

تحلیل و شبیه‌سازی رفتار سیالات غیر نیوتنی محلول در آب درون استوانه‌های دوار غیر هم‌مرکز

ابوالفضل حاجی زاده اقدم^{۱*}، محمد جواد ابراهیمی^۲، احمد بیت‌اللهی توکلی^۳، امیرحسین رفاهی^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۰/۰۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۰/۰۰	
واژگان کلیدی: سیالات غیر نیوتنی؛ استوانه‌های غیر هم‌مرکز؛ تنش برشی	در تحقیق حاضر به مطالعه و بررسی جریان سیال عبوری از بین استوانه‌های حلقوی غیر هم‌مرکز پرداخته شده است. بدین منظور از چندین سیال غیر نیوتنی محلول در آب، در مقایسه با آب استفاده شده است. مدل سیالات غیر نیوتنی بر اساس مدل پاورلو و شبیه‌سازی جریان آشفته در محیط سه بعدی به روش $k-\omega$ انجام شده است. تغییرات سرعت استوانه دوار داخلی و در نتیجه تغییرات سرعت شعاعی، سرعت محوری و سرعت مماسی سیالات در امتداد صفحات انتخاب شده بررسی گردید. همچنین انرژی جنبشی توربولانس و تنش برشی روی دیواره‌های استوانه‌ها نیز که از عوامل موثر در جریان سیال می‌باشد مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. میزان کاهش و افزایش تنش و تغییرات رفتار رئولوژیکال برای سیالات مورد بررسی با یکدیگر مقایسه شدند که دو سیال XG، CMC بیشترین شباهت با خواص رئولوژیکال آب را دارا بودند. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با نتایج تجربی موجود در ادبیات فن مقایسه گردید که تطابق خوبی با نتایج بدست آمده ملاحظه شد.

۱ * و ۴ هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اراک a.hajizadeh@arakut.ac.ir

۲ کارشناسی، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اراک

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

۱- مقدمه

جریان عبوری از مجاری حلقوی، یک مساله گسترده است. کاربردهای فراوانی در زمینه فرآیندهای شیمیایی، صنایع نفتی، مهندسی خط لوله، نیروگاه‌ها، مهندسی پزشکی، مطالعات میکروسیالات، صنایع غذایی، جریان‌های زمین گرمایی، اکستروژن پلاستیک‌های ریخته‌گری دارد و در سایر کاربردها نیز از هندسه‌های حلقوی استفاده می‌شود. انگیزه اصلی از تحقیق در زمینه جریان‌های حلقوی با درجات مختلف پیچیدگی، تحقیق در مورد کاربردهای صنعتی آن است. فهرست گسترده‌ای از مطالعات بر روی جریان‌های حلقوی توسط اسکودیرو همکاران [۱] ارائه گردید. این کار براساس تحقیقات قبلی با سیالات ویسکوالاستیک در حلقه‌های متحرک تحت شرایط جریان آرام صورت گرفته است.

این مسئله در حفاری چاه‌های نفت و گاز، وضعیت انتقال یا آشفتگی اهمیت فراوانی دارد. در مطالعه نوری و همکاران [۲] سه سرعت محوری، شعاعی و مماسی برای یک سیال نیوتنی و یک سیال غیرنیوتنی در یک حلقه با ضخامت $0/5$ و نسبت قطر $0/5$ و یک سیلندر داخلی چرخان با سرعت 300 دور بر دقیقه اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که چرخش ناشی از تاثیرات مشابه بر سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی با جریان محوری در اطراف حلقه و حداکثر سرعت مماسی در ناحیه کمترین فاصله، در هر دو سیال مورد مطالعه دارد.

شدت آشفتگی در ناحیه بیشترین فاصله، به واسطه چرخش در سیال نیوتنی افزایش یافته و در سیال غیرنیوتنی در ناحیه کمترین فاصله، کاهش می‌یابد. کروزو و همکاران [۳] یک راه حل تحلیلی را برای جریان مارپیچی سیال در حلقه‌های هم مرکز با سیلندر دوار داخلی و همچنین جریان پوزالی در یک کانال شیب‌دار با حرکت صفحه به سمت راست بررسی کردند. که یک راه حل ساده برای جریان مارپیچی در حلقه‌های بسیار

نازک است. به عبارت دیگر برای تغییرات سرعت شعاعی، سرعت‌های محوری و مماسی و نیز برای سه تنش برشی و دو تنش نرمال با استفاده از روش‌های بدون بعدی (به عنوان مثال عدد رینولدز و تیلور و غیره)، مشتق شده است. کلسیدیس و همکاران [۴] یک بررسی انتقادی از مدل سازی پیشرفته برای انتقال موثر در حین حفاری لوله ارائه و پارامترهای بحرانی مانند نرخ پمپ، اندازه چاه، مقدار سیالات، بارگذاری جامدات و شیب سوراخ و غیره را بر انتقال حفاری موثر دانسته است. علاوه بر این آن‌ها یک سیستم آزمایشگاهی نیز ایجاد کردند. اسکودیر و همکاران [۵] داده‌های تجربی را برای جریان کاملا آرام برای مایع رقیق شده که از میان دو حلقه هم مرکز و همچنین 80% غیر هم مرکزی می‌گذرد، ارائه کرده است. مایع مورد استفاده در آزمایش شامل $0/1\%$ گزانتان گام و $0/1\%$ کربکسی متیل سلولز است.

گاوریلوو و همکاران [۶] یک الگوریتم عددی برای شبیه‌سازی جریان‌های آرام و پایدار برای سیال تراکم‌پذیر در کانال‌های حلقوی با سیلندر دوار داخلی ارائه داده است. این الگوریتم توصیفی از نمونه‌های مختلف سیالات در زمینه کانال‌های حلقوی و همچنین توصیفی از ویژگی‌های سیال را به کار می‌برد. برای برخی از سیالات در روزه حلقه، نتایج عددی با نتایج تحلیلی و تجربی موجود مقایسه می‌شوند.

دوو [۷] تئوری گرادیان انرژی برای مطالعه ناپایداری جریان تیلور-کوئت بین دو سیلندر دوار متحدالمرکز را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که انتقال آشفتگی در جریان‌های تیلور-کوئت توسط تکینگی‌های مطرح شده در جریان آرام ایجاد می‌شود. مکانیزم انتقال انرژی بین لایه‌های سیال توصیفی از جریان سیال و ناپایداری جریان می‌دهد. با شبیه‌سازی جریان تیلور-کوئت با LES مشخص شد که ناپیوستگی سرعت مماسی ناشی از تنش برشی صفر در تکامل زمانی منجر به خوشه‌هایی می‌شود که تکینگی‌های میدان جریان را تشکیل می‌دهند. با

افزایش عدد رینولدز، می‌توان این سنبله‌ها را حفظ کرد و در نتیجه آشفتگی ایجاد کرد. این سنبله‌های سرعت ناشی از تنش برشی صفر ساختار مقیاس بزرگ در ناحیه هسته کانال را تشکیل می‌دهند.

کومار و همکاران [۸] به بررسی حرکت سیال پاول-آیرینگ بین دو سیلندر دوار متحدالمرکز پرداختند. مسئله در سیستم مختصات استوانه‌ای با شرایط مرزی مناسب شبیه‌سازی گردید. سرعت توسط نرم افزار Mathematica حاصل گردید. از تجزیه و تحلیل بدست آمده نتیجه می‌شود که، سرعت تابعی افزایشی از پارامتر چرخش و پارامتر سیال پاول-آیرینگ است.

سانگ - موک هان و همکاران [۹] ویژگی‌های انتقال هیدرولیکی جریان عمودی مخلوط جامد و مایع را در نواحی که ذرات جامد توسط سیال غیرنیوتنی در حلقه باریک با سیلندر داخلی دوار حرکت میکند را بررسی کرده‌است. غلظت حجمی ذرات جامد و افت فشار برای پارامترهای مختلف مانند حلقه شیب‌دار، نرخ جریان و سرعت چرخش سیلندر داخلی اندازه گیری شده‌است. محلول آبی سدیم کربوکسیل متیل سلولز ۰/۴-۰/۲ درصد و محلول بنتونیت ۵٪ جداگانه به عنوان سیال غیرنیوتنی انتخاب شده‌اند. برای هر دو محلول هنگامی که افت فشار بیشتر از غلظت ذرات جامد است صورت پذیرفته‌است.

وانگ و همکاران [۱۰] مدل‌های پایه هیدرولیکی و نرخ جرمی و معادلات بقای انرژی را برای جریان داخل حلقه با انتقال فاز گاز هیدرات برای حفاری‌های عمیق آب برقرار کرده‌است. آن‌ها رفتار جریان چند مرحله‌ای حلقوی را با گذراندن هیدرات به وسیله تجزیه و تحلیل منطقه تشکیل دهنده هیدرات، کسر گاز جریان سیال در حلقه، افزایش گودال، فشار پایین سوراخ و فشار محفظه بسته بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان منطقه تشکیل شده هیدرات را از سطح دریا با افزایش نرخ گردش حرکت داد. کاهش حجم گاز در حلقه به علت تشکیل هیدرات، باعث کاهش بهره وری می‌شود که می‌تواند تشخیص پاک سازی را به تاخیر بیاندازد و خطر

اتصال هیدرات را در خطوط افزایش دهد. برای زمانی که یک چاه به دلیل گاز خام در یک میزان تولید نسبتاً کم مورد بررسی قرار گیرد، احتیاط لازم است، زیرا احتمال حضور هیدرات بسیار بیشتر از میزان تولید نسبتاً بالاست. فشار محفظه بسته به علت تشکیل هیدرات که با گذر زمان افزایش می‌یابد، نمیتواند ضربه گازی را منعکس کند.

یانگ و همکاران [۱۱] یک بررسی تجربی مربوط به ویژگی جریان در یک حلقه متمرکز با نسبت قطر ۰/۵۲، که سیلندر بیرونی ثابت و درونی در حال چرخش است، انجام داد. افت فشار و ضریب اصطکاک پوسته به ترتیب برای جریان به‌طور کامل توسعه‌یافته از آب و ۰/۴ گرم محلول آبی کربوکسیل متیل سلولز برای زمانی که سیلندر داخلی با سرعت ۰ تا ۶۰۰ دور بر دقیقه گردش می‌کند. همچنین تجسم جریان‌های گردابه برای مشاهده امواج ناپایدار انجام شده‌است.

شریفی اصل و همکاران [۱۲] انتقال حرارت جابه جایی در جریان مغشوش یک نانوسیال غیرنیوتنی درون لوله‌ای افقی و مدور با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و حل عددی معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی بررسی کردند. برای این منظور از نانوسیال غیرنیوتنی متشکل از محلول نیم درصد وزنی کربوکسی متیل سلولز (CMC) در آب و نانوذرات Al_2O_3 استفاده شده‌است. در این تحقیق اندازه متوسط نانوذرات در محلول ۲۵ نانومتر بوده و تحلیل برای دو کسر حجمی مختلف ۰/۵ و ۱/۵ درصد انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که میزان ضریب انتقال حرارت جابه جایی موضعی و ناسلت موضعی در نانوسیال غیرنیوتنی بیش از سیال غیرنیوتنی پایه‌است. همچنین این ضریب با افزایش غلظت نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد؛ تطابق خوبی بین این نتایج و نتایج تحقیقات آزمایشگاهی مشاهده شد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته مشاهده می‌گردد که تحقیقات محدودی بر مطالعه جریان سه بعدی سیال

$$\bar{U} = \bar{U}_r e_r + \bar{U}_t e_t + \bar{U}_a e_a \quad (3)$$

$$\nabla = \left(e_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{e_t}{r} \frac{\partial}{\partial t} + e_a \frac{\partial}{\partial a} \right)$$

$$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial a^2} \right)$$

$$\nabla^2 \bar{U} = \left(\nabla^2 \bar{U}_r, \nabla^2 \bar{U}_t, \nabla^2 \bar{U}_a \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \bar{U}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \bar{U}_r}{\partial t^2} - U_r - 2 \frac{\partial \bar{U}_t}{\partial t} \right) e_r + \left(\frac{\partial^2 \bar{U}_t}{\partial t^2} + 2 \frac{\partial \bar{U}_r}{\partial t} - \bar{U}_r \right) e_t$$

$$\bar{U} \cdot \nabla \bar{U} = e_r \left(\bar{U}_r \frac{\partial \bar{U}_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} \frac{\partial \bar{U}_r}{\partial t} - \frac{\bar{U}_r^2}{r} + U_a \frac{\partial \bar{U}_r}{\partial a} \right) \quad (4)$$

$$+ e_t \left(\bar{U}_r \frac{\partial \bar{U}_t}{\partial r} + \frac{\bar{U}_r \bar{U}_t}{r} + \frac{\bar{U}_t}{r} \frac{\partial \bar{U}_r}{\partial t} + U_a \frac{\partial \bar{U}_t}{\partial a} \right)$$

$$+ e_a \left(\bar{U}_r \frac{\partial \bar{U}_a}{\partial r} + \frac{U_r}{r} \frac{\partial \bar{U}_a}{\partial t} + U_a \frac{\partial \bar{U}_a}{\partial a} \right)$$

$$\nabla \bar{U} = \left(\frac{\partial \bar{U}_r}{\partial r} + \frac{\bar{U}_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{U}_t}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_a}{\partial a} \right) = 0 \quad (5)$$

نوشتن معادلات ناویه-استوکس در این فرم اجازه انعطاف پذیری را برای استفاده از سیال غیرنیوتنی دلخواه می دهد. معادله پیوستگی انرژی از لحاظ پارامترهای حرارتی هیچ نقشی ندارد.

در هنگام تحلیل سیالات غیر نیوتنی چهار روش برای مدل سازی جریان های غیرنیوتنی وجود دارد که به شرح زیر آمده اند:

(الف) مدل پاورلا

(ب) مدل کاروا برای شبه پلاستیک

(ج) مدل کراس

(د) مدل هرشل - بالکی برای بینگ هام پلاستیک

در این مقاله سیالات غیر نیوتنی مورد آزمایش از مدل پاورلا تبعیت می کنند. کاربرد مدل پاورلا زمانی است که دما در مدل دخالت نمی کند و به صورت زیر آمده است [۱۳]:

$$\mu = k n^{-1} \quad (6)$$

$$\mu_{\min} < (\mu = k n^{-1}) < \mu_{\max} \quad (7)$$

$$n = 1$$

$$n < 1$$

$$n > 1$$

غیرنیوتنی صورت پذیرفته است. لذا در این مقاله توجه به شبیه سازی سه بعدی جریان سیال غیرنیوتنی در استوانه های غیر هم مرکز در رژیم جریان آشفته و بررسی تاثیر سرعت و تنش های برشی بوده است.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این مقاله، سیال به صورت سه بعدی غیرمتراکم، انتقالی و غیرنیوتنی انتخاب شده است. انسیس فلوئنت این مساله را، با استفاده از معادلات بقا به صورت راهبردی حل می کند. معادله ناویر استوکس و معادلات پیوستگی بر جریان سیال حاکم هستند.

معادله ناویر استوکس و معادلات پیوستگی بر جریان سیال حاکم هستند. مشخصات معادلات ناویر استوکس در زیر آمده است: [۱۳]

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \tau} + \bar{U} \cdot \nabla \bar{U} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{U} + \nabla \cdot \sigma_T \quad (1)$$

اجزای سرعت متوسط زمان جریان تلاطم، همان معادله Navier-Stokes را برای جریان چند لایه برآورده می کنند، در صورتی که تنش های چند لایه با تنش های اضافی به عنوان تنش های آشکار جریان آشفته یا تنش های رینولدز شناخته می شوند موارد زیر توسط تانسور تنش متقارن داده شده است [۱۳]:

$$\sigma_T = \begin{pmatrix} \overline{U_r'^2} & \overline{U_r' U_t'} & \overline{U_r' U_a'} \\ \overline{U_r' U_t'} & \overline{U_t'^2} & \overline{U_t' U_r'} \\ \overline{U_r' U_a'} & \overline{U_t' U_a'} & \overline{U_a'^2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

جزئیات بردار سرعت U و اپراتور Del در مختصات

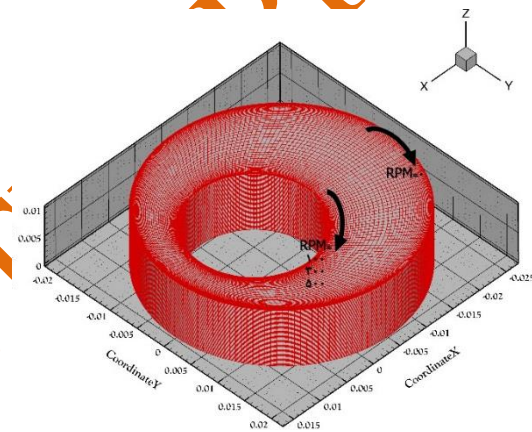
شعاعی به صورت زیر است [۱۳]:

در اینجا، K مقدار میانگین ویسکوزیته سیال است. و n معیار انحراف مایع از حالت نیوتنی است. مقدار n رده بندی سیال را مشخص می کند.

۳- مراحل شبیه سازی و تحلیل

۳-۱- تولید هندسه و شبکه بندی

برای انجام تحلیل و شبیه سازی در حلقه های غیر هم مرکز المانی از مجرا مکش سیال را در نظر می گیریم. هندسه فوق در شکل ۱ و سپس اندازه های هندسه در جدول ۱ به شرح زیر آمده است:



شکل ۱- نمایه سه بعدی از حلقه های غیر هم مرکز

جدول ۱- جدول مقادیر اندازه های مدل شبیه سازی شده

اسم	اندازه
قطر سیلندر داخلی (D_i)	mm ۲۰
قطر سیلندر داخلی (D_o)	mm ۴۰/۳
حداکثر میانگین قطر هیدرولیکی (D_h) max	mm ۲۰/۳
حداکثر غیر هم مرکزی (فاصله دو مرکز) (e_{max})	mm ۵/۱۵
ارتفاع سیلندر (ضخامت المان) (L)	mm ۱۰

مرکز سیلندر داخلی به عنوان مرجع اندازه گیری در نظر گرفته شد؛ سپس برای انجام شبیه سازی عددی با دقت بالا، شبکه های تولید شده به تعداد ۲۰۰ هزار سلول از نوع شش ضلعی ترسیم شده است و در نواحی دیواره های

سیلندر برای دقت بیشتر در لایه مرزی تراکم را بالا برده و سپس برای افزایش تراکم سلول ها بایاس داده می شود.

۳-۲- تولید شبکه بندی و شرایط مرزی و فرضیات

جریان به صورت سه بعدی، تراکم ناپذیر، پایا و در حال گذار با رینولدز حجمی محوری برابر با ۹۰۰۰ در نظر گرفته شده است. جهت جریان در جهت مثبت محور Z در میان حلقه بیرونی و درونی در نظر گرفته شده است. دبی جرمی در حال جریان و اندازه سرعت محوری با توجه به رینولدز مشخص شده به ترتیب ۲/۶۱۵ کیلو گرم بر ثانیه و ۲/۷۲ متر بر ثانیه مشخص شده اند [۱۳]:

$$U = \frac{Re \cdot D_H \cdot \rho}{\mu_{wall}} \quad (8)$$

$$m = U \cdot A \cdot \rho \quad (9)$$

$$A = (\pi / 4) \cdot (D_o^2 - D_i^2) \quad (10)$$

که ویسکوزیته (μ) و چگالی (ρ) به ترتیب ۰/۰۰۶ و ۱۰۰۰ می باشند.

شرایط حرکتی مدل به این صورت است که سیلندر داخلی در حالت ساعتگرد چرخان و سیلندر خارجی ثابت می باشد. سیلندر داخلی در سه حالت ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ دور بر دقیقه می چرخد. برای هر چهار سیال فوق در جدول ۲ این مقادیر مختلف سرعت تحلیل و بررسی می شوند.

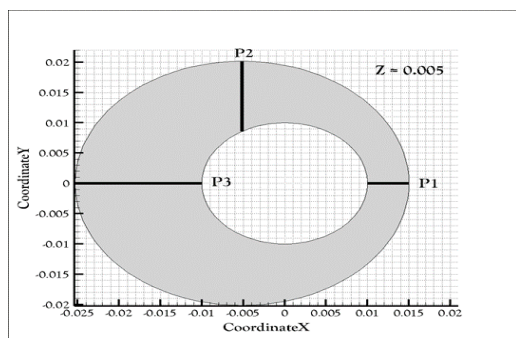
جدول ۲- خواص سیالات غیرنیوتونی محلول در آب برای

مدل پاورلا	سیال (*)	n (-)	k (k.Pa ²)	ρ (kg/m ³)
محلول XG		۰/۲۷	۰/۶۷۸	۱۰۰۰
محلول CMC		۰/۷۵	۰/۰۴۴	۱۰۰۰
محلول Bentonit		۰/۳۱۳	۰/۷	۱۰۷۰

برای محلول های فوق حداکثر و حداقل لزجت به ترتیب ۱۰۰۰ و ۰/۰۰۰۱ کیلوگرم بر متر در ثانیه می باشد. لازم به ذکر است برای شرایط تحلیل آب نیوتونی در نظر گرفته شده است و پارامترهای رئولوژیکی فوق را شامل نمی شود.

تکانه	۰/۷
چگالی	۱
نیروهای بدنه	۱
انرژی جنبشی آشفته‌گی	۰/۸
ویسکوزیته آشفته‌گی	۱
ضریب نرخ اتلاف	۰/۸
انرژی	۱

برای نمایش نتایج، مقادیر محاسبه شده برای تحلیل‌های فوق دراستوانه‌های غیرهم مرکز در صفحه‌های تعریف شده P1، P2 و P3 نمایش داده می‌شوند. این مکان‌ها در شکل ۲ و جدول ۴ به شرح زیر نشان داده شده‌است.



شکل ۲- نمایش مکان‌های مرجع P1، P2 و P3 برای مدل حلقوی خارج از مرکز

جدول ۴- مختصات متناسب با صفحه‌های P1، P2، P3

صفحه	مختص ات	کمترین مقدار m	بیشترین مقدار m
P1	X	۰/۰۱	۰/۰۱۵
	Y	۰/۰۰	۰/۰۰
	Z	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
P2	X	-۰/۱۵/۰۰۵	۰/۱۵/۰۰۵
	Y	۰/۰۰۸۵۶۶۸۵۸	۰/۰۲۰۱۵
	Z	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
P3	X	-۰/۰۱	-۰/۰۲۵۳
	Y	۰/۰۰	۰/۰۰
	Z	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵

فرمول‌های عددی مبتنی بر روش حجم محدود هست که در نرم افزار فلونت اجرا می‌شود. از الگوریتم سیمپل برای حل رفتار کوپلینگ سرعت و فشار استفاده شده‌است. در اینجا از مدل توربولانسی $k-\omega$ با گزینه جریان انتقال و تصحیح جریان برشی استفاده شده‌است.

۳-۳- شرایط مرزی در طول دامنه

شرایط مرزی زیر برای حل پارامترهای مختلف در دامنه حل مشخص شده‌است:

۱- شرایط مرزی پرودیک در امتداد جهت محوری در قسمت انتهایی، با ورودی جریان جرم در $Z=0$ ؛

۲- حرکت وضعیت مرزی دیوار در دیواره داخلی با چرخش جهت عقربه‌های ساعت با سرعت ثابت زاویه‌ای؛

۳- وضعیت مرز ثابت دیوار در قسمت بیرونی.

شرایط لغزش در هر دو دیوار قابل استفاده نیست. مش، جزئیات مدل و شرایط مرزی به‌طور کامل از راهنمای همراه نرم افزار انسیس فلونت گرفته شده‌است. از آنجایی

که شرایط جریان فعلی احتمالاً در وضعیت جریان گذار قرار دارد، بنابراین استاندارد $k-\omega$ استفاده می‌شود. این

اصطلاحات برای اصلاح جریان برشی و اثرات عدد رینولدز کم (درون آشفته‌گی) گنجانده شده‌است. الگوریتم سیمپل

برای کوپلینگ فشار سرعت استفاده کرده‌ایم. انسیس فلونت از یک طرح چند شبکه‌ای برای تسریع همگرایی

حل با استفاده از محاسبات اصلاح در یک سری از سطوح شبکه درشت استفاده می‌کند. استفاده از طرح چند شبکه

می‌تواند به میزان قابل توجهی تعداد تکرارها و زمان محاسباتی مورد نیاز برای بدست آوردن راه حل همگرا را

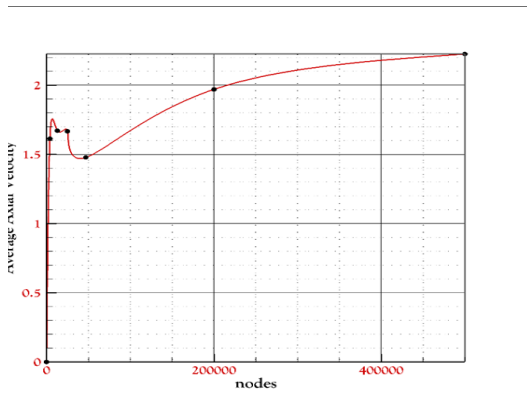
کاهش می‌دهد.

ضرایب زیر تخفیف برای متغیرهای حاکم، تعادل جرم، مؤلفه‌های سرعت جریان، K و ω در طول حل توسط

ثابت‌ها برای متعادل نگه داشتن در جدول جدول ۳ آمده‌است:

جدول ۳- ضرایب زیر تخفیف

مقدار	مولفه
۰/۳	فشار



شکل ۳- نمودار استقلال از شبکه برای میانگین سرعت محوری

۴-۳- اعتبارسنجی نتایج تحلیل عددی با آزمایش

تجربی

نتایج حاصل از تحلیل با داده‌های تجربی آقای نوری اعتبارسنجی شده‌است. بدین منظور، سرعت محوری و سرعت مماسی بر روی صفحات ذکر شده با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. تمام مقادیر سرعت‌ها و طول صفحات مشخص شده بی‌بعدسازی شده‌اند. از مقایسه نتایج تجربی با حل عددی با استفاده از روش کوئیک برای تغییرات سرعت‌های محوری و مماسی بر روی امتداد صفحات ذکر شده نشان می‌دهد که از لحاظ کیفی تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی آزمایشگاهی و تحلیل عددی یافت شده‌است. در مقایسه روش‌های مختلف با انتخاب روش $k-\omega$ نزدیک‌ترین پاسخ و کمترین انحراف را نسبت به شبیه‌سازی آقای نوری و همکاران به دست آمده‌است. بررسی نتایج حاصل از تحلیل عددی و تجربی در شکل ۴ آمده‌است. با بررسی نمودارها یک حرکت کیفی در روند تغییرات سرعت در نتایج دیده می‌شود.

۴- بی‌بعدسازی نتایج و استقلال از شبکه و

اعتبارسنجی

۴-۱- بی‌بعدسازی نتایج

نتایج بدست آمده به منظور ارائه طرحی قابل اتکا و قابل بسط به هندسه‌هایی با ابعاد مختلف بی‌بعدسازی شده‌است. که سرعت خروجی براساس رابطه ذیل بی‌بعدسازی شده و فقط مقادیر سرعت نرمال شده‌است [۱۳].

$$U_n = U / U_{inlet} \quad (11)$$

طول صفحه‌های P1، P2 و P3 برای تطبیق با توجه به نسبت ابعاد حلقه‌های غیر هم مرکز متفاوت با هندسه‌های گوناگون و سپس صحت سنجی با نتایج تجربی حاصل از کار آقای نوری نرمال سازی می‌شوند [۱۳]:

$$p1_{nx} = \frac{0.015 - p1_x}{0.005} \quad (12)$$

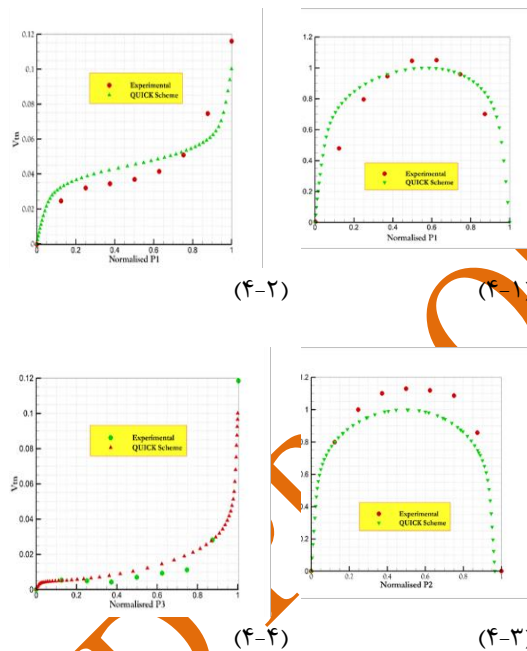
$$p2_{nx} = \frac{0.02015 - p2_y}{0.012} \quad (13)$$

$$p3_{nx} = \frac{p3_x - (-0.0253)}{0.0153} \quad (14)$$

۴-۲- استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال حل عددی از شبکه‌بندی محاسباتی، شبیه‌سازی بر روی چندین تراکم شبکه انجام شده‌است که شبکه از درشت به سمت ریز میل می‌کند و تراکم سلول‌ها بالاتر می‌رود. برای این کار استقلال از شبکه بر روی میانگین سرعت محوری بررسی شده‌است. نتایج محاسبات حاصل از مش بهینه‌شده ۲۰۰ هزار سلول است. در شکل ۳ نتایج حاصل استقلال از شبکه را مشاهده می‌کنید:

کمترین مقدار خود می‌رسد. لزجت مولکولی با لزجت پویا متفاوت است. لزجت مولکولی به‌طور معکوس متناسب با میزان سایش برشی است. از آنجایی که برای یک وضعیت جریان گذرا، در بخش‌های متوسط فضای بین دواستوانه، سرعت و فشار برشی کمترین مقدار است بنابراین به‌طور طبیعی این نتیجه می‌دهد که حداکثر مقدار لزجت مولکولی ایجاد می‌شود. با توجه به شکل ۵ که کانتور لزجت مولکولی را نشان می‌دهد قابل توجه است که لزجت مولکولی در میانه سیلندر افزایش یافته است. انرژی جنبشی آشفتگی میانگین انرژی جنبشی در واحد جرم را نشان می‌دهد که در جریان آشفتگی رخ می‌دهد. در شکل ۶ قابل مشاهده است که انرژی جنبشی آشفتگی در دواستوانه دوار نشان داده شده و در نواحی پایین دامنه‌های انرژی افزایش یافته است. در شکل ۷ سرعت‌های محوری، مماسی و شعاعی نشان داده شده که برای سرعت محوری حداکثر مقادیر در قسمت پایین دامنه جریان است. سرعت محوری در حال حاضر، در قسمت دیواره‌ها، به سمت مقدار صفر سرعت رسیده است، زیرا هیچ یک از سیلندرها حرکت محوری ندارند. در قسمت بالای دامنه در کناره سمت چپ، ناحیه‌ای که قسمت باریک فضای بین دواستوانه وجود دارد سرعت شعاعی به بیشترین مقدار خود رسیده است و در قسمت پایین آن سرعت شعاعی به کمترین مقدار خود رسیده، قسمت پایین به خاطر فشردگی جریان و در بالا به دلیل اینکه فضا از حالت متراکم به منبسط پیش می‌رود سرعت شعاعی افزایش یافته است. در فضای متراکم بین دواستوانه به دلیل متراکم شدن جریان سرعت مماسی به مقدار بیشینه خود می‌رسد که قابل مشاهده است.



۴-۱- تطابق نتایج سرعت محوری مستقل از بعد در حالت تجربی [2] و عددی روی صفحه P1
 ۴-۲- تطابق نتایج سرعت مماسی نرمال در حالت تجربی [2] و عددی روی صفحه P1
 ۴-۳- تطابق نتایج سرعت محوری نرمال در حالت تجربی [2] و عددی روی صفحه P2
 ۴-۴- تطابق نتایج سرعت محوری نرمال در حالت تجربی [2] و عددی روی صفحه P3

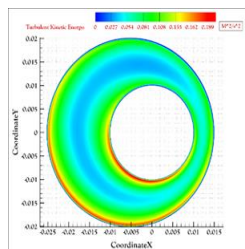
شکل ۴

۵- بحث و نتیجه

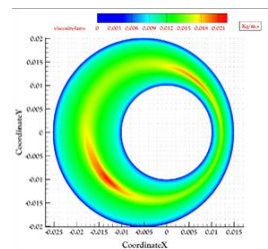
مقادیر سرعت محوری، سرعت شعاعی و سرعت مماسی ذرات مایع برای سیال فوق بدست آمده است و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. همچنین شکل‌ها برای تغییرات سرعت مولکولی و تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در سطح صفحه $Z=0.05$ آمده است. این مقادیر فیزیکی در مطالعه‌ی جریان مایع در حالت گذرا بسیار اهمیت دارد. خطوط لزجت مولکولی شعاعی حداکثر در وسط فضای بین دو حلقه قرار دارد و سپس به محض نزدیک شدن دیواره‌ها، دیواره داخلی سیلندر بیرونی که در حالت ثابت قرار دارد دیواره بیرونی سیلندر داخلی که در حال چرخش با سرعت دورانی ثابتی می‌باشد، لزجت مولکولی

برای نمودارها مقایسه‌ای بسیار خوبی براساس سرعت‌های مختلف چرخشی سیلندر داخلی، نوع سیالات مختلف و سرعت‌های برداری متفاوت تصویر شده‌است. مقادیر سرعت محوری در دیواره سیلندرها داخلی و خارجی صفر هستند و بین آن‌ها به صورت نموداری سهمی وار تصویر می‌شود. از مقایسه نتایج بدست آمده با مقادیر تجربی به درستی و قابلیت اطمینان نتایج فوق به دست آمده‌است.

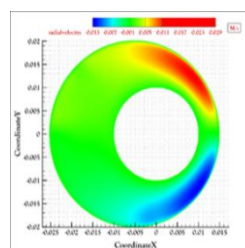
در شکل ۹ تنش برشی بر روی دیواره‌های استوانه‌های داخلی و خارجی برای سرعت‌های مختلف چرخش استوانه نشان داده شده‌است این تنش‌های برشی برای چهار سیال فوق محاسبه گردیده اند. از مقایسه نتایج فوق حاصل می‌شود که در بین سیالات کمترین مقدار تنش برشی برای آب و بیشترین مقدار برای سیال بنتونیت‌است. دو سیال کربکسیلیک متیلسلولوزو اگزانتان‌گام مقادیری نزدیک به آب دارند که در این میان اگزانتان‌گام از میان همه بیشترین شباهت را به آب دارد. در صفحه P1 باز افزایش سرعت چرخشی مقادیر تنش برشی هم بر روی دیواره داخلی و هم دیواره خارجی افزایش می‌یابد و در دو صفحه دیگر با افزایش مقدار چرخش مقدار تنش برشی برای هر دو دیواره کاهش می‌یابد که‌ای ن مهم در صفحه P3 بیشتر مشهوداست. دلیل این افزایش تنش برشی در صفحه P1 این است که‌ای ن صفحه در ناحیه تراکم قرار دارد افزایش چرخش در این ناحیه تراکم را بیشتر و سپس از افزایش تراکم تنش برشی افزایش می‌یابد و دو صفحه دیگر به ای ن خاطر که در ناحیه انبساطی قرار دارند با افزایش سرعت چرخش تاثیر زیادی بر روی تراکم ندارند و در مقادیر بسیار ناچیز تنش برشی کاهش می‌یابد. نتایج تنش برشی در سیالات مختلف با هم فرق می‌کند و خواص رئوژیکال آن‌ها با هم متفاوت است



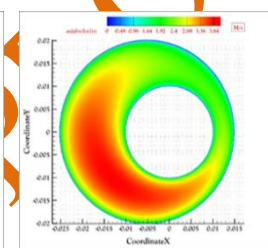
شکل ۶- کانتور انرژی جنبشی آشفته‌گی در صفحه $Z=0/005$



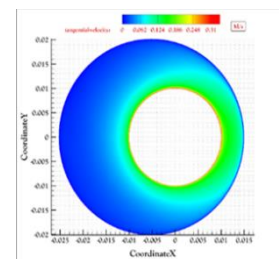
شکل ۵- کانتور لزجت مولکولی در صفحه $Z=0/005$



(۲-۷)



(۱-۷)

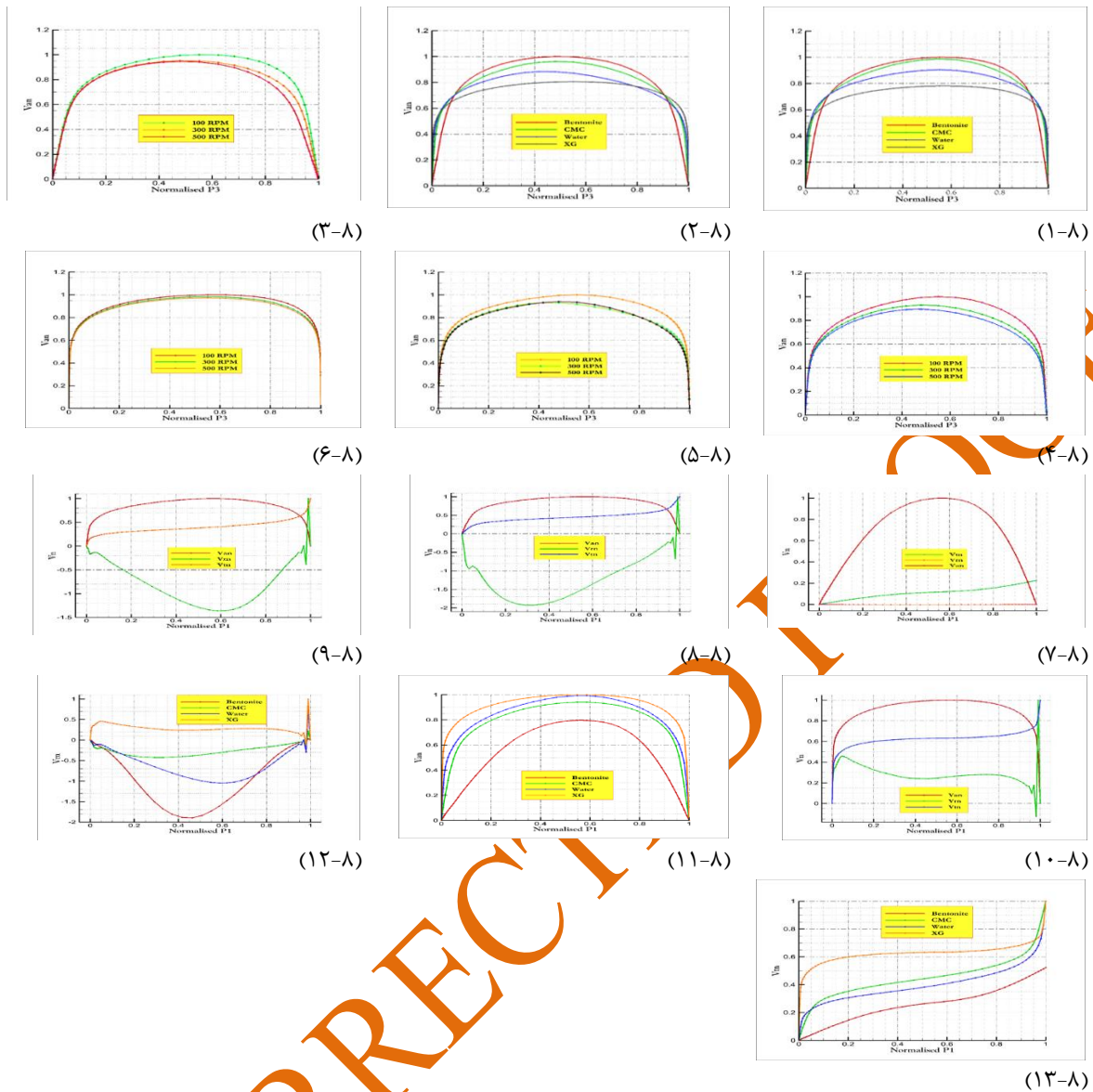


(۳-۷)

- ۱-۷- کانتور سرعت محوری در صفحه $Z=0/005$
- ۲-۷- کانتور سرعت شعاعی در صفحه $Z=0/005$
- ۳-۷- کانتور سرعت مماسی در صفحه $Z=0/005$

شکل ۷

نمودارها شکل ۸ مقایسه میان سیالات مختلف در صفحات P1, P2, P3 نشان می‌دهد. مقادیر سرعت محوری، سرعت شعاعی و سرعت مماسی در این سه صفحه به صورت کاملاً بی‌بعد نشان داده شد. در اینجا



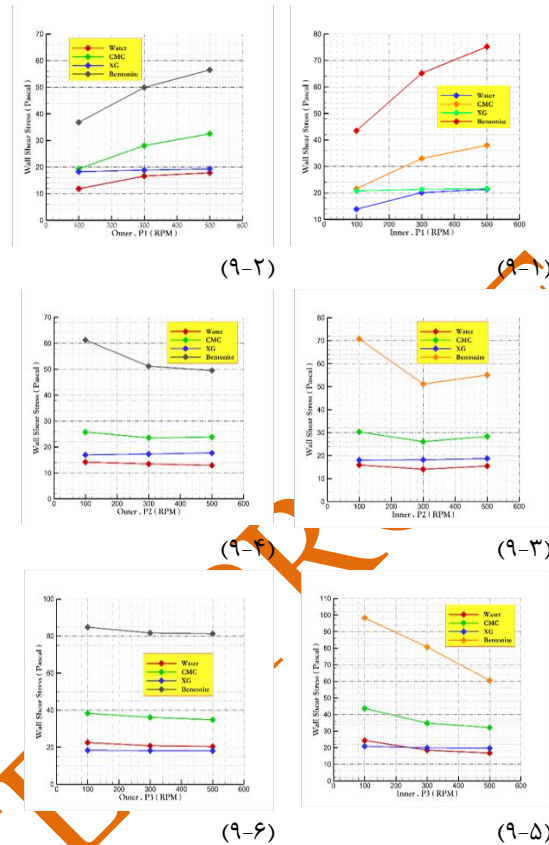
- ۱-۸- مقایسه سه سیال محلول در آب و آب در دور RPM ۱۰۰ برای سرعت محوری
bentonite
- ۲-۸- مقایسه سه سیال محلول در آب و آب در دور RPM ۳۰۰ برای سرعت محوری
CMC
- ۳-۸- مقایسه سه سیال محلول در آب و آب در دور RPM ۵۰۰ برای سرعت محوری
XG
- ۴-۸- نتایج مختلف سیال محلول در آب Bentonite در دوره‌های حرکتی مختلف
RPM ۵۰۰
- ۵-۸- نتایج مختلف سیال محلول در آب CMC در دوره‌های حرکتی مختلف
- ۶-۸- نتایج مختلف آب در دوره‌های حرکتی مختلف
- ۷-۸- نتایج مختلف سیال محلول در آب XG در دوره‌های حرکتی مختلف

دیگر سیالات نشان می‌داد که در نمودارهای مربوط به این سیال قابل مشاهده است. دو سیال XG, CMC بیشترین شباهت خواص رئولوژیکال به آب دارند. سیال XG نتایج بسیار جالبی داشت و خواص رئولوژیکال خود را در دوره‌های بالا حفظ می‌کند. در تحقیق فوق می‌توان با استناد به نتایج و نمودارهای حاصل از تحلیل عددی به نتیجه مورد نظر در شرایط مورد نیاز در حفاری رسید.

۷- ضمایم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
D	قطر، m
E	میزان غیر هم مرکزی، m
K	ضریب ثابت پاورلا، $Pa \cdot sn$
n	مقدار توان پاورلا
P	فشار، Pa
R	شعاع استوانه، m
Ri	شعاع استوانه داخلی، m
Ro	شعاع استوانه خارجی، m
Di	قطر استوانه داخلی، m
Do	قطر استوانه خارجی، m
Re	عدد رینولدز
U	سرعت، m/s
Uin	سرعت ورودی، m/s
Ua	سرعت محوری، m/s
Ut	سرعت مماسی، m/s
Ur	سرعت شعاعی، m/s
Urn	سرعت شعاعی بی‌بعد
Utn	سرعت مماسی بی‌بعد
Uan	سرعت محوری بی‌بعد
Vrn	سرعت شعاعی بی‌بعد
Vtn	سرعت مماسی بی‌بعد
Van	سرعت محوری بی‌بعد
Z	فاصله محور عمود بر صفحه، m
O	مرکز استوانه
er	بردار یکه راستای شعاعی
et	بردار یکه راستای مماسی
ea	بردار یکه راستای محوری
P1X	فاصله در راسته محور X در صفحه P1
P2Y	فاصله در راسته محور Y در صفحه P2



- ۹-۱- تنش برشی بر روی سیلندر داخلی در صفحه P1
- ۹-۲- تنش برشی بر روی سیلندر خارجی در صفحه P1
- ۹-۳- تنش برشی بر روی سیلندر داخلی در صفحه P2
- ۹-۴- تنش برشی بر روی سیلندر خارجی در صفحه P2
- ۹-۵- تنش برشی بر روی سیلندر داخلی در صفحه P3
- ۹-۶- تنش برشی بر روی سیلندر خارجی در صفحه P3

شکل ۹

۶- نتیجه گیری

این مقاله با هدف پیش بینی رفتار نتایج سیالات مختلف غیر نیوتونی مطرح در حفاری های نفت در دواستوانه غیر هم مرکز انجام شد. در بین سیالات فوق سرعت‌های مختلف برداری بدست آمد و در قسمت نتایج و بحث تشریح گردید و سپس تنش‌های برشی برای سیالات فوق محاسبه گردید. در ناحیه متراکم بین دواستوانه با افزایش سرعت چرخش تنش برشی افزایش می‌یابد و در ناحیه منبسط بین دواستوانه با افزایش چرخش نه تن‌ها تنش بررشی افزایش نمی‌یابد بلکه کاهش می‌یابد. میزان کاهش و افزایش تنش و تغییرات رفتار رئولوژیکال برای سیالات مورد بررسی با یکدیگر مقایسه شدند. سیال بنتونیت خواص متفاوتی با

سیال	f	فاصله در راسته محور X در صفحه P3	P3X
داخلی	i	فاصله بدون بعد در راسته محور X در صفحه P1	P1nX
خارجی	o	فاصله بدون بعد در راسته محور Y در صفحه P2	P2nY
محوری	a	فاصله بدون بعد در راسته محور X در صفحه P3	P3nX
شعاعی	r	ارتفاع المان، m	L
مماسی	t	قطر هیدرولیکی، m	Dh
هیدرولیکی	h	حداکثر غیرهم مرکزی دواستوانه، m	E _{max}
داخلی	in	صفحه ۱	P1
شعاعی مستقل از بعد	rn	صفحه ۲	P2
مماسی مستقل از بعد	tn	صفحه ۳	P3
محوری مستقل از بعد	an	دور بر دقیقه	RPM
محور X	X	تنش	σ
محور Y	Y	علائم یونانی	
محور X بی بعد	nX	چگالی، kg/m ³	ρ
محور Y بی بعد	nY	لزجت Pa.s	μ
بالانویس		لزجت دیواره Pa.s	wall μ
شرایط مرجع	*	زیرنویس	

مراجع

- [۱] M.P. Escudier, P.J. Oliveira, F.T. Pinho, Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner-cylinder rotation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23(1) (2002) 52-73.
- [۲] J.M. Nouri, J.H. Whitelaw, Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in an eccentric annulus with rotation of the inner cylinder, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 18(2) (1997) 236-246.
- [۳] D.O.A. Cruz, F.T. Pinho, Skewed Poiseuille-Couette flows of sPTT fluids in concentric annuli and channels, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 121(1) (2004) 1-14.
- [۴] V.C. Kelessidis, G.E. Bandelis, Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling, SPE-81746-PA, 19(04) (2004) 213-227.
- [۵] M. Escudier, P. Oliveira, F. Pinho, S. Smith, Fully developed laminar flow of non-Newtonian liquids through annuli: comparison of numerical calculations with experiments, *Experiments in Fluids*, 33(1) (2002) 101-111.
- [۶] A. Gavrilov, A. Minakov, A. Dekterev, V.Y. Rudyak, A numerical algorithm for modeling laminar flows in an annular channel with eccentricity, *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 5(4) (2011) 559-568.
- [۷] Dou, Hua-Shu. Stability of Taylor-Couette Flow Between Concentric Rotating Cylinders. In *Origin of Turbulence*, Springer, Singapore, 2022, 271-304.

[۸] Kumar, Deepak, K. Ramesh, and Sumit Chandok. Mathematical modeling and simulation for the flow of magneto-Powell-Eyring fluid in an annulus with concentric rotating cylinders. *Chinese Journal of Physics* 65 (2020): 187-197.

[۹] S.-M. Han, Y.-J. Kim, N.-S. Woo, Y.-K. Hwang, A study on the solid-liquid 2 phase helical flow in an inclined annulus, *Journal of mechanical science and technology*, 22(10) (2008) 1914-1920.

[۱۰] Z. Wang, B. Sun, Annular multiphase flow behavior during deep water drilling and the effect of hydrate phase transition, *Petroleum Science*, 6(1) (2009) 57-63.

[۱۱] Y.-J. Kim, Y.-K. Hwang, Experimental study on the vortex flow in a concentric annulus with a rotating inner cylinder, *KSME international journal*, 17(4) (2003) 562-570.

[۱۲] شریفی اصل، محمد، طغرای، داود، عظیمیان and احمد رضا. شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابه جایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسپال در یک لوله افقی مدور. مدل سازی در مهندسی ۱۶ (2018): 113-120. no. 53

[۱۳] Ursin Eberhard, J Hansjoerg, Marius Florianic, Pascal Bertsch, Joaquin Jiménez-Martínez, José S. Andrade Jr, and Markus Holzner, Determination of the Effective Viscosity of Non-newtonian Fluids Flowing Through Porous Media, *Frontiers in Physics*, 30(5) 2019

UNCORRECTED PROOF