنی تنش-نرخ برش به دست آمده توسط معادله‌ی گزیکس، بهترین تطابق را با منحنی آزمایشگاهی موجود داشته باشد. در این پایان نامه از الگوریتم تکاملی (PSO)^۱ جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. ضرایب تحرک به دست آمده برای موده‌های مختلف در جدول ۳-۳ آورده شده‌اند.

جدول ۳-۳ طیف ضرایب تحرک (α) سیال مورد مطالعه

I	$\alpha (i)$
۱	۰.۲
۲	۰.۰۵۲
۳	۰.۳۵
۴	۰.۲۷
۵	۰.۴۲
۶	۰.۴۸

^۱particle swarm optimization

۳-۶- هندسه، شرایط مرزی و شرایط اولیه مسئله

در مسئله موجود، سیال در فضای بین دو استوانه‌ی هم مرکز جریان پیدا می‌کند. با مراجعه به اطلاعات مربوط به علم حفاری، هندسه‌ای برای مسئله‌ی موجود، در نظر گرفته شده است. در اینجا هندسه‌ی آنالوس با دو استوانه‌ی تو در تو هم‌مرکز شبیه‌سازی شده است که استوانه‌ی داخلی با سرعت زاویه‌ای ثابت می‌چرخد و سرعت معمول آن در فرآیند حفاری در حدود (10 rad/s) می‌باشد.

باشد. طول در نظر گرفته شده برای استوانه‌ها ۵.۵ متر، شعاع استوانه‌ی داخلی ۶۱ میلی‌متر و شعاع استوانه بیرونی ۱۳۶ میلی‌متر می‌باشد. بر روی سطوح استوانه‌های داخلی و خارجی از شرط عدم لغزش استفاده شده است. استوانه‌ی خارجی همواره ساکن و استوانه‌ی داخلی با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد. در مرز ورودی جریان که در پایین فضای آنالوس می‌باشد، سیال با سرعت یکنواخت وارد می‌شود. میدان تنش و گرادیان فشار در مرز ورودی جریان صفر می‌باشند.

$$\text{@inlet boundary: } \frac{\partial p}{\partial n} = g; \tau = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; U = \text{cte}$$

در مرز خروجی جریان نیز گرادیان سرعت و تنش برابر صفر می‌باشد و فشار خروجی جریان برابر فشار اتمسفر است.

$$\text{@outlet boundary: } \frac{\partial u}{\partial n} = 0; \frac{\partial \tau}{\partial n} = 0; p = p_{\text{atm}} = \text{cte}$$

بر روی سطح استوانه‌های داخلی و خارجی گرادیان‌های فشار و تنش صفر می‌باشند.

$$\text{@inner cylinder: } U_x = 0; U_y = 0; U_z = 0; \omega = \text{cte}; \frac{\partial \tau}{\partial n} = 0; \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

$$\text{@outer cylinder: } U_x = 0; U_y = 0; U_z = 0; \omega = 0; \frac{\partial \tau}{\partial n} = 0; \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

۳-۷- روش حل عددی

جریان سیالات تراکم‌ناپذیر هم‌دما، از معادلات پیوستگیو ممنتوم تبعبیت می‌کنند. رابطه‌ی (۳-۱۶) معادله‌ی پیوستگی و رابطه‌ی (۳-۲۱) معادله‌ی ممنتوم برای سرعت در جهت i ام می‌باشد. علاوه بر این $\frac{\partial}{\partial t}$ مشتق زمانی و $\frac{\partial}{\partial x_j}$ مشتق مکانی نسبت به مؤلفه‌ی j ام دستگاه مختصات کارتزین، τ_{ij} مجموعی از تانسورهای تنش مربوط به حلال نیوتنی و ماده‌ی حل‌شونده‌ی پلیمری و p نیز فشار المان سیال

می‌باشد. همان‌طور که از روابط (۱۶-۳) و (۲۱-۳) برمی‌آید، معادله‌ی پیوستگی جرم تنها یک قید ریاضی برای حل عددی جریان محسوب می‌شود و اگر از یک میدان فشار مناسب در حل معادلات ممنتوم استفاده شود، میدان سرعت به دست‌آمده فاقد دیورژانس خواهد بود. برای حل این مشکل می‌توان از روش‌های پروجکشن^۱ بهره برد.

۳-۷-۱- معادله‌ی تکامل فشار

در حل عددی جریان سیال توسط مجموعه روابط (۱۶-۳) و (۲۱-۳)، نقش معادله‌ی ممنتوم، تکامل حل میدان سرعت در زمان است. برای این کار نیاز به میدان فشار سیال است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در معادله‌ی پیوستگی جرم، عامل فشار مشاهده نمی‌شود و برای حل این مشکل باید معادلات پایستگی جرم و پایستگی ممنتوم را هم‌زمان حل کرد. برای این کار که همان ترکیب کردن این معادلات است، باید ابتدا از معادله ممنتوم مطابق رابطه‌ی (۳۸-۳) دیورژانس گرفت.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j u_i) \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \tau_{ij} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (38-3)$$

و در ادامه

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} (u_j u_j) \right] \\ = - \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (39-3)$$

از آنجایی که در معادله‌ی پیوستگی $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$ است، بنابراین معادله‌ی (۳۹-۳) به صورت رابطه‌ی (۴۰-۳) بازنویسی می‌شود.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_j) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (40-3)$$

¹ Projection methods

رابطه‌ی (۳-۴۰)، معادله‌ی فشار پواسون^۱ می‌باشد و می‌توان با روش عددی مناسبی به حل آن پرداخت. از ضرب دو عملگر دیورژانس^۲ و گرادیان، عملگر لاپلاسیان^۳ تولید می‌شود. عملگر گرادیان از معادله‌ی مومنوم و عملگر دیورژانس از معادله‌ی پیوستگی می‌باشد. برای اینکه تخمین عددی درستی از عملگر لاپلاسیان حاصل شود، باید سازگاری این دو عملگر در گسسته‌سازی حفظ شود. در غیر این صورت، معادله پیوستگی توسط میدان سرعت به دست آمده ارضا نخواهد شد. بنابراین بهتر است معادله‌ی پیوستگی توسط میدان سرعت به دست آید تا اینکه خود عملگر لاپلاس گسسته شود.

۳-۷-۲- الگوریتم piso برای حل جریان تراکم‌ناپذیر

با گسسته‌سازی معادله‌ی پایستگی و مومنوم توسط یک حل عددی، برای هر گره در نظر گرفته شده به یک معادله‌ی جبری می‌رسیم. در واقع با انتگرال‌گیری از معادله‌ی مومنوم و حل انتگرال در یک حجم کنترل و انتگرال‌گیری در حوزه‌ی زمان و مکان، با اختصاص دادن سرعت، فشار و تنش مشخص به گره‌ی مفروض در حجم کنترل، برای هر گره به یک معادله‌ی جبری می‌رسیم. تمام این معادلات جبری تشکیل یک دستگاه معادله را می‌دهند. با حل این دستگاه معادلات می‌توان مجهولاتی مانند سرعت، تنش و فشار را به دست آورد. در واقع میزان پیچیدگی حل و تعداد معادلات جبری، به پارامترهایی همچون ابعاد هندسه‌ی مسئله، تعداد گره‌های در نظر گرفته‌شده و نحوه‌ی گسسته‌سازی ارتباط دارد. اگرچه هر روش معتبر حل به دسته معادلات جواب مناسبی ختم می‌شود، اما امکانات سخت افزاری موجود نیز باید مورد توجه قرار بگیرد. در واقع دو گروه روش حل مستقیم و غیر مستقیم برای حل معادلات جبری خطی وجود دارد. از روش‌های حل مستقیم می‌توان به روش ماتریس معکوس کرامر^۴ و روش حذفی گوس^۵ اشاره کرد. روش‌های غیرمستقیم یا به عبارتی روش‌های تکراری حاصل حل مکرر الگوریتم‌های به نسبت ساده‌ای هستند که بعد از تعداد قابل ملاحظه‌ای تکرار به جواب مشخصی هم‌گرا می‌شوند. از روش‌های تکراری معروف می‌توان به روش ژاکوبی^۶ و گوس سایدل نقطه به نقطه^۷ اشاره کرد. البته نمی‌توان انتظار داشت که هر حل تکراری به جواب درست همگرا شود. حل مسئله مورد مطالعه در پایان‌نامه از نوع غیر پایا می‌باشد و مدت زمانی طول می‌کشد تا حل به حالت پایا برسد. معادله‌ی پایستگی مومنوم در حالت وابسته به زمان به صورت رابطه‌ی (۳-۴۱) نوشته می‌شود.

¹ Poisson pressure equation

² Divergence

³ Laplacian

⁴ Cramer's rule inverse matrix

⁵ Gaussian elimination method

⁶ Jacobi iteration method

⁷ Gauss-Seidel point-by-point method

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (3-41)$$

انتگرال حجم محدود صورت گرفته بر روی حجم کنترل باید به همراه انتگرال در محدوده‌ی زمان Δt باشد. با تبدیل انتگرال‌های حجمی گرفته شده از ترم‌های دیفیوژن و جابه‌جایی به انتگرال سطح و تغییر مرتبه انتگرال به رابطه‌ی (3-42) می‌رسیم.

$$\int_{CV} \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dt \right) dV + \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A n \cdot (\rho u\phi) dA \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A n \cdot (\Gamma \text{grad}) \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S_\phi dV dt \quad (3-42)$$

استفاده از الگوریتم پی‌زو در حل مسائل عددی وابسته به زمان، در جهت گذر زمان غیرتکراری است. به نوعی که در یک زمان خاص پارامترهای صحیح سرعت، فشار و تنش به دست می‌آیند و سپس از این پارامترها برای به دست آوردن پارامترها در زمان‌های پیش‌رو استفاده می‌شود. در واقع الگوریتم پی‌زو توسعه‌یافته‌ی الگوریتم سیمپل می‌باشد. در الگوریتم سیمپل¹ یک مرحله حدس و یک مرحله تصحیح دارد در صورتی که در الگوریتم پی‌زو یک مرحله حدس و دو مرحله تصحیح وجود دارد. در واقع ابتدا گسسته‌یافته‌ی معادله ممنتوم با مقدار اولیه در نظر گرفته شده برای فشار، شروع به حل شدن می‌کند و مؤلفه‌های سرعت به دست می‌آیند. مؤلفه‌های سرعت به دست‌آمده در صورتی معادله پیوستگی را ارضا می‌کنند که میدان فشار در نظر گرفته شده، میدانی صحیح باشد.

¹ Simple algorithm

فصل ۴

نتایج حل عددی

در اینفصل، نتایج حاصل از حل عددی برای مدل سازی جریان سیال ویسکوالاستیک عبوری از فضای آنالوس ارائه می شود. با استفاده از نتایج و اطلاعات حاصل شده از حل عددی، فیزیک و پارامترهای جریان تحلیل می گردند و تأثیر عوامل و پارامترهای مختلف بر روی جریان سیال مورد بررسی قرار می گیرد.

در آغاز این فصل، استقلال حل از شبکه ی محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه برای اثبات صحت حل عددی، مسئله ای که قبلاً در هندسه ای مشابه با هندسه ی موجود در این پایان نامه توسط محققان دیگر حل شده بود، توسط حل گر و نرم افزار مربوط به این پایان نامه حل شده و جواب ها مقایسه می شوند. سپس اثر پارامترهای مختلفی مانند عدد رینولدز، عدد تیلور، عدد وایزنبرگو ضریب تحرک موجود در معادله ی گزیکس بر روی میدان های سرعت و تنش و ضرایب افت های اصطکاکی جریان، مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد.

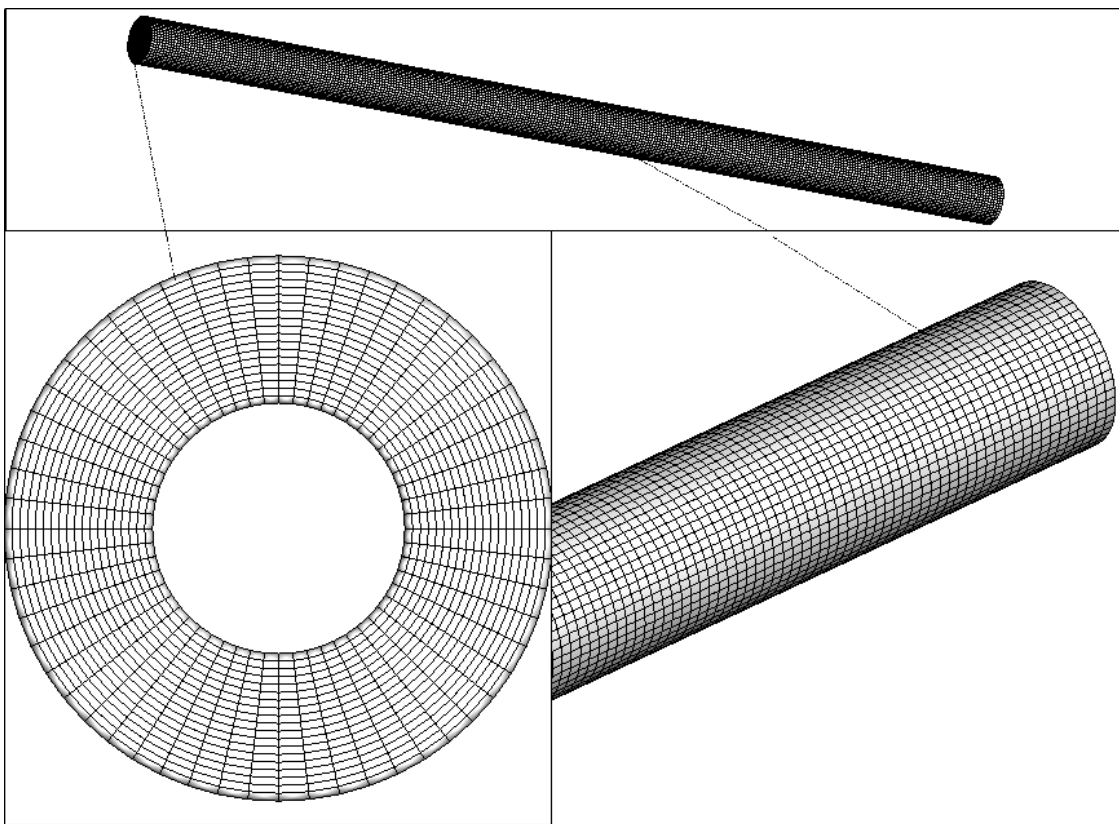
۴-۲- مطالعه ی استقلال حل عددی از شبکه بندی و صحت نتایج

در اینجا استقلال حل عددی صورت گرفته از شبکه ی محاسباتی جهت مطالعه جریان سیال ویسکوالاستیک در فضای بین دو استوانه، مورد بررسی قرار می گیرد. برای تولید شبکه از نرم افزارهای اختصاصی گمبیت و پوینت وایز استفاده می گردد. جهت بررسی میزان وابستگی حل به شبکه بندی هندسه و همچنین دست یافتن به شبکه ی مطلوب برای حل، از چهار شبکه ی محاسباتی استفاده شده و نتایج حاصل از حل هر کدام از آنها با یکدیگر مقایسه شده است. شبکه ها به صورت سازمان یافته می باشند و از شبکه بندی با ابعاد یکسان استفاده شده است. برای کم کردن عدد کورانت مجبور به کم کردن گام زمانی حل می باشیم که این امر منجر به افزایش زمان حل مسئله می شود. در جدول ۴-۱ مشخصات شبکه های محاسباتی آورده شده است.

جدول ۴-۱ تعداد سلول های در نظر گرفته شده در هر مرحله شبکه بندی

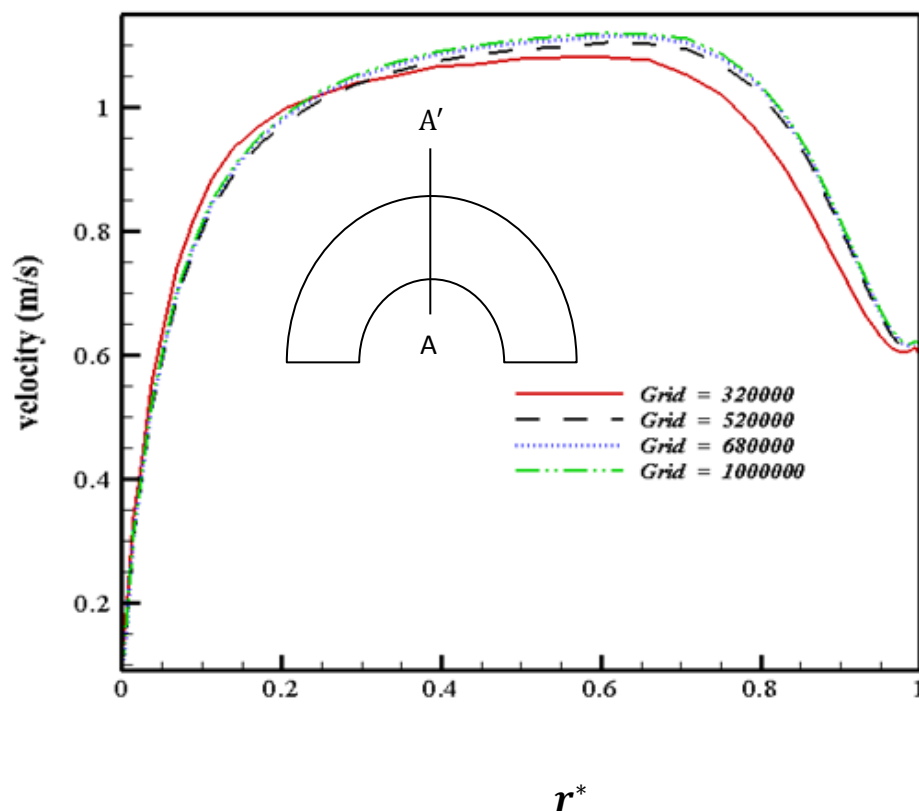
تعداد کل سلول ها	شبکه
320000	M-1
520000	M-2
680000	M-3
1000000	M-4

با افزایش تعداد کل سلول‌ها، منحنی‌های سرعت و تنش به شکل مشخصی میل می‌کنند و اختلاف پاسخ در حل‌های صورت گرفته با شبکه‌های M-4 و M-3 به مقدار ناچیزی می‌رسد. این امر نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن حل مسئله با شبکه‌ی M-3 است، چون برای رسیدن به جوابی که تنها مقدار بسیار اندکی دقیق‌تر است باید از شبکه‌بندی مانند M-4 استفاده کرد که به دلیل زمان بالای حل با این شبکه بندی، استفاده از شبکه‌ی M-3 منطقی می‌باشد. در شکل ۴-۱، نمایی کلی از شبکه‌ی محاسباتی هندسه‌ی مورد مطالعه، نمایش داده می‌شود. همچنین در شکل ۴-۲ منحنی سرعت کل سیال بر حسب موقعیت شعاعی به ازای شبکه بندی‌های گوناگون ترسیم شده است.



شکل ۴-۱ شبکه‌بندی هندسه آنالوس از نماهای مختلف

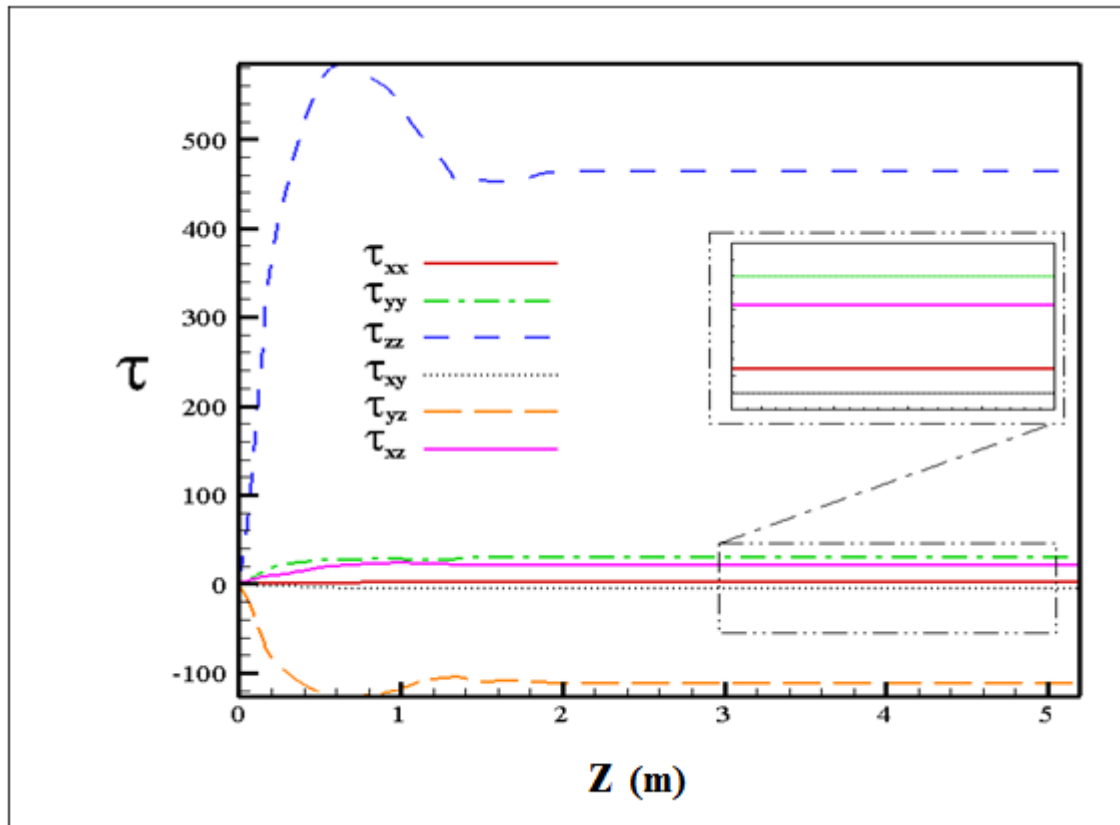
جهت گسسته‌سازی مشتق زمانی، از گسسته‌سازی مرتبه اول اویلر استفاده شده است. مقدار عدد کورانت برابر ۰.۰۰۱ و گام زمانی حل برابر ۰.۰۰۰۱ می‌باشد. با ادامه یافتن حل و افزایش عدد کورانت، گام زمانی باید تا ۰.۰۰۰۰۵ کاهش یافته تا حل به هم‌گرایی برسد.



شکل ۴-۲ نمودار سرعت کل بر حسب شعاع (مقطع $A - A'$) به ازای شبکه‌بندی‌های مختلف

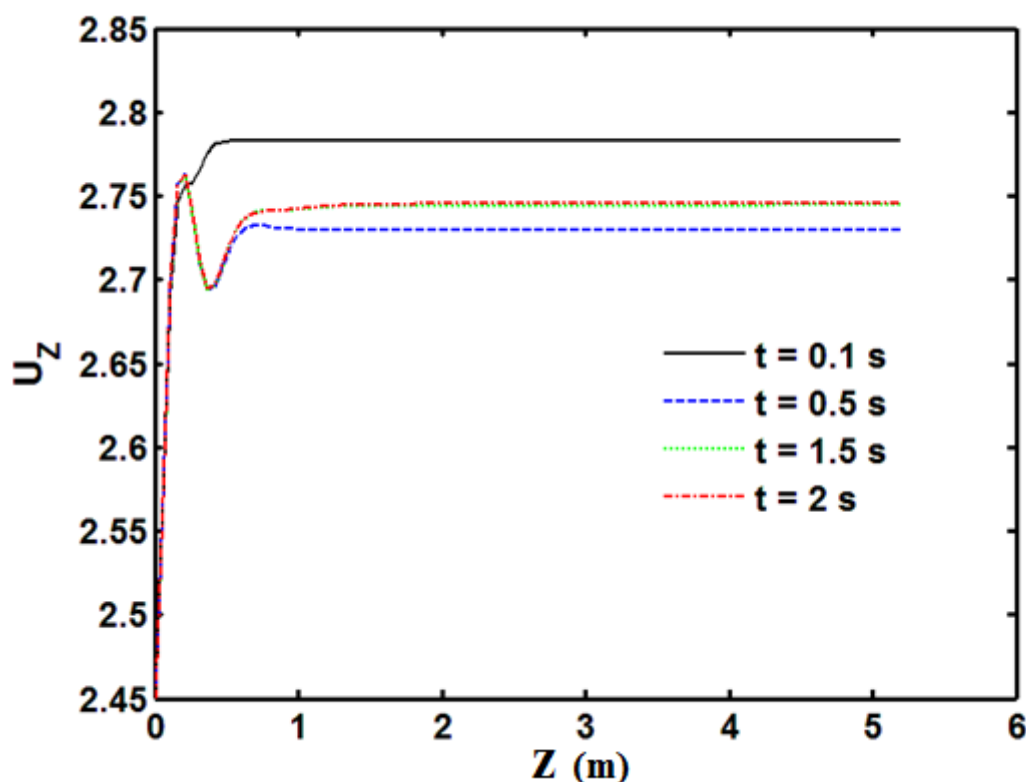
۴-۳- بررسی توسعه یافتگی پارامترهای جریان و رسیدن جریان به حالت دائمی

طول آنالوس در راستای (Z)، به اندازه‌ای اختیار می‌شود که تمام پارامترهای جریان به توسعه یافتگی برسند. جهت اطمینان از توسعه یافتگی حل عددی، تغییرات پارامترهای مختلف جریان در راستای محور (Z) آنالوس مورد بررسی قرار می‌گیرند. به طور نمونه، مقادیر مؤلفه‌های مختلف تنش در راستای محور (Z) آنالوس، در شکل ۴-۴ مورد بررسی قرار گرفته‌اند و همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، مقادیر مؤلفه‌های تنش به‌استقلال از طول هندسه رسیده‌اند.



شکل ۳-۴ منحنی مؤلفه‌های مختلف تنش بر حسب موقعیت محوری Z در شعاع $r = 0.1 \text{ (cm)}$

همچنین مدت زمانی از حل لازم است تا جریان از حالت غیر دائم به حالت دائم برسد. بعد از سپری شده این زمان، تمامی پارامترهای به دست آمده از حل، به استقلال از زمان حل می‌رسند. همان‌طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود، پس از سپری شدن ۲ ثانیه از حل عددی، مقدار مؤلفه‌ی سرعت محوری به استقلال زمانی از حل رسیده است.

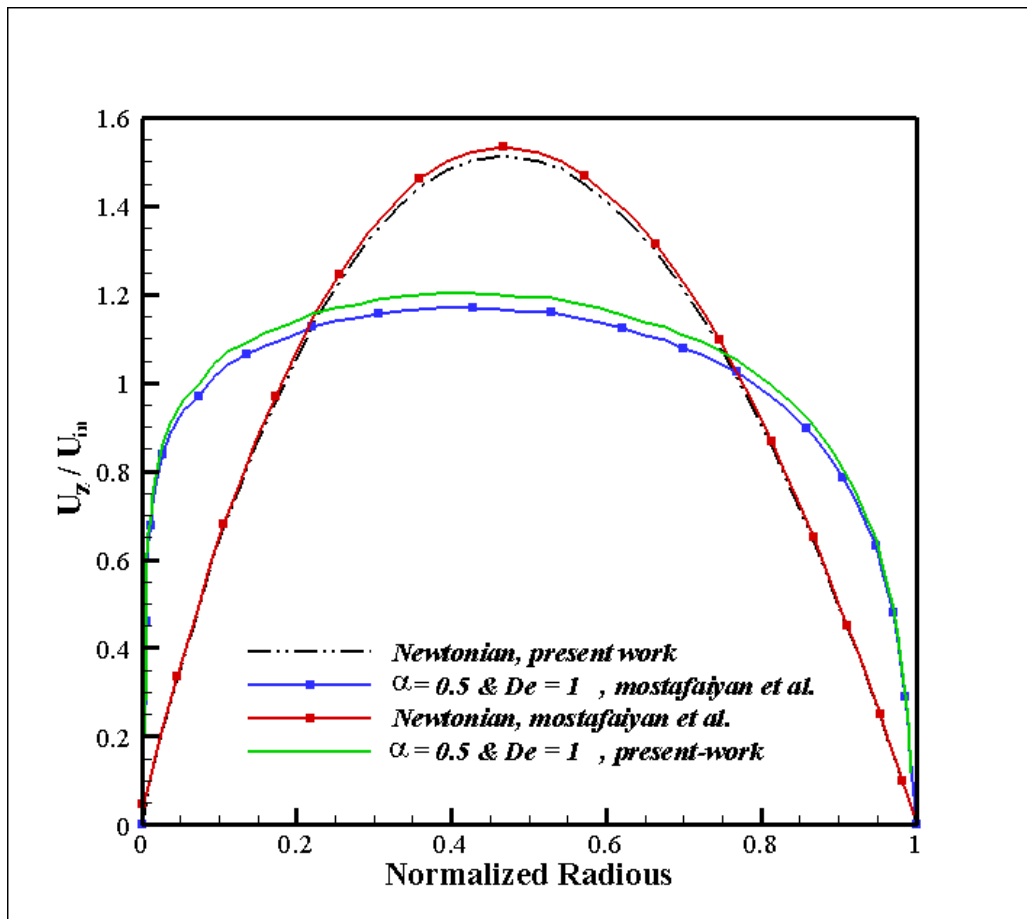


شکل ۴-۴: منحنی سرعت محوری سیال بر حسب موقعیت Z در شعاع $r = 0.1$ و به ازای زمان‌های مختلف حل

۴-۴-۴ اعتبار سنجی حل عددی

برای بررسی صحت حل عددی صورت گرفته و اطمینان از کارکرد درست حل گر، جریان سیال ویسکوالاستیک در فضای بین دو استوانه‌ی هم‌مرکز ولی بدون چرخش استوانه‌ی داخلی، شبیه‌سازی شده و با حل تحلیلی - تقریبی صورت گرفته در شرایط کاملاً مشابه، مقایسه شده است. مهدی مصطفائیان و همکاران [۱] به حل مسئله‌ی مذکور به صورت تحلیلی پرداختند و منحنی سرعت محوری در راستای شعاع استوانه‌ها را ارائه دادند. حل عددی انجام گرفته به ازای عدد دبرای ۱ و ضریب تحرک ۰.۵ می‌باشد. منحنی سرعت به دست آمده از حل تحلیلی، با منحنی سرعت حاصل از حل عددی، شباهت خوبی با یکدیگر دارند و مقادیر تا حد خوبی به یکدیگر نزدیک هستند. در شکل ۴-۶، منحنی سرعت‌های به دست آمده از هر دو روش آورده شده است. محققان نامبرده در حل تحلیلی خود، منحنی سرعت را در حالت جریان سیال نیوتنی نیز به دست آوردند. در اینجا با استفاده از حل عددی، مسئله‌ی مذکور با استفاده از حل گر نیوتنی شبیه‌سازی شده و منحنی سرعت حل عددی با منحنی سرعت به دست آمده از حل تحلیلی محققان نامبرده مقایسه شده است. در این

حالت نیز مطابقت خوبی بین حل عددی و تحلیلی وجود دارد. در شکل ۴-۶، مقایسه‌ای بین دو حل مذکور صورت گرفته است.



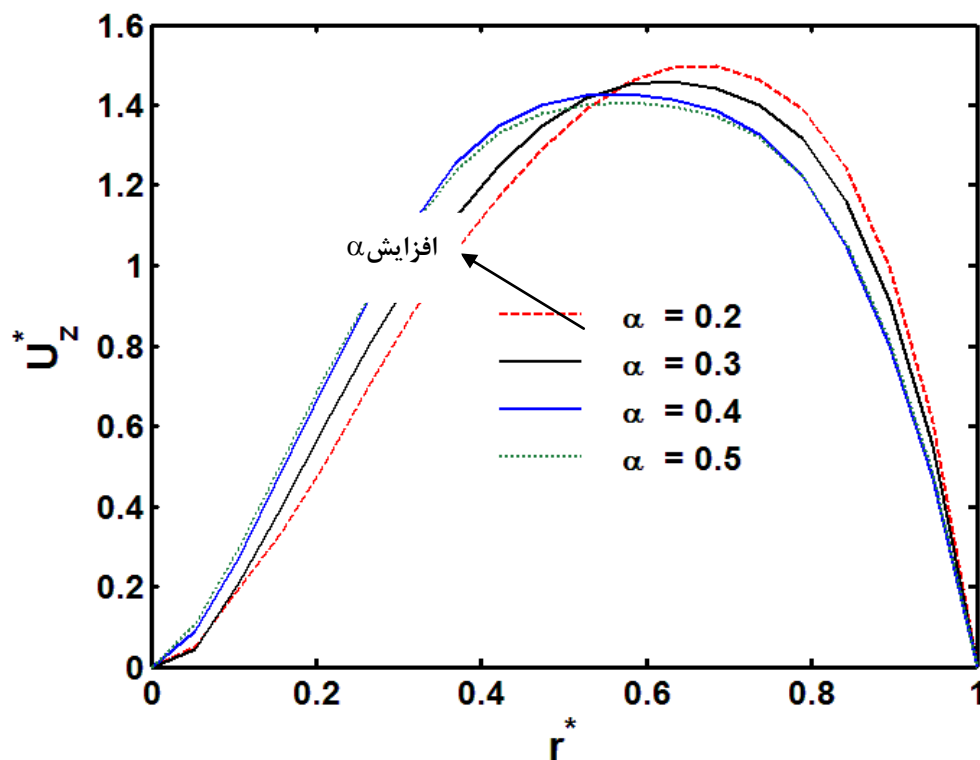
شکل ۴-۵ مقایسه‌ی بین منحنی‌های سرعت حاصل از حل عددی با حل تحلیلی صورت گرفته توسط محققان

۴-۵- بحث و نتایج

در این بخش نتایج حاصل از حل عددی ارائه شده و به بررسی اثرات پارامترهای مختلف همچون عدد رینولدز، عدد تیلور، عدد وایزنبرگ و ضریب تحرک معادله‌ی گزیکسبر مشخصه‌های جریان پرداخته می‌شود.

۴-۵-۱- تأثیر پارامتر α بر میدان سرعت محوری سیال

با افزایش ضریب تحرک سیال (α)، میزان خاصیت باریک شونده لزوجت نرخ برش، افزایش می‌یابد. همچنین چرخش استوانه‌ای داخلی موجب بالاتر بودن نرخ برش در نواحی مجاور به استوانه‌ای داخلی می‌گردد که این امر منجر به کمتر شدن مقدار لزجت در نواحی مجاور به استوانه‌ای داخلی می‌شود. کم شدن لزجت نیز باعث افزایش تغییرات سرعت محوری در این نواحی می‌گردد. از آنجایی که سیال تمایل به جریان یافتن در نواحی با لزجت کم دارد، منحنی سرعت به سمت استوانه‌ای داخلی متمایل شده و به دلیل بالاتر رفتن سرعت محوری در نواحی مجاور استوانه‌ای داخلی، منحنی سرعت در نواحی مرکزی تخت‌تر می‌گردد. اثر تغییرات پارامتر α به خوبی در منحنی سرعت شکل ۴-۷ قابل مشاهده است.

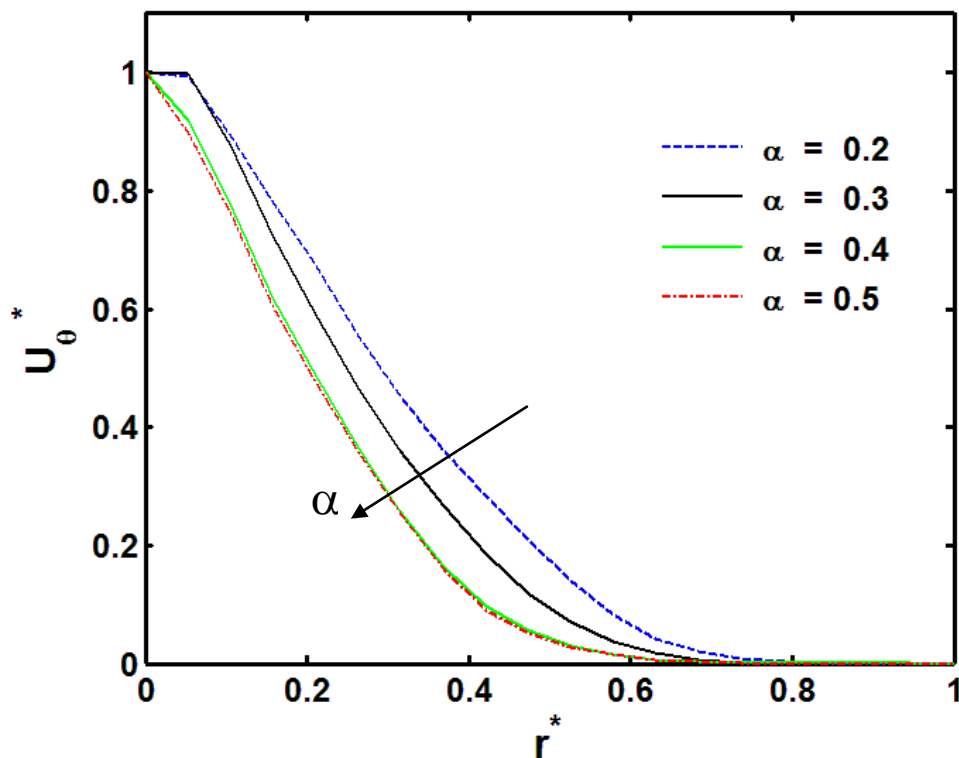


شکل ۴-۶ نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع و به ازای مقادیر مختلف α و

$$Ta = 38, Re = 45$$

۴-۵-۲- تأثیر پارامتر α بر میدان سرعت چرخشی سیال

با افزایش پارامتر α ، خاصیت باریک شونده لزوجت با نرخ برش افزایش می‌یابد. بنابراین سیال مجاور به استوانه‌ی چرخان داخلی به دلیل بالا بودن نرخ برش، لزوجت پایین‌تری نسبت به سایر نقاط دارد. از این رو تأثیر چرخش استوانه‌ی داخلی بر روی میدان سرعت سیال کاهش یافته و تغییرات سرعت چرخشی در نواحی مجاور استوانه‌ی داخلی افزایش می‌یابد. به دلیل کارتزین بودن مختصات حل صورت گرفته توسط نرم‌افزار، می‌توان با در نظر گرفتن مقطعی در یکی زوایای 0° ، 90° ، 270° و 360° درجه، سرعت دورانی سیال را بر حسب موقعیت شعاعی آن مشاهده نمود. در اینجا مقطعی در زاویه‌ی 90° درجه یا به عبارتی مقطعی در راستای محور y در نظر گرفته شده است. در اینجا سرعت U_x همان سرعت دورانی سیال (معادل سرعت U_θ در مختصات استوانه‌ای) خواهد بود. همان‌طور که در منحنی شکل ۵-۸ مشاهده می‌شود به ازای موقعیت شعاعی یکسان، سیالات با ضریب α پایین‌تر از سرعت چرخشی بالاتری برخوردار هستند و در واقع چرخش استوانه‌ی داخلی تأثیر بیشتری بر روی میدان سرعت سیال گذاشته است.

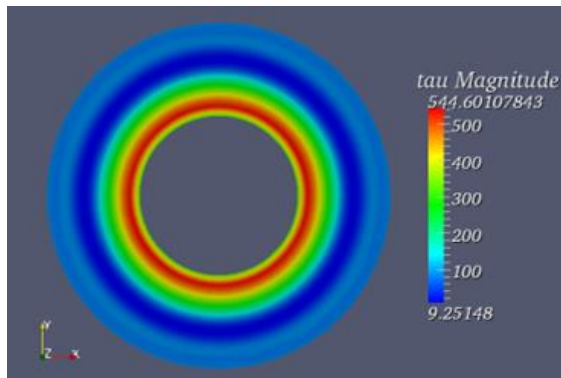


شکل ۴-۷ نمودار سرعت چرخشی بر حسب شعاع و به ازای ضرایب مختلف α و

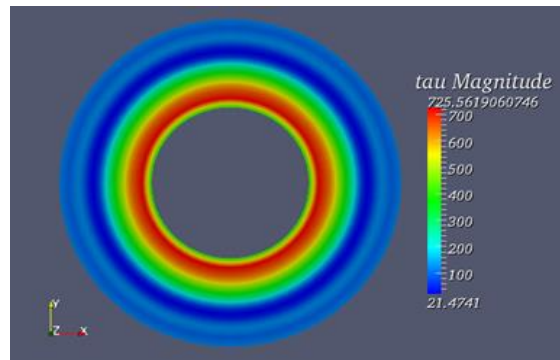
$$Ta = 38, Re = 45$$

۴-۵-۳- تأثیر پارامتر α بر میدان تنش در فضای آنالوس

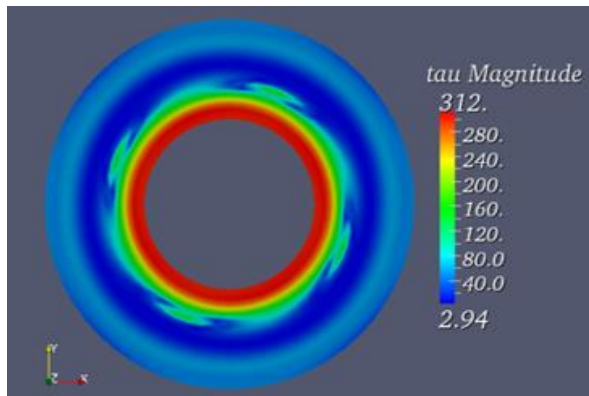
با بررسی کانتورهای استخراج شده از حل عددی مشخص می‌شود که با افزایش ضریب α ، تمامی مؤلفه‌های تنش (نرمال و برشی) کاهش می‌یابند. در شکل‌های ۹-۵ میدان‌های تنش وارد بر سیال به ازای ضرایب تحرک مختلف نشان داده می‌شوند. این کاهش در مقدار تنش نیز به خاطر افزایش خاصیت باریک شوندگی لزجت با افزایش نرخ برش می‌باشد.



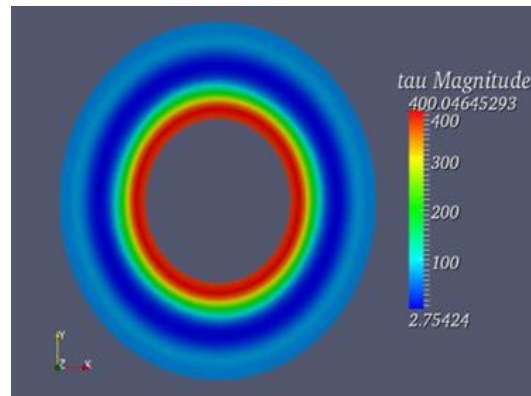
(ب)



(الف)



(ت)



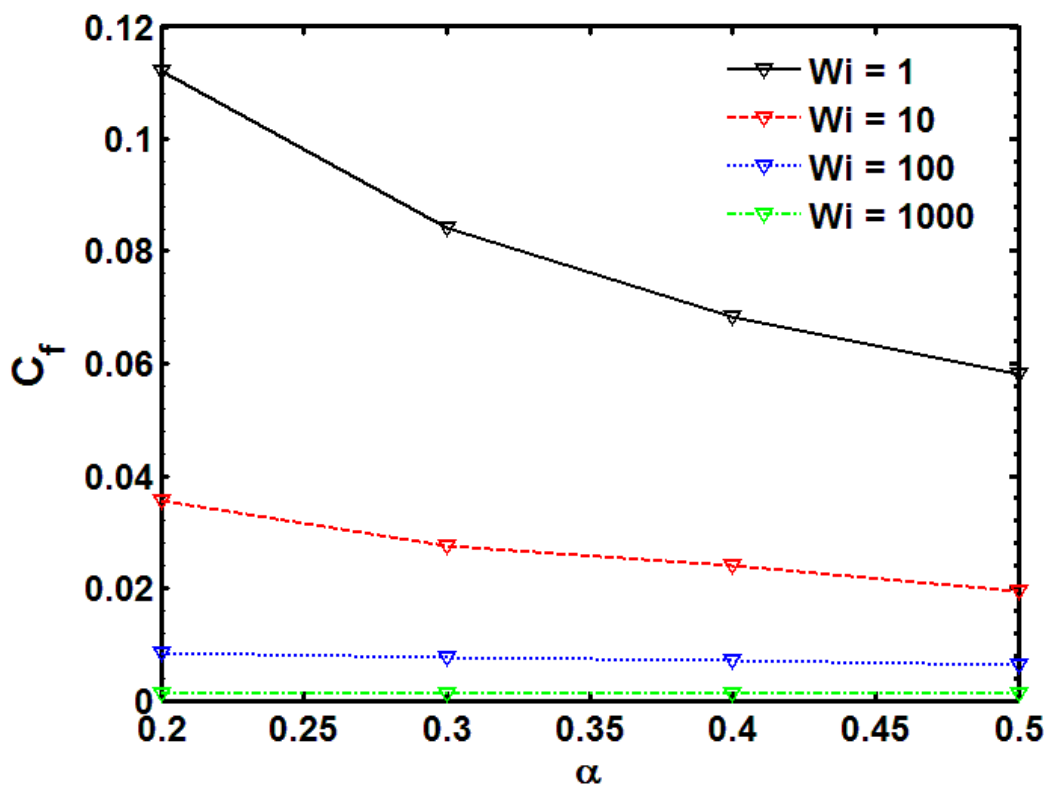
(پ)

شکل ۴-۸ توزیع تنش کل به ازای $Ta = 38$ ، $Re = 45$ ، $Wi = 750$ و (الف) $\alpha = 0.2$ (ب) $\alpha = 0.3$ (پ) $\alpha = 0.4$ (ت)

$$\alpha = 0.5$$

۴-۵-۴- تأثیر پارامتر α بر ضریب اصطکاک پوسته‌ای استوانه‌ای چرخان داخلی

با افزایش ضریب تحرک سیال، میزان لزجت مؤثر بر روی سطح استوانه‌ای چرخان داخلی کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش ضریب α و ثابت ماندن پارامترهای دیگر، میزان مؤلفه‌های تنش بر روی دیواره کاهش یافته که این عامل سبب کاهش ضریب اصطکاک دیواره‌ی استوانه‌ی داخلی می‌گردد. تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای با ضریب تحرک سیال در شکل ۵-۱۰ قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود به ازای اعداد وایزنبرگ پایین (خاصیت کم الاستیک) کاهش ضریب اصطکاک با افزایش ضریب α شدیدتر است و به تدریج با افزایش عدد وایزنبرگ وابستگی ضریب اصطکاک پوسته‌ای به ضریب α کاهش می‌یابد.

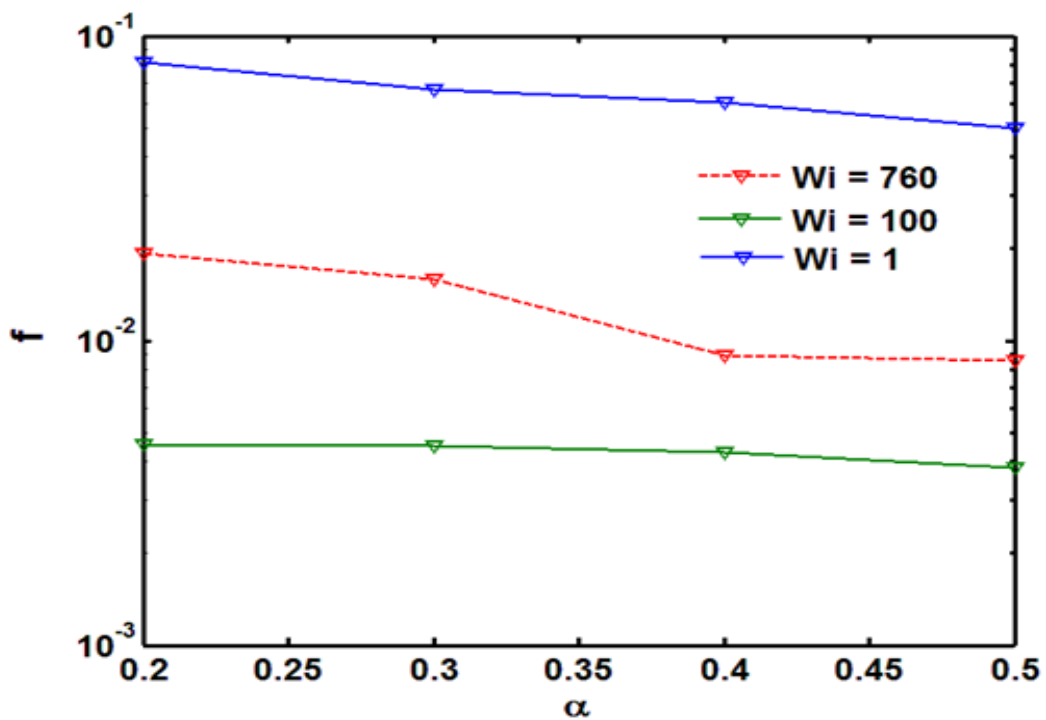


شکل ۴-۹ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای بر حسب ضریب تحرک α و به ازای اعداد

وایزنبرگ مختلف، $Re = 45$ ، $Ta = 38$.

۴-۵-۵- تأثیر پارامتر α بر ضریب افت داریسی - ویسباخ

با افزایش ضریب تحرک سیال، مقدار تنش وارده بر سیال و دیواره‌های آنالوس کاهش پیدا می‌کند. از این‌رو افت فشار در راستای محور آنالوس کاهش یافته و به دنبال آن ضریب افت داریسی - ویسباخ نیز کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۵-۱۱ مشاهده می‌شود، به ازای محدوده‌ی گسترده‌ای از اعداد وایزنبرگ، با افزایش ضریب تحرک مقدار f کاهش می‌یابد.

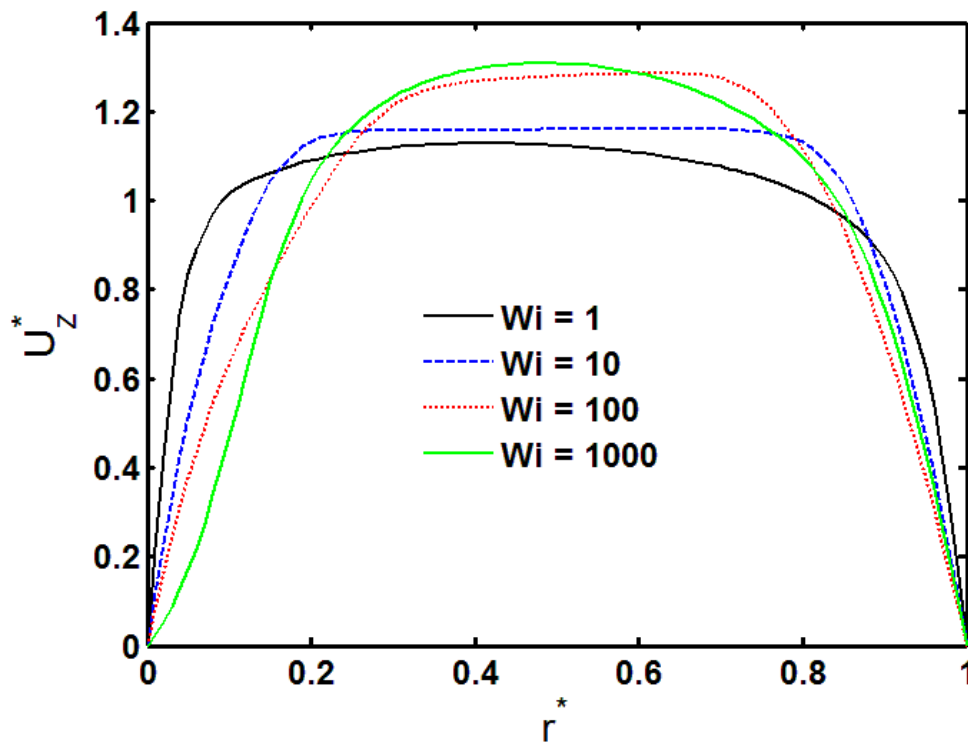


شکل ۴-۱۰ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک داریسی - ویسباخ با ضریب تحرک به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف و $\text{Re} = 38$ ، $Ta = 45$

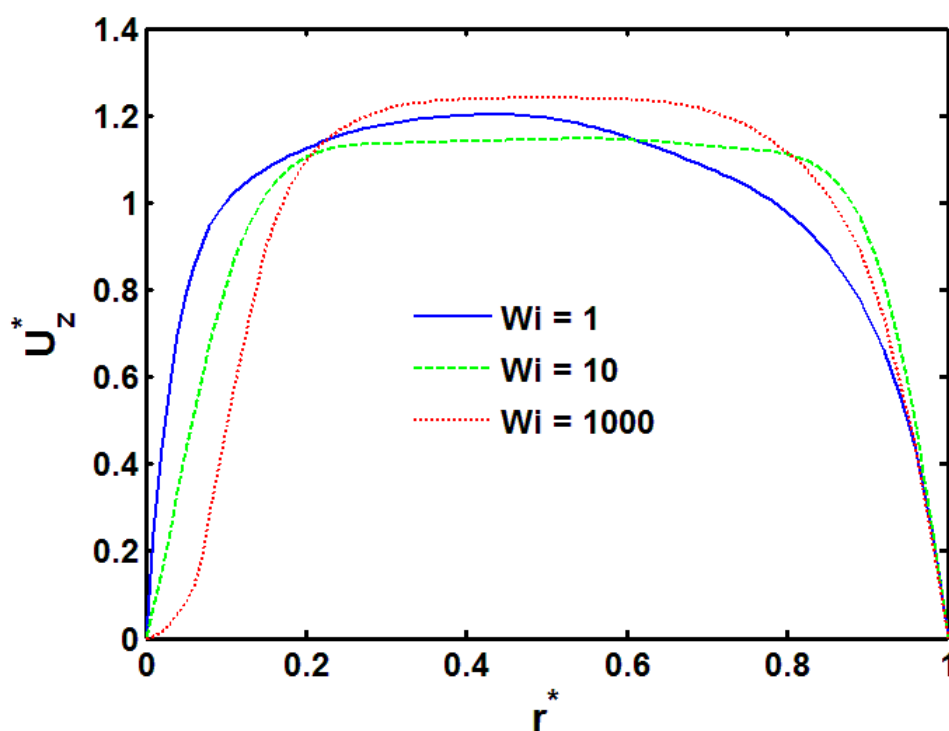
۴-۵-۶- تأثیر خاصیت الاستیک بر میدان سرعت محوری در قالب عدد وایزنبرگ

در اینجا افزایش عدد وایزنبرگ توسط افزایش ثابت زمانی رهایی از تنش سیال (λ) بوده است. پارامتر ثابت زمانی رهایی از تنش، ارتباط نزدیکی با ساختار و مشخصات مولکولی ماده‌ی پلیمری موجود در سیال حفاری دارد. همان‌طور که در منحنی شکل‌های ۵-۱۲ و ۵-۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش ثابت زمانی رهایی از تنش سیال و یا به عبارت دیگر افزایش عدد وایزنبرگ، تغییرات سرعت محوری در راستای شعاعی در ناحیه‌ی مجاور به استوانه‌ی داخلی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار سرعت محوری بر روی استوانه‌ی داخلی صفر می‌باشد، به نوعی تأثیر استوانه‌ی داخلی بر روی میدان سرعت محوری در وایزنبرگ‌های بالاتر، بیشتر خواهد بود و باعث خواهد شد تغییرات سرعت

محوری در راستای شعاع، با افزایش خاصیت الاستیک کاهش یابد. همچنین با توجه به شکل مذکور می‌توان گفت که در لزجت‌های پایین‌تر (نواحی مجاور استوانه‌ی داخلی)، تأثیر خاصیت الاستیک بر روی میدان سرعت سیال بیشتر خواهد بود.



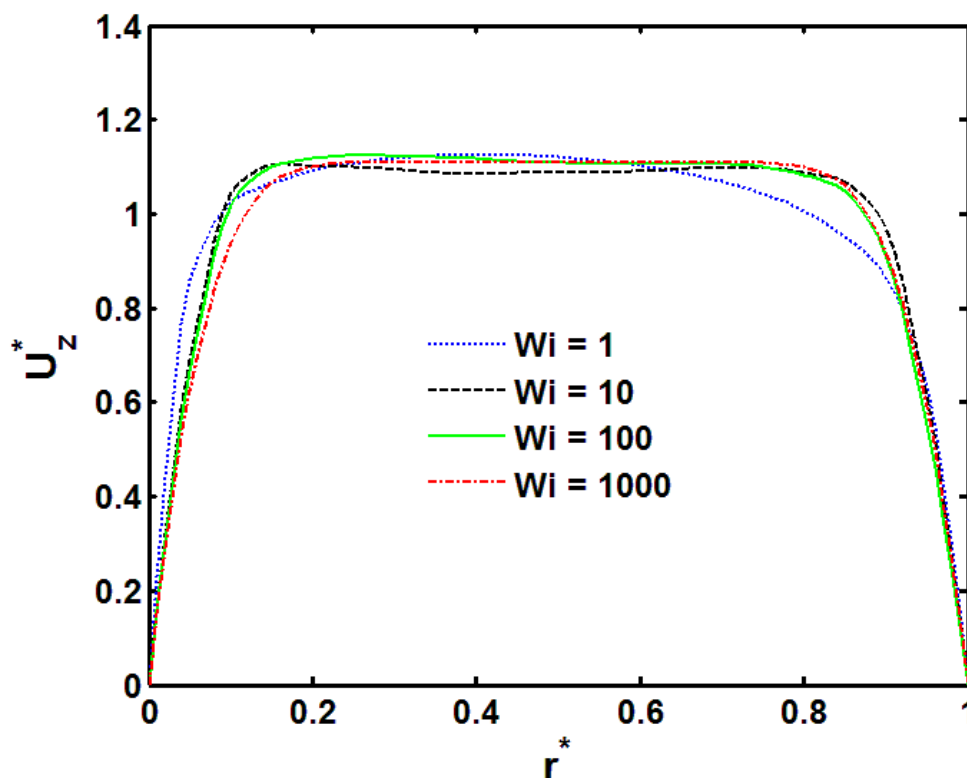
شکل ۴-۱ نمودار سرعت محوری بر حسب موقعیت شعاعی به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف و $Re = 45$ ، $Ta = 38$ و $\alpha = 0.5$



شکل ۴-۱۲ نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع و به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف و

$$Ta = 38, Re = 45, \alpha = 0.2$$

برای مشخص تر شدن تأثیر خاصیت الاستیک بر روی میدان سرعت محوری، حل برای حالت بدون چرخش استوانه‌ای داخلی نیز انجام گرفته است. همان‌طور که در شکل ۵-۱۴ مشاهده می‌گردد، در حالتی که استوانه‌ای داخلی ساکن است تغییرات خاصیت الاستیک تأثیر کمی بر روی میدان سرعت محوری دارد. به عبارت دیگر، چرخش استوانه‌ای داخلی و بوجود آمدن سرعت چرخشی سیال، موجب اثر پذیری بیشتر میدان سرعت محوری با تغییرات خاصیت الاستیک می‌گردد.



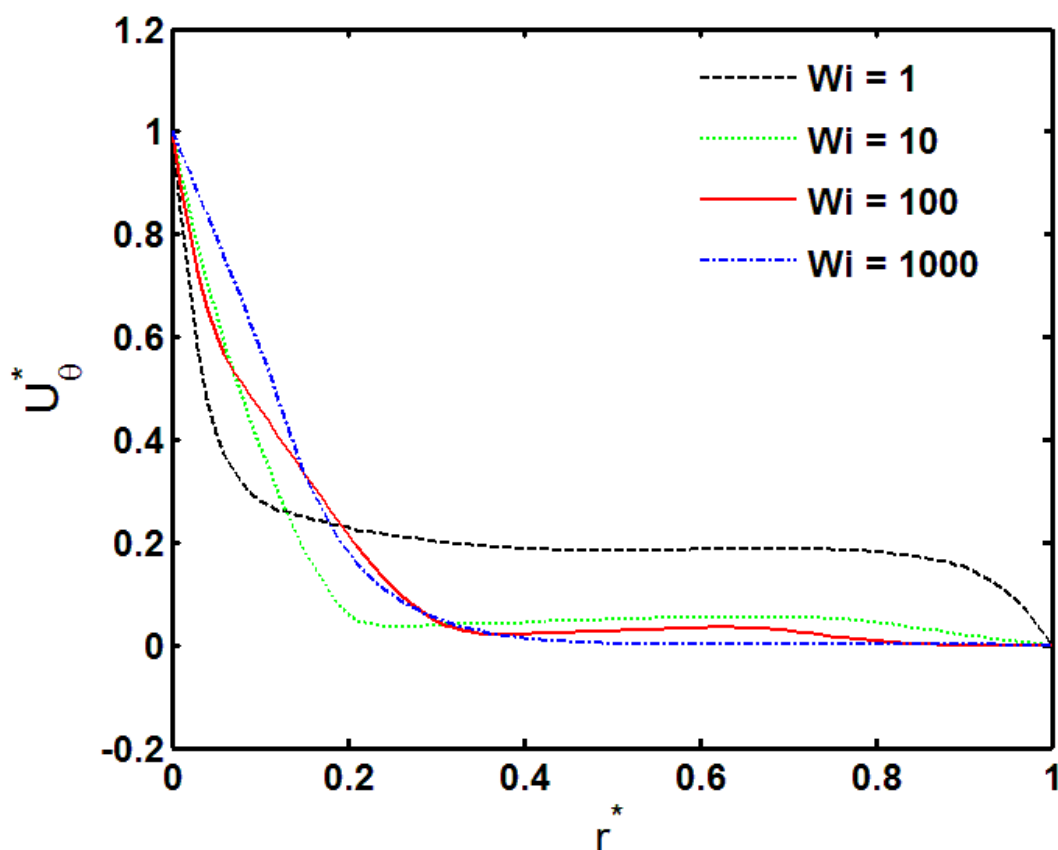
شکل ۴-۱۳ نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع و به ازای وایزنبرگ‌های مختلف و

$$Re = 45, \alpha = 0.5, Ta = 0$$

۴-۵-۷- تأثیر عدد وایزنبرگ بر میدان سرعت چرخشی

همان‌طور که در منحنی شکل ۵-۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش خاصیت الاستیک سیال و به دنبال آن افزایش عدد وایزنبرگ، تأثیر چرخش استوانه‌ای داخلی بر روی میدان سرعت سیال افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نواحی مجاور استوانه‌ای داخلی، سرعت چرخشی سیال با افزایش خاصیت الاستیک، افزایش می‌یابد. همچنین با دور شدن از استوانه‌ای داخلی، ابتدا مقدار سرعت چرخشی سیال کاهش یافته و سپس در ناحیه‌ای مقدار سرعت چرخشی ثابت مانده و حتی اندکی نیز افزایش یافته و سپس دوباره کاهش می‌یابد. این روند در محدوده‌ی گسترده‌ای از اعداد وایزنبرگ مشاهده می‌شود. اما با افزایش بسیار زیاد خاصیت الاستیک و به تبع آن عدد وایزنبرگ، با دور شدن از استوانه‌ای داخلی مقدار سرعت چرخشی سیال دائماً کاهش می‌یابد که این کاهش ابتدا با شیبی تند و سپس مقدار سرعت با تغییرات کمی همراه است. همچنین در نواحی مجاور به استوانه‌ای خارجی با افزایش خاصیت الاستیک مقدار سرعت چرخشی سیال کاهش می‌یابد

که نشان‌دهنده‌ی تأثیر بیشتر استوانه‌ی ساکن بر روی سیال مجاور به آن می‌باشد. در شکل ۵-۱۵ حالتی مورد نظر است که نسبت سرعت محوری ورودی سیال به سرعت چرخش استوانه‌ی داخلی ۳.۹ است و جریان محوری بر جریان چرخشی غلبه دارد. در این حالت ضریب تحرک سیال ۰.۵ در نظر گرفته شده است که نشان از خاصیت شدید باریک شوندگی لزجت با نرخ برش می‌باشد. از این‌رو مقدار لزجت در نواحی مجاور به دیواره‌های استوانه‌های داخلی و خارجی ناچیز و در ناحیه‌ی مرکزی بین دو استوانه مقدار آن بالا خواهد بود. در نواحی مجاور استوانه‌ی داخلی و با حرکت به سوی فضای مرکز بین دو استوانه، مقدار لزجت افزایش زیادی پیدا می‌کند در صورتی که مقادیر تنش‌های برشی تغییر چندانی نمی‌کند و بنابراین نرخ برش (تغییرات سرعت چرخشی و محوری در راستای شعاع) مقدار بالایی خواهد بود. در نواحی مرکزی بین دو استوانه تغییرات لزجت و تنش‌های برشی هر دو مقادیر اندکی بوده و لذا نرخ برش (تغییرات مؤلفه‌های سرعت) ناچیز می‌باشد. در نزدیکی استوانه‌ی خارجی دوباره لزجت کاهش یافته و به دلیل کاهش مقادیر تنش‌های برشی، نرخ برش افزایش زیادی پیدا می‌کند. با توجه هم‌زمان به منحنی‌های سرعت محوری و چرخشی مشخص می‌شود که به ازای اعداد وایزنبرگ مختلف، در ناحیه‌ی مشخصی از موقعیت شعاعی، مقادیر سرعت‌های محوری و چرخشی ثابت باقی می‌ماند. این ناحیه با افزایش عدد وایزنبرگ این محدودتر می‌شود.

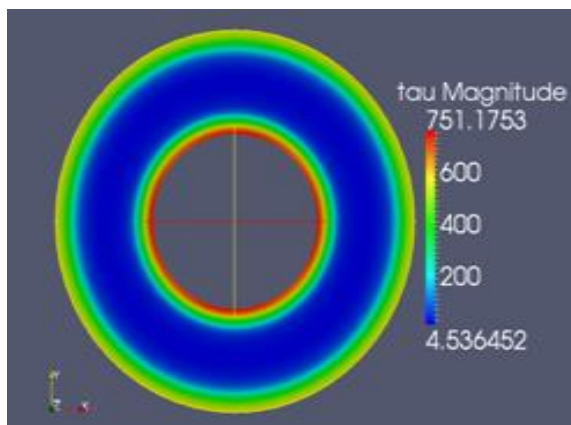


شکل ۴-۱۴ نمودار سرعت چرخشی بر حسب موقعیت شعاعی به ازای وایزنبرگ‌های مختلف و

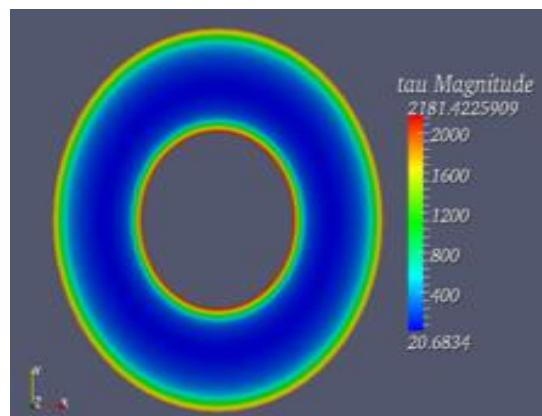
$$Ta = 38, Re = 45, \alpha = 0.5$$

۴-۵-۸- تأثیر عدد وایزنبرگ بر میدان تنش در فضای آنالوس

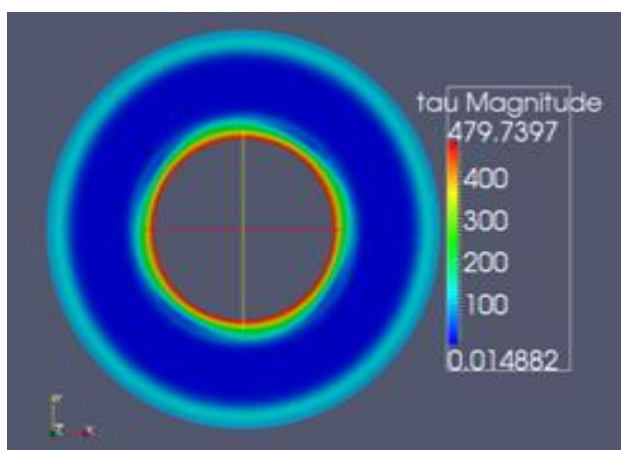
همان‌طور که در کانتورهای شکل ۵-۱۶ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد وایزنبرگ (افزایش خاصیت الاستیک)، ابتدا میزان تنش کل وارده بر سیال، کاهش زیادی یافته و سپس اندکی افزایش می‌یابد. با بررسی کانتورهای مرتبط به تمامی مؤلفه‌های تنش، مشخص می‌شود که با افزایش عدد وایزنبرگ تمامی مؤلفه‌های تنش (نرمال و شعاعی) در فضای آنالوس، ابتدا کاهش زیادی پیدا کرده و سپس در وایزنبرگ‌های بالا روند تغییرات افزایش یافته و مقادیر مؤلفه‌های تنش اندکی افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی مؤلفه‌های تنش، مشخص می‌شود که تنش نرمال محوری (τ_{zz})، بیشترین سهم را در مقدار کل تنش دارد



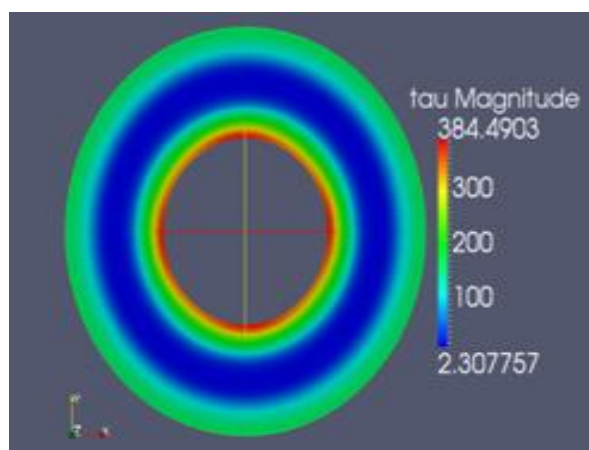
Wi = 10 (ب)



Wi = 1 (الف)



Wi = 1000 (ت)

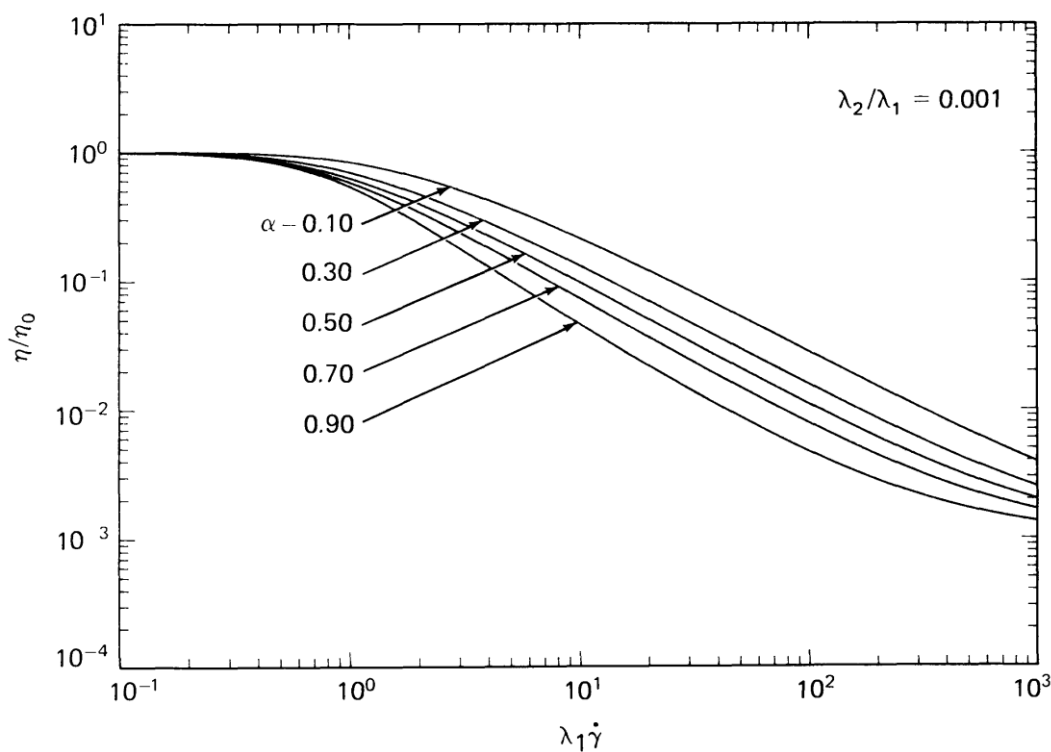


Wi = 100 (پ)

شکل ۴-۱۵ توزیع تنش کل به ازای $\alpha = 0.5$, $Re = 45$, $Ta = 38$ و (الف) $Wi = 1$ (ب) $Wi = 10$ (پ) $Wi = 100$ (ت) $Wi = 1000$

برای تحلیل تغییرات تنش با خاصیت الاستیک، می‌توان از نمودار لزجت بر حسب وایزنبرگ موجود در کتاب برد [۳] استفاده کرد. این نمودار مربوط به جریانی از سیال می‌باشد که در آن، تنها برش اتفاق افتاده است. در این نمودار (شکل ۵-۱۷)، تأثیر پارامترهایی همچون ضریب تحرک و عدد وایزنبرگ بر روی مقدار لزجت برشی، به صورت منحنی‌های مختلف به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است که در شکل مذکور نسبت لزجت حلال نیوتنی به لزجت حل شونده‌ی پلیمری در نرخ برش

صفر ($\lambda_2/\lambda_1 = \eta_s/\eta_p$)، مقداری ثابت است. همان‌طور که در شکل ۵-۱۷ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد وایزنبرگ در تمامی α ها، مقدار لزجت برشی کاهش می‌یابد و از این‌رو کاهش مقادیر تنش برشی با افزایش وایزنبرگ را می‌توان با استفاده از آن توجیه کرد

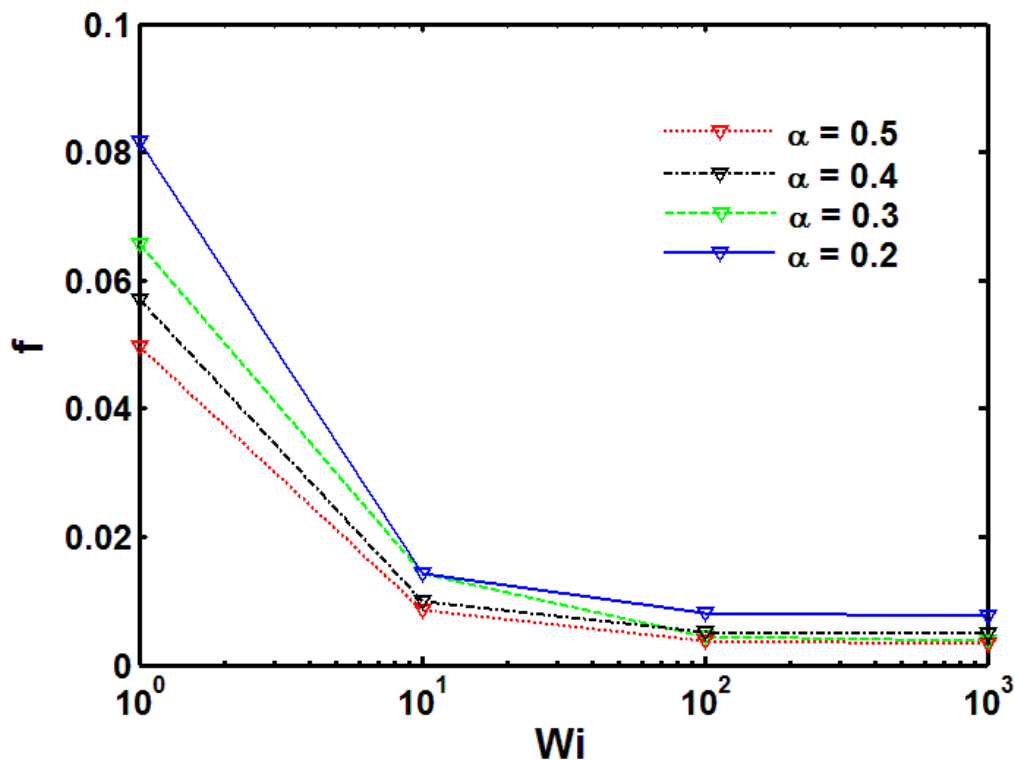


شکل ۴-۱۶ نمودار تغییرات لزجت برشی با عدد وایزنبرگ به ازای مقادیر مختلف α [۳۰].

۴-۵-۹- تأثیر عدد وایزنبرگ بر ضریب افت داریسی - ویسباخ

همان‌طور که در نمودار شکل ۵-۱۸ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد وایزنبرگ ابتدا ضریب افت اصطکاکی کاهش شدیدی پیدا می‌کند و سپس این روند کاهشی کند شده تا اینکه در وایزنبرگ‌های بالا، به ازای افزایش عدد وایزنبرگ (خاصیت الاستیک) در تمامی α ها، مقدار ضریب اصطکاک ثابت می‌ماند. همان‌طور که در شکل ۵-۱۷ مشاهده شد، با افزایش عدد وایزنبرگ ابتدا لزجت برشی کاهش شدیدی پیدا می‌کند که در اثر آن ضریب افت اصطکاکی نیز کاهش زیادی را تجربه می‌کند. سپس با

رسیدن به اعداد وایزنبرگ بالا، مقدار لزجت برشی تغییر چندانی نداشته و به دنبال آن ضریب افت نیز با تغییر چندانی مواجه نمی‌شود.



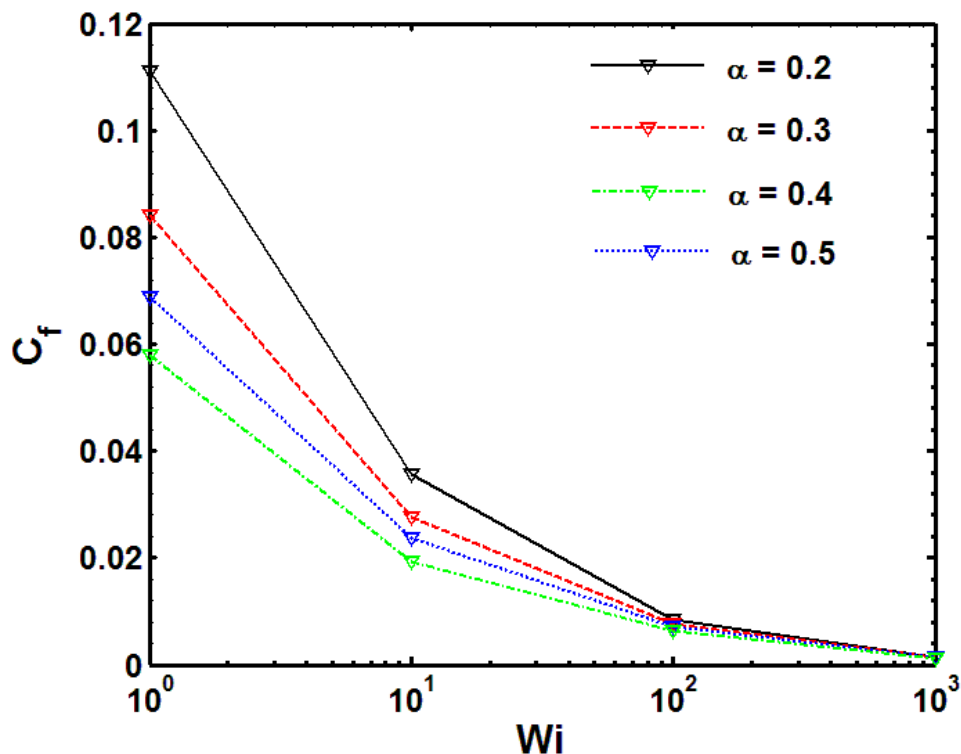
شکل ۴-۱۷ نمودار تغییرات ضریب افت اصطکاکی با عدد وایزنبرگ به ازای ضرایب مختلف α و

$$Ta = 38, Re = 45$$

۴-۵-۱۰- تأثیر عدد وایزنبرگ بر ضریب اصطکاک پوسته‌ایاستوانه‌ای داخلی

اثر عدد وایزنبرگ (خاصیت الاستیک) بر روی ضریب اصطکاک پوسته‌ای مشابه اثر آن بر ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ جریان است. همان‌طور که در شکل ۵-۱۹ نیز دیده می‌شود، با افزایش عدد وایزنبرگ ابتدا ضریب اصطکاک (c_f) افت شدیدی دارد و سپس شدت تغییرات کم شده تا اینکه به رسیدن عدد وایزنبرگ به مقادیر بالا، ضریب اصطکاک تغییر چندانی پیدا نمی‌کند. دلیل این رفتار، کاهش لزجت برشی با افزایش خاصیت الاستیک در محدوده‌ی وایزنبرگ پایین و متوسط است. به

طوری که با رسیدن عدد وایزنبرگ به مقادیر بالا، لزجت برشی و به تبع آن مقدار تنش‌های برشی، تغییر چندانی پیدا نمی‌کند و ضریب اصطکاک پوسته‌ای وارد بر استوانه‌ی داخلی نیز ثابت می‌ماند.



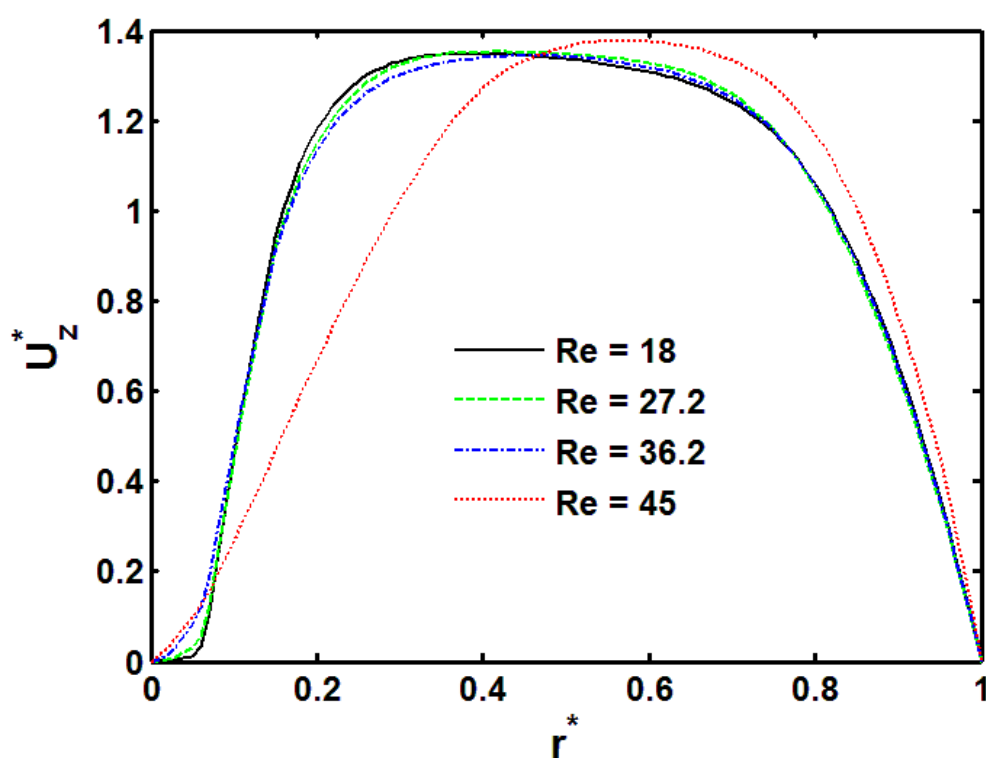
شکل ۴-۱۸ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای با عدد وایزنبرگ به ازای ضرایب α مختلف و

$$Ta = 38, Re = 45$$

۴-۵-۱۱- تأثیر عدد رینولدز بر میدان سرعت محوری

همان‌گونه که در نمودار شکل ۵-۲۰ مشاهده می‌شود، در رینولدزهای پایین‌تر، منحنی سرعت محوری به سمت استوانه‌ی داخلی متمایل است. به طوری که موقعیت شعاعی نقطه‌ای با سرعت ماکزیمم، به استوانه‌ی داخلی نزدیک‌تر است. علت این امر، پایین‌تر بودن لزجت در نواحی مجاور به استوانه‌ی داخلی (نرخ برش بالا و خاصیت باریک‌شوندگی لزجت) می‌باشد. اما با افزایش نرخ برش و شکسته شدن زنجیره‌های پلیمری و هم‌راستا شدن مولکول‌ها با خط جریان، خاصیت باریک‌شوندگی لزجت با نرخ برش، کاهش یافته و لزجت سیال با افزایش نرخ برش ثابت می‌ماند. با افزایش دبی ورودی به فضای آنالوس و به دنبال آن افزایش عدد رینولدز، میزان نرخ برش افزایش می‌یابد. به دلیل

بالا تر بودن نرخ برش در نواحی مجاور به استوانه‌ی، با توجه به مطالبی که گفته شد، افزایش عدد رینولدز و به دنبال آن نرخ برش در این نواحی باعث کاهش لزجت نمی‌شود. از سویی دیگر لزجت سیال موجود در نواحی دیگر هنوز با افزایش نرخ برش، تمایل به کاهش دارد و تمایل بیشتر سیال به جریان یافتن در نواحی با لزجت کمتر سبب افزایش سرعت سیال در نواحی مرکزی بین دو استوانه می‌گردد.

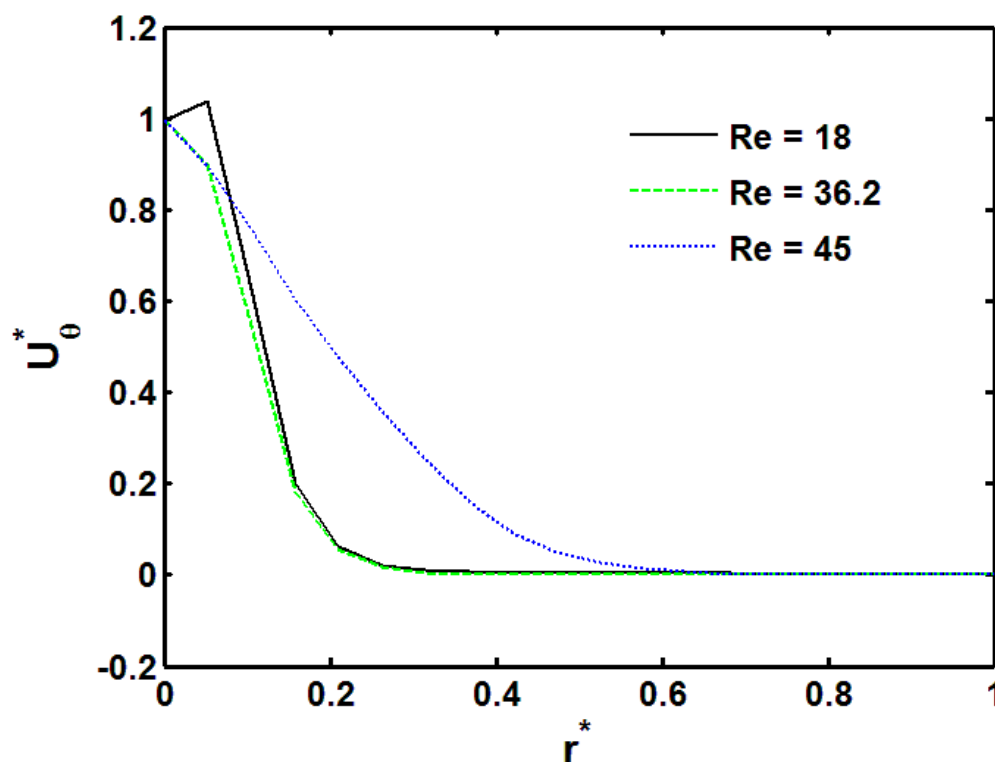


شکل ۴-۱۹ نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع به ازای رینولدزهای مختلف و

$$Ta = 38, Wi = 750, \alpha = 0.5$$

۴-۵-۱۲- تأثیر عدد رینولدز بر میدان سرعت چرخشی

با توجه به شکل ۵-۲۱، با افزایش عدد رینولدز و ثابت ماندن عدد تیلور، تغییرات سرعت چرخشی در ناحیه‌ی بزرگتری از آنالوس اتفاق می‌افتد. هنگامی که عدد رینولدز و به تبع آن مقدار نرخ برش پایین است، کاهش لزجت فقط در ناحیه‌ی محدود به مجاور استوانه‌ی داخلی است (به دلیل بالا بودن نرخ برش) و به دنبال آن تغییرات زیادی در مقدار سرعت چرخشی، در ناحیه‌ی مجاور استوانه‌ی چرخان داخلی رخ می‌دهد. به طوری که سرعت چرخشی سیال در ناحیه‌ی گسترده‌ای از آنالوس نزدیک صفر می‌باشد. اما با افزایش عدد رینولدز و گسترده شدن پدیده‌ی کاهش لزجت در سایر نواحی، تغییرات سرعت چرخشی بر حسب شعاع، در نواحی مرکزی آنالوس افزایش می‌یابد.

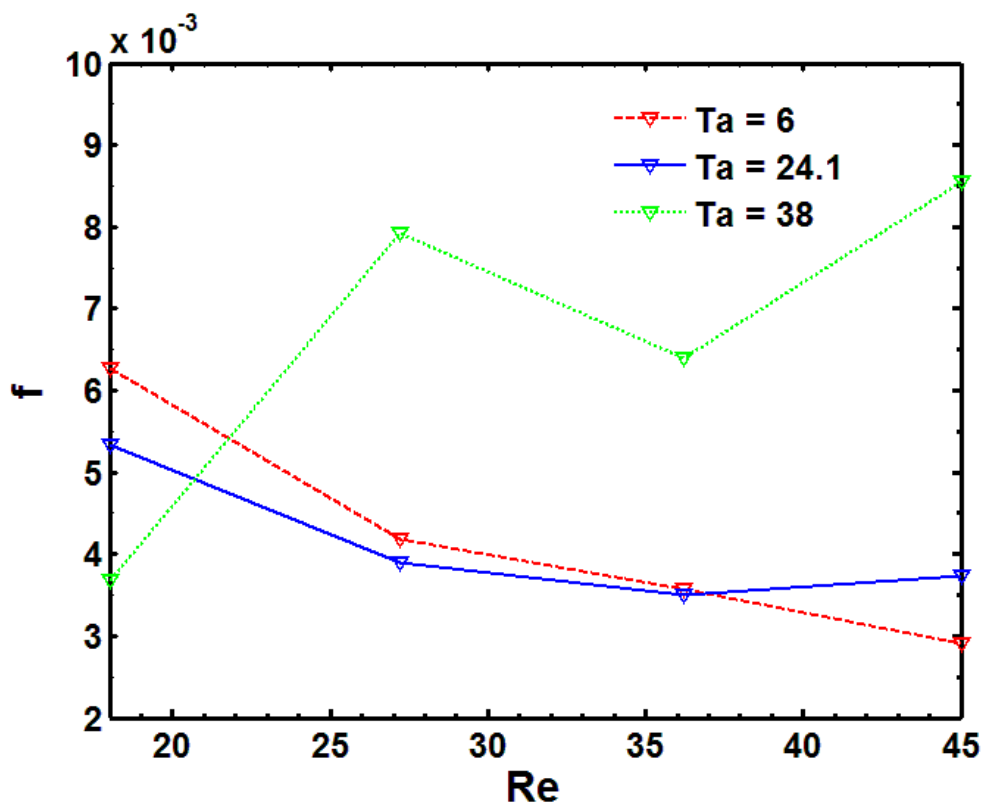


شکل ۴-۲۰ نمودار سرعت چرخشی بر حسب شعاع به ازای اعداد رینولدز مختلف و

$$Ta = 38, Wi = 750, \alpha = 0.5$$

۴-۵-۱۳- تأثیر عدد رینولدز بر ضریب افت دارسی - ویسباخ

با افزایش دبی جریان ورودی به آنالوس و به تبع آن افزایش عدد رینولدز، تغییرات فشار در راستای محوری افزایش می‌یابد. اما با توجه به تعریف ضریب افت اصطکاک دارسی - ویسباخ و تابعیت این ضریب با عکس مربع پارامتر سرعت، در نهایت در اکثر مواقع ضریب f با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. با توجه به پیچیده بودن رفتار سیالات ویسکوالاستیک، در محدوده‌های خاصی از پارامترها، افزایش ضریب اصطکاک با افزایش رینولدز مشاهده می‌شود. در سیالات غیر نیوتنی، لزجت و نرخ برش پارامترهایی مرتبط با یکدیگر هستند. از اینرو در اینجا ابتدا سرعت جریان ورودی به آنالوس مشخص شده و سپس با استفاده از این سرعت و سرعت دورانی استوانه‌ی داخلی، نرخ برش مرجع تعیین و لزجت و عدد رینولدز مرجع تعیین می‌گردند. در منحنی شکل وابستگی ضریب افت اصطکاکی به سرعت ورودی سیال نشان داده می‌شود.

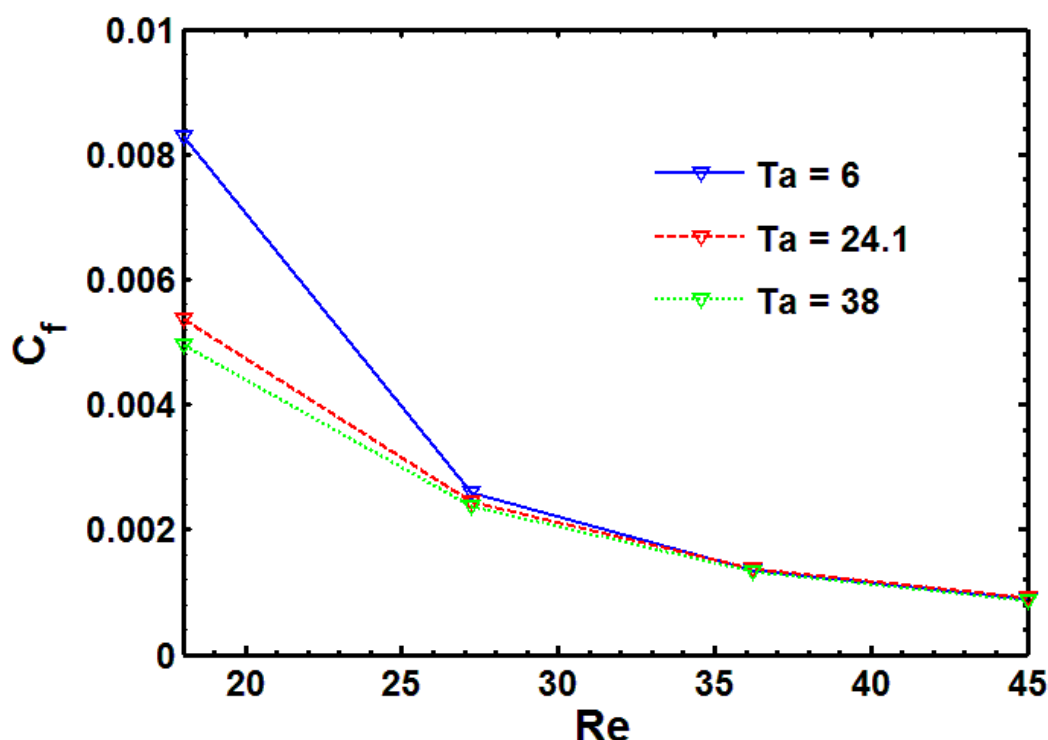


شکل ۴-۲۱ نمودار تغییرات ضریب افت اصطکاکی f بر حسب عدد رینولدز به ازای اعداد تیلور مختلف و

$$Wi = 750, \alpha = 0.5$$

۴-۵-۱۴- تأثیر عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک پوسته‌ای استوانه‌ای داخلی

با افزایش عدد رینولدز در تیلورهای ثابت، میزان ضریب اصطکاک پوسته‌ای استوانه‌ای چرخان افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۵-۲۳ مشاهده می‌شود، در رینولدزهای پایین‌تر، کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز بیشتر است. با افزایش عدد رینولدز نرخ برش وارده بر سیال افزایش می‌یابد و با توجه به خاصیت باریک شونده‌ی لزجت در سیالات پلیمری، مقدار لزجت نیز کاهش می‌یابد. در اینجا تأثیر کاهش لزجت بر روی مقدار تنش بیشتر از افزایش نرخ برش بوده و در نهایت مقدار تنش‌های برشی وارد بر دیواره‌ی استوانه‌ی داخلی کاهش می‌یابد. کاهش مقادیر تنش‌های برشی روی دیواره و کاهش سرعت مرجع سیال، هر دو در جهت کاهش ضریب اصطکاک پوسته‌ای مؤثر واقع می‌شوند. به تدریج با افزایش عدد رینولدز و نرخ برش سیال، خاصیت باریک شونده‌ی لزجت کاهش یافته و این امر باعث کاهش تغییرات لزجت و مؤلفه‌های تنش برشی بر روی استوانه‌ی داخلی با افزایش رینولدز می‌گردد. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، تغییرات ضریب اصطکاک در رینولدزهای بالا اندک است.



شکل ۴-۲۲ منحنی تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای با عدد رینولدز به ازای اعداد تیلور مختلف و

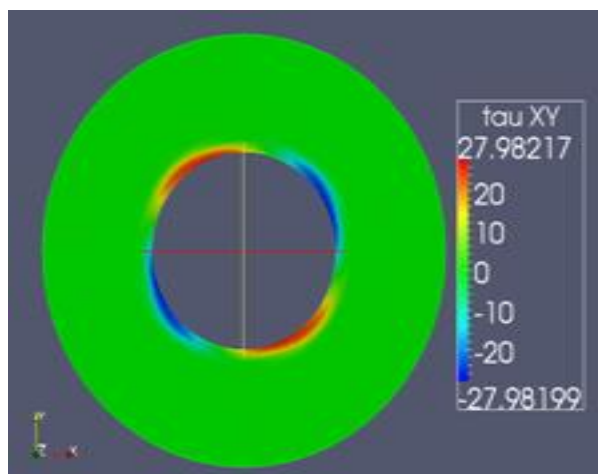
$$Wi = 750, \alpha = 0.5$$

۴-۵-۱۵- تأثیر عدد رینولدز بر میدان تنش در فضای آنالوس

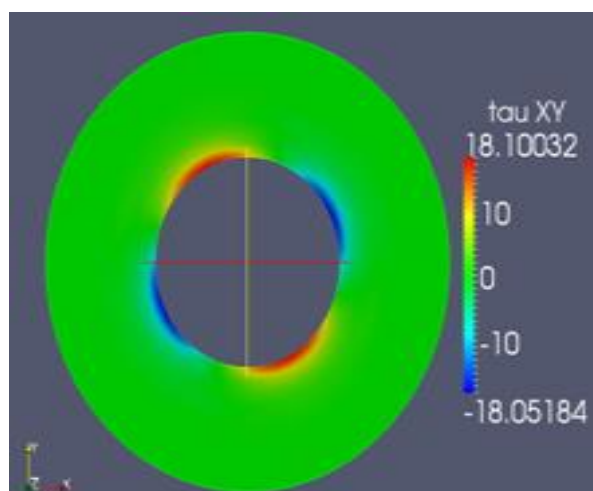
با توجه به کانتورهای میدان تنش داخل آنالوس، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت محوری سیال، ابتدا مقدار ماکزیمم مؤلفه‌های تنش موجود در آنالوس افزایش و سپس به دلیل کاهش لزجت سیال با افزایش نرخ برش، مقدار آن کاهش می‌یابد. در واقع ابتدا اثر افزایش نرخ برش نسبت به اثر کاهش لزجت غالب بوده و مؤلفه‌های تنش با افزایش رینولدز جریان، افزایش می‌یابند ولی سپس تأثیر لزجت غالب شده و مقادیر مؤلفه‌های تنش کاهش می‌یابند. برای نمونه کانتورهای مؤلفه‌های تنش τ_{xy} و τ_{zz} به ازای رینولدزهای مختلف، در شکل‌های ۵-۲۴ آورده شده‌اند.



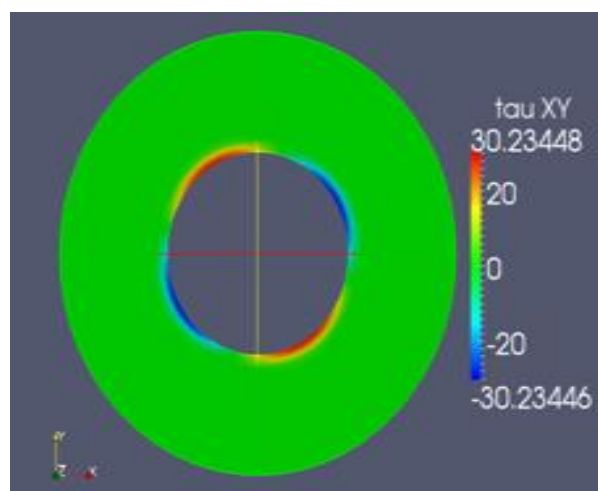
Re = ۲۷.۲ (ب)



Re = ۱۸ (الف)

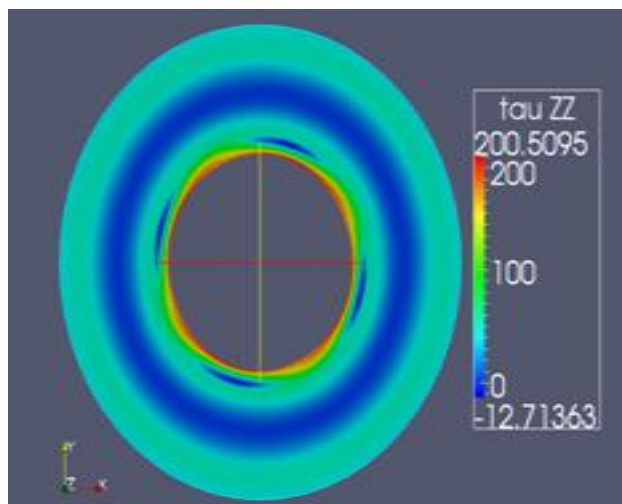


Re = ۴۵ (ت)

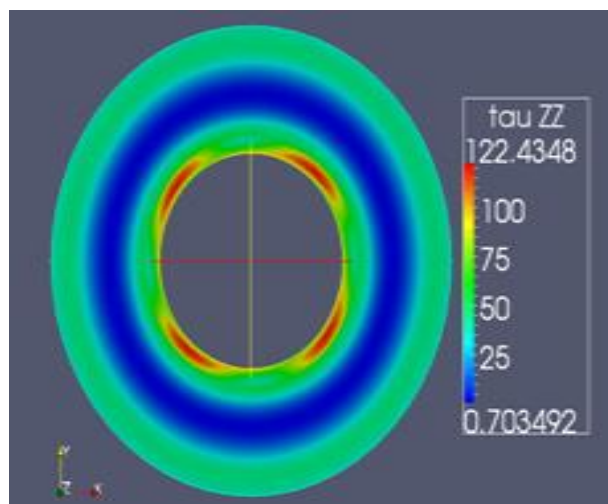


Re = ۳۶.۲ (پ)

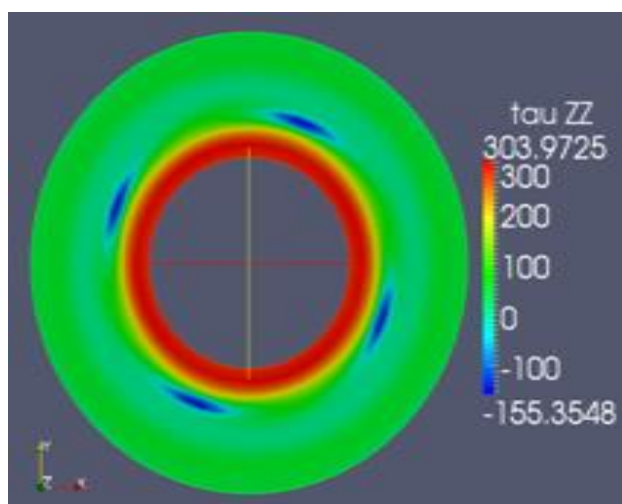
شکل ۴-۲۳ توزیع تنش برشی τ_{xy} به ازای $Ta=38, \alpha=0.5, Wi=750$ و الف) $Re = 18$ ب) $Re = 27.2$ پ) $Re = 36.2$ ت) $Re = 45$



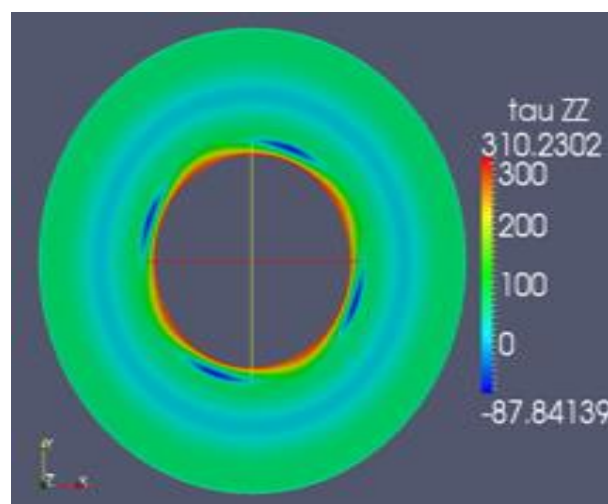
ب) $Re = 27.2$



الف) $Re = 18$



ت) $Re = 45$



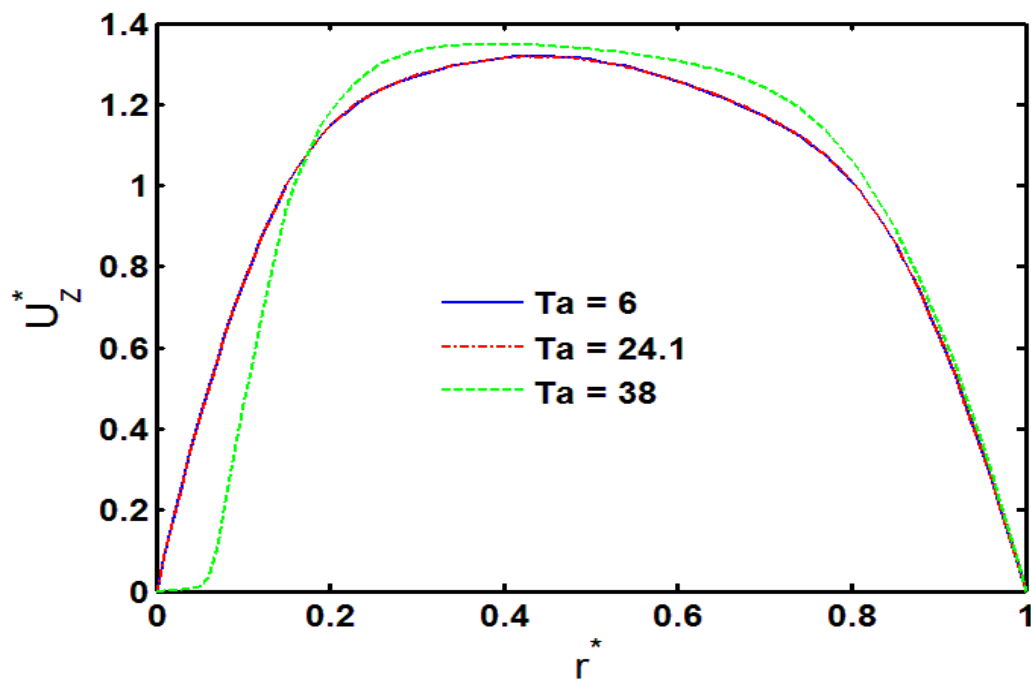
پ) $Re = 36.2$

شکل ۴-۲۴ توزیع تنش نرمال τ_{zz} به ازای $Ta = 38$, $\alpha = 0.5$, $Wi = 750$ و الف) $Re = 18$ ب) $Re = 27.2$ پ) $Re = 36.2$ ت) $Re = 45$

۴-۵-۱۶- تأثیر عدد تیلور بر میدان سرعت محوری سیال

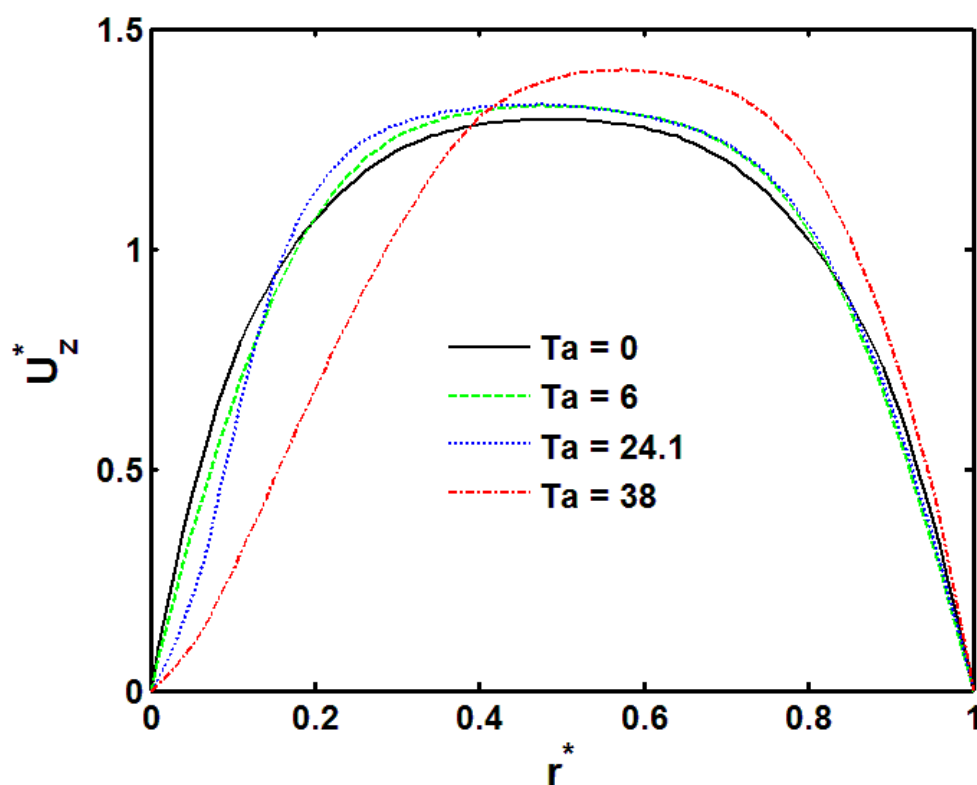
با افزایش سرعت چرخشی استوانه‌ای داخلی و به تبع آن افزایش عدد تیلور، مقدار نرخ برش در فضای آنالوس افزایش می‌یابد. به طوری که در تیلورهای بالا، خاصیت باریک شونده‌ی لزجت در ناحیه‌ی گسترده‌تری از فضای آنالوس پدیدار می‌شود. این عامل سبب شده منحنی سرعت محوری به

سمت مرکز فضای آنالوس و استوانه‌ای خارجی متمایل شود. با مقایسه‌ی شکل‌های ۲۶-۵ و ۲۷-۵ مشاهده می‌شود که به ازای دبی جریان کمتر (رینولدز پایین‌تر)، با افزایش عدد تیلور جریان موقعیت شعاعی نقطه‌ای با سرعت محوری ماکزیمم به استوانه‌ی داخلی نزدیک می‌گردد. اما در رینولدزهای بالاتر با افزایش عدد تیلور منحنی سرعت و موقعیت شعاعی نقطه‌ای با ماکزیمم سرعت به سمت استوانه‌ی بیرونی متمایل می‌گردد. علت این رفتار مشابه تأثیر عدد رینولدز بر منحنی سرعت محوری می‌باشد که در بخش توضیح داده شد.



شکل ۴-۲۵ نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع به ازای تیلورهای مختلف و

$$Wi = 750, \alpha = 0.5, Re = 18$$



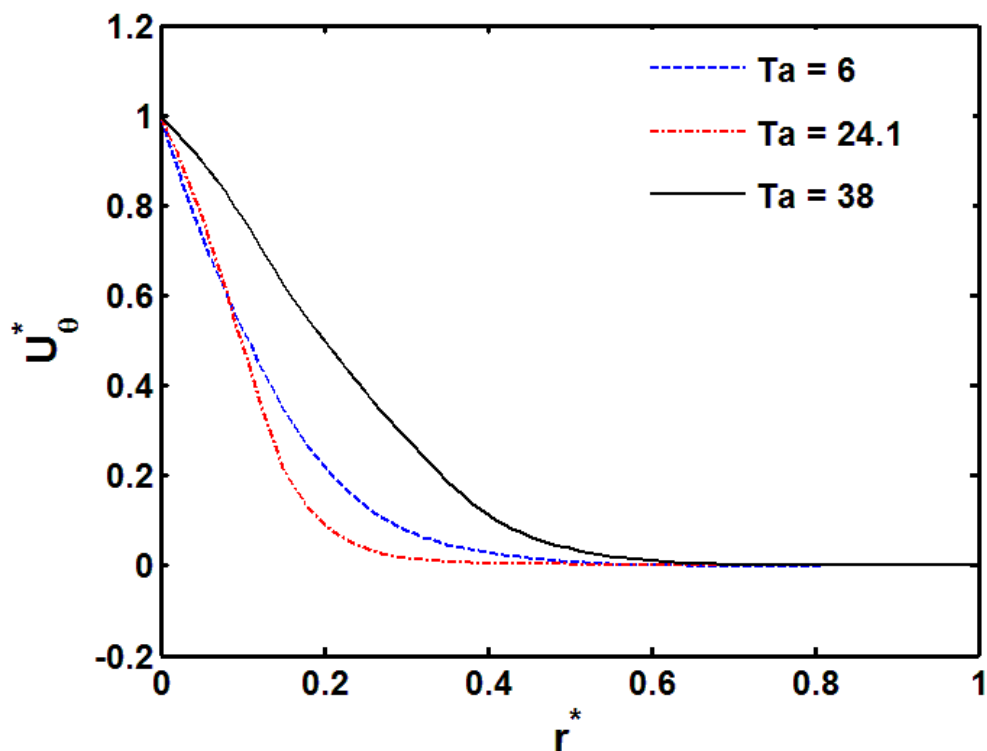
شکل ۴-۲۶ منحنی سرعت محوری بر حسب موقعیت شعاعی به ازای اعداد تیلور مختلف

$$Wi = 750, \alpha = 0.5, Re = 45$$

۴-۵-۱۷- تأثیر عدد تیلور بر میدان جریان چرخشی

همان گونه که در شکل ۵-۲۸ مشاهده می شود، اثر افزایش عدد تیلور بر منحنی سرعت چرخشی، مشابه اثر افزایش عدد رینولدز بر این منحنی می باشد. با افزایش عدد تیلور، نرخ برش در نواحی مجاور استوانه‌ای داخلی افزایش می یابد. این عامل سبب شده میزان لزجت در این نواحی کاهش یافته و به تبع آن تغییرات سرعت چرخشی در راستای شعاع افزایش می یابد. اما با گذر عدد تیلور از مقداری خاص، نرخ برش در این نواحی به حدی می رسد که خاصیت باریک شونده سیال با افزایش نرخ برش، مشاهده نمی شود. به طوری که سیال موجود در نواحی مرکزی و مجاور استوانه‌ای بیرونی

کماکان تمایل به کاهش لزجت با افزایش نرخ برش دارند. بنابراین تغییرات سرعت چرخشی در راستای شعاعی، در نواحی مجاور با استوانه‌ی داخلی کاهش و در نواحی دیگر افزایش می‌یابد.



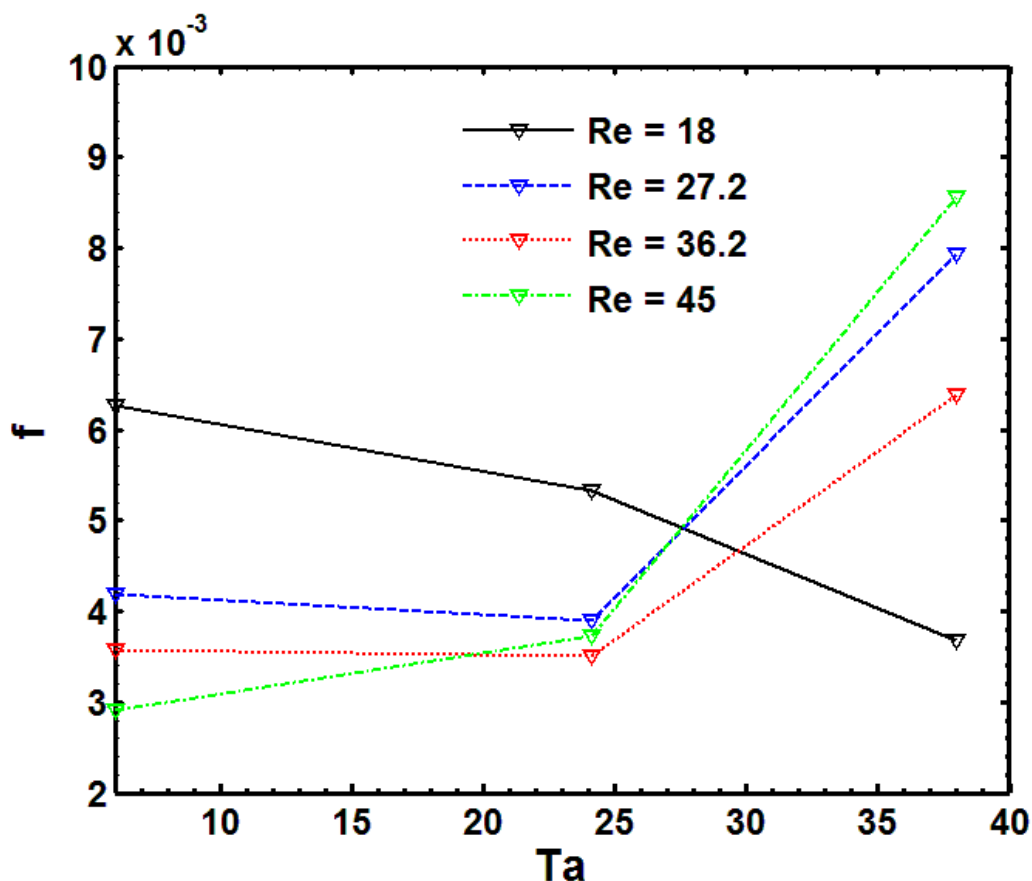
شکل ۴-۲۷ نمودار سرعت چرخشی بر حسب شعاع به ازای اعداد تیلور مختلف و

$$Wi = 750, \alpha = 0.5, Re = 45$$

۴-۵-۱۸- تأثیر عدد تیلور بر ضریب افت داریسی - ویسباخ

تغییر سرعت چرخشی استوانه‌ی داخلی تأثیر زیادی بر روی میزان فشار سیال حفاری در قسمت‌های پایین فضای آنالوس دارد. چرخش استوانه‌ی داخلی باعث افزایش نرخ برش سیال موجود در فضای آنالوس و به تبع آن افزایش تنش‌های برشی وارده بر سیال می‌شود. از سوی دیگر با توجه به باریک‌شوندگی لزجت سیال با افزایش نرخ برش، ابتدا با افزایش نرخ برش افت فشار سیال در جریان محوری کاهش یافته و همان‌طور که در شکل ۵-۲۹ مشاهده می‌شود، به ازای اعداد رینولدز و تیلور بالاتر، خاصیت باریک‌شوندگی لزجت با نرخ برش تقلیل پیدا کرده به دنبال آن تنش‌های وارده بر

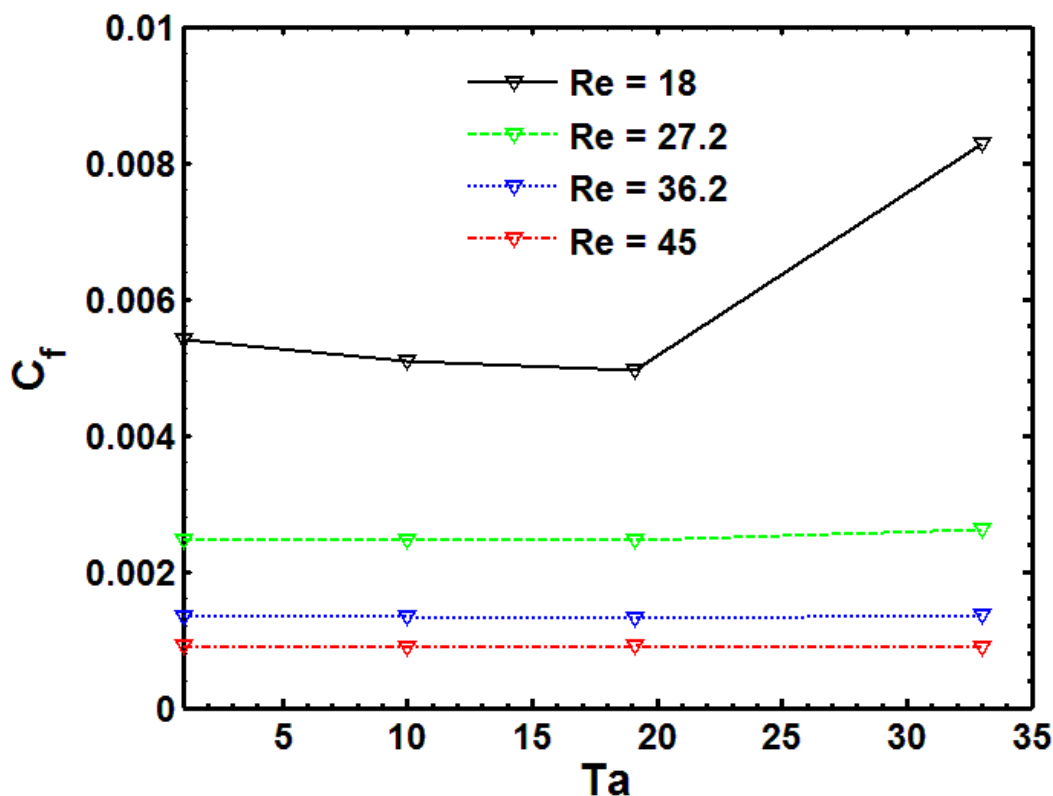
سیال و دیواره‌های آنالوس کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان افت فشار سیال در راستای محور و مقدار ضریب افت اصطکاکی داری - ویسباخ افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۸ منحنی تغییرات ضریب افت اصطکاکی داری - ویسباخ برحسب عدد تیلور به ازای اعداد رینولدز مختلف و $Wi = 750$ ، $\alpha = 0.5$.

۴-۵-۱۹- تأثیر عدد تیلور بر ضریب اصطکاک پوسته‌ای استوانه‌ای داخلی

با توجه به نتایج به دست آمده از حل عددی (شکل ۵-۳۰)، مشخص می‌شود که در محدوده‌ی اعداد رینولدز بررسی شده، تغییرات عدد تیلور در یک رینولدز ثابت، تأثیر چندانی در مقدار ضریب اصطکاکی C_f ندارد. در واقع ثابت ماندن مقدار C_f متأثر از خاصیت باریک شونده‌ی لزجت با نرخ برش می‌باشد.



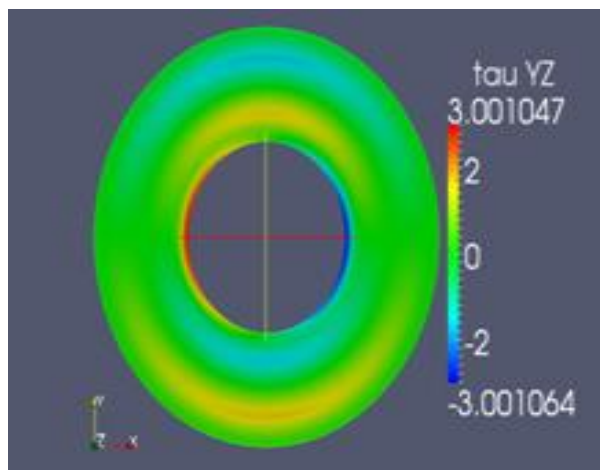
شکل ۴-۲۹ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای بر حسب عدد تیلور به ازای اعداد رینولدز مختلف و

$$Wi = 750, \alpha = 0.5$$

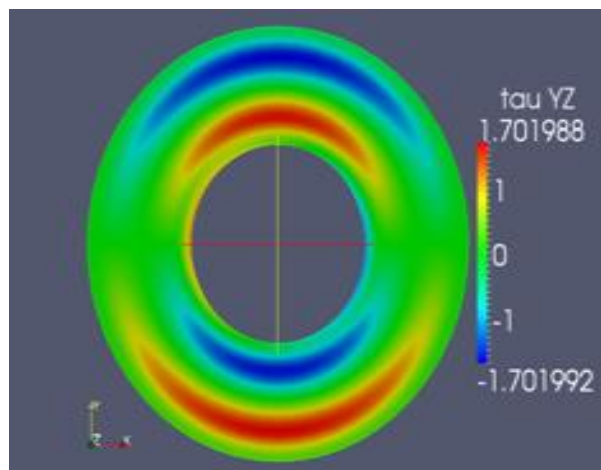
۴-۵-۲۰- تأثیر عدد تیلور بر میدان تنش در فضای آنالوس

در رینولدزهای پایین، با افزایش عدد تیلور، مقادیر مؤلفه‌های تنش برشی افزایش می‌یابد. این افزایش ابتدا ناچیز و سپس در تیلورهای بالا قابل ملاحظه می‌باشد. مقدار تنش نرمال محوری τ_{zz} نیز، ابتدا اندکی کاهش داشته و سپس افزایش می‌یابد. به ازای رینولدزهای بالاتر، با افزایش عدد تیلور، مقادیر مؤلفه‌های تنش برشی، ابتدا افزایش شدیدی داشته و سپس اندکی کاهش می‌یابند. همچنین در رینولدزهای بالاتر، مقدار مؤلفه‌ی تنش نرمال محوری (τ_{zz}) ابتدا کاهش زیادی داشته و سپس کاهش می‌یابد. در کانتورهای شکل ۵-۳۱ وابستگی مؤلفه تنش برشی (τ_{yz}) با عدد تیلور در رینولدز پایین ($Re = 18$) و در کانتورهای شکل ۵-۳۲ وابستگی این مؤلفه‌ی تنش برشی با عدد تیلور در

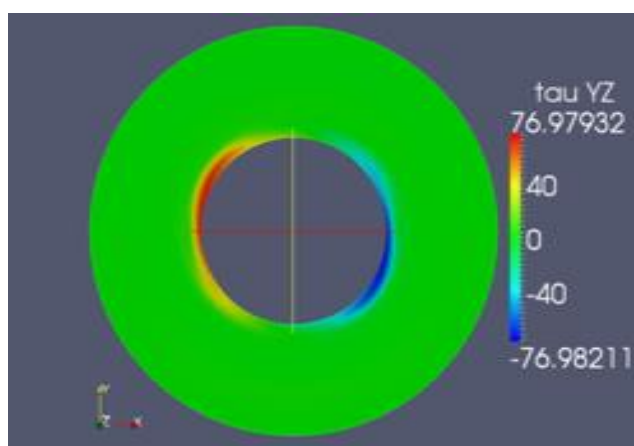
رینولدز بالاتری ($Re = 45$) بررسی می‌گردد. همچنین در کانتورهای شکل ۵-۳۳ وابستگی مؤلفه‌ی تنش نرمال محوری با عدد تیلور در رینولدز پایین ($Re = 18$) و در کانتورهای شکل ۵-۳۴ وابستگی این مؤلفه‌ی تنش با عدد تیلور در رینولدز بالاتری ($Re = 45$) بررسی می‌گردد.



الف) $Ta = 24.1$



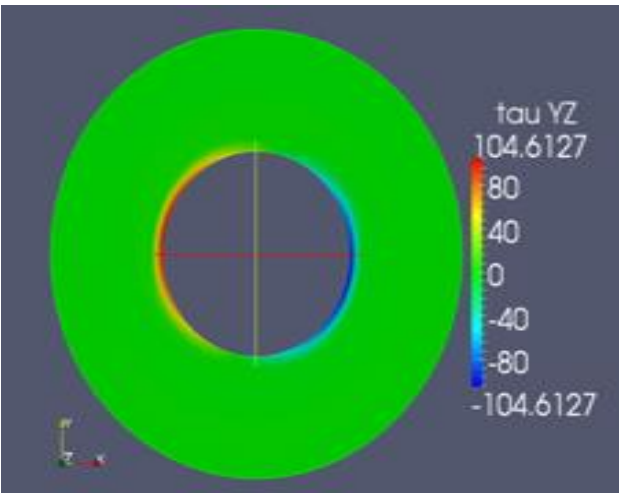
ب) $Ta = 6$



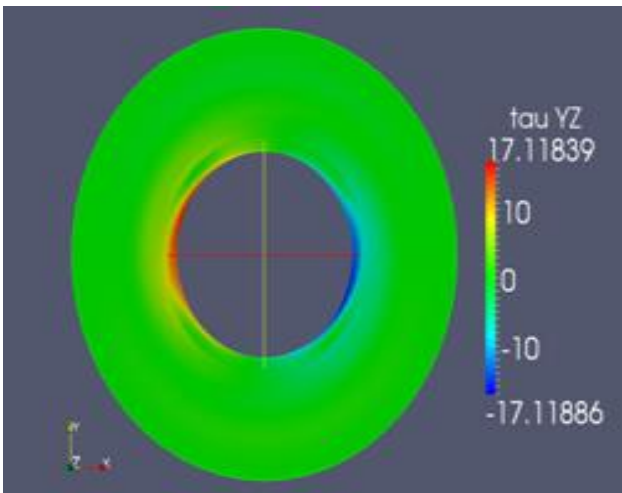
پ) $Ta = 38$

شکل ۴-۳۰ توزیع میدان تنش τ_{yz} به ازای $Re = 18$, $Wi = 750$, $\alpha = 0.5$ و الف) $Ta = 6$ ، ب) $Ta = 24.1$

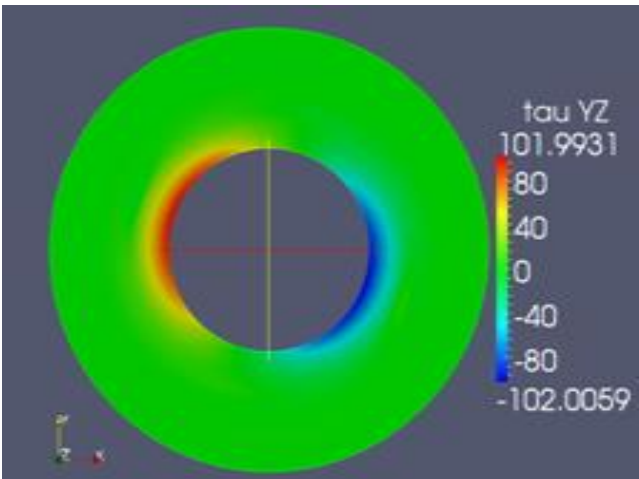
پ) $Ta = 38$



ب) $Ta = 24.1$



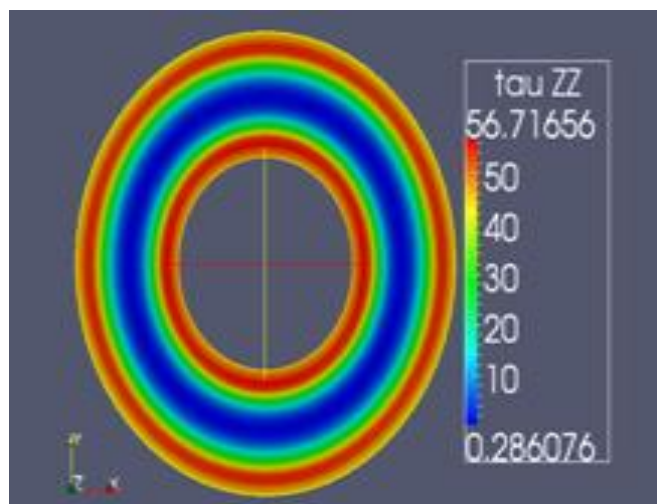
الف) $Ta = 6$



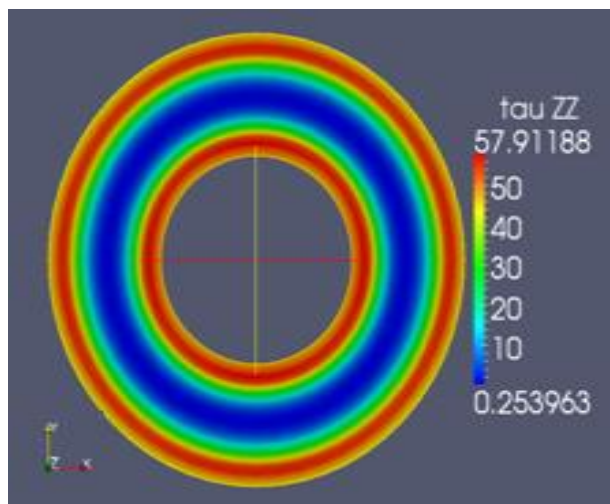
پ) $Ta = 38$

شکل ۴-۳۱ توزیع میدان تنش τ_{yz} به ازای $Re = 45$ ، $Wi = 750$ ، $\alpha = 0.5$ و الف) $Ta = 6$ ، ب) $Ta = 24.1$

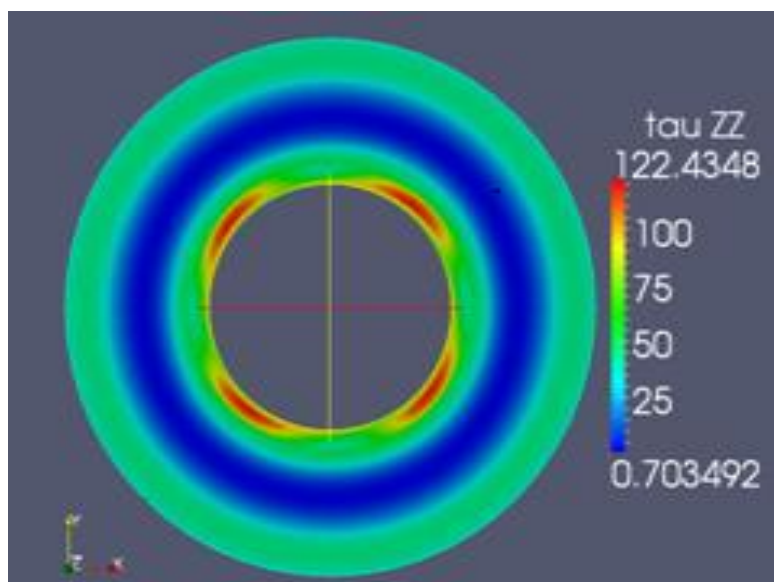
پ) $Ta = 38$



ب) $Ta = 24.1$



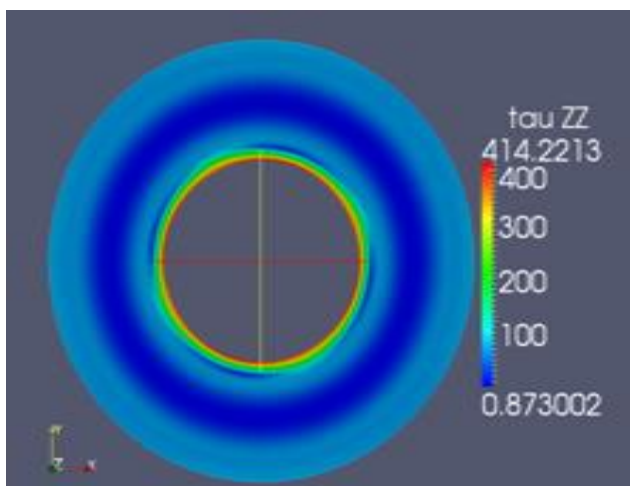
الف) $Ta = 6$



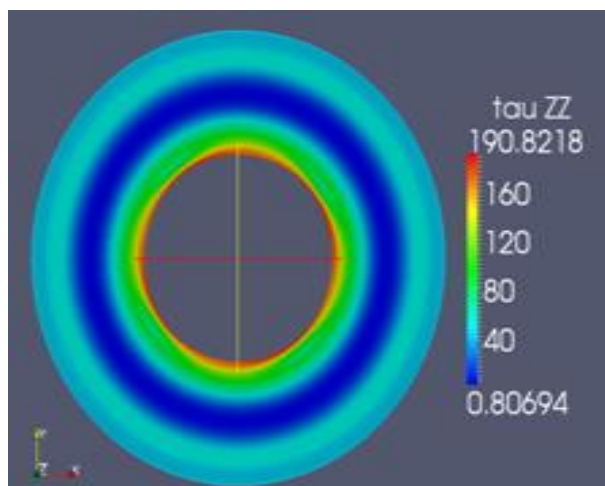
پ) $Ta = 38$

شکل ۳۲-۴ توزیع میدان تنش τ_{zz} به ازای $Re = 18$ ، $Wi = 750$ ، $\alpha = 0.5$ و الف) $Ta = 6$ ، ب) $Ta = 24.1$

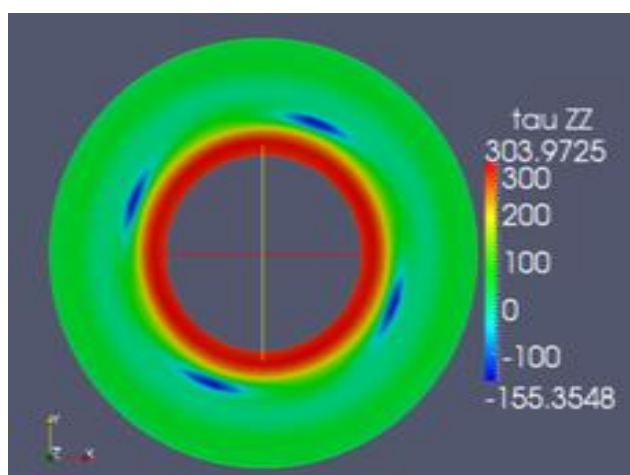
پ) $Ta = 38$



ب) $Ta = 24.1$



الف) $Ta = 6$



پ) $Ta = 38$

شکل ۴-۳ توزیع میدان تنش τ_{zz} به ازای $Re = 45$ ، $Wi = 750$ ، $\alpha = 0.5$ و الف) $Ta = 6$ ، ب) $Ta = 24.1$

پ) $Ta = 38$

فصل ۵

نتیجه گیری و پیشنهادات

در این بخش، نتایج حاصل از مدل سازی عددی جریان مارپیچ سیال ویسکوالاستیک در هندسه-ی آنالوس، ارائه می گردد. در این پایان نامه با استفاده اطلاعات مربوط به صنعت حفاری، هندسه، شرایط مرزی و شرایط اولیه ی مسئله، میزان رایج دبی ورودی سیال حفاری و سرعت چرخش استوانه-ی داخلی (لوله ی انتقال دهنده ی سیال حفاری به آنالوس) تعیین گردیدند. همچنین با استفاده ی از نتایج تست های آزمایشگاهی انجام گرفته بر روی چند نمونه گل حفاری پلیمری، ضرایب موجود در معادله ی ساختاری گزیکس به دست آمد. سپس با بی بعد سازی معادله ی ساختاری، پارامترها و اعداد بی بعد تأثیرگذار در مدل سازی جریان، تعیین گردید. محدوده ی در نظر گرفته شده برای اعداد بی بعد، جهت ترسیم نمودارها، با بهره گیری از شرایط واقعی و عملی فرایند حفاری بوده است. به طور مثال، محدوده ی مقادیر مطالعه شده ی اعداد رینولدز و تیلور، به ترتیب با استفاده از مقادیر رایج دبی ها و سرعت های چرخشی استوانه ی داخلی در فرایند حفاری، تعیین شده است. محدوده ی خواص الاستیک (عدد وایزنبرگ) مورد مطالعه نیز، با استفاده از نتایج تست های آزمایشگاهی انجام شده بر روی چند نمونه گل حفاری پلیمری، تعیین شده است.

۵-۲- نتایج و دستاوردهای پژوهش

از جمله دستاوردهای مهم این پژوهش، می توان به طور خلاصه به موارد زیر اشاره نمود:

- با افزایش خاصیت الاستیک سیال حفاری (افزایش عدد وایزنبرگ)، میزان افت فشار محوری سیال و همچنین ضریب اصطکاک دارسی- ویسباخ (f)، ابتدا کاهش شدیدی یافته و سپس این کاهش با شدت کمتری ادامه یافته تا اینکه در وایزنبرگ های بالا مقدار این افت فشار و ضریب اصطکاک، اندکی افزایش می یابند.

- افزایش خاصیت الاستیک، ابتدا باعث کاهش شدید تنش‌های برشی وارده بر سیال و دیواره-های آنالوس و سپس باعث افزایش جزئی بعضی از مؤلفه‌های تنش برشی می‌گردد. بنابراین با افزایش خاصیت الاستیک، ضریب اصطکاک پوسته‌ای (C_f) استوانه‌ی چرخان داخلی کاهش می‌یابد. شدت کاهش این ضریب، ابتدا زیاد بوده و سپس در وایزبرگ‌های بالا تقلیل می‌یابد.

- با افزایش ضریب تحرک (α) سیال، میزان افت فشار محوری سیال و همچنین ضریب افت اصطکاکی دارسی- ویسباخ (f)، به طور دائم کاهش می‌یابند. در واقع در وایزبرگ‌های بالاتر، تأثیر افزایش ضریب α بر مقدار ضریب افت اصطکاکی f ، بیشتر می‌باشد.

- افزایش ضریب تحرک (α)، موجب کاهش مقدار مؤلفه‌های تنش وارده بر سیال و دیواره‌های آنالوس می‌گردد. و به تبع آن، مقدار ضریب اصطکاک پوسته‌ای (C_f) استوانه‌ی داخلی، کاهش می‌یابد.

- با افزایش ضریب تحرک (α)، منحنی سرعت محوری سیال، در مرکز تخت‌تر شده و به سمت استوانه‌ی داخلی متمایل می‌گردد. در واقع سرعت ماکزیمم سیال کاهش یافته و موقعیت شعاعی این سرعت ماکزیمم به استوانه‌ی داخلی نزدیک می‌گردد. همچنین با افزایش این ضریب، چرخش استوانه-ی داخلی تأثیر بیشتری بر روی میدان سرعت چرخشی سیال می‌گذارد و تغییرات سرعت چرخشی در راستای شعاع، در نواحی مرکزی فضای آنالوس افزایش می‌یابد.

- با ثابت ماندن سرعت چرخشی استوانه‌ی داخلی (تیلور ثابت) و افزایش عدد رینولدز جریان (افزایش دبی)، میزان افت فشار محوری سیال افزایش می‌یابد ولی ضریب افت اصطکاکی دارسی- ویسباخ (f)، عمدتاً کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش عدد رینولدز جریان، ابتدا باعث افزایش و سپس کاهش مؤلفه‌های تنش در آنالوس می‌گردد. ضریب اصطکاک پوسته‌ای (C_f) نیز با افزایش عدد رینولدز، کاهش می‌یابد. این کاهش در رینولدزهای پایین‌تر، شدید می‌باشد و به تدریج با افزایش عدد رینولدز، شدت آن کاهش می‌یابد.

- با ثابت ماندن سرعت محوری ورودی سیال (عدد رینولدز) و افزایش عدد تیلور جریان (افزایش سرعت چرخشی استوانه‌ی داخلی)، به جز در رینولدزهای پایین، میزان ضریب افت اصطکاکی

دارسی - ویسباخ (f) افزایش می‌یابد. زیرا در رینولدزهای پایین، میزان نرخ برش کم است و افزایش عدد تیلور باعث افزایش نرخ برش و به تبع آن کاهش لزجت سیال (خاصیت باریک شونده لزجت با نرخ برش) می‌شود. با توجه به کانتورهای مربوط به رینولدزهای پایین، مشاهده می‌شود که با افزایش عدد تیلور مقدار تنش‌های برشی کمی افزایش و مقدار مؤلفه‌ی تنش نرمال محوری (T_{zz})، اندکی کاهش می‌یابد. این عوامل سبب شده، در این محدوده از اعداد رینولدز و تیلور، افزایش عدد تیلور باعث کاهش ضریب افت شود. اما در رینولدزهای بالاتر، ابتدا به ازای تغییر عدد تیلور، تغییر چندانی در میزان ضریب افت (f) دیده نشده و در ادامه با افزایش عدد تیلور، میزان این ضریب افزایش یافته است. افزایش این ضریب از آنجا ناشی می‌شود که در رینولدزها و تیلورهای بالا، خاصیت باریک شونده لزجت با نرخ برش سیال، کاهش یافته و افزایش عدد تیلور جریان باعث افزایش زیاد مؤلفه‌های تنش برشی و نرمال می‌گردد.

۵-۳- پیشنهادات

- مدل‌سازی عددی جریان مذکور با استفاده از مدل‌های ویسکوالاستیک غیر خطی دیگر، مانند مدل فن تین - تنر (PPT) و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج به دست آمده در این پژوهش.
- حل توأمان معادله‌ی انرژی در جریان مارپیچ سیال ویسکوالاستیک در هندسه‌ی مذکور و اعمال تأثیر دما بر روی پارامترهای رئولوژیکی سیال.
- مدل‌سازی جریان به صورت دوفازی، به نحوی ذرات سنگ کنده شده توسط مته، فاز جامد آن و گل حفاری فرستاده شده به آنالوس، فاز مایع آن را تشکیل می‌دهد.

- [1] Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E. and Young F. S. (1986) “**Applied drilling engineering**”, First Edition, Society of Petroleum Engineers, Texas.
- [2] ورمه زیاری ا. و شریفی م، (۱۳۹۲)، " مقایسه و بررسی نقش پلیمرهای طبیعی، اصلاح شده و مصنوعی در گل حفاری " ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز ، شماره ۱۰۳، ص ۲۷.
- [3] Bird B. R., Armstrong R. C. and Hassager O. (1987) “**Dynamics of Polymer Liquids**”, Vol. 1, Second Edition, John Wiley & Sons.Huio.
- [4] Reiner M. (1964) “**The Deborah Number**” J. Physics Today., 17, 1 ,pp 62-73.
- [5] Binh Bui., (2012), M.S. thesis, “**Determination of viscoelastic properties of drilling fluids**”, Petroleum engineering. depart. Tulsa university,
- [6] R J Poole (2012) “**The Deborah and Weissenberg numbers**” Rheology Bulletin., 53, 2, pp 32-39.
- [7] Ida Sandvold., (2012), M.S. thesis, “**Gel evolution in oil based drilling fluids**”, PetroleumEngineering and Applied Geophysics. depart. Norwegian University of Science and Technology,
- [8] White F. M. (2009), “**Fluid Mechanics**”, Seventh Edition, McGraw-Hill.
- [9] Cruz D. O. And Pinho F.T. (2004) “**Helical flow of SPTT fluids in concentric annuli**” J. Non-Newtonian Fluid Mech., 121, pp 1-14.
- [10] Volarovich M.P. and Gutkin A.M. (1946) “**Flow of plastic-viscoplastic material between two parallel flat-walls and in annular space between two coaxial tubes**” J. Tech. Phys., 3, pp 321–328.
- [11] Laird W.M. (1957) “**Slurry and suspension transport-Basic flow studies on Bingham plastic fluids**”, Ind. Chem. 49, 1, pp 138-141.
- [12] Fredrickson A.G. and Bird R.B. (1958). “**Non-Newtonian flow in annuli**” Ind. Chem. 50, 3, pp 347–352.
- [13] Rivlin R.S. (1956) “**Solution of some problems in the exact theory of visco-elasticity**”, J.Rat. Mech .1, 5, pp 179-188.
- [14] Rigbi z. and Galili N. (1971) “**Helical flow of some non-Newtonian Liquids**”, J.Tech. 9, 5, pp 447-452.
- [15] Batra R.L. and Eissa M. (1994) “**Helical flow of a Sutterby model fluid**”, J.

- Polym-Plast. 33, 4, pp 489-501.
- [16] P. fillip and J. David. (2003). “**Quasisimilarity of helical flow of power-law fluids in concentric annuli**”, J. Petroleum Science and Engineering. 45, pp 97-107.
- [17] Xisheng L. and Yinghu Z. (1986) “**An analysis of properties of laminar flow field of power-law fluid in annular space**”, Meeting on Petroleum Engineering, p535-544, Beijing, China.
- [18] Bhatnagar R.K.,(1963). “**Steady laminar flow of visco-elastic fluid through a pipe and through an annulus with suction or injection at the walls**”, J. Ind. Inst. Sci. 45, pp 126-151.
- [19] Dierckes A.C. and Schowalter W.R. (1966) “**Helical flow of a non-Newtonian polyisobutylene solution**”, Ind. Eng. Chem. Fundam. 5, 2, pp 263–271.
- [20] Tanner R. I. (1962) “**Helical flow of Elastico-Viscous Liquids**”, J. Rheologica Acta. 3, 1, pp 21-26.
- [21] Kaloni P.N. (1965) “**On the helical flow of an elasto-viscous fluid**”, J. Pure Appl. Phys. 3, pp 1-3.
- [22] Kulshrestha P. K. (1962), “**Helical flow of an idealized elastico-viscous liquid (I)**”, J. ZAMP. 13, 6, pp 553-561
- [23] Pinhoa F. T. and Oliveira P. J. (2000) “**Axial annular flow of a nonlinear viscoelastic fluid—an analytical solution**”, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 121, pp 1-14.
- [24] Takht Ravanchi M., Mirzazadeh M. and Rashidi F. (2006) “**Flow of giesekus viscoelastic fluid in a concentric annulus with inner cylinder rotation**”, J. Heat and fluid flow. 28, pp 838-845.
- [25] Mostafaiyan M., Khodabandehlou K. and Sharif F. (2003) “**Analysis of a viscoelastic fluid in an annulus using Giesekus model**”, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 118, pp 49-55.
- [26] Haitao Qi. and Hui Jin. (2009) “**Unsteady helical flows of a generalized Oldroyd-B fluid with fractional derivative**”, J. Nonlinear Analysis. 10, pp 2700-2708.
- [27] Menezes R.R., Campos L.A., Ferreira H.S., Santana L.N.L., Neves G. A. (2010) “**Use of statistical design to study the influence of CMC on the rheological properties of bentonite dispersions for water-based drilling fluid**”, J. Appl. ClaySci. 49, pp 13-20.
- [28] Maxy J. (2006) “**Rheological Analysis of Oilfield Drilling Fluids**”, AADE Drilling Fluids Technical Conference, Houston, Texas.

- [29] Maxey J. and Halliburton. (2010) **“A rheological approach to differentiating muds by gel structure”**, AADE Drilling Fluids Technical Conference, Houston, Texas.
- [30] Wellington M. B., Coradin H. T., Admilson T. F., Rigoberto E. M. M. and Martins A. L. M
 . **“Numerical study of a PTT viscoelastic fluid flow through a concentric annular”**, 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília, Brazil.
- [31] Moayed Mohseni M. and Rashidi F. (2009) **“ Viscoelastic fluid behavior in annulus using Giesekus model”**, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 165, pp 1150-1553.
- [32] Escudier M.P., Oliveira F.T. and Smith S. (2002) **“developed laminar flow of non Newtonian liquids through annuli: comparison of numerical calculations with experiments”**, J. Experiments in Fluids. 33, pp 101-111.
- 1-1-1-1- [33] Ogugbue C. C. E. (2009), PhD. thesis, **“ Non-Newtonian power- law fluid flow in eccentric annuli: CFD simulation and experimental study”**, Petroleum Engineering. depart. Oklahoma university,
- [34] Calin C., Balan M., Wilhelm M., (2008), **“new approach to determine the nonlinear parameter of the Giesekus constitutive model”**, Congress Rheology, P 1372, Monterey, USA.
- [35] Henning Winter H., (1997), **“Analysis of dynamic mechanical data: inversion into a relaxation time spectrum and consistency check”**, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 68, pp 225-239.

Abstract

The study of fluid flow between the space of two cylinders (annulus space), considered as a basic and applied problems in fluid mechanics. Also, this type of flow has a particular importance in the oil and gas industry. In the process of drilling oil and gas wells, drilling fluid exiting the drilling bit and encompasses the cuttings, then going through the annulus and moving out of the well head.

Studies and experiments which were carried out on most of the oil-based and water-based drilling fluids determine the viscoelastic behavior of drilling fluids in the extensive ranges of shear rates. Adding polymeric materials to drilling fluids cause them improving in their quality and results in improving the drilling efficiency.

In this study, the numerical investigations of helical fluid flow between two vertical concentric cylinders with inner cylinder rotation will be done. Here for the first time the study of viscoelastic fluid behavior in this geometry is done by using the Giesekus constitutive equation model. The numerical and analytical solutions former usually ignored the rotation of inner cylinder and the viscoelastic fluid was skipped. First, with regard to the relationship between modulus of absorption and dissipation of energy and angular frequency of oscillation, the experimental curve fitting is discussed. The minimum of the difference between the experimental data and the results can range from relationships constants and viscosity of the fluid when it is achieved. To optimize this error function and find the coefficients or the constant problem of evolutionary genetic algorithm is used. To find the coefficients of the mobility factor spectrum (α) used in the Giesekus equation, the Giesekus equation which the stress components are tensor should be opened first. The amount of each component of the tension, the sum of the individual components of the stress comes in all modes. Ode45 method is used for solving differential equations in MATLAB to obtain optimal dynamic coefficients of PSO evolutionary algorithm. In order to model the flow of open source software, Open Foam, a toolbox of Computational Fluid Dynamics (CFD) is used. The application of the finite volume method (FVM) uses for solving partial differential equations.

Based on numerical simulation, numerical solution of a number of independent elements (network) is investigated. In this study the effect of Reynolds number, Taylor number, Wisenberg number and mobility factor (α) on the drilling fluid in annulus space is studied. Dimensionless numbers to see the effect on the axial pressure drop of the fluid; can be a way to reduce the energy required for pumping drilling fluid in the annulus space to be achieved.

Keywords: Drilling fluid, Annulus space, Open Foam, Giesekus constitutive equation, Viscoelastic fluids, Polymeric additives



University of shahrood

Faculty of Mechanical Engineering

**Modeling the effect of polymeric additives to the fluid flow of
Oil drilling bit lubricants**

Mohammad amir hasani

Supervisor

Dr . Mahmood norouzi

February 2015