



## ساخت و آزمایش سیال مگنتورئولوژیکال بهینه و مدل سازی دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه با استفاده از مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید و روش های تحلیلی شبه استاتیک، تحلیلی ناپایا، عددی و آزمایشگاهی

محمد مهدی ذوالفقاریان\*، محمدحسن کیهانی، محمود نوروزی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۹  
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰  
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۰/۰۳

### کلمات کلیدی:

سیال مگنتورئولوژیکال  
دمپر مگنتورئولوژیکال  
مدل غیر نیوتونی جدید  
میدان مغناطیسی  
نیروی دمپینگ

**خلاصه:** سیال های مگنتورئولوژیکال، یکی از انواع سیال های هوشمند می باشند که به طور گسترده در کاربردهای مهندسی از جمله دمپینگ ارتعاشات در دمپرهای مگنتورئولوژیکال، بکار می روند و تحت میدان مغناطیسی دارای تنش تسلیم و ویسکوزیته قابل افزایش و کنترل می باشند. در این پژوهش، پس از انجام آزمایش روی سه نمونه پودر آهن کربونیل و تست پایداری، سیال بهینه انتخاب می شود. نتایج به دست آمده برای سیال بهینه ساخته شده با ۸۵٪ وزنی پودر آهن، مشابه نتایج روغن لرد (ساخت آمریکا) می باشد. همچنین یک مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید جهت مدل سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال بهینه، ارائه شد که نسبت به مدل های متداول بینگهام پلاستیک و هرچل بالکلی، دارای دقت بیشتری بوده و در مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی قابل استفاده است. سپس، ضمن مدل سازی یک نمونه دمپر مگنتورئولوژیکال با استفاده از مدل مذکور و مدل بینگهام پلاستیک و روش های دینامیک سیالات محاسباتی، تحلیلی شبه استاتیک و ناپایای ارائه شده، نتایج بدست آمده اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل نشان می دهد، در نظر نگرفتن اثر رقیق شوندگی سیال، تنش برشی سیال روی دیواره، ترم اینرسی و اثر میدان مغناطیسی بر ویسکوزیته پلاستیک، باعث خطای قابل توجه، بخصوص با افزایش میدان مغناطیسی، عدد رینولدز و عرض شیار پیستون می شود و روش های ارائه شده در این پژوهش، دقیق تر می باشد.

### ۱- مقدمه

کنترل شود. در این دمپرها، سیال وقتی در معرض میدان مغناطیسی قرار می گیرد می تواند در حدود چند میلی ثانیه از حالت سیال غلیظ به سیال شبه جامد تغییر کند. سیال می تواند به همان سرعتی که میدان مغناطیسی حذف می شود، کاملاً به حالت سیال معمولی اولیه برگردد. دمپرهای مگنتورئولوژیکال ذاتاً دینامیک بسیار غیرخطی و هیستریزس از خود نشان می دهند. چنین رفتاری مدل سازی این دمپرها را بسیار چالش برانگیز می کند. به منظور مشخص کردن عملکرد دمپرهای مگنتورئولوژیکال مدل های گوناگونی پیشنهاد شده است. مدل های پیشنهاد شده باید دقیق باشند، به این معنی که خروجی مدل پیشنهاد شده و داده های آزمایشگاهی باید دارای تطابق مناسب باشند. در دهه های اخیر مطالعاتی جهت مدل سازی این دمپرها به صورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی انجام شده است. یک تحلیل بی بعد شبه استاتیک توسط فیلیپس<sup>۲</sup> [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت که در آن، یک مجموعه از متغیرهای بی بعد و حل چندجمله ای متناظر با آن جهت تعیین گرادیان فشار و جریان

سیالات هوشمند مگنتورئولوژیکال (ام ار)<sup>۱</sup> بر اثر قرار گرفتن در میدان مغناطیسی دارای تنش تسلیم متغیر می شوند و تغییرات خصوصیات رئولوژیکال این سیالات در کمتر از چند میلی ثانیه اتفاق می افتد. این خصوصیت، آن ها را برای بسیاری از کاربردهای صنعتی مناسب می سازد. از این قابلیت به طور روزافزون در کاربردهای مهندسی، سامانه های ترمز ضد قفل [۱-۳]، کلاچ مغناطیسی [۴-۶] و دمپینگ ارتعاشات [۷ و ۸] در دمپرها در وسایل نقلیه، پل ها و ماشین های لباسشویی و همچنین در کاربردهای مختلف پزشکی استفاده می شود [۹]. هدف اصلی استفاده از دمپر در هر کاربرد دینامیکی، پراکنش انرژی است. در غیر این صورت انرژی اضافی در داخل سیستم باقی می ماند و منجر به خرابی زودرس تجهیزات می شود. نیروی دمپینگ دمپرهای مگنتورئولوژیکال، می تواند با تغییر ویسکوزیته و به ویژه تنش تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال داخل آن

1 MagnetoRheological (MR)

2 Phillips

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.zolfagharian62@gmail.com



خان و همکاران<sup>۵</sup> [۱۹]، ارزیابی شد.

بوجود اهمیت اثر ترم اینرسی سیال و رفتار ناپایای جریان سیال مگنتورئولوژیکال، اکثر حل‌های تحلیلی و فرمول‌های طراحی بر مبنای فرض شبه استاتیک بوده و از ترم اینرسی در آن‌ها صرف‌نظر شده است؛ بنابراین مطالعه شرایط ناپایا جریان این نوع سیال برای شرح عملکرد دمپر مگنتورئولوژیکال دارای اهمیت است. چن<sup>۶</sup> و یانگ [۲۰]، گرادیان فشار و پروفیل سرعت جریان ناپایای سیال بینگهام بین صفحات موازی را با استفاده از روش تبدیل لاپلاس حل کردند. یو و همکاران<sup>۷</sup> [۲۱] یک مطالعه تحلیلی ناپایا برای حالت مود جریانی با دیواره‌های ثابت انجام دادند.

از سال ۲۰۰۹ مطالعاتی با رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی (سی‌اف‌دی)<sup>۸</sup> روی دمپرهای مگنتورئولوژیکال انجام شده است. در سال ۲۰۰۹ سوسان<sup>۹</sup> [۲۲]، مدل رئولوژیکال برای سیالات مگنتورئولوژیکال، با ترکیب رفتار شبه نیوتونی در تنش برشی پایین با مدل هرچل-بالکی در تنش برشی بالا که در آن محلول رفتار (غلیظ شدن) از خود نشان می‌دهند ارائه کرد. از مزایای این مدل این بود که در کدهای سی‌اف‌دی معمول برای محاسبه جریان مگنتورئولوژیکال در کاربردهای معمول، قابل‌استفاده است؛ در این تحقیق حل شبه تحلیلی با نتایج عددی به‌دست‌آمده اعتبار سنجی شده است. سپس در سال ۲۰۱۱ بومپوس و نیکولاکوپولوس<sup>۱۰</sup> [۲۳] یک مطالعه جامع روی یک یاتاقان گرد مگنتورئولوژیکال، به‌وسیله دینامیک سیالات محاسباتی و روش المان محدود، انجام دادند و خصوصیات مانند ثوابت اصطکاک و خروج از مرکز محاسبه شدند. پارلاک و همکاران<sup>۱۱</sup> [۲۴] در سال ۲۰۱۲، یک روش بهینه‌سازی با تابع هدف نیروی کلی دمپر ۱۰۰۰ نیوتون و ماکزیمم چگالی میدان مغناطیسی یک دمپر مگنتورئولوژیکال ارائه کردند. روش المان محدود برای تحلیل میدان مغناطیسی و تحلیل سی‌اف‌دی برای تحلیل جریان مگنتورئولوژیکال مورد استفاده قرار گرفتند تا مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به دست آیند. رویکرد جدید آن‌ها استفاده از میدان مغناطیسی و جریان مگنتورئولوژیکال و هم‌زمان تعیین مقادیر طراحی بهینه می‌باشد. دو

بین دو صفحه موازی توسعه داده شد. یانگ و همکاران<sup>۱</sup> [۱۱]، یک مدل شبه استاتیک متقارن محوری برای دمپر مگنتورئولوژیکال ارائه و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی و مدل تحلیلی صفحات موازی مقایسه کردند. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده توسط آن‌ها، این مدل‌ها برای تشریح رفتار دینامیکی دمپر کافی نمی‌باشند و یک مدل مکانیکی بر مبنای مدل هیستریزیس باوس-ون<sup>۲</sup>، توسط آن‌ها توسعه داده شد. چهار پارامتر بی‌بعد طراحی بر مبنای معادله بینگهام پلاستیک و مدل تحلیلی شبه استاتیک توسط هنگ و همکاران<sup>۳</sup> [۱۲]، تعریف شد. آن‌ها مشخصات طراحی هر پارامتر را بررسی و مراحل طراحی دمپر مگنتورئولوژیکال را فرموله کردند. یو و ورلی<sup>۴</sup> [۱۳] یک مدل بینگهام پلاستیک شبه استاتیک متقارن محوری برای یک دمپر مگنتورئولوژیکال مود جریانی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک ثابت دمپینگ ویسکوز معاد، برای محفظه حلقوی، که در اندازه شیار کوچک معادل محفظه مستطیلی می‌باشد، تقریب زدند. یک مدل بینگهام بی‌بعد تحلیلی شبه استاتیک برای دمپر مگنتورئولوژیکال مود ترکیبی توسط هنگ و همکاران [۱۴] مورد تحلیل قرار گرفت. آن‌ها اثر عدد بینگهام و نسبت دامنه هیدرولیکی بی‌بعد روی ضخامت پلاگ بی‌بعد و ثابت دمپینگ ویسکوز معادل را بررسی کردند. هنگ و همکاران [۱۵] عملکرد یک شیر مگنتورئولوژیکال با دو شیار مقاوم جریان سیال حلقوی و شعاعی با شیر مگنتورئولوژیکال را با تنها یک شیار جریان سیال حلقوی، به‌صورت آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه کردند. بر طبق نتایج آن‌ها، با تغییر پارامترهای شیر، افت فشار در طول یک شیر مگنتورئولوژیکال با هر دو شیار جریان حلقوی و شعاعی بزرگ‌تر از شیر با شیار حلقوی می‌باشد. به دلیل رفتار تسلیم سیال‌های مگنتورئولوژیکال، مدل‌های رئولوژیکال ویسکوپلاستیک برای تشریح رفتار این نوع سیال‌ها استفاده می‌شوند [۱۶]. یکی از متداول‌ترین مدل‌های رئولوژیکال برای سیال‌های مگنتورئولوژیکال، مدل بینگهام پلاستیک می‌باشد [۱۷ و ۱۸] که در تحقیق حاضر جهت مقایسه با مدل پیشنهاد شده در این پژوهش، مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل شبه استاتیک بر مبنای مدل بینگهام پلاستیک و هرچل-بالکی برای جریان سیال مگنتورئولوژیکال در محفظه حلقوی توسط

5 Khan et al.

6 Chen

7 Yu et al.

8 Computational Fluid Dynamics (CFD)

9 <sup>6</sup> Susan

10 Bompos and Nikolakopoulos

11 Parlak et al.

1 Yang et al.

2 Bouc-Wen

3 Hong et al.

4 Yoo and Wereley

و شی<sup>۴</sup> [۲۹] در سال ۲۰۱۲ یک دمپر چرخشی مگنتورئولوژیکال را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق در فاصله باریک بین دو دیسک سیال مگنتورئولوژیکال پر شده است. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار فلونت، عملکرد دمپر مگنتورئولوژیکال چرخشی در دو حالت دیسک موج‌دار و دیسک صاف معمولی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده گشتاور خروجی کلی در حالت استفاده از دیسک موج‌دار از حالت دمپر چرخشی دو دیسک معمولی بیشتر می‌باشد. در سال ۲۰۱۳ اسپین‌اسکی و اسزسزچ<sup>۵</sup> [۳۰] یک مدل سی‌افدی برای سیال مگنتورئولوژیکال که تحت مود فشاری قرار دارد ارائه کردند. در این مدل، سیال مگنتورئولوژیکال بین دو صفحه موازی قرار دارد که یکی از آن‌ها تحت جابجایی تعیین شده یا نیروی ورودی قرار می‌گیرد. بر مبنای این تحقیق با در نظر گرفتن این نکته که تنش تسلیم در مود فشاری علاوه بر چگالی میدان مغناطیسی تابعی از میزان جابجایی نیز هست همخوانی دقیق‌تری بین نتایج آزمایشگاهی و مدل سی‌افدی به دست آوردند. گلداسز<sup>۶</sup> و اسپین‌اسکی [۳۱] در سال ۲۰۱۵ یک دمپر مود فشاری را با استفاده از رویکرد ویسکوزیته ظاهری، مورد مطالعه سی‌افدی قرار دادند. در این مدل سیال مگنتورئولوژیکال بین دو صفحه موازی تحت فشار قرار می‌گیرد. بر مبنای نتایج به دست آمده تنش تسلیم و در نتیجه نیروی دمپینگ در دمپ‌های مود فشاری علاوه بر میدان مغناطیسی متناسب با ارتفاع و جابجایی هم تغییر می‌کند. در سال ۲۰۱۷ گاو<sup>۷</sup> و همکاران [۳۲]، یک نمونه دمپر مگنتورئولوژیکال را با هدف حداقل کردن مصرف انرژی در هر سیکل و با استفاده از الگوریتم پی‌اس‌او<sup>۸</sup> طراحی بهینه کردند. سپس آن‌ها دمپر بهینه طراحی شده را ساخته و تست‌های نیرویی را در مورد آن انجام دادند.

در سال ۱۹۹۸ جولی و همکاران<sup>۹</sup> [۳۳] خواص مغناطیسی و رئولوژیکی چندین نوع سیال مگنتورئولوژیکال تجاری را مورد بحث و بررسی قرار دادند. این سیالات به کمک نمودارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بعضی از کاربردهای کنونی این سیالات بررسی شده است. این کاربردها نشان می‌دهند چگونه باید خواص مواد

طرح بهینه دمپر مگنتورئولوژیکال به دست آمده، ساخته شده و با نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده‌اند. آن‌ها در همان سال و روی همان هندسه پژوهش دیگری ارائه کردند که یکی از اهداف آن، بررسی اثر سرعت پیستون و کورس دمپر مگنتورئولوژیکال می‌باشد [۲۵]. علاوه تحلیل سی‌افدی نیز با استفاده از مش تغییر شکل یافته و گذرا به منظور مدل‌سازی حرکت سر پیستون دمپر مورد نظر انجام دادند. همچنین با استفاده مدل شبه استاتیک نیروی دمپر و ضخامت پلاگ مخصوص در شیار حلقوی محاسبه کردند. نهایتاً نتایج به دست آمده از دمپ‌های مدل‌سازی شده با مدل سی‌افدی و شبه استاتیک با نتایج آزمایشگاهی اعتبار سنجی شدند. بر طبق نتایج به دست آمده نیروی دمپر مخصوصاً با افزایش خطی جریان تا ۱ امپر افزایش می‌یابد و در جریان‌های بالاتر از آن به دلیل اشباع مغناطیسی افزایش به تدریج کم می‌شود. همچنین نرخ افزایش نیروی دمپر در سرعت‌های بالاتر از ۱۵ متر بر ثانیه، کاهش می‌یابد. گدیک و همکاران<sup>۱</sup> [۲۶] در سال ۲۰۱۲، به مدل‌سازی سی‌افدی دوبعدی جریان سیال مگنتورئولوژیکال غیرقابل تراکم پایا و لایه‌ای بین دو صفحه صاف موازی پرداختند. آن‌ها از کد تجاری انسیس فلونت<sup>۲</sup> و روش حجم محدود برای محاسبات سی‌افدی و همچنین مدول ام‌اچ‌دی<sup>۳</sup> فلونت برای حل معادلات القای مغناطیسی استفاده کردند؛ و بر طبق مشاهدات آن‌ها افزایش میدان مغناطیسی خارجی به کار گرفته شده باعث کاهش سرعت جریان می‌شود. در همان سال امیدبیگی و هاشم‌آبادی [۲۷] یک سیلندر چرخشی دارای خروج از مرکز در یک سیال مگنتورئولوژیکال را مورد مدل‌سازی سی‌افدی قرار دادند. بر مبنای مطالعات آن‌ها اثرات مگنتورئولوژیکال و افزایش درصد وزنی محلول و نسبت خروج از مرکز باعث افزایش ویسکوزیته، تنش تسلیم و گشتاور کلی چرخش سیلندر داخلی می‌شود. همچنین خان و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۲ عملکرد دمپ‌های مگنتورئولوژیکال با شکل پیستون‌های متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها ۶ شکل پیستون متفاوت مورد مدل‌سازی دوبعدی متقارن محوری قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد یک کوئل با پیستون که انتهای آن فیلت یا گرد شده بهتر از بقیه اشکال پیستون می‌باشد. چن

4 Shi

5 Sapiński and Szczech

6 Gołdasz

7 Gao

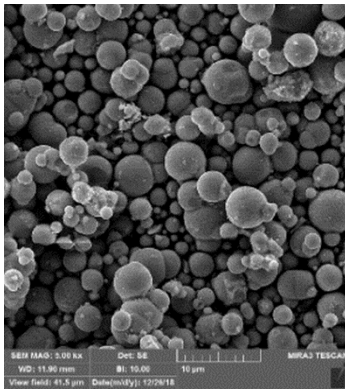
8 PSO

9 Jolly et al.

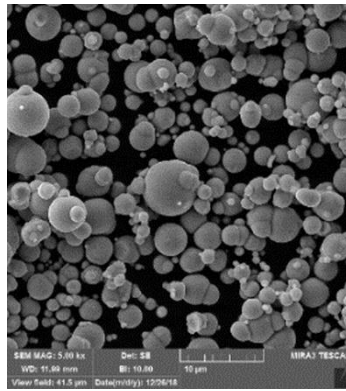
1 Gedik et al.

2 Ansys Fluent 14

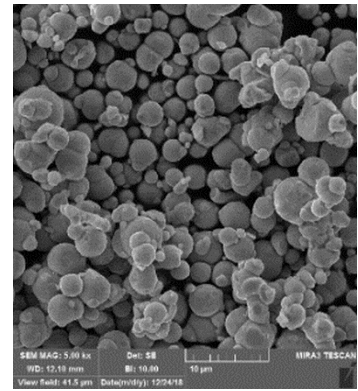
3 MHD



ج) نمونه ۳



ب) نمونه ۲



الف) نمونه ۱

**Fig. 1. SEM image of the particle structure and size of three carbonyl iron powder samples**

شکل ۱: تصویر اس‌ای‌ام از ساختار و اندازه ذرات سه نمونه پودر آهن کربونیل

محلول پلیمری تهیه کردند و مشخصات رئولوژیکی آن را تحت میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. در تهیه این سیال از محلول پلیمری پایه آبی ساخته شده از اکسید پلی اتیلن به عنوان سیال حامل و آهن کربونیل<sup>۶</sup> استفاده شده است. همچنین پرمالاسا و همکاران<sup>۷</sup> [۴۰] نیز در همان سال، خواص مغناطیسی مکانیکی سیالات مگنتورئولوژیکال پایه آهنی را مورد پژوهش قرار دادند. ایشان برای ساخت سیال مگنتورئولوژیکال از روغن سیلیکون و پودر آهن استفاده کردند. برای جلوگیری از ته نشینی ذرات آهن از گریس استفاده شده است. در سال ۲۰۱۹ وانگ و همکاران<sup>۸</sup> [۴۱]، با استفاده از نانو کامپوزیت<sup>۹</sup>، یک سیال مگنتورئولوژیکال با پایداری بسیار خوب ساختند که ته نشینی کم این سیال، ناشی از ساختار دوبعدی ویژه و کاهش یافتن توزیع غیریکنواخت چگالی ذرات سیال بوده است. همچنین، ویسکوزیته، تنش برشی و تنش تسلیم این سیال با افزایش میدان مغناطیسی به خوبی افزایش یافت.

در این پژوهش، ابتدا آزمایش پایداری برای چند نمونه سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده با ترکیب‌های مختلف انجام شده و سیال بهینه از لحاظ پایداری و غلظت برای تست‌های رئومتر انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از نتایج تست رئومتر به دست آمده، یک مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید جهت پیش بینی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال، ارائه شده و از آن، جهت مدل سازی رفتار دمپر مگنتورئولوژیکال دو

گوناگون تنظیم شوند تا عملکرد بهینه برای یک کاربرد خاص حاصل گردد. در سال ۲۰۰۲ بوسیس و همکاران<sup>۱</sup> [۳۴] خواص سیالات مگنتورئولوژیکال و ساختار آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۵ ویوتا و همکاران<sup>۲</sup> [۳۵] در مورد ساخت سوسپانسیون‌های مگنتورئولوژیکال و پایداری آن‌ها تحقیق و بررسی کردند. در سال ۲۰۰۶ ورلی و همکاران [۳۶] چند نمونه سیال مگنتورئولوژیکال دوبخشی با استفاده از ذرات آهن در مقیاس نانومتر و میکرون تهیه کردند. سیالات مگنتورئولوژیکال متداول از ذرات آهن در مقیاس میکرون تشکیل می‌شوند. در این پژوهش در ساخت سیال مگنتورئولوژیکال مخلوطی از ذرات در مقیاس میکرون آهن و ذرات آهن در مقیاس نانو استفاده شده است. همچنین در سال ۲۰۰۸ روزکوفسکی و همکاران<sup>۳</sup> [۳۷] ویسکوزیته سیال مگنتورئولوژیکال را تحت میدان مغناطیسی اندازه گیری کردند. هدف این پژوهش تعیین ویسکوزیته سیال مگنتورئولوژیکال در مقادیر میدان مختلف و تعیین پارامترهای مؤثر در توقف جریان سیال در یک لوله موئین بوده است. در همان سال جیان و همکاران<sup>۴</sup> [۳۸] چند نمونه سیال مگنتورئولوژیکال با سیالات حامل گوناگون تهیه کرده و خواص آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۲ کیم و همکاران<sup>۵</sup> [۳۹] سیال مگنتورئولوژیکالی را به کمک ذرات آهن کربونیل پخش شده در

6 CI  
7 Premalatha et al.  
8 Wang et al.  
9 CoFe2O4/MoS2

1 Bossis et al.  
2 Viota et al.  
3 Roszkowski et al.  
4 Zhang et al.  
5 Kim et al.



جدول ۱: ترکیب‌های به‌کار گرفته‌شده برای ساخت ۵ نمونه سیال مگنتورئولوژیکال  
Table 1. Different composition used in manufacturing of five samples of MR fluid

نمونه	درصد پودر آهن کربونیل	درصد سیال پایه	درصد پایدارکننده (اسید استئاریک)
سیال مگنتورئولوژیکال ۱	۶۵	۲۲	۳
سیال مگنتورئولوژیکال ۲	۷۵	۳۲	۳
سیال مگنتورئولوژیکال ۳	۸۵	۱۲	۳
سیال مگنتورئولوژیکال ۴	۸۵	۱۳	۲
سیال مگنتورئولوژیکال ۵	۸۵	۱۴	۱

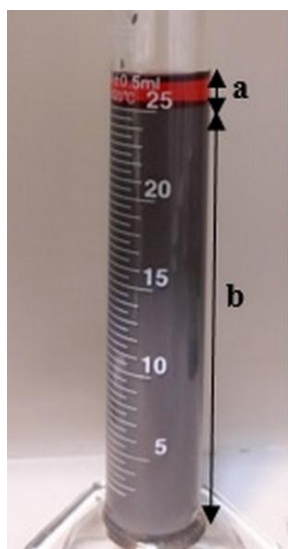


Fig. 3. Sedimentation test of Magnetorheological Fluid  
شکل ۳: تست ته‌نشینی سیال مگنتورئولوژیکال

هیدرولیک کاسپین وی‌جی ۱۴۶ به‌عنوان سیال پایه استفاده شده و همچنین عامل پایدارکننده دو فاز، اسید استئاریک<sup>۲</sup> می‌باشد که به‌عنوان افزودنی به ترکیب اضافه می‌شود.

ساختار و اندازه ذرات پودر آهن کربونیل مورد استفاده در این پژوهش توسط تصویر اس‌ای‌ام<sup>۳</sup> که در شکل ۱ نشان داده شده، به‌دست آمده و درصد خلوص پودرهای موجود نیز توسط آزمایش ای‌دی‌ایکس<sup>۴</sup> اندازه‌گیری شده است. از بین سه نمونه پودر آهن مورد آزمایش نشان داده شده در شکل ۱، نمونه ۱ دارای درجه خلوص بالاتری بوده و در نتیجه جهت ساخت سیال مگنتورئولوژیکال مورد استفاده قرار می‌گیرد. وادارندگی مغناطیسی<sup>۵</sup> و قابلیت نفوذپذیری آهن، به شدت



ب) (ب)



الف) (الف)

Fig. 2. a) Magnetic stirrer b) Mechanical stirrer  
شکل ۲: همزن الف) مغناطیسی ب) مکانیکی

مخزنه به روش سی‌اف‌دی استفاده می‌شود. نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از حل تحلیلی شبه استاتیک و ناپایای ارائه شده در این پژوهش با استفاده از مدل بینگهام پلاستیک، و همچنین فرمول متداول برای نیروی دمپینگ دمپر مود جریانی مقایسه شده و عملکرد دمپر مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده برای نیروی دمپینگ با استفاده از روش‌های ارائه شده در این پژوهش، نسبت به نتایج حاصل از فرمول متداول برای نیروی دمپینگ دمپر مود جریانی دقیق‌تر بوده و می‌توان از آن برای طراحی دقیق‌تر استفاده کرد.

## ۲- ساخت و آزمایش پایداری و رئومتری سیال مگنتورئولوژیکال:

سیالات مگنتورئولوژیکال، سوسپانسیون‌های مغناطیسی قابل‌کنترلی هستند که از فاز پراکنده فعال مغناطیسی، سیال حامل غیر مغناطیسی و عامل پایدارکننده تشکیل شده‌اند. در این پژوهش از پودر آهن کربونیل (با نام تجاری بسف آلمان، با قطر متوسط  $\mu\text{m}$  ۵ چگالی  $7.86 \text{ gr/cm}^3$ ) به‌عنوان فاز پراکنده مغناطیسی و روغن

- 1 VG46
- 2 Stearic acid
- 3 Scanning Electron Microscope (SEM)
- 4 Energy-Dispersive X-ray (EDX)
- 5 Coercivity

مدت ۷ روز، این بازه‌ی زمانی برای بررسی پایداری در نظر گرفته شده است.

درصد ته‌نشینی عبارت است از نسبت حجم قسمت شفاف سوسپانسیون به حجم کل آن، که توسط رابطه (۱) به دست می‌آید. در این رابطه،  $a$  ارتفاع سیال شفاف و  $b$  ارتفاع قسمت کدر سوسپانسیون می‌باشد.

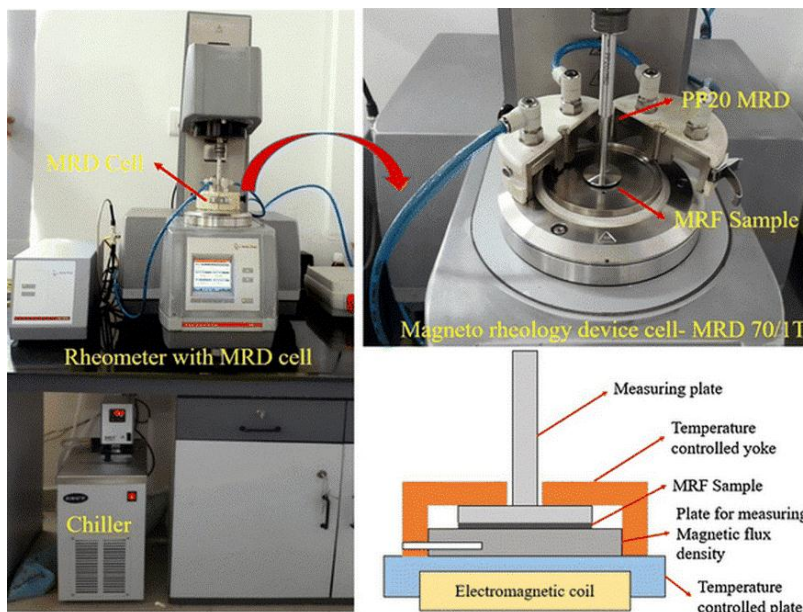
با توجه به نتایج آزمایش ته‌نشینی، اثر ماده نگه‌دارنده و غلظت فاز پراکنده بر پایداری بررسی شده و سپس سیال بهینه از نظر پایداری و غلظت مناسب، جهت انجام تست‌های رئومتر و مدل‌سازی رفتار سیال و دمپر مگنتورئولوژیکال، انتخاب می‌شود. تست‌های رئومتر در این پژوهش برای سیال بهینه انتخاب شده، در مد برشی انجام شده است. این تست‌ها، جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی بر خصوصیات میدان مغناطیسی بر خصوصیات رئولوژی سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده و در نتیجه نیروی دمپینگ دمپر انجام می‌شود. در مد برشی با تغییر نرخ برش، ویسکوزیته و تنش برشی سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان‌های مختلف، در نرخ برش‌های  $0.01/s$  تا  $1000/s$  توسط رئومتر (آنتون پار مدل ۳۰۲ ام‌سی‌آر<sup>۱</sup>)

وابسته به خلوص آن می‌باشد. از طرف دیگر، بیشترین تنش تسلیم ممکن، متناظر با کمترین میزان وادارندگی مغناطیسی ذرات پودر آهن پراکنده شده می‌باشد [۴۲ و ۴۳]. ترکیب‌های به کار گرفته شده برای ساخت ۵ نمونه سیال مگنتورئولوژیکال مطابق جدول ۱ می‌باشند جهت ساخت هر یک از نمونه سیال‌های مگنتورئولوژیکال ابتدا سیال پایه و ماده پایدارکننده، به مدت ۱۵ دقیقه توسط همزن مغناطیسی در دمای حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد مطابق شکل ۲(الف) مخلوط می‌شوند تا محلول شفافی حاصل شود. سپس پودر آهن به محلول حاصل اضافه شده و به وسیله همزن مکانیکی به مدت ۳۰ دقیقه با دور  $3000\text{ rpm}$  مطابق شکل ۲(ب) هم زده می‌شود.

با توجه به نمونه‌های ساخته شده، می‌توان اثر غلظت فاز پراکنده و همین‌طور عامل پایدارکننده (اسید استناریک) را بر پایداری سیال مگنتورئولوژیکال بررسی کرد. به این منظور هر یک از نمونه‌ها حدود

$$s = \frac{a}{(a+b)} \times 100 \quad (1)$$

یک هفته در یک محل ثابت درون لوله مدرج، مطابق شکل ۳ قرار داده شد. به دلیل تقریباً صفر شدن نرخ ته‌نشینی اکثر نمونه‌ها در



**Fig.4. Magnetic rheometer MCR 302 model**

شکل ۴: رئومتر مغناطیسی مدل ام‌سی‌آر ۳۰۲ مورد استفاده در آزمایش

و منبسط می‌شود. همچنین در اثر حرکت پیستون، روغن در شیار حلقوی داخل پیستون جریان می‌یابد. در شکل ۵(الف) نواحی داخل شیار که به موازات سیم پیچ هستند تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار نمی‌گیرند، در حالیکه آن قسمت از نواحی داخل شیار که موازی فلنج هستند مغناطیسی می‌شوند. در نواحی تحت میدان مغناطیسی، تنش تسلیم و ویسکوزیته سیال مگنتورئولوژیکال با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. یک نمای شماتیک از پروفیل سرعت و شرایط مرزی نواحی تحت میدان مغناطیسی در شکل ۵(ب) نشان داده شده است. در این شکل، در جریان سیال مگنتورئولوژیکال داخل شیار، بخش‌های ۱ و ۳ ناحیه پس از تسلیم هستند که در آن‌ها تنش برشی بیش از تنش تسلیم است و سیال جریان می‌یابد و ناحیه ۲، ناحیه جریان پلاگ است که تنش برشی در آن کمتر از تنش تسلیم بوده و سرعت در عرض این ناحیه ثابت است. در نواحی بدون میدان

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho(U \cdot \nabla)U = \nabla(-PI + \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot U)I \quad (2)$$

مغناطیسی به دلیل تنش تسلیم ناچیز، پروفیل سرعت تقریباً به شکل سهمی می‌باشد.

### ۳-۲- معادلات حاکم و معادلات ساختاری

معادلات حاکم عبارت‌اند از معادلات پیوستگی و مومنتوم که در حالت کلی به ترتیب به صورت رابطه‌های (۲) و (۳) بیان می‌شوند. در این معادلات  $t$  زمان،  $U$  بردار سرعت،  $p$  چگالی،  $\nabla P$  گرادیان فشار و  $\tau$  تنش برشی می‌باشند. این معادلات در مدل‌سازی سی‌اف‌دی به صورت کامل و در همه نواحی حل می‌شوند و در مدل‌سازی تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا، برای جریان سیال داخل شیار پیستون در نواحی تحت میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی، همراه با ساده‌سازی‌هایی که در قسمت بعد بیان می‌شود، حل شده و پروفیل

$$\tau = \tau_y(H)\text{sign}(\dot{\gamma}) + \mu_p(H)\dot{\gamma} \quad |\tau| > \tau_y \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| \leq \tau_y \quad (5)$$

سرعت و گرادیان فشار در شیار جهت محاسبه نیروی دمپینگ به دست می‌آیند.

اتریش) با شیار ۱ میلی‌متر بین صفحات موازی آن اندازه‌گیری شده‌اند. به این منظور برای هر آزمایش حدود ۵ میلی‌لیتر سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. دقت این دستگاه در اندازه‌گیری لزجت دینامیکی برای نمونه‌ی مورد استفاده  $\pm 1.0\%P$ ، در محدوده‌ی نرخ برش مورد نظر است. رئومتر مورد استفاده در آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است.

### ۳-مدل‌سازی میدان جریان و فشار در دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه

#### ۳-۱- تعریف مسئله

یک نمای شماتیک از دمپر دو مخزنه مگنتورئولوژیکال مود جریان‌ی و پروفیل سرعت جریان در شیار پیستون در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل، این نوع دمپر از دو سیلندر داخلی و بیرونی تشکیل شده است که با حرکت نوسانی پیستون، روغن به‌طور متناوب از طریق شیرهای یکطرفه پایینی به فضای بین دو سیلندر وارد و از آن خارج می‌شود و در نتیجه هوای بین دو سیلندر دائماً فشرده

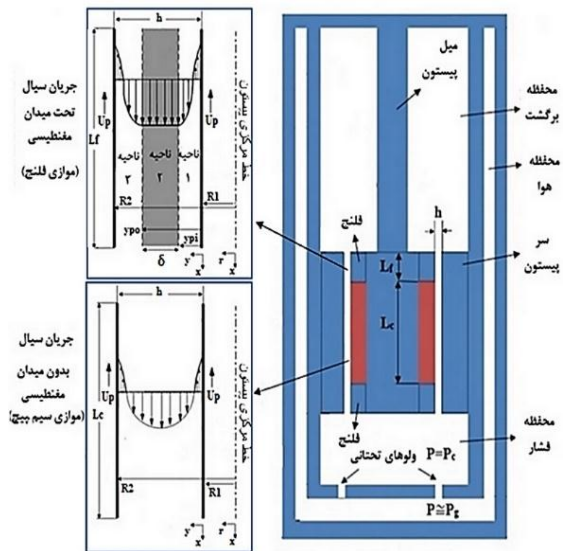


Fig. 5. Schematic view of a) flow mode twin tube magnetorheological damper b) velocity profile of fluid flow in piston gap

شکل ۵: نمای شماتیک از دمپر دو مخزنه مگنتورئولوژیکال مود جریان‌ی و پروفیل سرعت جریان در شیار پیستون

جدول ۲. شرایط مرزی مدل سی اف دی  
Table 2. Boundary condition of CFD modeling

$U = \bullet$	دیواره سیلندر
$U = U_p$	دیواره پیستون
$U = U_p$	دیواره میل پیستون
<p>If <math>\text{sgn}(Up) &gt; 0</math> then</p> $P_c(\text{rebound}) = P_g - \Delta P_{\text{valve}}$ <p>Else</p> $P_c(\text{compersion}) = P_g + \Delta P_{\text{valve}}$	شکل پایینی

مگنتورئولوژیکال در تمام فضای داخل دمپر با استفاده از روش اجزای محدود، در نرم افزار کامسول<sup>۱</sup> ۵،۳ حل شده و میدان جریان و فشار به دست آمده جهت بررسی عملکرد دمپر مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نیروی دمپینگ محاسبه می شود.

برای مدل سازی ویسکوزیته دینامیکی سیال غیر نیوتونی مگنتورئولوژیکال در روش سی اف دی، جهت جلوگیری از نامحدود شدن در حل عددی وابسته به زمان و همچنین مدل سازی دقیق تر رفتار سیال، از یک مدل هرچل بالکل اصلاح شده جدید (رابطه های (۶) و (۷)) که از برازش داده های آزمایشگاهی به دست آمده و برای اولین بار در این پژوهش ارائه می شود استفاده شده است. همچنین مدل سازی حرکت پیستون دمپر با استفاده از روش مش متحرک ای ال ای انجام شده است. استقلال حل از شبکه مورد بررسی قرار گرفته و تعداد مش مورد استفاده جهت مدل سازی، ۳۵۹۳۶۰ مش مربعی می باشد. شرایط

$$F_d = F_\eta + F_\tau = \frac{12\mu_0 L Q}{wh^3} A_p + \frac{cL_f \tau_y \text{sgn}(U_p)}{h} A_p \quad (8)$$

مرزی مورد استفاده روی دیواره های ثابت، متحرک و شیرهای یکطرفه خروجی در جدول ۲، آورده شده است.

در این تحقیق، در روش های تحلیلی از مدل بینگهام پلاستیک برای تشریح رفتار غیر نیوتونی سیال مگنتورئولوژیکال، به کار برده شده است که در این مدل، تنش برشی مطابق رابطه های (۴) و (۵) به دست می آید [۴۴].

در این معادلات  $\tau$  تنش برشی،  $\tau_y$  تنش تسلیم ناشی از میدان مغناطیسی،  $H$  شدت میدان مغناطیسی به کار برده شده،  $\mu$  ویسکوزیته پلاستیک سیال و  $\dot{\gamma}$  نرخ کرنش برشی می باشند. در این پژوهش، در بخش بحث روی نتایج، با استفاده از داده های آزمایشگاهی

$$\tau = \left( \frac{\tau_y(H)\text{sign}(\dot{\gamma})}{\sqrt{\dot{\gamma}^2 + \varepsilon^2}} + \tanh(m(H)\dot{\gamma})K(H)\dot{\gamma}^{n(H)-1} \right) \dot{\gamma} \quad |\tau| > \tau_y \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad |\tau| \leq \tau_y \quad (7)$$

به دست آمده، تابعیت ویسکوزیته پلاستیک از میدان مغناطیسی نیز، در مدل سازی در نظر گرفته شده است که به طور معمول از آن صرف نظر می شود.

همچنین در مدل سازی سی اف دی، جهت بررسی اثر رقیق شوندگی سیال و مدل سازی دقیق تر، علاوه بر مدل بینگهام پلاستیک، از مدل هرچل بالکل اصلاح شده جدید ارائه شده در این پژوهش (رابطه های (۶) و (۷)) که با استفاده از برازش داده های آزمایشگاهی به دست آمده استفاده می شود.

در این معادله ثوابت  $n$  و  $K$  مربوط به رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم می باشند. همچنین پارامتر  $\varepsilon$  و  $m$  به ترتیب جهت جلوگیری از نامحدود شدن حل و مدل سازی بهتر رفتار سیال در نواحی دارای نرخ برش پایین به کار گرفته شده اند که در بخش نتایج مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

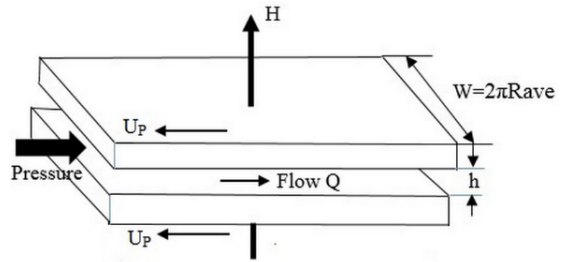
### ۳-۳- مدل سازی سی اف دی

تحلیل عددی ناپایای تراکم پذیر جریان سیال مگنتورئولوژیکال در دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه مود جریانی، به صورت متقارن محوری و بدون استفاده از فرضیات ساده کننده حل های تحلیلی انجام می شود. به این منظور، معادلات پیوستگی و ناویر استوکس، رابطه های (۱) و (۲)، به طور کامل برای جریان تراکم پذیر سیال

1 Comsol  
2 ale



صفحات موازی ارائه می‌شود. سپس ضمن ارائه یک حل ناپایا بر مبنای توسعه مسئله دوم استوکس [۴۶] برای جریان سیال مگنتورئولوژیکال در شیار حلقوی دارای حرکت نوسانی و تحت اختلاف فشار پرودیک، پروفیل سرعت و اختلاف فشار بین دو سر شیار، جهت محاسبه نیروی دمپینگ، با استفاده از هر دو روش به دست می‌آید.



**Fig. 6. Two dimensional fluid flow between two parallel plates**  
 شکل ۶: جریان داخل شیار به صورت جریان دوبعدی بین دو صفحه موازی

از آنجایی که نسبت عرض شیار (h) به شعاع متوسط (Rave) شیار کوچک است،  $h/R_{Rave} \ll 1$ ، در نتیجه جریان داخل شیار به صورت جریان دوبعدی بین دو صفحه موازی که در شکل ۶ نشان داده شده است در نظر گرفته می‌شود. این فرض به طور متداول برای تقریب رفتار سیال مگنتورئولوژیکال در هندسه‌های حلقوی، مورد استفاده قرار می‌گیرد و در طراحی‌های عملی با خطایی کمتر از ۵٪، مناسب به نظر می‌رسد [۱۷ و ۴۸-۴۷]. با توجه به این فرض، توزیع میدان مغناطیسی و در نتیجه تنش تسلیم در عرض شیار ثابت خواهد بود و تنش تسلیم از طریق شرایط مرزی ناحیه پلاگ بر حل معادله مومنوم و میدان سرعت و فشار به دست آمده تأثیر گزار می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه نسبت طول به عرض شیار بزرگ می‌باشد ( $L/h \gg 1$ )، جریان سیال مگنتورئولوژیکال در شیار داخل پیستون به صورت کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته می‌شود. در هر دو روش تحلیلی، از مدل بینگهام پلاستیک برای مدل کردن رفتار غیر نیوتونی جریان سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. با فرضیات مذکور برای حل تحلیلی جریان سیال مگنتورئولوژیکال، معادله مومنوم (رابطه (۲))، برای مدل‌های تحلیلی به صورت رابطه (۹) ساده می‌شود.

$$\frac{dP}{dx} = +\mu_p \frac{\partial^2}{\partial y^2} (U_{abs}) - \rho \left( \frac{\partial U_{abs}}{\partial t} \right) \quad (9)$$

به دلیل حرکت جریان سیال داخل پیستون متحرک، یک دستگاه مختصات غیر اینرسی که با سیستم در حال شتاب گرفتن حرکت می‌کند می‌تواند استفاده شود [۴۶]. در اینجا فرض شده است که دستگاه مختصات غیر اینرسی به پیستون متصل است؛ بنابراین شتاب مطلق  $a_{abs}$ ، سرعت مطلق  $U_{abs}$  یک ذره، بر حسب مقادیر نسبی آن به صورت زیر می‌تواند بیان شود. در این مسئله، پیستون دارای جابجایی نوسانی پرودیک سینوسی می‌باشد.

$$U_{abs} = -U_p + U_{rel} \quad (10)$$

$$a_{abs} = -a_p + a_{rel} \quad (11)$$

### ۳-۴- مدل سازی تحلیلی ناپایا و شبه استاتیک

فرمول متداول برای به دست آوردن نیروی دمپینگ در دمپرهای مگنتورئولوژیکال مود جریانی مطابق رابطه (۸) می‌باشد [۴۵]. که در این رابطه،  $\mu_0$  ویسکوزیته در حالت بدون میدان،  $L$  طول پیستون،  $Q$  دبی عبوری از داخل شیار،  $h$  عرض شیار،  $L_f$  طول ناحیه تحت میدان مغناطیسی و  $A_p$  مساحت سطح مقطع پیستون می‌باشند. همچنین  $w$  در شکل ۶ که نشان دهنده فرض مدل صفحات موازی می‌باشد، نشان داده شده است.

این رابطه با فرض شبه استاتیک و برای یک ولو با دیواره‌های ثابت به دست آمده است که در آن اثر میدان مغناطیسی بر ویسکوزیته پلاستیک و تنش برشی روی دیواره در محاسبه نیروی دمپینگ اعمال نشده است. همچنین جریان سیال در نواحی بدون میدان کاملاً نیوتونی فرض شده و از اثر حرکت دیواره و ترم اینرسی صرف نظر شده است.

در این پژوهش، جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی بر ویسکوزیته پلاستیک و رفتار جریان سیال و دمپر مگنتورئولوژیکال در ناحیه پس از تسلیم، اثر تنش برشی سیال روی دیواره شیار دمپر مود جریانی بر نیروی دمپینگ و اثر میدان مغناطیسی بر آن و همچنین تأثیر ترم اینرسی و حرکت دیواره پیستون بر عملکرد دمپر، علاوه بر مدل سازی سی اف دی، از دو روش تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا استفاده می‌شود که اولین بار توسط نویسندگان این مقاله ارائه شده‌اند. ابتدا یک حل شبه استاتیک برای جریان سیال مگنتورئولوژیکال داخل شیار حلقوی، با در نظر گرفتن حرکت دیواره‌های شیار و با استفاده از مدل

$$Q_h = 2\pi R_{ave} \left( \int_0^{y_{pi}} U_{abs1}(y,t) dy + \int_{y_{pi}}^{y_{po}} U_{abs2}(y,t) dy + \int_{y_{po}}^h U_{abs3}(y,t) dy \right) \quad (15)$$

$$\delta = y_{po} - y_{pi} = \quad (16)$$

$$2\tau_y L_f \text{sign}(U_p) \Delta P_{MR}^{-1}$$

$$\Delta P_{on} = \frac{12\mu L_f (A\omega(A_p - A_r + 2\pi R_{ave} h) \cos(\omega t))}{\pi R_{ave} h^3 (2 + (\bar{\delta})^3 - 3(\bar{\delta}))} \quad (17)$$

که در این رابطه  $\bar{\delta}$ ، ضخامت ناحیه پلاگ بی بعد می باشد. این رابطه برای جریان سیال مگنتورئولوژیکال داخل شیار پیستون با حرکت نوسانی برحسب ضخامت بی بعد ناحیه پلاگ و با در نظر گرفتن حرکت نوسانی دیواره های شیار برای اولین بار توسط نویسندگان این مقاله ارائه شده است. افت فشار در نواحی بدون میدان مغناطیسی،  $\dot{A}P_{off}$  نیز به روش مشابه به دست می آید.

حل تحلیلی معادلات حاکم برای جریان های ناپایا پیچیده است. با استفاده از روش به کار گرفته شده در این پژوهش، معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، به معادلات دیفرانسیل معمولی ساده می شود. با توجه به اینکه مسئله حاضر، شامل مرزهای دارای حرکت نوسانی و توام با گرادیان فشار پریودیک می باشد، در این مطالعه یک حل تحلیلی ناپایا، با توسعه حل مسئله استوکس [۴۹]. برای حل جریان سیال غیر نیوتونی در شیار حلقوی پیستون دارای حرکت نوسانی و با گرادیان فشار پریودیک، ارائه شده است. در این نوع مسائل با نوسان بلندمدت، از جریان گذرای اولیه صرف نظر شده [۴۶] و حل نوسانی میدان جریان به فرم رابطه (۱۸)، می تواند بیان شود. در این رابطه سرعت پیستون به فرم کسینوسی، در نظر گرفته شده و شتاب پیستون نیز با مشتق گیری از این رابطه قابل محاسبه است. همچنین سرعت و گرادیان فشار در این مسئله به فرم کلی معادله های (۱۸) و (۱۹) تعریف می شود.

$$U_{abs}(y,t) = -A\omega \exp(i\omega t) + \bar{U}_{rel}(y) \exp(i\omega t) \quad (18)$$

$$\frac{dp}{dx} = -\rho |K| e^{\phi} \exp(i\omega t) \quad (19)$$

با توجه به شکل ۵، شرایط مرزی جریان سیال مگنتورئولوژیکال در شیار حلقوی داخل پیستون، در جدول ۳ داده شده است. همچنین گرادیان سرعت روی مرزهای ناحیه پلاگ برابر صفر می باشد.

در حل شبه استاتیک با صرف نظر کردن از ترم اینرسی در معادله مومنوم، انتگرال گیری مستقیم و اعمال شرایط مرزی، معادلات سرعت در نواحی پلاگ و پس از تسلیم ۲،۱ و ۳ به ترتیب به صورت رابطه های (۱۲) تا (۱۴) به دست می آید.

$$U_{abs1}(y) = -\frac{\Delta P_{on}}{2\mu L_f} \left( (y^2) - 2y_{pi}y \right) - A\omega \cos(\omega t) \quad (12)$$

$$U_{abs2}(y) = \frac{\Delta P_{on}}{2\mu L_f} \left( y_{pi}^2 \right) - A\omega \cos(\omega t) \quad (13)$$

$$U_{abs3}(y) = -\frac{\Delta P_{on}}{2\mu L_f} \left( y^2 - 2y_{po}y + h(2y_{po} - h) \right) - A\omega \cos(\omega t) \quad (14)$$

در این حل، برخلاف فرمول متداول برای دمپر های مود جریانی (رابطه (۸)) که بر مبنای یک شیر با دیواره های ثابت به دست می آید [۴۵]، اثر حرکت دیواره ها نیز، در محاسبه میدان جریان و گرادیان فشار در شیار لحاظ شده است. همچنین، با استفاده از میدان جریان به دست آمده، دبی حاصل از عبور جریان سیال مگنتورئولوژیکال غیر نیوتونی از داخل شیار پیستون، از رابطه (۱۵) به دست می آید.

افت فشار در نواحی تحت میدان مغناطیسی، داخل شیار پیستون با استفاده از برابری دبی حجمی سیال جابجا شده توسط پیستون با دبی جریان داخل شیار، معادله حاصل از تعادل نیرویی در ناحیه پلاگ، رابطه (۱۶) و ثابت بودن سرعت در عرض ناحیه پلاگ، مطابق رابطه (۱۷) به دست می آید.

از شرایط مرزی جدول ۱، پروفیل سرعت برحسب متغیر مجهول  $K$  و مختصات مجهول ناحیه پلاگ،  $y_{pi}$  و  $y_{po}$  مطابق به دست می‌آید. پروفیل سرعت در نواحی تحت میدان مغناطیسی داخل شیار، مطابق رابطه‌های (۲۱) تا (۲۳) به دست می‌آید. رابطه‌های (۲۱) و (۲۲) به ترتیب سرعت در نواحی پس از تسلیم ۱ و ۳ و رابطه (۲۳) سرعت در ناحیه پلاگ، ناحیه ۲ را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن افت فشار در نواحی داخل شیار، دستگاه

با توجه به رابطه‌های (۱۸) و (۱۹)، آرگومان مقدار مختلط  $K$  مربوط به اختلاف فاز بین میدان جریان و گرادیان فشار می‌باشد؛ بنابراین با استفاده از این روش، اختلاف فاز سرعت و گرادیان فشار به راحتی قابل محاسبه خواهد بود. در این روش ابتدا میدان جریان برحسب متغیر مجهول  $K$  که مربوط به اختلاف فشار می‌باشد به دست می‌آید. به این منظور با جایگذاری رابطه‌های (۱۸) و (۱۹) در رابطه (۹)، رابطه (۲۰) به دست می‌آید. با حل این معادله و با استفاده

$$v\bar{U}_{rel}(y)'' - i\omega\bar{U}_{rel}(y) = -(K + Ai\omega^2) \quad (20)$$

$$U_{abs1}(y,t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right) \left(\frac{K}{i\omega} + A\omega\right)}{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right) + 1} \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y\right) \\ \frac{\frac{K}{i\omega} + A\omega}{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right) + 1} \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y\right) + \frac{K}{i\omega} \end{array} \right\} \exp(i\omega t) \quad (21)$$

$$U_{abs3}(y,t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{po}\right) \left(\frac{K}{i\omega} + A\omega\right)}{\exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot h - 2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{po}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right)} \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y\right) \\ \frac{\frac{K}{i\omega} + A\omega}{\exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot h - 2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{po}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right)} \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y\right) + \frac{K}{i\omega} \end{array} \right\} \exp(i\omega t) \quad (22)$$

$$U_{abs2}(y,t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\exp\left(-2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{po}\right) \left(\frac{K}{i\omega} + A\omega\right)}{\exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot h - 2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{po}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right)} \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{po}\right) \\ \frac{\frac{K}{i\omega} + A\omega}{\exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot h - 2\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{po}\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{pi}\right)} \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} \cdot y_{po}\right) + \frac{K}{i\omega} \end{array} \right\} \exp(i\omega t) \quad (23)$$

[۵۰] و استفاده از فرمول‌های جبری متداول برای شیر [۵۱]، نیروی دمپینگ مطابق رابطه (۲۸) به دست می‌آید.

$$F_d(t) = -\left( (\Delta P(t))_{On} \times 2L_f + \Delta P(t)_{off} \times L_c \right) (A_p - A_r) + P_c(A_r) + \text{sign}(Real(U_p)) F_s + \tau_{won} A_{won} + \tau_{woff} A_{woff} \quad (28)$$

که در این رابطه  $P_c$ ، فشار در محفظه پایین پیستون، مطابق شکل ۱، از رابطه (۲۹) به دست می‌آید

$$P_c = P_g \pm \Delta P_{valve} \quad (29)$$

$P_g$ ، فشار گاز در محفظه بین دو سیلندر (با فرض فرایند پلی تریپیک) و افت فشار شیر [۵۱] به ترتیب از رابطه‌های (۳۰) و (۳۱) به دست می‌آیند.

$$P_g = P_0 \left( \frac{V_0}{V_0 + A_r X_p(t)} \right)^n \quad (30)$$

$$\Delta P_{valve} = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{Q_{valve}}{C_d A_{valve}} \right)^2 \quad (31)$$

که در این روابط دبی عبوری از شیر و جابجایی پیستون به ترتیب برابر  $Q_{valve}$  و  $X_p(t)$  می‌باشند. همچنین  $\tau_{won}$ ،  $\tau_{woff}$  و  $A_{won}$  و  $A_{woff}$  به ترتیب تنش برشی سیال روی دیواره و مساحت دیواره شیر در نواحی تحت میدان و بدون میدان مغناطیسی می‌باشد.

#### ۴- بحث و نتایج

##### ۴-۱- نتایج آزمایش‌های پایداری (تست تنه‌نشینی) و

##### ساخت سیال مگنتورئولوژیکال بهینه

شکل ۷ (الف) نتایج به‌دست‌آمده از تست‌های تنه‌نشینی مربوط به سیال‌های ساخته‌شده ام‌آراف ۱، ۲، ۳، ام‌آراف ۴ و ام‌آراف ۵ که چگونگی ساخت، آزمایش و همچنین ترکیبات آن در بخش ۲ تشریح شد را، در مدت ۷ روز، نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، افزایش درصد وزنی ماده نگه‌دارنده ( $\phi$ ) و پودر آهن کربونیل  $\phi$ ، باعث کاهش تنه‌نشینی و افزایش پایداری سیال مگنتورئولوژیکال می‌شود. چگونگی تغییر میزان تنه‌نشینی و در نتیجه پایداری سیال مگنتورئولوژیکال با درصد وزنی پودر آهن کربونیل و

$$2\pi R_{ave} \left( \int_0^{y_{pi}} U_{abs1}(y,t) dy + \int_{y_{pi}}^{y_{po}} U_{abs2}(y,t) dy + \int_{y_{po}}^h U_{abs3}(y,t) dy \right) = A\omega \exp(i\omega t) (A_p - A_r) \quad (24)$$

$$\delta(t) = y_{po} - y_{pi} = 2\tau_y \cdot \text{sign} \left( (Real(U_p)) \left( \frac{\Delta P(t)}{L_f} MR - \rho \frac{\partial U_{abs2}(y,t)}{\partial t} \right)^{-1} \right) \quad (25)$$

$$U_{abs1}(y_{pi}, t) = U_{abs3}(y_{po}, t) \quad (26)$$

سه معادله مجهول غیرخطی شامل معادلات: ۱- برابری دبی جریان عبوری گذرنده از شیر داخل پیستون با حجم سیال جابجا شده با پیستون در واحد زمان، رابطه (۲۴)، ۲- معادله حاصل از تعادل نیرویی در ناحیه پلاگ، رابطه (۲۵) و ۳- معادله حاصل از برابری سرعت در مرزهای ناحیه پلاگ، رابطه (۲۶) باید حل شود. مجهولات این دستگاه سه معادله سه مجهول غیرخطی، شامل  $K$ ،  $y_{pi}$  و  $y_{po}$  می‌باشند؛ که این دستگاه با استفاده از روش‌های تکرار و کد عددی در نرم‌افزار متلب حل می‌شود.

با حل این دستگاه علاوه بر افت فشار، مختصات ناحیه پلاگ در هر لحظه و در نتیجه تغییرات ضخامت ناحیه پلاگ با زمان از رابطه (۲۵)، قابل محاسبه خواهد بود. با جایگذاری مقدار  $K$  به‌دست‌آمده در رابطه (۲۷)، افت فشار در هر لحظه به دست می‌آید. همچنین اختلاف فاز جریان سیال غیر نیوتونی ام‌آر با گرادیان فشار، در نواحی تحت میدان مغناطیسی، با استفاده از آرگومان مقدار مختلط  $K$  به‌دست‌آمده قابل محاسبه می‌باشد. افت فشار در نواحی بدون میدان مغناطیسی نیز به روش مشابه به دست می‌آید.

$$\Delta P(t)_{on} = \rho L_f |K_{MR}| e^{\phi_{MR}} \exp(i\omega t) \quad (27)$$

با استفاده از مجموع اختلاف فشارهای به‌دست‌آمده در نواحی تحت میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی، اختلاف فشار بین دو سر پیستون به دست می‌آید و سپس با در نظر گرفتن فرایند فشردگی و انبساط گاز بین دو سیلندر به‌صورت فرایند پلی تروپیک



جی ۱۴۰<sup>۱</sup> (ساخت کشور آمریکا) در شرایط اشباع مغناطیسی مشابه است که با توجه به قیمت قابل توجه روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی جی ۱۴۰، ساخت سیال بهینه مگنتورئولوژیکال ام آراف ۵ با خصوصیات رئومترى مشابه روغن مذکور حائز اهمیت ویژه می‌باشد. در نتیجه سیال ساخته شده مگنتورئولوژیکال ام آراف ۵، علاوه بر غلظت و پایداری، از لحاظ شباهت رفتار آن به روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی جی ۱۴۰، نیز مناسب بوده و می‌توان از آن به عنوان روغن بهینه در دمپرهای مگنتورئولوژیکال استفاده کرد. همچنین سیال مگنتورئولوژیکال ام آراف ۵ به دلیل درصد وزنی پودر آهن بیشتر نسبت به سیال‌های ام آراف ۱ و ام آراف ۲ با به ترتیب ۶۵٪ و ۷۵٪ وزنی پودر آهن کربونیل گستره وسیع‌تری از تنش‌های تسلیم و ویسکوزیته را پوشش می‌دهد.

#### ۴-۳- نتایج مدل‌سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال

جهت مدل‌سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال به‌طور متداول از مدل بینگهام پلاستیک [۱۰] استفاده می‌شود. برازش داده‌های به‌دست‌آمده از تست‌های رئومترى در این پژوهش با مدل بینگهام پلاستیک در شکل ۱۰، نشان می‌دهد این مدل در بعضی از نواحی از دقت کافی برای پیش‌بینی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال برخوردار نیست. به‌طور مشابه نتایج برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل هرچل بالکلی نیز در این شکل نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مدل هرچل بالکلی نیز در نرخ برش‌های پایین، رفتار سیال مگنتورئولوژیکال را به‌خوبی پیش‌بینی نمی‌کند. از طرفی مدل‌های بینگهام پلاستیک و هرچل بالکلی به دلیل نامحدود شدن حل در نرخ برش‌های نزدیک به صفر، قابل استفاده در مدل‌سازی سی‌اف‌دی نمی‌باشند. به دلایل ذکر شده، در این پژوهش، با استفاده از برازش داده به‌دست‌آمده از آزمایش‌های رئومترى در جریان‌های الکتریکی و در نتیجه میدان‌های مغناطیسی مختلف، یک مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید ارائه شده است که رفتار سیال مگنتورئولوژیکال در تمامی نرخ برش‌ها را مطابق شکل ۱۰ به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین، با استفاده از این مدل، بدلیل استفاده از پارامتر E، مشکل نامحدود شدن حل در نرخ برش‌های بسیار پایین، بوجود نمی‌آید.

ماده نگه‌دارنده و توابع به دست آمده در شکل‌های ۷(ب) و ۷(ج) نشان داده شده است. مطابق شکل ۷(ب) با افزایش درصد وزنی پودر آهن کربونیل از ۶۵٪ به ۸۵٪ برای روغن با درصد ماده نگه‌دارنده ثابت (۳٪)، میزان ته‌نشینی نهایی سیال، ۵۰ درصد کاهش یافته و سیال به میزان قابل توجهی پایدارتر می‌شود. از طرف دیگر افزایش درصد پودر باعث می‌شود، سیال در زمان کمتری به پایداری نسبی برسد. همچنین مطابق شکل ۷(ج) با افزایش درصد وزنی ماده نگه‌دارنده از ۱٪ به ۳٪ برای سیال با درصد وزنی پودر آهن ثابت (۸۵٪)، میزان ته‌نشینی از ۱۵ درصد به ۰ درصد کاهش می‌یابد و پایداری سیال به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. با وجود پایداری بسیار خوب سیال‌های ام آراف ۳ و ام آراف ۴ (با ۸۵٪ وزنی پودر آهن کربونیل و به ترتیب ۳٪ و ۲٪ وزنی ماده نگه‌دارنده)، اما با توجه به غلظت ظاهری بالای این دو سیال، استفاده از این سیال‌ها در دمپر مناسب نمی‌باشد. از طرف دیگر سیال ام آراف ۵ (با ۸۵٪ وزنی پودر آهن و ۱ درصد وزنی ماده نگه‌دارنده)، با وجود درصد ماده نگه‌دارنده کمتر نسبت به سیال‌های ام آراف ۱ و ام آراف ۲ با ۳ درصد وزنی ماده نگه‌دارنده و به ترتیب ۶۵٪ و ۷۵٪ وزنی پودر آهن کربونیل، ته‌نشینی کمتری داشته و پایدارتر می‌باشد. همچنین، دارای غلظت ظاهری مناسب‌تری نیز نسبت به سیال‌های ام آراف ۳ و ام آراف ۴ می‌باشد. در نتیجه سیال ام آراف ۵ به‌عنوان سیال بهینه از لحاظ غلظت و پایداری برای انجام تست‌های رئومترى و سپس تست‌های نیرویی و مدل‌سازی دمپر مگنتورئولوژیکال انتخاب می‌شود.

#### ۴-۲- نتایج آزمایش‌های رئومترى

نتایج تست‌های رئومترى برای سیال بهینه مگنتورئولوژیکال ام آراف ۵ که چگونگی انجام آن در بخش ۲ تشریح شد، در شکل ۸ آورده شده است. مطابق منحنی‌های تنش-نرخ برش و ویسکوزیته-نرخ برش که در این شکل نشان داده شده است با رسیدن به جریان ۲ آمپر، سیال ام آراف ۵ به حالت اشباع مغناطیسی می‌رسد. به عبارت دیگر با افزایش بیشتر جریان الکتریکی و در نتیجه میدان مغناطیسی، مقادیر تنش و ویسکوزیته افزایش چشمگیری پیدا نمی‌کند. همچنین مطابق شکل ۹ نتایج تست رئومترى سیال ساخته شده بهینه مگنتورئولوژیکال ام آراف ۵ با ۸۵٪ درصد وزنی پودر آهن و ۱ درصد وزنی ماده نگه‌دارنده، با نتایج تست رئومترى روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی

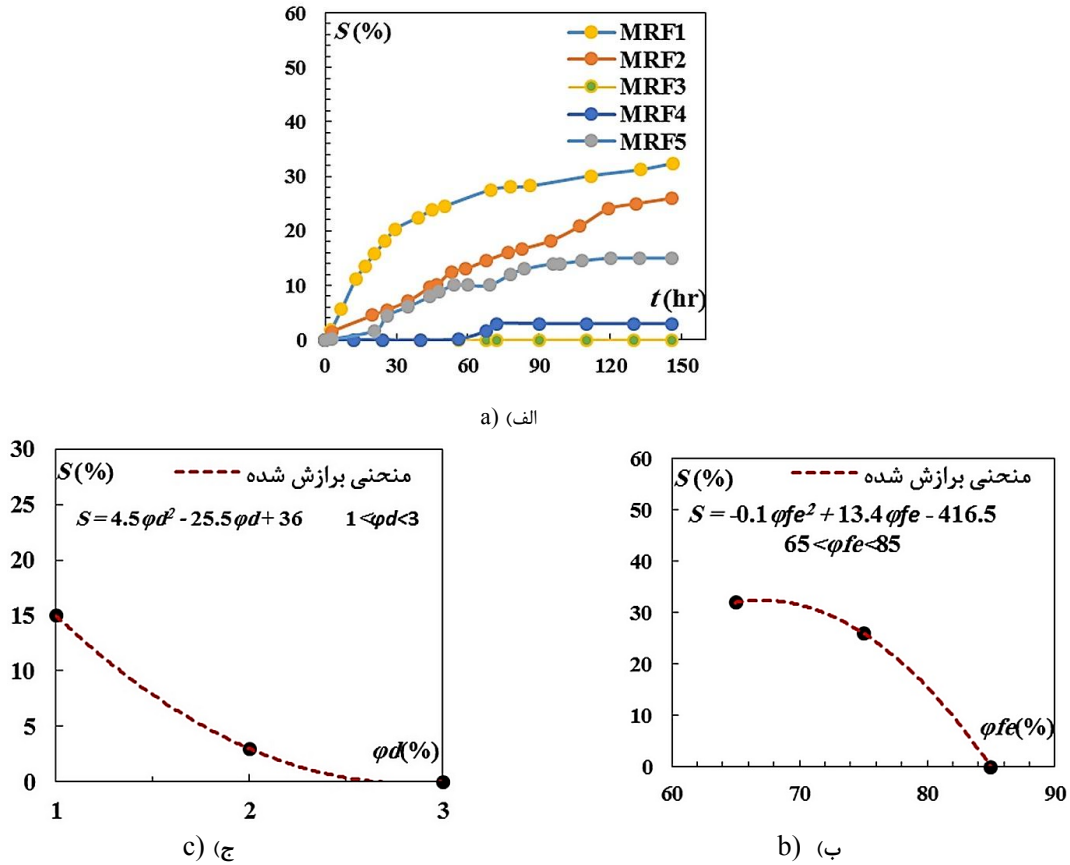


Fig. 7. Sedimentation test of magnetorheological fluid results a) variation of sedimentation with time b) effect of  $\phi fe$  on sedimentation c) effect of  $\phi d$  on sedimentation

شکل ۷: نتایج تست‌های ته‌نشینی (پایداری) سیال‌های ساخته‌شده (الف) مقایسه درصد ته‌نشینی سیال‌ها با زمان (ب) تأثیر درصد پودر آهن کربونیل  $\phi fe$  بر میزان ته‌نشینی و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال (ج) تأثیر درصد ماده نگه‌دارنده  $\phi d$  بر میزان ته‌نشینی و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال

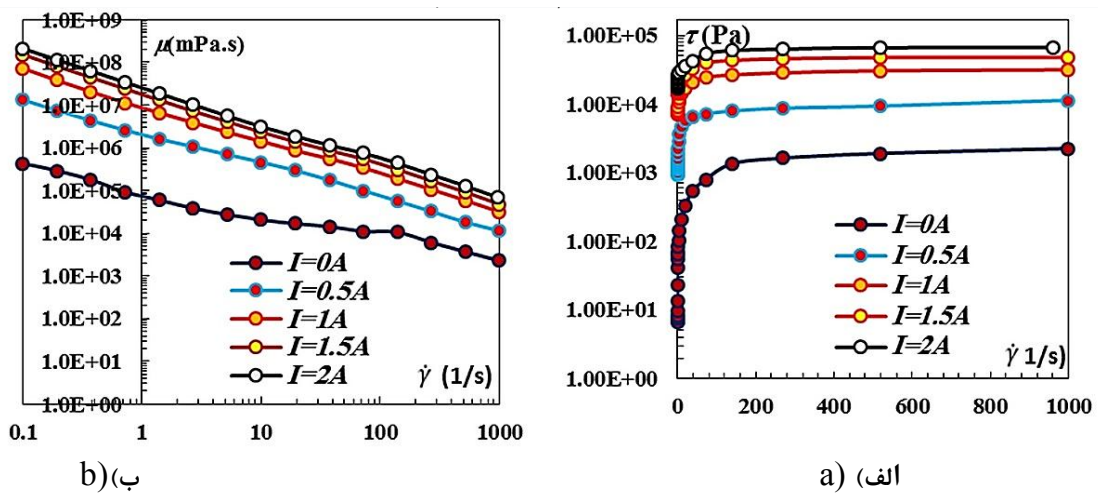


Fig. 8. Rheumatic tests results for MRF5 a) shear stress-shear rate b) viscosity-shear rate

شکل ۸: نتایج تست‌های رئومتر برای سیال بهینه مگنتورئولوژیکال ام‌آر اف ۵ (الف) تنش-نرخ برش (ب) ویسکوزیته-نرخ برش

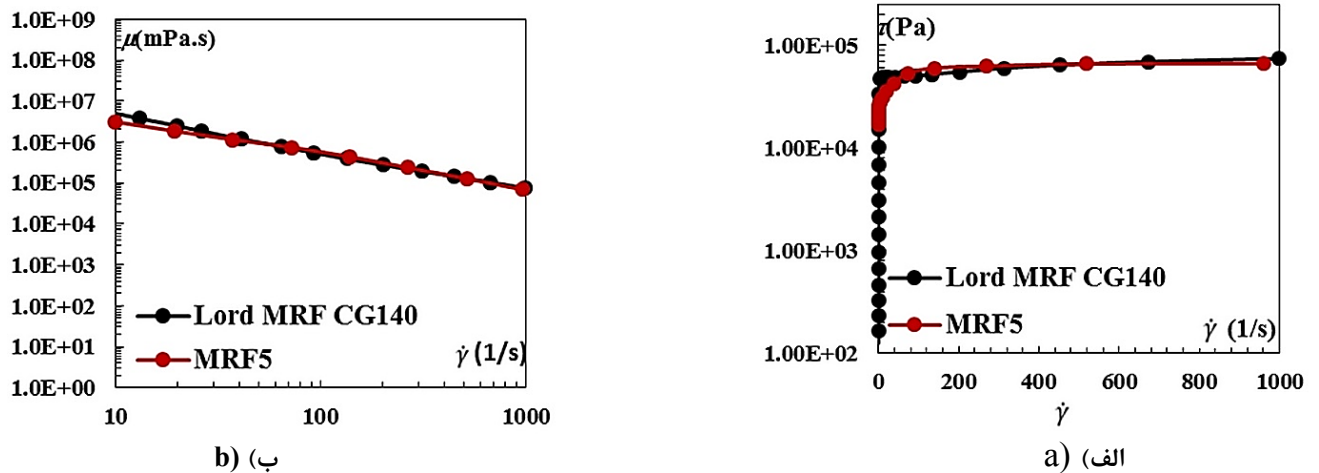


Fig. 9. A Comparison of Magnetic Rheumatic tests results of MRF 5 and Lord MRF CG 140 Oil a) shear stress-shear rate b) viscosity-shear rate

شکل ۹: مقایسه نتایج تست‌های رئومتر سیال بهینه مگنتورئولوژیکال ام‌آر اف ۵ با روغن مگنتورئولوژیکال لرد سی‌جی ۱۴۰ (الف) تنش-نرخ برش (ب) ویسکوزیته-نرخ برش

همچنین تغییرات تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک در مدل بینگهام پلاستیک در شکل ۱۲ نشان داده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تغییرات مقادیر پارامترهای هر دو مدل با رسیدن سیال به حالت اشباع مغناطیسی، به تدریج کم می‌شود. عبارت دوم در هر یک از رابطه‌های (۳۵) و (۳۶) بیانگر ویسکوزیته پلاستیک می‌باشد که مربوط به رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابق مدل اصلاح‌شده ارائه‌شده در این پژوهش که با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد، مقدار ویسکوزیته پلاستیک سیال مگنتورئولوژیکال با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد و به‌عبارت‌دیگر سیال دارای رفتار رقیق‌شوندگی می‌شود. در حالیکه در مدل بینگهام پلاستیک این پارامتر ثابت است و در نتیجه اثرات رقیق‌شوندگی سیال به‌خوبی پیش‌بینی نمی‌شود. همچنین پارامترهای مدل ارائه‌شده و مدل بینگهام پلاستیک به‌صورت تابعی از میدان مغناطیسی و با استفاده از برازش داده‌های آزمایشگاهی در رابطه‌های (۳۴) تا (۳۹) بیان شده‌اند. با استفاده از جایگزینی این روابط در رابطه‌های (۳۵) و (۳۶)، ویسکوزیته ظاهری سیال مگنتورئولوژیکال به‌صورت تابعی از میدان مغناطیسی و نرخ برش به دست می‌آید. از این مدل غیر نیوتونی ارائه‌شده و توابع به‌دست‌آمده مربوطه، می‌توان برای پیش‌بینی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال، حل معادلات حاکم بر جریان آن و نهایتاً مدل‌سازی دمپ‌های مگنتورئولوژیکال و دیگر کاربردهای صنعتی این نوع سیال،

معادلات تنش مربوط به این مدل در رابطه‌های (۶) و (۷) به‌عنوان معادلات ساختاری مورد استفاده در مدل‌سازی سی‌اف‌دی بیان شده‌اند همچنین ویسکوزیته ظاهری در این مدل و مدل بینگهام پلاستیک مطابق رابطه‌های (۳۲) و (۳۳) به دست می‌آید که از این روابط در حل معادلات حاکم و مدل‌سازی بجای ویسکوزیته سیال استفاده می‌شود

$$\mu_{app} = \frac{\tau_y(H)\text{sign}(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} + \mu_p(H) \quad (32)$$

$$\mu_{app} = \left( \frac{\tau_y(H)\text{sign}(\dot{\gamma})}{\sqrt{\dot{\gamma}^2 + \varepsilon^2}} + \tanh(m(H)\dot{\gamma})K(H)\dot{\gamma}^{n(H)-1} \right) \quad (33)$$

با استفاده از پارامتر  $\varepsilon$  در مخرج که مقدار آن در برازش داده‌ها ۰/۳ در نظر گرفته شده است، در نرخ برش‌های نزدیک به صفر، از نامحدود شدن حل در حل سی‌اف‌دی جلوگیری می‌شود. همچنین عبارت  $\tanh(m(H)\dot{\gamma})$  موجب مدل‌سازی بهتر رفتار غیرخطی سیال در نواحی با نرخ برش پایین می‌شود. تابعیت پارامترهای این مدل از میدان مغناطیسی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

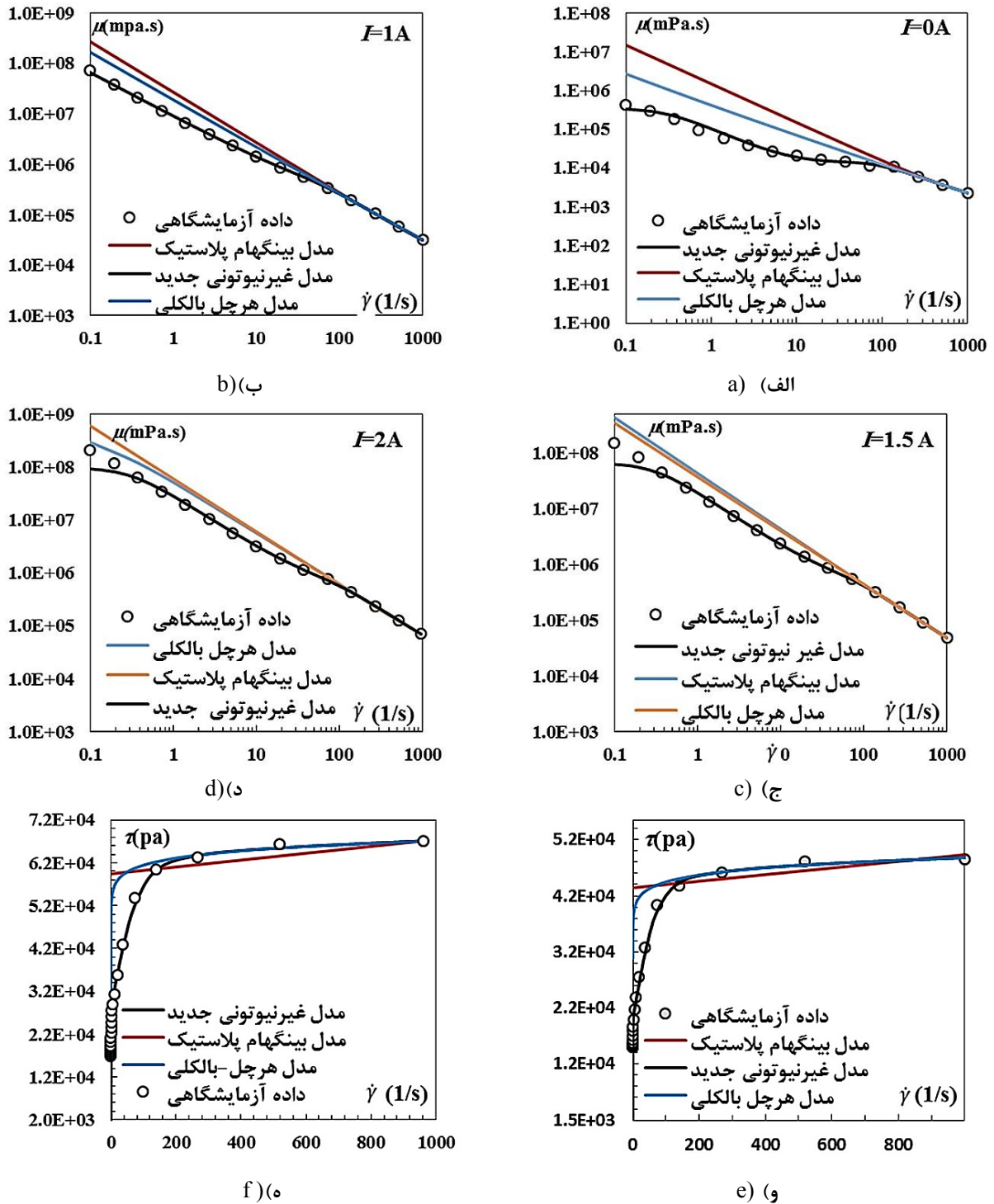


Fig. 10. Fitted data of Magnetic Rheumatic tests of MRF5 with new modified model, Bingham-plastic and herchel-bulk-ly model. Shear stress-shear rate a)  $I=0A$  b)  $I=1A$  c)  $I=1.5A$  d)  $I=2A$  viscosity-shear rate e)  $I=1.5A$  f)  $I=2A$

شکل ۱۰: برازش نتایج تست‌های رئومتر برای سیال بهینه ام‌آراف ۵ با مدل‌های غیر نیوتونی اصلاح‌شده جدید، بینگهام پلاستیک و هرچل بالکلی

ویسکوزیته-نرخ برش الف)  $I=0A$  ب)  $I=1A$  ج)  $I=1.5A$  د)  $I=2A$  تنش-نرخ برش ه)  $I=1.5A$  و)  $I=2A$



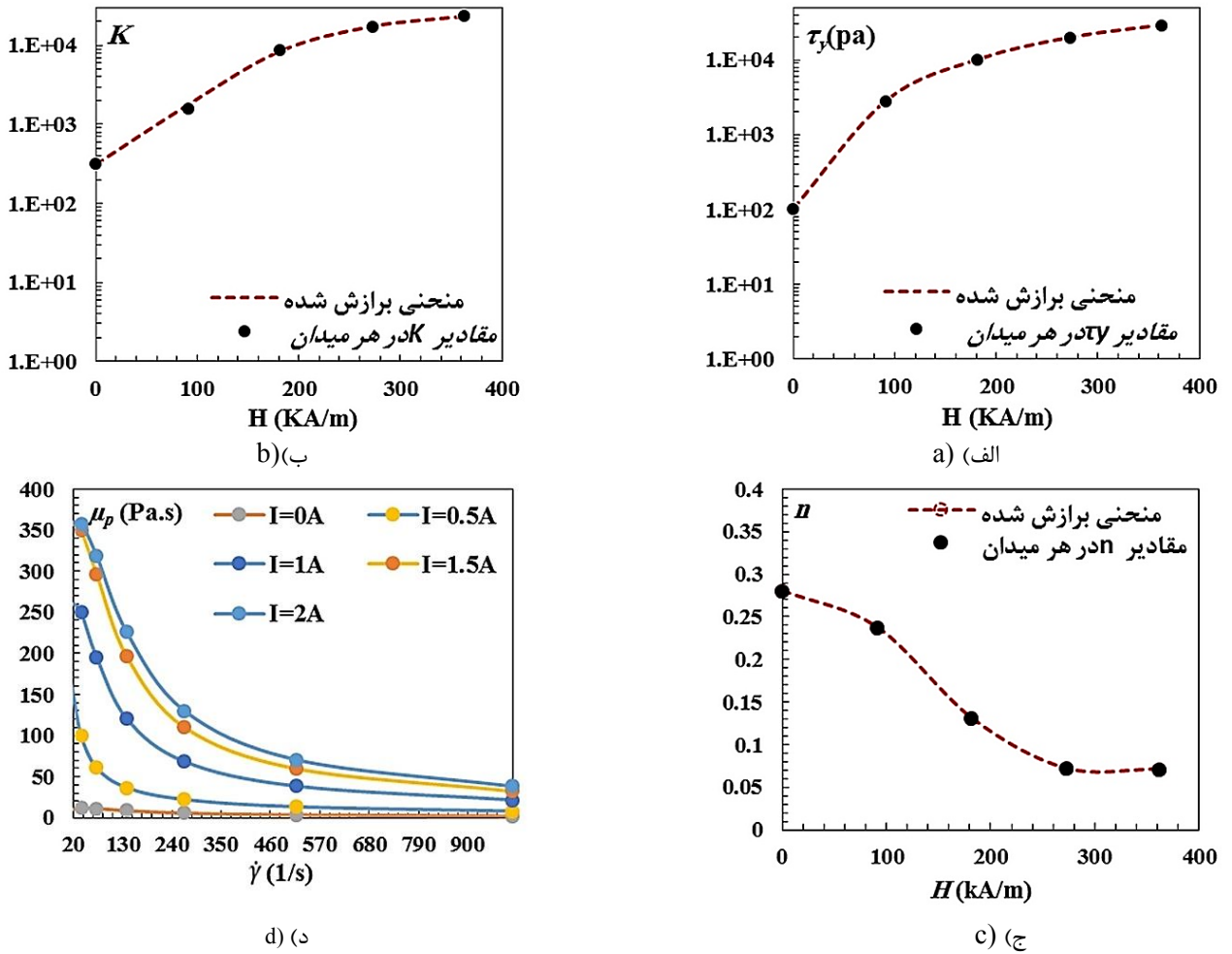


Fig. 11. Magnetic field dependence of new non-Newtonian modified model parameters a)  $\tau_y$  b)  $K$  c)  $n$  d)  $\mu_p$

شکل ۱۱: تابعیت پارامترهای مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید از میدان مغناطیسی الف)  $\tau_y$  ب)  $K$  ج)  $n$  د)  $\mu_p$

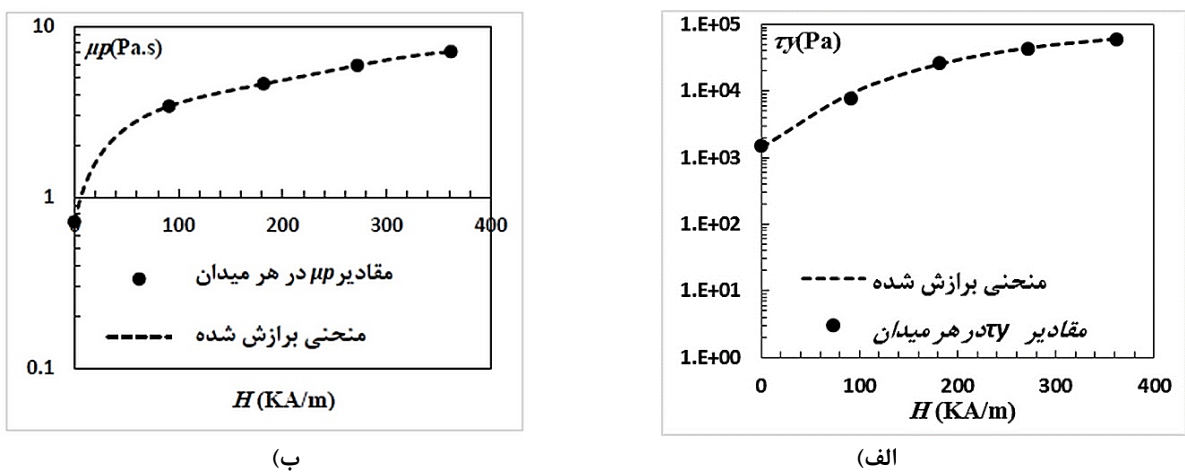


Fig. 12. Magnetic field dependence of Bingham-plastic model parameters a)  $\tau_y$  b)  $\mu_p$

شکل ۱۲: تابعیت پارامترهای مدل بینگهام پلاستیک از میدان مغناطیسی الف)  $\tau_y$  ب)  $\mu_p$

روش‌های به‌کاربرده شده مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، روش عددی به دلیل عدم استفاده از فرضیات مدل‌های تحلیلی و همچنین استفاده از مدل اصلاح‌شده جدید بجای مدل بینگهام پلاستیک، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. از طرف دیگر نتایج حاصل از فرمول متداول برای دمپ‌های مود جریان (رابطه (۸))، به دلیل، در نظر نگرفتن اثر میدان مغناطیسی بر ویسکوزیته پلاستیک و همچنین اثر تنش برشی سیال روی دیواره بر نیروی دمپینگ و اثر میدان مغناطیسی بر آن، اثر سرعت دیواره و فرضیات ساده‌کننده، نسبت به مدل اصلاح‌شده ارائه‌شده و روش‌های حل به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش، دارای خطای قابل‌توجهی در شرایط اشباع می‌باشد. همچنین نتایج حل‌های شبه استاتیک و ناپایا به دلیل پایین بودن فرکانس و در نتیجه ناچیز بودن اثر ترم اینرسی در این آزمایش منطبق بر هم می‌باشند. موارد مذکور، در ادامه مورد بحث بررسی قرار می‌گیرند. مساحت مقطع، طول و عرض شیار پیستون دمپر مورد آزمایش به ترتیب برابر  $10^{-4} \times 2/6$  مترمربع،  $2/2$  و  $4/2$

سانتی‌متر و  $1/5$  میلی‌متر می‌باشند. همچنین روش تحلیلی ناپایای ارائه شده در این پژوهش برای دمپر مورد مطالعه توسط یو و همکاران [۲۱] مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل، مطابق شکل ۱۳(ج)، مطابقت خوبی با نتایج به‌دست آمده در پژوهش مذکور دارد.

#### ۴-۴-۲- نتایج مدل‌سازی تحلیلی و عددی میدان جریان و فشار

پس از اعتبارسنجی حل‌های انجام‌شده ابتدا میدان جریان و فشار و سپس لوب‌های نیرو جابجایی و نیرو سرعت به‌دست‌آمده از هر یک از روش‌ها با یکدیگر و با فرمول متداول برای دمپر مود جریانی مقایسه شده و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

میزان تأثیر میدان مغناطیسی بر توزیع فشار و سرعت در دمپر مگنتورئولوژیکال، با استفاده از مدل‌سازی سی‌اف‌دی، در شکل ۱۴ به خوبی قابل‌مشاهده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۴(الف) و ۱۴(ب) مشاهده می‌شود، میدان مغناطیسی باعث تغییر قابل‌توجه میدان جریان در نواحی تحت میدان مغناطیسی (موازی فلنج) در شیار عبور جریان سیال مگنتورئولوژیکال در پیستون می‌شود. در

$$\tau_y(H) = -5E - 07H^4 - 0.0002H^3 + 0.3502H^2 - 0.1411H + 103.3 \quad (34)$$

$$K(H) = \left( \frac{-1.065E - 06 H^4 + 0.3252H^2 + -14.65H}{0.3252H^2 + -14.65H} \right)^{1.02} + 314.1 \quad (35)$$

$$n(H) = -6.2174E - 11H^4 + 5.8768E - 08H^3 - 1.63078E - 05H^2 + 5.7401E - 04H + 2.8E - 01 \quad (36)$$

$$m(H) = -1.08535E - 08H^3 + 9.0766E - 06H^2 - 2.4874E - 03H + 2.3854E - 01 \quad (37)$$

$$\tau_y = -0.0013H^3 + 0.8606H^2 + 16.869H + 1211.9 \quad (38)$$

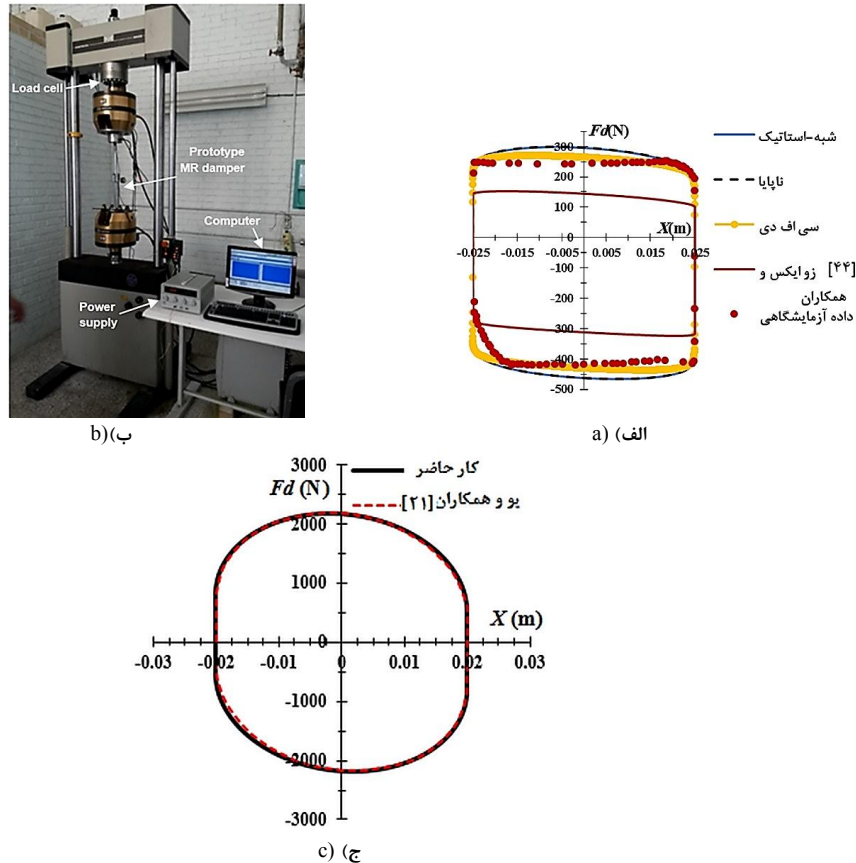
$$\mu_p = -1E - 09H^4 + 1E - 06H^3 - 0.0003H^2 + 0.049H + 0.7178 \quad (39)$$

در میدان‌های مغناطیسی مختلف استفاده کرد.

#### ۴-۴-۴- نتایج مدل‌سازی و بررسی پارامتریک دمپر مگنتورئولوژیکال

##### ۴-۴-۱- اعتبارسنجی حل‌های انجام‌شده با داده‌های به‌دست‌آمده از نتایج تست نیروی دمپر مگنتورئولوژیکال

در شکل ۱۳(الف) جهت اعتبارسنجی حل‌های انجام‌شده در این پژوهش، نتایج نیروی حاصل از فرمول متداول برای دمپ‌های مود جریانی (رابطه (۸) [۴۵])، حل‌های تحلیلی شبه استاتیک و ناپایای ارائه‌شده، عددی و آزمایشگاهی، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به این منظور، ابتدا با استفاده از سیال بهینه ام‌آراف ۵، یک دمپر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه مود جریانی ساخته‌شده، به کمک دستگاه اینسترون (سری ۸۸۰۰،  $V230 \pm 10\%$ ، بیشترین محدوده نیرو  $N$  ۲۵۰۰ در فرکانس ۵۰ هرتز) در فرکانس ۵ / هرتز، مطابق شکل ۱۳(ب) تحت بار نوسانی سینوسی با دامنه  $0.25$  متر قرار گرفته و جریان الکتریکی ۲ آمپر که منجر به اعمال شدت میدان مغناطیسی موردنیاز برای اشباع سیال موردنظر در شیار پیستون می‌شود به آن اعمال شد. همان‌طور که در شکل ۱۳(الف) نشان داده شده است،



**Fig. 13. a) A Comparison between quasi-static, unsteady, conventional model, CFD and experimental data b) Instron dynamic and fatigue testing system with the damper under test c) Comparison between present method and results reported by Yu et al. [21]**

شکل ۱۳: الف) مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی تحلیلی شبه استاتیک، ناپایا، فرمول متداول و سی اف دی با نتایج آزمایشگاهی (ب) دستگاه اینسترون و دمپر تحت بار (ج) مقایسه کار حاضر با پژوهش پیشین [۲۱]

اشباع پروفیل های سرعت بر هم منطبق می شوند.

در شکل ۱۶ پروفیل سرعت به دست آمده از هر یک از روش های عددی، تحلیلی شبه استاتیک و ناپایا، در شرایط اشباع مغناطیسی و در زمان  $T/8$  که پیستون بین میانه کورس و انتهای کورس قرار دارد با یکدیگر مقایسه شده است. تفاوت بین پروفیل سرعت شبه استاتیک و ناپایا ناشی از اعمال اثر ترم اینرسی در حل ناپایا می باشد که در روش شبه استاتیک از آن صرف نظر می شود. همچنین تفاوت بین پروفیل سرعت به دست آمده از حل عددی با پروفیل سرعت به دست آمده از حل تحلیلی ناپایا که در نواحی پس از تسلیم مشهودتر است، به دلیل تفاوت بین مدل غیر نیوتونی ارائه شده در این پژوهش با مدل بینگهام پلاستیک که در روش های تحلیلی استفاده می شود، می باشد.

مقایسه میدان جریان به دست آمده از روش های تحلیلی ناپایا و شبه استاتیک و همین طور تغییرات ترم اینرسی در عرض شیار در سه زمان  $t=0$ ،  $t=T/8$  و  $t=T/5$  در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

شکل ۱۴ (ب) تشکیل ناحیه پلاگ ناشی از تنش تسلیم در ناحیه موازی فلنج و تفاوت میدان جریان با نواحی بدون میدان مغناطیسی به خوبی نشان داده شده است. همچنین اختلاف فشار بین دو سر پیستون در حالت بدون میدان مغناطیسی و تحت میدان مغناطیسی در شکل های ۱۴ (ج) و ۱۴ (د) نشان داده شده است. مطابق این شکل ها، با اعمال میدان مغناطیسی تا شرایط اشباع، اختلاف فشار بین دو سر پیستون تا ۵ برابر افزایش می یابد.

چگونگی اثر میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت جریان سیال مگنتورئولوژیکال، با استفاده از مدل سازی سی اف دی در شکل ۱۵، نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش میدان مغناطیسی ناحیه پلاگ تشکیل شده بزرگ تر می شود و سرعت در ناحیه مرکزی شیار کاهش می یابد. بنا بر این بنا به قانون پیوستگی، سرعت و در نتیجه گرادین سرعت، در ناحیه پس از تسلیم، مطابق شکل ۱۵، افزایش می یابد. افزایش گرادین سرعت منجر به افزایش تنش برشی در ناحیه پس از تسلیم و روی دیواره می شود. همچنین با رسیدن به شرایط

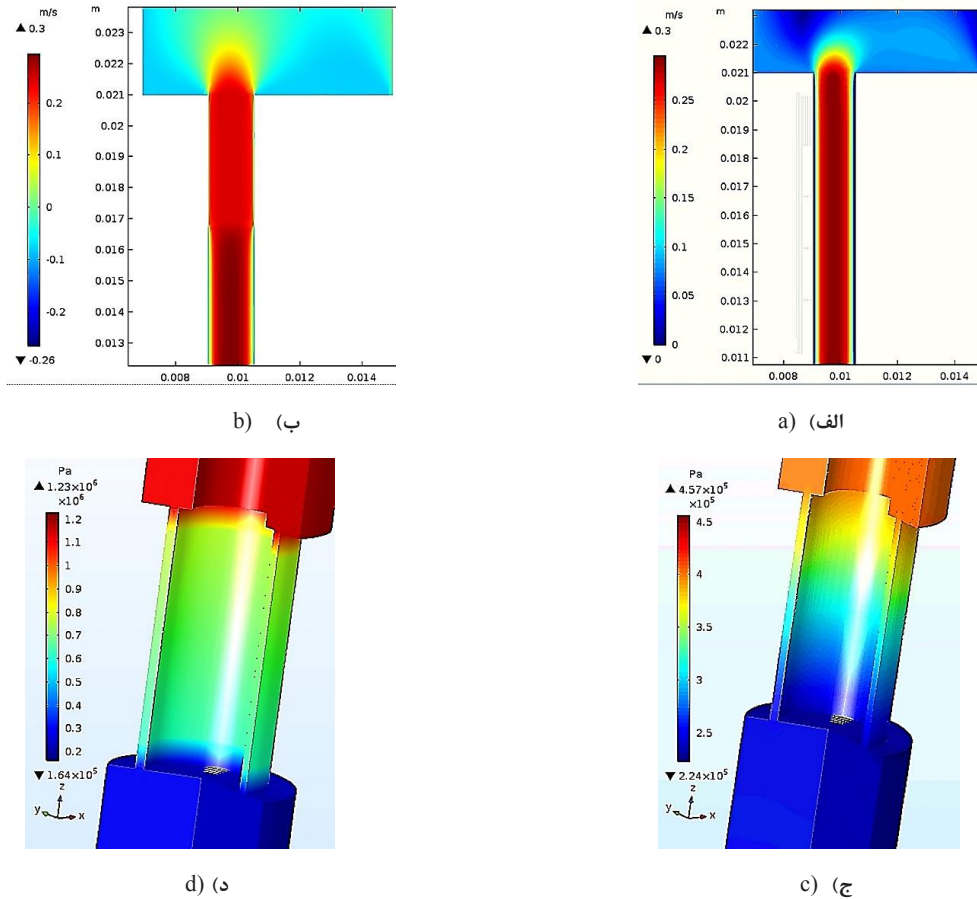


Fig. 14. Effect of magnetic field on velocity profile of optimal MR fluid flow (MRF) in MR damper a) without magnetic field b) with magnetic field and pressure field c) without magnetic field d) with magnetic field using CFD model

شکل ۱۴: تأثیر میدان مغناطیسی بر توزیع سرعت جریان سیال بهینه ساخته شده مگنتورئولوژیکال ام آراف ۵ در دمپر مگنتورئولوژیکال، الف) بدون میدان مغناطیسی ب) تحت میدان مغناطیسی و توزیع فشار ج) بدون میدان مغناطیسی د) تحت میدان مغناطیسی با استفاده از مدل سازی سی اف دی

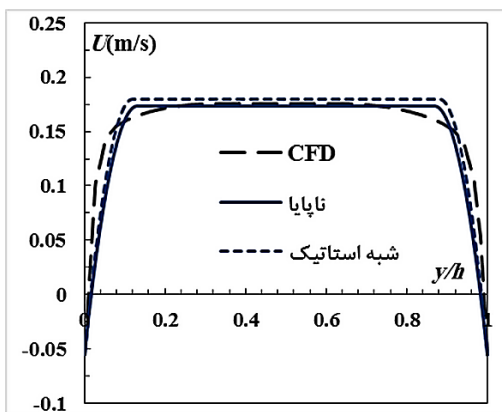


Fig. 16. Comparison between velocity profiles obtained from CFD, unsteady and quasi static modeling at  $t=T/8$

شکل ۱۶: مقایسه پروفیل سرعت جریان سیال مگنتورئولوژیکال ام آراف ۵ با سی اف دی با استفاده از روش های تحلیلی شبه استاتیکی، ناپایا در  $t=T/8$

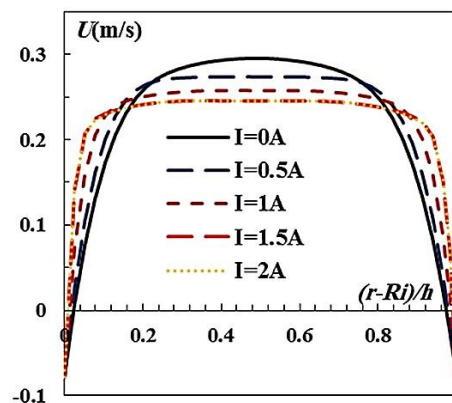


Fig. 15. Velocity profile of MR fluid flow under the magnetic field

شکل ۱۵: پروفیل سرعت جریان سیال مگنتورئولوژیکال ام آراف ۵، استفاده از مدل سازی سی اف دی تحت میدان مغناطیسی



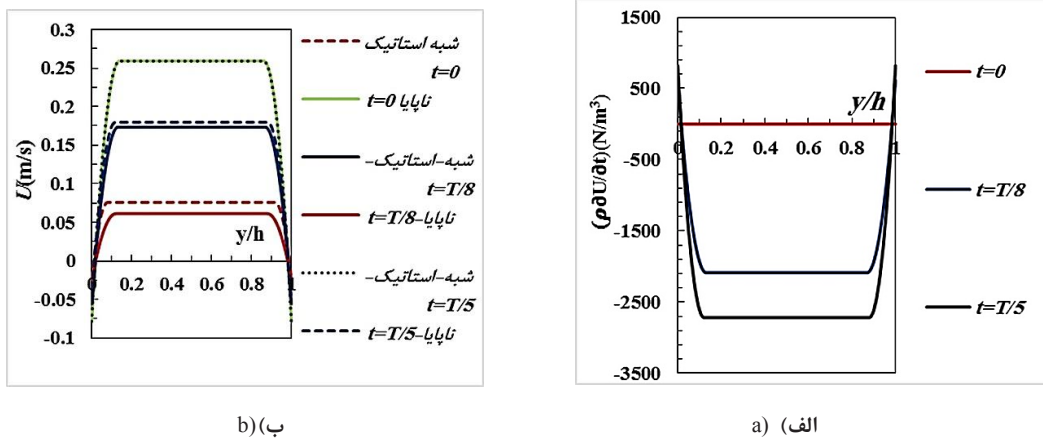


Fig. 17. a) Variation of inertia term across gap height and course length b) Comparison between velocity profiles obtained from, unsteady and quasi static modeling at different time

داده شده است، افزایش جریان الکتریکی و در نتیجه میدان مغناطیسی باعث افزایش ضخامت ناحیه پلاگ می‌شود که این پدیده به دلیل افزایش تنش تسلیم سیال ساخته شده مگنتورئولوژیکال ام آر اف ۵ با افزایش میدان مغناطیسی، مطابق شکل ۱۲ (الف) می‌باشد. همچنین ضخامت ناحیه پلاگ به دست آمده از روش ناپایا بخصوص در نواحی انتهایی کورس ( $t=T/4$  و  $t=3T/4$ ) کمتر از مقادیر محاسبه شده از

همان‌طور که مشاهده می‌شود با نزدیک شده به انتهای کورس، ترم اینرسی مطابق شکل ۱۷ (الف) افزایش می‌یابد و در نتیجه اختلاف بین پروفیل سرعت به دست آمده از روش شبه استاتیک و ناپایا مطابق شکل ۱۷ (ب) زیاد می‌شود. همچنین در وسط کورس ( $t=0$ ) ترم اینرسی ناچیز بوده و در نتیجه اختلافی بین دو پروفیل سرعت دیده نمی‌شود.

روش شبه استاتیک می‌باشد. این پدیده، به علت اثر ترم اینرسی در مخرج رابطه (۲۸) می‌باشد که در رابطه (۱۸) به دلیل صرف نظر کردن از آن در روش شبه استاتیک، ظاهر نشده است. در نتیجه روش شبه استاتیک در محاسبه ضخامت ناحیه پلاگ، بخصوص در نواحی انتهایی

ضخامت ناحیه پلاگ و تغییرات آن با زمان و میدان مغناطیسی یکی از پارامترهای مهم در سیال‌های مگنتورئولوژیکال می‌باشد که با استفاده از رابطه‌های (۱۶) و (۲۸) که به ترتیب از معادلات مربوط به روش‌های شبه استاتیک و ناپایای ارائه شده در این پژوهش به دست می‌آیند، قابل محاسبه است. همان‌طور که در شکل ۱۸ (الف) نشان

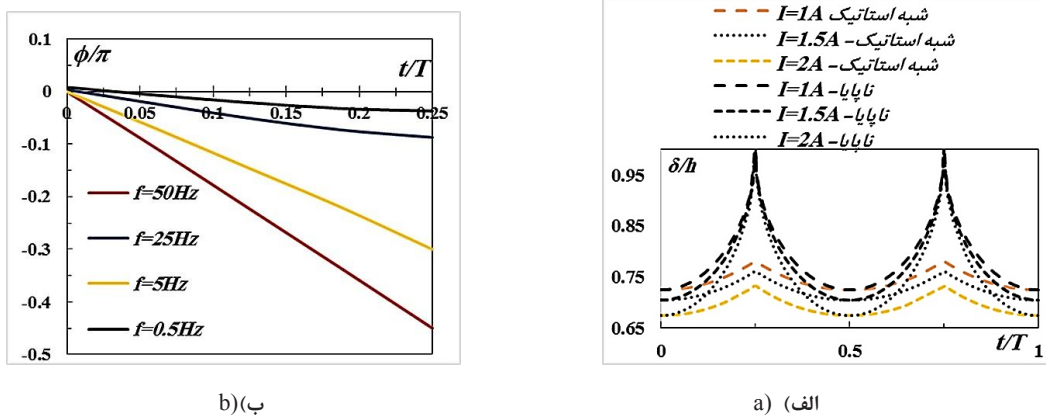


Fig. 18. Variation of a) non-dimensional plug thickness with time and magnetic field b) phase difference between velocity and pressure of MR fluid flow

شکل ۱۸: تغییرات (الف) ضخامت ناحیه پلاگ بی‌بعد با زمان و میدان مغناطیسی (ب) اختلاف فاز سرعت و فشار جریان سیال مگنتورئولوژیکال

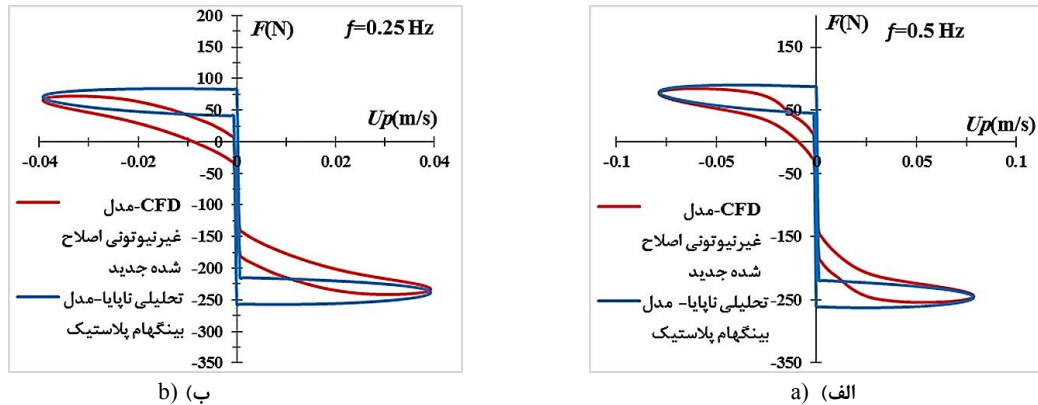


Fig. 19. a) Comparison Force-Velocity graph obtained from bingham-plastic and new modified non-Newtonian model at two frequency a) 0.55 Hz b) 0.25 Hz b) with magnetic field and pressure field c) without magnetic field d) with magnetic field using CFD model

شکل ۱۹: مقایسه نمودارهای نیرو-سرعت دمپر مگنتورئولوژیکال، به دست آمده از مدل بینگهام پلاستیک و مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید در دو فرکانس الف  $0.55 \text{ Hz}$  ب  $0.25 \text{ Hz}$

#### ۴-۳- مقایسه نتایج نیرویی

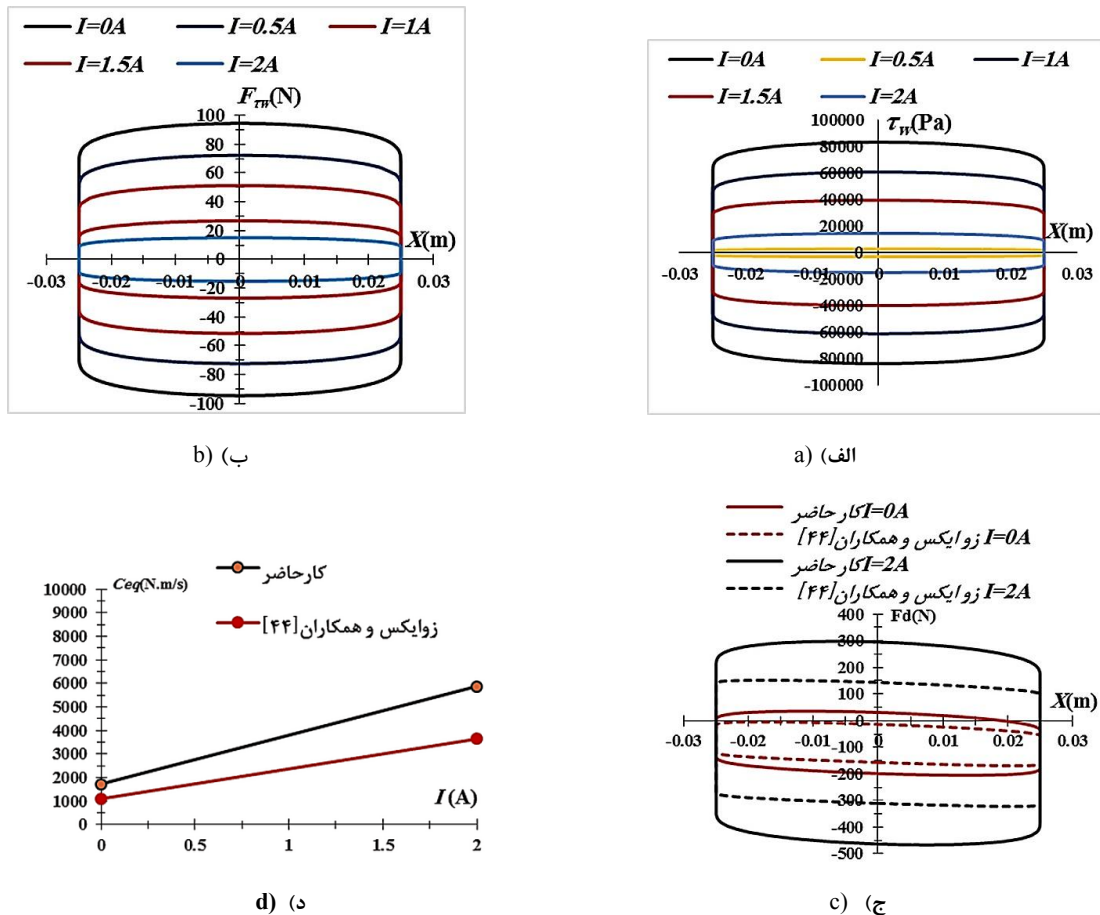
در شکل ۱۹، نمودارهای نیرو-سرعت دمپر مگنتورئولوژیکال، در دو فرکانس  $0.25$  و  $0.55$  هر تیز نشان داده شده‌اند. شکل ظاهری این نمودارها مشابه دیاگرام‌های تنش-نرخ برش به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های ۱۰ (و) و ۱۰ (ه) می‌باشد. اثرات رقیق شوندگی سیال، به خصوص در نرخ برش‌های پایین که در داده‌های آزمایشگاهی مشاهده و توسط مدل اصلاح شده جدید مدل شد، در نمودارهای نیرو-سرعت به دست آمده از حل سی اف دی نیز به خوبی قابل مشاهده است. مطابق شکل ۱۹، نواحی دارای نرخ برش پایین که در آن خطای مدل متداول بینگهام-پلاستیک، نسبت به مدل اصلاح شده جدید ارائه شده در این پژوهش قابل توجه است، با کاهش فرکانس، بیشتر می‌شود. در نتیجه استفاده از مدل ارائه شده در این پژوهش، به خصوص جهت در نظر گرفتن رفتار رقیق شوندگی غیرخطی سیال در نرخ برش‌های پایین تر، برای محاسبه نیروی دمپینگ دمپر، حائز اهمیت است.

اثر میدان مغناطیسی بر رفتار سیال در نواحی پس از تسلیم، در نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل‌های ۱۱ (د) و ۱۲ (ب)، قابل مشاهده است. همان طور که در بخش ۴-۳ بیان شد، در رابطه (۸) که به طور متداول برای محاسبه نیروی دمپینگ در دمپرهای مگنتورئولوژیکال مود جریانی استفاده می‌شود [۴۵]، اثرات میدان

کورس که ترم اینرسی مطابق شکل ۱۷ (ب) افزایش می‌یابد، دارای خطای قابل ملاحظه می‌باشد. همچنین در نواحی میانه کورس به دلیل عدم وجود اثر ترم اینرسی هر دو روش، ضخامت ناحیه پلاگ یکسانی محاسبه می‌کنند.

تغییرات اختلاف فاز بین اختلاف فشار و سرعت متوسط سیال مگنتورئولوژیکال در عرض شیار پیستون،  $\phi$ ، در شکل ۱۸ (ب) نشان داده شده است. یکی از مزایای روش حل ناپایای ارائه شده در این پژوهش، علاوه بر محاسبه دقیق تر ضخامت ناحیه پلاگ در هر زمان، امکان اندازه گیری مستقیم اختلاف فاز بین سرعت و فشار می‌باشد. از آنجایی که اعداد به دست آمده برای اختلاف فشار و سرعت در این روش، مختلط می‌باشند.

با محاسبه اختلاف آرگومان مربوط به این پارامترها، اختلاف فاز بین آن‌ها محاسبه می‌شود. همان طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، با نزدیک شدن به انتهای کورس و کاهش اثر سرعت سیال و گرادیان سرعت در معادله مومنتوم و با توجه به ثابت بودن مقدار تنش تسلیم در طول کورس، اختلاف فاز بین فشار و سرعت ناشی از اثر تنش تسلیم، در انتهای کورس افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فرکانس و در نتیجه افزایش اثر سرعت و گرادیان سرعت سیال در معادله مومنتوم، میزان اختلاف فاز ناشی از تنش تسلیم کاهش می‌یابد.



**Fig. 20. Effect of magnetic field on a) wall shear stress b) damping force due to wall shear stress c) damping force obtained from conventional formula and present work d) Equivalent damping constant of damper**

شکل ۲۰: اثر میدان مغناطیسی بر: الف) تنش برشی روی دیواره وب) نیروی دمپینگ ناشی از تنش برشی روی دیواره (ج) نتایج پژوهش حاضر و فرمول متداول دمپر مود جریان در حالت بدون میدان و تحت میدان مغناطیسی (د) مقایسه نتایج مربوط به اثر افزایشی میدان مغناطیسی بر ضریب میرایی معادل دمپر

از فرمول متداول برای نیروی دمپینگ دمپر مود جریانی، با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. همچنین قسمتی از خطای ذکر شده ناشی از در نظر نگرفتن اثر میدان مغناطیسی بر رفتار سیال در نواحی پس از تسلیم، در رابطه (۸) می‌باشد. به‌طور مشابه، نتایج مربوط به اثر افزایشی میدان مغناطیسی بر ضریب میرایی معادل دمپر [۵۲] با استفاده از هر دو روش، در شکل ۲۰(د) نشان داده شده است. اعتبارسنجی نتایج مربوط به کار حاضر در شکل ۱۳(الف) آورده شده است.

مطابق فرمول رابطه (۳۱) اختلاف فشار بین دو سر پیستون و تنش برشی روی دیواره، دو پارامتر مؤثر بر نیروی دمپینگ می‌باشند. همچنین مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۲۱(الف) با کاهش

مغناطیسی بر رفتار جریان در ناحیه پس از تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک اعمال نشده است. به‌عبارت‌دیگر، ویسکوزیته پلاستیک سیال مگنتورئولوژیکال در ناحیه پس از تسلیم، با ویسکوزیته سیال در حالت بدون میدان مغناطیسی یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین در این فرمول، از اثر حرکت دیواره و تنش برشی روی دیواره، صرف‌نظر شده است. اثر میدان مغناطیسی بر تنش برشی روی دیواره و نیروی دمپینگ ناشی از این تنش در شکل‌های ۲۰(الف) و ۲۰(ب) نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌خصوص با افزایش میدان مغناطیسی تنش برشی روی دیواره و اثر آن بر نیروی دمپینگ افزایش می‌یابد. در نتیجه مطابق شکل‌های ۲۰(ج) و ۲۰(د) خطای نتایج به‌دست‌آمده

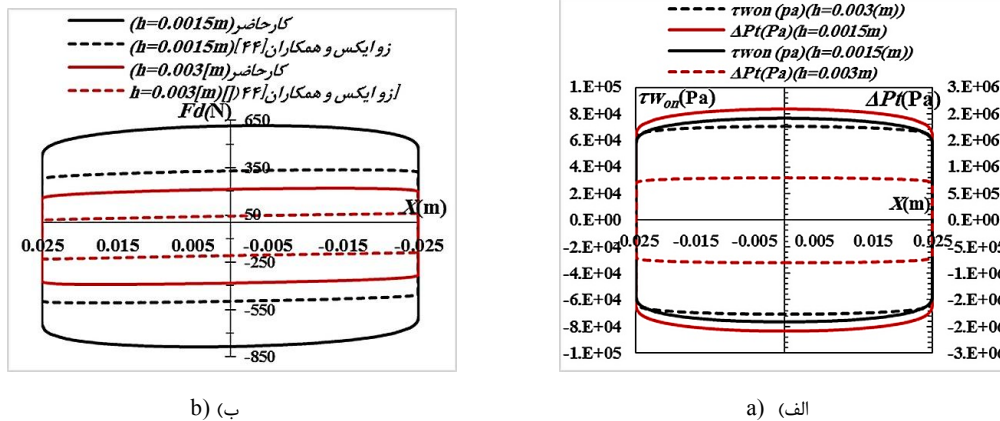


Fig. 21. Effect of gap thickness on a) pressure drop and wall shear stress b) damping force obtained from two method

شکل ۲۱: اثر کاهش عرض شیار بر: الف) اختلاف فشار و تنش برشی روی دیواره ب) نیروی دمپینگ به دست آمده از دو روش

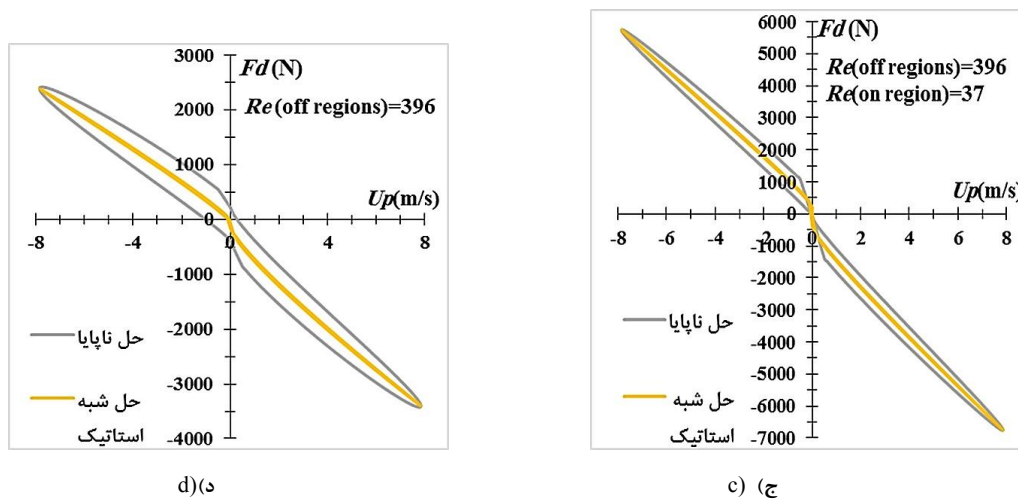


Fig. 22. Effect of inertia term on force-displacement graphs and comparison between quasi-static and unsteady modeling

شکل ۲۲: اثر ترم اینرسی بر منحنی‌های نیرو-سرعت دمپر و مقایسه روش‌های شبه استاتیکی و ناپایا

نظر نگرفتن آن در فرمول متداول رابطه (۸)، باعث خطای بیشتری در عرض شیارهای بزرگ‌تر می‌شود. تأثیر عرض شیار بر نیروی دمپینگ در شکل ۲۱ (ب) نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲۲، مقایسه نتایج نیرویی در اعداد رینولدز نوسانی [۵۳] مختلف در نواحی تحت میدان،  $Re_{on}$  و بدون میدان،  $Re_{off}$  نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، خطای روش شبه استاتیکی نسبت به حل ناپایا به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این خطا به دلیل صرف نظر کردن از ترم اینرسی در روش حل شبه استاتیکی می‌باشد. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، اختلاف بین دو حل ناپایا و شبه استاتیکی، بخصوص در نواحی نزدیک به انتهای کورس که ترم اینرسی مطابق شکل ۱۷ (الف)، افزایش می‌یابد، بیشتر می‌باشد. در محاسبه عدد رینولدز نوسانی از دامنه سرعت نوسانی متوسط سیال

عرض شیار اختلاف فشار بین دو سر پیستون کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد، در حالیکه تنش برشی روی دیواره کاهش چندانی پیدا نمی‌کند. دلیل این پدیده این است که با افزایش عرض شیار، گرادیان سرعت و به عبارتی نرخ برش در عرض شیار و در نتیجه در نزدیک دیواره کاهش پیدا می‌کند. کاهش نرخ برش، بالقوه باعث کاهش تنش برشی روی دیواره می‌شود؛ اما با توجه به ماهیت غیر نیوتونی بودن سیال مگنتورئولوژیکی و افزایش ویسکوزیته پلاستیک و ویسکوزیته کل سیال مگنتورئولوژیکی با کاهش نرخ برش، (مطابق نتایج آزمایش‌های رئومتر نشان داده شده در شکل‌های ۱۱ و ۸)، میزان این کاهش تنش که در شکل ۲۱ (الف) نشان داده شده است، زیاد نمی‌باشد. در نتیجه، با افزایش عرض شیار، سهم تنش برشی روی دیواره در نیروی دمپینگ نسبت به اختلاف فشار، افزایش یافته و در

و فرمول‌های متداول مربوط به محاسبه نیروی دمپینگ در نظر گرفته نشده است. همچنین بر طبق نتایج تست‌های رتومتری انجام شده در میدان‌های مغناطیسی مختلف، تغییرات تمامی پارامترهای مربوط به این مدل‌ها با افزایش میدان مغناطیسی به تدریج به حالت اشباع می‌رسد. از مزایای دیگر مدل اصلاح شده جدید امکان استفاده از آن در مدل‌سازی سی‌اف‌دی می‌باشد، بطوریکه نامحدود شدن در حل اتفاق نمی‌افتد. در مرحله بعد، با استفاده از روش‌های تحلیلی شبه استاتیک، تحلیلی ناپایا و سی‌اف‌دی و مدل‌های بینگهام پلاستیک و مدل اصلاح شده جدید، میدان جریان و فشار سیال مگنتورئولوژیکال، در دمپر مگنتورئولوژیکال، مدل‌سازی و نیروی دمپینگ محاسبه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، استفاده از مدل متداول بینگهام پلاستیک با توجه به در نظر نگرفتن اثر رقیق شوندگی سیال، باعث خطای قابل توجه در محاسبه نیروی دمپینگ، نسبت به مدل اصلاح شده جدید ارائه شده در این پژوهش، می‌شود. همچنین اثر میدان مغناطیسی بر ویسکوزیته پلاستیک و نیروی ناشی از تنش برشی سیال روی دیواره و در نتیجه نیروی دمپینگ بررسی شد و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، صرف نظر کردن از این اثرات در فرمول‌های شبه استاتیک متداول در محاسبه نیروی دمپینگ، باعث خطای قابل توجه نسبت به نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های جدید انجام شده در این پژوهش می‌شود که این خطا با افزایش عرض شیار و میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. همچنین، بررسی تأثیر ترم اینرسی در مدل‌سازی‌های انجام شده، نشان می‌دهد، با افزایش اثر ترم اینرسی، استفاده از روش شبه استاتیک منجر به خطای قابل توجهی در محاسبه میدان جریان، ضخامت ناحیه پلاگ و نیروی دمپینگ، نسبت به حل تحلیلی ناپایای انجام شده، بخصوص در نواحی انتهایی کورس، می‌شود. دلیل این پدیده، صرف نظر کردن از ترم اینرسی در روش شبه استاتیک می‌باشد که در نواحی نزدیک به انتهای کورس بیشترین مقدار را دارد؛ بنابراین، نتایج به دست آمده استفاده از مدل‌ها و روش‌های ارائه شده در این پژوهش، نسبت به نتایج روش‌های پیشین و فرمول متداول برای دمپر مود جریانی دقیق‌تر بوده و می‌توان از آن برای طراحی دقیق‌تر استفاده کرد

در عرض شیار که حداکثر مقدار این سرعت، در طول کورس می‌باشد و کمترین ویسکوزیته سیال که مربوط به حداکثر نرخ برش و سرعت سیال در طول کورس است، استفاده شده است.

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، ابتدا ۵ نمونه سیال مگنتورئولوژیکال با ترکیب‌های مختلف پودر آهن (۶۵٪، ۷۵٪ و ۸۵٪) و ماده نگه‌دارنده (۱٪، ۲٪ و ۳٪) که از مشتقات اسیدهای چرب می‌باشد، ساخته شد. پس از انجام تست‌های پایداری و بررسی اثر غلظت پودر آهن و ماده نگه‌دارنده بر میزان ته‌نشینی سیال، سیال بهینه با پایداری و غلظت مناسب (۸۵٪ وزنی پودر آهن و ۱٪ وزنی ماده نگه‌دارنده) جهت انجام تست‌های رتومتری انتخاب شد. سپس، سیال بهینه در میدان‌های مغناطیسی مختلف تا رسیدن به شرایط اشباع، در مود برشی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج تست رتومتری به دست آمده برای سیال بهینه ساخته شده با ۸۵٪ وزنی پودر آهن با نتایج روغن لرد مگنتورئولوژیکال لرد سی‌جی ۱۴۰ مشابه می‌باشد که با توجه به قیمت قابل توجه این روغن، ساخت روغن مشابه آن در این پژوهش حائز اهمیت ویژه می‌باشد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از تست‌های رتومتری در نرخ برش و میدان‌های مختلف، یک مدل غیر نیوتونی اصلاح شده جدید جهت مدل‌سازی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال بهینه، ارائه شد و با نتایج مدل بینگهام پلاستیک که به طور متداول و در فرمول‌های طراحی برای مدل‌سازی رفتار جریان سیال و دمپر مگنتورئولوژیکال مورد استفاده قرار می‌گیرد مقایسه می‌شود. مطابق نتایج به دست آمده، مدل بینگهام پلاستیک و همچنین هرچل بالکلی در نرخ برش‌های پایین دارای خطای قابل توجهی نسبت به مدل اصلاح شده پیشنهادی در این پژوهش در پیش‌بینی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال می‌باشند. همچنین تابعیت تنش تسلیم، ویسکوزیته پلاستیک و ثوابت این مدل‌ها از میدان مغناطیسی به دست آمد. مطابق نتایج به دست آمده، علاوه بر تنش تسلیم، رفتار سیال در ناحیه پس از تسلیم و در نتیجه ویسکوزیته پلاستیک، تابع میدان مغناطیسی می‌باشد که این پدیده به طور معمول در پژوهش‌ها



- [4] F. Bucchini, P. Forte, F. Frendo, R. Squarcini, A magnetorheological clutch for efficient automotive auxiliary device actuation, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 7(23) (2013) 62-74.
- [5] L. Wessling, Physical modeling of a clutch for heavy vehicles, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden, 2011.
- [6] B. Kavlicoglu, F. Gordaninejad, Y. Liu, X. Wang, N. Cobanoglu, Magneto rheological Fluid Limited Slip Differential Clutch, *Composite and Intelligent Materials Laboratory*, (2006).
- [7] T. Stancioiu, D. Giuclea, M. Sireteanu, Modelling of Magnetorheological Damper Dynamic Behaviour by Genetic Algorithms Based Inverse Method. , *PROCEEDINGS OF THE ROMANIAN ACADEMY, Series A.*, 5 (2004) 000 - 000.
- [8] B. Spencer Jr, S. Dyke, M. Sain, J. Carlson, Phenomenological model for magnetorheological dampers, *Journal of engineering mechanics*, 123(3) (1997) 230-238.
- [9] K.H. Guðmundsson, Design of a magnetorheological fluid for an MR prosthetic knee actuator with an optimal geometry, University of Iceland., Iceland, 2011.
- [10] R.W. Phillips, Engineering applications of fluids with a variable yield stress, Ph.D, University of California, Berkeley, 1969.
- [11] G. Yang, B. Spencer Jr, J. Carlson, M. Sain, Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations, *Engineering structures*, 24(3) (2002) 309-323.
- [12] S. Hong, S. Choi, Y. Choi, N. Wereley, Non-dimensional analysis and design of a magnetorheological damper, *Journal of Sound and Vibration*, 288(4-5) (2005) 847-863.
- [13] J.-H. Yoo, N.M. Wereley, Nondimensional analysis of annular duct flow in magnetorheological/electrorheological dampers, *International Journal of Modern Physics B*, 19(07n09) (2005) 1577-1583.
- [14] S. Hong, N. Wereley, Y. Choi, S. Choi, Analytical and

## فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$A$	مساحت، $m^2$
$S$	درصد تنشینی
$U$	سرعت (m/s)
$H$	شدت میدان مغناطیسی (kA/m)
$F$	نیرو (N)
$P$	فشار (Pa)
$f$	فرکانس (Hz)

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\mu$	ویسکوزیته Pa.s
$\tau$	تنش (Pa)
$\delta$	ضخامت ناحیه پلاگ (m)
$\dot{\gamma}$	نرخ برش (1/s)

### زیرنویس

$P$	پیستون
$g$	گاز
$rel$	نسبی
$abs$	مطلق
$on$	تحت میدان مغناطیسی
$off$	بدون میدان مغناطیسی

## ۶- مراجع

- [1] D. Calarasu, C. Cotae, R. Olaru, Magnetic fluid brake, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 201(1-3) (1999) 401-403.
- [2] K. Karakoc, E.J. Park, A. Suleman, Design considerations for an automotive magnetorheological brake, *Mechatronics*, 18(8) (2008) 434-447.
- [3] J. Huang, J. Zhang, Y. Yang, Y. Wei, Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake, *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1-3) (2002) 559-562.

- [24] Z. Parlak, T. Engin, İ. Çallı, Optimal design of MR damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field, *Mechatronics*, 22(6) (2012) 890-903.
- [25] Z. Parlak, T. Engin, Time-dependent CFD and quasi-static analysis of magnetorheological fluid dampers with experimental validation, *International Journal of Mechanical Sciences*, 64(1) (2012) 22-31.
- [26] E. Gedik, H. Kurt, Z. Recebli, C. Balan, Two-dimensional CFD simulation of magnetorheological fluid between two fixed parallel plates applied external magnetic field, *Computers & fluids*, 63 (2012) 128-134.
- [27] F. Omidbeygi, S. Hashemabadi, Experimental study and CFD simulation of rotational eccentric cylinder in a magnetorheological fluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(13) (2012) 2062-2069.
- [28] M.S.A. Khan, A. Suresh, N.S. Ramaiah, Investigation on the performance of MR damper with various piston configurations, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(12) (2012) 4.
- [29] S. Chen, W. Shi, Study of corrugated disc rotary damper based on intelligent effect, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(9) (2012) 995-1000.
- [30] B. Sapiński, M. Szczęch, CFD model of a magnetorheological fluid in squeeze mode, *acta mechanica et automatica*, 7(3) (2013) 180-183.
- [31] J. Gołdasz, B. Sapiński, Application of CFD to modeling of squeeze mode magnetorheological dampers, *acta mechanica et automatica*, 9(3) (2015) 129-134.
- [32] F. Gao, Y.-N. Liu, W.-H. Liao, Optimal design of a magnetorheological damper used in smart prosthetic knees, *Smart Materials and Structures*, 26(3) (2017) 035034.
- [33] M.R. Jolly, J.W. Bender, J.D. Carlson, Properties and applications of commercial magnetorheological fluids, in: *Smart structures and materials 1998: passive damping and isolation*, International Society for Optics and Photonics, 1998, pp. 262-275.
- [34] G. Bossis, O. Volkova, S. Lacis, A. Meunier, *Magnetorheology: fluids, structures and rheology*, in: *Ferrofluids*, Springer, 2002, pp. 202-230.
- experimental validation of a nondimensional Bingham model for mixed-mode magnetorheological dampers, *Journal of Sound and Vibration*, 312(3) (2008) 399-417.
- [15] D. Wang, H. Ai, W. Liao, A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps, *Smart materials and structures*, 18(11) (2009) 115001.
- [16] A. Ghaffari, S.H. Hashemabadi, M. Ashtiani, A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids, *Journal of intelligent material systems and structures*, 26(8) (2015) 881-904.
- [17] G.M. Kamath, M.K. Hurt, N.M. Wereley, Analysis and testing of Bingham plastic behavior in semi-active electrorheological fluid dampers, *Smart Materials and Structures*, 5(5) (1996) 576.
- [18] J.-H. Yoo, N.M. Wereley, Quasi-steady axisymmetric Bingham-plastic model of magnetorheological flow damper behavior, in: *ASME 2005 International mechanical engineering congress and exposition*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2005, pp. 375-380.
- [19] S.A. Khan, A. Suresh, N. Seetharamaiah, Principles, characteristics and applications of magneto rheological fluid damper in flow and shear mode, *Procedia materials science*, 6 (2014) 1547-1556.
- [20] C.-I. Chen, Y.-T. Yang, Unsteady unidirectional flow of Bingham fluid between parallel plates with different given volume flow rate conditions, *Applied Mathematical Modelling*, 28(8) (2004) 697-709.
- [21] M. Yu, S. Wang, J. Fu, Y. Peng, Unsteady flow damping force prediction of MR dampers subjected to sinusoidal loading, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2013, pp. 012052.
- [22] D. Susan-Resiga, A rheological model for magnetorheological fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(8) (2009) 1001-1010.
- [23] D.A. Bompos, P.G. Nikolakopoulos, CFD simulation of magnetorheological fluid journal bearings, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(4) (2011) 1035-1060.

- [44] J.-H. YOO, N.M. WERELEY, NONDIMENSIONAL ANALYSIS OF ANNULAR DUCT FLOW IN MAGNETORHEOLOGICAL/ELECTRORHEOLOGICAL DAMPERS, in: *Electrorheological Fluids And Magnetorheological Suspensions (Ernr 2004)*, World Scientific, 2005, pp. 666-672.
- [45] X. Zhu, X. Jing, L. Cheng, Magnetorheological fluid dampers: a review on structure design and analysis, *Journal of intelligent material systems and structures*, 23(8) (2012) 839-873.
- [46] F.M. White, I. Corfield, *Viscous fluid flow*, McGraw-Hill New York, 2006.
- [47] H.P. Gavin, Design method for high-force electrorheological dampers, *Smart Materials and structures*, 7(5) (1998) 664.
- [48] M.R. Jolly, J.W. Bender, J.D. Carlson, Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10(1) (1999) 5-13.
- [49] G.G. Stokes, *On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums*, Pitt Press Cambridge, Cambridge, 1851.
- [50] U. Ferdek, J. Łuczko, Modeling and analysis of a twin-tube hydraulic shock absorber, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 50(2) (2012) 627-638.
- [51] J.C. Dixon, *The shock absorber handbook*, Second ed., John Wiley & Sons, England, 2008.
- [52] N.M. Wereley, L. Pang, Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models, *Smart Materials and Structures*, 7(5) (1998) 732.
- [53] M.Ö. Çarpınioğlu, An overview on pulsatile flow dynamics, *Journal of Thermal Engineering*, 1(6) (2015) 496-504.
- [35] J. Viota, J. De Vicente, J. Duran, A. Delgado, Stabilization of magnetorheological suspensions by polyacrylic acid polymers, *Journal of colloid and interface science*, 284(2) (2005) 527-541.
- [36] N. Wereley, A. Chaudhuri, J.-H. Yoo, S. John, S. Kotha, A. Suggs, R. Radhakrishnan, B. Love, T. Sudarshan, Bidisperse magnetorheological fluids using Fe particles at nanometer and micron scale, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17(5) (2006) 393-401.
- [37] A. Roszkowski, M. Bogdan, W. Skoczynski, B. Marek, Testing viscosity of MR fluid in magnetic field, *Measurement Science Review*, 8(3) (2008) 58-60.
- [38] J. Zhang, J.-q. Zhang, J.-f. Jia, Characteristic analysis of magnetorheological fluid based on different carriers, *Journal of Central South University of Technology*, 15(1) (2008) 252-255.
- [39] M.S. Kim, Y.D. Liu, B.J. Park, C.-Y. You, H.J. Choi, Carbonyl iron particles dispersed in a polymer solution and their rheological characteristics under applied magnetic field, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(2) (2012) 664-667.
- [40] S.E. Premalatha, R. Chokkalingam, M. Mahendran, Magneto mechanical properties of iron based MR fluids, *Am. J. Polym. Sci*, 2(4) (2012) 50-55.
- [41] G. Wang, F. Zhou, Z. Lu, Y. Ma, X. Li, Y. Tong, X. Dong, Controlled synthesis of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> nanocomposites with excellent sedimentation stability for magnetorheological fluid, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 70 (2019) 439-446.
- [42] S. Sgobba, Physics and measurements of magnetic materials, in: *CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets*, Bruges, Belgium, 2009.
- [43] G. Berselli, R. Vertechy, G. Vassura, *Smart Actuation and Sensing Systems: Recent Advances and Future Challenges*, BoD-Books on Demand, 2012.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. M. Zolfagharian, M. H. Kayhani, M. Norouzi, *Manufacturing and Testing of an Optimized Magneto-Rheological Fluid and Modelling of a Twin Tube Magneto-Rheological Damper Using a Modified Non-Newtonian Model Using Analytical Quasi-Static, Analytical Unsteady, Numerical and Experimental Methods*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 1373- 1400.  
DOI: [10.22060/mej.2019.16718.6430](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16718.6430)

