



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Simulation of the Behavior of Non-Newtonian Fluids Dissolved in Water Inside Non-Concentric Rotating Cylinders

Abolfazl Hajizadeh Aghdam<sup>a,\*</sup>, Mohamadjavad Ebrahimi<sup>b</sup>, Ahmad Beytolahi Tavakoli<sup>c</sup>, AmirHossein Refahi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Arak university of Technology., Arak, Iran

<sup>b</sup> M.sc. Student, Mech. Eng., Arak university of Technology., Arak, Iran

<sup>c</sup> Ph.D Student, Kasahn University, Kashan, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 30 April 2023

Revised: 29 October 2023

Accepted: 12 November 2023

### Keywords:

Non-Newtonian fluids;  
Non-concentric cylinders;  
Shear stress; Velocity.

## ABSTRACT

The study and investigation of the currents passing through non-concentric annular cylinders is of great importance due to its application in many fields such as oil and petrochemical industries. Oil well drilling is an example of this application. In the current research, non-Newtonian fluid is considered between two non-concentric cylinders rotating. The changes in the speed of the rotating cylinder and as a result the changes in the radial speed, axial speed and tangential speed of the fluids were investigated along the selected planes. Turbulence kinetic energy and shear stress on the cylinder walls, which are effective factors in fluid flow, were also analyzed and investigated. Also, in this research, a study was conducted on several non-Newtonian fluids, such as bentonite, carboxyl methyl cellulose, and xanthan gum dissolved in water, in comparison with water. Two fluids, XG and CMC, had the most similarities with the rheological properties of water, while the XG fluid kept its rheological properties at high speeds. The simulations were compared with the experimental results available in the literature, and a good agreement was observed between the results.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30507.2445>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address: [a.hajizadeh@arakut.ac.ir](mailto:a.hajizadeh@arakut.ac.ir)

## How to cite this article:

Hajizadeh Aghdam, A., Ebrahimi, M., Beytolahi Tavakoli, A., & Refahi, A. (2024). Simulation and analysis of the behavior of non-Newtonian fluids dissolved in water inside non-concentric rotating cylinders. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(77), 13-24. doi: 10.22075/jme.2023.30507.2445

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

ابوالفضل حاجی زاده اقدم<sup>۱\*</sup>، محمد جواد ابراهیمی<sup>۲</sup>، احمد بیت‌اللهی توکلی<sup>۳</sup>، امیرحسین رفاهی<sup>۱</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰	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.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱	
<b>واژگان کلیدی:</b> سیالات غیر نیوتنی، استوانه‌های غیر هم‌مرکز، تنش برشی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30507.2445>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## ۱- مقدمه

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 غیر نیوتنی در یک حلقه با ضخامت ۰/۵ و نسبت قطر ۰/۵ و یک سیلندر داخلی چرخان با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که چرخش ناشی از تأثیرات مشابه بر سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی با جریان محوری در اطراف حلقه و حداکثر سرعت مماسی در ناحیه کمترین فاصله، در هر دو سیال مورد مطالعه دارد.

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

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.hajizadeh@arakut.ac.ir

۱. هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اراک

۲ کارشناسی، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اراک

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

استناد به این مقاله:

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 نرم‌افزار 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 آن نواحی که ذرات جامد توسط سیال غیرنیوتنی در حلقه باریک با سیلندر داخلی دوار حرکت می‌کند، بررسی نموده‌اند. غلظت حجمی ذرات جامد و افت فشار برای پارامترهای مختلف مانند حلقه شیب‌دار، نرخ جریان و سرعت چرخش سیلندر داخلی اندازه‌گیری شده است. محلول آبی سدیم کربکسیل 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، بررسی‌ها صورت پذیرفته است.

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 کرده است. 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 بهره‌وری می‌شود که می‌تواند تشخیص پاکسازی را به تاخیر بیندازد 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 بالا است. فشار محفظه بسته به علت تشکیل هیدرات که با گذر زمان افزایش می‌یابد، نمیتواند ضربه گازی را

شدت آشفتگی در ناحیه بیشترین فاصله، به واسطه چرخش در سیال نیوتونی افزایش یافته و در سیال غیرنیوتنی در ناحیه کمترین فاصله، کاهش می‌یابد. کروزو و همکاران [۳] یک راه حل تحلیلی را برای جریان ماریپیچی 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 ماریپیچی 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 مدل‌سازی 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 کاملاً آرام برای مایع رقیق شده که از میان دو حلقه هم مرکز و همچنین ۸۰٪ غیر هم مرکزی می‌گذرد، ارائه کرده است. مایع مورد استفاده در آزمایش شامل ۰/۱٪ گزانتان گام و ۰/۱٪ 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 آشفته در جریان‌های تیلور-کوئت توسط تکنیک‌های 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 تکنیک‌های میدان جریان را تشکیل می‌دهند. با افزایش

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 می‌کند. در صورتی که تنش‌های چند لایه با تنش‌های اضافی به عنوان تنش‌های آشکار جریان آشفته یا تنش‌های رینولدز شناخته می‌شوند. 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]:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

در هنگام تحلیل سیالات غیر نیوتونی چهار روش برای مدل‌سازی جریان‌های غیرنیوتنی وجود دارد که به شرح زیر آمده‌اند:

الف) مدل پاورلا

ب) مدل کاروا برای شبه پلاستیک

ج) مدل کراس

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 داده‌اند. افت فشار و ضریب اصطکاک پوسته به ترتیب برای جریان به‌طور کامل توسعه‌یافته از آب و ۰/۴ گرم محلول آبی کربکسیل 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 شده است.

شریفی اصل و همکاران [۱۲] انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان مغشوش یک نانوسیال غیرنیوتنی درون لوله‌ای افقی و مدور را با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و حل عددی معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی بررسی کرده‌اند. برای این منظور از نانوسیال غیرنیوتنی متشکل از محلول نیم درصد وزنی کربوکسی متیل سلولز (CMC) در آب و نانوذرات Al2O3 استفاده شده است. 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 شده است. نتایج نشان می‌دهند که میزان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی و ناسلت موضعی در نانوسیال غیرنیوتنی بیش از سیال غیرنیوتنی پایه است. همچنین این ضریب با افزایش غلظت نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد. تطابق خوبی بین این نتایج و نتایج تحقیقات آزمایشگاهی مشاهده شده است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته مشاهده می‌گردد که تحقیقات محدودی بر مطالعه جریان سه بعدی سیال غیرنیوتنی صورت پذیرفته است. لذا در این مقاله، توجه به شبیه‌سازی سه بعدی جریان سیال غیرنیوتنی در استوانه‌های غیر هم‌مرکز در رژیم جریان آشفته و بررسی تاثیر سرعت و تنش‌های برشی می‌باشد.

## ۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این مقاله، سیال به صورت سه بعدی غیرمتراکم، انتقالی و غیرنیوتنی انتخاب شده است. انسیس فلونت این مساله را، با استفاده از معادلات بقا به صورت راهبردی حل می‌کند. معادله ناویراستوکس 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

شبکه‌های تولید شده به تعداد ۲۰۰ هزار سلول از نوع شش ضلعی ترسیم شده است و در نواحی دیواره‌های سیلندر برای دقت بیشتر در لایه مرزی تراکم را بالا برده و سپس برای افزایش تراکم سلول‌ها بایاس داده می‌شود.

### ۳-۲- تولید شبکه‌بندی و شرایط مرزی و فرضیات

جریان به صورت سه بعدی، تراکم‌ناپذیر، 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 کیلوگرم بر ثانیه و ۲/۷۲ متر بر ثانیه مشخص شده‌اند [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 ( $\mu$ ) و چگالی ( $\rho$ ) به ترتیب ۰/۰۰۶ و ۱۰۰۰ می‌باشند.

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

جدول ۲- خواص سیالات غیرنیوتونی محلول در آب برای

سیال (*)	n (-)	k (k.Pa2)	$\rho$ (kg/m3)
محلول XG	۰/۲۷	۰/۶۷۸	۱۰۰۰
محلول CMC	۰/۷۵	۰/۰۴۴	۱۰۰۰
محلول Bentonit	۰/۳۱۳	۰/۷	۱۰۷۰

برای محلول‌های فوق حداکثر و حداقل لزجت به ترتیب ۱۰۰۰ و ۰/۰۰۰۱ کیلوگرم بر متر در ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است برای شرایط تحلیل آب نیوتونی در نظر گرفته شده است و پارامترهای رئولوژیکی فوق را شامل نمی‌شود. 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 شده است. در اینجا از مدل توربولانسی  $k-\omega$  با گزینه جریان انتقال و

(د) مدل هرشل - بالکی برای بینگ‌هام پلاستیک

در این مقاله سیالات غیر نیوتونی مورد آزمایش از مدل پاورلا تبعیت می‌کنند. کاربرد مدل پاورلا زمانی است که دما در مدل دخالت نمی‌کند و به صورت زیر آمده است [۱۳]:

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

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

$$n = 1$$

$$n < 1$$

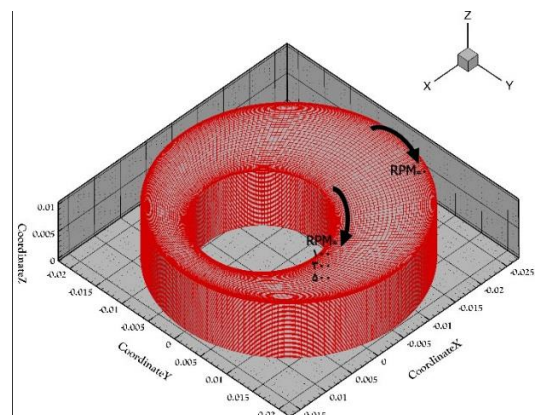
$$n > 1$$

در اینجا، K مقدار میانگین ویسکوزیته سیال است. و n معیار انحراف مایع از حالت نیوتنی است. مقدار n رده‌بندی سیال را مشخص می‌کند.

### ۳- مراحل شبیه‌سازی و تحلیل

#### ۳-۱- تولید هندسه و شبکه‌بندی

برای انجام تحلیل و شبیه‌سازی در حلقه‌های غیر هم‌مرکز المانی از مجرا مکش سیال را در نظر می‌گیریم. هندسه فوق در شکل (۱) و سپس اندازه‌های هندسه در جدول ۱ به شرح زیر آمده است:

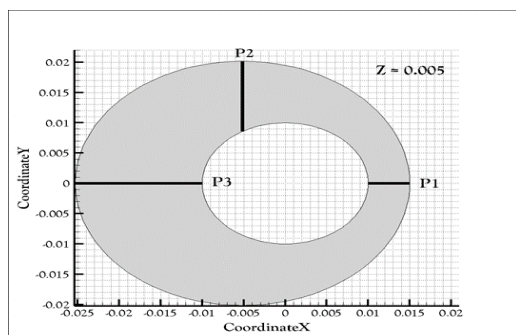


شکل ۱- نمایه سه بعدی از حلقه‌های غیر هم‌مرکز

جدول ۱- جدول مقادیر اندازه‌های مدل شبیه‌سازی شده

اسم	اندازه
قطر سیلندر داخلی (Di)	۲۰ mm
قطر سیلندر داخلی (Do)	۴۰/۳ mm
حداکثر میانگین قطر هیدرولیکی max (Dh)	۲۰/۳ mm
حداکثر غیر هم‌مرکزی (فاصله دو مرکز) (emax)	۵/۱۵ mm
ارتفاع سیلندر (ضخامت المان) (L)	۱۰ mm

مرکز سیلندر داخلی به عنوان مرجع اندازه‌گیری در نظر گرفته شد؛ سپس برای انجام شبیه‌سازی عددی با دقت بالا،



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

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

صفحه	مختصات	کمترین مقدار	بیشترین مقدار
		m	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

#### 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 شده است. سرعت خروجی بر اساس رابطه ذیل بی‌بعدسازی شده و فقط مقادیر سرعت نرمال شده است [۱۳].

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

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

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

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

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

تصحیح جریان برشی استفاده شده است.

##### ۳-۳- شرایط مرزی در طول دامنه

شرایط مرزی زیر برای حل پارامترهای مختلف در دامنه حل مشخص شده است:

- ۱- شرایط مرزی پریودیک 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.

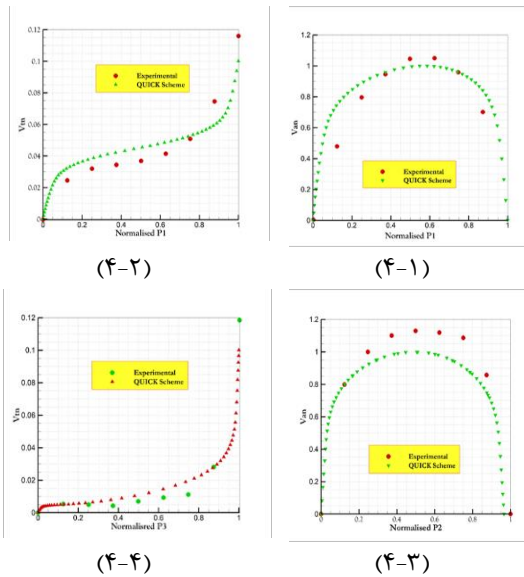
شرایط لغزش در هر دو دیوار قابل استفاده نیست. مش، جزئیات مدل و شرایط مرزی به‌طور کامل از راهنمای همراه نرم افزار انسیس فلونت گرفته شده است. از آنجایی که شرایط جریان فعلی احتمالاً در وضعیت جریان گذار قرار دارد، بنابراین، استاندارد  $k-\omega$  استفاده می‌شود. این اصطلاحات برای اصلاح جریان برشی و اثرات عدد رینولدز کم (درون آشفتگی) گنجانده شده است. از الگوریتم سیمپل برای کوپلینگ فشار سرعت استفاده گردیده است. 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  $\omega$  در طول حل توسط ثابت‌ها برای متعادل نگه داشتن در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۳- ضرایب زیر تخفیف

مقدار	مؤلفه
۰/۳	فشار
۰/۷	تکانه
۱	چگالی
۱	نیروهای بدنه
۰/۸	انرژی جنبشی آشفتگی
۱	ویسکوزیته آشفتگی
۰/۸	ضریب نرخ اتلاف
۱	انرژی

برای نمایش نتایج، مقادیر محاسبه شده برای تحلیل‌های فوق در استوانه‌های غیر هم‌مرکز در صفحه‌های تعریف شده P1, P2, P3 نمایش داده می‌شوند. این مکان‌ها در شکل (۲) و جدول ۴ به شرح زیر نشان داده شده است.



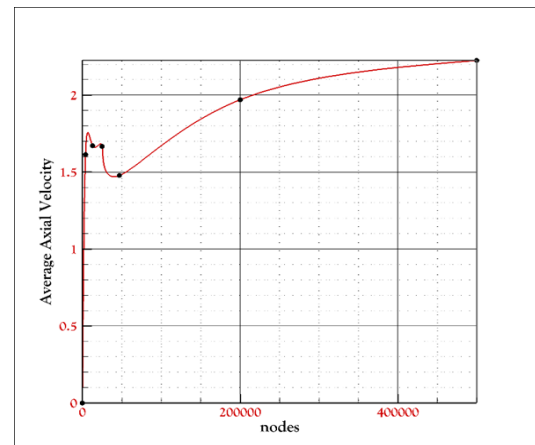
- ۴-۱- تطابق نتایج سرعت محوری مستقل از بعد در حالت تجربی [2] و عددی روی صفحه P1
- ۴-۲- تطابق نتایج سرعت مماسی نرمال در حالت تجربی [2] و عددی روی صفحه P1
- ۴-۳- تطابق نتایج سرعت محوری نرمال در حالت تجربی [2] و عددی روی صفحه P2
- ۴-۴- تطابق نتایج سرعت محوری نرمال در حالت تجربی [2] و عددی روی صفحه P3

## 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 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 دو استوانه، سرعت و فشار برشی کمترین مقدار است؛ بنابراین به‌طور طبیعی، حداکثر مقدار لزجت مولکولی ایجاد می‌شود. با توجه به شکل (۵) که کانتور لزجت مولکولی را نشان می‌دهد، قابل توجه است

## ۴-۲- استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال حل عددی از شبکه‌بندی محاسباتی، شبیه‌سازی بر روی چندین تراکم شبکه انجام شده است 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 شده است. نتایج محاسبات حاصل از مش بهینه‌شده ۲۰۰ هزار سلول است. در شکل (۳) نتایج حاصل استقلال از شبکه را مشاهده می‌کنید:

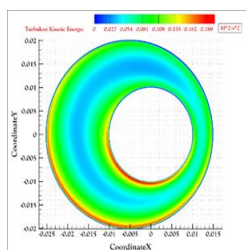


شکل ۳- نمودار استقلال از شبکه برای میانگین سرعت محوری

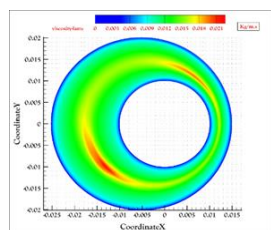
## ۴-۳- اعتبارسنجی نتایج تحلیل عددی با آزمایش تجربی

نتایج حاصل از تحلیل با داده‌های تجربی آقای نوری اعتبارسنجی شده است. 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 شده است. در مقایسه روش‌های مختلف با انتخاب روش  $k-\omega$  نزدیک‌ترین پاسخ و کمترین انحراف را نسبت به شبیه‌سازی آقای نوری و همکاران به دست آمده است. بررسی نتایج حاصل از تحلیل عددی و تجربی در شکل (۴) آمده است. با بررسی نمودارها یک حرکت کیفی در روند تغییرات سرعت در نتایج دیده می‌شود.

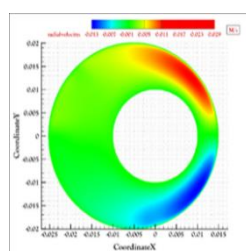
همه بیشترین شباهت را به آب دارد. در صفحه P1 باز افزایش سرعت چرخشی مقادیر تنش برشی هم بر روی دیواره داخلی و هم دیواره خارجی افزایش می‌یابد و در دو صفحه دیگر با افزایش مقدار چرخش مقدار تنش برشی برای هر دو دیواره کاهش می‌یابد که این هم در صفحه P3 بیشتر مشهود است. دلیل این افزایش تنش برشی در صفحه P1 این است که این صفحه در ناحیه متراکم قرار دارد. افزایش چرخش در این ناحیه، تراکم را بیشتر و سپس از افزایش تراکم تنش برشی افزایش می‌یابد و دو صفحه دیگر به این خاطر که در ناحیه انبساطی قرار دارند با افزایش سرعت چرخش تاثیر زیادی بر روی تراکم ندارد و در مقادیر بسیار ناچیز تنش برشی کاهش می‌یابد. نتایج تنش برشی در سیالات مختلف با هم فرق می‌کند و خواص رئوژیکیال آن‌ها با هم متفاوت است.



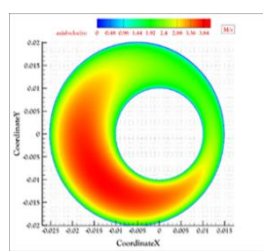
شکل ۶- کانتور انرژی جنبشی آشفتگی در صفحه  $Z=0/0.5$



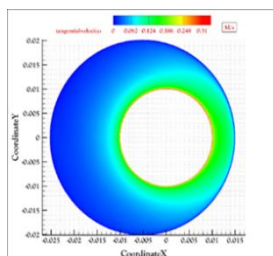
شکل ۵- کانتور لزجت مولکولی در صفحه  $Z=0/0.5$



(۲-۷)



(۱-۷)



(۳-۷)

۱-۷- کانتور سرعت محوری در صفحه  $Z=0/0.5$

۲-۷- کانتور سرعت شعاعی در صفحه  $Z=0/0.5$

۳-۷- کانتور سرعت مماسی در صفحه  $Z=0/0.5$

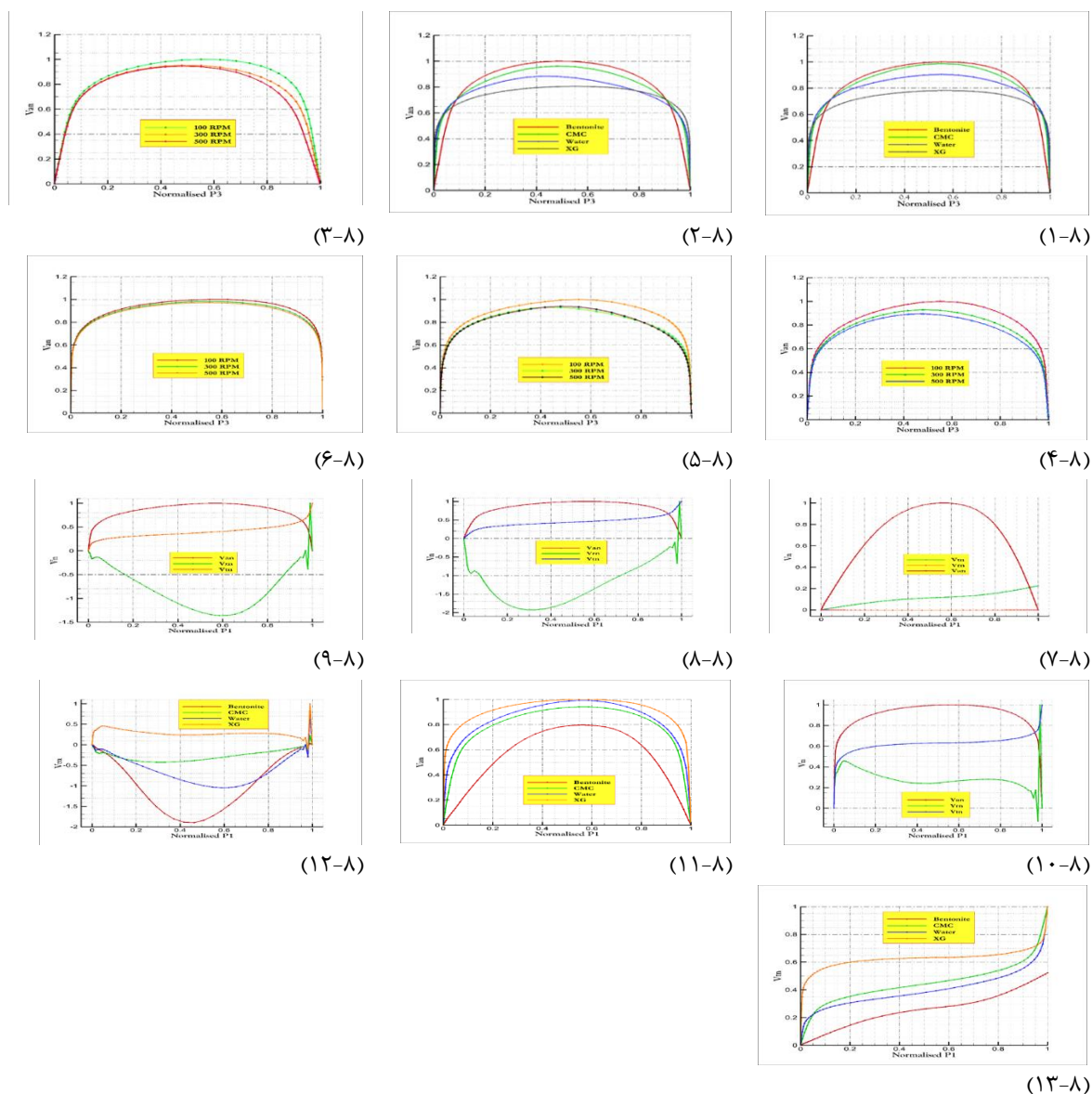
که لزجت مولکولی در میانه سیلندر افزایش یافته است. انرژی جنبشی آشفتگی میانگین انرژی جنبشی در واحد جرم را نشان می‌دهد که در جریان آشفتگی رخ می‌دهد. در شکل (۶) قابل مشاهده است که انرژی جنبشی آشفتگی در استوانه دوار نشان داده شده و در نواحی پایین دامنه‌ای نیز انرژی افزایش یافته است.

در شکل (۷)، سرعت‌های محوری، مماسی و شعاعی نشان داده شده است که برای سرعت محوری حداکثر مقادیر در قسمت پایین دامنه جریان است. سرعت محوری در حال حاضر، در قسمت دیوارها، 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 دو استوانه 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 دو استوانه به دلیل متراکم شدن جریان سرعت مماسی به مقدار بیشینه خود می‌رسد که قابل مشاهده است.

شکل (۸) مقایسه میان سیالات مختلف در صفحات P3, P1, P2 را نشان می‌دهد. مقادیر سرعت محوری، سرعت شعاعی و سرعت مماسی در این سه صفحه به صورت کاملاً بی‌بعد نشان داده شده است. در اینجا برای نمودارها، مقایسه‌ی خوبی بر اساس سرعت‌های مختلف چرخشی سیلندر داخلی، نوع سیالات مختلف و سرعت‌های برداری متفاوت تصویر شده است. مقادیر سرعت محوری در دیواره سیلندرها داخلی و خارجی صفر هستند و بین آن‌ها به صورت نموداری سهمی‌وار تصویر می‌شود. از مقایسه نتایج بدست آمده با مقادیر تجربی می‌توان به درستی و قابلیت اطمینان نتایج فوق پی برد.

در شکل (۹) تنش برشی بر روی دیواره‌های استوانه‌های داخلی و خارجی برای سرعت‌های مختلف چرخش استوانه نشان داده شده است این تنش‌های برشی برای چهار سیال فوق محاسبه گردیده‌اند. از مقایسه نتایج فوق این نتیجه حاصل می‌شود که در بین سیالات، کمترین مقدار تنش برشی برای آب و بیشترین مقدار برای سیال بنتونیت است. دو سیال کربکسیلیک متیلسلولوزو اگزانتان‌گام مقادیری نزدیک به آب دارند که در این میان اگزانتان‌گام از میان





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

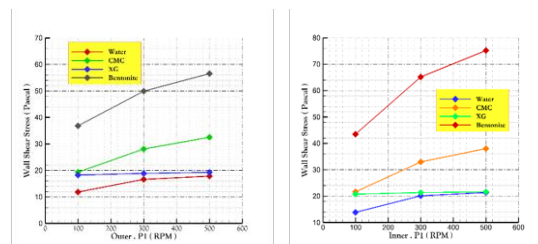
شکل ۸

متفاوتی نسبت به دیگر سیالات از خود نشان می‌داد که در نمودارهای مربوط به این سیال قابل مشاهده است. دو سیال XG و CMC بیشترین شباهت خواص رئولوژیکال به آب را 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.

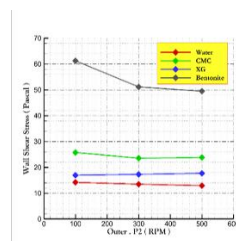
## ۷- ضمایم

### علائم انگلیسی

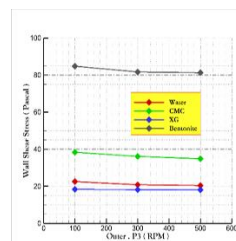
A	مساحت، $m^2$
D	قطر، $m$
E	میزان غیر هم مرکزی، $m$
K	ضریب ثابت پاورلا، Pa.sn
n	مقدار توان پاورلا
P	فشار، Pa
R	شعاع استوانه، $m$
Ri	شعاع استوانه داخلی، $m$
Ro	شعاع استوانه خارجی، $m$
Di	قطر استوانه داخلی، $m$
Do	قطر استوانه خارجی، $m$
Re	عدد رینولدز
U	سرعت، $m/s$
Uin	سرعت ورودی، $m/s$
Ua	سرعت محوری، $m/s$
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
P3X	فاصله در راسته محور X در صفحه P3



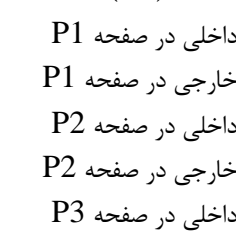
(۹-۲)



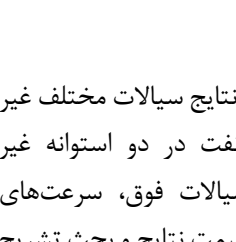
(۹-۴)



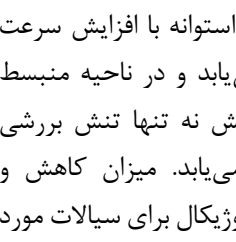
(۹-۶)



(۹-۵)



(۹-۳)



(۹-۱)

- 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- نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف پیش‌بینی رفتار نتایج سیالات مختلف غیر نیوتونی مطرح در حفاری‌های نفت در دو استوانه غیر هم‌مرکز 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 دو استوانه با افزایش سرعت چرخش، تنش برشی افزایش می‌یابد و در ناحیه منبسط بین دو استوانه، با افزایش چرخش نه تنها تنش برشی 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

زیر نویس		P1nX	فاصله بدون بعد در راسته محور X در صفحه P1
سیال	f	P2nY	فاصله بدون بعد در راسته محور Y در صفحه P2
داخلی	i	P3nX	فاصله بدون بعد در راسته محور X در صفحه P3
خارجی	o	L	ارتفاع المان، m
محوری	a	Dh	قطر هیدرولیکی، m
شعاعی	r	E <sub>max</sub>	حداکثر غیررهم مرکزی دواستوانه، m
مماسی	t	P1	صفحه ۱
هیدرولیکی	h	P2	صفحه ۲
داخلی	in	P3	صفحه ۳
شعاعی مستقل از بعد	rn	RPM	دور بر دقیقه
مماسی مستقل از بعد	tn	$\sigma$	تنش
محوری مستقل از بعد	an	علائم یونانی	
محور X	X	$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
محور Y	Y	$\mu$	لزجت Pa.s
محور X بی بعد	nX	wall $\mu$	لزجت دیواره Pa.s
محور Y بی بعد	nY		
	بالا نویس		
	* شرایط مرجع		

## مراجع

- [1] Escudier. M.P. P.J Oliveira and 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. no.1 (2002): 52-73.
- [2] Nouri. J.M. and 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. no.2 (1997): 236-246.
- [3] Cruz. D.O.A. F.T Pinho. "Skewed Poiseuille-Couette flows of sPTT fluids in concentric annuli and channels". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 121 no.1 (2004) 1-14.
- [4] Kelessidis. V.C and 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. no.04 (2004) 213-227.
- [5] Escudier. M. P Oliveira. F Pinho and S Smith. "Fully developed laminar flow of non-Newtonian liquids through annuli: comparison of numerical calculations with experiments". *Experiments in Fluids* 33, no.1 (2002): 101-111.
- [6] Gavrilov. A. A Minakov. A Dekterev and V.Y. Rudyak. "A numerical algorithm for modeling laminar flows in an annular channel with eccentricity". *Journal of Applied and Industrial Mathematics* 5. no.4 (2011): 559-568.
- [7] Hua-Shu. Dou." Stability of Taylor-Couette Flow Between Concentric Rotating Cylinders. In *Origin of Turbulence*. e, Springer, Singapore, (2022): 271-304.
- [8] 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.
- [9] Han. S.-M. 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. no.10 (2008): 1914-1920.
- [10] Wang. Z and B Sun. "Annular multiphase flow behavior during deep water drilling and the effect of hydrate phase transition". *Petroleum Science* 6. no.1 (2009): 57-63.
- [11] Kim. Y.-J. and Y.-K Hwang. "Experimental study on the vortex flow in a concentric annulus with a rotating inner cylinder". *KSME international journal* 17. no.4 (2003): 562-570.

[12] Sharifi Asl. M. D Toghraei and A.R Azimian. "Numerical simulation of displacement heat transfer in non-Newtonian turbulent flow of nanofluid in a circular horizontal pipe". *Modeling in engineering* 16. no. 53 (2018): 113-120 (in persian)

[13] Eberhard Ursin. 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. no.5 (2019).