مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1395، دوره 16، شماره 2، ص‌ص 301-308

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی آزمایشگاهی پایداری و رئولوژی سیال مگنتورئولوژیکال پایه آهن

احسان کیومرثی[1]، امیر جلالی[2*]، محمود نوروزی[2]، مجتبی قطعی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
* شاهرود، 3619995161، amirjalali@shahroodut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 آذر 1394
پذیرش: 27 دی 1394
ارائه در سایت: 26 بهمن 1394

*کلید واژگان:*
پایداری
سیال مگنتورئولوژیکال
ته‌نشینی
لزجت بدون میدان
رئولوژی

**چکیده**

ته‌نشینی و تشکیل توده سخت ذرات مغناطیسی، پاسخ سیال مگنتورئولوژیکال به میدان مغناطیسی را محدود می‌کند و می‌تواند منجر به خرابی دستگاه دربردارنده سیال مگنتورئولوژیکال شود؛ لذا همواره بررسی بیشتر روش‌های کاهش ته‌نشینی و عوامل مؤثر بر آن به‌منظور گسترش کاربرد سیالات مگنتورئولوژیکال مورد توجه بوده است. در این مقاله به بررسی برخی پارامترهای مؤثر بر روی پایداری سیالات مگنتورئولوژیکال پرداخته شده است. به این منظور در ابتدا نمونه‌های سیال مورد نظر ساخته شده و میزان تأثیر عوامل مختلفی شامل اثر نوع سیال حامل، غلظت ذرات و روش‌های اختلاط سیال مگنتورئولوژیکال بر پایداری آن بررسی گردیده است و اهمیت هریک از این عوامل با استفاده از الگوریتم تاگوچی تعیین و نمونه سیال پایدار برای استفاده در میراگرهای مگنتورئولوژیکال انتخاب شده است. پس‌ازآن با بررسی رفتار رئولوژیکال بهترین نمونه (از دیدگاه ترکیب پایداری و لزجت در حالت بدون میدان)، رابطه‌ای برای تنش تسلیم در میدان‌های مغناطیسی مختلف ارائه شده است. این مدل بر پایه‌ی روابط موجود برای تنش تسلیم و برازش مدل هرشل- باکلی با داده‌های آزمایشگاهی استخراج گردیده است. نتایج نشان می‌دهد پایدارترین نمونه پس از 168 ساعت دارای 7% ته‌نشینی است. این نمونه متشکل از روغن سیلیکون و 70% وزنی پودر آهن با روش اختلاط همزن مکانیکی است. افزودن مقدار 3% وزنی اسید استئاریک به سیال حامل به‌منظور افزایش پایداری سبب افزایش شدید لزجت سیال حامل تا 39 برابر شده است. بااین‌وجود، نمونه بهینه اثر مگنتورئولوژیکال قابل قبولی را نشان می‌دهد به‌طوری‌که در میدان مغناطیسی 146 kA/m دارای تنش تسلیمی برابر با 15 kPa است.

# An experimental investigation of iron based magnetorheological fluid stability and rheology

**Ehsan Kiyumarsi, Amir Jalali*, Mahmood Norouzi, Mojtaba Ghatee**

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
* P.O.B. 3619995161 Shahrood, Iran, amirjalali@shahroodut.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 11 December 2015
Accepted 17 January 2016
Available Online 15 February 2016

*Keywords:*
Stability
Magnetorheological fluid
Sedimentation
off-state viscosity
rheology

**ABSTRACT**

Sedimentations and hard cakes formation of magnetic particles restrict magnetorheological fluid response to magnetic field and can cause the MR fluid containing device to collapse. Therefore, researches on MR fluids sedimentation reduction procedures and its effective factors are of considerable interest to improve magnetorheological applications. In this study, the effects of some parameters on typical MRF stability were investigated. For this purpose, at first, MRF samples were constructed and the effects of various factors including carrier fluid type, particles concentrations and MRF mixing methods on its stability were investigated and the importance of each factor was determined by Taguchi algorithm and the stable MRF sample for application of magnetorheological dampers was chosen. Next, by investigating the most stable MRF sample, based on the combination of stability and off-state viscosity factors, the relation for yield stress in various magnetic fields was presented. This relation was derived based on fitting the Herschel- Bulkley model with experimental data in conjunction with the existing relations of yield stress. As the results show, after 168 hours, sedimentation for the most stable sample is 7%. This sample consists of silicon oil and 70%wt iron powder which was prepared with mechanical stirrer. Adding 3%wt stearic acid to carrier fluid for increasing the stability results in increasing the viscosity of carrier fluid up to 39 times. In spite of this, an acceptable MR effect is presented so that, in magnetic field of 146 kA/m the sample yield stress is 15KPa.

## 1- مقدمه

به ماده‌ای که حداقل یکی از خواص آن با تحریک خارجی قابل کنترل باشد، ماده هوشمند گفته می‌شود. امروزه استفاده از این مواد توسعه روزافزونی یافته است. سیالات مگنتورئولوژیکال[1] بخش مهمی از مواد هوشمند را تشکیل می‌دهند. این نوع سیال در سال 1949 توسط

1- Magnetorheological fluids (MRF)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
E. Kiyumarsi, A. Jalali, M. Norouzi, M. Ghatee, An experimental investigation of iron based magnetorheological fluid stability and rheology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 301-308, 2016 (in Persian)

Archive of SID
www.SID.ir

رابینو[1] ابداع شده است، اما تنها در دو دهه اخیر پس از ساخت اولین نمونه تجاری سیال مگنتورئولوژیکال و به‌کارگیری آن در تجهیزات کنترل‌پذیر، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [1]. با اعمال میدان مغناطیسی به این سیالات در کسری از ثانیه (در حد هزارم ثانیه) رفتار رئولوژیکال آن تغییر می‌کند و در نهایت از یک سیال شبه نیوتونی تبدیل به یک جامد ویسکوالاستیک می‌شود. این پدیده اثر مگنتورئولوژیکال[2] نام دارد. این ویژگی سیالات مگنتورئولوژیکال را برای کاربرد در دستگاه‌های مکانیکی که به کنترل فعال یا انتقال گشتاور نیاز دارد بسیار مناسب می‌نماید [2]. به‌عنوان مثال می‌توان به کاربرد سیال مگنتورئولوژیکال در جاذب‌های شوک[3]، ترمزها، کلاچ‌ها، شیرهای کنترل، مفاصل مصنوعی و میراگرهای ارتعاشات زلزله و خودرو اشاره کرد [3]. میراگر مگنتورئولوژیکال نوعی از میراگرهای هوشمند است که مبتنی بر خواص رئولوژیکال قابل‌کنترل سیال به‌کار رفته در آن است. کاربرد این میراگرها محدوده وسیعی از سازه‌های عمرانی و مکانیکی نظیر ساختمان‌ها، پل‌ها تا اتومبیل‌ها و وسایل حمل‌ونقل ریلی را دربر می‌گیرد [4]. سیالات مگنتورئولوژیکال مرسوم از پراکندن ذرات میکرونی مغناطیس‌پذیر (تا 50 درصد حجم سیال) در یک سیال غیرمغناطیسی به‌دست می‌آیند. با اعمال میدان مغناطیسی هریک از این ذرات قطبیده می‌شود و به دلیل خاصیت فرومغناطیس، ذرات مجاور خود را می‌رباید و در راستای میدان، زنجیره‌ای را تشکیل می‌دهد. به‌دلیل نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بالا، آهن کربونیل معمول‌ترین ذره مغناطیسی مورد استفاده در ساخت این‌گونه سیالات است. از انواع سیال‌های حامل به‌کاررفته می‌توان به روغن‌های معدنی، روغن سیلیکون، پلی‌استرها، هیدروکربن‌های مصنوعی و آب اشاره نمود [2]. به‌علت تفاوت زیاد چگالی ذرات مغناطیسی با سیال حامل، ته‌نشینی ذرات و به‌تبع آن تشکیل زنجیره ناقص از این ذرات تحت میدان مغناطیسی رخ می‌دهد، درنتیجه پاسخ سیال مگنتورئولوژیکال به میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد [5]. در تحقیقات گذشته راه‌حل‌های بسیاری برای جلوگیری از ته‌نشینی و انباشتگی ذرات مغناطیسی ارائه شده است که می‌توان به روش‌هایی مانند پوشش‌دهی ذرات مغناطیسی، استفاده از نانوذره‌های سیم مانند و نانوذره‌های کروی، استفاده از افزودنی‌های پایدارساز، به‌کارگیری سیالات حامل چگال و روش‌های مکانیکی اشاره نمود [6]. اثر اندازه و نسبت حجمی یا وزنی ذرات مغناطیسی بر پایداری سیال مگنتورئولوژیکال توسط تعدادی از محققان بررسی شده است [7]. مشخصه‌های اصلی این سیال شامل تنش تسلیم، نرخ یا سرعت ته‌نشینی و لزجت است [1]. با افزایش قطر متوسط ذرات مغناطیسی تنش تسلیم افزایش و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال کاهش می‌یابد [8]. بررسی استفاده از ذرات در اندازه و اشکال مختلف برای افزایش پایداری نشان می‌دهد که افزودن ذرات مغناطیسی در مقیاس نانو به ذرات میکرونی باعث افزایش پایداری و تنش تسلیم و همچنین کاهش لزجت حالت بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال می‌شود [9]. آزمایش‌ها نشان می‌دهند مقادیر وزنی متفاوت ذرات مغناطیسی سبب تغییر سرعت ته‌نشینی می‌گردند [10]. اضافه‌کردن افزودنی‌های[4] مختلف نظیر نانوتیوب‌های کربن، گرافیت، سیلیکا، اکسید گرافن و همچنین اثر افزودنی‌های تیکسوتروپیک[5] در کمتر کردن ته‌نشینی ذرات ثابت شده است [12,11]. افزودن اسیدهای هایدروفوبیک[6] مانند اسید استئاریک با زنجیره بیش از 14 کربن به سیال مگنتورئولوژیکال منجر به ارتقاء معنی‌دار پایداری و اثر مگنتورئولوژیکال می‌گردد [13]. از بین روش‌های گوناگون برای افزایش پایداری سیال مگنتورئولوژیکال، استفاده از نانوذرات مغناطیس‌پذیر و افزودنی‌های پایدارساز نتایج رضایت‌بخش‌تری را در افزایش پایداری به‌دست می‌دهند [6]. در ترکیب این سیالات معمولا یکی از سه نوع سیال حامل روغن سیلیکون، روغن هیدروکربنی مصنوعی[7] و روغن معدنی[8] با ذرات آهن کربونیل مخلوط می‌گردد [1]. به‌رغم وجود تحقیقاتی که در گذشته تأثیر سیال حامل را بر اثر مگنتورئولوژیکال و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال بررسی کرده است، ماده و یا ترکیبی که به‌اندازه‌ی کافی برای کاربردهای صنعتی این نوع سیال رضایت‌بخش باشد، وجود ندارد؛ بنابراین تحقیقات بیشتری در این زمینه موردنیاز است. در اکثر تجهیزاتی که از سیالات مگنتورئولوژیکال استفاده می‌کنند، روغن سیلیکون به‌عنوان سیال حامل به‌کار می‌رود [6]. لزجت حالت بدون میدان مغناطیسی سیال مگنتورئولوژیکال کاملا متأثر از لزجت سیال حامل است. بالا بودن لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در حالت عدم حضور میدان مغناطیسی، در بسیاری از کاربردهای این سیال امری نامطلوب به‌حساب می‌آید، زیرا در این حالت مؤلفه مگنتورئولوژیکال (نیروی ناشی از تنش تسلیم) نیروی میرایی کاهش می‌یابد [13]. محدوده نیروی میرایی برای میراگر حالت ایمن[9] بدون وجود میدان مغناطیسی حدود 2kN است و با اعمال میدان مغناطیسی تا 5kN افزایش می‌یابد [14].

در این پژوهش در ابتدا نمونه‌های سیال از پراکندن ذرات آهن کربونیل با غلظت‌های مختلف در روغن سیلیکون و روغن هیدرولیک به‌کمک دو روش اختلاط مکانیکی و آسیاب گلوله‌ای ساخته شده است. در ادامه علاوه بر بررسی اثر غلظت پودر آهن، نوع سیال حامل و اضافه کردن اسید استئاریک بر لزجت بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال، اثر پارامترهایی نظیر درصد و چگونگی اختلاط و نوع سیال حامل نیز بر پایداری این سیال هوشمند بررسی می‌گردد. سپس میزان اهمیت هریک از این پارامترها در سرعت ته‌نشینی بررسی شده و یک سیال مغناطیسی پایدار و مؤثر با توجه به کاربرد خاص برای دمپر مگنتورئولوژیکال ارائه می‌شود. بررسی پاسخ این سیال به میدان مغناطیسی و اثر مگنتورئولوژیکال با توجه به افزایش لزجت حالت بدون میدان امری ضروری است؛ بنابراین در این مقاله رفتار رئولوژیکال پایدارترین نمونه بررسی و تنش تسلیم و لزجت آن به‌ازای میدان‌های مختلف ارزیابی گردیده است.

## 2- روش آزمایش

در این پژوهش برای ساخت سیال مگنتورئولوژیکال از پودر آهن کربونیل (با نام تجاری بسف[10] آلمان، با قطر متوسط ذرات 4μm و چگالی $7.86\ g/cm^3$) استفاده شده است. مراجعه به تحقیقات گذشته نشان می‌دهد ذرات آهن-کربونیل با قطر 4μm به‌دلیل نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بالا و فرآیند تولید نسبتا ساده مناسب‌ترین گزینه برای ساخت سیال مگنتورئولوژیکال می‌باشند. بسته به محدوده‌ی تنش مورد نیاز، نسبت حجمی ذرات مغناطیسی به‌کاررفته از 10% تا 7 متغیر است [6]. انتخاب غلظت پودر آهن به‌کاررفته در سیال مگنتورئولوژیکال اثر مستقیم بر لزجت بدون میدان سیال و اثر مگنتورئولوژیکال آن دارد که این موضوع منجر به محدودیت در انتخاب

1- Rabinow
2- MR effect
3- Shock absorber
4- Additives
5- Thixotropic additive
6- Hydrophobic acid

7- Synthetic oil
8- Mineral oil
9- Fail safe
10- Basf



Archive of SID
www.SID.ir

غلظت پودر آهن می‌گردد. به‌عنوان‌مثال افزایش غلظت پودر آهن باعث افزایش اثر مگنتورئولوژیکال و افزایش لزجت بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال می‌شود. برای فاز پیوسته یا سیال حامل نیز دو نوع سیال مرسوم (در میراگرهای مگنتورئولوژیکال) درنظر گرفته شده است، این دو نوع سیال شامل روغن معدنی (روغن هیدرولیک کاسپین VG46 با لزجت 46cSt در دمای 40°C) و روغن سیلیکون (روغن سیلیکون کی‌سی‌سی[1] کره با لزجت 350cSt در دمای 40°C) است. برای افزایش پایداری سیال، مقداری اسید استئاریک[2] (اپلیکم[3] آلمان) به‌عنوان افزودنی به‌کاررفته است.

### 2-1- ساخت سیال

پس از توزین مواد با توجه به نسبت‌های وزنی مورد نظر، اسید استئاریک به سیال پایه (روغن سیلیکون یا روغن هیدرولیک) اضافه شده و محلول به‌مدت 30 دقیقه با کمک همزن مغناطیسی[4] در دمای حدود 100°C مخلوط می‌گردد تا محلول شفافی حاصل شود. سپس پودر آهن به محلول اضافه و برای اختلاط آن از دو روش همزن مکانیکی[5] یا آسیاب‌کاری[6] با گلوله‌ی فولادی استفاده می‌گردد. در نمونه‌هایی که اختلاط آن با همزن مکانیکی انجام می‌شود، پس از اضافه نمودن پودر آهن، به مدت 30 دقیقه سوسپانسیون با همزن مکانیکی با دور 3000rpm هم زده می‌شود. برای اختلاط به روش آسیاب‌کاری نیز، سوسپانسیون حدود 10 ساعت با ساچمه‌های فولادی به قطر 12 میلی‌متر و نسبت حجمی (حجم پودر آهن/ حجم گلوله) برابر 1.5 با دور 30rpm آسیاب می‌گردد. مشخصات نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکال ساخته‌شده در جدول 1 آمده است. مقدار اسید استئاریک اضافه‌شده به هریک از نمونه‌ها برابر با 3% وزنی کل سوسپانسیون است [13].

### 2-2- آزمایش سیال مگنتورئولوژیکال

مطابق بسیاری از تحقیقات گذشته، تعیین پایداری و ته‌نشینی با مشاهده‌ی تغییر مکان مرز بین بخش شفاف و کدر سیال مغناطیسی در دمای اتاق انجام

**جدول 1** مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده از سیال مگنتورئولوژیکال

**Table 1** prepared MRF samples properties

| نمونه | روش اختلاط | فاز پیوسته (درصد وزنی) | درصد وزنی آهن کربونیل |
|---|---|---|---|
| MR1 | همزن مکانیکی | روغن سیلیکون (47%) | 50% |
| MR2 | همزن مکانیکی | روغن سیلیکون (37%) | 60% |
| MR3 | همزن مکانیکی | روغن سیلیکون (27%) | 70% |
| MR4 | آسیاب گلوله‌ای | روغن هیدرولیک (47%) | 50% |
| MR5 | آسیاب گلوله‌ای | روغن هیدرولیک (37%) | 60% |
| MR6 | آسیاب گلوله‌ای | روغن هیدرولیک (27%) | 70% |
| MR7 | همزن مکانیکی | روغن سیلیکون (47%) | 50% |
| MR8 | همزن مکانیکی | روغن سیلیکون (37%) | 60% |
| MR9 | همزن مکانیکی | روغن سیلیکون (27%) | 70% |
| MR10 | آسیاب گلوله‌ای | روغن هیدرولیک (47%) | 50% |
| MR11 | آسیاب گلوله‌ای | روغن هیدرولیک (37%) | 60% |
| MR12 | آسیاب گلوله‌ای | روغن هیدرولیک (27%) | 70% |

1- KCC
2- Stearic acid
3- Applichem
4- Magnetic stirrer
5- Overhead mechanical stirrer
6- Ball milling

شده است [13,5]. به‌منظور بررسی اثر غلظت فاز پراکنده‌شونده، روش اختلاط و نوع سیال حامل بر روی پایداری و لزجت بدون میدان، آزمایش‌هایی طراحی گردیده است، به‌گونه‌ای که به سه غلظت مختلف ذرات مغناطیسی، دو نوع سیال حامل و دو روش اختلاط و درمجموع تعداد 12 نمونه برای اندازه‌گیری میزان تأثیر هریک از این پارامترها بر روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال مورد نیاز است. هر یک از نمونه‌ها حدود 170 ساعت در یک محل ثابت قرار داده شده است. به‌دلیل تقریبا صفر شدن نرخ ته‌نشینی بیشتر نمونه‌ها در مدت 7 روز، این بازه زمانی برای بررسی پایداری در نظر گرفته شده است. نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکال در شرایط یکسان، درون لوله‌های آزمایش به قطر 18mm و طول 175mm به‌مدت یک هفته نگه‌داری شده است. با استفاده از نتایج آزمایش ته‌نشینی و به‌کمک روش تاگوچی[7] در نرم‌افزار مینی‌تب[8] بهترین ترکیب متغیرهای مختلف برای تعیین سیال مگنتورئولوژیکال پایدار و تأثیر هرکدام از آن‌ها برروی ته‌نشینی استخراج شده است. با توجه به نتایج آزمون ته‌نشینی، نمونه‌های مورد قبول در آزمایش پایداری انتخاب شده و ادامه آزمایش‌ها و مطالعات رئومتری روی این نمونه‌ها انجام گرفته است. برای بررسی رفتار لزجت بدون میدان نمونه‌های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال، از ویسکومتر دیجیتال (بروکفیلد[9] مدل DV-E آمریکا) استفاده شده است (شکل 1) تا لزجت برخی نمونه‌ها بدون اعمال میدان مغناطیسی در دمای اتاق استخراج گردد. حداکثر خطای لزجت‌سنجی دستگاه با توجه به ویسکوزیته‌ی نمونه‌های مختلف، متفاوت است (با توجه به اسپیندل به‌کار رفته در دستگاه متناسب با لزجت سیال) که مقادیر آن در جدول 2 آورده شده است، بیشترین خطای اندازه‌گیری مربوط به کمترین نرخ برش و کمترین آن مربوط به نرخ برش بیشینه‌ی هر نمونه است. لزجت نمونه‌ها در دمای 25°C توسط ویسکومتر دیجیتال در نرخ برش‌های 0.3 تا 100 دور بر دقیقه بدون اعمال میدان مغناطیسی استخراج گردیده است. همچنین لزجت و تنش برشی سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان‌های مغناطیسی مختلف نیز به‌دست آمده است که این اطلاعات در نرخ برش‌های 0.01 تا $\frac{1}{s}$ 1000 در دمای 25°C توسط رئومتر (آنتون پار[10] مدل MCR 300 اتریش) با شیار[11] 1mm بین صفحات موازی آن استخراج شده است (شکل 1). بااین‌منظور برای هر آزمایش حدود 3ml سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. دقت این دستگاه در اندازه‌گیری لزجت دینامیکی برای نمونه‌ی مورد استفاده ±100cp در محدوده‌ی نرخ برش مورد نظر است.

## 3- نتایج و بحث و بررسی

### 3-1- پایداری سیالات مگنتورئولوژیکال

درصد ته‌نشینی عبارت است از نسبت حجم قسمت شفاف سوسپانسیون به حجم کل آن که توسط رابطه (1) ارائه شده است:

$$R = \frac{a}{(a+b)} \times 100\% \qquad (1)$$

در این رابطه، $a$ ارتفاع سیال شفاف و $b$ ارتفاع قسمت کدر سوسپانسیون می باشد. همچنین مکانیزم اندازه گیری ارتفاع قسمت شفاف و کدر نیز در شکل 2 ارائه گردیده است. همان‌طورکه در شکل 2 نشان داده شده است با اندازه‌گیری طول قسمت شفاف سوسپانسیون و ارتفاع کل با کمک رابطه (2)

7- Taguchi method
8- Minitab
9- Brookfield
10- Anton Paar
11- Gap



Archive of SID
www.SID.ir

**جدول 2** دقت اندازه‌گیری ویسکومتر دیجیتال

**Table 2** measurement accuracy of digital viscometer

| نمونه | روغن سیلیکون | روغن سیلیکون باافزودنی | روغن هیدرولیک | روغن هیدرولیک با افزودنی | MR1 | MR3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| خطای دستگاه (cp) | 60-5 | 1K-20 | 60-5 | 1K-20 | 4K-20 | 11K-100 |

K(*) برابر با 1000 است

(b) (a)

**Fig. 1** Used rheometer (a) and viscometer (b) in experiment

**شکل 1** رئومتر (a) و ویسکومتر (b) مورد استفاده در آزمایش

درصد ته‌نشینی در زمان‌های مختلف برای هر نمونه محاسبه شده است. با توجه به اندازه گیری ارتفاع قسمت ها با خط کش، دقت اندازه‌گیری برابر 1mm است. در شکل 3 نتایج پایداری نمونه‌های ساخته‌شده در این مدت (بر حسب ساعت) بیان گردیده است.

همان‌طور که در بالا به آن اشاره شد، در ساخت سیال نمونه از افزودنی اسید استئاریک به‌عنوان پایدارکننده استفاده شده است. اضافه کردن اسید استئاریک پایداری سیال را به نحو چشمگیری افزایش می‌دهد، به‌گونه‌ای که پایداری سیال در این حالت 8 برابر حالت بدون اسید استئاریک است. همچنین استفاده از اسید پالمتیک[1] به‌عنوان افزودنی با همان نسبت، پایداری سیال را به دو برابر افزایش می‌دهد. درنتیجه استفاده از اسید استئاریک به‌عنوان پایدارکننده مناسب‌تر به نظر می‌رسد [13]. همان‌طور که از مقایسه‌ی منحنی‌های شکل 3 استنباط می‌شود کمترین ته‌نشینی در این محدوده‌ی زمانی متعلق به دو نمونه با سیال حامل روغن سیلیکون و درصد وزنی آهن 60% و 70% است. می‌توان پس از مدت یک هفته نتیجه مقایسه پایداری نمونه‌های مختلف سیال را بر حسب بیشترین مقدار پایداری به‌صورت زیر نوشت:

MR3>MR2>MR6>MR5>MR9>MR1>MR8>MR11>MR7>
MR12>MR10>MR4

با توجه به شکل 3 رفتار بعضی از نمونه‌ها به‌گونه‌ای است که در یک بازه زمانی کمتر از 7 روز سرعت ته‌نشینی بسیار زیاد بوده است و سپس با کاسته شدن از سرعت ته‌نشینی به تعادل می‌رسند، پس‌ازآن مدت، درصد پایداری تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند؛ اما بعضی از نمونه‌ها مانند MR7 و MR8 پس از بازه 7 روز نیز نرخ ته‌نشینی بالایی را نشان می‌دهند، در نتیجه برای بررسی پایداری آن‌ها باید بازه‌ی زمانی بزرگ‌تری را اختصاص داد. در تست ته‌نشینی بیشترین پایداری مربوط به سیال مغناطیسی با نسبت ترکیبی 70% وزنی آهن با سیال پایه‌ی روغن سیلیکون و اختلاط با همزن مکانیکی

1- Palmitic acid

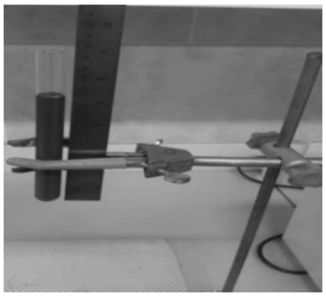

**Fig. 2** Measuring sedimentation manner

**شکل 2** نحوه اندازه‌گیری ته‌نشینی

(MR3) است. در این نمونه درصد ته‌نشینی پس از گذشت هفت روز معادل 7% است، اما MR2 با اندکی ته‌نشینی بیشتر در 168 ساعت (8.2%) سرعت ته‌نشینی تقریبا برابری را در انتهای بازه‌ی زمانی آزمایش نشان می‌دهد. این امر می‌تواند نشان‌گر این باشد که در سیال مگنتورئولوژیکال با سیال حاملی که دارای لزجت بالا است، افزودن مقدار زیاد ذرات پراکنده‌شونده تأثیری بر پایداری سیال مگنتورئولوژیکال ندارد و حتی ممکن است آن را کاهش دهد.

### 2-3- اثر اختلاط، نوع سیال و غلظت فاز پراکنده‌شونده در پایداری سیال

با توجه به نتایج حاصل از شکل 3 و بررسی ته‌نشینی سیالات مگنتورئولوژیکال مختلف، ملاحظه می‌شود اختلاط سوسپانسیون با کمک همزن مکانیکی در صورت یکسان بودن سایر شرایط، پایداری بهتری را نسبت به آسیاب با گلوله فلزی نشان می‌دهد به‌علاوه زمان و هزینه انجام آن نیز بسیار کمتر است. در این روش، پراکندن ذرات آهن احتمالا به دلیل انرژی بیشتری که در همزن مکانیکی منتقل می‌شود، بهتر رخ می‌دهد و سیال همگن‌تری را به‌دست می‌دهد. با افزایش نسبت وزنی پودر آهن کربونیل در سیال مگنتورئولوژیکال پایداری سیال افزایش می‌یابد. این افزایش پایداری با افزایش لزجت سیال حامل کمتر می‌شود، یعنی در نمونه با سیال پایه روغن سیلیکون، افزایش غلظت ذرات مغناطیسی تأثیر کمتری در پایداری سیال مگنتورئولوژیکال به نسبت سیال پایه روغن هیدرولیک دارد. نتایج آزمون پایداری نشان می‌دهد که نمونه‌های با سیال پایه‌ی روغن سیلیکون پایداری بسیار بهتری را حتی در مقایسه با نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده در سال‌های اخیر [17-15,11] نشان می‌دهد.

### 3-3- لزجت حالت بدون میدان

عموما با افزایش لزجت سیال مگنتورئولوژیکال، پایداری آن نیز افزایش می‌یابد. به‌عنوان‌مثال نمونه‌های MR4 و MR10 (سیال حامل روغن هیدرولیک و 50% وزنی پودر آهن) دارای کمترین لزجت و بیشترین ته‌نشینی یا کمترین پایداری است. از عوامل مؤثر بر لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در نبود میدان مغناطیسی می‌توان به نسبت ترکیبی فاز پراکنده‌شونده، لزجت سیال حامل و نوع و مقدار افزودنی اشاره کرد. همان‌طور که در شکل 4 مشخص است در غیاب میدان مغناطیسی، لزجت ظاهری سیال مگنتورئولوژیکال با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد که به این خاصیت سیالات غیر نیوتونی، رقیق‌شوندگی برشی[2] می‌گویند. این رفتار برای سیالات مگنتورئولوژیکال مناسب است چون در فرکانس‌های بالا گرمای تولیدشده

2- Shear thinning



Archive of SID
www.SID.ir

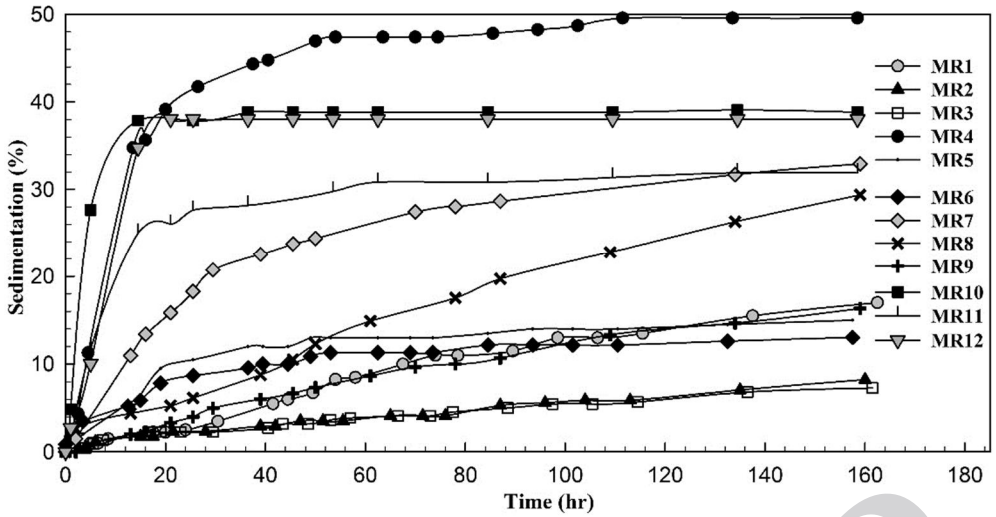


**Fig. 3** MRFs samples sedimentation ratio versus time (hour) in temperature 25°c

**شکل 3** نسبت ته‌نشینی نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکال برحسب زمان (ساعت) در دمای 25°c

ناشی از اصطکاک سیال میراگر افزایش می‌یابد و هرچه لزجت سیال کمتر باشد این گرمای تولیدی کمتر می‌شود. همچنین سیالات حامل نیز تقریبا رفتاری نیوتونی از خود نشان می‌دهند و با تغییر نرخ برش لزجتشان ثابت باقی می‌ماند؛ اما با افزودن اسید استئاریک لزجت این سیالات به‌شدت بالا می‌رود و تشکیل یک حالت ژله مانند می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که حتی لزجت محلول روغن سیلیکون و اسید استئاریک تقریبا برابر با MR1 می‌شود؛ رفتار این محلول نیز رقیق‌شونده برشی است. لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در حالت بدون میدان باید به‌گونه‌ای باشد که در صورت خرابی قسمت فعال بتواند مقدار نیروی میرایی کافی را منتقل کند. در این حالت (بدون وجود میدان مغناطیسی) نیروی میراگر تنها ناشی از نیروی ویسکوز سیال است، اما با اعمال میدان مغناطیسی، مؤلفه دیگر نیرو ناشی از اثر مگنتورئولوژیکال نیز بر مؤلفه ویسکوز اضافه می‌گردد که بر آن غالب است، درنتیجه لزجت بدون میدان با شدت زیاد، اثر مگنتورئولوژیکال را محدود می‌کند که امری نامطلوب است. در این مطالعه کاربرد سیال مگنتورئولوژیکال در دمپرهای جذب ارتعاشات خودرو در نظر گرفته شده است. با افزایش مقدار اسید استئاریک اضافه شده به سیال هم پایداری و هم لزجت سیال مگنتورئولوژیکال افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش اسید استئاریک به بیش از 3% وزنی، لزجت ظاهری بدون افزایش قابل ملاحظه پایداری، به‌صورت نامطلوبی بالا می‌رود [13]. همچنین اثر لزجت سیال پایه بر روی لزجت سیال مگنتورئولوژیکال نیز در شکل 5 مشخص است. به‌طوری‌که ویسکوزیته روغن سیلیکون انتخاب شده حدود 7 برابر روغن هیدرولیک است، اما سیال مگنتورئولوژیکال با سیال پایه مختلف و یکسان بودن سایر شرایط، تفاوت کمتری را در لزجت بدون میدان نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود با افزایش نسبت پودر آهن کربونیل، لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در حالت بدون میدان تا 6 برابر نیز (آهن کربونیل 70% نسبت به 50% در نرخ برش‌های پایین) افزایش می‌یابد. تأثیر این تفاوت با افزایش نرخ برش، بر لزجت میدان صفر کاهش می‌یابد.

### 3-4- میزان تأثیر پارامترها برروی پایداری

جدول 3 هر یک از سطوح آزمایش (محورهای افقی شکل 4) تعریف شده برای الگوریتم تاگوچی را نشان می‌دهد. این الگوریتم، 36 آزمایش را پیشنهاد می‌دهد. پس از وارد نمودن نتایج آزمون ته‌نشینی و انجام محاسبات توسط نرم‌افزار، نمودار نسبت سیگنال به نویز به‌دست می‌آید که در شکل 5 نمایش داده شده است. این مقدار هرچه بزرگ‌تر باشد به مقدار مطلوب خروجی (پایداری) نزدیک‌تر هست. بر این مبنا این نمودار بهترین نمونه از لحاظ پایداری را نمونه‌ای که با روش همزن مکانیکی و با سیال حامل روغن سیلیکون و غلظت 60% پودر آهن تهیه شده است معرفی می‌کند (MR2).

چون در این نمودار تمامی فاکتورها به یک مقیاس باهم سنجیده شده است، می‌توان میزان اهمیت مستقل هرکدام از متغیرها بر روی پارامترخروجی که همان ته‌نشینی است را نیز نشان داد. با توجه به این شکل می‌توان گفت انتخاب نحوه‌ی اختلاط بیشترین تأثیر را روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال دارد و پس‌ازآن نوع سیال حامل در درجه دوم اهمیت قرار دارد و تأثیر غلظت دارای اهمیت کمتری است؛ البته تغییرات غلظت پودر آهن کربونیل از 50% به 60% نسبت به تغییر 60% به 70% تأثیر بیشتری بر روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال دارد.

### 3-5- رئولوژی

نتایج رئومتری روی مناسب‌ترین نمونه از نظر پایداری و لزجت بدون میدان

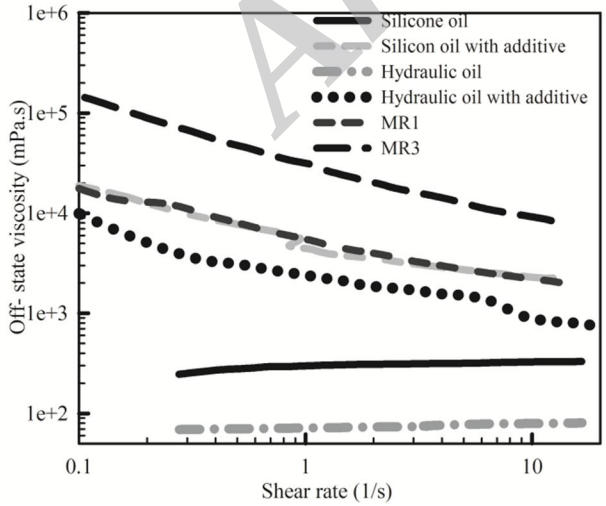


**Fig. 4** off- state viscosity of MRFs & carrier fluids versus shear rate

**شکل 4** لزجت بدون میدان سیالات مگنتورئولوژیکال و سیالات حامل برحسب نرخ برش



Archive of SID
www.SID.ir

(نمونه بهینه که MR2 با غلظت 60% آهن کربونیل و سیال حامل روغن سیلیکون، اختلاط با همزن مکانیکی است) نشان می‌دهد که اعمال میدان مغناطیسی تنش برشی و لزجت سیال مگنتورئولوژیکال را افزایش می‌دهد، به‌طوری‌که هرچه میدان مغناطیسی- تا رسیدن به حد اشباع- زیاد شود تنش برشی و لزجت به نحو چشم‌گیری افزایش می‌یابد، این امر ویژگی اصلی اثر مگنتورئولوژیکال است و به این تنش برشی بیشینه تنش تسلیم گفته می‌شود، به‌عبارت دیگر تنش تسلیم، بیشینه تنشی است که قبل از جریان یافتن مداوم سیال می‌توان به آن اعمال نمود [6]. شکل 6 تغییرات تنش برشی MR2 را برحسب نرخ برش در میدان‌های مغناطیسی مختلف نشان می‌دهد، می‌توان با برازش این نمودار با مدل هرشل- باکلی[1] (معادله 2)، تنش تسلیم را محاسبه نمود. این مدل مشابه مدل بینگهام پلاستیک فرض می‌کند که در تنش‌های زیر تنش تسلیم، سیال رفتار صلب را نشان می‌دهد و در تنش‌های بالاتر از تنش تسلیم سیال مانند سیال ویسکوز جریان می‌یابد؛ با این تفاوت که در این مدل برخلاف مدل بینگهام اثر رقیق‌شوندگی و یا غلیظ‌شوندگی برشی[2] سیال پس از تسلیم نیز در نظر گرفته می‌شود [1] در نتیجه تنش تسلیم حاصل از این مدل نسبت به تنش تسلیم محاسبه شده از مدل بینگهام مانند آنچه در تعدادی از تحقیقات گذشته انجام شده است [18,9] دقت بالاتری دارد.

$$\tau = \tau_y + (k|\dot{\gamma}|^{1/m})\mathrm{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (2)$$

در رابطه (2) $\tau_y$ تنش تسلیم برحسب Pa است که به‌وسیله میدان مغناطیسی کنترل می‌شود، $\dot{\gamma}$ نرخ برش برحسب 1/s و $\mathrm{sgn}(*)$ تابع علامت است. $k$ و $m$ پارامترهای سیال هستند، به‌طوری‌که $m > 1$ نشان‌دهنده‌ی رفتار رقیق‌شوندگی برشی سیال است و با $m < 1$ سیال غلیظ‌شونده برشی است [4]. نتایج برازش این مدل با داده‌های آزمایشگاهی آزمون رئومتری در جدول 4 نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود

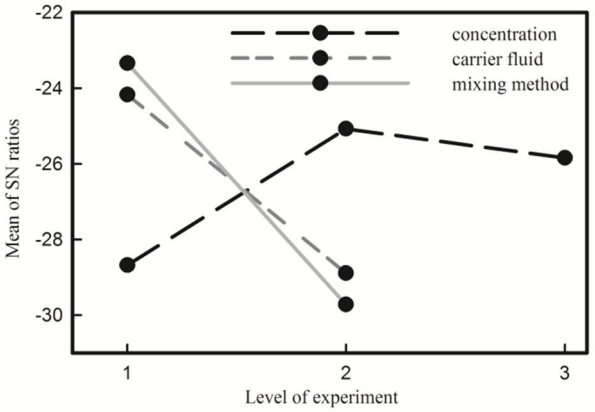


**Fig. 5** SNR charts for designed experiments with Taguchi

**شکل 5** نمودار نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش‌های طراحی‌شده، به‌کمک الگوریتم تاگوچی

**جدول 3** سطوح آزمایش درنظرگرفته شده برای الگوریتم تاگوچی

**Table 3** expected levels of experiments for Taguchi algorithm

| سطح | روش اختلاط | غلظت آهن کربونیل | نوع سیال حامل |
|---|---|---|---|
| 1 | همزن مکانیکی | wt 50% | روغن سیلیکون |
| 2 | آسیاب‌کاری | wt 60% | روغن هیدرولیک |
| 3 | - | wt 70% | - |

1- Herschel- Bulkley
2- Shear thickening

مقادیر m بزرگ‌تر از 1 است که نشان‌دهنده رقیق‌شوندگی برشی نمونه سیال مگنتورئولوژیکال است. RMSE نیز خطای جذر میانگین مربعات است. با افزایش میدان مغناطیسی خطای تخمین یا انحراف از مدل افزایش می‌یابد.

در گذشته روابط زیادی برای تنش‌تسلیم برحسب شدت میدان مغناطیسی ارائه شده است، به‌عنوان نمونه می‌توان به رابطه ارائه‌شده توسط پیائو و همکارانش [13] اشاره نمود که در رابطه (3) ارائه شده است:

$$\tau_y \propto H^n \tanh(\sqrt{H}) \quad (3)$$

در این رابطه $n$ توان معادله، $H$ شدت میدان مغناطیسی اعمالی برحسب kA/m و $\tau_y$ تنش تسلیم بیشینه برحسب Pa است که از برازش مدل هرشل- باکلی با داده‌های آزمایشگاهی (شکل 6) استخراج شده‌است. طبق این محاسبات تنش تسلیم بیشینه برای MR2 حدود 15 kPa در شدت میدان مغناطیسی 146 kA/m در دمای 25°C است که مقداری قابل قبول است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، تنش تسلیم بیشینه به‌شدت افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به حد اشباع مغناطیسی، از مقدار این افزایش کاسته می‌گردد. همچنین از طریق برازش رابطه (3) با داده‌های آزمایشگاهی، می‌توان ارتباط بین تنش تسلیم و میدان مغناطیسی در دمای ثابت، برای MR2 را مطابق رابطه (4) پیشنهاد نمود:

$$\tau_y = 247.3 \times H^{0.83} \tanh(\sqrt{H}) \quad (4)$$

در شکل 7 لزجت سیال MR2 به‌عنوان تابعی از نرخ برش در شدت میدان‌های مغناطیسی مختلف در دمای 25°C نشان داده شده است که می‌توان از روی آن الگوی رفتار سیال مگنتورئولوژیکال پس از تسلیم را مشاهده نمود. از شکل 7 می‌توان استنباط نمود که در میدان‌های نزدیک به حالت اشباع مغناطیسی لزجت سیال مگنتورئولوژیکال تنها تابع نرخ برش است و به میدان مغناطیسی بستگی ندارد، به‌عبارت دیگر افزایش میدان از حالت اشباع به بعد هیچ تأثیری روی رفتار رئولوژیکال سیال ندارد.

### 3-6- تحلیل عدم قطعیت

خطای اندازه‌گیری ویسکومتر دیجیتال (جدول 2) و رئومتر بیان‌گر میزان دقت نتایج است. خطای نسبی اندازه‌گیری ته‌نشینی نیز با توجه به دقت اندازه‌گیری ابزار به‌صورت میانگین حدود 2.5% است.

## 4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر پایداری نمونه‌های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال با شرایط متغیر نظیر دو نوع سیال حامل شامل روغن سیلیکون و روغن هیدرولیک، دو روش پراکندن ذرات مغناطیسی در سیال حامل یکی با کمک همزن مکانیکی و دیگری آسیاب کاری با گلوله‌ی فلزی و سه غلظت متفاوت 50%wt، 60%wt و 70%wt برای ذرات مغناطیسی بررسی گردید. حساسیت سنجی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال نسبت به هرکدام از پارامترهای متغیر، با کمک الگوریتم تاگوچی انجام و پایدارترین سیال با توجه به کاربرد در

**جدول 4** پارامترهای مدل هرشل- باکلی برازش شده با نتایج رئومتری

**Table 4** fitted parameters of Herschel- Bulkley model with rheometry results

| میدان مغناطیسی (kA/m) | $\tau_y$ (kPa) | k | m | RMSE |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.16 | 10.7 | 1.57 | 3.2 |
| 36 | 4.38 | 143.6 | 1.93 | 30.48 |
| 73 | 9.78 | 188.9 | 1.74 | 175.8 |
| 109 | 12.95 | 600.9 | 2.26 | 1203 |
| 146 | 14.9 | 668.8 | 2.26 | 2137 |



Archive of SID
www.SID.ir

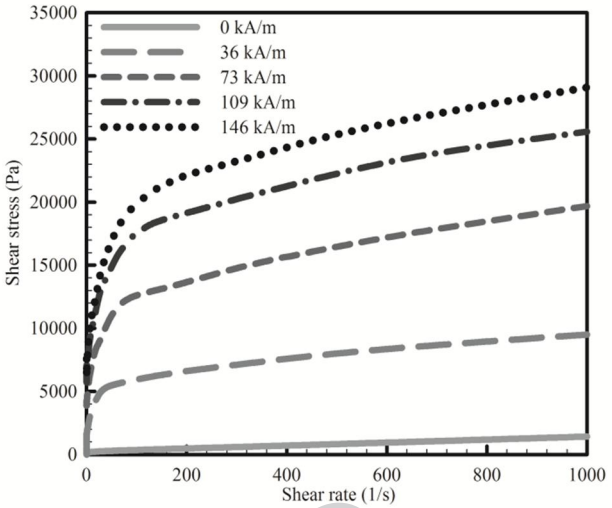


**Fig. 6** MR2 shear stress versus shear rate in various magnetic fields

**شکل 6** تنش برشی برحسب نرخ برش در میدان‌های مغناطیسی مختلف برای MR2

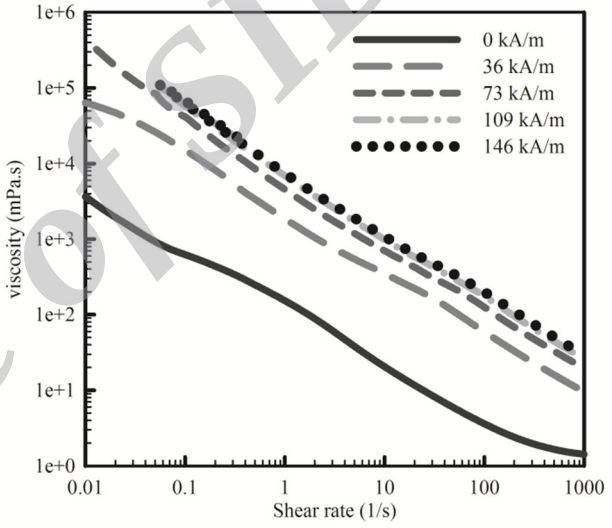


**Fig .7** MR2 viscosity versus shear rate in various magnetic fields

**شکل 7** لزجت برحسب نرخ برش در میدان‌های مغناطیسی مختلف برای MR2

جاذب‌های ارتعاشی خودرو معرفی شد. پایداری این سیال 91.8% پس از گذشت 196 ساعت است. همچنین به‌منظور بررسی تأثیر غلظت فاز پراکنده شونده و نوع سیال حامل روی لزجت بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال، آزمون لزجت‌سنجی روی برخی از نمونه‌ها انجام گردید. با ارزیابی رفتار رئولوژیکال سیال بهینه در مجموع می‌توان نتایج زیر را ارائه نمود:

- استفاده از روغن سیلیکون نسبت به روغن هیدرولیک به‌عنوان سیال حامل، پایداری بیشتری برای سیال ایجاد می‌کند. این امر می‌تواند به‌دلیل افزایش لزجت سیال مگنتورئولوژیکال به‌علت افزایش لزجت سیال حامل باشد.
- نحوه اختلاط تأثیر چشمگیری بر پایداری سیال دارد؛ به‌طوری‌که استفاده از همزن مکانیکی برای اختلاط اجزای سیال مگنتورئولوژیکال، نمونه سیال پایدارتری را ایجاد می‌کند.
- افزودن اسید استئاریک لزجت ابتدایی بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال را به‌شدت افزایش می‌دهد؛ اما پایداری و اثر مگنتورئولوژیکال قابل قبولی را به‌دست می‌دهد.
- به‌صورت کلی می‌توان گفت افزایش غلظت پودر آهن کربونیل سیال مگنتورئولوژیکال، لزجت بدون میدان و پایداری آن‌را افزایش می‌دهد؛ اما در لزجت‌های بالا از اثر آن کاسته می‌شود به‌طوری‌که در لزجت‌های بسیار بالا افزودن ذرات مغناطیسی تأثیری در پایداری ندارد.
- نحوه اختلاط بیشترین تأثیر را روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال دارد. پس‌ازآن نوع سیال حامل در درجه دوم اهمیت و تغییرات غلظت پودر آهن کربونیل نیز در مرتبه سوم اهمیت قرار دارد و در غلظت‌های پایین تأثیر بیشتری بر روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال دارد.
- پایداری سیال بهینه ارائه شده بیشتر از دو برابر پایداری بسیاری از سیالات مگنتورئوژیکال مرسوم است [17-15,11] .
- باوجود افزایش نسبی لزجت حالت بدون میدان MR2، این سیال مگنتورئولوژیکال تنش تسلیم قابل قبولی برابر با 15kPa در شدت میدان مغناطیسی 146kA/m در دمای 25°C از خود نشان می‌دهد.
- پس از اشباع مغناطیسی یا در میدان‌های نزدیک به آن، لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در دمای ثابت تنها تابعی از نرخ برش است و به میدان مغناطیسی بستگی ندارد.
- مقدار تنش تسلیم بیشینه و محدوده لزجت MR2، مناسب بودن آن‌را برای کاربرد در میراگرهای مغناطیسی سیستم تعلیق هوشمند تأیید می‌کند.

## 5- مراجع

[1] A. A. Alghamdi, R. Lostado, A. G. Olabi, *Magneto-Rheological Fluid Technology*, First Edition, pp. 43-62, Berlin: Springer, 2014.
[2] J. de Vicente, D. J. Klingenberg, R. Hidalgo-Alvarez, Magnetorheological fluids: a review, *Soft Matter*, Vol. 7, No. 8, pp. 3701-3710, 2011.
[3] D. J. Klingenberg, Magnetorheology: Applications and challenges, *American Institute of Chemical Engineers AIChE Journal*, Vol. 47, No. 2, pp. 246-249, 2001.
[4] D. Wang, W. H. Liao, Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling, *Smart materials and structures*, Vol. 20, No. 2, pp. 023001, 2011.
[5] R. Turczyn, M. Kciuk, Preparation and study of model magnetorheological fluids, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 131-134, 2008.
[6] M. Ashtiani, S. Hashemabadi, A. Ghaffari, A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 374, pp. 716-730, 2015.
[7] N. Rosenfeld, N. M. Wereley, R. Radkarishnan, T. S. Sudarshan, Behavior of magnetorheological fluids utilizing nanopowder iron, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 16, No. 17-18, pp. 2392-2398, 2002.
[8] A.-M. Trendler, H. Böse, Influence of particle size on the rheological properties of magnetorheological suspensions, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 19, No. 7-9, pp. 1416-1422, 2005.
[9] 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*, Vol. 17, No. 5, pp. 393-401, 2006.
[10] K. Shah, S.-B. Choi, The influence of particle size on the rheological properties of plate-like iron particle based magnetorheological fluids, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 1, pp. 15004-15011, 2015.
[11] S. H. Piao, W. L. Zhang, H. J. Choi, Magnetic carbonyl iron suspension with sepiolite additive and its magnetorheological property, *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-4, 2014.
[12] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Third Edition, pp.34-36, New York: Courier Corporation, 2013.
[13] Y. Rabbani, M. Ashtiani, S. H. Hashemabadi, An experimental study on the effects of temperature and magnetic field strength on the magnetorheological fluid stability and MR effect, *Soft matter*, Vol. 11, No. 22, pp. 4453-4460, 2015.
[14] H. Bose, J. Ehrlich, T. Gerlach, *MR Devices with Advanced Magnetic Circuits Magnetorheology: Advances and Applications*, Second Edition, pp. 229-260, Cambridge:The Royal Society of Chemistry, 2014.

Archive of SID



www.SID.ir

[15] K. Shah, M.-S. Seong, R. Upadhyay, S.-B. Choi, A low sedimentation magnetorheological fluid based on plate-like iron particles, and verification using a damper test, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 27001-27010, 2014.
[16] M. S. Mohammadi, *design and fabrication of smart damper with hydraulic oil based magnetorheological fluid*, MSc thesis Thesis, Mechanical engineering, Shahrood University of Technology Shahrood, 2014. (in Persian فارسی)
[17] J. Zhang, J.-q. Zhang, J.-f. Jia, Characteristic analysis of magnetorheological fluid based on different carriers, *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 15, pp. 252-255, 2008.
[18] J. Jiang, Y. Tian, D. Ren, Y. Meng, An experimental study on the normal stress of magnetorheological fluids, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 085012, 2011.

Archive of SID



www.SID.ir