

سیالات هوشمند، خواص آنها و شبیه سازی CFD حرکت سیال الکترورنولوژیک بین دو استوانه

فاطمه امید بیگی، سیدحسن هاشم آبادی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

پیام نگار : Hashemabadi@iust.ac.ir

چکیده

سیالات هوشمند، سیالاتی هستند که در حضور محرک خارجی، خصوصیات رئولوژیکی آنها از جمله گرانی و تنش تسلیم، به سرعت و در کمتر از میلی ثانیه، تغییر می‌کند. این سیالات به دو دسته کلی حساس به میدان الکتریکی (سیالات الکترورنولوژیک^۱) و حساس به میدان مغناطیسی (سیالات مگنتورنولوژیک^۲)، تقسیم‌بندی می‌شوند. سیالات هوشمند شامل یک سیال عایق پایه می‌باشند که ذراتی به صورت معلق داخل آن پخش شده‌اند. در حضور میدان، ذرات به صورت زنجیره‌هایی آرایش می‌گیرند که باعث تبدیل سیال از حالت مایع به شبه جامد می‌شوند. این دسته از سیالات به دلیل پاسخ سریع، بازگشت پذیر بودن و کنترل آسان شرایط محیطی می‌توانند به طور گسترده در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع خودرو سازی، ضد زلزله کردن ساختمانها، شیرهای صنعتی، رباتیک، صنایع نظامی و مهندسی پزشکی مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله، ساختار سیالات هوشمند، دسته‌بندی و خواص آنها بررسی شده است. همچنین رفتار یک سیال الکترورنولوژیک در فضای بین دو استوانه که استوانه داخلی با سرعت زاویه ای ثابتی می‌چرخد و نیمی از آن در معرض میدان الکتریکی قرار دارد، شبیه سازی شده است. شبیه سازی با استفاده از نرم افزار FEMLAB نسخه ۲/۳ که بر اساس روش المان محدود عمل می‌کند، انجام شده است. هدف از ارائه این مقاله بررسی امکان جایگزین کردن سیال هوشمند در کاربردهای صنعتی آنها مانند یاتاقانها و موارد دیگر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با سیال نیوتنی، کاهش سرعت چرخش استوانه داخلی و افزایش میدان الکتریکی باعث افزایش گرانی و تنش تسلیم می‌شود که با کاهش شاخص پاورلا، این اثر قوی‌تر می‌گردد. به طور مثال برای $n=1$ و $n=0.75$ در شعاع خارجی اختلاف گرانی و تنش تسلیم می‌شود که با کاهش شاخص پاورلا، این اثر قوی‌تر می‌گردد. به طور مثال برای $n=1$ و $n=0.75$ در شعاع خارجی اختلاف گرانی و تنش تسلیم می‌شود که با کاهش شاخص پاورلا، این اثر قوی‌تر می‌گردد. به طور مثال برای $n=1$ و $n=0.75$ در شعاع خارجی اختلاف گرانی و تنش تسلیم می‌شود که با کاهش شاخص پاورلا، این اثر قوی‌تر می‌گردد.

کلمات کلیدی: سیالات هوشمند، شبیه سازی CFD، سیال الکترورنولوژیکال، میدان الکتریکی

۱- مقدمه

مغناطیسی برای سیال مگنتورنولوژیک (MR)، به سادگی قابل کنترل است [۱]. اثر الکترورنولوژیک اولین بار توسط وینزلو^۳ در سال ۱۹۴۹ توصیف [۲] و اثر مگنتورنولوژیک تقریباً ۷۰ سال قبل، در سال ۱۹۴۰، توسط جاکوب رابینو^۴ کشف شد [۴]. این سیالات می‌توانند

سیال هوشمند سیالی است که خصوصیات رئولوژیکی آن از جمله (گرانی و تنش تسلیم، مدول برشی و دیگر خواص) با به کار بردن میدان الکتریکی خارجی برای سیال الکترورنولوژیک (ER) و میدان

3. Winslow
4. Jacob Rabinov

1. Electrorheological fluids
2. Magnetorheological fluids

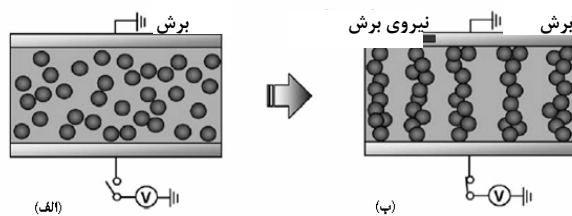
نارسانای دیگر با فراریت کم و پایداری شیمیایی بالا است. مواد روغنی معمول استفاده شده شامل پلی دی متیل سیکلوهاگزان (روغن سیلیکون)، روغن گیاهی، روغن معدنی، پارافین، کروزن، محلول هیدروژن و کلروکربن، روغن ترانسفورماتور و غیره می‌شود. روغنهای با چگالی بالا مانند روغن (فلوئورو - سیلیکون) یا (فنیل - سیلیکون) هم برای افزایش مقاومت ته نشینی به کار برده می‌شوند.

ذرات به کار رفته برای فاز ناپیوسته در مورد سیال الکتروژئولوژیک برای حالت جامد که سیال الکتروژئولوژیک ناهمگن را تشکیل می‌دهند شامل اکسیدهای غیر آلی مثل اکسید آهن و سیلیس، مواد غیر آلی غیر اکسیدی مانند زئولیت و آلومینوسیلیکات، مواد آلی، پلیمری مانند پلی آنیلین ها و نشاسته [۳]، اکسید تیتانیم [۱۶-۱۴]، پلی آنیلین‌ها [۱۸] و نانوتیوپ‌های کربن [۱۷] می‌باشند. برای سیالات الکتروژئولوژیک همگن، از پلی سیلیکون ها و پلی پروپیلن اصلاح شده به عنوان فاز پراکنده استفاده می‌شود. ذرات فلزی سیال مگنتورئولوژیک نیز معمولاً شامل کربونیل آهن [۱۰] یا براده آهن، ذرات کامپوزیت مغناطیسی [۹ و ۱۳]، پلی استایرن [۱۲]، پلی اتیلن گلیکول [۱۱] و یا آلیاژهای آهن/کبالت برای رسیدن به اشباع مغناطیسی بالا هستند.

افزودنیها نیز مواد قطبی‌ای هستند که می‌توانند بر روی سطح ذرات پراکنده جذب سطحی شوند. آب، اسیدهای (آلی و غیر آلی)، فلز قلیایی، نمک و مواد فعال در سطح، از جمله افزودنیهای معمول به شمار می‌روند. مواد با گرانروی بالا مانند گریس یا افزودنی‌های تیکسوتروپیک نیز به منظور افزایش پایداری ته نشینی به کار برده می‌شوند. افزودنی‌ها دارای سه نقش اساسی در سوسپانسیون سیالات هوشمند هستند: افزایش مقاومت ته‌نشینی ذرات، جلوگیری از خوردگی و افزایش اثر رئولوژیک.

برای تولید سیالات هوشمند ابتدا مواد پودری شکل که فاز ناپیوسته را تشکیل می‌دهند، به وسیله آسیاب کردن به اندازه مطلوب می‌رسند، سپس عملیات گرمایی به منظور خروج آب اضافی انجام می‌گیرد. در مرحله بعد، مواد پودری شکل با سیال پایه مخلوط و افزودنی‌ها نیز در همین مرحله به سوسپانسیون اضافه می‌شوند. معمولاً سیستم‌های اولتراسونیک (فراصوتی) برای پراکنده سازی ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳].

از حالت مایع در حضور میدان و در مدت کمتر از میلی ثانیه به حالت شبه جامد تبدیل شوند، به این صورت که مطابق شکل (۱) ذرات در راستای میدان زنجیره‌هایی را که کلاستر نامیده می‌شوند، تشکیل می‌دهند که این پدیده در حضور میدان الکتریکی اثر الکتروژئولوژیک و در حضور میدان مغناطیسی اثر مگنتورئولوژیک نامیده می‌شود. رشته‌های ایجاد شده مقاومت کافی برای جلوگیری از جریان یافتن سیال را دارند. بنابراین برای شکستن این ساختارهای شبه زنجیر، تنش مورد نیاز خواهد بود که به عنوان تنش تسلیم شناخته می‌شود. مشخصه منحصر به فرد اثر رئولوژیک این است که سیالات هوشمند به صورت بازگشت‌پذیر و مستمر از یک حالت مایع به یک حالت شبه جامد تغییر می‌کنند. بنابراین، این گونه سیالات حد فاصل الکتریکی و مکانیکی در صنایع مختلف از جمله صنعت خودرو سازی، رباتیک و صنایع نظامی و دیگر صنایع می‌باشند. پارامترهای مؤثر بر اثر سیالات هوشمند شامل شدت میدان، خصوصیات قطبی شدن، رسانایی و جزء حجمی ذرات، دما، میزان آب و سیال عایق پایه می‌باشند [۳].



شکل ۱- مکانیسم اثر الکتروژئولوژیک در سیالات هوشمند
(الف) بدون میدان (ب) در حضور میدان [۲]

۲- ساختار سیالات هوشمند

یک سیال هوشمند از یک مایع ناقطبی (معمولاً روغن‌های معدنی) و ذراتی که قابلیت قطبی شدن و یا مغناطیسی شدن را دارند و به طور معلق درون آن پخش شده‌اند، تشکیل شده است. به طور کلی سیالات هوشمند شامل سه جزء اصلی هستند: فاز ناپیوسته، که می‌تواند هم مایع و هم جامد باشد، فاز پیوسته، که یک روغن عایق است و افزودنیها، که مواد قطبی هستند تا اثر رئولوژیک و یا پایداری در مقابل ته‌نشینی کل سوسپانسیون را افزایش دهند [۲]. فاز پیوسته سیال هوشمند معمولاً یک روغن عایق یا مایعات

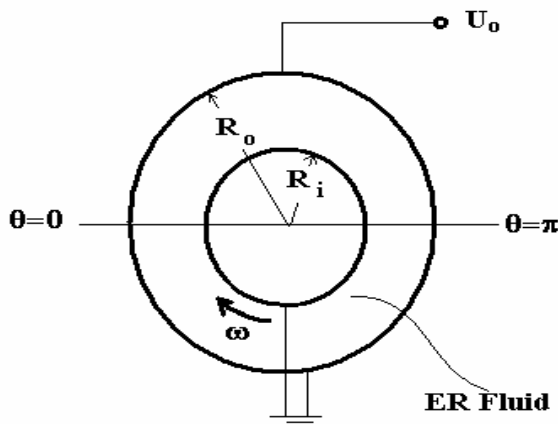
مدل (رابرتسون - استیف)^[۶]:

$$\tau = A(\dot{\gamma} + C)^B, \tau_0 = f(E \text{ or } B) \quad (۴)$$

که A و C و β خواص مربوط به سیال می باشند.

۳- شبیه سازی حرکت سیال ER بین دو استوانه

دو استوانه غیر هم مرکز، که بخشی از آن ($\theta=180^\circ$) بوسیله دو الکتروود در دو طرف آن، در معرض میدان الکتریکی خارجی قرار دارد، در شکل (۲) نشان داده شده اند. استوانه میانی با سرعت زاویه ای ω در حال چرخش در خلاف جهت عقربه های ساعت می باشد و استوانه خارجی ثابت است. نیمی از دو استوانه داخلی و خارجی مطابق شکل تحت تأثیر میدان و اختلاف پتانسیل U_0 قرار دارد.



شکل ۲- دو استوانه هم مرکز شامل سیال ER

در شرایط پایا برای سیال تراکم ناپذیر معادلات پیوستگی و تکانه به صورت زیر در می آیند:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۵)$$

4. Roberston-Stiff

شباهت های اندکی بین سیالات الکترورنولوژیک و سیالات مگنتورنولوژیک در توان مورد نیاز وجود دارد، اما در سیالات الکترورنولوژیک، هزاران ولت و شدت جریانی در حدود میلی آمپر مورد نیاز است، در حالی که برای سیالات مگنتورنولوژیک معمولاً بین ۲ تا ۲۴ ولت و شدت جریانی در حدود آمپر نیاز داریم. سیالات مگنتورنولوژیک اثرات کنترلی قویتری در مقایسه با محصولات الکترورنولوژیک مشابه دارند. ماکزیمم تنش تسلیمی که در سیالات مگنتورنولوژیک در اثر میدان ایجاد می گردد، (۵۰-۲۰) بار بزرگتر از سیالات الکترورنولوژیک است. سیالات مگنتورنولوژیک برخلاف سیالات الکترورنولوژیک حساسیت کمتری نسبت به رطوبت و آلودگی دارند و بنابراین انتخاب خوبی برای استفاده در محیط های آلوده هستند. به علاوه سیالات الکترورنولوژیک از مواد فعال در سطح که بر روی سطح ذرات جذب شده اند، بیشتر از سیالات مگنتورنولوژیک تأثیر می پذیرند [۴].

باید توجه شود که سیالات هوشمند قبل از اعمال میدان به شکل سیالات نیوتنی با گرانیوی ثابت رفتار می کنند. در حالت اعمال میدان، مدل های رئولوژیکی مختلفی می توانند رفتار این سیالات را بیان کنند. بیشتر از مدل های زیر برای بیان ریاضی رفتار رئولوژیکی آنها استفاده می شود:

مدل بینگهام پلاستیک^[۸]:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}, \tau_0 = f(E \text{ or } B) \quad (۱)$$

مدل (هرشل - بالکلی)^[۷]:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \tau_0 = f(E \text{ or } B) \quad (۲)$$

مدل کیسون لایک^[۷]:

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\mu\dot{\gamma})^{1/2}, \tau_0 = f(E \text{ or } B) \quad (۳)$$

1. Bingham-plastic
2. Herschel-Bulkley
3. Cason-Like

$$\tau_0 = AE^\beta \quad (12)$$

A و β پارامترهای وابسته به خواص سیال ER هستند. E شدت میدان الکتریکی است که از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x_i \partial x_i} = 0, \quad E_i = \frac{\partial U}{\partial x_i} \quad (13)$$

برای شبیه سازی CFD مدل مطرح شده، از نرم افزار FEMLAB نسخه ۲/۳ استفاده شده است. سیال به کار رفته دارای چگالی (kg/m^3) ۸۹۴، گرانیروی اولیه (Pa.s) ۰/۴، $\beta=2/518$ ، $A=6/69 \times 10^{-13}$ ، $R_0=0/0255$ و $R_i=0/0185$ می‌باشد [۵]. برای شبیه سازی، معادلات تکانه و معادلات پتانسیل الکتریکی، همزمان حل می‌شوند. برای مش‌بندی از مش مثلثی و به تعداد ۸۸۵۶ گره محاسباتی استفاده می‌شود.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

شکل (۳) مقایسه گرانیروی بین دو حالت بدون میدان و حالت دارای میدان برای $U_0=1800\text{V}$ ، $\omega=600\text{rpm}$ و $n=1$ به منظور نشان دادن اثر رئولوژیک (افزایش گرانیروی با اعمال میدان) ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در حالتی که شاخص n برابر یک است، در قسمت بدون میدان، سیال مانند یک سیال نیوتنی رفتار می‌کند و دارای گرانیروی ثابت ۰/۴ می‌باشد و در مقایسه با حالتی که میدان اعمال شده است، دارای گرانیروی کمتری است که نشان‌دهنده یکی از اثرات مهم الکترورئولوژیکی سیال ER است. با افزایش شعاع که افزایش میدان الکتریکی را در پی خواهد داشت، مشاهده می‌گردد که افزایش گرانیروی نیز شدیدتر می‌شود و گرانیروی متناسب با r^5 می‌باشد. در حالی که در $n=0/75$ با توجه به شکل (۷) رابطه گرانیروی با شعاع به صورت r^2 است. با مقایسه شکل‌های (۳) و (۷) مشاهده می‌شود که کاهش شاخص n ، افزایش اثر رئولوژیک را به همراه خواهد داشت. به طور مثال برای $n=1$ و $n=0/75$ در شعاع خارجی اختلاف ویسکوزیته بین دو حالت دارای میدان و بدون میدان، به ترتیب ۲/۵٪ و ۵/۵٪ می‌باشد، این بدین معنی است که ۳۳٪ کاهش در شاخص n ، ۳٪ افزایش در اختلاف گرانیروی را در پی

$$\rho \left(V_k \frac{\partial V_l}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_l} + \frac{\partial \tau_{lk}}{\partial x_k} \quad (6)$$

که V_i مؤلفه‌های سرعت، ρ چگالی سیال ER، p فشار و τ_{ik} مؤلفه‌های تنسور تنش هستند. رابطه τ_{ik} برحسب نرخ برش با رابطه‌های زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{ik} = \eta \dot{\gamma}_{ik} \quad \left(\sqrt{\frac{\tau_{ik}\tau_{ik}}{2}} > \tau_0 \right) \quad (7)$$

$$\dot{\gamma}_{ik} = 0 \quad \left(\sqrt{\frac{\tau_{ik}\tau_{ik}}{2}} \leq \tau_0 \right) \quad (8)$$

سیال ER برای قسمتی که در معرض میدان قرار می‌گیرد به صورت سیال (هرشل - بالکلی) مدل می‌شود که رابطه گرانیروی آن به صورت زیر است:

$$\eta = \mu D^{(n-1)} + \tau_0 D^{-1} \quad (9)$$

$$D = \nabla V + \nabla V^t \quad (10)$$

برای حالتی که نرخ برش به سمت صفر میل می‌کند، مقدار η به سمت بی‌نهایت میل خواهد کرد که ایجاد خطای محاسباتی می‌کند، برای حل این مشکل پاپاناستازیو^۱ معادله زیر را به جای معادله (۹) پیشنهاد کرد:

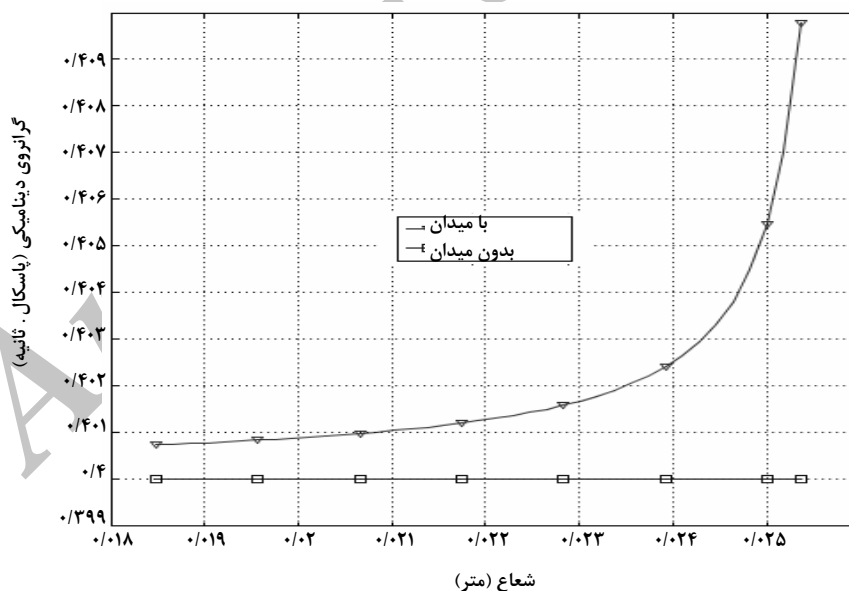
$$\eta = \mu D^{(n-1)} + \frac{\tau_0 (1 - \exp(-mD))}{D} \quad (11)$$

که $m \geq 200\text{s}$ فرض می‌شود. برای قسمتی که میدان اعمال نمی‌شود، سیال ER به صورت سیال نیوتنی با گرانیروی ثابت در نظر گرفته می‌شود. τ_0 برحسب توزیع میدان الکتریکی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

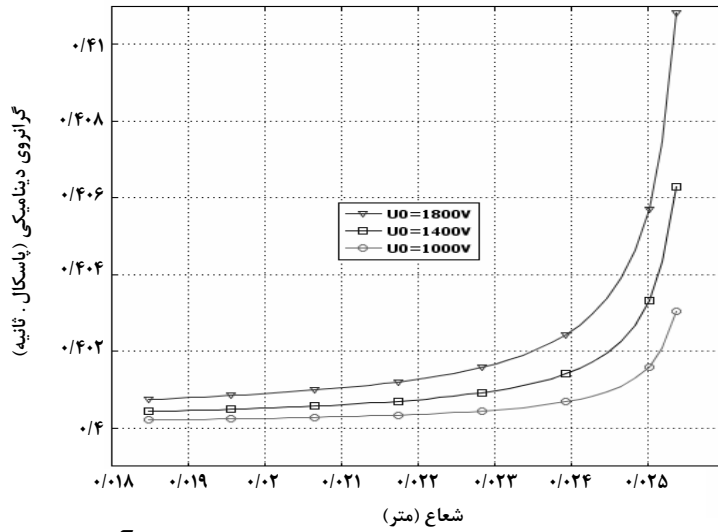
1. Papanastasiou

می‌رسد. از شکل (۶) که اثر افزایش سرعت استوانه داخلی را بر گرانروی سیال نشان می‌دهد کاملاً واضح است که کاهش سرعت چرخش استوانه میانی، افزایش گرانروی بیشتری را به دنبال دارد. لازم به ذکر است که کاهش سرعت چرخش باعث افزایش نرخ برش در سیال شده و این امر باعث افزایش گرانروی شده است. برای مثال، وقتی سرعت چرخش از ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به ۲۴۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافته باشد، تغییرات گرانروی ۰/۶۳٪ کاهش یافته است. شکل (۷) نیز به منظور مشاهده اثر کاهش شاخص n بر تغییرات گرانروی بین دو حالت با میدان و بدون میدان رسم شده است. افزایش گرانروی در شعاع‌های بالاتر توسط شکل (۳) و (۷) قابل توجیه است. به این صورت که با افزایش میدان الکتریکی، تنش تسلیم سیال، τ_0 ، بزرگ‌تر و در نتیجه سیال طبق رابطه (هرشل - بالکلی) گرانروی بیشتری خواهد داشت.

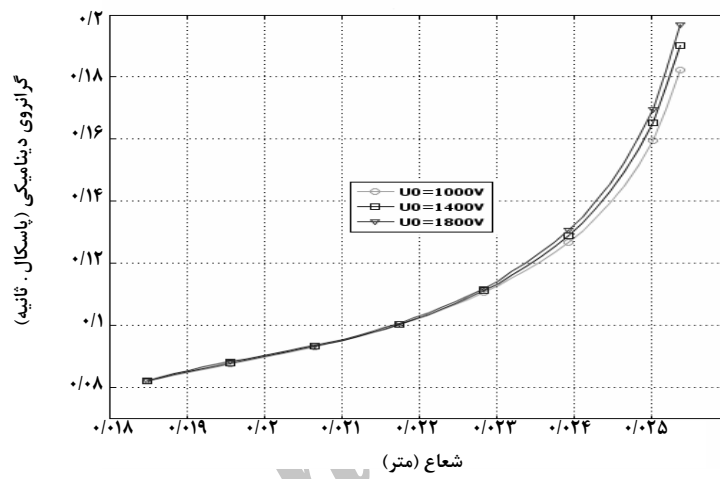
خواهد داشت. شکل‌های (۴) و (۵) مقایسه گرانروی برای (دور بر دقیقه) $\omega = 600 \text{ rpm}$ در ولتاژهای مختلف به ترتیب برای $n=1$ و $n=0.75$ را نشان می‌دهد و برای نشان دادن اثر افزایش میدان و کاهش شاخص n بر گرانروی سیال الکترورنولوژیک آورده شده‌اند. از این شکلها نیز کاملاً مشخص است که در میدان‌های قوی‌تر (اختلاف پتانسیل بالاتر) تغییرات گرانروی در مقایسه با میدانهای ضعیف‌تر بیشتر است و هرچه میدان قوی‌تر باشد اختلاف گرانروی بیشتری را در پی خواهد داشت. مثلاً در حالت $n=1$ ، وقتی اختلاف پتانسیل از ۱۰۰۰ ولت به ۱۴۰۰ ولت افزایش می‌یابد، اختلاف گرانروی ۰/۶۲٪ افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه شکل‌های (۴) و (۵) می‌توان دریافت که با افزایش شاخص n در مدل هرشل بالکلی، تغییرات گرانروی در طول شعاع قابل توجه‌تر است. در حالت $n=1$ گرانروی از شعاع داخلی تا شعاع خارجی در (ولت) $U_0=1800 \text{ V}$ ، ۲/۲۴٪ تغییر می‌کند، در حالی که برای $n=0.75$ این مقدار افزایش به ۱/۱۵٪



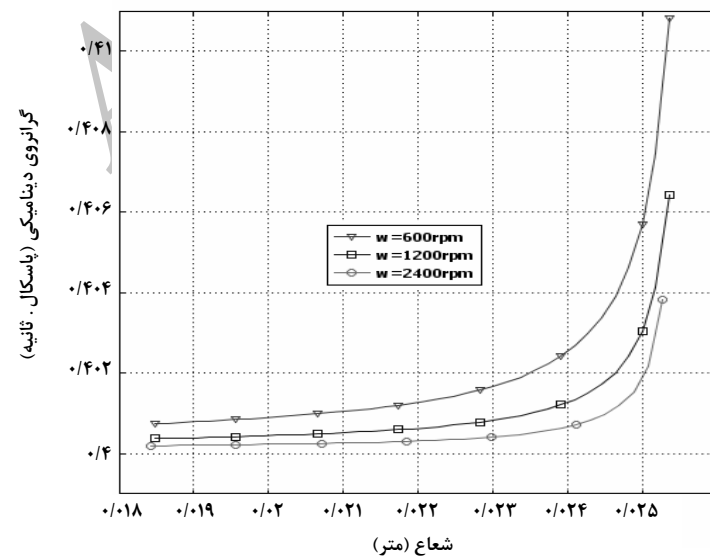
شکل ۳- مقایسه گرانروی بین دو حالت: بدون میدان ($\theta = \frac{5\pi}{4}$) و دارای میدان ($\theta = \frac{\pi}{4}$) برای $n=1$ و $\omega=600 \text{ rpm}$ و $U_0=1800 \text{ V}$



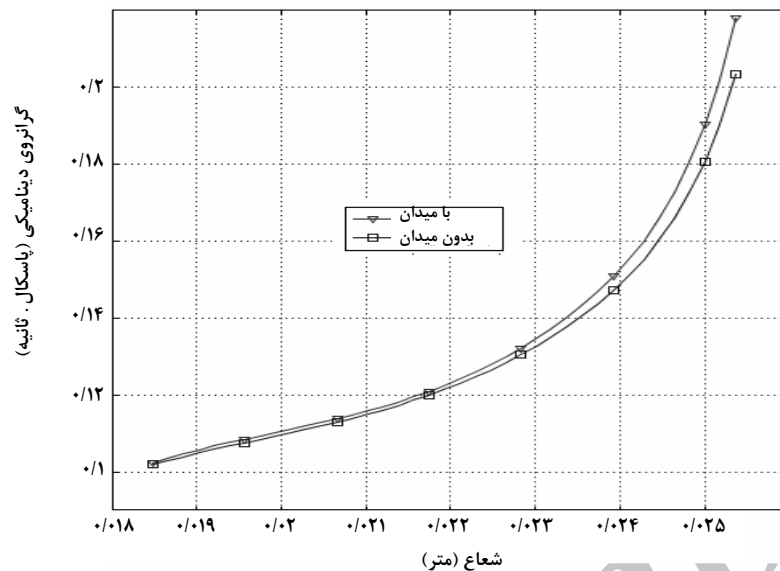
شکل ۴- مقایسه گرانروی برای $\omega=600rpm$, $n=1$, U_0 های مختلف و $(\theta = \frac{\pi}{4})$



شکل ۵- مقایسه گرانروی برای $\omega=600rpm$ و $n=0.75$ و U_0 های مختلف و $(\theta = \frac{\pi}{4})$



شکل ۶- مقایسه گرانروی برای $U_0=1800V$, $n=1$ در سرعت‌های چرخش مختلف و $(\theta = \frac{\pi}{4})$



شکل ۷- مقایسه گرانروی بین دو حالت: بدون میدان ($\theta = \frac{5\pi}{4}$) و دارای میدان ($\theta = \frac{\pi}{4}$) برای $n=0.75$ و $\omega=600$ rpm و $U_0=180.07$

۵- نتیجه گیری

ترتیب ۲/۵٪ و ۵/۵٪ می باشد. همچنین با افزایش شاخص n، تغییرات گرانروی در طول شعاع قابل توجه تر است.

در این مطالعه، سیالات هوشمند، ساختار و خواص آنها مورد بررسی قرار گرفت. سیالات الکترورنولوژیک که نسبت به میدان الکتریکی در حد کیلوولت و سیالات مگنتورنولوژیک که در میدان مغناطیسی رفتاررنولوژیک آنها تغییر می کنند، دو دسته مهم از این سیالات هستند. این سیالات عموماً از ترکیب ذرات جامد و در بعضی موارد مایع در یک سیال پایه ساخته می شوند. با توجه به کنترل پذیری رفتار آنها، این سیالات کاربردهای وسیعی در صنایع خودرو سازی، ضد زلزله کردن ساختمانها، صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، روباتیک، صنایع نظامی و مهندسی پزشکی پیدا کرده اند. شبیه سازی CFD حرکت سیال ER بین دو استوانه با مدل (هرشل - بالکلی) و نرم افزار FEMLAB نسخه ۲/۳ بررسی شد. اثر اعمال میدان الکتریکی روی خواص رئولوژیکی سیال ER مورد مطالعه قرار گرفت. در مقایسه با سیال نیوتنی، کاهش سرعت چرخش استوانه داخلی و افزایش میدان الکتریکی باعث افزایش گرانروی و تنش تسلیم می شود که در nهای کوچکتر، این اثر قوی تر خواهد بود. به طور مثال به ازای $n=1$ و $n=0.75$ در شعاع خارجی اختلاف گرانروی بین دو حالت دارای میدان و بدون میدان، به

۶- فهرست علائم و نشانه ها

E	شدت میدان الکتریکی
τ_0	نرخ برش
U	ولتاژ میدان الکتریکی
U_0	ولتاژ اعمال شده به استوانه خارجی
R_i	شعاع استوانه داخلی
R_o	شعاع استوانه خارجی
ω	سرعت زاویه ای استوانه داخلی
τ_0	تنش تسلیم سیال غیر نیوتنی
B	شدت میدان مغناطیسی
η	گرانروی ظاهری
v	بردار سرعت

- [1] Song X., "Decomposition approach to model smart suspension struts", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol.13, pp.1695-1705, (2007).
- [2] Hao T., "Electrorheological Fluids", *Advanced Materials*, vol. 13, pp. 1847-1857, (2001).
- [3] Hao T., "Electrorheological suspensions" *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 97, pp. 1-35, (2002).
- [4] Olabi A.G., Grunwald A., "Design and application of magneto-rheological fluid", *Mechanical and Manufacturing Engineering*, vol. 51, pp. 67-80, (2006).
- [5] Peng J., Ke-Qin Zhu, "Effects of electric field on hydrodynamic characteristics of finite-length ER journal bearings", *Tribology International*, vol. 39, pp. 533-540, (2005).
- [6] Sayed-Ahmad M.E., "Forced Convection Transfer Of a Roberston-Stiff Fluid Between Two Coaxial Rotating Cylinders", *Int. Comm. Heat Transfer*, vol. 26, pp. 695-704, (1999).
- [7] Ursescu A., "Channel flow of electrorheological fluids under an inhomogeneous electric field", PhD Thesis, (2005).
- [8] Gertzos K.P. , Nikolakopoulos P.G., Papadopoulos C.A. , "CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant" *Tribology International*, vol. 41 , pp.1190-1204, (2008).
- [9] Jun J., Uhm S., Ryu J., Suhb K., "Synthesis and characterization of monodisperse magnetic composite particles for magnetorheological fluid materials", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 260, pp.157-164, (2005).
- [10] Choi J.S., Park B.J., Cho M.S., Choi H.J., "Preparation and magnetorheological characteristics of polymer coated carbonyl iron suspensions", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , vol. 306, pp. 374 – 376 , (2006).
- [11] Feng B., Hong R.Y., Wang L.S., Guoc L., Li H.Z., Ding J., Zheng Y., Wei D.G., "Synthesis of Fe₃O₄/APTES/PEG diacid functionalized magnetic nano particles for MR imaging", *Colloids and SurfacesA: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 328, pp. 52–59, (2008).
- [12] Fang F., Kim J., Choi H., "Synthesis of core-shell structured PS/Fe₃O₄ microbeads and their Magnetorheology", *Polymer*, vol. 50, pp. 2290 –2293, (2009).
- [13] Caoa Z., Jianga W., Yeb X., Gong X., "Preparation of superparamagnetic Fe₃O₄/PMMA nano composites and their magnetorheological characteristics", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, pp. 1499–1502, (2008).
- [14] Wu Q., Yuan Zhao B., Chen L., Fang C., Hu K., "Preparation and electrorheological property of rare earth modified amorphous Ba_xSr_{1-x}TiO₃ gel electrorheological fluid" *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 282 , pp. 493-498, (2004).
- [15] Wu Q., Yuan Zhao B., Chen L., Hu K., "Preparation and electrorheological property of alkaline earth metal compounds modified amorphous TiO₂ electrorheological fluid" *Scripta Materialia*, vol. 50, pp. 635-639, (2003).
- [16] Cao J.G., Shen M., Zhou L.W., "Preparation and electrorheological properties of triethanolamine-modified TiO₂", *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 179, pp.1565-1568, (2006).
- [17] Jung R., Ho Yoon S., Kang M., Kim H., Jin H., "Preparation of carbon nanotubes-incorporated polymeric microspheres for electrorheological fluids", *Current Applied Physics*, vol. 8, pp. 807– 809, (2007).
- [18] Lee Y.H. , Kim C.A. , Jang W.H. , Choi H.J., Jhon M.S., "Synthesis and electrorheological characteristics of microencapsulated polyaniline particles with melamine-formaldehyde resins", *Polymer*, vol. 42, pp. 8277- 8283, (2001).