





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی آزمایشگاهی پایداری سیالات مگنتورئولوژیکال مبتنی بر سورفکتانتها

نگارنده:

علیرضا باقری

اساتید راهنما:

دکتر علی خالقی

دکتر محمود نوروزی

استاد مشاور:

دکتر مجتبی قطعی

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۳۵/۲۹۸/۱۳۵
تاریخ: ۲۰/۷/۹۸

باسم تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علیرضا یاقری با شماره دانشجویی ۹۵۰۲۴۳۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی پایداری سیالات مگنتورئولوژیکیال مبتنی بر سورفکتانتها که در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه علمی خوب)			
نوع تحقیق: <input type="checkbox"/> نظری <input checked="" type="checkbox"/> عملی			
اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادهای اول	دکتر علی خالقی	استادبزرگ	
۲- استادهای دوم	دکتر محمود نوروزی	دانشیار	
۳- استاد مشاور	دکتر مجتبی نغمی	استادبزرگ	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی عباس نژاد	استادبزرگ	
۵- استاد محقق اول	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۶- استاد محقق دوم	دکتر محمدحسن کیهانی	استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمدحسن شاهپرستان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصوه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در منته محاز تخمین) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۳ ماه برگزار شود).

تقدیم به پدر و مادرم:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پر بار
و جودشان بیایم و از ریشه آن ها شاخ و برگ بگیرم و از سایه و جودشان در راه کسب علم و دانش
تلاش نمایم. والدینی که بودشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم،
چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند و دستم را گرفتند و راه رفتن را در این
وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانمی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را
معنا کردند....

بر خود واجب می‌دانم از اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر علی خالقی و جناب آقای دکتر محمود نوروزی که به عنوان اساتید راهنما در مراحل مختلف این پایان نامه، همواره با سه صدر و کشاده رویی در کنار من بودند و در طول مدت تحصیل از راهنمایی‌های اخلاقی و علمی آن‌ها بهره‌جسته‌ام تشکر و قدر دانی نمایم.

جناب آقای دکتر مجتبی قطعی به عنوان استاد مشاور مسئولیت سنگینی را قبول زحمت فرمودند و مطمئناً بدون حمایت‌ها، راهنمایی‌ها و روحیه بخش‌های ایشان، انجام بخش مهمی از این رساله میسر نمی‌شد. بدین وسیله از بزرگوارانی، حسن سلوک و حمایت بی‌دریغ ایشان تشکر کرده و برای ایشان طول عمر توأم با سربلندی را آرزو مندم.

تعهدنامه

این جانب **علیرضا باقری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی آزمایشگاهی پایداری سیالات مگنتورئولوژیکیال مبتنی بر سورفکتانت ها تحت راهنمایی دکتر علی خالقی-دکتر محمود نوروزی** متعهد می-شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج بانام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

سیالات MR یک نوع سوسپانسیون و یک دسته از مواد هوشمند می‌باشد که در حضور محرک خارجی، خصوصیات رئولوژیکی آن‌ها از جمله لزجت و تنش تسلیم، به سرعت و در کمتر از میلی‌ثانیه، تغییر می‌کند. مهم‌ترین ویژگی این سیالات تغییر فاز از حالت مایع به نیمه جامد است، که تنش تسلیم آن‌ها به سرعت با اعمال میدان مغناطیسی قابل کنترل است. اساساً سه مؤلفه در ترکیب یک سیال MR وجود دارد که عبارت‌اند از: ذرات فرو مغناطیسی، سیال حامل و مواد افزودنی پایدارکننده. رسوب‌گذاری ذرات معلق در سیالات MR، به علت اختلاف چگالی ذرات و سیال حامل به وجود می‌آید. در سیستم‌هایی همچون میراگرهای زلزله که در آن به ندرت سیستم فعال می‌گردد، به علت اینکه دوباره پراکنی این ذرات مشکل است، از انباشتگی آن‌ها می‌بایستی حدالمقدور پیشگیری نمود. تاکنون روش‌های بسیاری برای بهبود پایداری سیال MR ارائه شده است که غالب این نوع روش‌ها منجر به افزایش ویسکوزیته حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی می‌شود. در این تحقیق اثر تشکیل میسل‌های کرمی شکل (wormlike micelles) در سیال حامل برای بهبود پایداری سیال MR بررسی شده است. میسل‌ها گروهی از مواد فعال‌کننده سطحی متراکم هستند که در یک کلونید مایع پراکنده‌اند. در بسیاری از محلول‌های میسلار حاوی سیال پایه هیدروکربنی از لسیتین به عنوان سورفکتانت استفاده می‌شود. به منظور مقایسه سیال MR با محلول پایه حاوی میسل‌های کرمی شکل، دو غلظت دیگر از محلول میسلار، یکی بالاتر از غلظت میسل‌های کرمی شکل و دیگری پایین‌تر از آن ساخته شده است. پس از تهیه محلول پایه برای ساخت سیال MR پودر آهن با درصد وزنی ۶۵٪ به محلول اضافه شد. مقدار ویسکوزیته سیال MR هدف در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی ۲۵۴ پاسکال ثانیه می‌باشد که نسبت به سایر مطالعات در محدوده مناسبی قرار دارد. یکی از مدل‌های متداول که قادر به پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی سیال MR است مدل هرشل-بالکلی می‌باشد. با توجه به این مدل، تنش تسلیم در میدان مغناطیسی $H=91 (kA/m)$ برای سیال MR هدف ۴۳۱۹,۷۶ پاسکال است. نمونه‌های سیال MR به مدت یک ماه به منظور قیاس پایداری آن‌ها، اندازه‌گیری شد. میزان ته‌نشینی سیال MR-W که سیال

هدف می‌باشد تقریباً با سیال MR-H که حاوی محلول پایه با بیشترین غلظت می‌باشد، برابر است. این نوع رفتار نشان‌دهنده اثر شبکه میسل‌های کرمی شکل است که موجب بهبود پایداری ذرات شده است. مقدار ته‌نشینی سیال‌های MR-W و MR-H پس از یک ماه به ترتیب، ۱۸,۲ و ۱۷,۸ درصد می‌باشد. قابلیت‌های ویژه سیال MR در این مطالعه، قابلیت سهولت پراکندگی دوباره در سیال حامل پس از مدت طولانی می‌باشد.

کلید واژگان: پایداری سیال مگنتورئولوژیکال، مدل ماکسول، میسل‌های کرمی شکل، تنش تسلیم،

لسیتین

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- مواد هوشمند.....	۲
۳-۱- معرفی سیال MR.....	۳
۴-۱- تاریخچه سیال MR.....	۴
۵-۱- اجزای تشکیل دهنده‌ی سیال MR.....	۵
۱-۵-۱- ذرات مغناطیسی.....	۶
۲-۵-۱- سیال حامل.....	۷
۳-۵-۱- افزودنی‌ها.....	۷
۶-۱- رفتار سیالات و عملگرهای مگنتورئولوژیکال.....	۸
۷-۱- مدل بیهنگام.....	۱۱
۸-۱- کاربرد سیال MR در حالت‌های مختلف.....	۱۲
۹-۱- خواص سیالات MR تجاری.....	۱۳
۱-۹-۱- خواص رئولوژیکی.....	۱۴
۲-۹-۱- ویژگی‌های مغناطیسی.....	۱۷
۳-۹-۱- رطوبت، ویژگی‌های ته نشینی، سازگاری مواد.....	۱۹
۴-۹-۱- بیان عددی از عملکرد سیال.....	۲۱
۱۰-۱- لزجت سیال MR در نبود میدان مغناطیسی.....	۲۴
۱۱-۱- تنش برشی تسلیم سیال MR.....	۲۴
۱۲-۱- دستگاه‌ها و دمپرهای ساخته شده با فناوری MR.....	۲۷
۱-۱۲-۱- کاربرد سیال MR در دمپرها و جاذبه‌های ارتعاشات در خودرو.....	۲۸
۲-۱۲-۱- دمپر MR در کاربرد‌های سازه‌ای.....	۳۰
۲- فصل دوم: مطالعات پیشین مربوط به بهبود پایداری سیال MR.....	۳۵

۳۶	۱-۲- مقدمه.....
۳۶	۲-۲- روش‌های استفاده‌شده برای بهبود پایداری سیال MR.....
۳۶	۱-۲-۲- استفاده از کربن نانو لوله ای تک جهت.....
۳۷	۲-۲-۲- استفاده از گریس.....
۳۸	۳-۲-۲- بررسی اثر ذرات مغناطیسی غیر هم شکل.....
۴۱	۴-۲-۲- سیال MR حاوی نانوسیم‌های آهنی و ذرات کروی.....
۴۴	۵-۲-۲- پوشش دهی ذرات مغناطیسی.....
۴۶	۶-۲-۲- استفاده از مایعات یونی به‌عنوان سیال حامل.....
۴۸	۷-۲-۲- استفاده از یک نوع ترکیب پلیمری.....
۵۰	۸-۲-۲- استفاده از کربن نانو لوله ای چند جهت و افزودنی سیلیکا.....
۵۴	۳-۲- معرفی تحقیق حاضر.....
۵۷	۳- فصل سوم: روش ساخت سیال MR.....
۵۸	۱-۳- مقدمه.....
۵۸	۲-۳- ویسکوالاستیک.....
۵۹	۳-۳- مدل‌های مکانیکی برای تشریح ویسکوالاستیسیته.....
۶۰	۱-۳-۳- مدل ماکسول.....
۶۱	۲-۳-۳- مدل کلونین.....
۶۴	۴-۳- تست مکانیکی دینامیک (پویا) (DMA).....
۶۴	۱-۴-۳- Relaxation time.....
۶۴	۲-۴-۳- مدول ذخیره‌سازی یا الاستیک و مدول اتلاف یا ویسکوز.....
۶۵	۳-۴-۳- ویسکوزیته مختلط.....
۶۵	۴-۴-۳- دمپینگ یا اتلاف.....
۶۶	۵-۳- هندسه‌های آزمایش.....
۶۶	۶-۳- موده‌های تست و نتایج.....
۶۹	۷-۳- سورفکتانت‌ها.....

۸-۳-۸- میسل‌ها (micelles) و میسل‌های کرمی شکل (wormlike micelles) ۷۰

۹-۳-۹- روش ساخت سیال MR ۷۴

۴- فصل چهارم: بررسی نتایج، بحث و نتیجه-

گیری ۷۷

۱-۴-۱- مقدمه ۷۸

۲-۴-۲- غلظت محلول‌های پایه بررسی شده ۷۸

۳-۴-۳- روش تشخیص میسل‌های کرمی شکل در محلول پایه با استفاده از تست رئومتری ۸۰

۱-۳-۴- استفاده از اطاعات مربوط به نمودار ویسکوزیته و ویسکوزیته برش صفر محلول پایه ۸۰

۲-۳-۴- استفاده از اطاعات مربوط به نمودار تنش و تنش تسلیم محلول پایه ۸۲

۳-۳-۴- استفاده از نتایج حاصل از نمودارهای G' و G'' برحسب فرکانس ۸۴

۴-۴-۴- نتایج حاصل از تست رئومتری سیال MR ۹۳

۱-۴-۴- ویسکوزیته سیال MR در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی ۹۳

۲-۴-۴- نتایج منحنی‌های G' و G'' برحسب فرکانس تحت میدان مغناطیسی ۹۵

۳-۴-۴- مقادیر تنش تسلیم سیال MR ۹۷

۴-۴-۴- نتایج آزمون پایداری نمونه‌ها ۱۰۲

۵-۴-۵- نتیجه گیری ۱۰۴

۶-۴-۶- پیشنهاد برای کارهای آینده ۱۰۴

۵- مراجع ۱۰۶

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱: مشخصات مهم سیالات MR و ER ۵
- جدول ۱-۲: ترکیب اصلی و چگالی چهار سیال تجاری (MR (Lord,1998) ۱۴
- جدول ۱-۳: میانگین ضریب اصطکاک کشویی برای سطوح مشترک روان کاری شده سیال MR ۲۰
- جدول ۱-۴: نرخ ته‌نشینی اولیه ۲۱
- جدول ۲-۱: ترکیبات نمونه‌های سیال MR با نسبت وزنی مختلف نانوسیم‌های آهنی ۴۲
- جدول ۴-۱: غلظت نمونه‌های ساخته شده از محلول پایه ۷۸
- جدول ۴-۲: مقادیر ضریب مدل هرشل-بالکی و شاخص نیرو تحت میدان‌های مختلف مغناطیسی ۹۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تصویر میکروسکوپی از پودر کربونیل آهن (الف) شکل کروی ذرات (ب) ساختار پوست پیازی ذرات ۶
- شکل ۲-۱: هم‌ترازی دو قطبی ذرات مغناطیسی [۷] ۸
- شکل ۳-۱: رشته‌ها و دانه‌های تمثیلی سیال MR فعال [۸] ۹
- شکل ۴-۱: آرایش ذرات در میدان مغناطیس در چهار وضعیت بارگذاری متفاوت [۹] ۱۰
- شکل ۵-۱: منحنی مدل بینگهام تنش برشی برحسب نرخ برشی ۱۲
- شکل ۶-۱: حالت‌های اصلی کارکرد دستگاه‌های سیال قابل کنترل ۱۲
- شکل ۷-۱: تنش برشی سیال به‌عنوان یک تابع از مقدار شار مغناطیسی در حداکثر نرخ برش ۲۶ (1/s) ۱۶
- شکل ۸-۱: ویسکوزیته به‌عنوان یک تابع از نرخ برش در دمای ۲۵ درجه برای سیالات MR تجاری ۱۶
- شکل ۹-۱: مقدار شار در سیالات MR به‌عنوان یک تابع از میدان اعمال‌شده ۱۸
- شکل ۱۰-۱: نیروی F_1 به‌عنوان یک تابع از نرخ برش در دمای ۲۵ درجه و ۱ تسلا برای سیالات MR تجاری .. ۲۲
- شکل ۱۱-۱: ن نیروی F_2 به‌عنوان یک تابع از نرخ برش در دمای ۲۵ درجه و ۱ تسلا برای سیالات MR تجاری ۲۳
- شکل ۱۲-۱: نیروی F_3 به‌عنوان یک تابع از مقدار شار در دمای ۲۵ درجه برای سیالات MR تجاری ۲۳
- شکل ۱۳-۱: الف) ماکزیمم تنش تسلیم در برابر درصد حجمی ذرات (تحت چگالی شار مغناطیسی ۹ تسلا) (ب) لزجت در برابر درصد حجمی ذرات [۲۰] ۲۵
- شکل ۱۴-۱: ماکزیمم تنش تسلیم برحسب لزجت برای فرمولاسیون دو گروهی مختلف (درصد وزنی ثابت کل ذرات ۲۶ (/۵۵)
- شکل ۱۵-۱: ماکزیمم تنش تسلیم برحسب میدان مغناطیسی (ϕ_w درصد وزنی ذرات است) [۲۳] ۲۶
- شکل ۱۶-۱: از فناوری‌های QED، ماشین پرداختکاری مگنتورئولوژیکال Q22 [۲۴] ۲۸
- شکل ۱۷-۱: توصیف فرآیند پولیش کاری با فناوری MRF [۲۴] ۲۸
- شکل ۱۸-۱: نمونه‌ای از دمپر MR ۲۹
- شکل ۱۹-۱: (a) شماتیک دمپر MR با ظرفیت ۲۰ تن (b) نمونه آزمایشگاهی [۳۰] ۳۰
- شکل ۲۰-۱: دمپرهای MR پل Dongting در چین ۳۱
- شکل ۲۱-۱: پای مصنوعی بیدرمن [۷] ۳۱
- شکل ۲۲-۱: نمونه‌ای از پروتز زانو ساخته شده توسط بیدرمن [۳۳] ۳۲
- شکل ۲-۱: (a) تصویر SEM مربوط به اثر SWNTها (b) اطلاعات مربوط به SWNT خالص و غیر خالص ۳۷
- شکل ۲-۲: میزان ته‌نشینی ذرات برحسب زمان برای کربنیل آهن و برای کربنیل آهن و SWNT ۳۷
- شکل ۳-۲: نرخ ته‌نشینی سیالات MR همراه با افزودنی و بدون آن ۳۸

- شکل ۲-۴: تصویر SEM ذرات غیر هم‌شکل ۳۹
- شکل ۲-۵: الگوی انعکاس دهنده اشعه ایکس ذرات غیر هم‌شکل ۴۰
- شکل ۲-۶: وابستگی مغناطیسی و نفوذ پذیری میدان مغناطیسی بر روی ذرات کربونیل و ذرات غیر هم‌شکل ۴۰
- شکل ۲-۷: نرخ ته‌نشینی بر حسب زمان سیال CMRF و AMRF ۴۱
- شکل ۲-۸: تنش برشی به‌عنوان تابعی از میدان مغناطیسی برای سیال MR حاوی نرخ وزنی مختلف از نانوسیم‌ها ۴۲
- شکل ۲-۹: تنش تسلیم دینامیکی به‌عنوان تابعی از میدان مغناطیسی برای سیال MR حاوی نرخ‌های وزنی مختلف از نانوسیم‌ها ۴۳
- شکل ۲-۱۰: درصد ته‌نشینی به‌عنوان تابعی از زمان برای سیال MR حاوی نرخ‌های وزنی مختلف از نانوسیم‌ها ۴۳
- شکل ۲-۱۱: منحنی مغناطیسی ذرات کربونیل بدون پوشش و ذرات پوشش داده‌شده ۴۴
- شکل ۲-۱۲: ته‌نشینی سوسپانسیون حاوی ۴۰ درصد وزنی از ذرات بدون پوشش در روغن سیلیکون در دمای اتاق ۴۵
- شکل ۲-۱۳: وابستگی نیروی نفوذ در برابر عمق برای سوسپانسیون‌های حاوی ۴۰٪ وزنی از ذرات کربونیل بدون پوشش و پوشش دار در روغن سیلیکون و دمای اتاق ۴۶
- شکل ۲-۱۴: (A,B) اندازه‌گیری ته‌نشینی سیالات MR ، به ترتیب سیال MR با نرخ‌های ته‌نشینی پایین و سیال MR با نرخ‌های ته‌نشینی بالا ۴۸
- شکل ۲-۱۵: (a) تنش برشی به‌عنوان تابعی از نرخ برش (b) ویسکوزیته برشی به‌عنوان یک تابع از نرخ برش برای سیال ویسکوالاستیک MR مبتنی بر CI-PIB / PB و سیال MR مبتنی بر روغن و ذرات کربونیل تحت نیروهای مختلف میدان مغناطیسی ۴۹
- شکل ۲-۱۶: تصویر ذرات کربونیل پراکنده شده در PIB/PB : قبل (a) و بعد از یک ماه (b) ۵۰
- شکل ۲-۱۷: منحنی تنش برشی CI-MWCNT ها مبتنی بر روغن سیلیکون 10 cP (یا 100 cP) با سیلیکا فومی ۱ ، ۲ ، و ۳ درصد وزنی، و (b) سیال MR تجاری ۵۲
- شکل ۲-۱۸: شدت انرژی لیزر به‌عنوان تابعی از زمان برای پودر کربونیل خالص ، CI-MWCNT ها و CI-MWCNT ها با ۳ درصد وزنی سیلیکا فومی بر پایه روغن سیلیکون ۱۰ cP ، (b) زمان بین ۰ تا ۱۰ دقیقه ، و (c) تصویر نمونه‌های حقیقی ۵۴
- شکل ۲-۱۹: (a) شدت انرژی لیزر به‌عنوان تابعی از زمان برای پودر کربونیل خالص ، CI-MWCNT ها و CI-MWCNT ها با ۳ درصد وزنی سیلیکا فومی بر پایه روغن سیلیکون ۱۰۰ cP ، (b) زمان بین ۰ تا ۱۰ دقیقه ، و (c) تصویر نمونه‌های حقیقی ۵۴
- شکل ۳-۱: مدل دمپر سیال کاملاً لزج و مدل فنر یک بدنه الاستیک ایده‌آل را توصیف می‌کند ۵۹
- شکل ۳-۲: مدل ماکسول متشکل از فنر و دمپر به‌صورت سری ۶۱
- شکل ۳-۳: مدل کلوین متشکل از فنر و دمپر به‌صورت موازی ۶۱
- شکل ۳-۴: سیگنال‌های تنش و کرنش در طول یک آزمایش نوسانی ۶۲

- شکل ۳-۵: وابستگی فرکانس روغن سیلیکون با لزجت بالا..... ۶۴
- شکل ۳-۶: دامنه کرنش پلی پروپیلن مایع..... ۶۶
- شکل ۳-۷: پاسخ فرکانس نوعی ژل در محدوده خطی..... ۶۷
- شکل ۳-۸: رفتار ذوب شدن شکلات با انواع مختلف چربی..... ۶۸
- شکل ۳-۹: منحنی ویسکوزیته دو ترکیب قالب گیری تزییقی..... ۶۸
- شکل ۳-۱۰: (A) شکل ساختمان میسل های کرمی را نشان می دهد (B) طیف تکامل ساختاری برای میسل های کرمی شکل (wormlike micelles) پس از تغییر در انرژی انتهایی راس (ϵ_e) و انرژی شاخه ای (ϵ_j)..... ۷۳
- شکل ۴-۱: ویسکوزیته محلول های C16، C17 و C18 بر حسب نرخ برش..... ۸۱
- شکل ۴-۲: مقادیر ویسکوزیته برش صفر بر حسب غلظت آب برای محلول های C16، C17 و C18..... ۸۲
- شکل ۴-۳: مقادیر تنش بر حسب نرخ برش برای محلول های C16، C17 و C18..... ۸۳
- شکل ۴-۴: مقادیر تنش تسلیم بر حسب غلظت آب برای محلول های C16، C17 و C18..... ۸۴
- شکل ۴-۵: نمایی شماتیک از پاسخ نوسانی مدل رایج ماکسول..... ۸۵
- شکل ۴-۶: تست محدوده ویسکو الاستیک خطی..... ۸۶
- شکل ۴-۷: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C3..... ۸۷
- شکل ۴-۸: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C11..... ۸۷
- شکل ۴-۹: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C2..... ۸۸
- شکل ۴-۱۰: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C12..... ۸۹
- شکل ۴-۱۱: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C4..... ۹۰
- شکل ۴-۱۲: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C13..... ۹۰
- شکل ۴-۱۳: برازش منحنی نتایج تست محلول C17 با مدل ماکسول..... ۹۱
- شکل ۴-۱۴: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C16..... ۹۲
- شکل ۴-۱۵: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C18..... ۹۳
- شکل ۴-۱۶: ویسکوزیته سیال MR تابعی از نرخ برش در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی..... ۹۴
- شکل ۴-۱۷: نتایج ویسکوزیته در حالت بدون میدان برای نمونه های سیال MR در مطالعه آقای آشتیانی و همکاران..... ۹۵
- شکل ۴-۱۸: منحنی های G' و G'' بر حسب فرکانس تحت میدان مغناطیسی ۷۶ (kA/m) برای سیال های الف) (MR-L ، ب) MR-W و ج) MR-H..... ۹۷
- شکل ۴-۱۹: مقادیر تنش بر حسب نرخ برش سیال MR برای الف) H=0 ب) H=42 ج) H=76 د) H=91 (kA/m)..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۰: مقادیر تنش تسلیم بر حسب میدان مغناطیسی..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۱: نتایج آزمون پایداری نمونه ها بر حسب ساعت در طول یک ماه..... ۱۰۳

فہرست علامت

علامت لاتین

$A(m^2)$	مساحت
n	شاخص نیرو
c	تابع پروفیل سرعت جریان
$F(N)$	نیرو
$L(m)$	طول کانال
K	ضریب ہرشل-بالکی
$P(N/m^2)$	فشار
$G''(Pa)$	مدول ویسکوز
$G'(Pa)$	مدول الاستیک
$A(m^2)$	مساحت

$\mu_0(T - m/A)$	نفوذپذیری خلأ
$t(s)$	زمان
$Q(m^3/s)$	نرخ حجمی جریان
$B(\text{Tesla})$	چگالی شار مغناطیسی
$s(m/s)$	سرعت جزء (صفحه)
$g(m)$	فاصله کانال
$V(m^3)$	حجم
$W(m)$	عرض کانال
$H(kA/m)$	میدان مغناطیسی
D_e	عدد دبرا

• علائم یونانی

$\dot{\gamma}(1/s)$	نرخ برش
$\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$	ویسکوزیته
$\tau(\text{Pa})$	تنش
$\tau_y(\text{Pa})$	تنش تسلیم
$\eta(\text{Pa}\cdot\text{s})$	لزجت سینماتیکی
$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	چگالی
λ	زمان بازگشت سیستم به تعادل
$\omega(\text{Hz})$	فرکانس

غلظت مونومر

ϕ

۱- فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی مواد هوشمند، مرور مبانی و ویژگی‌های سیال مگنتورئولوژیکال^۱ از ابعاد مختلف و کاربرد این نوع سیال پرداخته می‌شود. در ادامه برای سادگی، سیال مگنتورئولوژیکال به اختصار سیال MR نامیده می‌شود. در ادامه‌ی فصل مشکلات کاربرد سیال MR بیان می‌شود. در انتهای فصل نیز اهداف، رویکردها و رئوس مطالب این پژوهش آورده شده است.

۱-۲- مواد هوشمند

علم و تکنولوژی پیشرفت‌های شگفت‌انگیزی در طراحی الکترونیک و ماشین‌آلات با استفاده از مواد استاندارد که ویژگی خاصی ندارند کرده است (به‌عنوان مثال فولاد، آلومینیوم، طلا). تصور کنید طیف وسیعی از ویژگی‌های عملکردی برای مواد ویژه‌ای وجود دارد که دانشمندان می‌توانند خواص آن‌ها را دست‌کاری کنند. بعضی از این مواد توانایی تغییر شکل یا اندازه را به‌سادگی با اضافه کردن کمی گرما و یا تغییر سریع یک مایع به شبه جامد بلافاصله پس از نزدیکی یک آهن‌ربا را دارند؛ این مواد، مواد هوشمند نامیده می‌شوند.

مواد هوشمند دارای یک یا چند ویژگی هستند که به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کنند. بیشتر مواد روزمره دارای خواص فیزیکی هستند که قابل‌تغییر نیستند. برای مثال اگر روغن گرم شود کمی نازک‌تر می‌شود، درحالی‌که یک ماده هوشمند با ویسکوزیته متغیر ممکن است از یک مایع که به‌راحتی جاری می‌شود به جامد تبدیل شود. در حال حاضر یک طیف از مواد هوشمند وجود دارد و به‌طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته است. این مواد شامل مواد پیزوالکتریک^۲، مواد مگنتواستاتیک^۳، مواد الکترواستاتیک^۴ و آلیاژهای شکل‌پذیر با حافظه است.

¹ Magnetorheological fluid

² Piezoelectric

³ Magnetostatic

⁴ Electrostatic

۱-۳- معرفی سیال MR

به مخلوط غیرهمگنی که از پخش شدن ذرات جامد در مایع (یا مایع در گاز) به وجود می‌آید سوسپانسیون^۱ می‌گویند، مانند خاکشیر در آب. سوسپانسیون‌ها در حال عادی ناپایدار هستند و پس از مدتی نگهداری در حالت سکون، کلوئیدها لخته شده (coagulate) و ته‌نشین می‌شوند در اثر این پدیده فاز مایع از جامد جدا می‌شود.

سیالات MR یک نوع سوسپانسیون و یک کلاس از مواد هوشمند می‌باشد که در حضور محرک خارجی، خصوصیات رئولوژیکی آن‌ها از جمله لزجت و تنش تسلیم، به سرعت و در کمتر از میلی‌ثانیه، تغییر می‌کند. این سیالات به دودسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱- حساس به میدان الکتریکی (سیالات الکترورئولوژیکال^۲ ERF) - ۲- حساس به میدان مغناطیسی (سیالات مگنئورئولوژیکال^۳ MRF)

مهم‌ترین ویژگی این نوع از سیالات تغییر فاز از حالت مایع به نیمه جامد است، که تنش تسلیم آن‌ها به سرعت با اعمال میدان الکتریکی و یا مغناطیسی قابل کنترل است. این سیالات در حضور میدان رفتار ویسکوالاستیک^۳ از خود نشان می‌دهند درحالی‌که در غیاب آن عمدتاً رفتاری نیوتنی دارند. هنگامی که میدان الکتریکی یا مغناطیسی خارجی اعمال می‌شود ذرات جامد دوقطبی شده و برای کاهش سطح انرژی در جهت میدان خارجی قرار می‌گیرند و مجموعه‌هایی زنجیروار با سطح انرژی پایین را تشکیل می‌دهند. از آنجاکه میدان اعمال شده عمود بر جهت جریان است، این زنجیره‌ها نیز عمود بر جریان واقع شده و مانع حرکت سیال می‌شوند. این فرآیند باعث تغییر در الگوی حرکت سیال، ایجاد تنش تسلیم و در نهایت تغییر خواص رئولوژیکی سیال می‌شود. انرژی مکانیکی موردنیاز برای از بین بردن آرایش این زنجیره‌ها با افزایش میدان خارجی، تا حالت اشباع، افزایش می‌یابد. این کنترل‌پذیری خواص مکانیکی و سرعت بالای پاسخگویی سیالات MR و ER آن‌ها را به موادی مناسب برای ارتباط

¹ suspension

² Electrorheological fluid

³ Viscoelastic

بین سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی مبدل کرده است.

۱-۴- تاریخچه سیال MR

سابقه کشف سیال مگنتورئولوژیکال (MRF) و مطالعه ویژگی‌های رفتاری آن در حضور میدان مغناطیسی به دهه‌ها پیش برمی‌گردد. با این وجود موضوع کاربرد آن در ایجاد فناوری‌های جدید همچنان ادامه دارد. این سیال توسط ژاکوب رابینوو برای اولین بار در ایالات متحده در سال ۱۹۴۰ کشف شد [۱]. به جز مواردی که پس از کشف اولیه مورد توجه قرار گرفته است، اطلاعات مبهمی درباره مایعات MR منتشر شد. در همان زمان ویسلو نیز ترکیب مشابهی را یافت که اگر در یک میدان الکتریکی قرار می‌گرفت لزجتش تغییر می‌یافت. از این رو آن را سیال الکتروئولوژیکال نام‌گذاری نمودند. هر چند که منبع تحریک هر دو گونه سیال نامبرده متفاوت می‌باشد، ولیکن رفتار مکانیکی آن‌ها مشابه است و دامنه کاربرد وسیعی برای آن‌ها در توسعه ابزارها و تجهیزات کنترلی جدید می‌توان متصور شد. برای چند سال اول، موج علاقه به سیالات MR وجود داشت ولی این علاقه به علت عدم کنترل میدان مغناطیسی مؤثر بر آن سست شد. اما امروزه با استفاده از پردازنده سیگنال دیجیتال و کامپیوترهای سریع میدان مغناطیسی مؤثر بر مایع کنترل می‌شود. در اوایل سال ۱۹۹۰ تجدید حیات در تحقیقات سیال MR به وجود آمد که عمدتاً به دلیل وجود شرکت تحقیقات و توسعه لرد بوده است.

از بزرگ‌ترین مزیت‌های بارز سیالات MR بر نوع ER می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- سیال ER مستلزم اعمال جریان برق با ولتاژ بسیار بالا می‌باشد حال آنکه در مورد سیال MR، به‌طور معمول مستلزم اعمال ولتاژی بین ۳ تا ۳۲ ولت و جریانی در حد چند آمپر می‌باشد.
- سیالات MR بین ۲۰ تا ۵۰ بار کنترل‌پذیرتر از سیالات ER معادل آن رادارند. به عبارت دیگر با اعمال تغییرات اندکی در ولتاژ برق اعمال‌شده، سیالات MR نسبت به سیالات ER بیشتر تأثیر می‌پذیرند.
- سیال MR در برابر ذرات پایدار بهتری نسبت به سیال ER دارد.

همه این ویژگی‌های سیال MR موجب شده است که بیشتر مورد توجه قرار گیرد و در نهایت محصولات

بیشتری بر اساس تکنولوژی سیال MR در چند سال اخیر ارائه شده است. جدول ۱-۱ یک نمای کلی از تمایزهای کلیدی ویژگی‌های رفتاری سیالات ER و MR را نشان می‌دهد [۲].

جدول ۱-۱ مشخصات مهم سیالات MR و ER

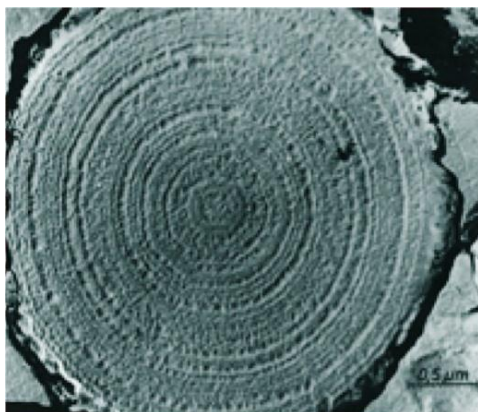
ERF	MRF	ویژگی‌ها
2-5 kPa	50-100kPa	ماکسیمم تنش برش
0.1-1.0 Pa s	0.1-1.0 Pa s	ویسکوزیته
10-90(ionic DC)-25-+125(nonionic AC)	-40 - + 150	رنج دمایی
عدم تحمل ناخالصی‌ها	غیر متأثر از اکثر ناخالصی‌ها	پایداری
کمتر از چند میلی ثانیه	کمتر از چند میلی ثانیه	زمان پاسخگویی
1-2 g/cm ³	3-4 g/cm ³	چگالی
0.001J/cm ³	0.1 J/cm ³	ماکسیمم چگالی انرژی
2-25kV @ 1-10mA(2-50W)	2-25V @ 1-2A(2-50W)	منبع تغذیه

۱-۵- اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سیال MR

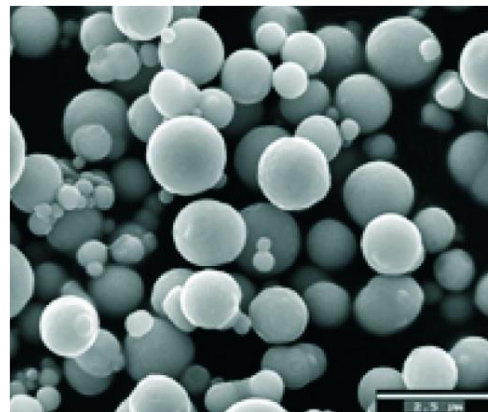
اساساً سه مؤلفه در ترکیب یک سیال MR وجود دارد که عبارت‌اند از: ذرات فرو مغناطیسی، سیال حامل و مواد افزودنی پایدارکننده.

۱-۵-۱- ذرات مغناطیسی

ماکزیمم نیروی جاذبه بین ذرات و بنابراین ماکزیمم تنش تسلیم سیال با مربع اشباع مغناطیسی (J_s) ذرات افزایش می‌یابد. با توجه به اشباع مغناطیسی بالای کربنیل آهن، پرکاربردترین ماده مورد استفاده به عنوان ذرات مغناطیسی می‌باشد [۳،۴]. کربونیل آهن از طریق جداسازی حرارتی پنتاکربنیل ($FeCo_5$) به ذرات کروی در حدود $1-10 \mu m$ تبدیل می‌شود. اثر شکل کروی آن، به جهت اینکه از ساینده‌گی ذرات می‌کاهد و ابعاد آن‌ها را بادوام‌تر می‌سازد، از پارامترهای مورد توجه می‌باشد. این ذرات، از طریق ساختار پوست‌پیزی شکل مقطع آن و محتوای آهن بالای ۹۷٫۸٪ شناسایی می‌شوند. پودر آهن که با تکنیک‌های گوناگونی تولید می‌شود و به مراتب ارزان‌تر از کربوبیل آهن به دست می‌آید نیز قابلیت استفاده در سیالات MR را دارد. این نکته لازم به ذکر است که ذرات پودر آهن با داشتن ابعادی در حدود $10-100 \mu m$ ، اندازه بزرگ‌تری از کربونیل‌ها دارند و همچنین این ذرات دارای شکل‌های نامنظم و غیر کروی می‌باشند که با تشدید ساینده‌گی ذرات و مجموعه‌هایی که با آن‌ها در تماس می‌باشند، بر مقدار مقاومت و دوام ذرات پودر اثر نامطلوب می‌گذارد. البته ثابت شده است که وجود ذرات با اشکال نامنظم منجر به لزجت بیشتری نسبت به ذرات کروی با همان نسبت حجمی در سیال می‌شوند [۵].



(ب)



(الف)

شکل ۱-۱: تصویر میکروسکوپی از پودر کربونیل آهن (الف) شکل کروی ذرات (ب) ساختار پوست‌پیزی ذرات [۴۸]

۱-۵-۲- سیال حامل

سیالات حامل بر اساس پایداری دمایی، لزجت ذاتی، سازگاری با دیگر مواد ترکیب یافته و همچنین جنس تجهیزات حاوی سیال MR انتخاب می‌شوند. به علت روان کاری خوب، ماندگاری و ترکیب با محدوده وسیعی از افزودنی‌ها، معمول‌ترین سیال حامل مورد استفاده روغن‌های هیدروکربنی می‌باشند، که می‌توانند به روغن‌های معدنی، روغن‌های سنتز شده و یا ترکیبی از هر دو دسته‌بندی شوند. روغن‌های سیلیکونی که از دسته روغن‌های معدنی می‌باشند، می‌توانند به منظور دستیابی به محدوده وسیع‌تری از دمای کاری و سازگاری با دیگر اجزاء سیستم، مورد استفاده قرار گیرند. در سال ۱۹۹۸، جولی و همکارانش [۱] با انجام یک مطالعه جامع محدوده دمای کاری انواع سیالات MR و همچنین سازگاری آن با مواد متشکله سایر تجهیزات مربوطه را بررسی نمودند.

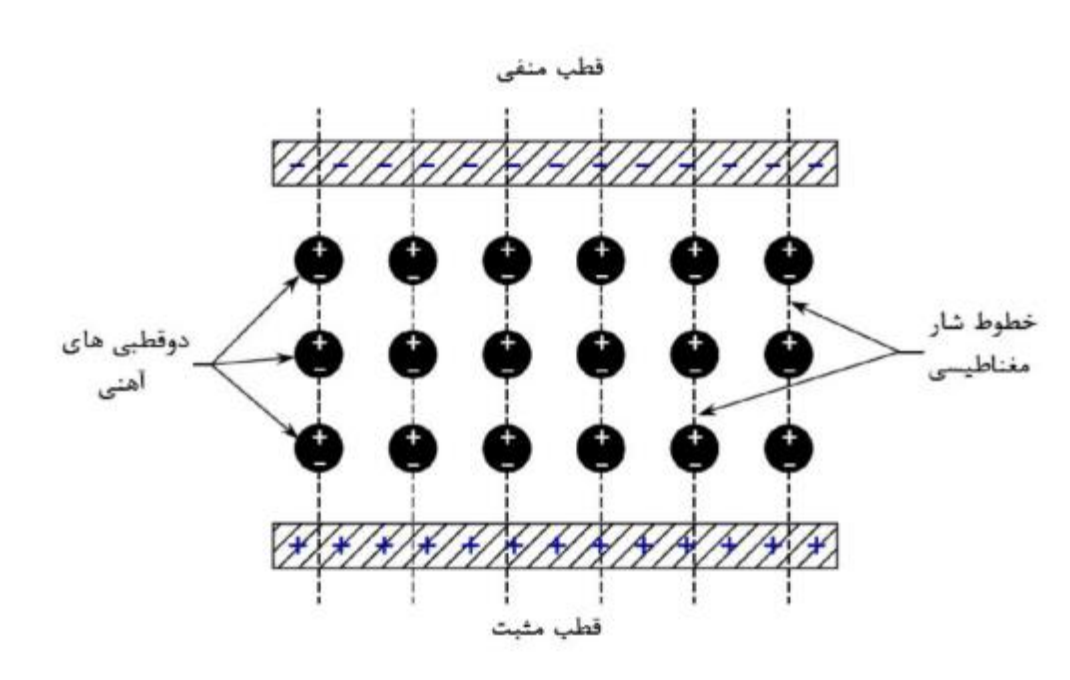
۱-۵-۳- افزودنی‌ها

انواع مختلفی از افزودنی‌ها، غالباً اختصاصی، برای سیالات MR مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از آن‌ها اهداف مختلفی از قبیل جلوگیری از ته‌نشینی و انباشتگی ذرات در سیال حامل، کاهش میزان سایش میان ذرات و همچنین جلوگیری از اکسیداسیون و از بین رفتن ذرات را دنبال می‌کنند. در این میان مهم‌ترین ویژگی مورد تقاضا از این افزودنی‌ها تقویت پایداری و دوام کارکردی سیال MR می‌باشد. تحقق این خواسته خود نقش بسزایی در گسترش دامنه کاربرد سیالات MR در صنعت دارد. از این‌رو در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری بر روی توسعه افزودنی‌های جدید باهدف بهبود کیفیت سیال MR انجام شده است [۵، ۶]. ته‌نشینی ذرات معلق در سیالات MR به علت اختلاف چگالی ذرات و سیال حامل به وجود می‌آید. این پدیده ممکن است با انباشتگی ذرات همراه باشد، بدین معنی که ذرات در غیاب میدان مغناطیسی به یکدیگر بچسبند (این اثر می‌تواند در اثر وجود پسماند مغناطیسی در ذرات تشدید گردد). هرچند ته‌نشینی کم ذرات در سیستم‌هایی که در آن‌ها سیال به‌طور طبیعی در طی فرآیند عملکردی مخلوط می‌شود، مثل کلاچ‌ها، میراگرها و جاذب‌های ضربه مورد بحث نیست، اما در سیستم‌هایی همچون میراگرهای زلزله که در آن به‌ندرت سیستم فعال می‌گردد، به علت اینکه دوباره

پراکنی این ذرات مشکل است، از انباشتگی آن‌ها می‌بایستی حدالمقدور پیشگیری نمود.

۱-۶- رفتار سیالات و عملگرهای مگنتورئولوژیکال

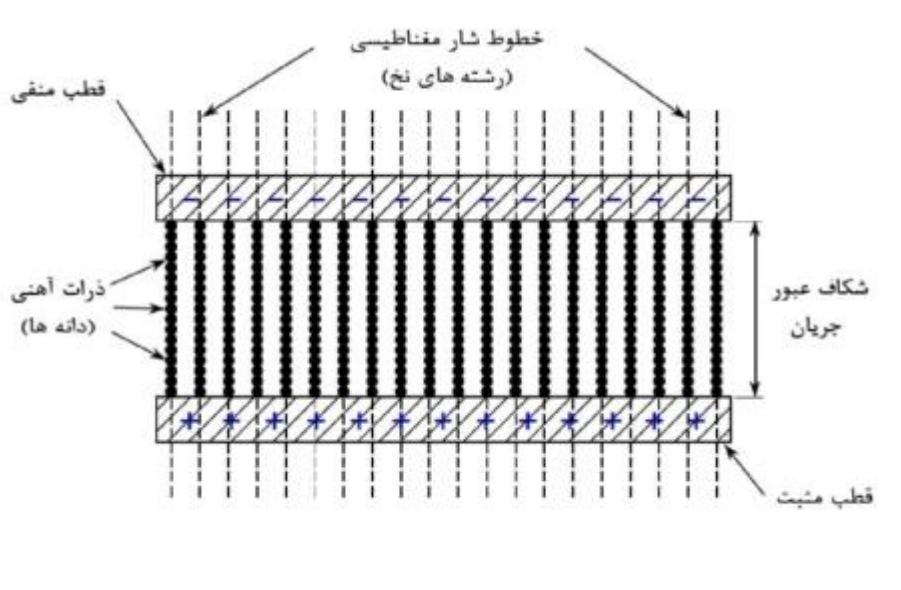
تعریف رفتار مکانیکی سیالات MR در انتقال نیرو و یا گشتاور در شرایط کاری گوناگون موضوع پژوهش‌های گوناگونی قرار گرفته است و در نتیجه برای توصیف آن مدل‌های ریاضی متفاوتی پیشنهاد گردیده است. هنگام قرار گرفتن سیال MR در معرض یک میدان مغناطیسی، ذرات کربونیل آهن که در سراسر سیال پراکنده شده‌اند به صورت دوقطبی مغناطیسی شکل می‌گیرند. همان‌طور که در شکل ۱-۱-۲ نشان داده شده است این دوقطبی‌های مغناطیسی، تحت میدان مغناطیسی، خود را در امتداد خطوط شار مغناطیسی ردیف می‌کنند.



شکل ۱-۲: هم‌ترازی دوقطبی ذرات مغناطیسی [۷]

در یک مقیاس بزرگ‌تر، این شکل‌گیری مجدد ذرات آهنی دوقطبی می‌تواند به‌عنوان تعداد بسیار زیادی از دانه‌های میکروسکوپی که بر روی یک رشته بسیار نازک نخ قابل مشاهده هستند، همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، باشند. می‌توان این رشته نازک کشش را بر روی یک قطب مغناطیسی

دیگر و عمود بر هر سطح قطب پارامگنتیک^۱ تصور کرد.

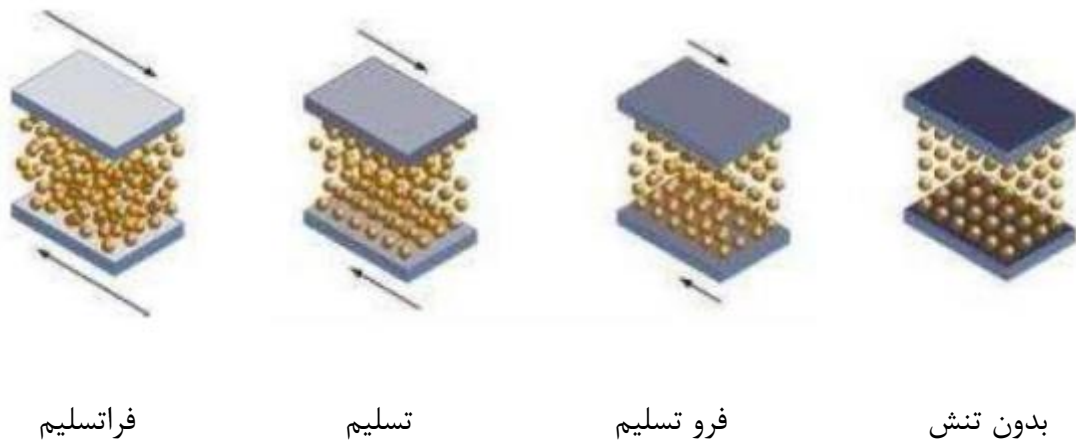


شکل ۱-۳: رشته‌ها و دانه‌های تمثیلی سیال MR فعال [۸]

در این توصیف، دانه‌های کروی نشان‌دهنده ذرات آهن کربونیل هستند و هر رشته نشان‌دهنده یک خط شار مغناطیسی است. می‌توان تصور کرد که بسیاری از این رشته‌های از مهره‌های نزدیک به هم، خیلی شبیه به موی مسواک قرار داده شده‌اند. هنگامی که در این حالت قرار دارند، ذرات آهنی در برابر حرکت خود از خطوط شار مقاومت می‌کنند و در عمل به‌عنوان مانعی برای جریان سیال MR هستند [۸]. همان‌طور که افزایش میدان اعمال‌شده منجر به تنش تسلیم وابسته به میدان می‌شود، انرژی مکانیکی موردنیاز برای از بین بردن این ساختار زنجیره‌ای افزایش می‌یابد. در صورت عدم وجود یک میدان مغناطیسی، سیالات MR رفتار نیوتنی مشابهی را نشان می‌دهند. رفتار مکانیکی سیال MR در یک میدان نیرو، با مقدار تنش برشی لازم برای جابجایی نسبی در لایه‌های سیال سنجیده می‌شود. با قرار گرفتن در یک میدان مغناطیسی، مقدار این تنش تحت تأثیر دو عامل قرار می‌گیرد که مؤلفه نخست آن ناشی از لزجت سیال حامل می‌باشد، که مستقل از میدان مغناطیسی است، و مؤلفه دوم آن، که در

¹ Paramagnetic

اثر وجود میدان مغناطیسی خود را نشان می‌دهد، ناشی از آرایش گرفتن ذرات مغناطیسی معلق در سیال در راستای خطوط شار میدان می‌باشد. تنش برشی ناشی از لزجت سیال حامل به خواص فیزیکی و شیمیایی این سیال وابسته بوده و مستقل از تأثیر میدان مغناطیسی می‌باشد و با تغییر سرعت نسبی در لایه‌های سیال نمود پیدا می‌کند. حال آنکه با اعمال میدان مغناطیسی، مؤلفه دوم تنش برشی، که تنها تحت تأثیر میدان می‌باشد، در تعیین رفتار مکانیکی سیال نقش بازی می‌کند و تا آنجایی در مقابل جریان سیال MR از خود مقاومت نشان می‌دهد که رشته‌های ذرات فرو مغناطیس آرایش یافته در راستای میدان مغناطیسی، از هم گسیخته شوند و از آن پس سیال جریان می‌یابد و رفتار آن تابع لزجت سیال می‌باشد. به این مقدار تنش که برای قرار گرفتن سیال در آستانه جریان لازم است، تنش تسلیم برشی می‌گویند و اعمال آن تا مادامی که میدان مغناطیسی تغییر نکرده است برای تداوم جریان سیال و گسستن پیوند میان رشته‌های ذرات فرو مغناطیس لازم است. شکل ۱-۴ به صورت نمادین، آرایش ذرات فرو مغناطیس معلق در سیال را در چهار وضعیت بارگذاری؛ بدون تنش، تحت تنش کمتر از تسلیم یا فرو تسلیم، تحت تنش تسلیم و تحت تنش بالاتر از تسلیم یا فراتسلیم نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴: آرایش ذرات در میدان مغناطیس در چهار وضعیت بارگذاری متفاوت [۹]

از این رو در یک میدان سرعت مشخص در لایه‌های سیال، تنش برشی ناشی از لزجت با مقدار معینی مشخص می‌گردد. در این حالت، اگر میدان مغناطیسی مشخصی بر سیال اعمال گردد، مقدار تنش برشی

موضعی بین لایه‌ها از شدت میدان مغناطیسی در آن نقطه متأثر می‌گردد و جابجایی لایه‌ها نیازمند غلبه بر این مؤلفه از تنش برشی می‌باشد.

۷-۱- مدل بینگهام

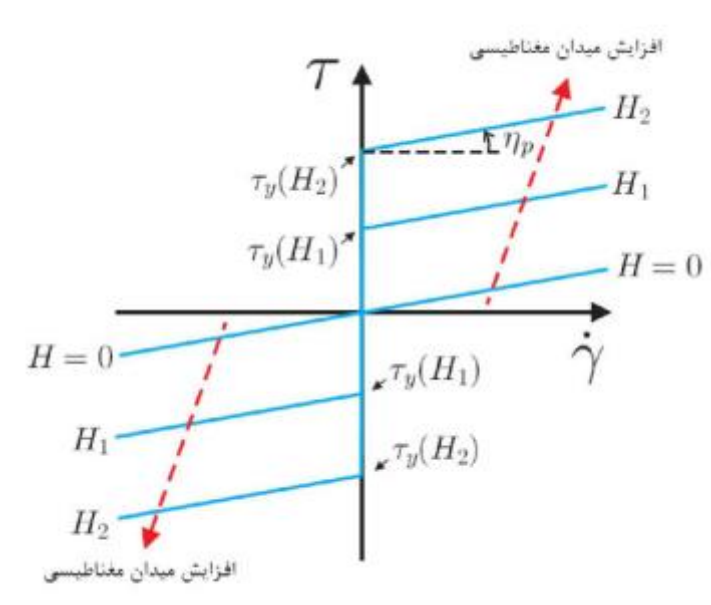
رفتار سیالات کنترل‌پذیر با میدان مغناطیسی (H) که دارای تنش‌های تسلیم متغیر می‌باشند به صورت مدل بینگهام ارائه می‌شود [۲, ۱۰-۱۲]. در این مدل جریان، تنش تسلیم به صورت رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma} \quad \tau > \tau_y(H) \quad (1-11)$$

که τ_y تنش برشی، $\dot{\gamma}$ نرخ برش و η لزجت سیال (مستقل از میدان مغناطیسی) است، که در معادله بالا τ بزرگ‌تر از تنش تسلیم وابسته به میدان τ_y است. در حالت کمتر از تنش تسلیم ($\tau \leq \tau_y$) (در محدوده نرخ برش 10^{-3}) سیال MR معمولاً دارای رفتاری ویسکوالاستیک می‌باشد:

$$\tau = G(H)\gamma \quad \tau \leq \tau_y(H) \quad (2-11)$$

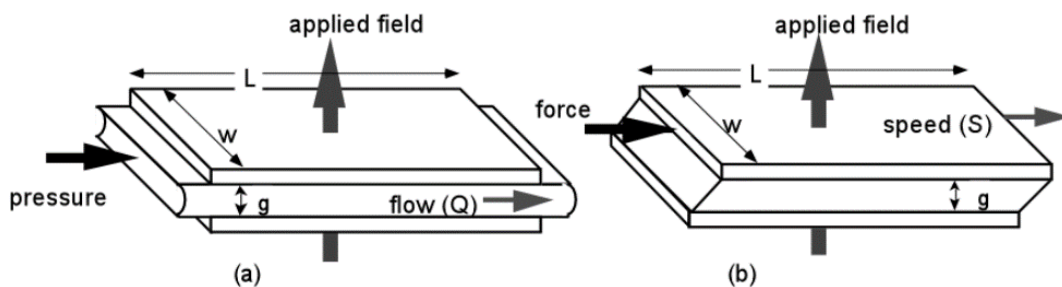
که G مدول مواد مرکب است و در مقالات چاپ‌شده، مشاهده شده است که وابسته به میدان می‌باشد [۱۲, ۱۳]. شکل ۱-۵ رفتار تنش-کرنش مدل بینگهام سیالات MR را نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۱-۵: منحنی مدل بینگهام تنش برشی بر حسب نرخ برشی [۱۴]

در حالی که مدل پلاستیک بیهنگام در طراحی و توصیف دستگاه‌های مبتنی بر سیال MR مفید است، رفتار سیال MR واقعی گاهی خروج‌های معنی‌دار از این مدل ساده را نشان می‌دهد. شاید عمده این خروج‌ها شامل رفتار غیر نیوتنی سیالات MR در شرایط عدم حضور یک میدان مغناطیسی باشد [۱۵].

۱-۸- کاربرد سیال MR در حالت‌های مختلف



شکل ۱-۶: حالت‌های اصلی کارکرد دستگاه‌های سیال قابل کنترل [۱]

بیشتر دستگاه‌هایی که از سیالات قابل کنترل استفاده می‌کنند را می‌توان بر اساس داشتن

اجزای ثابت (حالت جریان فشار وارد شده) و یا بر اساس اجزای قابل حرکت (حالت برش مستقیم) طبقه‌بندی کرد. اشکال هندسی این دو حالت کارکرد اصلی در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. مثال‌های دستگاه‌های حالت جریان فشار وارد شده (PDF) شامل دریچه‌های سرو، دمرها و جاذب‌های ارتعاش می‌باشد. مثال‌های دستگاه‌های حالت برش مستقیم شامل کلاچ‌ها، ترمزها، دستگاه‌های قفل کننده و دوار می‌باشد. حالت سوم عملکرد تحت عنوان حالت فیلم فشاری برای استفاده در کاربردهای نیروی بالا و حرکت محدود استفاده می‌شود. افت فشار در یک دستگاه بر اساس حالت جریان فشار وارد شده به‌طور معمول فرض می‌شود که از مجموع یک جزء لزج ΔP_η و یک جزء تنش تسلیم القاشده وابسته به میدان ΔP_τ حاصل می‌شود.

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_\tau(H) = \frac{12 \eta Q L}{g^3 W} + \frac{c \tau_y(H)L}{g} \quad (3-11)$$

که L ، g و w به ترتیب طول و فاصله و عرض جریان بین کانال اجزای ثابت هستند، Q نرخ جریان حجمی، η لزجت بدون اعمال میدان و τ_y تنش تسلیم در پاسخ به اعمال یک میدان H است. پارامتر c یک تابع از پروفیل سرعت جریان است و دارای محدوده حداقل ۲ (برای $\Delta P_\tau / \Delta P_\eta$ کمتر از ۱) تا حداکثر ۳ (برای $\Delta P_\tau / \Delta P_\eta$ بزرگ‌تر از ۱۰۰) می‌باشد. به شیوه‌ای مشابه، نیروی اعمال شده به‌وسیله‌ی یک دستگاه حالت برش مستقیم برابر است با:

$$F = F_\eta + F_\tau(H) = \frac{\eta S A}{g} + \tau_y(H)A \quad (4-11)$$

که S مربوط به سرعت جز (صفحه) و $A = Lw$ سطح برش (صفحه) است.

۹-۱- خواص سیالات MR تجاری

در ادامه برای درک بهتر مفاهیم مربوط به سیالات MR، خواص مغناطیسی، رئولوژیکی و تهنشینی

چهار سیال MR تجاری مربوط به شرکت لرد مورد بحث قرار گرفته است [۱]. ترکیب اولیه این چهار مایعات در جدول ۱-۲ آمده است.

جدول ۱-۲: ترکیب اصلی و چگالی چهار سیال تجاری (MR (Lord,1998)

درصد حجمی آهن	سیال حامل	چگالی (g/ml)	سیال MR تجاری
۲۶	روغن هیدروکربنی روغن	۲,۶۶	MRX-126PD
۴۰	هیدروکربنی	۳,۶۴	MRX-140ND
۴۲	آب	۳,۸۸	MRX-242AS
۳۶	روغن سیلیکون	۳,۴۷	MRX-336AG

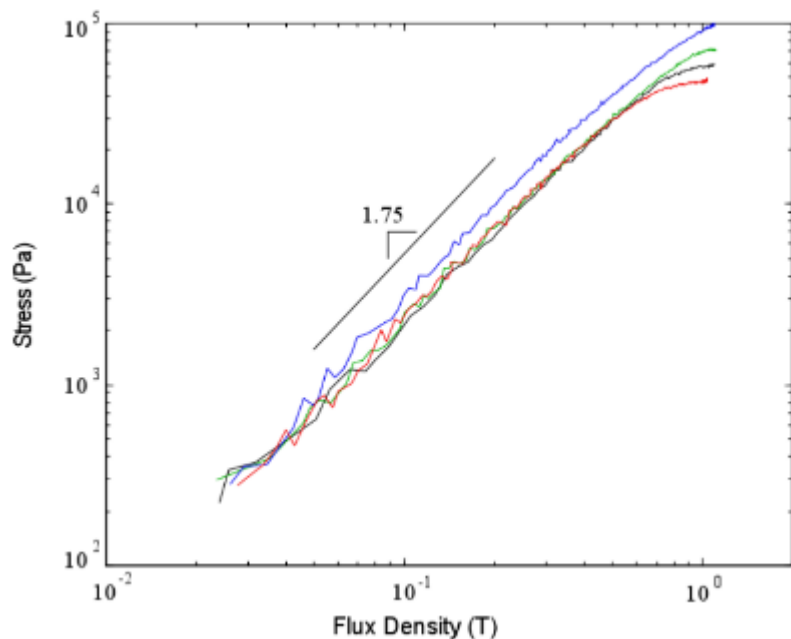
۱-۹-۱- خواص رئولوژیکی

خواص رئولوژیکی سیالات قابل کنترل به غلظت و تراکم ذرات، اندازه ذرات و شکل انتشار، خواص مایع حامل، افزودنی‌های فرعی، زمینه کاربردی، دما و سایر عوامل بستگی دارد. وابستگی متقابل تمام این عوامل بسیار پیچیده است، با این حال در سازمان‌دهی روش‌های بهینه‌سازی عملکرد این سیالات برای کاربردهای خاص، مهم است.

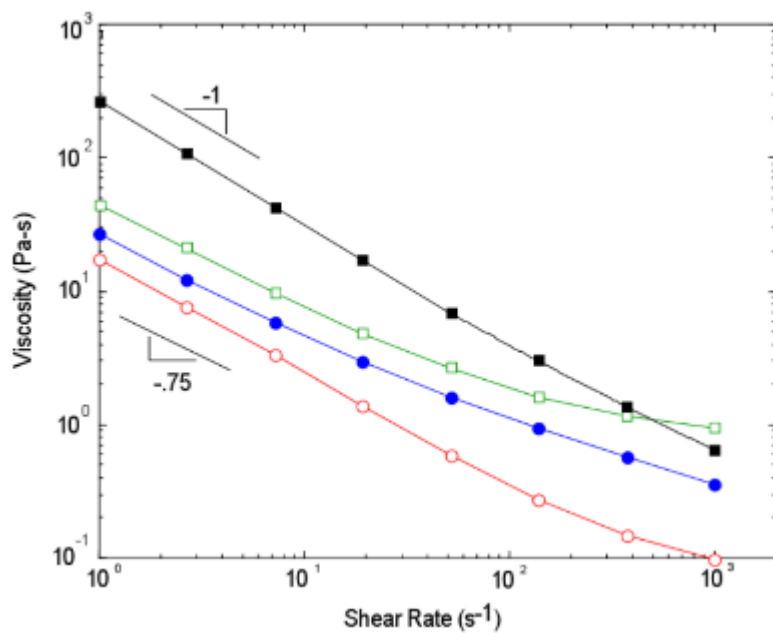
اثر مگنتورئولوژیکی چهار سیال MR در یک رئومتر مرسوم با استفاده از هندسه صفحات موازی با قطر ۴۶ میلی‌متر که در فاصله ۱ میلی‌متری تنظیم شده، اندازه‌گیری شده است. در هندسه صفحات موازی، نرخ برش در طول نمونه سیال با حداکثر نرخ برش در شعاع بیرونی، به صورت خطی متفاوت است. رئومتر قادر است بیش از ۱ تسلا را به سیال نمونه اعمال کند. شکل ۱-۷ تنش برشی در سیالات MR را به عنوان تابعی از شار در حداکثر نرخ برش (۱/ s) را نشان می‌دهد. در چنین نرخ برشی پایینی، اطلاعات خروجی تنش برشی تقریباً برابر با تنش تسلیم سیال است که در معادله ۱-۲ تعریف شده

است. در مقدار شار پایین، تنش سیال را می‌توان به‌عنوان یک رفتار از قانون نیرو نشان داد. شاخص تقریبی ۱,۷۵ قانون نیرو در محدوده پایین تا متوسط میدان به‌وسیله‌ی مدل‌های مگنتورئولوژیکی معاصر پیش‌بینی می‌شود. هر دو مدل خطی و مدل‌هایی که برای اثرات مغناطیسی غیرخطی مانند حالت ذرات اشباع اتفاق می‌افتد، رفتار حالت درجه دوم در شارهای بسیار پایین پیش‌بینی می‌شود [۱۶]. مدل غیرخطی پیشنهادشده توسط گیندر و همکاران [۱۷] یک شاخص ۱,۵ قانون نیرو را در میدان‌های متوسط پیش‌بینی می‌کند. خارج از مقدار شار حدود ۰,۲-۰,۳ تسلا، اثرات اشباع مغناطیسی به‌صورت خروج از رفتار قانون نیرو بیان می‌شود. پاسخ تنش درنهایت به دلیل اینکه مایعات MR به اشباع مغناطیسی کامل می‌رسد، بدون تغییر باقی می‌ماند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار حجمی آهن در مایع، مقدار شاری که در آن این اشباع رخ می‌دهد نیز افزایش می‌یابد.

در همه فرمولاسیون‌های سیال MR که برای یک کاربرد خاص یا طبقه‌ای از کاربردهای بهینه‌شده، ویسکوزیته مکانیکی در غیاب یک میدان، بیشترین اهمیت را به‌عنوان یک تابع از روغن حامل، عوامل معلق‌کننده و ذرات اضافه‌شده، دارد. موارد ذکرشده در بالا با استفاده از یک ویسکوزیته سیال پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما باید با سایر نیازهای مایع مانند محدوده‌ی دمایی و پراکندگی دوباره ذرات، متوازن شود. به سبب اضافه کردن هردوی عوامل معلق‌ساز و تغییر در میکرو ساختار ذرات مغناطیسی هنگام برش، بیشتر سیالات MR رقیق‌شوندگی برشی قابل توجهی را نشان می‌دهند.



شکل ۷-۱: تنش برشی سیال به‌عنوان یک تابع از مقدار شار مغناطیسی در حداکثر نرخ برش ۲۶ (1/s) ترتیب صعودی منحنی‌ها با افزایش مقدار حجمی آهن همراه است [۱].



شکل ۸-۱: ویسکوزیته به‌عنوان یک تابع از نرخ برش در دمای ۲۵ درجه برای MRX-126PD(O), MRX-242AS (O), MRX-140ND (□) و MRX-336AG (■) [۱]

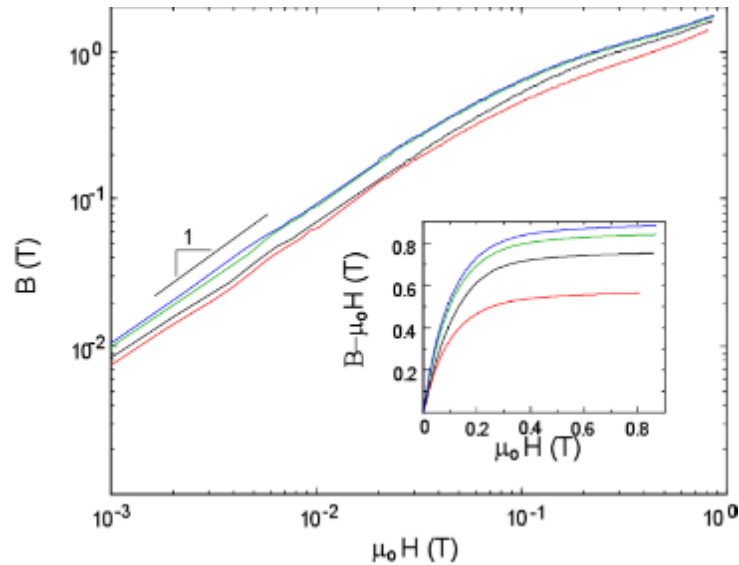
ویسکوزیته چهار سیال MR روی یک دستگاه رئومتر تنش قابل کنترل TA CS²500 با استفاده از یک هندسه صفحه و مخروط (قطر ۴۰ میلی‌متر و زاویه مخروطی ۱ درجه) اندازه‌گیری شده است.

شکل ۱-۸ ویسکوزیته چهار سیال MR که تابع نرخ برش است را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که ویسکوزیته سیال دقیقاً مطابق با مقدار ذرات آهن موجود در هر سیال نیست. در واقع، ویسکوزیته سیال به‌طور قابل‌توجهی یک تابع از ترکیبات و خواص روغن‌های حامل است. سیالات MR نشان داده‌شده رفتار قانون نیروی نرخ برش پایین با شیب بین ۰,۷۵- تا ۱- را نشان می‌دهد. در نرخ برش بالا، نرخ رقیق‌شوندگی برشی^۱ کاهش می‌یابد و به یک مقدار تقریبی خواهد رسید که تا حد زیادی حالت جامد، لزجت روغن حامل و مقدار رقیق‌شوندگی برشی عوامل معلق ساز را نشان می‌دهد. MRX-336AG تقریباً یک مرتبه ویسکوزیته بیشتر را در نرخ برش پایین در مقایسه با سایر سیالات MR نشان می‌دهد. این یک نتیجه از رفتار تسلیم قابل توجه از میدان صفر این سیال است، که به وسیله‌ی شیب 1- قانون نیرو در نرخ برشی پایین مشخص می‌شود. ویسکوزیته پلاستیک ($\partial\rho/\partial\dot{\gamma}$) خارج از محدوده تسلیم عملاً بسیار پایین است ($\sim 10^{-1} Pa - s$).

۱-۹-۲- ویژگی‌های مغناطیسی

درک خواص مغناطیسی سیالات MR برای طراحی دستگاه‌های برمبنای سیال MR مهم است. در بسیاری از این دستگاه‌ها، سیال MR بیشترین مقاومت مغناطیسی را در محیط مغناطیسی نشان می‌دهد. همچنین این خواص مغناطیسی ممکن است در ارائه بینش نسبت به طبیعت و تشکیل ساختار ذرات در داخل سیال مفید باشد.

¹ shear thinning



شکل ۱-۹: مقدار شار در سیالات MR به عنوان یک تابع از میدان اعمال شده، ترتیب صعودی منحنی‌ها متناسب با افزایش مقدار حجمی آهن می‌باشد [۱].

منحنی القایی مغناطیسی یا منحنی B-H چهار سیال تجاری MR در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیالات MR خواص مغناطیسی خطی را تا میدان اعمال شده نزدیک به $0.02/\mu_0 \text{ A/m}$ را نشان می‌دهند که $\mu_0 = 4\pi e^{-7} \text{ T} - m/A$ نفوذپذیری خلأ است. در این ناحیه دیفرانسیل نفوذپذیری (شیب B(H) سیالات MR تقریباً ثابت است. این نفوذپذیری‌ها بین ۵ تا ۹ برابر خلأ متغیر است. خواص مغناطیسی مایعات MR به‌طور قابل ملاحظه‌ای از خصوصیات بیشترین خواص فرو مغناطیسی تفاوت دارد، زیرا القاء شدن فرو مغناطیسی می‌تواند به‌طور معمول در دامنه وسیعی از میدان‌های اعمال شده خطی شود و نفوذپذیری‌های متناسب با آن چندین مرتبه بزرگ‌تر هستند. مایعات MR شروع به رفتار تدریجی اشباع مغناطیسی خارج از محدوده خطی می‌کنند. اشباع کامل معمولاً در میدان‌های بیشتر از $0.04/\mu_0 \text{ A/m}$ اتفاق می‌افتد. القاء ذاتی یا مقدار قطبی شدن ($B - \mu_0 H$) یک سیال MR در حالت اشباع کامل ϕJ_s Tesla است، که ϕ درصد حجمی ذرات در سیال است و J_s قطبی شدن حالت اشباع مواد به صورت ذره است. به عنوان مثال، مایع حاوی ۳۰٪ آهن ($J_s = 2.1$ تسلا) در حدود

(۰,۳) (۲,۱) = ۰,۶۳ تسلا اشباع می‌شود. در منحنی‌های القایی ممکن است کمی هیستریزیس^۱ دیده شود. این رفتار فوق‌العاده پارامغناطیسی در نتیجه خواص مغناطیسی خوب آهن مورد استفاده به‌عنوان مواد ذره‌ای در این مایعات و تحرک فاز ذرات است.

۱-۹-۳- رطوبت، ویژگی‌های ته‌نشینی، سازگاری مواد

سیال MR ذاتا تا حدودی ساینده است. مرحله‌ای که پایداری یک بخش یا جزء خاص را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بستگی به تعدادی از عوامل مرتبط با ترکیب سیال و طراحی دستگاه دارد. نوارهای پوششی و دیگر مواد تحمل‌کننده‌ای که در معرض سیال MR به‌صورت تماس کشویی مستقیم قرار دارند، اغلب دارای نواحی سایش بحرانی به‌ویژه در کاربردهای دستگاه خطی هستند. توانایی سیالات MR برای روان کاری سطوح کشویی، گرایش برای پوشش چنین سطوحی از دستگاه‌های سیال MR را منعکس خواهد کرد. ضرایب اصطکاک برای روان کاری آهن روی آهن و آهن روی نایلون سطوح مشترک سیالات MR در جدول ۱-۳ آمده است. این موارد با ابعاد تماس ۷,۶ سانتی‌متر و ۷,۶ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. این نتایج میانگین چندین بار تست در سرعت ۲,۶ میلی‌متر بر ثانیه و با نیروی عادی متغییر در محدوده ۱۰ تا ۲۰ نیوتن به‌دست‌آمده است (هیچ میدان مغناطیسی وجود ندارد). مشاهده می‌شود که با روان کاری مایع MR، اصطکاک کشویی نسبت به سطوح خشک دو یا سه برابر کاهش می‌یابد. با این وجود، اندازه‌گیری اصطکاک کشویی روان کاری سیال MR با استفاده از این روش تا حدی ضعیفی قابلیت تکرارپذیری را نشان داده است. این موضوع به خواص پیچیده رئولوژیکی سیالات MR مربوط می‌شود و بدین معنی است که خواص اصطکاک کشویی، تابع هر دو سرعت کشویی و ضخامت فیلم مایع بین سطوح مشترک است.

^۱ Hysteresis

جدول ۱-۳: میانگین ضریب اصطکاک کشویی برای سطوح مشترک روان کاری شده سیال MR.

سیال MR تجاری	نایلون روی آهن	آهن روی آهن
حالت خشک	۰,۱۹	۰,۱۸
MRX-126PD	0.04-0.07	0.04-0.07
MRX-140ND	0.05-0.07	0.07-0.09
MRX-242AS	0.06-0.07	0.05-0.07
MRX-336AG	0.08-0.11	0.08-0.11

همان‌طور که هر سوسپانسیون حاوی ذرات در مقیاس میکرون، که در آن عدم انطباق چگالی بین سیال و ذرات وجود دارد، ته‌نشینی در مایعات MR باید در هنگام فرمولاسیون در نظر گرفته شود. بازهم کاربردهای خاص مشخص می‌کند که چه مقدار ته‌نشینی باید کنترل شود و همچنین چطور اندازه‌گیری شود. برای مثال در کاربرد دمپر مربوط به زمین‌لرزه ممکن است نیاز به الزامات سختگیرانه عدم ته‌نشینی ذرات باشد، درحالی‌که ممکن است ته‌نشینی ذرات در کاربرد مربوط به ترمز حائز اهمیت نباشد. یک مقایسه ساده و غیر نرم‌افزاری ته‌نشینی ذرات در جدول ۱-۴ خلاصه شده است که نرخ اولیه ته‌نشینی را به‌عنوان یک درصد از ارتفاع کل ستون مایع جدول‌بندی شده است. (توجه داشته باشید که نتایج ته‌نشینی یک سیال بدون ذره روی سوسپانسیون غلیظ ذرات حاصل شده است و در نتیجه میزان ته‌نشینی آهسته است. بنابراین نرخ رسوب اولیه سریع‌ترین دوره ته‌نشینی است.) به‌طور کلی ته‌نشینی تابع ویژگی‌های رئولوژیکی واسطه سوسپانسیون، مشخصات سطحی ذرات مغناطیسی و حضور عوامل فعال‌کننده سطحی می‌باشد. در یک دستگاه، ته‌نشینی می‌تواند بیشتر تحت تأثیر حضور میدان‌های باقی‌مانده،

جهت گیری دستگاه و هندسه دستگاه باشد. برای سیالات مورد مطالعه در اینجا، مایعات به ترتیب ویسکوزیته رتبه بندی می شوند. سیالاتی که دارای بالاترین ویسکوزیته هستند (شکل ۱-۸) کمترین میزان ته نشینی را نشان می دهند.

جدول ۱-۴: نرخ ته نشینی اولیه

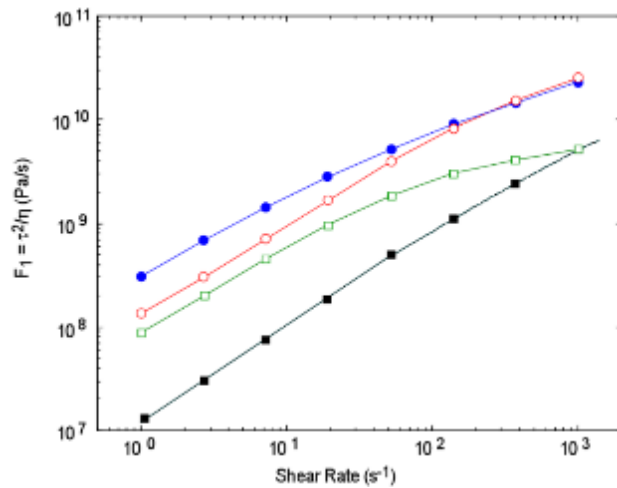
سیال	نرخ ته نشینی اولیه (% بر حسب روز)
MRX-126PD	1.0
MRX-140ND	0.2
MRX-242AS	0.3
MRX-336AG	0.0 (غیر قابل تشخیص)

معیارهای دیگر که ترکیب یک سیال MR شامل محدوده‌ی دمایی عملکرد دستگاه، سازگاری با مواد داخل دستگاه و اینکه آیا سیال از فضای خارج دستگاه خارج می شود یا خیر، است.

۱-۹-۴- بیان عددی از عملکرد سیال

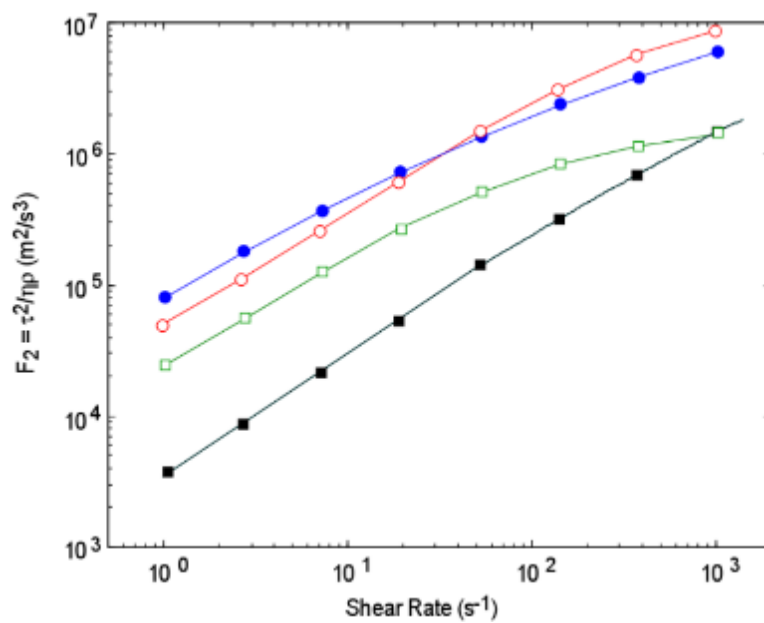
شکل ۱-۱۰ عملکرد نیروی $F_1 = \tau^2 / \eta$ به عنوان یک تابع از نرخ برش برای چهار سیال MR نشان می دهد. این شکل از نیرو محدودی دینامیکی (نرخ کنترل) یک دستگاه MR و همچنین حجم سیال MR مورد نیاز و مصرف انرژی را نشان می دهد. دیده می شود که با افزایش نرخ برش، چهار سیال مورد نظر افزایش قابل توجهی نیروی F_1 را به دلیل ویژگی های رقیق شونده‌ی برشی این سیالات نشان می دهد. در طیف گسترده‌ای از نیروی F_1 در میان سیالات MR نتایج ناشی از وابستگی حاد نیروی F_1 به ویسکوزیته مشاهده شده است. شکل ۱-۱۱ نیروی $F_2 = \tau^2 / \eta \rho$ به عنوان یک تابع از نرخ برش را نشان می دهد. این شکل از کارایی ارتباط نزدیک با شکل نیروی F_1 دارد با این تفاوت که ترم چگالی را بیشتر

دارد. به استثنای تغییر مکان عمودی داده‌ها، F_2 ویژگی‌های بسیار مشابه با F_1 را نشان می‌دهد. جالب توجه است که با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده به وسیله F_2 ، MRX-126PD منحصرًا برای کاربردهای با نرخ برش پایین مناسب است و MRX-242AS برای کاربردهای با نرخ برش بالا بهتر است. هر دو شکل F_1 و F_2 توصیف می‌کند که سیالات MR در حالت کلی به دلیل مشخصه رقیق شونده برشی، رفتار رئولوژیکی بهتری را در نرخ‌های برشی بالا نشان می‌دهد. عملکرد نیروی $F_3 = \tau/BH$ به عنوان یک تابع از مقدار شار در شکل ۱-۱۲ برای چهار سیال MR موردنظر نشان داده شده است. این شکل از کارایی مربوط به بازده انرژی سیالات MR است و در کاربردهایی که در آن پهنای نوار بلند مطلوب است، مهم می‌باشد. خطوط دارای نقاط در این داده‌ها مطابق با برون‌یابی تقریبی با کوچک‌ترین منحنی‌های درجه دوم تولید شده است. این موضوع به عنوان یک جایگزینی برای ارائه سطح توسعه یافته اندازه‌گیری و نويز محاسباتی موجود در مقادیر شارهای پایین انجام شده است. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقدار شار نیروی F_3 ، کاهش پایداری همراه با نزول ناگهانی را دارد، به طوری که مایعات MR شروع به اشباع مغناطیسی می‌کنند. در نهایت، همان‌طور که سیال به شرایطی می‌رسد که افزایش ورودی مغناطیسی در اثر افزایش تنش تسلیم متوقف می‌شود، نیروی F_3 به مقدار صفر خواهد رسید. از آنجایی که مقدار آهن موجب افزایش نفوذپذیری مغناطیسی و افزایش تنش تسلیم می‌شود، سیالات MR با مقدار بالای آهن به طور کلی به وسیله نیروی F_3 بهتر موردسنجش قرار می‌گیرند. جالب است که این موضوع ثابت می‌کند که تنها در مقادیر شار بالاتر برای چهار سیال MR نشان داده شده در شکل ۱-۱۲ موکدا صحیح است.



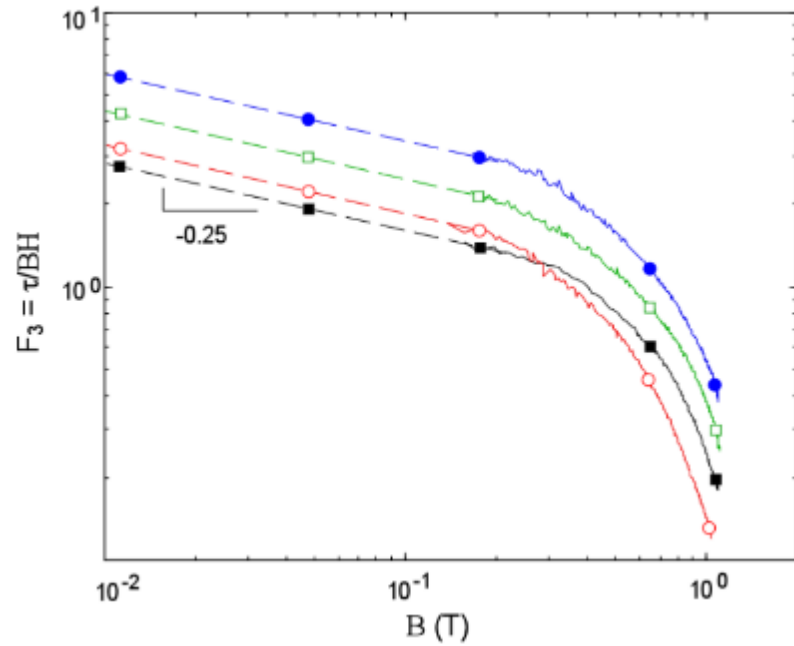
شکل ۱-۱۰: F_1 به عنوان یک تابع از نرخ برش در دمای ۲۵ درجه و ۱ تسلا برای

MRX-126PD (○), MRX-242AS (●), MRX-140ND (□), and MRX-336AG (■).



شکل ۱-۱۱: F_2 به عنوان یک تابع از نرخ برش در دمای ۲۵ درجه و ۱ تسلا برای MRX-

MRX-126PD (○), MRX-242AS (●), MRX-140ND (□), and MRX-336AG (■).



شکل ۱-۱۲: F_3 به عنوان یک تابع از مقدار شار در دمای ۲۵ درجه برای

MRX-126PD (○), MRX-242AS (●), MRX-140ND (□), and MRX-336AG (■) [۱]

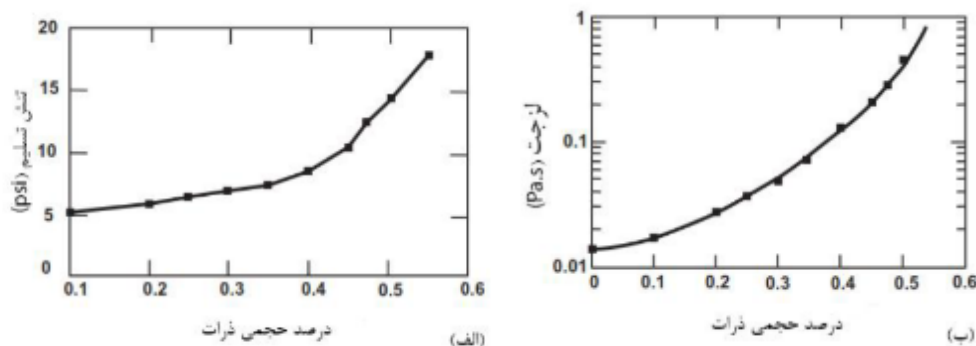
۱-۱-۱- لزجت سیال MR در نبود میدان مغناطیسی

از آنجایی که وجود لزجت مستقل از میدان مغناطیسی (η) در سیال حامل بر روی مقدار مینیمم نیرو یا گشتاور وابسته به سرعت در عملگرهای مگنتورئولوژیکال، تأثیر می‌گذارد، یک عامل بسیار مهم در تعیین نوع سیال مناسب می‌باشد. نظر به اینکه سیالیت مواد با دما تغییر می‌کند، وابستگی این لزجت به دما، نیروها و گشتاورهای مقاوم در سیال MR را تحت تأثیر شرایط دمایی قرار می‌دهد. لزجت سیال MR به‌طور عمده تحت تأثیر لزجت ذاتی سیال حامل و درصد حجمی ذرات غوطه‌ور در آن می‌باشد. افزایش درصد حجمی ذرات موجب افزایش لزجت سیال می‌شود. در دمای اتاق محدوده لزجت سیالات MR از ۵۰ mPa.s تا ۲۰۰ mPa.s می‌باشد.

۱۱-۱- تنش برشی تسلیم سیال MR

به دلیل تأثیر مستقیم تنش تسلیم برشی سیال، که وابسته به میدان مغناطیسی اعمال شده می- باشد، بر کنترل مقدار نیرو و یا گشتاور ایجادشده در سیستم‌های بکار گیرنده سیالات MR، تعیین حدود تغییرات این نوع تنش، مشخص‌کننده حدود نیرو و یا گشتاور قابل کنترل می‌باشد.

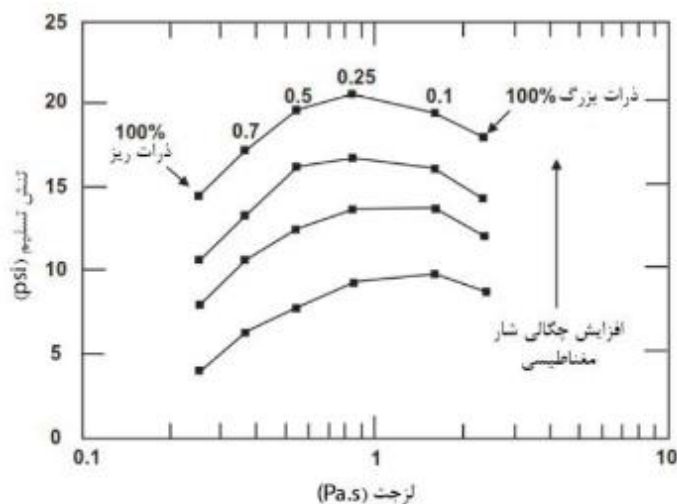
همان‌گونه که پیش‌ازاین آمد، نظر به اینکه نوع جنس ذرات بر مقدار اشباع مغناطیسی در یک میدان مغناطیسی مؤثر است، انتخاب مناسب آن بر روی ماکزیمم تنش تسلیم برشی اثر می‌گذارد [۳]. عامل دوم مؤثر بر ایجاد ماکزیمم تنش تسلیم برشی، درصد حجمی ذرات مغناطیسی در محلول می‌باشد. رابینو در سال ۱۹۴۸ [۱۸] ثابت کرد که افزایش درصد حجمی ذرات موجب افزایش گشتاور خروجی از یک کلاچ مگنتورئولوژیکال می‌شود. از آن زمان به بعد پژوهشگران متعددی به بررسی این خصوصیت پرداختند و نشان دادند که ماکزیمم تنش تسلیم برشی با افزایش درصد حجمی ذرات به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد [۱۹-۲۱]. نظر به اینکه لزجت سیال در غیاب میدان مغناطیسی نیز با افزایش درصد حجمی ذرات مغناطیسی در سیال، در نسبتی هماهنگ و سریع‌تر از تنش تسلیم، افزایش می‌یابد، این امر منجر به کاهش محدوده پتانسیل دینامیکی (نسبت بین ماکزیمم نیرو و یا گشتاور مقاوم قابل دسترس در حضور میدان مغناطیسی و مقدار آن در غیاب میدان مغناطیسی) در وسیله‌ای که از چنین سیالی استفاده می‌کند، می‌شود.



شکل ۱-۱۳: الف) ماکزیمم تنش تسلیم در برابر درصد حجمی ذرات (تحت چگالی شار مغناطیسی ۹ تسلا) (ب)

لزجت در برابر درصد حجمی ذرات [۲۰]

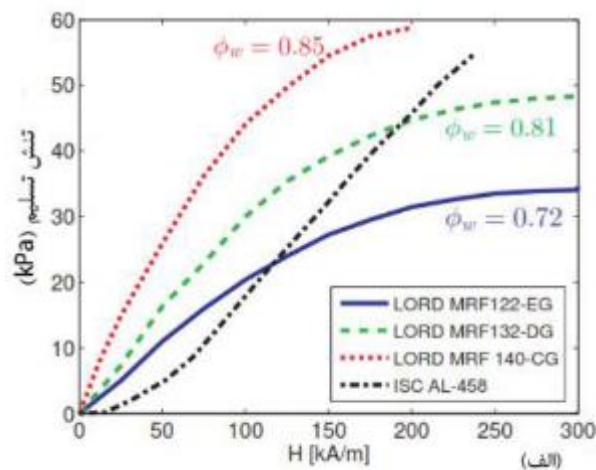
راه دیگر برای افزایش ماکزیمم تنش تسلیم، افزایش ابعادی ذرات غوطه‌ور در سیال MR است. مزیت این روش این است که می‌توان لزجت کمتر به ازای درصد حجمی ذرات مشابه را داشته باشیم [۲۲]. یک مورد خاص از این روش، استفاده از توزیع دوگروهی ذرات می‌باشد، که دو گروه از ذرات با اندازه‌های متفاوت ترکیب شده‌اند [۱۹-۲۱]. همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است، افزایش در تنش تسلیم می‌تواند با یک افزایش ناچیز (در حدود ۲۵٪ وزنی) در نسبت ذرات کوچک به دست آید. در توجیه این اثر می‌توان ادعا نمود که وجود ذرات ریزتر در بین ذرات درشت باعث می‌شود که ذرات همبند در زنجیره‌های آرایش یافته پیوند محکم‌تری با همدیگر بیابند.



شکل ۱-۱۴: ماکزیمم تنش تسلیم برحسب لزجت برای فرمولاسیون دوگروهی مختلف (درصد وزنی ثابت کل ذرات

۵۵٪) [۲۰]

در شکل ۱-۱۵ نمودار تنش تسلیم (τ_y) برحسب شدت میدان مغناطیسی (H) را برای سیالات MR سنتز شده توسط شرکت لرد و همچنین موسسه آی‌اس‌سی باهم مقایسه شده‌اند.



شکل ۱-۱۵: ماکزیمم تنش تسلیم برحسب میدان مغناطیسی (ϕ_w درصد وزنی ذرات است) [۲۳]

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که در فرمولاسیون‌های مختلف سیالات MR، با تغییر در درصد حجمی ذرات، رفتارهای مختلفی مشاهده می‌شود. علاوه بر این، اختلاف بین شکل منحنی سیالات توسط شرکت‌های "لرد" و "آی‌اس‌سی" می‌تواند به نحوه انجام آزمایشات برای اندازه‌گیری تنش تسلیم مرتبط باشد. برای سیالات تولیدشده توسط شرکت لرد دیده می‌شود که تنش تسلیم برای شدت میدان مغناطیسی بالاتر از 250 KA/m شروع به اشباع شدن می‌کند و از آن‌پس افزایش شدت میدان مغناطیسی تأثیر چندانی بر تنش برشی نخواهد داشت. شدت میدان مغناطیسی که تنش تسلیم سیال AL-458 (که نمودار مرجع بر آن اساس ترسیم‌شده است) شروع به اشباع می‌کند، در خارج از محدوده اندازه‌گیری مشخص شده در شکل ۱-۱۵، قرار دارد.

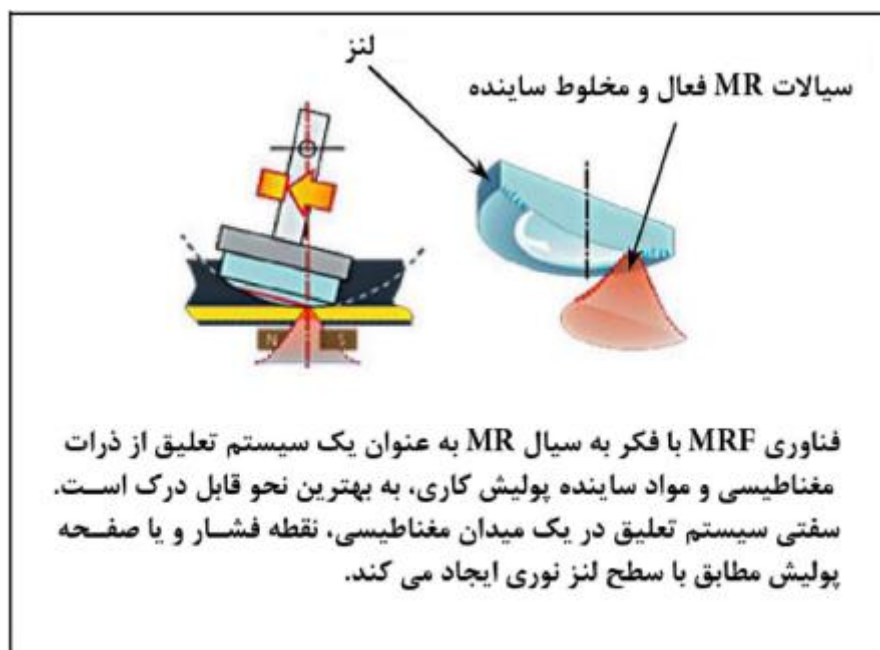
۱۲-۱- دستگاه‌ها و دمپر های ساخته‌شده با فناوری MR

علاوه بر دمپر یا کمک‌فتر، سیال MR را می‌توان در انواع مختلفی از دستگاه‌های دیگر، از جمله ترمزهای دوار، کلاچ‌ها و اعضای مصنوعی استفاده نمود، و حتی برای کارهایی مثل پولیش کردن و سنگ‌زنی استفاده می‌کنند. در ادامه تعدادی از دستگاه‌هایی که در آن‌ها از سیال MR استفاده می‌شود، آورده شده است. یکی از مهم‌ترین برنامه‌های کاربردی و تجاری نوآورانه برای سیالات MR در پرداخت-کاری لنزهای نوری می‌باشد. فناوری‌های QED در حال حاضر یک دستگاه پولیش CNC چند محوره

تولید کرده‌اند که از دو غالب ساخته شده از سیال MR و یک سایند استفاده می‌کند. با توجه به نشریه QED ذکر شده در مرجع [۲۴]: "برخلاف ساینده پولیش سفت و سخت مرسوم، سیال MR به عنوان یک ساینده پولیش سازگار عمل می‌کند، که شکل و سفتی آن را می‌توان به طور مغناطیسی در زمان واقعی، ساماندهی و کنترل کرد. شکل سطح نهایی لنز نوری و نتایج پرداخت کاری به دقت از طریق استفاده از الگوریتم‌های رایانه‌ای پیش‌بینی شده است که شامل نقشه آن و کنترل مقدار جدایش مواد در سراسر قطعه کار است". شکل‌های ۱-۱۶ و ۱-۱۷ از فناوری‌های QED ماشین پرداخت کاری مگنتورئولوژیکال Q22 و فرآیندی را که در آن کار می‌کند را نشان می‌دهند.



شکل ۱-۱۶: از فناوری‌های QED ، ماشین پرداخت کاری مگنتورئولوژیکال Q22 [۲۴]



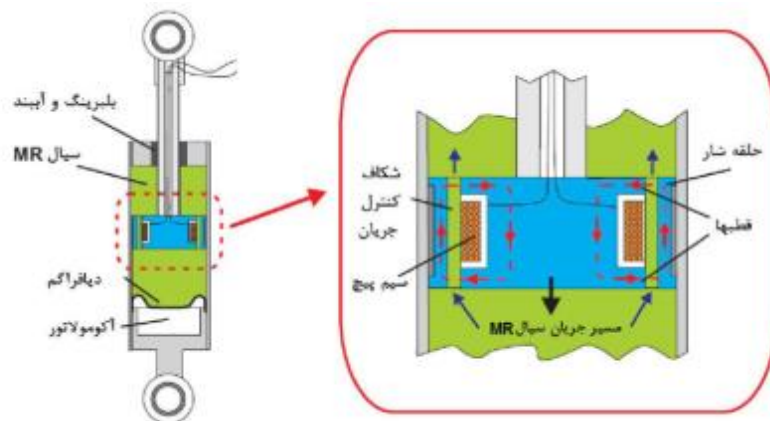
شکل ۱-۱۷: توصیف فرآیند پولیش کاری [۲۴]

۱-۱۲-۱- کاربرد سیال MR در دمپرها و جاذب‌های ارتعاشات در خودرو

به تازگی دمپره‌های مگنتورئولوژیکال به دلیل خصوصیات فیزیکی قابل توجه و همچنین به دلیل توانایی بالقوه در کنترل دمپینگ سیستم‌های مکانیکی به یک هدف مطالعه متمرکز تبدیل شده‌اند [۲۵]. ابداع و توسعه دمپرها و ارتعاش گیرهای سیالات MR عمدتاً به خاطر نیازمندی‌های صنعت خودروسازی صورت گرفته است و این نوع دمپرها توسعه یافته دمپرهایی هستند که توسط سیالات ER در دهه ۱۹۸۰ ساخته شدند. دمپر مگنتورئولوژیکال یکی از مهم‌ترین دستگاه‌های کنترل ارتعاش سیستم تعلیق است زیرا محاسن زیاد از قبیل سادگی مکانیکی، محدوده دینامیکی بالا، نیاز به انرژی پایین، ظرفیت نیروی بالا و مقاوم بودن را دارد. این دمپر یک راه حل کارآمد را برای دو الزام متناقض سواری راحت و هندلینگ خودرو ارائه می‌دهد [۲۶].

اولین محصول تجاری این دمپرها در سال ۱۹۹۸ برای کاربرد در سیستم‌های تعلیق فعال کامیون‌ها و ماشین‌های مسابقه استفاده شدند [۲۷]. ولی اولین پیشرفت تجاری واقعی در سال ۲۰۰۲ با ابداع مگنوراید صورت گرفت، اولین سیستم تعلیق تجاری که دارای دمپرهایی مجهز به سیال MR بود که

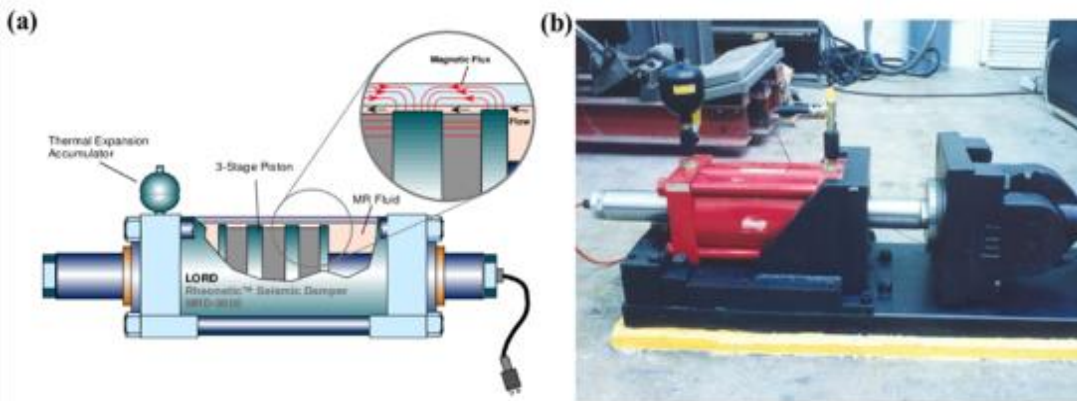
به‌طور خودکار با شرایط محیط جاده در کم‌ترین زمان و در زمان واقعی سازگار می‌شود و دارای قسمتهای متحرک کم و نیازمند نیروی کم‌تری نسبت به سیستم‌های هیدرولیک بود [۲۸] (شکل ۱-۱۸). از این سیستم ابتدا در ماشین‌های با تکنولوژی بالاتر مانند کادیلک و ماشین‌های مسابقه استفاده می‌شد ولی به مرور زمان از این سیستم در وسایل نقلیه با تکنولوژی پائین‌تر نیز استفاده کردند.



شکل ۱-۱۸: نمونه‌ای از دمپر MR [۲۸]

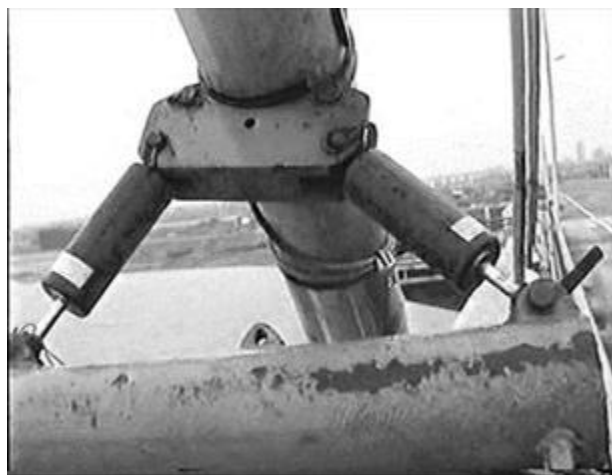
۲-۱۲-۱- دمپر MR در کاربردهای سازه‌ای

تنها صنعت خودرو نیست که از مزایای دمپره‌های MR استفاده می‌کند بلکه دمپره‌های بزرگ (ظرفیت تا ۳۰۰ کیلو نیوتن) برای جذب ارتعاشات ناشی از زلزله در مهندسی عمران نیز استفاده می‌شوند [۲۹، ۳۰]. لازم به ذکر است که عدم‌تشنینی ذرات در سیال MR که در این نوع دمپرها استفاده می‌شوند از نکات مهمی است که باید در نظر گرفته شود زیرا که ذرات مغناطیسی به‌کاررفته در سیال MR برای مدت طولانی نمی‌توانند به‌صورت معلق باقی بمانند.



شکل ۱-۱۹: (a) شماتیک دمپر MR با ظرفیت ۲۰ تن (b) نمونه آزمایشگاهی [۳۰]

دمپره‌های سیال MR برای کنترل ارتعاشات ناشی از وزش باد در پل‌های مجهز به کابل نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۱]. پل Dongting پل مجهز به کابل است که از دریاچه Dongting جایی که در آن رودخانه یانگ تسه در جنوب مرکزی چین قرار دارد، عبور می‌کند. در ماه ژوئن سال ۲۰۰۲، پل Dongting اولین پل مجهز به کابل با استفاده از دمپر MR برای جلوگیری از ارتعاشات ناشی از باد و باران شد. نتایج اثربخشی قابل توجهی از کنترل ارتعاشات را در کابل‌ها نشان می‌دهد که با دمپره‌های MR خنثی شده‌اند [۳۲].



شکل ۱-۲۰: دمپره‌های MR پل Dongting در چین [۳۲]

۱-۱۲-۳- دمپره‌های مورد استفاده در ساخت اعضای مصنوعی

نوعی از دمپرهای پیشرفته توسط شرکت لرد اختراع و به بهره‌برداری رسیدند که در کاربردهای

متنوعی از قبیل صندلی‌های اتوبوس و کامیون برای کاهش خستگی راننده مورد استفاده قرار گرفتند. دمپ‌های ساخته‌شده برای این سیستم‌ها که تحت عنوان "Motion Master" می‌باشند برای پای مصنوعی‌ای که توسط بیدرمن موتچ گمبه توسعه یافته است نیز به کار گرفته شده است [۳۳]. شکل‌های ۲۱-۱ و ۲۲-۱ نشان‌دهنده کاربرد این دمپ در پای مصنوعی می‌باشد.



شکل ۲۱-۱: پای مصنوعی بیدرمن [۷]



شکل ۲۲-۱: نمونه‌ای از پروتز زانو ساخته‌شده توسط بیدرمن [۳۳]

پایان نامه از چهار فصل کلی تشکیل شده است که در فصل اول آن مقدمه‌ای از سیال MR، تاریخچه این سیال، بحث درباره‌ی ویژگی‌های سیالات MR مرسوم شرکت لرد و کاربردهای گوناگون این سیال ارائه شد.

از آنجاکه هدف از این مطالعه بهبود پایداری سیال MR می‌باشد، فصل دوم به بررسی برخی از کارهای انجام شده و نتایج حاصل از آن در این حوضه، پرداخته شده است.

در فصل سوم ابتدا به بررسی مبحث ویسکوالاستیک^۱ و آزمون مربوط به آن پرداخته شده است. در ادامه شبکه میسل‌های کرمی شکل^۲ که مربوط به محلول پایه سیال MR مورد مطالعه می‌باشد، بررسی شده است. در قسمت آخر نحوه‌ی ساخت محلول پایه و سیال MR گزارش شده است.

در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمون رئومتر محلول پایه و سیال MR و همچنین مدل‌های مورد استفاده برای صحت سنجی نتایج ارائه شده است. همچنین در این فصل به نتایج آزمون پایداری نمونه‌ها گزارش شده است. در پایان به بیان نتیجه‌گیری‌ها و پیشنهادات برای آینده پرداخته شده است.

¹ viscoelastic

² wormlike micelles

۲- فصل دوم: مطالعات پیشین مربوط به بهبود

پایداری سیال **MR**

۲-۱- مقدمه

علاوه بر بهبود ویژگی‌های مربوط به تنش تسلیم سیالات MR، یکی از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از این نوع سیالات، جلوگیری از ته‌نشینی ذرات کربونیل موجود در آن‌ها می‌باشد. بسیاری از روش‌ها برای جلوگیری از این ته‌نشینی ذرات ارائه شده است که غالب این نوع روش‌ها منجر به افزایش ویسکوزیته حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی می‌شود. نکته دیگر این است که غالب سیالات MR پس از ته‌نشینی ذرات کربونیل با مدت‌زمان طولانی، به‌سختی در روغن پایه پراکنده می‌شوند. این رفتار به‌اصطلاح رسوب‌گذاری ذرات، گفته می‌شود.

۲-۲- روش‌های استفاده‌شده برای بهبود پایداری سیال MR

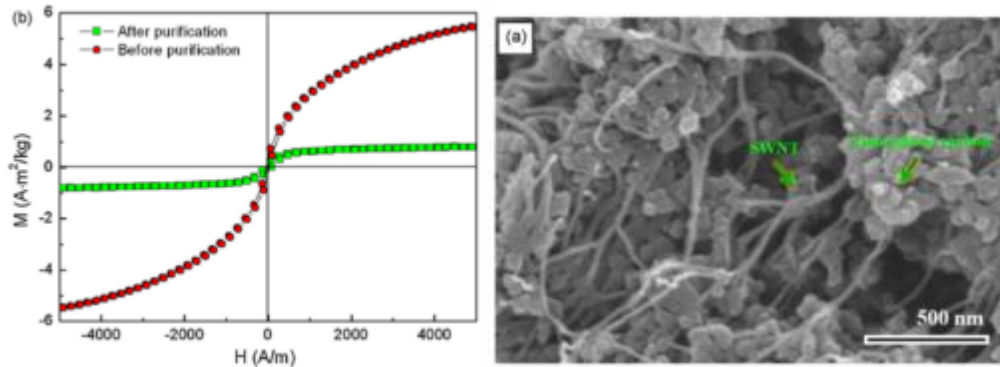
تاکنون روش‌های بسیاری برای بهبود پایداری سیال MR ارائه شده است. استفاده از کربن نانولوله‌ای تک‌جهته، استفاده از گریس، اثر ذرات مغناطیسی غیر هم‌شکل در مقابل ذرات آهن کربونیل، استفاده از نانوسیم‌های آهنی و ذرات کروی، پوشش دهی ذرات، استفاده از مایعات یونی به‌عنوان سیال حامل، استفاده از یک نوع ترکیب پلیمری و استفاده از کربن نانولوله‌ای چند جهته به همراه افزودنی سیلیکا برخی از این روش‌ها می‌باشند که در ادامه به تأثیر آن‌ها بر روی ویژگی‌های سیال MR و پایداری این سیال پرداخته شده است.

۲-۲-۱- استفاده از کربن نانولوله‌ای تک‌جهته

در یک تحقیق از کربن نانولوله‌ای تک‌جهته^۱ (SWNT) به‌عنوان یک پرکننده فاصله برای محلول‌های کربونیل آهنی برای کاهش ته‌نشینی محلول استفاده شده است [۳۴]. علاوه بر حسن مقیاس نانو، این مواد دارای برتری خواص مغناطیسی نیز می‌باشند. شکل ۱-۲ (a) شکل ظاهری فیبری SWNT استفاده‌شده را نشان می‌دهد که به‌طورجدی با بسیاری از ذرات کربونیل ترکیب شده است. ویژگی‌های مغناطیسی SWNT ها در حالت خالص و غیر خالص در شکل ۱-۲ (b) نشان داده شده است که در آن

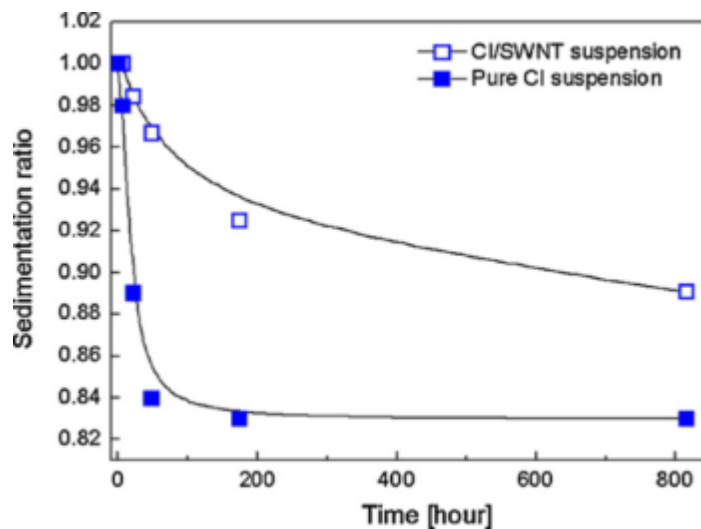
¹ single-walled carbon nanotubes

حالت اشباع مغناطیسی از $5,5 A.m^2/kg$ به $0,7 A.m^2/kg$ در حالت خالص شده می‌رسد. این تغییر به حذف کاتالیزورهای آهن در فرایند تصفیه مرتبط است. شکل ۲-۲ میزان ته‌نشینی ذرات را برحسب زمان نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱: (a) تصویر SEM مربوط به اثر SWNTها (b) اطلاعات مربوط به SWNT خالص و غیر خالص

[۳۴]



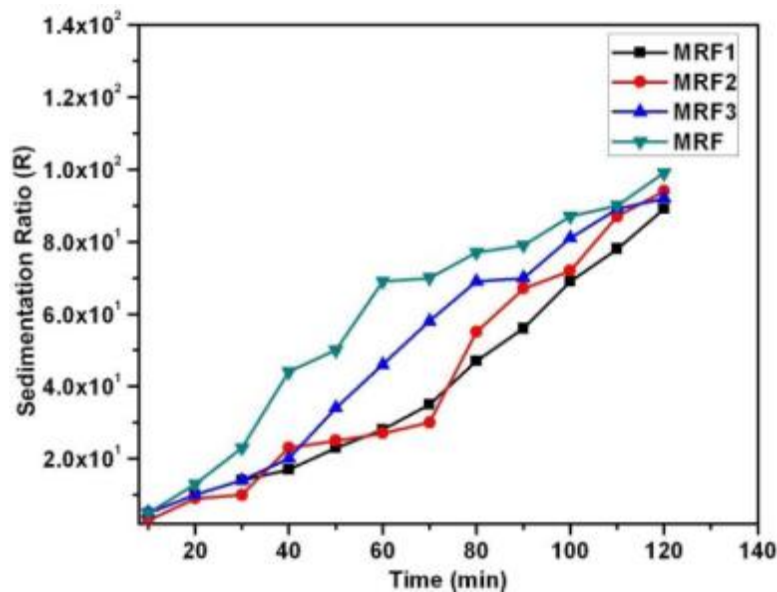
شکل ۲-۲: میزان ته‌نشینی ذرات برحسب زمان برای کربنیل آهن (مربع‌های پرشده) و برای کربنیل آهن و

SWNT (مربع‌های خالی) [۳۴]

۲-۲-۲- استفاده از گریس

در یکی دیگر از تحقیقات از گریس به‌عنوان ماده افزودنی به سیال MR استفاده شده است [۳۵]. در این تحقیق ابتدا گریس به روغن سیلیکون اضافه شده است و سپس با یک همزن مکانیکی با دور

۴۰۰ دور بر دقیقه در دمای محیط مخلوط می‌شود و در نهایت برای ساخت سیال MR پور آهن با ذرات ۲۸ میکرومتر با درصد وزنی ۳۹٪ به محلول اضافه می‌شود. در این تحقیق سه سیال MR (MRF1 و MRF2، و MRF3 به ترتیب با سه غلظت گریس ۰٫۵٪، ۰٫۲۵٪ و ۰٫۱۵٪ ساخته شده است. همچنین میزان ته‌نشینی سه نمونه سیال به همراه یک نمونه سیال MR بدون افزودنی (MRF) اندازه‌گیری شده و نتایج آن در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



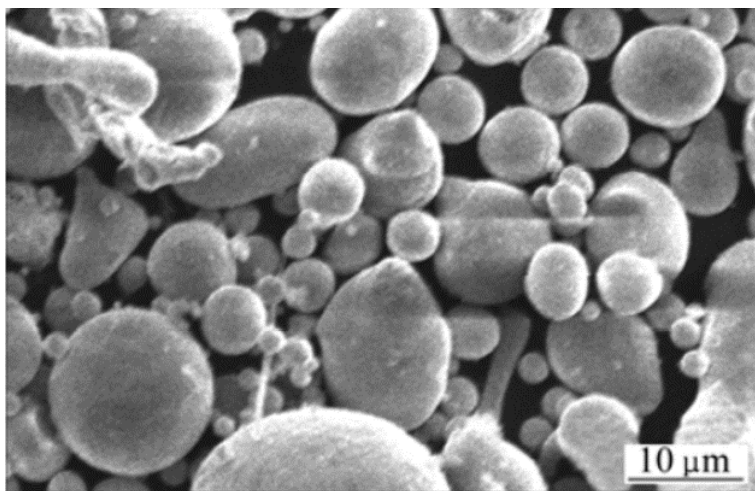
شکل ۲-۳: نرخ ته‌نشینی سیالات MR همراه با افزودنی و بدون آن [۳۵].

همان‌طور که دیده می‌شود سیال MRF1 به دلیل غلظت بالاتر گریس دارای پایداری بیشتری است.

۲-۲-۳- بررسی اثر ذرات مغناطیسی غیر هم‌شکل

در یکی دیگر از مطالعات به بررسی اثر ذرات مغناطیسی غیر هم‌شکل در مقابل ذرات آهن کربونیل پرداخته شده است [۳۶]. در این تحقیق سیال MR همراه با ذرات کربونیل آهن به اختصار CMRF و ذرات غیر هم‌شکل AMRF نامیده می‌شود و روغن سیلیکون به‌عنوان سیال حامل بکار رفته است. برای

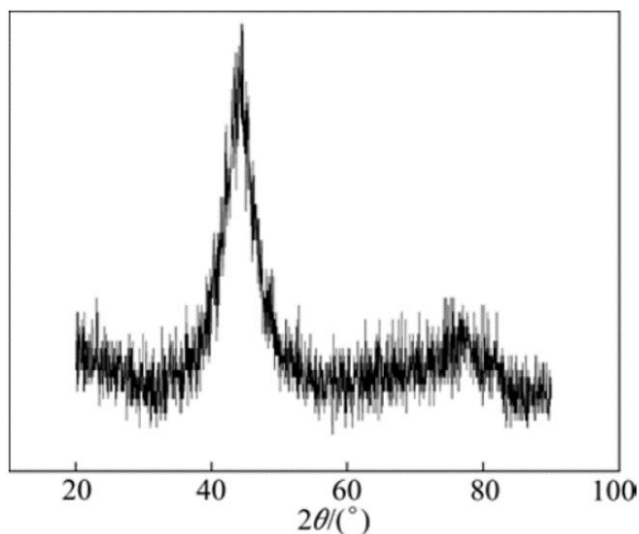
افزایش پایداری سیال عامل اتصال‌دهنده تیتانات^۱ به‌عنوان سورفکتانت به‌کاررفته است. ذرات در یک محلول هیدروکسید سدیم به مدت چند دقیقه پراکنده شدند تا لایه‌ای از سطح ذرات تمیز شوند و سپس چند بار با استفاده از آب مقطر شسته شدند. سورفکتانت تیتانات به مقدار ۲٪ از جرم ذرات در محلول استون حل شد. سپس ذرات خشک شسته شده در محلول پراکنده شدند. برای اطمینان از اینکه تمام ذرات به‌طور یکنواخت با سورفکتانت پوشش داده شدند، یک موج التراسونیک^۲ تا زمانی که تمام استون بخار شود، اعمال شده است. درنهایت، میکرو ذرات مغناطیسی مناسب به دست می‌آید. سپس ذرات با روغن سیلیکون مخلوط شده است. کسر حجمی ذرات برای دو نوع سیال MR مبتنی بر ذرات کربونیل و ذرات غیر هم‌شکل، ۲۰٪ می‌باشد. برای به‌دست آوردن مایعات MR با ترکیب یکنواخت ترکیب ذرات به مدت ۶۰ دقیقه با سرعت زیاد مخلوط می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، ذرات غیر هم‌شکل کروی هستند و نسبتاً به‌خوبی پراکنده شده‌اند. اندازه متوسط ذرات غیر هم‌شکل ۵ میکرومتر است. شکل ۲-۵ الگوی انعکاس‌دهنده به‌وسیله‌ی اشعه ایکس را نشان می‌دهد. پهنای میدان بین ۳۰ تا ۶۰ درجه ساختار غیر هم‌شکل را تأیید می‌کند.



شکل ۲-۴: تصویر SEM ذرات غیر هم‌شکل [۳۶]

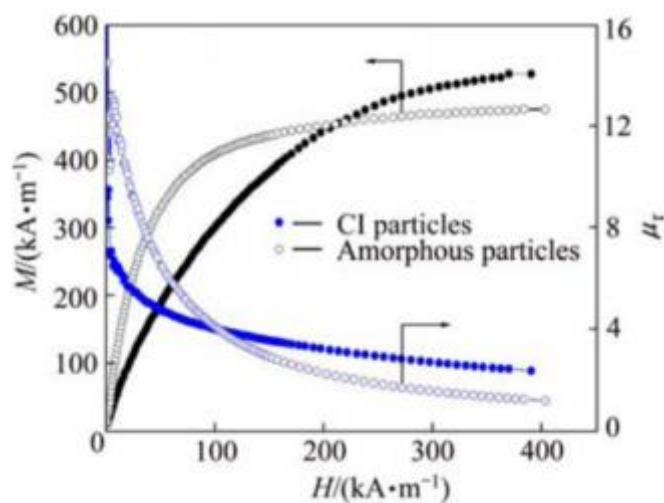
¹ Titanate

² Ultrasonic



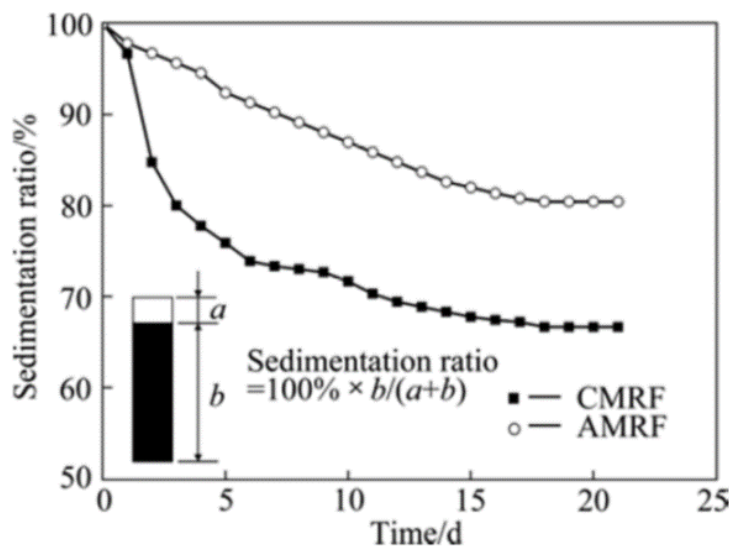
شکل ۲-۵: الگوی انعکاس دهنده اشعه ایکس ذرات غیر هم شکل [۳۶]

در این تحقیق مشخص شد که ذرات غیر هم شکل دارای چگالی کمتر، اشباع شدگی و مغناطیس باقی-مانده کمتر در مقایسه با ذرات کربونیل می باشد. همچنین مشخص شده است که هیستریسیس مغناطیسی ذرات غیر هم شکل کمتر از ذرات کربونیل می باشد. مقایسه منحنی های اولیه M-H و μ_r بین ذرات کربونیل و ذرات غیر هم شکل در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. در سطوح پایین میدان، ذرات غیر هم شکل شدت مغناطیسی بیشتر و نفوذپذیری بیشتری نسبت به ذرات کربونیل از خود نشان می دهند.



شکل ۲-۶: وابستگی مغناطیسی و نفوذپذیری میدان مغناطیسی بر روی ذرات کربونیل و ذرات غیر هم شکل [۳۶]

شکل ۲-۷ میزان ته‌نشینی را برحسب زمان برای دو سیال MR حاوی ذرات متفاوت نشان می‌دهد. ذرات کربونیل در ۵ روز اول به سرعت در حال ته‌نشینی هستند، درحالی‌که ذرات غیر هم‌شکل به آهستگی ته‌نشین می‌شوند. اگرچه اندازه متوسط ذرات غیر هم‌شکل از ذرات کربونیل بزرگ‌تر هستند، سیال AMRF (دارای ذرات غیر هم‌شکل) پایداری بهتری را از خود نشان می‌دهند. بیشترین دلایل احتمالی برای چنین تفاوتی می‌تواند شامل دو جنبه باشد. اولاً، چگالی ذرات غیر هم‌شکل کمتر از ذرات کربونیل است. ثانیاً، ذرات کربونیل به صورت ساده‌تری اجتماع می‌کنند تا یک توده را تشکیل دهند.



شکل ۲-۷: نرخ ته‌نشینی برحسب زمان سیال CMRF و AMRF [۳۶]

۲-۲-۴- سیال MR حاوی نانوسیم‌های آهنی و ذرات کروی

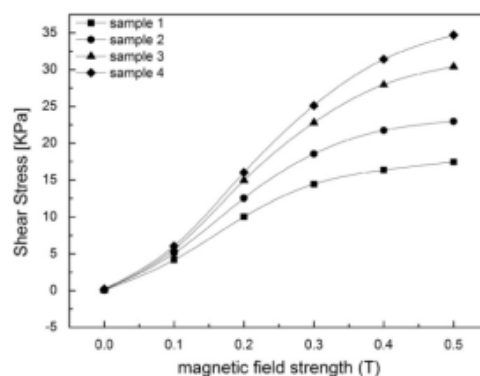
در تحقیقی دیگر نشان داده شد که خواص مگنتورئولوژیکال سیال MR دارای دو ترکیب (نانوسیم-های آهنی و ذرات کروی) با درصدهای وزنی مختلف از نانوسیم‌های آهنی تا حد زیادی مقدار تنش تسلیم و پایداری سیال MR را بهبود می‌بخشد [۳۷]. در این تحقیق ذرات کروی کربونیل با قطر متوسط $3.5\mu m$ به‌عنوان فاز اصلی استفاده شد. روغن سیلیکون با لزجت $0.168 Pa.s$ به‌عنوان سیال حامل و اسیداستئاریک با ۳٪ وزنی از جرم ذرات کربونیل به‌عنوان سورفاکتانت به‌منظور تولید پراکندگی پایدار استفاده شده است. به‌منظور بررسی تأثیر نانوسیم‌های آهنی بر روی سیالات MR، هر دو سیال MR

مرسوم و دارای دو ترکیب با نسبت وزنی مشابه ذرات کربونیل تهیه شده است (جدول ۱-۲). علاوه بر این، سوسپانسیون های مغناطیسی با نسبت وزنی مختلف نانوسیم های آهنی نیز تهیه شدند.

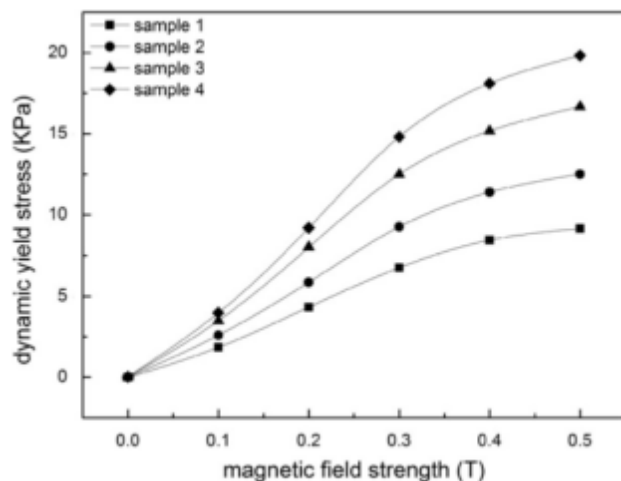
جدول ۱-۲: ترکیبات نمونه های سیال MR با نسبت وزنی مختلف نانوسیم های آهنی

نمونه ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مقدار کربونیل آهن (درصد وزنی)	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
مقدار نانوسیم های آهنی (درصد وزنی)	۰	۲	۴	۶	۲	۴	۶

شکل ۲-۸ نمودار تنش برشی را به صورت تابعی از شار مغناطیسی در نرخ برش $100s^{-1}$ نشان می دهد. همچنین این شکل نشان می دهد که تنش برشی با قدرت میدان مغناطیسی افزایش می یابد. لازم به ذکر است که تنش برشی سیال MR دارای دو ترکیب بسیار بالاتر از سیال MR مبتنی بر آهن کربونیل که حاوی همان نسبت وزنی کربونیل و بدون نانوسیم های آهنی است. این نتایج نشان می دهد که محصولات آهنی سیمی شکل استحکام تنش سیالات MR را تا حد زیادی افزایش می دهند. همچنین این شکل نشان می دهد که استحکام تنش با افزایش نرخ وزنی نانوسیم ها افزایش می یابد. منحنی تنش تسلیم دینامیکی به عنوان تابعی از میدان مغناطیسی در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. در این شکل مشخص شده است که تنش تسلیم دینامیکی نیز با نسبت وزنی نانوسیم های آهنی افزایش می یابد.



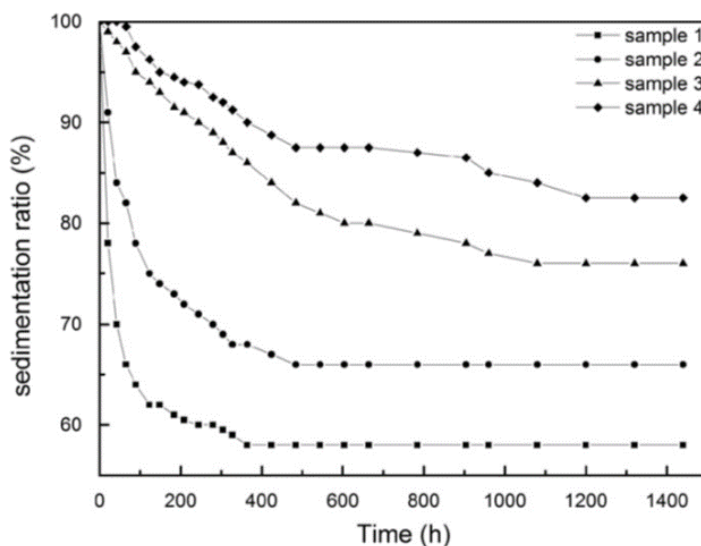
شکل ۲-۸: تنش برشی به عنوان تابعی از میدان مغناطیسی برای سیال MR حاوی نرخ وزنی مختلف از نانوسیم ها [۳۷]



شکل ۲-۹: تنش تسلیم دینامیکی به عنوان تابعی از میدان مغناطیسی برای سیال MR حاوی نرخ‌های وزنی مختلف از نانوسیم‌ها [۳۷]

البته در برخی تحقیقات گزارش شده است که سیالات MR دارای دو ترکیب تنها سطحی از تنش تسلیم را به وسیله‌ی جایگزینی بخشی از ذرات کروی با نانوسیم‌ها می‌تواند تحمل کند [۳۸].

شکل ۲-۱۰: آزمون ته‌نشینی سیالات MR را نشان می‌دهد. درصد ته‌نشینی هر دو سیال MR دارای دو ترکیب و مرسوم به عنوان مقایسه مشخص شده است.

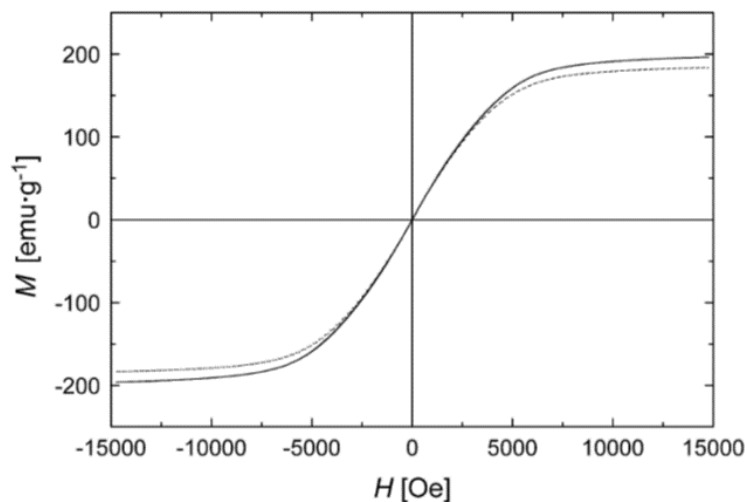


شکل ۲-۱۰: درصد ته‌نشینی به عنوان تابعی از زمان برای سیال MR حاوی نرخ‌های وزنی مختلف از نانوسیم‌ها [۳۷]

همان‌طور که در شکل مشخص شده است سیالات MR حاوی نانوسیم‌ها کاهش ته‌نشینی را تا زمانی که به تعادل برسند نشان می‌دهد. این اختلاف ته‌نشینی بین دو نوع سیال MR می‌تواند به‌طور عمده به نفوذ نانوسیم‌ها مربوط می‌شود، زیرا شبکه‌های پیچیده ایجاد شده حرکت سیم‌ها و ذرات را محدود می‌کنند. علاوه بر این، اصطکاک جامد نیز پاسخگوی بهبود میزان ته‌نشینی می‌باشد.

۲-۲-۵- پوشش دهی ذرات مغناطیسی

در تحقیقی دیگر از طریق پوشش دهی ذرات به اصلاح ته‌نشینی ذرات پرداخته شده است [۳۹]. ابتدا سطح ذرات کربونیل با سنتز دومرحله‌ای اصلاح شده است و سپس با گروهی از کلسترول‌ها پوشش داده شده است. خواص مغناطیسی هر دو ذرات کربونیل بدون پوشش و با پوشش در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. ذرات پوشش داده شده با کلسترول اشباع مغناطیسی کمی کمتر در مقایسه با ذرات بدون پوشش به علت یک‌لایه متراکم از گروه‌های کلسترول روی سطح ذرات را نشان می‌دهند.

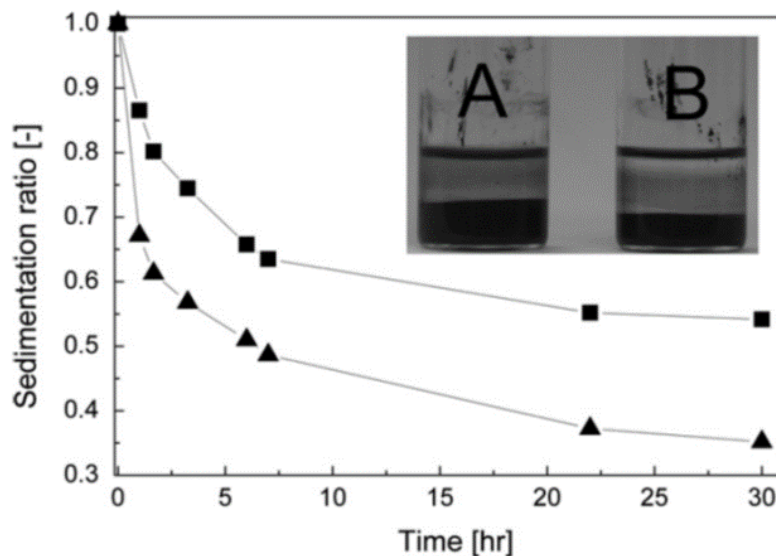


شکل ۲-۱۱: منحنی مغناطیسی ذرات کربونیل بدون پوشش (خط توپر) و ذرات پوشش داده شده (خطوط بریده‌بریده)

[۳۹]

شکل ۲-۱۲ میزان ته‌نشینی دو نوع سیال MR را نشان می‌دهد. میزان ته‌نشینی ذرات پوشش داده شده کندتر از ذرات بدون پوشش می‌باشد. افزایش پایداری ذرات با پوشش کلسترول می‌تواند به

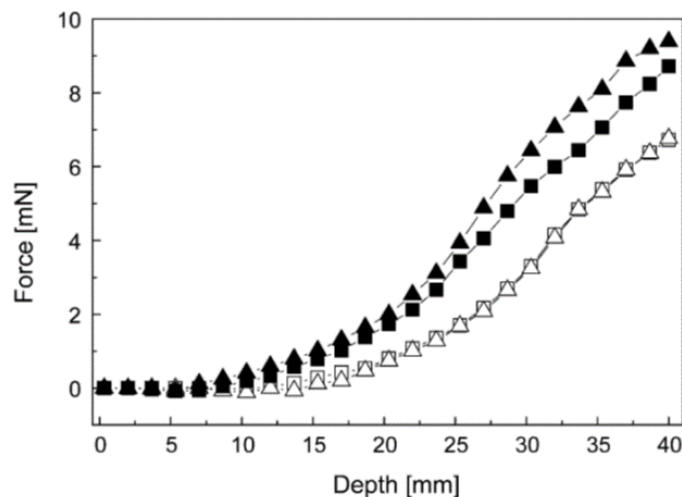
دلیل افزایش پراکندگی ذرات پوشش داده شده در روغن سیلیکون و کاهش چگالی آن‌ها باشد.



شکل ۲-۱۲: ته‌نشینی سوسپانسیون حاوی ۴۰ درصد وزنی از ذرات بدون پوشش (اندازه‌گیری شده با نماد ▲) و

ذرات با پوشش کلسترول (اندازه‌گیری شده با نماد ■) در روغن سیلیکون در دمای اتاق [۳۹]

هنگامی که ذرات پس از دوره زمانی ته‌نشین می‌شوند توانایی دوباره پراکنده شدن آن‌ها مهم است. عامل کلیدی در طراحی سوسپانسیون‌های MR سفتی کم ذرات رسوب شده است به طوری که با تکان ملایم دوباره پراکنده شود. همان‌طور که در شکل ۲-۱۳ دیده می‌شود نیروی نفوذ برای سوسپانسیون‌های حاوی ذرات پوشش داده شده و ذرات بدون پوشش که به‌تازگی ساخته شده‌اند تقریباً یکی است. از سویی دیگر، زمانی که این اندازه‌گیری بعد از ۵ روز انجام می‌شود، نیروی نفوذ برای ذرات کربونیل بدون پوشش خیلی بیشتر از ذرات پوشش داده شده است. از این‌رو ذرات پوشش داده شده با کلسترول باعث کاهش سفتی رسوبات می‌شود.



شکل ۲-۱۳: وابستگی نیروی نفوذ در برابر عمق برای سوسپانسیون‌های حاوی ۰.۴٪ وزنی از ذرات کربونیل بدون پوشش (▲ ▲) و پوشش‌دار (■ □) در روغن سیلیکون و دمای اتاق، برای سوسپانسیون‌هایی که تازه آماده شده‌اند (نمادهای توخالی) و سوسپانسیون‌هایی که بعد از ۵ روز اندازه‌گیری شده (نمادهای توپر) [۳۹]

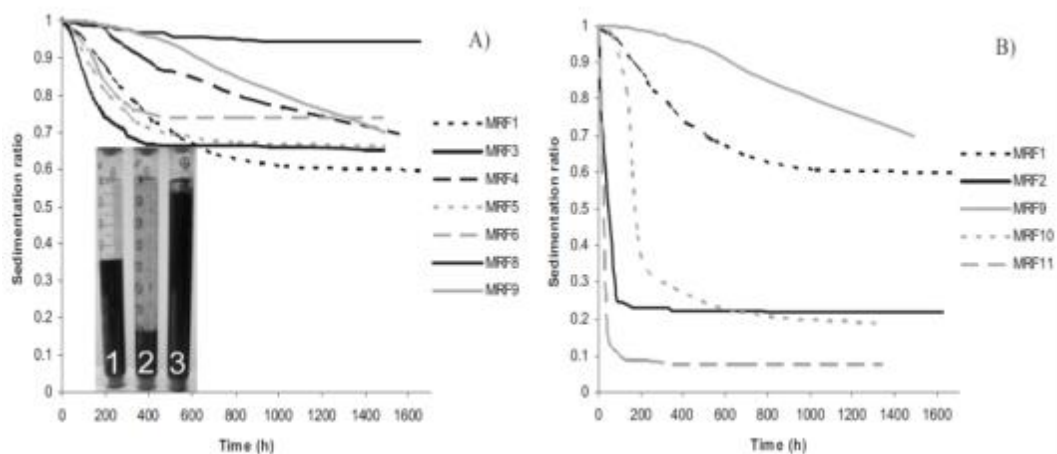
سوسپانسیون‌های حاوی ذرات پوشش داده‌شده با کلسترول در شرایط بدون اعمال میدان مغناطیسی ویسکوزیته پایین‌تری را به دلیل سازگاری بیشتر این ذرات با روغن سیلیکون از خود نشان می‌دهند. شدت اثر مگنتوزئولوژیکال در سوسپانسیون حاوی ذرات پوشش‌دار کمتر است ولی با سوسپانسیون ذرات بدون پوشش قابل‌رقابت است. این موضوع بیان می‌کند که امکان استفاده در کاربردهای واقعی از سوسپانسیون حاوی ذرات پوشش‌دار کمی کمتر از ذرات بدون پوشش است اما هنوز در کاربردهای واقعی امکان‌پذیر است.

۲-۲-۶- استفاده از مایعات یونی به‌عنوان سیال حامل

در تحقیق دیگری از مایعات یونی به‌عنوان سیال حامل برای پراکندگی ذرات در سوسپانسیون MR و جلوگیری از ته‌نشینی ذرات استفاده شده است [۴۰]. بر این اساس سیالات MR با مایعات حامل یونی مختلفی تهیه شده است.

شکل ۲-۱۴ (A) نتایج اندازه‌گیری ته‌نشینی سیالات MR موجود را نمایش می‌دهد. نرخ ته‌نشینی کمتری برای سیالات حاوی ۰.۲۵٪ وزنی ذرات میکرو سایز مشاهده می‌شود. با توجه به این نتایج سیال

MRF3 پایداری عالی را در مقابل تهنشینی با نرخ تهنشینی ۰,۹۵، بیش از یک دوره زمانی ۱۶۸۰ ساعت را نشان می‌دهد. دلیل اینکه چرا سیال MRF3 پایداری متمایزی در برابر تهنشینی دارد هنوز مورد تحقیق است. با این حال، تصور می‌شود که این مشاهده می‌تواند مربوط به خواص شیمیایی مایع یونی استفاده شده برای تهیه سوسپانسیون MRF3 و نزدیکی آن به مواد مغناطیسی مورد بررسی است. وابستگی بالای مایعات یونی به ذرات مغناطیسی پراکنده شده ممکن است دافعه الکترواستاتیکی مناسبی را روی سطوح ذرات فراهم کند تا آن‌ها را برای مدت زمان قابل توجهی معلق نگه دارد. تأثیر غلظت ذرات مغناطیسی و اندازه آن‌ها بر پایداری ذرات به صورت مختصر مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج به دست آمده در شکل ۲-۱۴ (B) نشان داده شده است. با توجه به تأثیر اندازه ذرات، شکل ۲-۱۴ (B) نشان می‌دهد سیال MRF2 که از نانو ذرات مغناطیسی پراکنده شده در سیال یونی است میزان تهنشینی سریع‌تری را دارد. زمانی که ذرات در مقیاس میکرو استفاده می‌شود، در همان غلظت و در همان سیال حامل، پایداری ذرات به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد (به عنوان مثال MRF1). استفاده از ذرات در محدوده نانو باعث تجمع ذرات می‌شود. با توجه به اثر غلظت ذرات بر روی پدیده تهنشینی شکل ۲-۱۴ (B) رابطه معکوس بین محتوای ذرات و نرخ تهنشینی را نشان می‌دهد. این موضوع به خاطر این واقعیت است که اثر متقابل بین ذرات در غلظت‌های بالاتر قوی‌تر است و سرعت تهنشینی ذرات کاهش می‌یابد. برای نمونه، MRF9 (حاوی ۲۵ درصد وزنی میکرو ذرات پراکنده شده در سیال یونی) نرخ تهنشینی کمتری را از MRF11 (۲ درصد وزنی میکرو ذرات پراکنده شده در همان سیال یونی) نشان می‌دهد. به طور خلاصه شکل ۲-۱۴ (A) نشان می‌دهد که استفاده از سیال یونی به عنوان سیال حامل در پراکندگی ذرات مغناطیسی با اندازه میکرو متر امکان تهیه سیال MR با خواص پایداری بهبود یافته را در نبود مواد افزودنی ضد تهنشینی را فراهم می‌کند (حداقل تحت شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی).



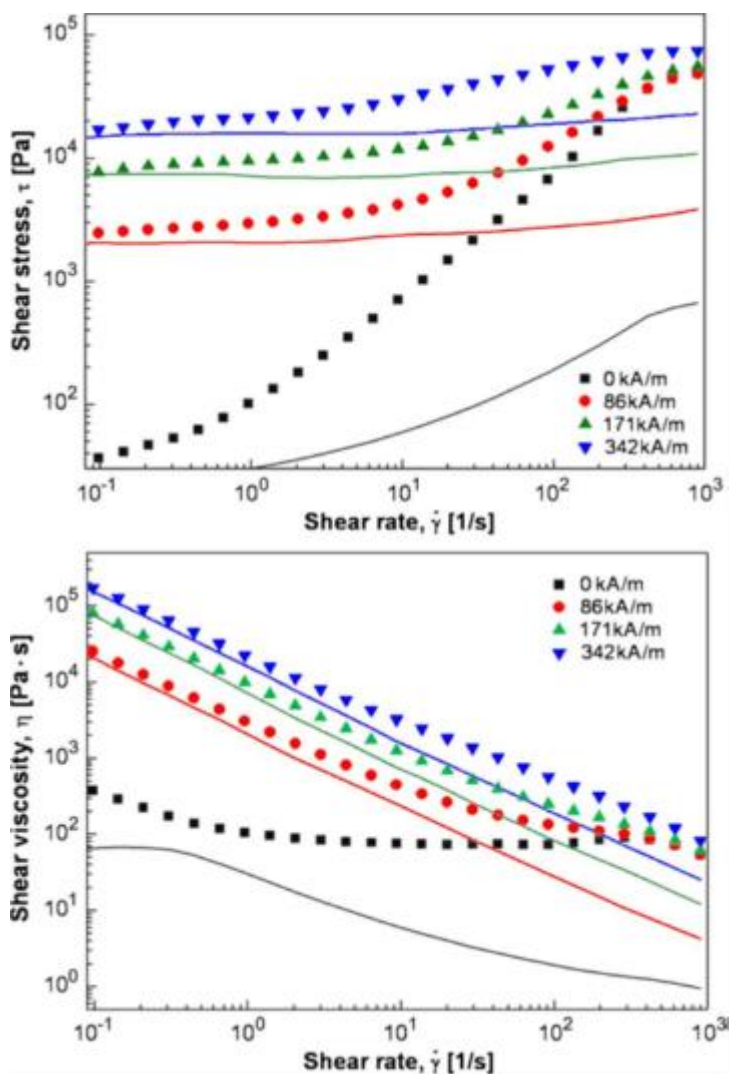
شکل ۲-۱۴: A, B) اندازه‌گیری ته‌نشینی سیالات MR، به ترتیب سیال MR با نرخ‌های ته‌نشینی پایین و سیال MR با نرخ‌های ته‌نشینی بالا. تصویر درج‌شده (A) اندازه‌گیری‌ها را پس از ۱۶۸۰ ساعت نمایش داده است. اعداد ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به MRF1، MRF2 و MRF3 مربوط می‌شوند [۴۰].

۲-۲-۷- استفاده از یک نوع ترکیب پلیمری

در تحقیق دیگری از یک ترکیب پلیمری به سیال حامل به‌جای روغن‌های در ترکیب سیال MR مرسوم استفاده‌شده است [۴۱]. برای واسطه پلیمری ویسکوالاستیک (سیال حامل) یک ترکیب با وزن مولکولی بالای پلی ایزوبوتیلن (PIB) و با وزن مولکولی پایین پلی بوتیلن (PB) استفاده‌شده است. هپتان به‌عنوان یک حلال خوب برای PIB و PB در نظر گرفته‌شده است. در ابتدا یک مقدار کم از PIB (۲۵٪ وزنی) در هپتان با استفاده از یک همزن مغناطیسی به مدت دو روز در دمای اتاق حل‌شده است. سپس این ترکیب با PB (۹۹٫۷۵٪ وزنی) در دمای اتاق به مدت ۲ روز مخلوط شد. سپس ذرات کربونیل در محلول PIB/PB با سرعت‌پایین همزن برای مخلوطی مناسب بدون تخریب مولکولی زنجیره طولانی پراکنده شدند. درنهایت، برای سیال ویسکوالاستیک MR مبتنی بر PIB / PB، هپتان در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل بر روی کوره خلأ حذف شد.

سیال MR مبتنی بر PIB / PB دارای تنش برشی بالاتر و ویسکوزیته برشی بالاتری نسبت به مایعات MR مبتنی بر روغن و ذرات کربونیل (CI) در کل محدوده نرخ برشی است. در مقایسه با مقدار تنش برشی با یک میدان مغناطیسی، هر دو سیال MR مقدار مشابه از تنش تسلیم و تنش برشی را در

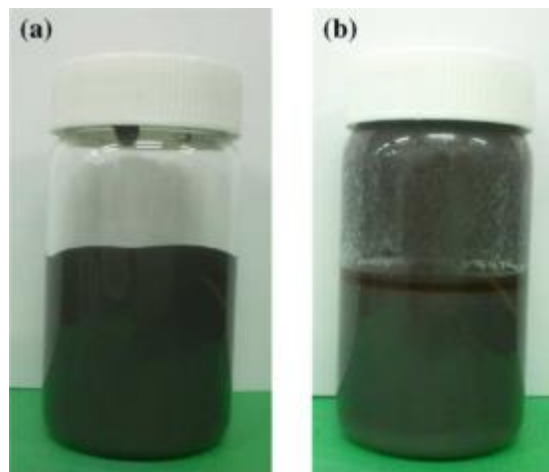
نرخ برشی پایین نشان دادند. باین حال، سیال ویسکوالاستیک CI-PIB / PB نشان دهنده تنش برشی نسبتاً بالاتری نسبت به سیال MR مبتنی بر روغن مایع و ذرات در محدوده نرخ برشی بالا است. این مشاهدات به علت قابلیت ارتجاعی محلول PIB / PB است که در آن قابلیت ارتجاعی بالا باعث افزایش مقاومت سیال در برابر جریان برشی می شود.



شکل ۲-۱۵: (a) تنش برشی به عنوان تابعی از نرخ برش. (b) ویسکوزیته برشی به عنوان یک تابع از نرخ برش برای سیال ویسکوالاستیک MR مبتنی بر CI-PIB / PB (نقاط) و سیال MR مبتنی بر روغن و ذرات کربونیل (خطوط) تحت نیروهای مختلف میدان مغناطیسی [۴۱]

ته نشینی سیال ویسکوالاستیک MR مبتنی بر CI-PIB / PB با قرار دادن آن بر روی یک میز صاف به

مدت یک ماه بررسی شده است. تصویر شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است که سیال ویسکوالاستیک MR مبتنی بر CI-PIB / PB ته نشینی ندارد. حتی پس از مدت زمان طولانی، ذرات کربونیل هنوز در ترکیب PIB / PB معلق هستند، زیرا ترکیب PIB / PB نقش مهم ترکیب با الاستیسیته بالا را بازی می کند. توجه داشته باشید که روغن معمولی سیال MR اغلب باعث مشکل ته نشینی جدی می شود. در این مطالعه مشخص شده است که ترکیب ویسکوالاستیک PIB / PB نه تنها به ذرات CI کمک می کند تا زنجیره های پایدار را در میدان مغناطیسی ایجاد کنند، بلکه باعث کمینه شدن ته نشینی سیالات مرسوم MR می شود.



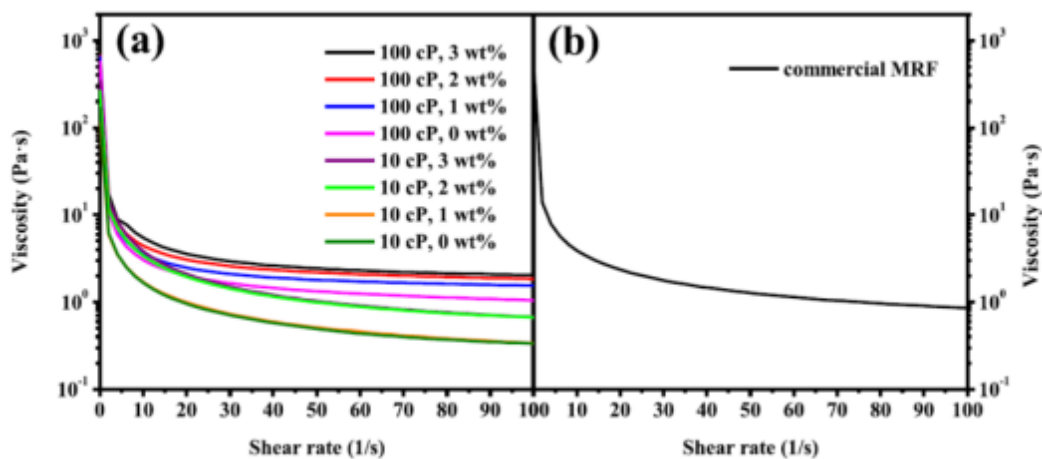
شکل ۲-۱۶: تصویر ذرات کربونیل پراکنده شده در PIB/PB: قبل (a) و بعد از یک ماه (b) [۴۱].

۲-۲-۸- استفاده از کربن نانولوله ای چند جهته و افزودنی سیلیکا

در تحقیقی جدید گزارش شده است که یک روش ساده و ضد ته نشینی ذرات برای ساخت سیال MR ارائه شده است. در این مطالعه از کربن نانولوله ای چند جهته^۱ (MWCNTs) و ذرات آهن کربونیل (CI) به عنوان ماده مغناطیسی، روغن سیلیکون به عنوان سیال حامل و سیلیکا فومی به عنوان افزودنی استفاده شده است [۴۲]. برای ساخت سیال MR از کربن نانولوله ای چند جهته و ذرات آهن کربونیل در روغن سیلیکون با ۰، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی از سیلیکا فومی پراکنده شدند. مشاهدات اشباع مغناطیسی

^۱ Multi Walled Carbon Nanotubes

ذرات کربونیل خالص و ذرات کربونیل همراه با کربن نانولوله‌ای چند جهته به ترتیب ۲۱۳ و ۲۰۶ (emu/g) است و در نتیجه اشباع مغناطیسی این دو ترکیب یکسان است. ویسکوزیته با افزایش غلظت فوم سیلیکا افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است ویسکوزیته 629 Pa.s سیالات MR تجاری در نرخ برش اولیه 0.01 1/s بیشتر از سیالات MR مبتنی بر کربن نانولوله‌ای چند جهته، آهن کربونیل و روغن سیلیکون 10 cP با سیلیکا فومی (۱، ۲، ۳ درصد وزنی که در آن ویسکوزیته به ترتیب ۱۵۰، ۲۶۸،۹ و ۳۵۱ Pa.s) است و کمتر از سیالات MR مبتنی بر کربن نانولوله‌ای چند جهته، آهن کربونیل و روغن سیلیکون 100 cP با سیلیکا فومی (۱، ۲، ۳ درصد وزنی که در آن ویسکوزیته به ترتیب ۶۶۷،۵، ۶۸۶،۵ و ۷۳۰ Pa.s) است. به علاوه، ویسکوزیته 0.85 Pa.s سیالات MR تجاری در نرخ برش 100 1/s بیشتر از سیالات MR مبتنی بر کربن نانولوله‌ای چند جهته، آهن کربونیل و روغن سیلیکون 10 cP با سیلیکا فومی (۱، ۲، ۳ درصد وزنی که در آن ویسکوزیته به ترتیب ۰،۳۳۸، ۰،۶۶۴ و ۰،۶۷۱ Pa.s) است و کمتر از سیالات MR مبتنی بر کربن نانولوله‌ای چند جهته (MWCNTs)، آهن کربونیل و روغن سیلیکون 100 cP با سیلیکا فومی (۱، ۲، ۳ درصد وزنی که در آن ویسکوزیته به ترتیب ۱،۵۴۴، ۱،۸۴۳ و ۲،۰۴۰ Pa.s) است. بنا بر توضیحات بالا سیال MR مبتنی بر کربن نانولوله‌ای چند جهته، آهن کربونیل و روغن سیلیکون 10 cP نسبت به سیالات MR تجاری ویسکوزیته مناسبی برای کاربردها دارد. از طرفی تنش برشی سیال MR مبتنی بر کربن نانولوله‌ای چند جهته، آهن کربونیل و روغن سیلیکون 10 cP با سیلیکا فومی (۱، ۲، ۳ درصد وزنی) (یا روغن سیلیکون 100 cP با سیلیکا فومی (۱، ۲، ۳ درصد وزنی) نسبت به سیال تجاری MR بیشتر است.

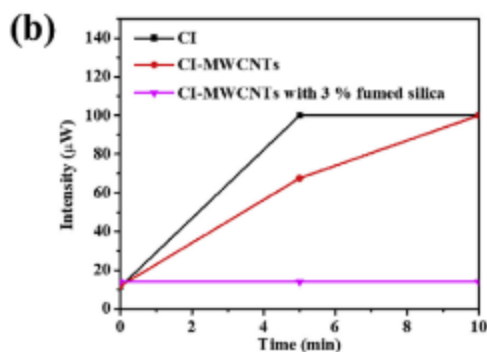
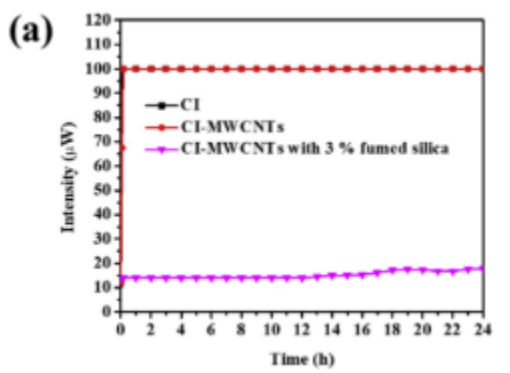


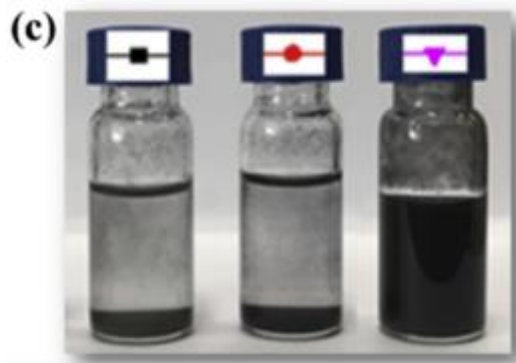
شکل ۲-۱۷: (a) منحنی تنش برشی CI-MWCNT ها مبتنی بر روغن سیلیکون 10 cP (یا 100 cP) با

سیلیکا فومی ۱، ۲، و ۳ درصد وزنی، و (b) سیال MR تجاری [۴۲]

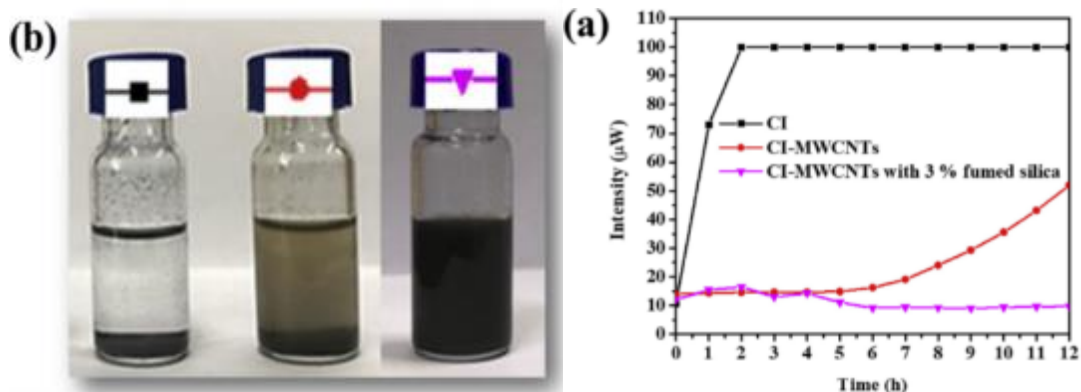
به طور کلی، مشاهده شده است که افزودن سیلیکا فومی به بهبود چگالی روغن سیلیکون به عنوان یک مایع حامل کمک کرده و بین چگالی مواد مغناطیسی و مایع حامل را تعادل بخشید. تست پدیده ته نشینی با استفاده از پرتو لیزر انجام شده است. سوسپانسیون ذرات به یک نمونه شیشه‌ای استوانه منتقل شده و با پرتو لیزر آنالیز شده است. شدت پرتو لیزری که از نمونه عبور می‌کند توسط یک سنسور دریافت می‌شود. بنابراین، شدت کم برای سوسپانسیون ذرات مطابق با پراکنش کم و پایداری بیشتر نمونه است. در ابتدا تمام سوسپانسیون‌ها شدت کمی را بین ۱۰ تا ۱۵ (μW)، به علت حالت پراکندگی مشابه، نشان داده‌اند. سپس گذشت زمان به تدریج شدت پرتو لیزر افزایش می‌یابد (شکل ۲-۱۸ و ۲-۱۹). مشاهده شده است که سوسپانسیون ذرات کربونیل مبتنی بر روغن سیلیکون 10 cP در ۵ دقیقه به طور قابل توجهی بیشتر از سوسپانسیون CI-MWCNTs (یا CI-MWCNTs با ۳ درصد وزنی سیلیکا فومی) می‌باشد، این موضوع به این دلیل است که چگالی ذرات کربونیل به وسیله‌ی MWCNT ها کاهش نمی‌یابد. علاوه بر این، در ۱۰ دقیقه شدت سوسپانسیون CI-MWCNTs افزایش یافته است، این موضوع نیز به این دلیل است که چگالی روغن سیلیکون به عنوان سیال حامل توسط سیلیکا فومی همان طور که در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است، بهبودی نیافته است. از طرف دیگر، نرخ ته نشینی

ذرات کربونیل خالص از موارد دیگر به دلیل این که به وسیله ی MWCNTs و سیلیکا فومی بهبود نیافته است، زیادتر است. ته نشینی مواد مغناطیسی در پایین در شکل ۲-۱۸ (c) نشان داده شده است. شدت لیزر CI-MWCNT ها با سوسپانسیون سیلیکا فومی با مقدار ۱۴ μW بین ۰ تا ۱۲ باقی مانده است. علاوه بر این، این مقدار در ۱۳ ساعت به آرامی افزایش یافته و بین ۱۴,۴ تا ۱۷,۷ μW باقی مانده است، که نشان می دهد سوسپانسیون خواص ضد ته نشینی بهتری دارد و همان طور که در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است حالت پراکندگی همگن را نشان می دهد. با توجه به شکل ۲-۱۹، سوسپانسیون مبتنی بر روغن سیلیکون ۱۰۰ cP روند مشابهی را نشان داده است. شدت لیزر برای سوسپانسیون مبتنی بر ذرات کربونیل به طور قابل توجهی بالاتر از CI-MWCNTs (یا CI-MWCNTs با ۳ درصد وزنی سیلیکا فومی) در ۲ ساعت است. علاوه بر این، شدت لیزر برای سوسپانسیون مبتنی بر CI-MWCNT ها به آرامی در عرض ۵ ساعت افزایش یافته است و سوسپانسیون CI-MWCNT ها با ۳ درصد وزنی سیلیکا فومی با شدت لیزر کمتری بین ۹ تا ۱۶,۵ μW حفظ می شدند. از سوی دیگر، نرخ ته نشینی ذرات کربونیل خالص مبتنی بر روغن سیلیکون ۱۰۰ cP کمتر از ذرات کربونیل بر پایه روغن سیلیکون ۱۰ cP است زیرا لزجت بالاتر روغن سیلیکون ۱۰۰ cP پایداری سوسپانسیون را بهبود می بخشد. با توجه به این توضیحات سیال MR مبتنی بر ذرات کربونیل می تواند به وسیله ی MWCNT ها و سیلیکا فومی پایدار شوند.





شکل ۲-۱۸: (a) شدت انرژی لیزر به عنوان تابعی از زمان برای پودر کربونیل خالص (مربع مشکی)، CI-MWCNT ها (دایره قرمز) و CI-MWCNT ها با ۳ درصد وزنی سیلیکا فومی (مثلث روبه پایین بنفش) بر پایه روغن سیلیکون ۱۰ cP، زمان بین ۰ تا ۱۰ دقیقه، و (c) تصویر نمونه‌های حقیقی [۴۲].



شکل ۲-۱۹: (a) شدت انرژی لیزر به عنوان تابعی از زمان برای پودر کربونیل خالص (مربع مشکی)، CI-MWCNT ها (دایره قرمز) و CI-MWCNT ها با ۳ درصد وزنی سیلیکا فومی (مثلث روبه پایین بنفش) بر پایه روغن سیلیکون ۱۰۰ cP، زمان بین ۰ تا ۱۰ دقیقه، و (c) تصویر نمونه‌های حقیقی [۴۲].

۲-۳- معرفی تحقیق حاضر

همان‌طور که در فصل اول نیز اشاره شد، سیال MR کاربردهای فراوانی در صنعت، به‌ویژه صنعت خودروسازی دارد. با وجود گذشت سالیان طولانی از کشف این نوع از سیالات، هنوز مشکلاتی در کاربرد این نوع از سیالات وجود دارد. مشکل عمده در راه استفاده گسترده از سیالات مگنتورئولوژیکال، ناپایداری این نوع سیالات به دلیل تفاوت زیاد چگالی ذرات مغناطیسی با سیال حامل می‌باشد به طوری که پس از زمان مشخصی منجر به ته‌نشینی ذرات و به تبع آن تشکیل زنجیره ناقص از این ذرات تحت میدان

مغناطیسی می‌شود. برای حل این مشکل راه‌کارهایی ارائه شده است که تقریباً عمده‌ی این راه‌کارها منجر به افزایش بیش‌ازحد ویسکوزیته سیال MR می‌شود. یکی دیگر از مشکلات این نوع از سیالات عدم پراکندگی دوباره در محلول پایه می‌باشد. به‌طوری‌که پس از مدت طولانی و ته‌نشینی ذرات، امکان پراکندگی دوباره ذرات در محلول پایه به‌سختی صورت می‌گیرد.

در تحقیق حاضر به بررسی اثر شبکه میسل‌های کرمی شکل بر پایداری سیال MR و سایر خصوصیات این سیال مانند: ویسکوزیته در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی، تنش تسلیم و... پرداخته شده است.

در این تحقیق محلول پایه سیال MR از ماده‌ی لسیتین، روغن هیدرولیک و آب تشکیل شده است و پس از تهیه محلول پایه پودر آهن با درصد وزنی ۶۵٪ به محلول اضافه می‌شود.

هدف از انجام تحقیق حاضر بهبود پایداری سیال MR و همچنین خاصیت پراکندگی مجدد آن بدون افزایش بیش‌ازحد ویسکوزیته سیال در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد. علت تأکید بر روی پایین بودن ویسکوزیته سیال MR در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی، کاربرد این سیال در دمپر مغناطیسی می‌باشد به‌طوری‌که با افزایش ویسکوزیته در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی، عملاً امکان استفاده از این نوع سیال وجود ندارد.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای از اثر شبکه میسل‌های کرمی شکل بر روی سیال MR انجام نشده است، بنابراین مطالعه این موضوع اهمیت فراوانی دارد.

۳- فصل سوم: روش ساخت سیال MR

۳-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل دوم مشاهده شد تمامی سیال‌های MR شامل یک محلول پایه که حاوی سیال حامل و مواد افزودنی برای بهبود خصوصیات پایداری و مغناطیسی سیال MR می‌باشند. مواد افزودنی باید به‌گونه‌ای باشد که سیال MR پس از مدت طولانی و ته‌نشینی پودر آهن کربونیل خاصیت از نو پراکندگی^۱ یا به‌اصطلاح قابلیت هم زدن محلول وجود داشته باشد. با توجه به این توضیحات ساخت سیال MR شامل دو مرحله‌ی تهیه‌ی محلول پایه و تهیه‌ی سوسپانسیون MR می‌باشد. در ادامه توضیحاتی در مورد سورفکتانت‌ها، تشکیل شبکه میسل‌های کرمی شکل (wormlike micelles) و همچنین تست مکانیکی دینامیک^۲ (پویا) (DMA) برای درک بهتر نتایج فصل چهارم، ارائه می‌شود.

۳-۲- ویسکوالاستیک

اکثر مواد منحصرًا لزج نیستند و اغلب رفتارهای الاستیک (کشسان) قابل توجهی دارند. این مواد به‌عنوان مواد ویسکوالاستیک نامیده می‌شوند و پارامتر کلیدی زمان تعیین می‌کند که رفتار لزج و یا الاستیک غالب است [۴۳].

از این‌رو در تغییر شکل یا فرآیند جریان کند، رفتار لزج غالب است، درحالی‌که در یک فرآیند زمان کوتاه، رفتار ماده عمدتاً الاستیک است. اینکه یک فرآیند سریع یا آهسته است بستگی به یک‌زمان مشخصه داخلی مواد دارد.

یک ماده به‌عنوان یک مایع لزج شناخته می‌شود اگر relaxation time ماده (زمان بازگشت یک سیستم تحریک‌شده به تعادل) در مقایسه با زمان فرآیند تغییر شکل بسیار کوتاه باشد.

رابطه بین relaxation time و زمان فرآیند تغییر شکل ماده به‌وسیله‌ی عدد دبرا^۳ و به دست می‌-

¹ redisperse

² dynamic mechanical analysis

³ Deborah

آید.

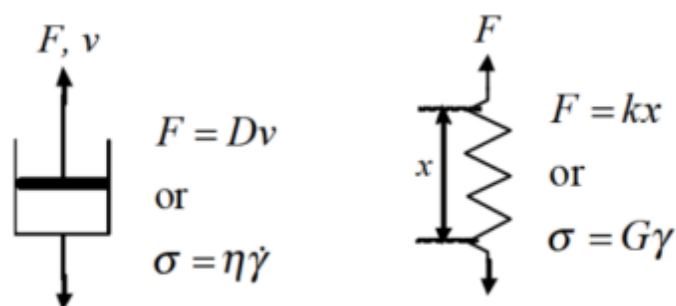
$$D_e = \lambda/T \quad (1-3)$$

که λ مقدار relaxation time و T زمان مشخصه فرآیند تغییر شکل ماده است.

اگر فرآیند تغییر شکل ماده سریع تر از فرآیند relaxation باشد، ماده الاستیک ظاهر خواهد شد (عدد دبرا بالا) و برعکس این موضوع بخش ویسکوز غالب خواهد شد (عدد دبرا پایین). اندازه گیری ناحیه الاستیک اطلاعاتی در مورد ساختار داخلی مواد، به عنوان مثال ساختار مولکولی یا فیزیکی (مورفولوژی) مواد ارائه می دهد، در ناحیه ویسکوز اطلاعات مربوط به رفتار جریان برای مثال اکستروژن، مخلوط کردن، پمپاژ و غیره به دست می آید.

۳-۳- مدل های مکانیکی برای تشریح ویسکوالاستیسیته

مواد ویسکوالاستیک می توانند هر دو رفتار لزج و الاستیک را نشان دهند. بنابراین آن ها را می توان به عنوان ترکیبی از هر دو نوع مواد ایدئال مشاهده کرد: مایعات کاملاً لزج و جامدات الاستیک ایده آل. ویژگی های یک ماده کاملاً چسبناک می تواند در یک آزمایش جریان ساده مشخص شود.



شکل ۳-۱: مدل دمپر سیال کاملاً لزج و مدل فنر یک بدنه الاستیک ایده آل را توصیف می کند [۴۳]

تغییر فرم مواد در یک نرخ ثابت از تنش اعمال شده، ثابت است و به وسیله ی یک رابطه ساده که به عنوان قانون نیوتن شناخته شده است توصیف می شود. چنین سیالاتی به عنوان سیالات نیوتنی شناخته می شوند

و ثابت مواد به‌عنوان ویسکوزیته نیوتونی نامیده می‌شود. تغییر شکل برای سیالات نیوتونی غیرقابل برگشت است. این نوع از سیالات به‌وسیله‌ی مدل دمپر مشخص می‌شوند.

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (2-3)$$

برای یک ماده جامد الاستیک (به‌عنوان مثال یک فنر فولادی یا لاستیک) یک رابطه خطی ساده بین تنش و کرنش وجود دارد. این مواد بلافاصله هنگامی که در معرض یک تنش ناگهانی قرار می‌گیرند دچار تغییر شکل می‌شوند و تا زمانی که تنش حذف شود کرنش ثابت باقی می‌ماند. هیچ اتلاف انرژی وجود ندارد و جسم جامد به شکل اصلی خود بازمی‌گردد (تغییر شکل کاملاً برگشت‌پذیر است). ثابت یک ماده مدول آن ماده است. معادله مربوط به تنش و کرنش به‌عنوان قانون هوک شناخته می‌شود. این نوع مواد به‌وسیله‌ی یک فنر نشان داده می‌شوند.

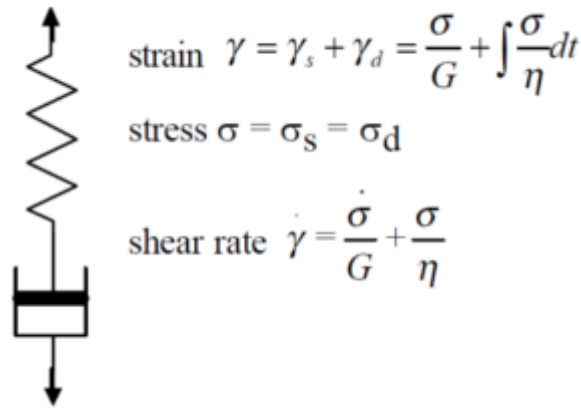
$$\sigma = G \cdot \gamma \quad (3-3)$$

قوانین نیوتن و هوک دو حالت را نشان می‌دهند. با این حال، اکثر مواد برخی از ویژگی‌های هر دو رفتار ویسکوز و الاستیک را نشان می‌دهند و می‌توان آن را با ترکیب فنرها و دمپرها به‌صورت موازی و یا به‌صورت سری توصیف کرد. این مدل‌های مکانیکی ساختار واقعی یک ماده را نشان نمی‌دهند، بلکه یک چارچوب فیزیکی برای توصیف رفتار کلی مایعات ویسکولاستیک ارائه می‌دهند. ساده‌ترین مدل‌ها مدل ماکسول و کلوین است.

۳-۳-۱- مدل ماکسول

مدل ماکسول یک فنر و دمپر است که در حالت سری قرار گرفته است (شکل ۳-۲). در این مدل تنش اعمال‌شده برای هر جزء یکسان است، کرنش به‌صورت افزایشی است. اگر یک کشش ثابت (آزمایش *relaxation*) به این مدل اعمال شود، تنش فوراً به یک مقدار حداکثر که به‌وسیله‌ی مدول الاستیسیته تعیین می‌شود، افزایش می‌یابد و سپس به‌صورت نمایی به صفر می‌رسد. این که به چه میزان تنش سریع

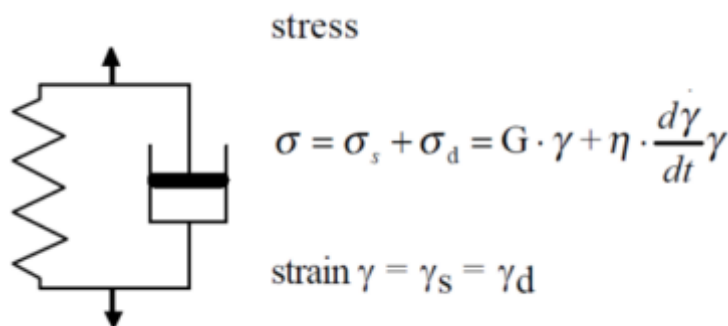
به صفر می‌رسد به وسیله‌ی *relaxation time* به دست می‌آید ($t = G/h$).



شکل ۳-۲: مدل ماکسول متشکل از فنر و دمپر به صورت سری [۴۳]

۳-۲-۳-۲- مدل کلویین

مدل کلویین متشکل از فنر و دمپر به صورت موازی می‌باشد (شکل ۳-۳). کرنش برای این مدل برای هر دو جزء است، درحالی‌که تنش افزایشی است. اگر یک تنش ثابت اعمال شود ابتدا دمپر کل بار را می‌گیرد و مدل با حداکثر نرخ تغییر فرم می‌دهد. همان‌طور که تغییر شکل افزایش می‌یابد، سهم فنر به کل تنش افزایش می‌یابد و نرخ تغییر شکل به‌طور نمایی به صفر می‌رسد (تغییر شکل به حداکثر مقدار خود می‌رسد). در این مرحله، فنر کل تنش اعمال‌شده به مدل را تحمل می‌کند. این‌که به چه میزان تنش سریع به صفر می‌رسد به وسیله‌ی *relaxation time* به دست می‌آید ($\tau = G/\eta$).

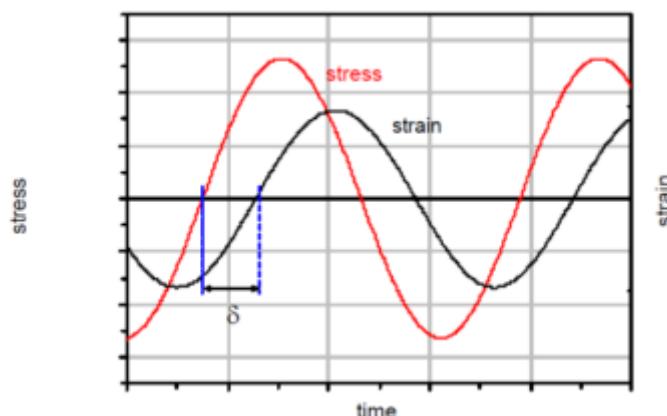


شکل ۳-۳: مدل کلویین متشکل از فنر و دمپر به صورت موازی [۴۳]

۳-۴- تست مکانیکی دینامیک (پویا) (DMA)

در یک اندازه‌گیری نوسانی مواد تحت فشار یا کشش سینوسی قرار می‌گیرند و پاسخ کرنش یا تنش اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳-۴). تحلیل مکانیکی پویا (DMA) به‌طور هم‌زمان هر دو پاسخ الاستیسیته و ویسکوز مواد را تحلیل می‌کند. در این نوع آزمایش یک موتور برای اعمال تنش یا کرنش سینوسی به یک ماده (در حالت تنش، خمش یا برش) استفاده می‌شود و تنش حاصل با یک مبدل نیرو اندازه‌گیری می‌شود و یا نتایج کرنش با یک سنسور موقعیت اندازه‌گیری می‌شود.

رفتار رئولوژیکی مواد را می‌توان به‌صورت تابع زمان، دما، کرنش یا دامنه و فرکانس تنش اندازه‌گیری کرد. نتایج به‌دست‌آمده حاوی اطلاعاتی درباره خواص ساختاری نمونه مانند وزن مولکولی، غلظت، چگالی برای پلیمرها یا اندازه، شکل و خواص سطوح مشترک ذرات برای مایعات چندفازی است. این اطلاعات در توسعه محصول (فرموله سازی) برای پیش‌بینی عملکرد محصول و رفتار مواد جدید یا اصلاح‌شده مهم است. رفتار رئولوژیکی عمومی در یک آزمایش نوسانی می‌تواند با مدل ماکسول توصیف شود. در استفاده از تنش سینوسی، فنر بلافاصله گسترش می‌یابد. باین‌حال، دمپر تغییر شکل کلی سیستم را به تعویق می‌اندازد. بنابراین، یک جابجایی فاز δ بین تنش و کرنش در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: سیگنال‌های تنش و کرنش در طول یک آزمایش نوسانی [۴۳]

همان‌طور که فنر به‌طور مستقیم از تنش تبعیت می‌کند، جابجایی فاز برای یک ماده الاستیک صفر است. اگر مواد تنها بر پایه دمپر باشد، تنش مستقیماً از نرخ کرنش تبعیت می‌کند و جابجایی فاز برای کرنش ۹۰ درجه می‌شود. برای یک ماده ویسکوالاستیک، جابجایی فاز برای کرنش بین ۰ و ۹۰ درجه است.

تغییر فاز δ یک مقیاس از مقدار الاستیسیته موجود در یک نمونه است. اگر یک جابجایی فاز ۴۵ درجه یا $\tan \delta = 1$ باشد، ماده به همان اندازه الاستیک و ویسکوز است. فرکانس این رویداد برای یک ماده مشخص است و بنابراین توصیف ایده‌آل از *relaxation time* ماده است ($\tau_{mat} = 1/\omega$) ($\tan \delta = 1$).

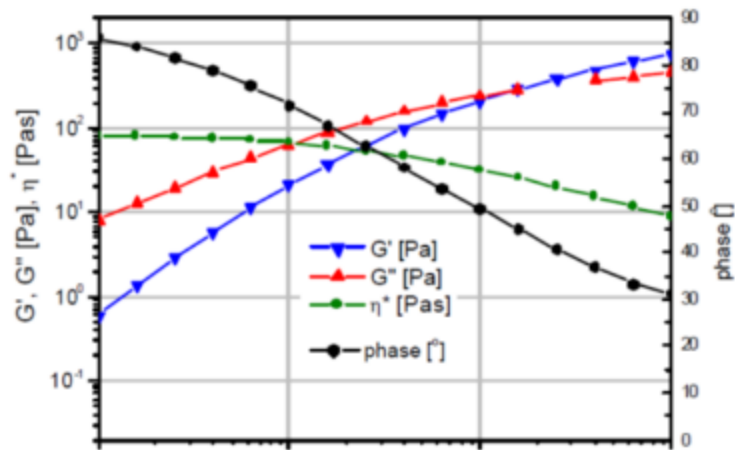
مجموعه‌ای از پارامترهای مواد را می‌توان از تنش و کرنش اندازه‌گیری شده، محاسبه کرد. اگر آزمایش در حالت برش (هندسه صفحه-صفحه یا مخروط-صفحه) انجام شود، مدول برشی (G) به دست می‌آید. آزمون‌های کشش و خمش مدول کششی (E) را اندازه‌گیری می‌کنند. در یک تست نوسانی، جابجایی فاز برای جدا کردن تنش اندازه‌گیری شده نسبت به یک مؤلفه در فاز و برای تعیین مدول الاستیسیته یا ذخیره‌سازی^۱ (G' یا E') یک ماده که به‌عنوان نسبت الاستیک (در فاز) تنش به کرنش مشخص شده، استفاده می‌شود. مدول ذخیره‌سازی مربوط به توانایی مواد برای ذخیره انرژی الاستیسیته است. به‌طور مشابه، مدول اتلاف^۲ (G'' یا E'') یک ماده نسبت لزجت جزء (خارج از فاز) به تنش است و مربوط به توانایی مواد برای از بین بردن تنش از طریق گرما است.

شکل ۳-۵ که وابستگی فرکانس G' و G'' به‌عنوان یک نتیجه از اندازه‌گیری برش نوسانی برای لزجت روغن سیلیکون ویسکوالاستیک را نشان می‌دهد. این ماده مانند یک توپ لاستیکی هنگامی که به یک سطح سخت برخورد می‌کند، بازمی‌گردد، اما اگر در حالت ساکن باقی بماند، پس از چند دقیقه

¹ storage modulus

² loss modulus

تحت تأثیر گرانش جریان می‌یابد. لطفاً به تغییر فاز را در شکل ۳-۵ توجه کنید. در فرکانس‌های بالا (که به زمان‌های کوتاه مربوط می‌شود) تغییرات فاز بسیار کم است و در فرکانس‌های بسیار پایین به ۹۰ درجه نزدیک می‌شود که نشان می‌دهد رفتار عمدتاً لزج است.



شکل ۳-۵: وابستگی فرکانس روغن سیلیکون با لزجت بالا [۴۳]

از این آزمایش می‌توان اطلاعات زیر را به دست آورد:

۳-۴-۱- Relaxation time

relaxation time (زمان بازگشت یک سیستم تحریک شده به تعادل) به وسیله‌ی رابطه $t =$

$1/(2pf)$ محاسبه می‌شود که f فرکانس زمانی است که جابجایی فاز به ۴۵ درجه می‌رسد.

۳-۴-۲- مدول ذخیره‌سازی یا الاستیک و مدول اتلاف یا ویسکوز

مدول ذخیره‌سازی اطلاعات مربوط به مقدار ساختار موجود در یک ماده را می‌دهد. این مدول نشان‌دهنده انرژی ذخیره‌شده در ساختار الاستیک نمونه است. اگر از مدول اتلاف بالاتر باشد، ماده را می‌توان عمدتاً به‌طور الاستیک مشاهده کرد، یعنی جابجایی فاز زیر ۴۵ درجه است. مدول اتلاف نشان‌دهنده بخش ویسکوز یا مقدار انرژی تلف‌شده در یک نمونه را نشان می‌دهد. مجموع مدول اتلاف و ذخیره‌سازی به اصطلاح مدول مختلط (G^*) نامیده می‌شود.

۳-۴-۳- ویسکوزیته مختلط

ویسکوزیته مختلط (η^*) رایج‌ترین پارامتر است و می‌تواند به‌طور مستقیم از مدول مختلط محاسبه شود. ویسکوزیته مختلط یک مقدار محدود در فرکانس‌های پایین است. این مقدار ویسکوزیته برشی صفر ماده است.

۳-۴-۴- دمپینگ یا اتلاف

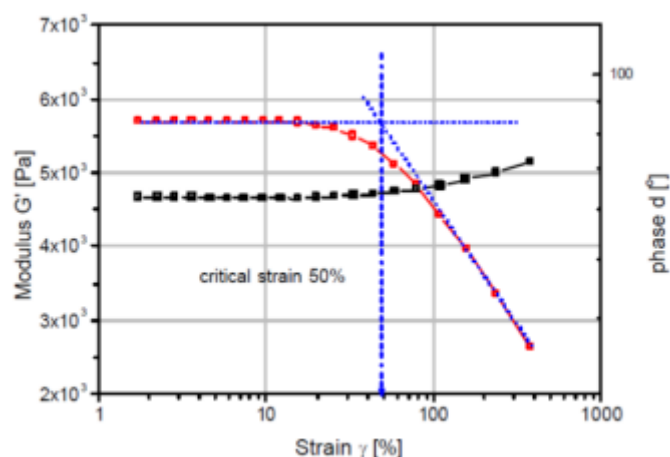
نسبت مدول (G''/G' یا E''/E') به‌صورت $\tan \delta$ تعریف می‌شود و نشان‌دهنده میزان نسبی اتلاف انرژی یا دمپینگ مواد می‌باشد.

تمام آزمایش‌های نوسانی باید در دامنه تنش یا کرنش کوچک انجام شود تا درون ناحیه به‌اصطلاح ویسکوالاستیک خطی^۱ باقی بماند. درون این ناحیه که توسط تنش (یا کرنش) بحرانی محدود شده است، ساختار ماده در تعادل است و رابطه بین تنش اعمال شده و مقادیر اندازه‌گیری شده خطی است؛ این به این معنی است که تنها یک تابع از زمان یا فرکانس در دمای ثابت هستند.

ناحیه ویسکوالاستیک خطی یک ماده در یک اندازه‌گیری نوسانی در یک فرکانس ثابت با افزایش دامنه تنش یا کرنش تعیین می‌شود. مدول اندازه‌گیری شده تا زمانی که به کرنش بحرانی نرسیده است، ثابت باقی می‌ماند. پایان ناحیه خطی با کاهش مدول ویسکوز یا الاستیک و افزایش جابجایی فاز که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است به دست می‌آید. کرنش بحرانی این ماده یعنی پلی‌پروپیلن مایع تقریباً ۵۰ است.

اندازه‌گیری دامنه کرنش نوسانی معمولاً اولین تست بر روی یک ماده ناشناخته است. تمام آزمایش‌های بعدی باید در مقادیر کرنش‌های پایین‌تر از مقدار کرنش بحرانی انجام شود.

¹ linear viscoelastic region



شکل ۳-۶: دامنه کرنش پلی پروپیلن مایع [۴۳]

۳-۵- هندسه‌های آزمایش

هندسه‌های آزمایش گوناگونی در آزمایش رئولوژی‌یکال استفاده می‌شود. جامدات در برش، کشش و خمش با استفاده از نمونه‌های مستطیلی یا استوانه‌ای آزمایش می‌شوند. خواص مایعات با استفاده از صفحات موازی، صفحه و مخروط، یا فیکسچرهای استوانه‌ای هم‌مرکز اندازه‌گیری می‌شوند. فیکسچر مورد استفاده برای آزمایش یک ماده بستگی به عوامل متعددی از جمله سختی مواد، ویسکوزیته، حساسیت دستگاه و نوع اندازه‌گیری دارد. تست به‌طور کلی غیر مخرب است و اندازه نمونه معمولاً کوچک است.

۳-۶- مودهای تست و نتایج

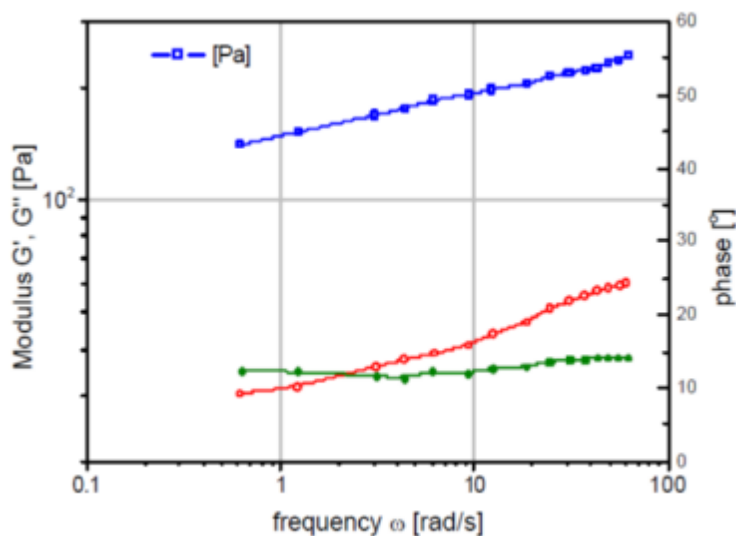
در هر تست واحد سه پارامتر کنترل می‌شود: فرکانس نوسان، دامنه نوسان و دمای آزمایش. یک تست نوسانی (تغییر پیوسته یک پارامتر) دو پارامتر را ثابت نگه می‌دارد و پارامتر سوم تغییر می‌کند. در یک دامنه، فرکانس تست متغیر است تا وابستگی فرکانس یک ماده را تعیین کند (شکل ۳-۵). کاربردهای معمول عبارت‌اند از تعیین ویسکوزیته مواد، الاستیسیته یا رقیق‌شدگی برشی. دامنه کرنش برای اندازه‌گیری محدوده رفتار خطی ویسکولاستیک مواد استفاده می‌شود. مدول برشی مواد از دامنه کرنش تا یک کرنش اعمال‌شده معین وابسته هستند. در این محدوده یک ماده گفته می‌شود که از نظر

ویسکوالاستیک خطی است. فراتر از آن نقطه ساختار ماده شروع به شکستن می‌کند و مدول الاستیک افت می‌کند (شکل ۳-۶).

برخی از نمونه‌های کاربرد اندازه‌گیری نوسانی به شرح زیر است:

۱) روغن سیلیکون (شکل ۳-۵) یک رفتار رئولوژیکی رایج برای مایعات پلیمری با وزن مولکولی بالا را نشان می‌دهد.

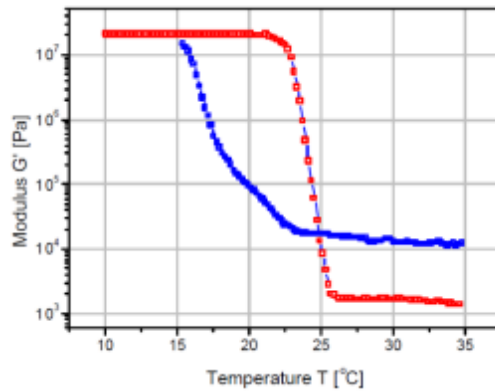
اندازه‌گیری نوسانات وابسته به فرکانس در یک ژل در شکل ۳-۷ ارائه شده است. در این مورد، جابجایی فاز با فرکانس تقریباً ثابت است و ماده در طول کل محدوده الاستیک است. برای ژل‌ها مرسوم است که مدول ذخیره‌سازی و اتلاف تقریباً موازی است. ژل‌ها این رفتار را تا زمانی نشان می‌دهند که ساختارشان تغییر نکند.



شکل ۳-۷: پاسخ فرکانس نوعی ژل در محدوده خطی [۴۳]

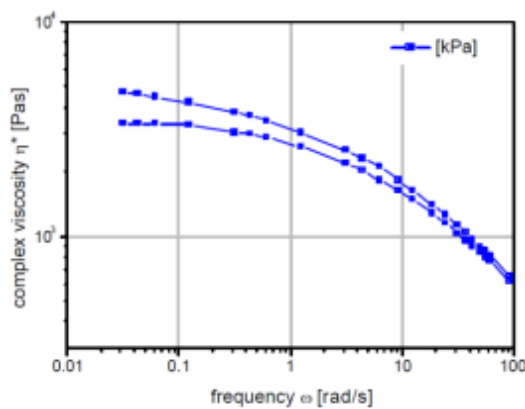
۲) اندازه‌گیری‌های نوسانی برای مطالعه فرآیندها که شامل تغییر ساختار در نمونه می‌شود، بسیار مفید است. کرنش باید به اندازه کافی کوچک باشد، نه اینکه روند فرآیند شیمیایی فیزیکی و شیمیایی را مختل کند.

شکل ۳-۸ ذوب شدن دو نمونه شکلات مختلف را به عنوان تابعی از دما نشان می‌دهد. شکلات با نقطه ذوب پایین‌تر شامل کره کاکائو است، نمونه دیگر نیز شامل چربی‌های با نقطه ذوب بالاتر است.



شکل ۳-۸: رفتار ذوب شدن شکلات با انواع مختلف چربی [۴۳]

۳) پاسخ فرکانسی دو نوع ذوب پلیمری مورد استفاده برای قالب‌گیری تزریقی در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. یکی از آن‌ها با عنوان مطلوب شرح داده می‌شود، دیگری رفتار غیرعادی را نشان می‌دهد که در کیفیت ثبات ابعادی محصول نهایی مشخص می‌شود. دو نمونه تفاوت‌های قابل توجهی از ویسکوزیته را در فرکانس پایین (نرخ برشی پایین) نشان می‌دهند. نمونه نامطلوب دارای ویسکوزیته بالاتری است که موجب کاهش جریان در قالب می‌شود. در نتیجه، در شرایط فرآیند یکسان پرشدگی کمتر اتفاق می‌افتد، که دلیل کیفیت محصول نهایی است.



۳-۹: منحنی ویسکوزیته دو ترکیب قالب‌گیری تزریقی [۴۳]

تجزیه و تحلیل مکانیکی پویا یک روش حساس برای بررسی ساختار، پردازش پذیری و عملکرد نهایی بسیاری از مواد است. این قابلیت تفاوت ساختاری بین مواد را فراهم می‌کند و اطلاعاتی در مورد چگونگی عملکرد مواد ارائه می‌دهد. چنین اطلاعاتی برای توسعه محصول و همچنین طراحی فرآیند و بهینه‌سازی مهم است. اکثر مواد ویسکوالاستیک هستند و مشخصات کامل یک رئولوژی مواد نیاز به اطلاعات الاستیسیته علاوه بر اطلاعات ویسکوزیته دارد. تجزیه و تحلیل مکانیکی پویا یک روش منحصر به فرد قدرتمند است زیرا هر دو خواص را به طور هم‌زمان اندازه می‌گیرد.

۳-۷- سورفکتانت‌ها

کلمه سورفکتانت^۱ مجموعه از کلمات " Surface active agent " بوده و نوعی ماده فعال کننده سطحی می‌باشد. سورفکتانت‌ها معمولاً ترکیباتی آلی هستند که دارای گروه‌های هیدروفوبیک (دافع آب) که نقش دم و دنباله را دارد و گروه‌های هیدروفیلیک (جاذب آب) که نقش سر را دارد می‌باشند، بنابراین به تناسب ساختار مولکولی در حلال‌های آلی و آب حل می‌شوند و باعث کاهش کشش سطحی در فصل مشترک هوا- آب و یا روغن- آب می‌شوند.

ساختار شیمیایی این مواد اغلب شامل یک مولکول نسبتاً طولانی با یک انتهای آب‌گریز و انتهای دیگر آب‌دوست می‌باشد. قسمت آب‌گریز این مواد (یک دنباله هیدروکربنی طولانی) با رزین سازگار بوده و در جهت آن حرکت می‌کند در حالی که قسمت آب‌دوست به سمت بیرون جهت‌گیری نموده (به سمت فاز آب) و با احاطه نمودن رزین باعث سازگاری آن با آب می‌شود. در واقع سورفکتانت‌ها موادی هستند که می‌توانند انرژی سطحی را بین سطوح به میزان زیادی تغییر دهند خاصیت یک سورفکتانت ناشی از دو شخصیتی بودن ساختمان مولکولی آن است به این معنی که هم‌زمان دارای گروه‌های آب‌دوست و آب‌گریز می‌باشند. سورفکتانت‌ها نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای عملی و محصولات بازی می‌کنند مثلاً: شوینده‌ها، انعقاد سازها (مثل: خون)، امولسیون کننده‌ها (مثل: کرم)، جوهر سازی، کف‌سازی

¹ Surfactant

(مثل: شامپو)، دیسپرسنت‌ها (جداکننده‌ها)، پلیمر (مثل: لاستیک ماشین) و

سورفکتانت به توزیع یک‌فاز در فاز دیگر کمک می‌کند. این تعریف محدود به سوسپانسیون‌های جامد - مایع نیست و ممکن است شامل سیستم‌های مایع - مایع هم بشود. هنگامی که این مواد برای پایدارسازی ذرات جامد در مایع به کار می‌روند به آن‌ها دیسپرسانت^۱ می‌گویند. مولکول‌های تشکیل‌دهنده سورفکتانت‌ها تمایل زیادی به تجمع در فصل مشترک دارند. این امر به این علت رخ می‌دهد که ساختار آن‌ها از دو بخش تشکیل شده است که یک بخش آن محلول در حلال و بخش دیگر آن نامحلول است. این مولکول‌ها به صورت ترجیحی به شکلی جهت‌گیری می‌کنند که بخش محلول با مایع پیوند پیدا کرده و بخش نامحلول به سطح جامد پیوند پیدا می‌کند.

حدود ۹۰ درصد توده سورفکتانت (وزن خشک آن) از لیپید تشکیل می‌شود. پروتئین‌ها ۱۰ درصد بقیه سورفکتانت را تشکیل می‌دهند. جزء فعال اصلی سورفکتانت، نوعی لسیتین اختصاصی به نام دی پالمیتوئیل فسفاتیدیل کولین (DPPC) است که حدود ۵۰ درصد آن را تشکیل می‌دهد. دومین جزء سورفکتانت که از نظر فعالیت در سطح در رتبه دوم قرار دارد، فسفاتیدیل گلیسرول (PG) است که ۸ - ۱۵ درصد سورفکتانت را شامل می‌شود. فسفاتیدیل گلیسرول می‌تواند کشش سطحی را در آلونول کاهش بدهد.

۳-۸- میسل‌ها (micelles) و میسل‌های کرمی شکل (wormlike micelles)

میسل‌ها گروهی از مواد فعال‌کننده سطحی متراکم هستند که در یک کلوئید مایع پراکنده‌اند. میسل‌ها اشکال مختلفی دارند مثل کره و استوانه و صفحه‌ای. این که یک میسل چرا کروی و یا چرا استوانه‌ای است و... بستگی به شرایط محیط و نوع ماده فعال سطحی بستگی دارد. در محلول، مولکول‌های سورفکتانت خود را به میسل‌ها با اشکال مختلف گردهمایی می‌کنند. در این میان، میسل‌های استوانه‌ای بسیار بلند و انعطاف‌پذیر به دلیل خواص قابل توجه ویسکوالاستیکی که در بسیاری از

¹ Dispersant

زمینه‌های تکنولوژیکی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در موارد چاپ‌شده چندین صفت (پلیمرهای زنده (living-polymers)، پلیمری شکل، رشته‌ای شکل و حتی اسپاگتی شکل) به این میسل‌ها داده شده است و اخیراً به نظر می‌رسد صفت کرمی شکل (wormlike) متداول شده است و در ادامه نیز به کار می‌رود. با توجه به اهمیت غیرقابل انکار آب به عنوان یک حلال فراوان و ارزان، توجه ویژه به کاربردهای صنعتی و فنی کریستال‌های میسلی که از طریق سورفکتانت‌های مناسب در آب تشکیل شده‌اند، اختصاص داده شده است [۴۴].

فراتر از غلظت آستانه (غلظت هم‌پوشانی ϕ^*) میسل‌های کرمی شکل، به هم پیوند خورده و یک شبکه گذرا ایجاد می‌کند که دارای خواص بسیاری با شبکه‌های پلیمری در محلول‌های نیمه رقیق است. با این حال، میسل‌های کرمی شکل یک تفاوت اساسی با پلیمرها دارند: میسل‌ها تحت کنترل ترمودینامیکی هستند به طوری که توزیع طول کانتورشان به وسیله‌ی ترکیب شیمیایی معین نیست اما با متغیرهای متمرکز مانند غلظت یا دما، به صورت برگشت‌پذیر متغیر می‌باشد. علاوه بر این، میسل‌ها بازمان جدا شده و دوباره ترکیب می‌شوند و به عنوان یک اثر پاسخ به تغییر شکل‌های مکانیکی نیز این دینامیک پیچیده را نشان می‌دهد. نیروی محرکه برای دنباله میسل‌ها، انرژی آزاد مربوط به دو انتها است. رفتار میانگین میدان روند تجمع، یک توزیع طول نمایی با یک طول متوسط کانتور (\bar{L}) هم‌مقیاس با ریشه دوم غلظت مونومر (ϕ) پیش‌بینی می‌شود:

$$\bar{L} \sim \sqrt{\phi} e^{\varepsilon_e} \quad (4-3)$$

که ε_e انرژی انتهای رأس (در مقیاس $k_B T$) نسبت به بخش مرکزی است. در محلول‌های نیمه رقیق شده و غلیظ پلیمری، توزیع زنجیره‌ای با یک حرکت خزنده (reptile-like) از پلیمر در امتداد کانتور خود (خزش) و بسیاری از خواص توده‌ای مانند ویسکوزیته برشی صفر^۱ (η^0) و وابستگی مدول

¹ zero shear viscosity

فلات و غلظت هم‌پوشانی ϕ^* روی طول متوسط کانتور \bar{L} و روی غلظت مونومر ϕ مطابق با قانون انرژی، رخ می‌دهد. برای میسل‌های کرمی شکل وابستگی طول متوسط کانتور \bar{L} روی غلظت مونومر ϕ (رابطه ۳-۴) می‌تواند به تئوری خزش برای به‌دست آوردن ضابطه‌های مقیاسی جدید، ترکیب شود. درحالی‌که این رویکرد تأثیر تعادل ترمودینامیکی را در نظر می‌گیرد، جنبش‌های ترکیب و جدایش برگشت‌پذیر یک جزء کلیدی برای مدل پاسخ رئولوژیکی است. یکی از محققان به نام کیتس پیشنهاد کرد که، در کنار خزش، رخداد شکستن و دوباره به هم پیوستن میسل‌ها یک مکانیسم اضافی را برای استراحت تنش مکانیکی فراهم می‌کند. در محدودیت سریع شکستن، تمام تغییرات بخش‌های لوله‌ای با سرعت یکسان استراحت می‌کنند و استراحت تنش نمایی مفرد با مشخصه زمان τ با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau \sim \sqrt{\tau_{break} \tau_{rept}} \quad (5-3)$$

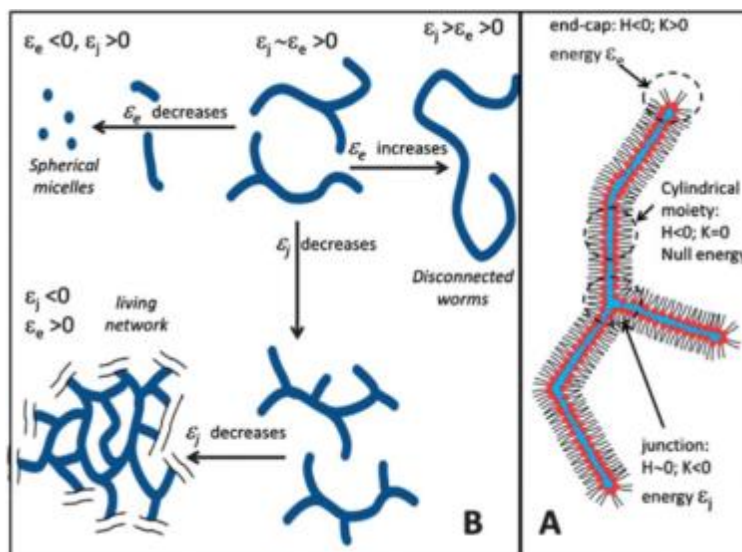
که τ_{rept} و τ_{break} به ترتیب زمان شکست/به هم پیوستن و خزش است. این موضوع با شواهد قابل توجهی توضیح می‌دهد که، برای میسل‌های کرمی شکل، استراحت معمولاً با یک زمان استراحت مفرد، با وجود پراکندگی پلیمری بالا از اندازه میسل، مشخص می‌شود. هنگامی که یک جزء به شاخه‌ای و یا متصل شدن اجازه می‌دهد (به شکل ۳-۱۰ (A) توجه کنید)، مدل باید اصلاح شود. مقیاس طول بعدی مرتبط می‌شود با: فاصله‌ی معمولی بین نقاط شاخه‌ای \bar{L}_j که به صورت زیر مقیاس می‌شود:

$$\bar{L}_j \sim \frac{e^{\varepsilon_j}}{\sqrt{\phi}} \quad (6-3)$$

که ε_j انرژی اتصال است. بسته به مقادیر نسبی ε_e و ε_j ، میسل‌ها می‌توانند از حالت کرمی شکل استوانه‌ای جداشده و شاخه‌ای شوند و همچنین یک شبکه کاملاً شاخه‌ای را در موازنه با یک فاز میسلار رقیق تشکیل دهند (شکل ۳-۱۰ (B) را ببینید). مدل‌هایی که شبکه شاخه‌ای را توصیف می‌کنند، در پیش‌بینی یک جفت از ویژگی‌های مخالف حالت طبیعی توافق دارند. ۱- برای غلظت مونومر ϕ به اندازه

کافی بالا، جداسازی فاز از بین می‌رود (یعنی سیستم برای غلظت پایین ϕ دارای فاز جدا می‌باشد ولی برای غلظت بالای ϕ پایدار است)، ۲- از جانب رئولوژی، شاخه‌ای شدن میسل‌ها می‌تواند منجر به کاهش ویسکوزیته شود زیرا نقاط تقاطع اتصال می‌تواند به‌طور آزادانه در امتداد رشته‌های مداخله کننده سست شود. میسل‌های کرمی شکل (*wormlike micelles*) توسط چندین سورفکتانت تشکیل می‌شوند و رشد آن‌ها اغلب با حضور وزن مولکولی کم افزودنی‌ها (آغازگرهای موجود) افزایش می‌یابد.

ویژگی‌های اساسی میسل‌های کرمی شکل (*wormlike micelles*) نیز توسط سیستم‌های متفاوت از محلول‌های سورفکتانت مانند پلیمرهای سوپر مولکولی، ژل‌های در تعادل و مایعات دوقطبی استفاده می‌شود. با توجه به معادله ۳-۴، سیستم با مقدار بیشتر سورفکتانت‌ها، با افزایش در غلظت ϕ به‌عنوان نماینده اساسی تجمع میسل‌های کرمی شکل یا با یک تغییر موازی در انرژی انتهای رأس (ϵ_e) به دلیل افزایش هم‌زمان در قدرت یونی، مطابق است.



شکل ۳-۱۰: (A) شکل ساختمان میسل‌های کرمی را نشان می‌دهد. بخش استوانه‌ای مرکزی با انحنای گاوسی
 صفر حالت مرجع برای انرژی انحنای است. انحراف (کمبود) از این هندسه، انرژی‌های مختلف $k_B T$ بالاتر از هندسه
 استوانه‌ای را نشان می‌دهد. کمبودها می‌تواند $k > 0$ را به‌عنوان انتهای رأس کروی یا $k < 0$ را به‌عنوان نقاط
 (اتصال) شاخه‌ای زین مانند داشته باشند. (B) طیف تکامل ساختاری برای میسل‌های کرمی شکل (*wormlike micelles*) پس از تغییر در انرژی انتهای رأس (ϵ_e) و انرژی شاخه‌ای (ϵ_j) [۴۴].

برخی از محلول‌های میسل‌ها در محلول پایه آب و برخی دیگر در محلول پایه ترکیبات هیدروکربنی مانند روغن‌ها ساخته می‌شوند. از آنجایی که سیال *MR* موردنظر در دمپر کار می‌کند به دلیل خواص روان کاری دمپر از ترکیب پایه محلول حاوی ترکیبات هیدروکربنی مانند روغن‌ها، ساخته می‌شود.

در بسیاری از محلول‌های میسل‌ها حاوی سیال پایه هیدروکربنی از لسیتین^۱ به‌عنوان سورفکتانت استفاده می‌شود. لسیتین یک لغت یونانی و به معنای زرده تخم‌مرغ است و علت نام‌گذاری آن وجود میزان فراوان لسیتین در زرده تخم‌مرغ و همچنین کشف این ماده برای اولین بار در زرده تخم‌مرغ بوده است. لسیتین، یک گروه از فسفولیپیدها می‌باشند که ترکیب اسید فسفریک، گلیسرول، کولین با اسیدهای چرب مانند فسفاتیدیل کولین، فسفاتیدیل اینوزیتول، فسفاتیدیل اتانل آمین و فسفاتیدیل سرین، هستند.

برای تشکیل محلول میسلار از افزودنی‌های مختلفی از قبیل آب، فرمامید، پی‌کوماریک اسید، گلیسرول، اوره و... به ترکیب لسیتین و سیال پایه هیدروکربنی، استفاده می‌شود. از این بین آب به دلیل ارزان و در دسترس بودن برای تشکیل محلول میسلار رایج‌تر می‌باشد و در این مطالعه نیز از آن استفاده می‌شود [۴۴].

لسیتین محلول در یک گروه بزرگ از حلال‌های آلی، پس از اضافه شدن آب یک شبکه دینامیکی مرکب از میسل‌های کرمی شکل معکوس طولانی و انعطاف‌پذیر را شکل می‌دهد. این مواد که به‌اصطلاح ژل‌های ارگانیک لسیتین نامیده می‌شوند با لزجت‌های بالا بسته به نسبت مولی آب به لسیتین (W_0) با حداکثر ویسکوزیته مطابق با خصوصیات مقدار W_0 (وابسته به حلال) شناخته می‌شوند.

۳-۹- روش ساخت سیال MR

در بسیاری از مطالعات از سیکلوهگزان (Cyclohexane) و اندکان (n-Decane) به‌عنوان سیال

¹ lecithin

پایه محلول‌های میسلار استفاده شده است. در این مطالعه به دلیل استفاده از سیال MR در دمپر MR و خواص روان کاری از روغن هیدرولیک VG46 به عنوان سیال پایه استفاده شده است. سپس مقدار مشخصی از پودر لسیتین با توجه به مطالعات پیشین به روغن اضافه شده و تا زمانی که پودر لسیتین به طور کامل در روغن حل شود به وسیله همزن مغناطیسی، مخلوط شد. سپس به محلول فوق مقادیر مشخصی از آب مقطر اضافه شد و به مدت یک ربع به وسیله همزن مغناطیسی مخلوط شد. با توجه به آزمون رئومتر در یکی از این مقادیر شبکه میسل‌های کرمی شکل تشکیل شد که نتایج مربوط به آن در فصل ۴ گزارش شده است.

به منظور مقایسه سیال MR با محلول پایه میسل‌های کرمی شکل، دو غلظت دیگر از محلول میسلار، یکی بالاتر از غلظت میسل‌های کرمی شکل و دیگری پایین تر از آن ساخته شد.

پس از تهیه محلول پایه برای ساخت سیال MR پودر آهن با درصد وزنی ۶۵٪ به محلول اضافه شد. برای مثال اگر محلول پایه ۲۵ گرم باشد مقدار پودر آهن اضافه شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{25}{35} = \frac{x}{65} \quad x = 46.42 \text{ gr}$$

پس از اضافه کردن پودر آهن به محلول پایه در ظرف مخصوص، به مدت ۴۵ دقیقه به وسیله همزن مکانیکی با دور متوسط مخلوط شد. مخلوط شدن محلول با دور بالا منجر به شکستن زنجیره‌های محلول می‌شود. با هر یک ربع مخلوط شدن محلول ۵ دقیقه به آن استراحت داده شد. پس از ساخت سیال MR، تست‌های رئومتر مربوط به سیال MR به وسیله دستگاه رئومتر نوسانی شرکت Anton Paar مدل MCR 302، گرفته شد.

پس از این آزمون رئومتر، سیال در لوله‌های آزمایش به منظور تست پایداری سیال MR، ریخته

شد.

۴- فصل چهارم: بررسی نتایج، بحث و

نتیجه‌گیری

۴-۱- مقدمه

در این فصل نتایج مربوط به تست رئومترى محلول پایه شامل ویسکوزیته محلول‌ها، ویسکوزیته برش صفر^۱ محلول‌ها، تنش تسلیم محلول‌های پایه و نتایج مربوط به مدول الاستیک و مدول ویسکوز ارائه می‌شود. در ادامه نتایج تست رئومترى سیال MR شامل ویسکوزیته سیال MR بدون اعمال میدان مغناطیسی، مدول الاستیک و مدول ویسکوز این سیال تحت میدان مغناطیسی، نمودارهای مربوط به

^۱ Zero Shear Viscosity

تنش تسلیم سیالات MR و اعتبارسنجی این نتایج ارائه شده است. و در پایان نتایج پایداری نمونه‌ها که هدف اصلی این مطالعه می‌باشد و در طول یک ماه اندازه‌گیری شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲- غلظت محلول‌های پایه بررسی شده

به دلیل استفاده از سیال MR در دمپر MR در این مطالعه از روغن پایه هیدرولیک VG46 استفاده شده است که مشابه با روغن پایه سایر محلول‌های میسلار نمی‌باشد، در یک طیف مشخصی از غلظت‌ها، محلول پایه ساخته شده و به بررسی نتایج اعتبار سنجی مربوط به تشکیل شبکه میسل‌های کرمی شکل پرداخته شده است. اطلاعات مربوط به این غلظت‌ها در جدول ۴-۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۴-۱: غلظت نمونه‌های ساخته شده از محلول پایه

مقدار آب (gr)	مقدار لسیتین (gr)	نمونه‌ها
۰,۸۶	۱	C1
۱,۷۲	۱	C2
۲,۰۴۲	۱	C3
مقدار آب (gr)	مقدار لسیتین (gr)	نمونه‌ها
۲,۵۸	۱	C4
۴,۳	۱	C5
۰,۶۴۵	۱,۶	C6

۱,۲۹	۱,۶	C7
۳,۲۲۵	۱,۶	C8
۳,۷۶۲	۱,۶	C9
۴,۳	۱,۶	C10
۰,۸۶	۲	C11
۱,۲۹	۲	C12
۱,۵۰۵	۲	C13
۴,۹۴۵	۲,۴	C14
۵,۵۹	۲,۴	C15
۴	۲,۸	C16
مقدار آب (gr)	مقدار لسیتین (gr)	نمونه‌ها
۵,۶	۲,۸	C17
۷,۱	۲,۸	C18
۳,۶۵	۳,۵	C19

۴,۹۴۵	۳,۵	C20
۵,۳۷۵	۳,۵	C21

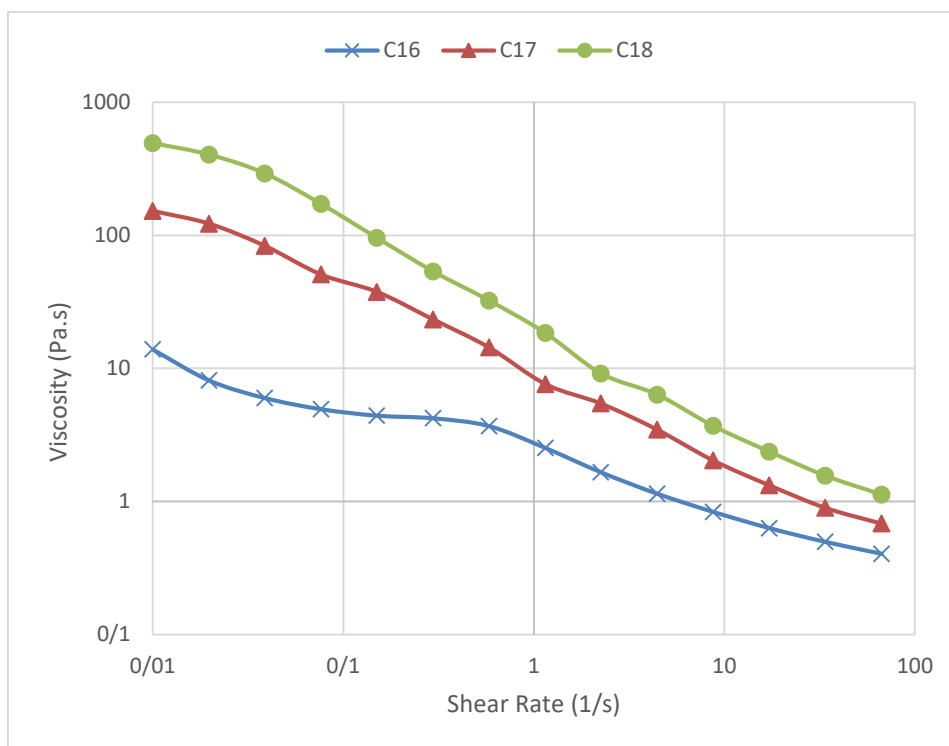
تمامی محلول‌های فوق در 25cc (18 gr) روغن ساخته شد.

۳-۴- روش تشخیص میسل‌های کرمی شکل در محلول پایه با استفاده از تست رئومتر

۳-۴-۱- استفاده از اطاعات مربوط به نمودار ویسکوزیته و ویسکوزیته برش صفر

محلول پایه

تقریباً در تمامی محلول‌های میسل‌های کرمی شکل افزایش ویسکوزیته محلول به محض افزودن آب به ترکیب روغن و لسیتین گزارش شده است [۴۴-۴۶]. این افزایش ویسکوزیته ناشی از تشکیل ساختار میسلار محلول‌ها می‌باشد و مقدار افزایش آن به مقدار آب، غلظت لسیتین و نوع حلال پایه دارد. شکل ۴-۱ ویسکوزیته محلول‌های پایه (محلول‌های C16، C17 و C19) که سیالات MR نیز بر مبنای آن‌ها ساخته شده، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است این سه محلول رفتار رقیق شوندگی برشی را از خود نشان می‌دهند. گزارش شده است که بیشتر سیستم‌های میسل کرمی شکل مانند: لسیتین/آب/روغن، لسیتین/گلیسرول/روغن، لسیتین/اورره/روغن و... رفتار رقیق شوندگی برشی را از خود نشان می‌دهند به طوری که ویسکوزیته در نرخ‌های برشی بالا کاهش می‌یابد. این رفتار به دلیل ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی گذرای مربوط به میسل‌های کرمی شکل می‌باشد که با افزایش نرخ برش به‌طور مکرر شکسته و مجدد ترکیب می‌شود [۴۹].

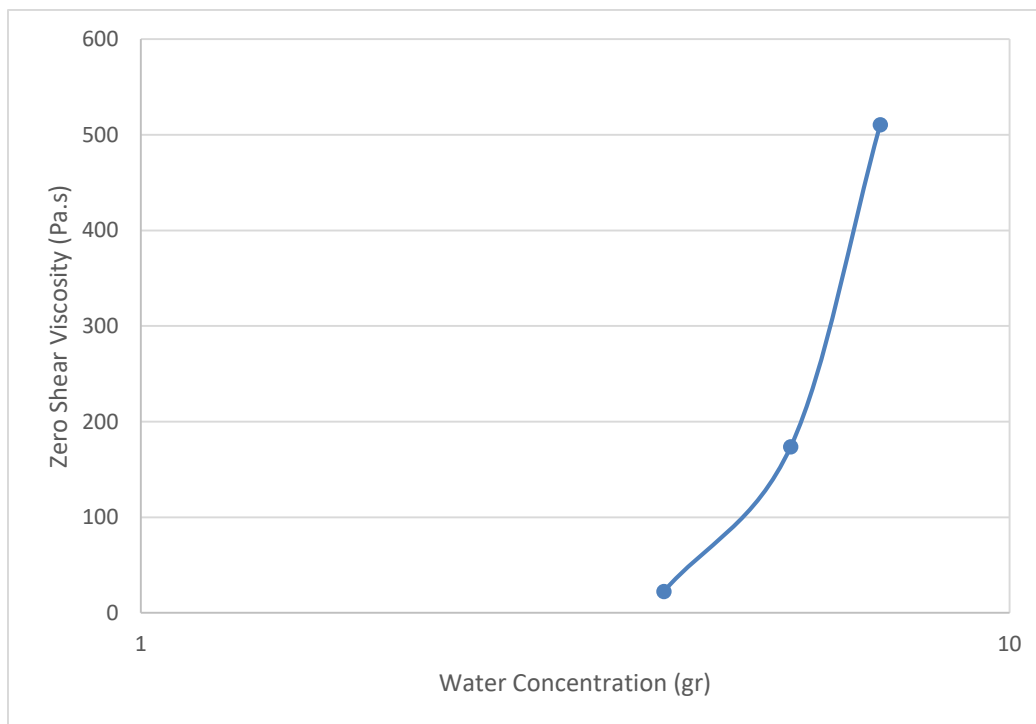


شکل ۴-۱: ویسکوزیته محلول‌های C16، C17 و C18 بر حسب نرخ برش

همان‌طور که در شکل نیز مشخص می‌باشد، ویسکوزیته محلول‌ها با افزایش مقدار آب، افزایش یافته است که نشان‌دهنده تقویت شبکه میسلار می‌باشد. همچنین این نوع از محلول‌ها رفتار سیال غیر نیوتنی را دارند.

برخی از سیستم‌های میسل‌های کرمی شکل نیز رفتار غلیظ شوندگی برشی را نشان می‌دهند. از جمله این نوع سیستم‌ها می‌توان لسیتین/اسید چرب پلی‌گلیسرول/روغن را نام برد. معمولاً غلیظ‌شوندگی برشی به صورت افزایش ویسکوزیته با افزایش نرخ برش تعریف می‌شود [۴۹].

یکی دیگر از پارامترهای مهم که در محلول‌های میسل کرمی شکل گزارش شده است، افزایش ویسکوزیته برش صفر (η_0) با افزایش آب به محلول پایه می‌باشد. شکل ۴-۲ این افزایش را بر حسب غلظت آب اضافه‌شده به محلول نشان می‌دهد. مقادیر ویسکوزیته برش صفر از برآزش منحنی انجام‌شده توسط دستگاه رئومتر بر روی منحنی ویسکوزیته، به دست آمده است.

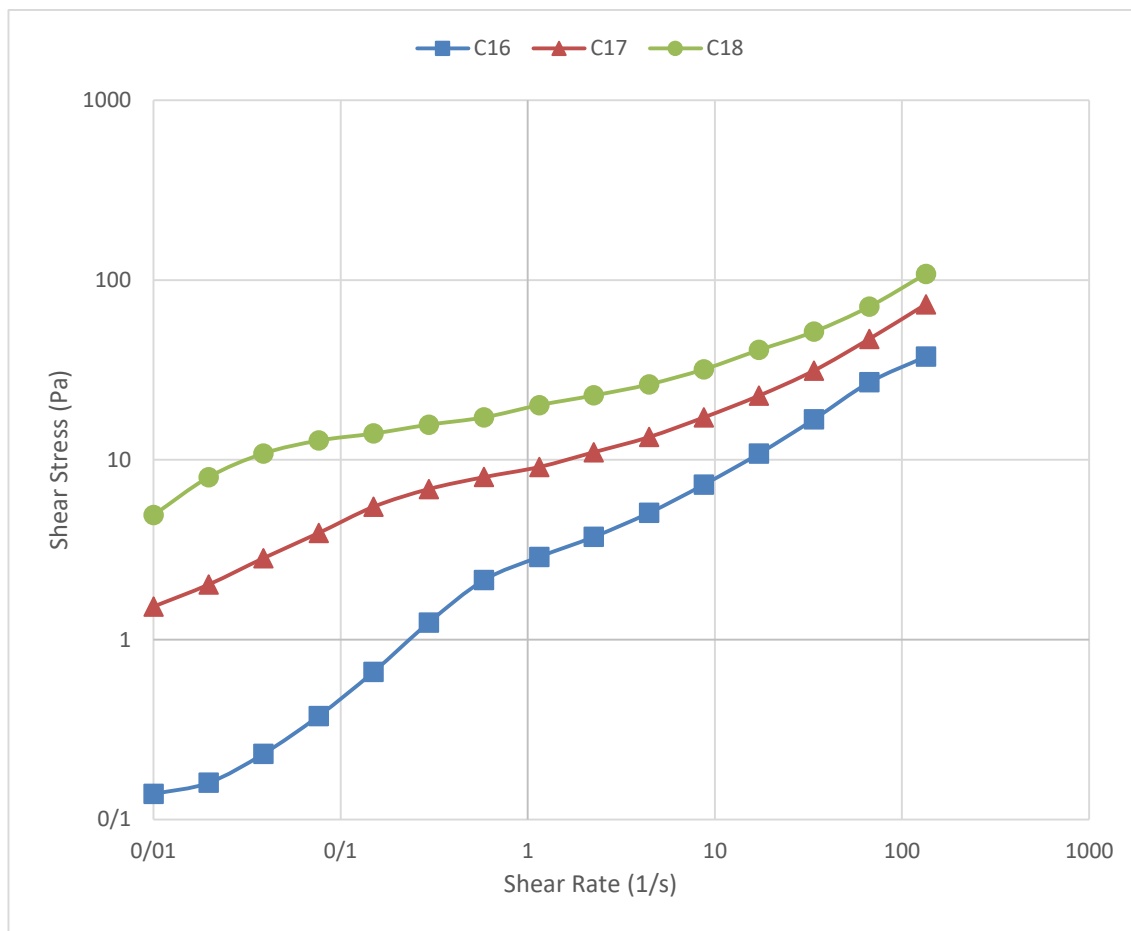


شکل ۴-۲: مقادیر ویسکوزیته برش صفر برحسب غلظت آب برای محلول‌های C16، C17 و C18

همان‌طور که در شکل مشخص است، مقدار ویسکوزیته برش صفر با افزایش مقدار آب، افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند ناشی از تشکیل میسل‌های استوانه‌ای انعطاف‌پذیر باشد. مقدار ویسکوزیته برش صفر برای محلول‌های C16، C17 و C18 به ترتیب ۲۲,۴، ۱۷۳,۶ و ۵۱۰,۳ پاسکال ثانیه می‌باشد.

۴-۳-۲- استفاده از اطاعات مربوط به نمودار تنش و تنش تسلیم محلول پایه

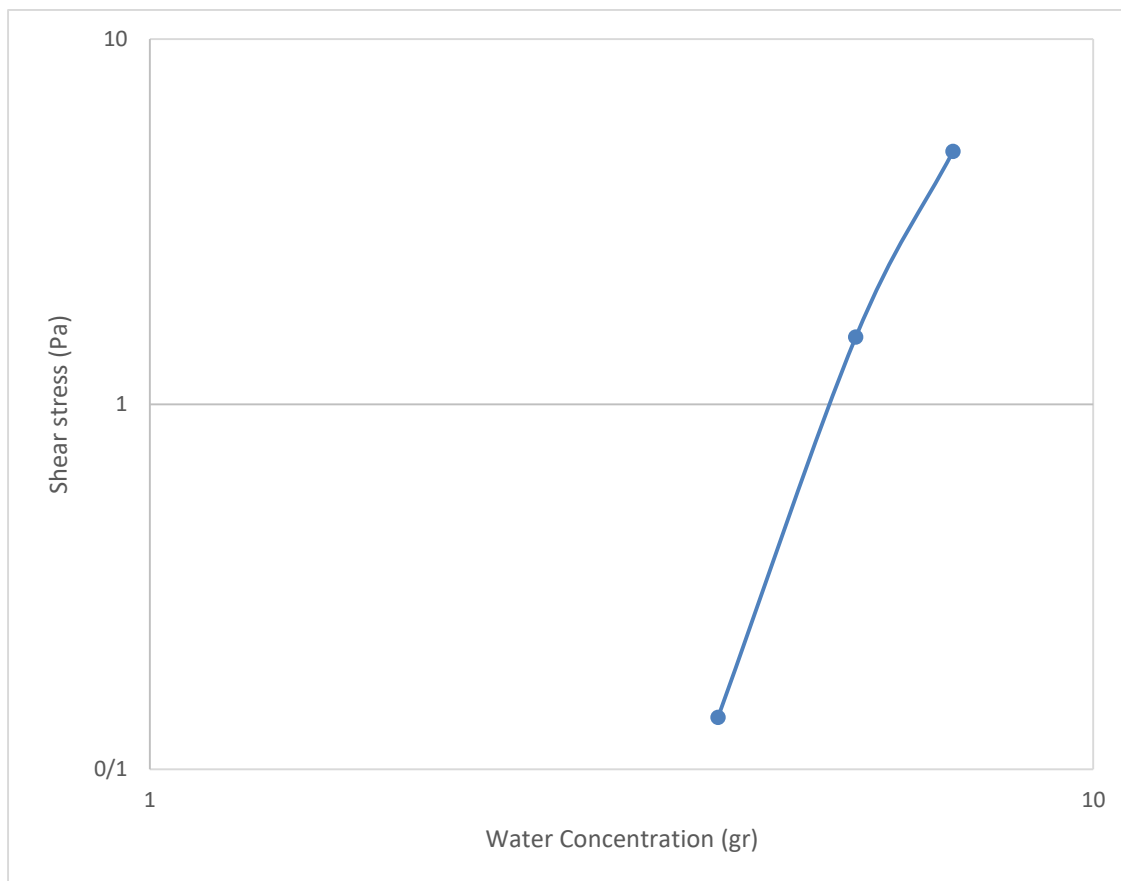
با توجه به بخش قبلی، همان‌طور که افزایش مقادیر آب موجب افزایش مقادیر ویسکوزیته محلول-های پایه شد، این اثر موجب افزایش تنش محلول‌های پایه برحسب افزایش نرخ برش می‌شود. این موضوع نیز می‌تواند به دلیل شکستن و ترکیب مجدد میسل‌ها باشد که با افزایش مقدار آب موجود در محلول‌ها به دلیل ساختار محکم‌تر میسل‌ها، این تنش افزایش می‌یابد. شکل ۴-۳ تنش محلول‌های C16، C17 و C18 را برحسب نرخ برش نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳: مقادیر تنش بر حسب نرخ برش برای محلول‌های C16، C17 و C18

همان‌طور که در شکل نیز مشخص می‌باشد با افزایش مقادیر آب موجود در محلول‌ها تنش بر حسب نرخ برش افزایش می‌یابد. همچنین این منحنی‌ها نشان‌دهنده رفتار غیر نیوتنی محلول‌ها به دلیل وجود ساختار میسلار می‌باشد.

در نرخ‌های برشی بسیار پایین مقادیر به دست آمده از نمودار تنش بر حسب نرخ برش، تنش تسلیم محلول‌های پایه می‌باشد. شکل ۴-۴ این مقادیر را بر حسب مقادیر آب موجود در محلول نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: مقادیر تنش تسلیم برحسب غلظت آب برای محلول‌های C16، C17 و C18

همان‌طور که در شکل نیز مشخص می‌باشد با افزایش مقادیر آب، تنش تسلیم محلول‌ها به دلیل استحکام بیشتر ساختار میسلار محلول‌ها، افزایش می‌یابد. مقدار تنش تسلیم برای محلول‌های C16، C17 و C18 به ترتیب ۰،۱۳۸، ۱،۵۲۷ و ۴،۹۲۵ پاسکال می‌باشد.

۴-۳-۳- استفاده از نتایج حاصل از نمودارهای G' و G'' برحسب فرکانس

با توجه به این‌که در تمامی محلول‌های حاوی میسل‌های کرمی شکل افزایش ویسکوزیته و تنش برحسب نرخ برش گزارش شده است، نمی‌توان برای پیدا کردن غلظت اصلی این نوع از محلول‌ها تنها به این دو نمودار اتکا نمود. یکی از مهم‌ترین و عمومی‌ترین روش‌های تشخیص میسل‌های کرمی شکل به‌وسیله‌ی تحلیل نمودارهای G' و G'' می‌باشد. این نوع از محلول‌ها از مدل ویسکوالاستیک ماکسول پیروی می‌کنند [۴۴-۴۶]. این مدل در نمودار فرکانسی مدول الاستیک (G') و مدول ویسکوز (G'') را

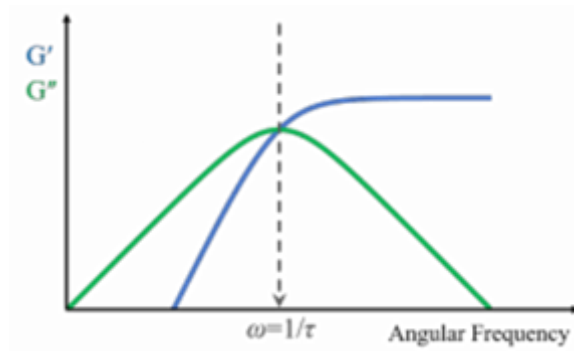
برحسب فرکانس نشان می‌دهند. روابط این دو مدول و فرکانس به صورت زیر بیان می‌شود:

$$G' = G_0 \frac{(\omega\tau)^2}{1+(\omega\tau)^2} \quad (۱-۴)$$

$$G'' = G_0 \frac{(\omega\tau)}{1+(\omega\tau)^2} \quad (۲-۴)$$

در روابط بالا τ ، زمان بازگشت یک سیستم تحریک شده به تعادل (relaxation time)، ω فرکانس و G_0 ضریب ثابت مدول برشی می‌باشد.

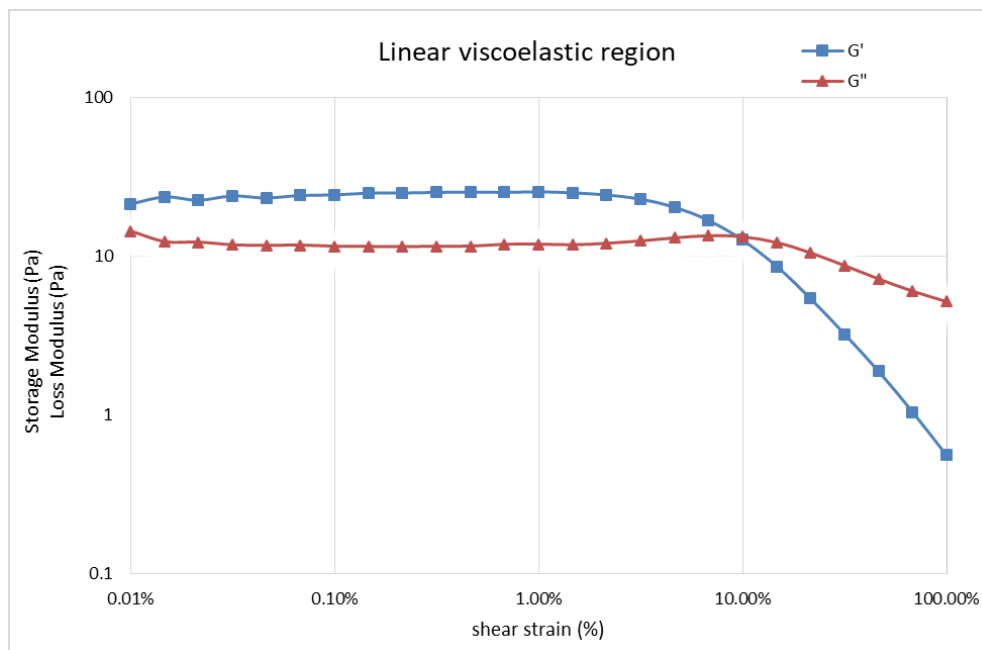
شکل ۴-۵ نمایی شماتیک از مدل ماکسول را در فرکانس‌های پایین نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است در فرکانس‌های پایین مقدار G'' از G' بزرگ تر است و از این رو، یک رفتار شبه مایع غالب است. با افزایش فرکانس آزمایش، G' افزایش می‌یابد و رفتار شبه جامد غالب می‌شود. زمانی که G'' به بیشترین مقدار خود می‌رسد، با مقدار G' برابر می‌شود. این نقطه relaxation time ماده (τ) را نشان می‌دهد با افزایش بیشتر فرکانس مقدار G' به یک مقدار ثابت می‌رسد که این مقدار ثابت همان ضریب ثابت مدول برشی (G_0) می‌باشد.



شکل ۴-۵: نمایی شماتیک از پاسخ نوسانی مدل رایج ماکسول [۵۰]

با توجه به مطالب فصل گذشته قبل از انجام تست مدول الاستیک و ویسکوز برحسب فرکانس نیاز است تا محدوده ویسکو الاستیک خطی ماده مورد نظر را داشته باشیم. تمام تست‌های نوسانی باید در دامنه تنش یا کرنش کوچک انجام شود تا به اصطلاح درون ناحیه ویسکو الاستیک خطی باقی بماند. این

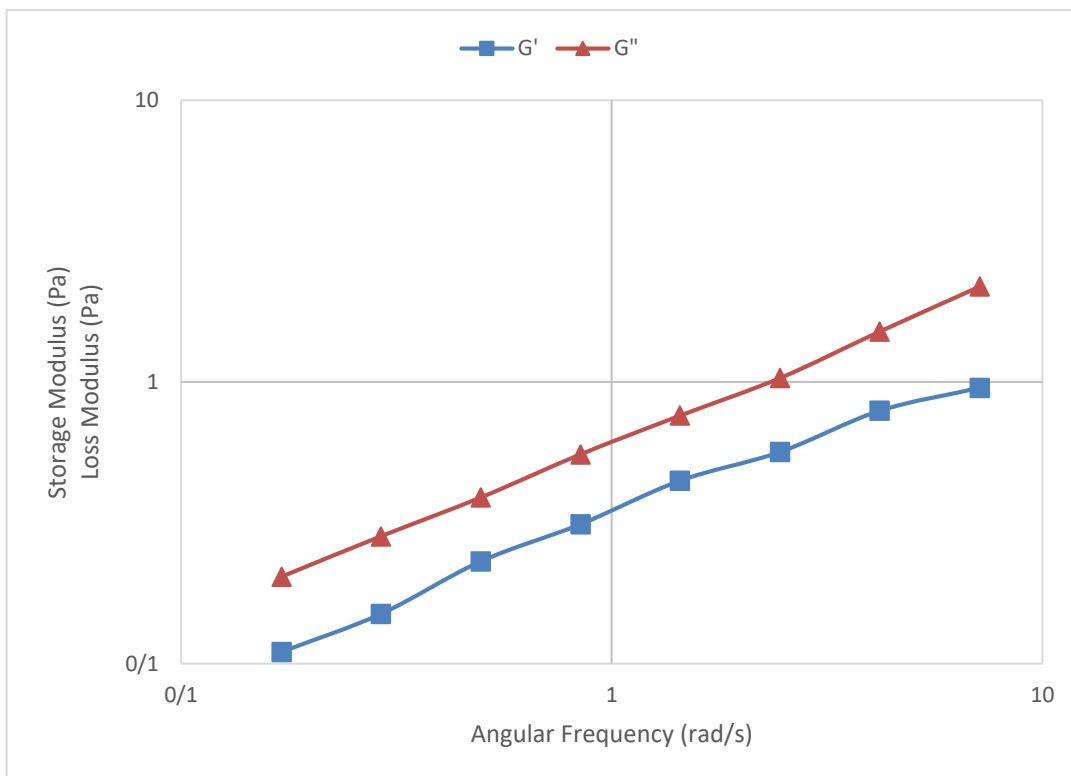
تست را برای محلول‌های موردنظر انجام شد و با توجه به نتایج عدد ۰.۱٪ برای کرنش نوسانی تقریب مناسبی برای محدوده ویسکوالاستیک خطی می‌باشد. شکل ۴-۶ نتایج این تست را نشان می‌دهد.



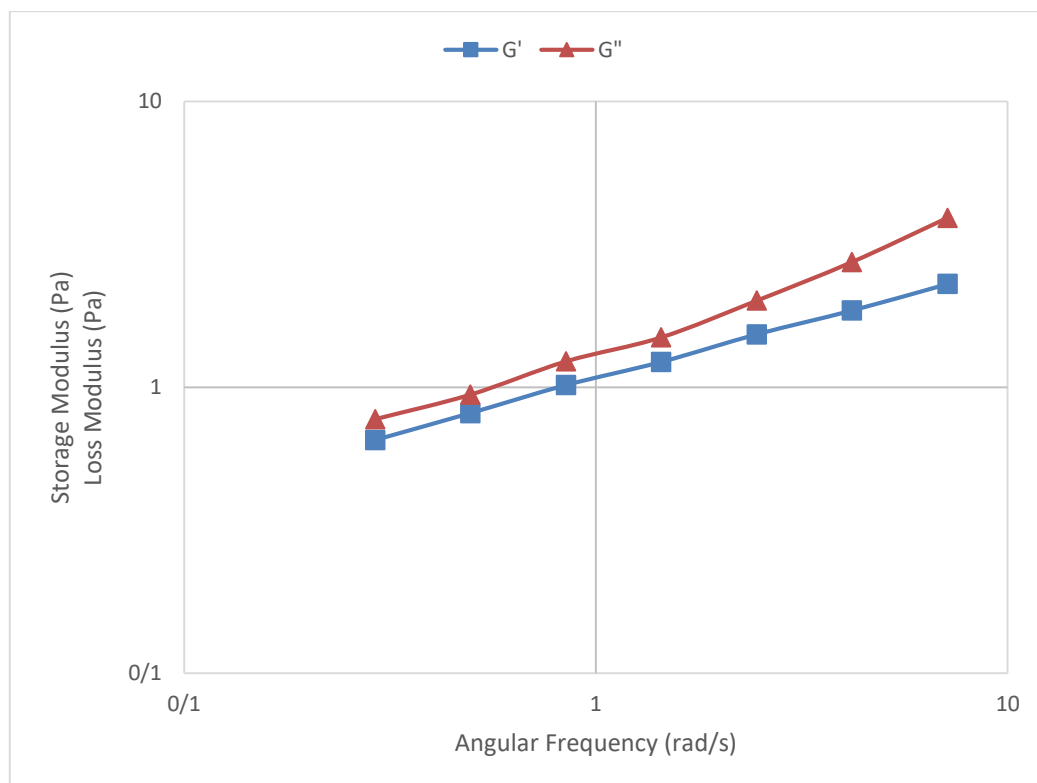
شکل ۴-۶: تست محدوده ویسکوالاستیک خطی

با توجه به غلظت‌های گزارش شده در جدول ۴-۱، در مقادیر پایین آب اضافه شده به محلول و غلظت‌های مختلف از مقادیر لسیتین منحنی مدول ویسکوز (G') از منحنی مدول الاستیک (G'') بالاتر می‌باشد و رفتار مایع عمدتاً ویسکوز می‌باشد. شکل ۴-۷ و ۴-۸ که نمونه‌ای از این نوع رفتار می‌باشد، نمودارهای G' و G'' را برای غلظت C3 و C11 برحسب فرکانس نمایش می‌دهد.

علت متفاوت بودن مقادیر آب در این نوع رفتار، متفاوت بودن مقدار لسیتین برای دو محلول می‌باشد به طوری که محلول حاوی مقدار کمتری از آب دارای مقدار بیشتری لسیتین می‌باشد.

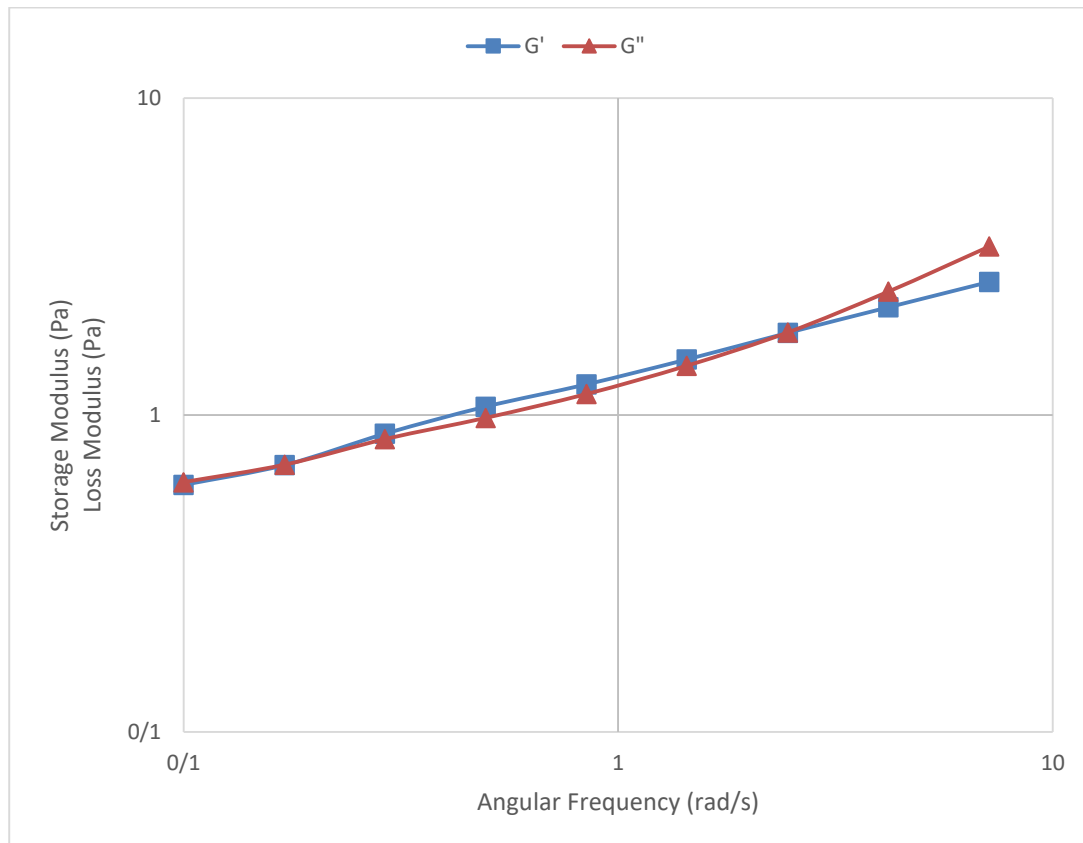


شکل ۴-۷: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C3

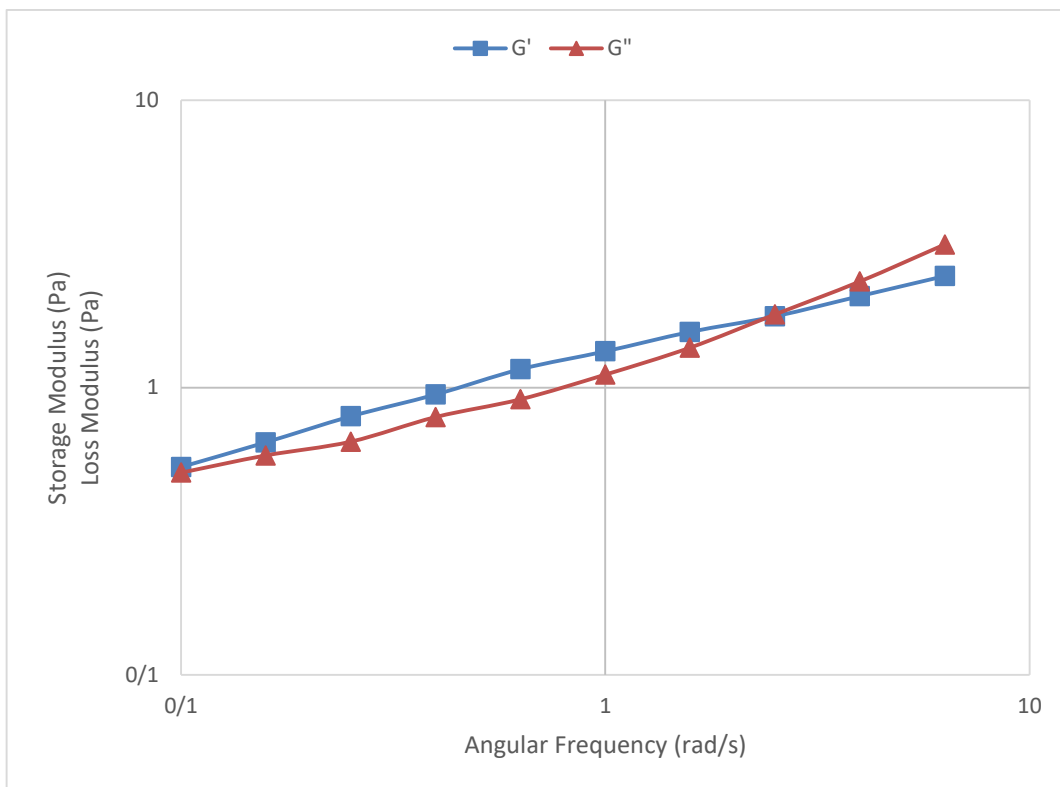


شکل ۴-۸: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C11

با افزایش مقدار آب محلول، در یک غلظت خاص تقریباً منحنی الاستیک بر روی منحنی ویسکوز منطبق می‌شود. این شرایط که با افزایش ویسکوزیته محلول نیز همراه است، شروع محدوده ویسکوالاستیک می‌باشد. شکل ۹-۴ و ۱۰-۴ که نمونه‌ای از این نوع رفتار می‌باشد، نمودارهای G' و G'' را برحسب فرکانس به ترتیب برای غلظت‌های C2 و C12 نشان می‌دهد.



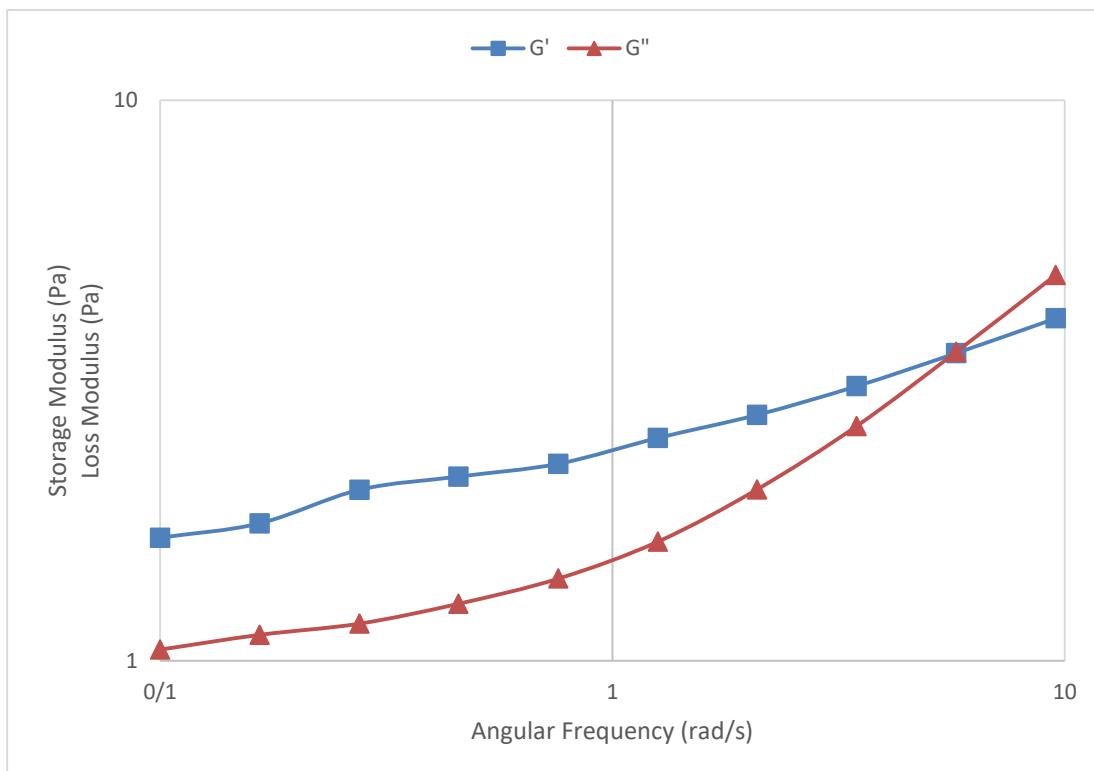
شکل ۹-۴: منحنی G' و G'' برحسب فرکانس برای غلظت C2



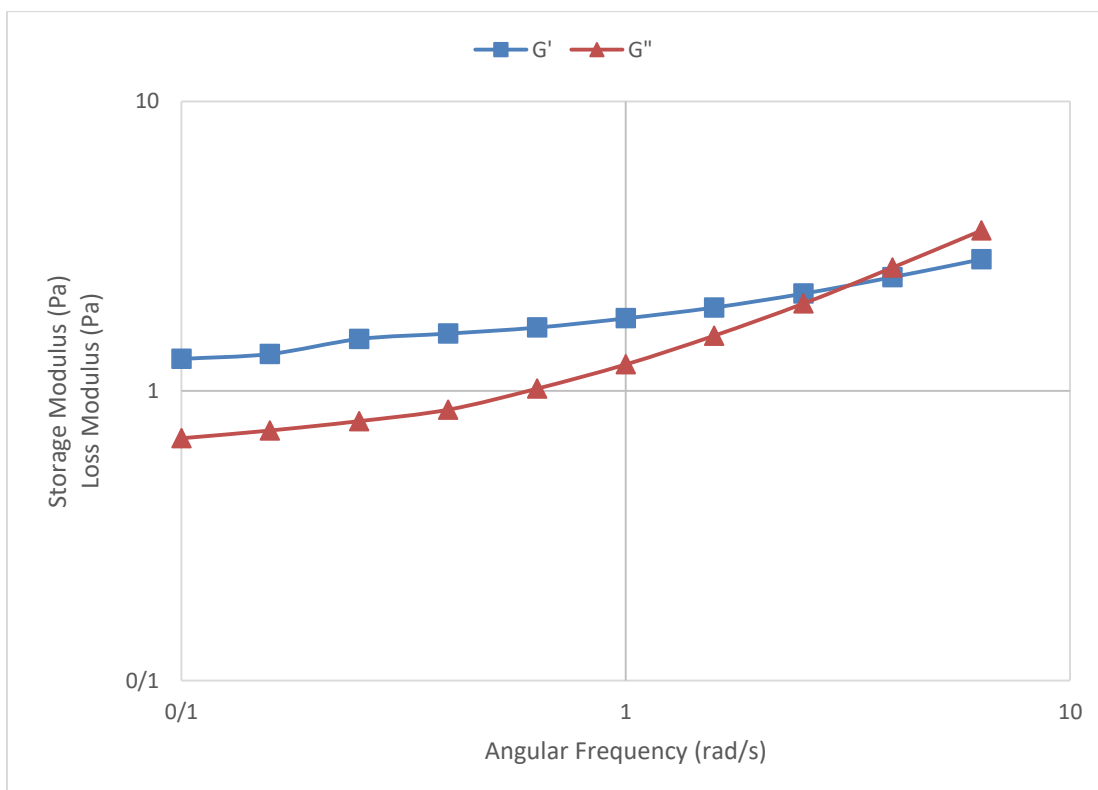
شکل ۴-۱۰: منحنی G' و G'' برحسب فرکانس برای غلظت C12

با افزایش بیشتر مقدار آب محلول‌های فوق، منحنی مدول الاستیک افزایش یافته و بر منحنی ویسکوز غلبه می‌کند. علت این پدیده شروع ساختار میسلار محلول می‌باشد و در این شرایط رفتار الاستیک مایع بر رفتار ویسکوز غلبه می‌کند. شکل ۴-۱۱ و ۴-۱۲، نمودارهای G' و G'' را برحسب فرکانس به ترتیب برای غلظت‌های C4 و C13 نشان می‌دهد.

در این حالت نیز با اضافه کردن مقادیر بیشتری از آب، این دو مدول فاصله‌ی بیشتری از هم می‌گیرند که نشان‌دهنده قوی‌تر شدن بخش الاستیک مایع می‌باشد.

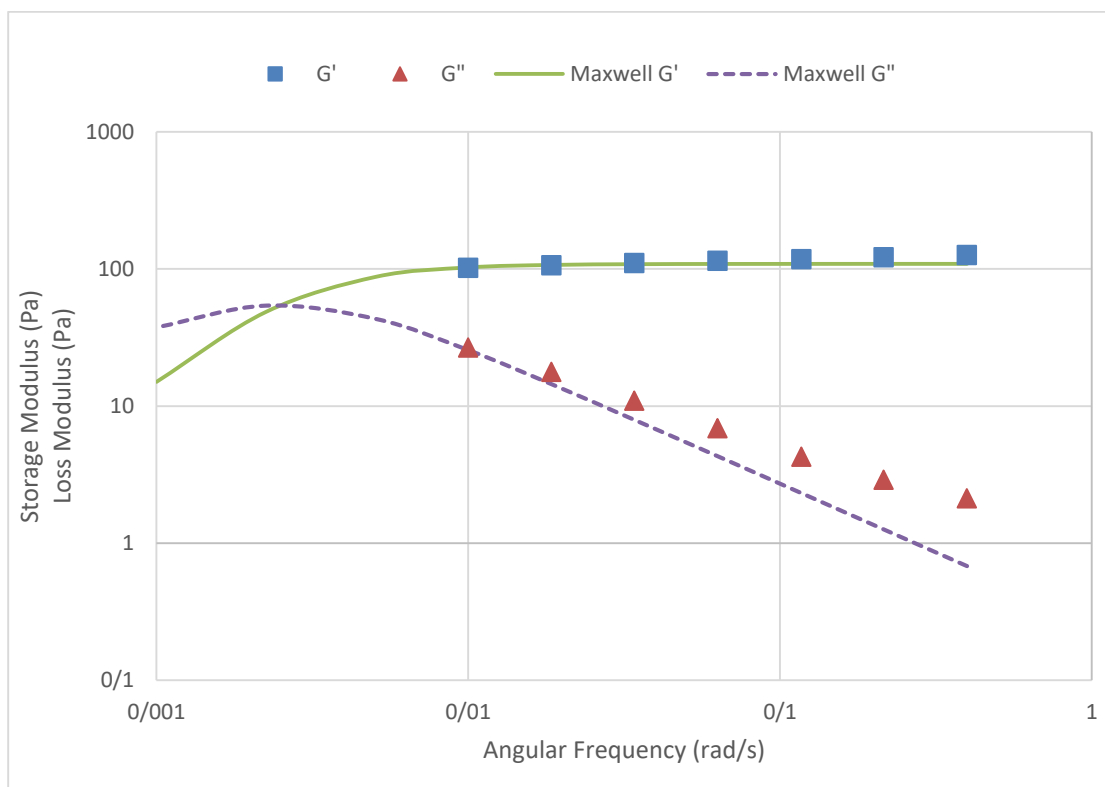


شکل ۴-۱۱: منحنی G' و G'' برحسب فرکانس برای غلظت C4



شکل ۴-۱۲: منحنی G' و G'' برحسب فرکانس برای غلظت C13

سایر غلظت‌های موجود در جدول ۴-۱ از مدل‌های منحنی فوق پیروی می‌کنند. در غلظت خاصی از لسیتین و آب مدول ویسکوز تقویت‌شده و حالت صعودی به خود می‌گیرد. این غلظت که C17 می‌باشد، در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. غلظت C17 محلول پایه با توجه به این که از مدل ماکسول پیروی می‌کند، شبکه میسل‌های کرمی شکل (*wormlike micelles*) را تشکیل داده است. شکل ۴-۱۴ برازش منحنی نتایج تست رئومتری را با مدل ماکسول نشان می‌دهد. با توجه به محدودیت‌های فرکانس‌های پایین، تست رئومتری تا فرکانس ۰,۰۱ انجام شده است و مدل ماکسول فیت شده بر روی این داده‌ها *relaxation time* حدود ۴۰۰ ثانیه را پیش‌بینی می‌کند. این فیت با توجه به روابط ۴-۱ و ۴-۲ به صورت محاسباتی انجام شده است.

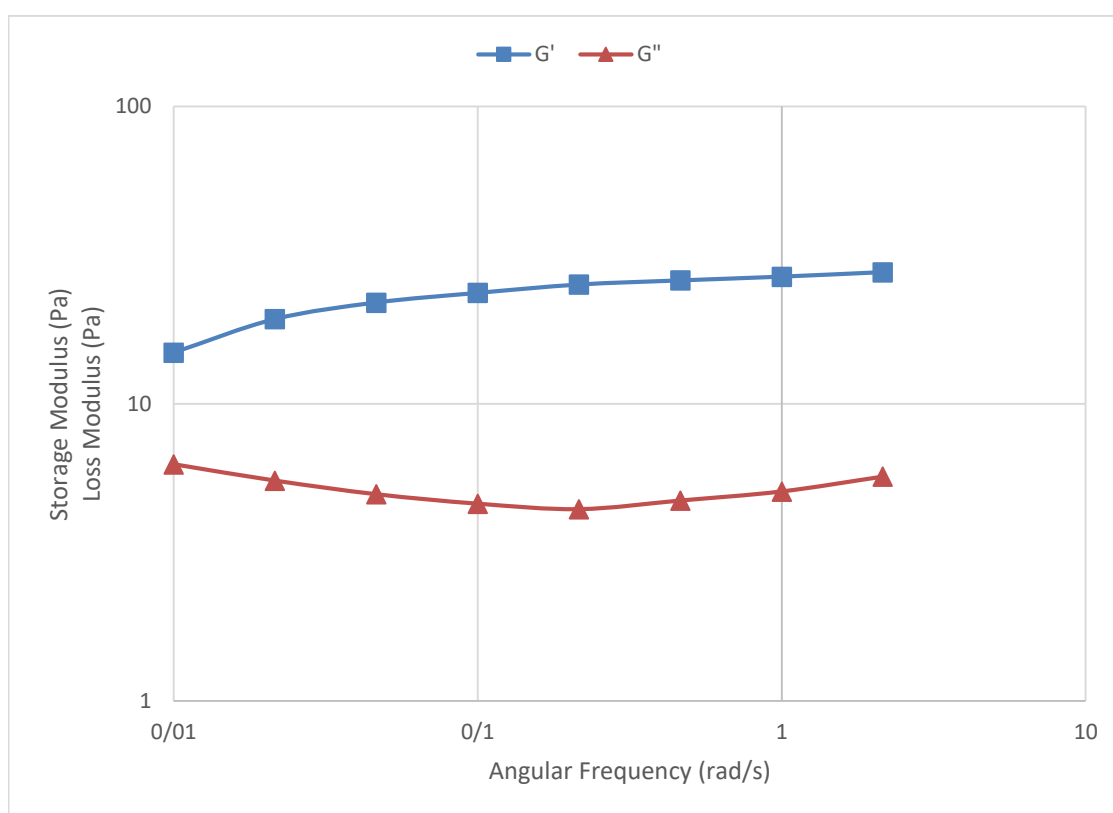


شکل ۴-۱۳: برازش منحنی نتایج تست محلول C17 با مدل ماکسول

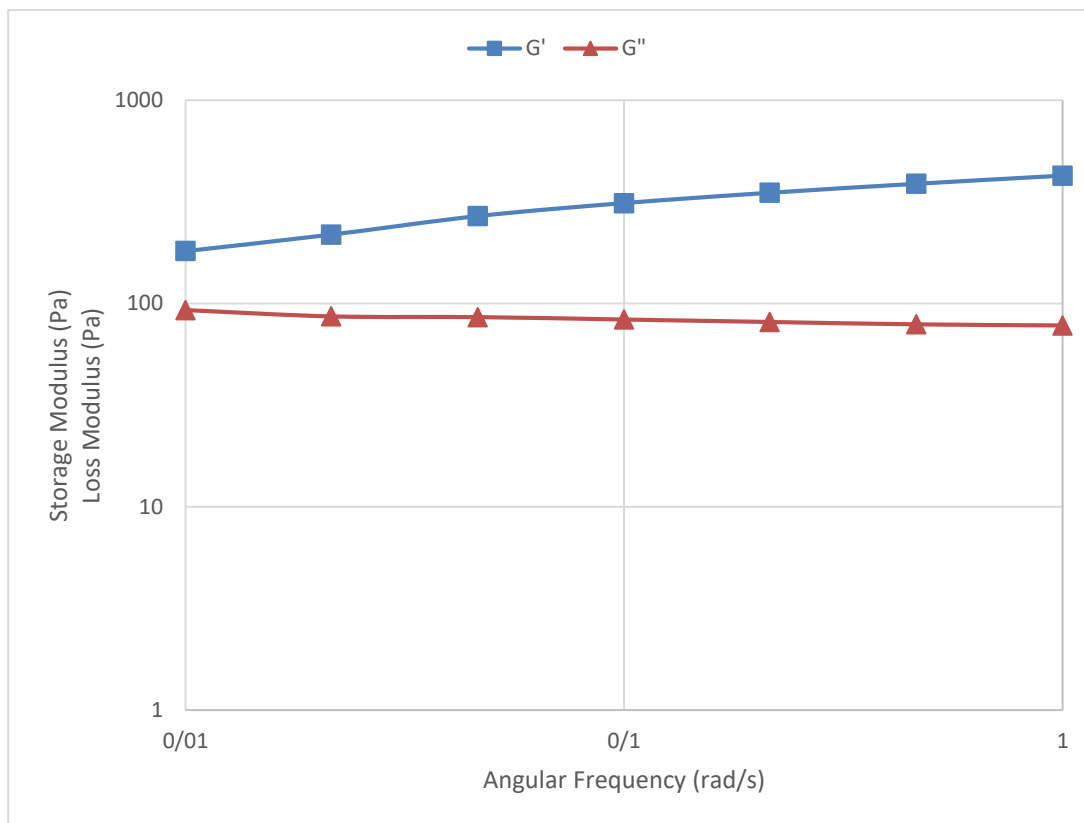
همان‌طور که در شکل نیز مشخص است در این غلظت مدول الاستیک (G') به یک محدوده ثابت رسیده است. این محدوده ثابت نشان‌دهنده مدول برشی (G_0) می‌باشد که مقدار آن ۱۰۹ پاسکال

می‌باشد.

با توجه به این که سیال MR هدف بر روی غلظت C17 ساخته شده است به منظور مقایسه تست‌های سیال MR، در دو غلظت دیگر یعنی C16 و C18 نیز سیال MR ساخته شد. نتایج مدول الاستیک و ویسکوز این دو محلول به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۴: منحنی G' و G'' بر حسب فرکانس برای غلظت C16



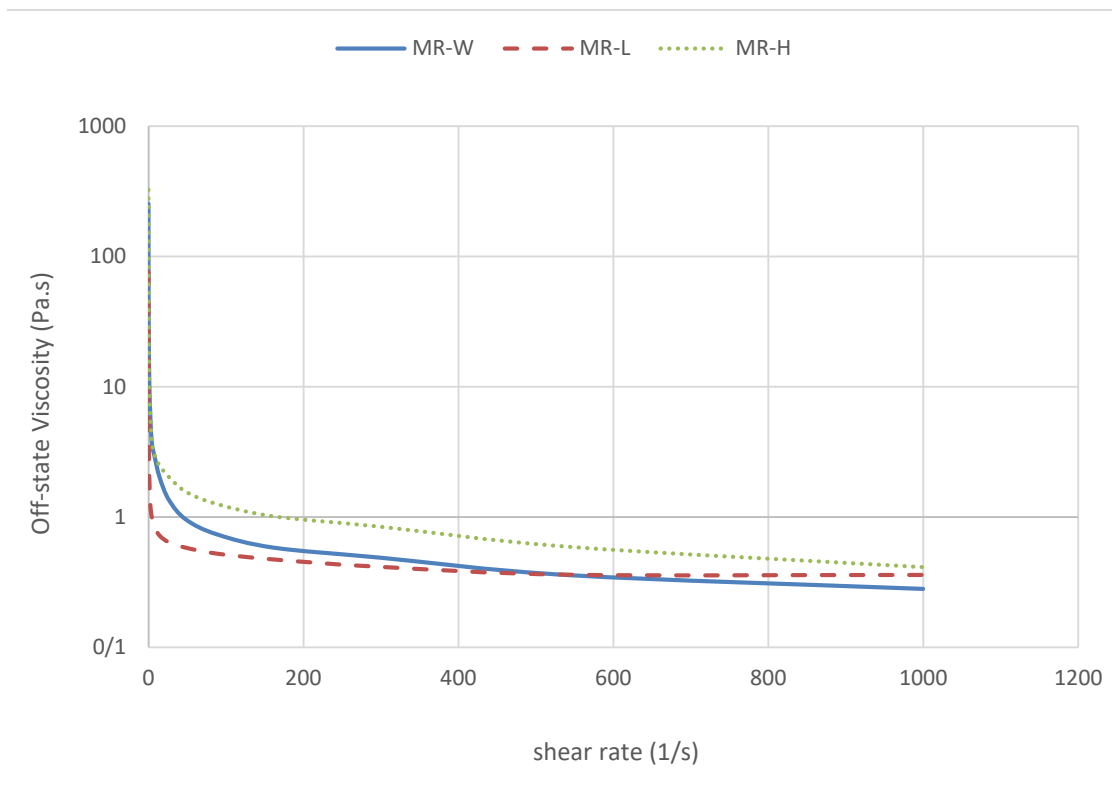
شکل ۴-۱۵: منحنی G' و G'' برحسب فرکانس برای غلظت C18

همان طور که مشاهده می شود، غلظت های C16 و C18 از مدل ماکسول پیروی نمی کنند، بنابراین ساختار محلول های حاوی شبکه میسل های کرمی شکل (*wormlike micelles*) را ندارند.

۴-۴- نتایج حاصل از تست رئومتر سیال MR

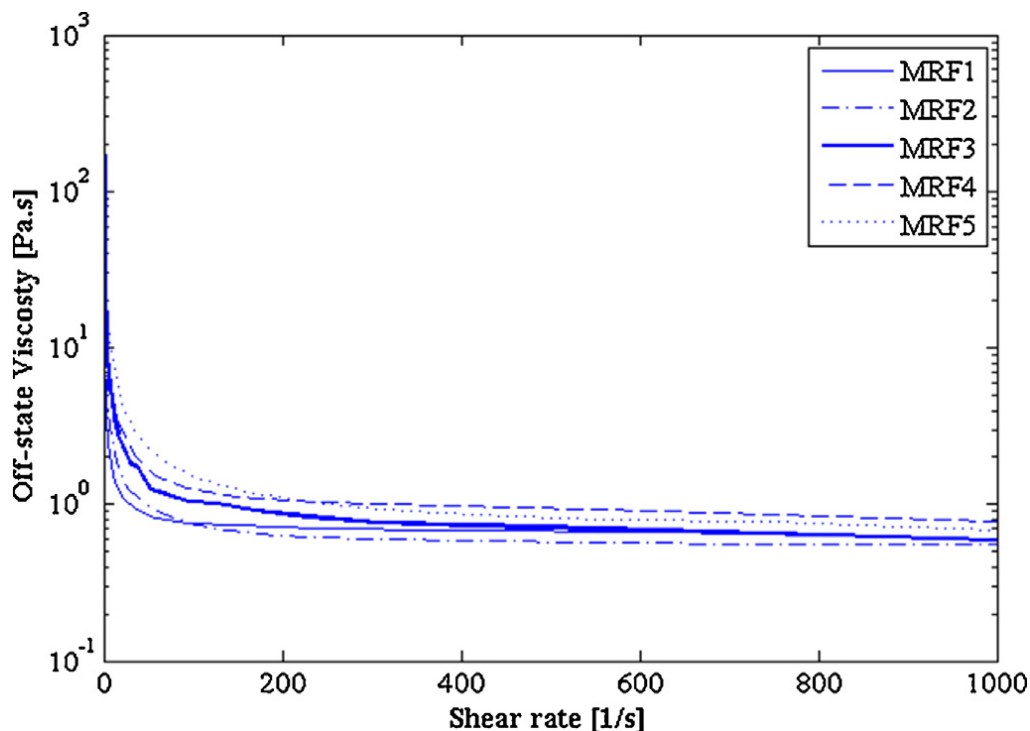
۴-۴-۱- ویسکوزیته سیال MR در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی

پس از ساخت سیال MR، تست های تحت میدان مغناطیسی با دستگاه رئومتر انجام شد. به منظور سادگی کار به ترتیب سیال MR با محلول پایه غلظت C16، MR-L، سیال MR در غلظت تشکیل شبکه میسل های کرمی شکل (C17)، MR-W، و در غلظت C18، MR-H نام گذاری شد. یکی از بررسی های مهم مربوط این نوع سیال، ویسکوزیته سیال در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی می باشد. نتایج حاصل از این آزمون در شکل ۴-۱۶ دیده می شود.



شکل ۴-۱۶: ویسکوزیته سیال MR تابعی از نرخ برش در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی

همان طور که در فصول قبل نیز اشاره شد، محلول‌های حاوی میسل‌های کرمی شکل باعث افزایش ویسکوزیته و ویسکوزیته برش صفر محلول پایه می‌شوند، در نتیجه ویسکوزیته سیال MR نیز افزایش می‌یابد. مقدار ویسکوزیته سیال MR در نرخ‌های برشی پایین به ترتیب برای $MR-L$ ، $MR-W$ و $MR-H$ 76 ، 254 و 325 پاسکال ثانیه می‌باشد. یکی از نکات مهم در ارتباط با سیال MR این موضوع می‌باشد که افزایش ویسکوزیته در نرخ برش‌های پایین اثر مؤثری بر روی پایداری ذرات ایفا می‌کند. از طرفی پایین بودن مقادیر ویسکوزیته در محدوده نرخ برش 0 تا 200 ($1/s$) کمک شایانی برای عملکرد بهتر دمپر MR می‌کند. در مطالعه آقای آشتیانی و همکاران [۵۰] مقدار ویسکوزیته سیال MR در نرخ‌های برش پایین با افزودنی اسید استئاریک حدود 200 پاسکال ثانیه می‌باشد. نتایج این مطالعه در شکل ۴-۱۷ ارائه شده است.



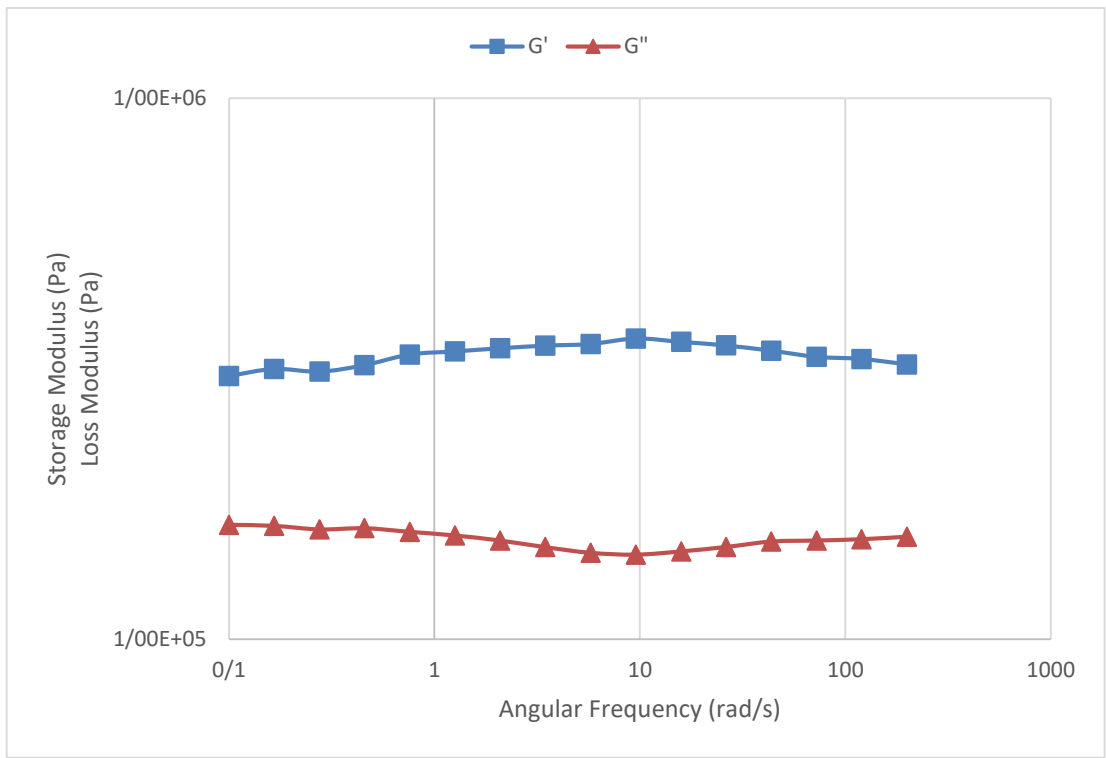
شکل ۴-۱۷: نتایج ویسکوزیته در حالت بدون میدان برای نمونه‌های سیال MR در مطالعه آقای آشتیانی و

همکاران [۵۰]

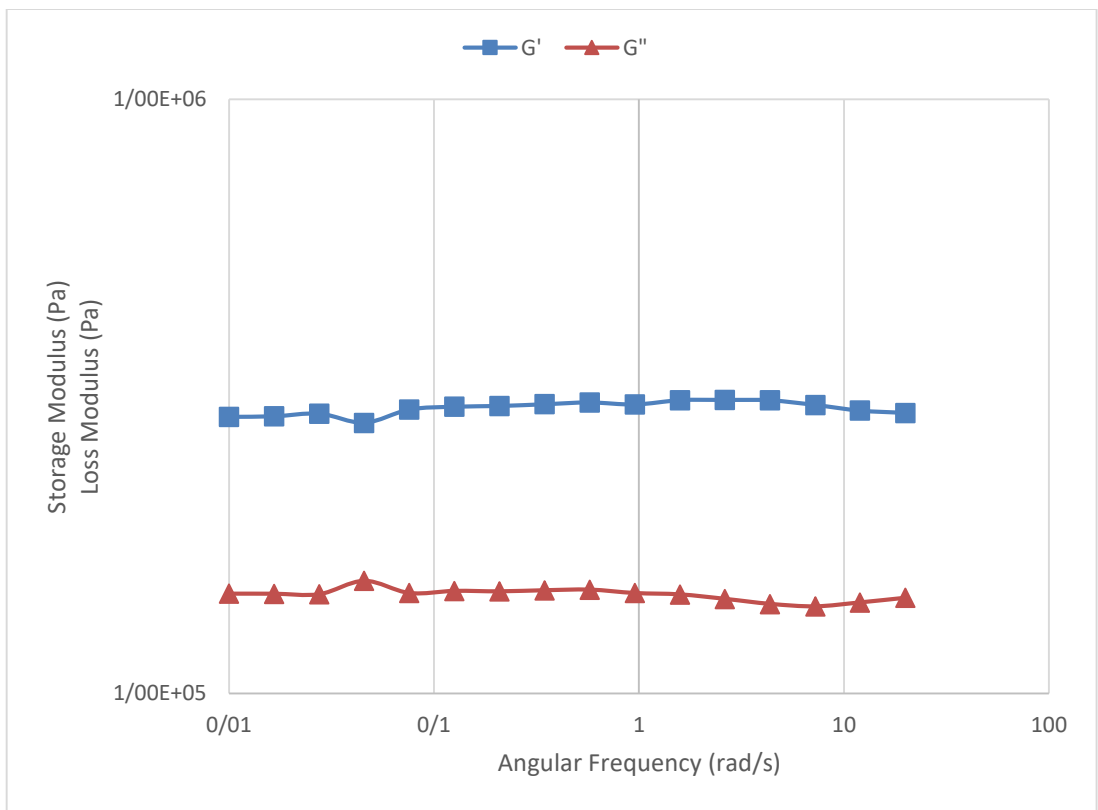
با مقایسه شکل‌های ۴-۱۶ و ۴-۱۷ می‌توان دریافت که سیال MR-W در محدوده‌ی بهتری از ویسکوزیته در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی قرار دارد.

۴-۴-۲- نتایج منحنی‌های G' و G'' برحسب فرکانس تحت میدان مغناطیسی

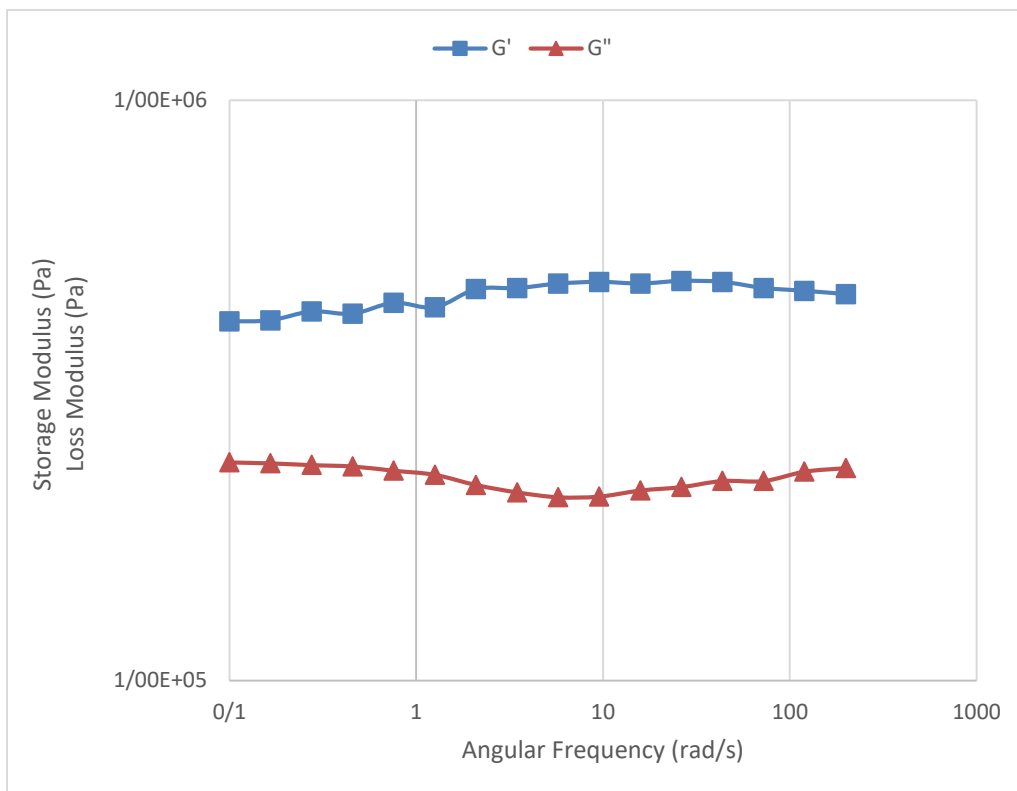
نتایج حاصل از منحنی‌های G' و G'' برحسب فرکانس تحت میدان مغناطیسی (76 kA/m) برای سیال‌های MR-L، MR-W و MR-H در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۱۸ می‌توان دریافت که تحت میدان مغناطیسی ثابت مدول الاستیک و ویسکوز تغییر نمی‌کند که نشان‌دهنده رفتار شبه جامد در سیال MR می‌باشد. در این شکل مقدار مدول الاستیک از ویسکوز بالاتر می‌باشد که این رفتار نشان‌دهنده خاصیت الاستیک سیال MR می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴-۱۸: منحنی‌های G' و G'' بر حسب فرکانس تحت میدان مغناطیسی 76 (kA/m) برای سیال‌های الف)

MR-L ، MR-W (ب) و MR-H (ج)

۴-۳-۴- مقادیر تنش تسلیم MR

مدل‌های رئولوژیکی مختلفی برای بررسی رفتار رئولوژیکی سیال MR وجود دارد. در مدل‌های کارآمد، تنش تسلیم تابعی از قدرت میدان مغناطیسی در نظر گرفته شده است. یکی از مدل‌های متداول که قادر به پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی سیال MR است مدل هرشل-بالکی^۱ می‌باشد [۴۷, ۴۸]. این مدل یک تنش تسلیم را معرفی می‌کند که در آن جریان سیال گرادیان سرعت ندارد اگر تنش اعمال شده افزایش نیابد. معادله ۴-۴ مدل هرشل-بالکی را معرفی می‌کند.

^۱ Herschel-Bulkley model

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (3-4)$$

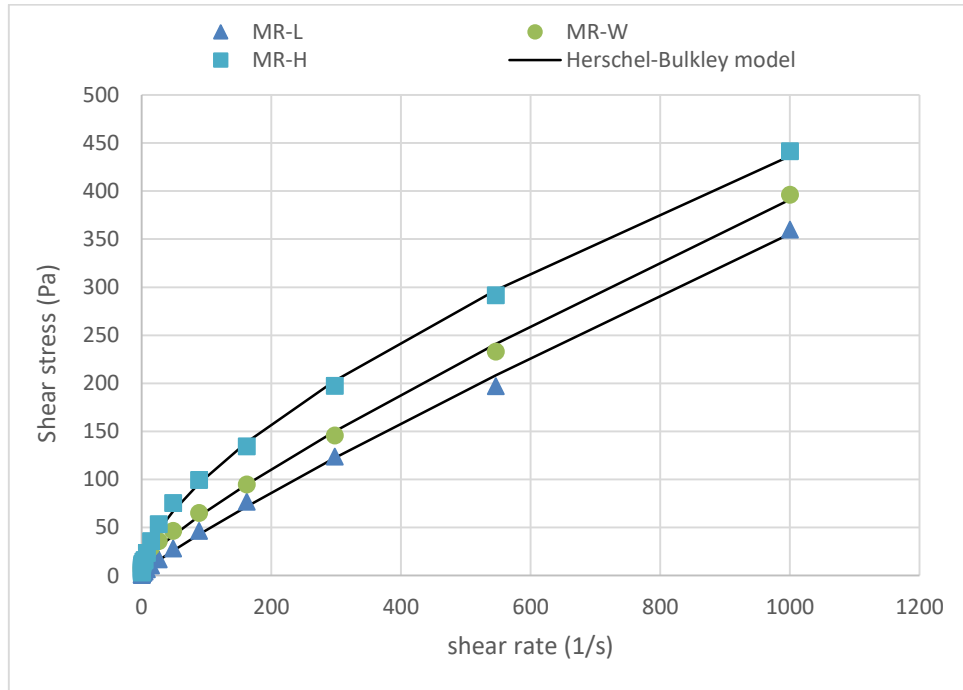
در رابطه فوق τ_y ، تنش تسلیم، K ضریب هرشل-بالکی و n شاخص نیرو می باشد. به منظور برازش منحنی رابطه فوق بر روی داده های به دست آمده از آزمون رئومتر روی روش حداقل مربعات بکار گرفته شده است. و این عملیات در نرم افزار اکسل انجام شده است. جدول ۲-۴ مقادیر K ، n و τ_y را بر حسب میدان های مختلف مغناطیسی نشان داده است.

جدول ۲-۴: مقادیر ضریب هرشل-بالکی و شاخص نیرو تحت میدان های مغناطیسی مختلف

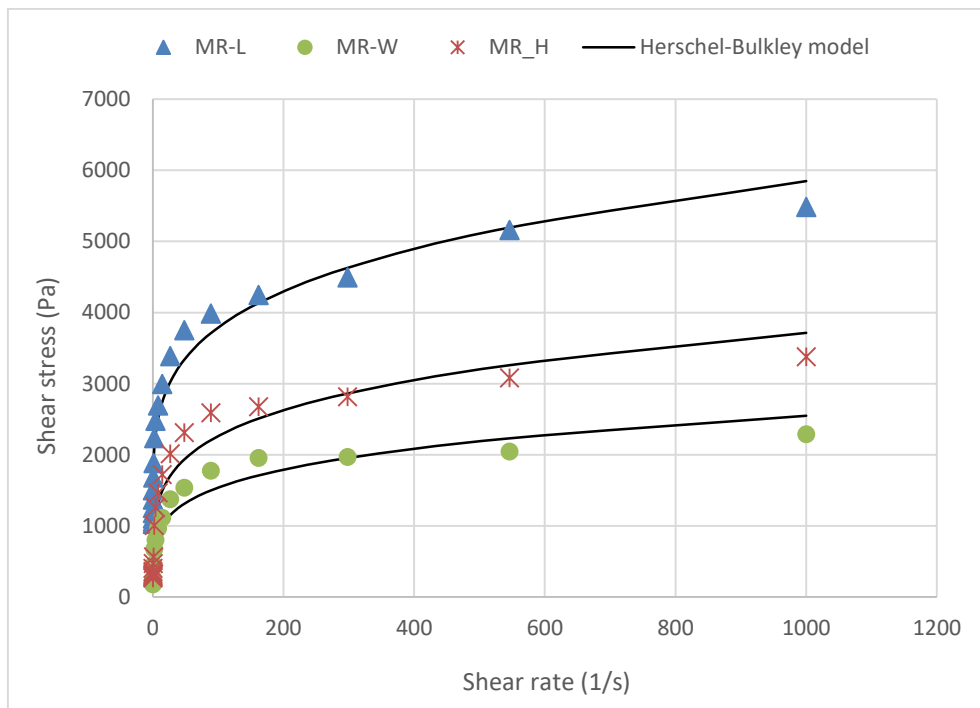
τ_y (Pa)	K	n	H(kA/m)	نمونه
1.827	0.760	0.889	0	MR-L
930.82	965.92	0.235	42	
4785.04	1153.36	0.285	76	
6251.48	1162.10	0.300	91	
10.765	1.23	0.829	0	MR-W
17.56	547.64	0.221	42	
1233.38	1263.30	0.289	76	
4319.76	656.05	0.360	91	
6.205	4.91	0.647	0	MR-H
25.97	821.21	0.217	42	
1950.33	2430.21	0.204	76	
4420.92	2680.22	0.228	91	

پس از محاسبه ضرایب، مدل هرشل-بالکی بر روی مقادیر تنش به دست آمده از تست رئومتری،

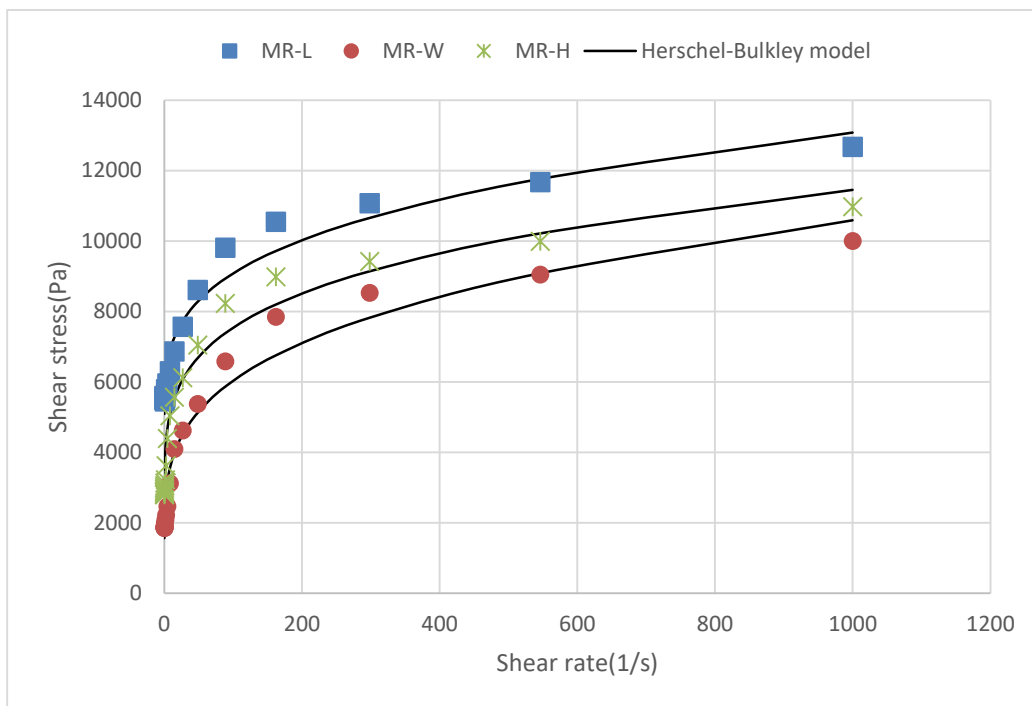
فیت شد. شکل ۴-۱۹ این برازش منحنی را برای میدان‌های مغناطیسی مختلف نشان می‌دهد.



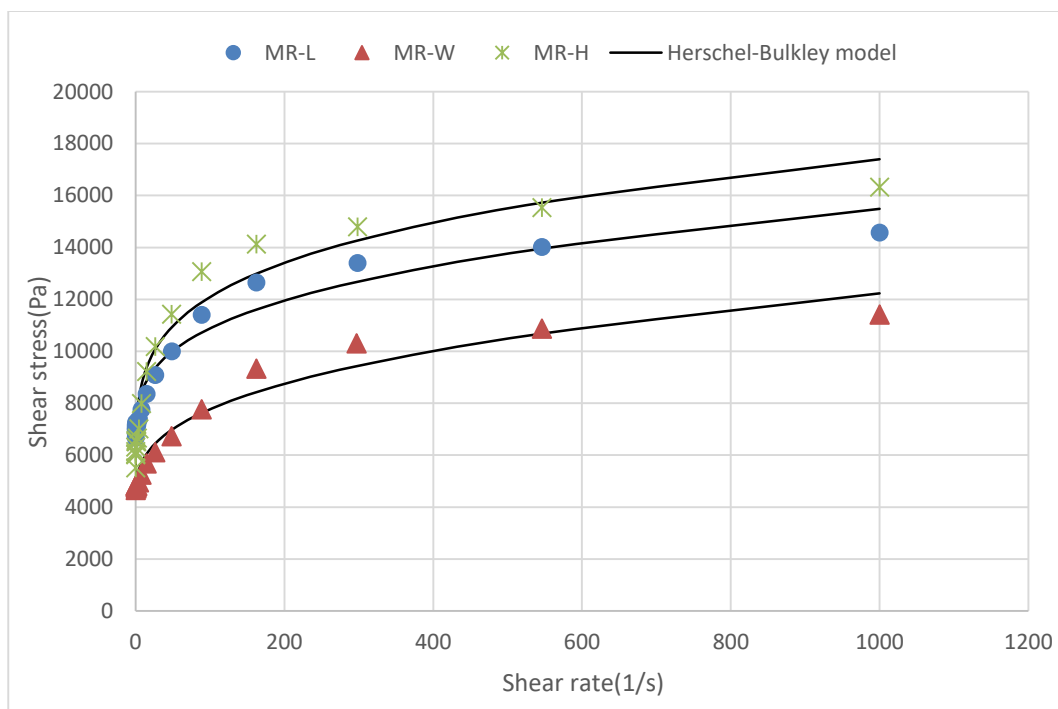
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴-۱۹: مقادیر تنش بر حسب نرخ برش سیال MR برای الف) H=0 ب) H=42 ج) H=76 د) H=91

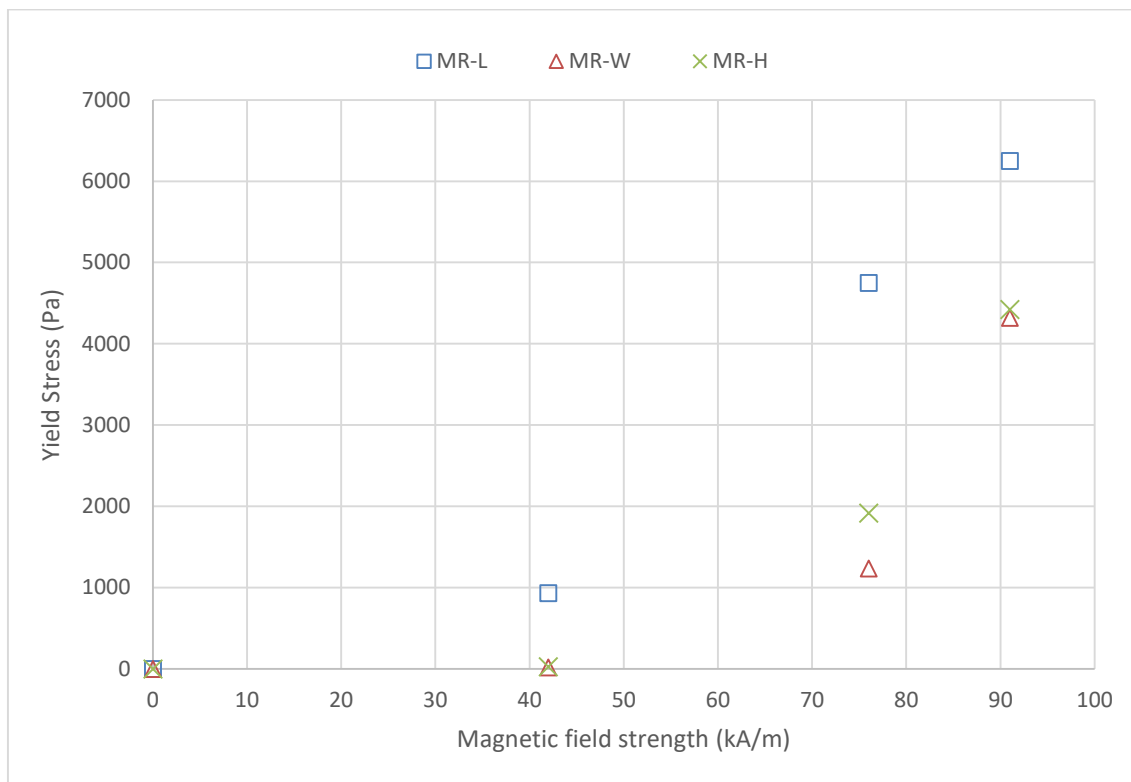
(kA/m)

همان‌طور که در شکل ۴-۱۹ دیده می‌شود در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی سیال MR رفتار شبه نیوتنی دارد، همچنین در این حالت افزایش تنش متناسب با ویسکوزیته سیال پایه می‌باشد، یعنی سیال MR با محلول پایه غلیظ‌تر تنش بیشتری دارد. در حالت میدان مغناطیسی اعمال‌شده، مقادیر تنش با افزایش مقادیر میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که تمامی نمونه‌ها از مدل غیر نیوتنی هرشل بالکی پیروی می‌کنند. همچنین در این حالت سیال MR رفتار رقیق‌شوندگی برشی را دارد و با افزایش میدان مغناطیسی این رفتار بهبود پیدا می‌کند. برای سیال‌های MR با محلول پایه غلظت پایین مقادیر تنش بیشتر است، که این نتیجه می‌تواند به دلیل تشکیل ساده‌تر زنجیره‌ی ذرات کربونیل باشد. همچنین مقادیر تنش برای سیال MR-W کم‌تر از بقیه نمونه‌ها می‌باشد، که این نتیجه می‌تواند به دلیل تشکیل شبکه میسل‌های کرمی شکل می‌باشد که مانع تشکیل ساده‌تر زنجیره‌ی ذرات کربونیل می‌شوند.

با استفاده از مدل هرشل-بالکی مقادیر تنش تسلیم هر یک از نمونه‌ها تحت میدان‌های مغناطیسی مختلف به دست می‌آید. این مقادیر از تنش تسلیم برای میدان مغناطیسی $H=42$ (kA/m) برای MR-L ، MR-W و MR-H به ترتیب ۸۲،۹۳۰ ، ۱۷،۵۶ و ۲۵،۹۷ پاسکال، و برای میدان مغناطیسی $H=76$ (kA/m) برای MR-L ، MR-W و MR-H به ترتیب ۴۷۵۰،۰۴ ، ۱۲۳۳،۳۸ و ۱۹۱۷،۵۴ پاسکال ، و برای میدان مغناطیسی $H=91$ (kA/m) برای MR-L ، MR-W و MR-H به ترتیب ۶۲۵۱،۴۸ ، ۴۳۱۹،۷۶ و ۴۴۲۰،۹۲ پاسکال می‌باشد.

برای اعتبارسنجی مقدار تنش تسلیم (T_y) سیال MR-W که سیال هدف در این مطالعه می‌باشد، نتیجه تنش در میدان $H=91$ (kA/m) را با بهترین نمونه از مطالعه آقای آشتیانی و همکاران ایشان در میدان یکسان مورد مقایسه قرار گرفت [۴۷]. در این میدان برای نمونه سیال MR حاوی اسید استتاریک مقدار تنش تسلیم حدود ۴۶۰۰ پاسکال می‌باشد و بنابراین می‌توان مقدار تنش تسلیم سیال MR-W را با تقریب مناسبی در این محدوده مناسب در نظر گرفت.

مقادیر تنش تسلیم تمامی نمونه‌ها در میدان‌های مغناطیسی مختلف در شکل ۴-۲۰ دیده می‌شود.



شکل ۴-۲۰: مقادیر تنش تسلیم برحسب میدان مغناطیسی

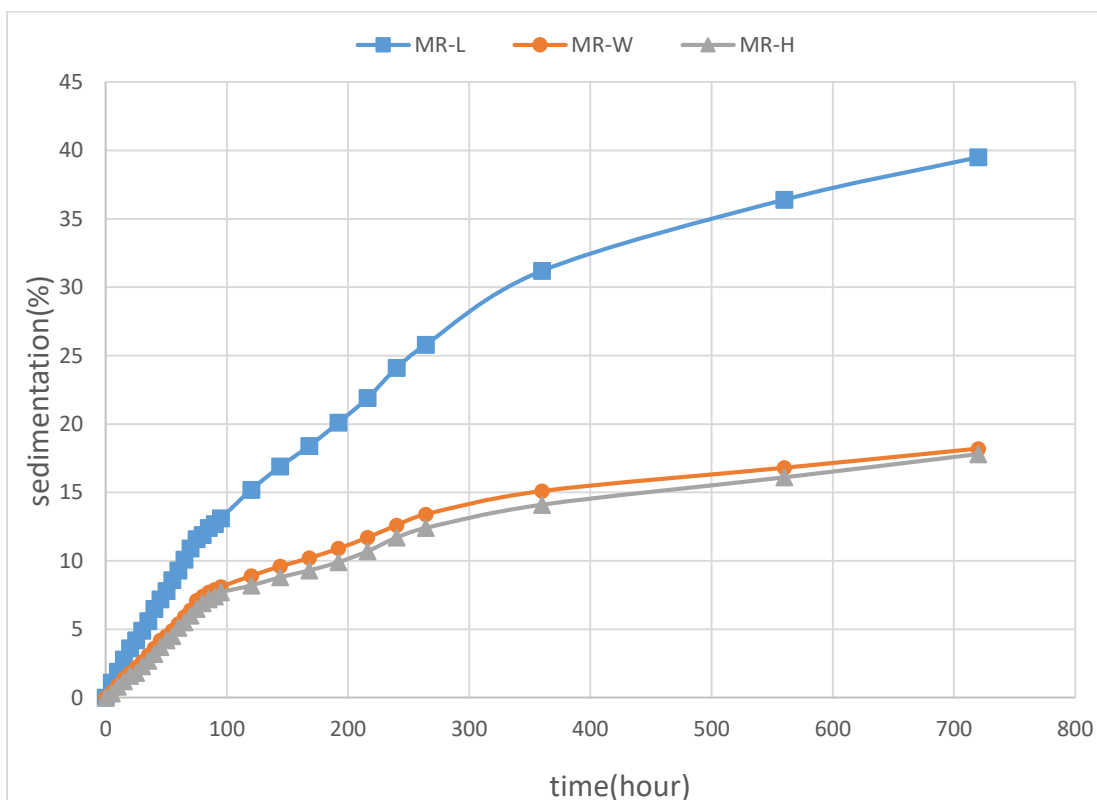
۴-۴-۴- نتایج آزمون پایداری نمونه‌ها

نمونه‌های سیال MR به مدت یک ماه به منظور قیاس پایداری آن‌ها، اندازه‌گیری شد. روش تعیین درصد ته‌نشینی نمونه‌ها طبق رابطه ۴-۴ می‌باشد.

$$(۴-۴) \quad \text{مقدار ته‌نشینی نمونه‌ها برحسب درصد} = \frac{\text{طول قسمت شفاف لوله}}{\text{طول کل لوله}} \times 100$$

نتایج حاصل از این آزمون در شکل ۴-۲۱ گزارش شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است نرخ ته‌نشینی نمونه‌ها در ابتدا بالا بوده و با افزایش زمان کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع افزایش ویسکوزیته سیال به دلیل افزایش پودر آهن در قسمت ته‌نشین شده می‌باشد. میزان ته‌نشینی سیال MR-L که حاوی محلول پایه C16 است نسبت به سایر نمونه‌ها مناسب نمی‌باشد و پس از ۲۴ ساعت حدود ۴,۲ درصد و پس از یک ماه حدود ۳۹,۵ درصد از سیال ته‌نشین شده است.

میزان ته‌نشینی سیال MR-W که سیال هدف می‌باشد تقریباً با سیال MR-H که حاوی محلول پایه با بیشترین غلظت می‌باشد، برابر است. این نوع رفتار نشان‌دهنده اثر شبکه میسل‌های کرمی شکل است که موجب بهبود پایداری ذرات شده است. مقدار ته‌نشینی سیال‌های MR-W و MR-H به ترتیب پس از ۲۴ ساعت ۲،۲ و ۱،۸ درصد و پس از یک ماه، ۱۸،۲ و ۱۷،۸ درصد می‌باشد.



شکل ۴-۲۱: نتایج آزمون پایداری نمونه‌ها برحسب ساعت در طول یک ماه

لازم به ذکر است یکی از نمونه‌های سیال MR شرکت لرد با درصد وزنی پودر ۸۵ درصد، پس از ۲۴ ساعت دارای ۳ درصد ته‌نشینی می‌باشد. از دلایل پایداری خوب محلول MR-W می‌توان به ویسکوزیته برش صفر بالای محلول پایه و امکان جذب ذرات پودر آهن توسط شاخه‌های میسل‌های کرمی شکل در باشد. یکی دیگر از دلایل پایداری مناسب سیال MR-W را می‌توان به این صورت عنوان کرد که ماده‌ی

لسیتین یک سر آب دوست (هیدروفیلیک^۱) و یک سر آب گریز (هیدروفوبیک^۲) دارد، قسمت آب گریز با روغن پیوند می خورد و سر آب دوست با آهن کربونیل پیوند خورده و بنابراین آهن کربونیل در شبکه میسل های کرمی شکل شرکت می کند و موجب افزایش پایداری سیال MR می شود. سیال MR-H نیز مانند سیال MR-W پایداری مناسبی دارد ولی به دلیل بالا بودن ویسکوزیته این سیال عملاً امکان کاربرد در دمپر MR را ندارد. سیال MR-W بعد از مدت یک ماه دوباره مخلوط شد و این عمل به سادگی صورت گرفت. علت این موضوع را می توان به این صورت ذکر کرد که ذرات پودر آهن در میسل های کرمی شکل پیوند خورده که پس از مدت طولانی مانع از انباشتگی بیش از حد این ذرات روی هم می شود.

۴-۵- نتیجه گیری

با توجه محدوده مناسب ویسکوزیته سیال MR-W و همچنین تنش تسلیم این سیال می توان آن را گزینه مناسبی برای استفاده در دمپر مکانیکی عنوان کرد.

نتایج نشان داد که این نوع از سیالات تحت میدان مغناطیسی ثابت رفتار شبه جامد را دارند و رفتار الاستیک از خود نشان می دهند.

همچنین این سیال پس از مدت طولانی (حدود یک ماه) به دلیل وجود شبکه میسل های کرمی شکل، قابلیت پراکندگی دوباره در سیال پایه را دارد که این ویژگی سیال آن را نسبت به سایر سیال های MR متمایز می کند.

۴-۶- پیشنهاد برای کارهای آینده

هنوز در سطح دنیا مطالعه ویژه ای بر روی اثر میسل های کرمی شکل بر روی پایداری سیال MR انجام نشده است. بنابراین این موضوع می تواند برای تحقیقات محققان فعال در این حوضه نتایج خوبی

¹ hydrophilic

² hydrophobic

به دنبال داشته باشد. از جمله موارد پیشنهادی برای مطالعات آینده می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- بررسی دمایی سیال MR با محلول پایه متشکل از میسل های کرمی شکل
- بررسی اثر سایر گروه های میسل های کرمی شکل بر روی سیال MR که ترکیبات دیگری دارند.
- بررسی کارایی سیال MR حاوی میسل های کرمی شکل در دمپر مغناطیسی
- بررسی سیال MR حاوی میسل های کرمی شکل و درصدهای مختلف از پودر آهن
- بررسی اثر میسل های کرمی شکل بر روی پایداری پودر آهن از طریق سایر مشاهدات فیزیکی همچون SEM، SAXS و ...
- به کارگیری روش هایی برای افزایش تنش تسلیم این نوع از سیالات
- بررسی اثر ذرات غیر هم شکل در سیال MR حاوی میسل های کرمی شکل

٥- مراجع

- [1] Jolly, M.R., J.W. Bender, and J.D. Carlson. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. in Smart Structures and Materials 1998: Passive Damping and Isolation. 1998. International Society for Optics and Photonics.
- [2] Phillips, R.W., Engineering applications of fluids with a variable yield stress. 1969, University of California, Berkeley.
- [3] Carlson, J.D. and M.R. Jolly, MR fluid, foam and elastomer devices. mechatronics, 2000. 10(4-5): p. 555-569.
- [4] Ginder, J., L. Davis, and L. Elie, Rheology of magnetorheological fluids: Models and measurements. International journal of modern physics b, 1996. 10(23n24): p. 3293-3303.
- [5] Olabi, A.-G. and A. Grunwald, Design and application of magneto-rheological fluid. Materials & design, 2007. 28(10): p. 2658-2664.
- [6] Premalatha, S.E., R. Chokkalingam, and M. Mahendran, Magneto mechanical properties of iron based MR fluids. Am. J. Polym. Sci, 2012. 2(4): p. 50-55.
- [7] Poynor, J.C., Innovative designs for magneto-rheological dampers. 2001, Virginia Tech.
- [8] Gravatt, J.W., Magneto-rheological dampers for super-sport motorcycle applications. 2003, Virginia Tech.
- [9] Guðmundsson, K.H., Design of a magnetorheological fluid for an MR prosthetic knee actuator with an optimal geometry. 2011.
- [10] An, J. and D.-S. Kwon, Modeling of a magnetorheological actuator including magnetic hysteresis. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2003. 14(9): p. 541-550.
- [11] Kordonsky, W., Elements and devices based on magnetorheological effect. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1993. 4(1): p. 65-69.

- [12] Weiss, K.D., J.D. Carlson, and D.A. Nixon, Viscoelastic properties of magneto-and electro-rheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1994. 5(6): p. 772-775.
- [13] Nakano, M., M. Yamamoto, and M. Jolly. Dynamic Viscoelasticity of a Magnetorheological Fluid in Oscillatory Slit Flow, 6th Int. in Conf. on ERF, MRS and Their Applications, Yonezawa, Japan. 1997.
- [14] Stanway, R., J. Sproston, and N. Stevens, Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper. *Journal of Electrostatics*, 1987. 20(2): p. 167-184.
- [15] Kormann, C., M. Laun, and G. Klett. Magnetorheological fluids with nano-sized particles for fast damping systems. in *Proceedings of 4th International Conference on New Actuators*,(15.-17. 1994
- [16] Jolly, M.R., J.D. Carlson, and B.C. Munoz, A model of the behaviour of magnetorheological materials. *Smart Materials and Structures*, 1996. 5(5): p. 607.
- [17] Ginder, J., L. Davis, and L. Elie, Rheology of magnetorheological fluids: models and measurements. 5th Int. Conf. on ER Fluids and MR Suspensions. Singapore: World Scientific, 1995. 514.
- [18] Rabinow, J., The magnetic fluid clutch. *Electrical Engineering*, 1948. 67(12): p. 1167-1167.
- [19] Chin, B.D., et al., Rheological properties and dispersion stability of magnetorheological (MR) suspensions. *Rheologica Acta*, 2001. 40(3): p. 211-219.
- [20] Foister, R.T., Magnetorheological fluids. 1997, Google Patents.
- [21] Genç, S., Synthesis and properties of magnetorheological (MR) fluids. 2003, University of Pittsburgh.
- [22] Goncalves, F.D., J.-H. Koo, and M. Ahmadian, A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies--Part I: MR fluid and MR fluid models. *The Shock and Vibration Digest*, 2006. 38(3): p. 203-220.
- [23] Carlson, J.D., What makes a good MR fluid?, in *Electrorheological Fluids And Magnetorheological Suspensions*. 2002, World Scientific. p. 63-69.

- [24] Pollicove, H. and D. Golini. Deterministic manufacturing processes for precision optical surfaces. in Key Engineering Materials. 2003. Trans Tech Publ.
- [25] Świtoński, E., et al., Prototype magnetorheological fluid damper for active vibration control system. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007. 21(1): p. 55-62.
- [26] Metered, H., Modelling and control of magnetorheological dampers for vehicle suspension systems. 2010, The University of Manchester (United Kingdom).
- [27] Carlson, J. and J. Sproston. Controllable fluids in 2000-status of ER and MR fluid technology. in Proc. 7th Int. Conf. New Actuators. 2000.
- [28] Spronston, J., et al. Controllable fluids in 2002—Status of ER and MR technology. in 8th International Conference on New Actuators & 2nd International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems. 2002.
- [29] Yang, G., et al., Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. Engineering structures, 2002. 24(3): p. 309-323.
- [30] Yang, G., et al., Dynamic modeling of large-scale magnetorheological damper systems for civil engineering applications. Journal of Engineering Mechanics, 2004. 130(9): p. 1107-1114.
- [31] Kciuk, M. and R. Turczyn, Properties and application of magnetorheological fluids. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006. 18(1-2): p. 127-130.
- [32] Bajaj, H., G.S. Birdi, and A.U. Bhushan, Application of magnetorheological (MR) fluid damper and its social impact. International Journal of Mechanical and Production Engineering, 2014. 2: p. 41-45.
- [33] Carlson, J.D., W. Matthis, and J.R. Toscano. Smart prosthetics based on magnetorheological fluids. in Smart structures and materials 2001: industrial and commercial applications of smart structures technologies. 2001. International Society for Optics and Photonics.
- [34] Fang, F.F., H.J. Choi, and M.S. Jhon, Magnetorheology of soft magnetic

carbonyl iron suspension with single-walled carbon nanotube additive and its yield stress scaling function. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009. 351(1-3): p. 46-51.

[35] Premalatha, S.E., R. Chokkalingam, and M. Mahendran, Magneto mechanical properties of iron based MR fluids. *Am. J. Polym. Sci*, 2012. 2(4): p. 50-55.

[36] DONG, X.-f., et al., Properties of magneto-rheological fluids based on amorphous micro-particles. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012. 22(12): p. 2979-2983.

[37] Jiang, W., et al., Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011. 323(24): p. 3246-3250.

[38] Ngatu, G., et al., Dimorphic magnetorheological fluids: exploiting partial substitution of microspheres by nanowires. *Smart Materials and Structures*, 2008. 17(4): p. 045022.

[39] Mrlík, M., et al., Improved thermooxidation and sedimentation stability of covalently-coated carbonyl iron particles with cholesteryl groups and their influence on magnetorheology. *Journal of colloid and interface science*, 2013. 396: p. 146-151.

[40] Guerrero- Sanchez, C., et al., Magnetorheological fluids based on ionic liquids. *Advanced Materials*, 2007. 19(13): p. 1740-1747.

[41] Kim, J.E. and H.J. Choi, Magnetic carbonyl iron particle dispersed in viscoelastic fluid and its magnetorheological property. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011. 47(10): p. 3173-3176.

[42] Rwei, S.-P., et al., Characterization and preparation of carbonyl iron-based high magnetic fluids stabilized by the addition of fumed silica. *Journal of Solid State Chemistry*, 2019. 274: p. 308-314.

[43] Franck, A. and T.I. Germany, Viscoelasticity and dynamic mechanical testing. TA Instruments, New Castle, DE, USA AN004.

[44] Palazzo, G., Wormlike reverse micelles. *Soft Matter*, 2013. 9(45): p.

10668-10677.

[45] Cautela, J., et al., Wormlike reverse micelles in lecithin/bile salt/water mixtures in oil. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017. 532: p. 411-419.

[46] Angelico, R., et al., Impact of branching on the viscoelasticity of wormlike reverse micelles. *Soft Matter*, 2012. 8(42): p. 10941-10949.

[47] Ashtiani, M. and S. Hashemabadi, An experimental study on the effect of fatty acid chain length on the magnetorheological fluid stabilization and rheological properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015. 469: p. 29-35.

[48] BASF, Product datasheet: Carbonyl iron powders, 3443.

[49] Hashizaki, K., et al., Highly Viscoelastic Reverse Wormlike Micellar Systems from a Mixture of Lecithin, Polyglycerol Fatty Acid Monoesters, and an Oil. *Journal of oleo science*, 2017: p. ess17091.

[50] Macosko, C.W., *Rheology Principles. Measurements and Applications*, 1994.

Abstract

MR fluids are a kind of suspension and a category of intelligent materials that in the presence of external actuator, their rheological properties such as viscosity and yield stress change very quickly and less than a millisecond. The most important feature of these fluids is the phase change from liquid to semi-solid state, which their yield stress can be quickly controlled by the applying of magnetic fields. There are basically three components to the composition of a MR fluid including the magnetic particles, the carrier fluid, and the stabilizing additives. The deposition of suspended particles in MR fluids is due to the difference in particle density and carrier fluid. In systems such as earthquake dampers where the system is rarely activated, because it is difficult to disperse these particles, their sedimentation should be avoided as much as possible. Many methods have been proposed to improve the stability of MR fluid that most of these methods increase the viscosity of the state without applying a magnetic field. In this study, we investigated the effect of wormlike micelles formation on carrier fluid to improve MR fluid stability. Micelles are a group of dense surfactants that are dispersed in a liquid colloid. In many micellar solutions containing hydrocarbon base fluid, lecithin is used as a surfactant. To compare MR fluid with base solution containing creamy micelles the other two concentrations are made of micellar solution, one is made above the concentration of worm-like micelles and the other is made below. After preparing the base solution for making MR fluid, iron powder with 65% by weight was added to the solution. The target MR viscosity value is 254 Pa.s without applying a magnetic field which is well within the range of other studies. One of the common models that can predict the rheological behavior of MR fluid is the Herschel-Bockley model. According to this model, the yield stress at the magnetic field of $H = 91$ (kA / m) for the MR fluid is 4319.76 Pascal. MR fluid samples were measured for one month to compare their stability. The amount of MR-W fluid deposition, which is the target fluid, is approximately equal to the MR-H fluid containing the highest concentration of base solution. This behavior reflects the effect of the worm-like micelles network, which improves the stability of the particles. The settling rates of MR-W and MR-H fluids were 18.2 and 17.8% after one month, respectively. Special Features of MR Fluid In this study, it is easy to disperse the carrier fluid after a long time.

Keywords: Magnetorheological fluid stability, Worm-like micelles, Maxwell model, Yield stress, Lecithin



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**An experimental investigation on
magnetorheological fluids stability based on
Surfactants**

By:

Alireza Bagheri

Supervisor(s):

Dr. Ali Khaleghi,

Dr. Mahmoud Norouzi

Advisor:

Dr. Mojtaba Ghatie

September 2019