

اللَّهُ الرَّحْمَنُ الرَّحِيمُ



دانشکده مهندسی مکانیک

گروه طراحی جامدات

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی دینامیکی پارامتریک میراگر مگنتورئولوژیکیال و کنترل آن با

در نظر گرفتن پارامتر دما

نگارنده : احسان کیومرثی

اساتید راهنما:

دکتر امیر جلالی

دکتر محمود نوروزی

استاد مشاور:

دکتر مجتبی قطعی

خرداد ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه جامدات

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای /خانم احسان کیومرثی به شماره دانشجویی: ۹۲۱۲۰۴۴

تحت عنوان:

مدل سازی دینامیکی پارامتریک میراگر مغناطیسی و کنترل آن با در نظر گرفتن پارامتر دما

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به ...

پدر و مادر عزیزم

یادم باشد که در بخشیدن دانش سخاوتمند باشم مانند آن ها که به سخا بخشیدند و

چشم بستند؛ چرا که جهل تاریکی است مسری

ابتدا بر خود لازم می دانم از زحمات خانواده ی عزیزم که عمرشان را برایم فدا کردند قدر دانی

کنم. از راهبانی های اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر جلالی، جناب آقای دکتر

نوروزی و جناب آقای دکتر قطعی پاسکزارم و از همه ی دوستانی که در این مدت قوت

قلبم بوده اند تشکر می کنم.

تعهد نامه

اینجانب احسان کیومرثی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی دینامیکی پارامتریک میراگر مغناطیسی و کنترل آن با در نظر گرفتن پارامتر دما تحت راهنمایی دکتر امیر جلالی و دکتر محمود نوروزی و دکتر مجتبی قطعی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « 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 بافتهای آنها) 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 اخلاقی 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 شاهرود می باشد. این مطلب باید به

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده

سیال مگنتورئولوژیکال (MRF) گونه‌ای از مواد هوشمند است که خواص رئولوژیکال آن با اعمال میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. این سیالات به دلیل تنش تسلیم و لزجت قابل کنترل در دو دهه‌ی اخیر کاربردهای فراوانی نظیر انواع میراگرها، کلاچ و ترمز، تجهیزات پزشکی، پرداخت سطوح صیقلی و ... یافته است به دلیل اختلاف زیاد چگالی این بین ذرات مغناطیسی و سیال حامل معمولاً عامل پایدارساز نیز به این سیالات اضافه می‌گردد، با این وجود هنوز هم پایداری MRF چالش اصلی توسعه‌ی کاربرد آن است. مشکل دیگر استفاده از این سیالات تغییرات قابل توجه رفتار رئولوژیکال آن نسبت به تغییرات دما است، چرا که عموماً در محفظه‌های کوچک با گرمای تولید شده داخلی بالا عمل می‌کنند. در این تحقیق نمونه‌های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شد. این نمونه‌ها از نظر ته‌نشینی با هم مقایسه شد. برای کم کردن اثر تغییر دما بر خواص رئولوژیکال از روغن سیلیکون که ظرفیت گرمایی بالایی دارد در ساخت نمونه‌ی سیال بهینه به کار رفت. رابطه‌ای برای بیان رفتار تنش تسلیم برحسب میدان مغناطیسی اعمالی و دما ارائه شد. به منظور طراحی، تخمین عمل کرد و کنترل میراگر مگنتورئولوژیکال به یک مدل دینامیکی مناسب نیاز است. انواع مدل‌های ارائه شده برای میراگرهای مگنتورئولوژیکال را می‌توان به دو دسته‌ی مدل‌های پدیده‌شناختی و مدل‌های فیزیکی تقسیم‌بندی نمود. مدل‌های پدیده‌شناختی نیاز به ساخت میراگر و انجام آزمایش برای شناسایی ضرایب دارد اما مدل‌های فیزیکی تنها وابسته به مشخصات هندسی میراگر و خصوصیات سیال است به همین دلیل برای فاز طراحی، این مدل‌ها بسیار مناسب هستند. میراگرهای مود ترکیبی (جریان + برش) به علت ظرفیت نیروی بالا و عملکرد مناسب در همه‌ی سرعت‌های پیستون (حتی سرعت‌های پایین) برای کاربرد در سیستم تعلیق وسایل نقلیه مناسب هستند. مدل‌سازی دینامیکی این میراگرها با در نظر گرفتن ترم اینرسی برای اولین بار در این پژوهش انجام شده است و علاوه بر آن در نظر گرفتن تغییرات دما نیز در این فرآیند مدل‌سازی لحاظ شده است. علی‌رغم لزوم در

نظر گرفتن دما به علت تغییرات دمایی زیاد سیال میراگر مگنتورئولوژیکال حین کار، تحقیقات کمی دما را نیز در مدل میراگر در نظر گرفته‌اند. به منظور نشان دادن اثر بخشی میراگر مگنتورئولوژیکال نسبت به سیستم تعلیق غیرفعال، سیستم تعلیق نیمه‌فعال با استفاده از منطق گیره- فضایی شبیه‌سازی و نسبت به سیستم تعلیق غیرفعال مقایسه شد.

کلیدواژه‌ها: سیال مگنتورئولوژیکال، میراگر مگنتورئولوژیکال مود ترکیبی، مدل دینامیکی، دما

فهرست مطالب

۱.....	فصل اول: مقدمه.....
۲.....	۱-۱ پیش‌گفتار.....
۲.....	۲-۱ سیالات مگنتورئولوژیکال.....
۴.....	۱-۲-۱ تسلیم.....
۵.....	۲-۲-۱ رفتار جریان.....
۵.....	۳-۱ مدل‌های سیال مگنتورئولوژیکال.....
۶.....	۱-۳-۱ مدل پلاستیک بینگهام.....
۶.....	۲-۳-۱ مدل بایویسکوز.....
۷.....	۳-۳-۱ مدل هرشل - باکلی.....
۸.....	۴-۱ مودهای سیال مگنتورئولوژیکال.....
۸.....	۱-۴-۱ مود برشی.....
۹.....	۱-۴-۲ مود جریان (شیر).....
۱۰.....	۳-۴-۱ مود نوسانی.....
۱۱.....	۵-۱ اجزای سیال مگنتورئولوژیکال.....
۱۱.....	۱-۵-۱ فاز پراکنده‌شونده.....
۱۲.....	۲-۵-۱ فاز پیوسته.....
۱۳.....	۳-۵-۱ افزودنی.....
۱۴.....	۶-۱ کاربرد سیالات مگنتورئولوژیکال.....

۱۴	۱-۶-۱ ابزار مگنتورئولوژیکیال
۱۶	۲-۶-۱ میراگرهای مگنتورئولوژیکیال
۲۰	۷-۱ عملکرد میراگر مگنتورئولوژیکیال
۲۲	۱-۷-۱ مشخصه‌های میراگر مگنتورئولوژیکیال [۸]
۲۴	۸-۱ پیشینه‌ی ساخت سیال مگنتورئولوژیکیال
۳۳	۹-۱ مدل‌سازی دینامیکی میراگر
۳۴	۱-۹-۱ انواع مدل‌های ارائه‌شده برای میراگر مگنتورئولوژیکیال
۳۵	۱۰-۱ پیشینه‌ی مدل‌سازی میراگر مگنتورئولوژیکیال
۳۵	۱-۱۰-۱ مدل‌های پارامتری و غیرپارامتری
۳۵	۲-۱۰-۱ مدل‌های فیزیکی
۳۷	۳-۱۰-۱ اثر پارامتر دما
۳۸	۱۱-۱ معرفی تحقیق حاضر
۳۹	۱-۱۱-۱ ضرورت و کاربرد موضوع
۴۰	۲-۱۱-۱ جنبه‌های نوآوری پژوهش
۴۱	۱۲-۱ جمع‌بندی فصل
۴۳	فصل دوم: ساخت سیال مگنتورئولوژیکیال
۴۴	۱-۲ پیش‌گفتار
۴۴	۲-۲ مواد آزمایش
۴۵	۲-۳ ساخت سیال

۴۶.....	آزمایش سیال مگنتورئولوژیکال	۲-۴
۴۸.....	پایداری سیالات مگنتورئولوژیکال	۵-۲
۴۹.....	تعیین تأثیر پارامترها بر روی پایداری به کمک روش تاگوچی	۶-۲
۵۰.....	بررسی رفتار رئولوژیکال	۷-۲
۵۱.....	اثر میدان مغناطیسی بر رفتار رئولوژیکال	۱۱-۷-۲
۵۱.....	اثر دما بر رفتار رئولوژیکال	۲-۷-۲
۵۲.....	مدل سازی تنش تسلیم	۳-۷-۲
۵۲.....	جمع بندی	۸-۲
۵۳.....	فصل سوم: مدل سازی دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیکال	
۵۴.....	پیش گفتار	۱-۳
۵۴.....	معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سیال در شیار	۲-۳
۵۷.....	شرایط مرزی	۳-۳
۵۸.....	رابطه ی پیوستگی	۴-۳
۶۱.....	نیروی میراگر	۵-۳
۶۳.....	حل عددی	۶-۳
۶۴.....	اثر دما	۷-۳
۶۷.....	جمع بندی:	۸-۳
	فصل چهارم: کنترل نیمه فعال در سیستم تعلیق خودرو با استفاده از میراگر	
۶۹.....	مگنتورئولوژیکال	

۷۰.....	پیش‌گفتار	۱-۴
۷۰.....	سیستم‌های کنترل ارتعاشات	۲-۴
۷۱.....	۱-۲-۴ منطق گیره- فضایی	۱-۲-۴
۷۵.....	شبیه‌سازی خودرو	۳-۴
۷۹.....	جمع‌بندی	۴-۴
۸۱.....	فصل پنجم: تحلیل نتایج	
۸۲.....	پیش‌گفتار	۱-۵
۸۳.....	نتایج ساخت و مدل‌سازی سیال مگنتورئولوژیکال	۲-۵
۸۳.....	۱-۲-۵ پایداری سیال مگنتورئولوژیکال	۱-۲-۵
۸۴.....	۱۲-۲-۵ اثر اختلاط، نوع سیال و غلظت فاز پراکنده‌شونده در پایداری سیال	۱۲-۲-۵
۸۵.....	۳-۲-۵ لزجت حالت بدون میدان	۳-۲-۵
۸۷.....	۵-۲-۴ اهمیت‌سنجی تأثیر پارامترها بر روی پایداری MRF	۵-۲-۴
۸۸.....	۵-۲-۵ اثر میدان مغناطیسی و دما بر رفتار رئولوژیکال MRF	۵-۲-۵
۹۵.....	۵-۳ تحلیل خطا	۵-۳
۹۷.....	۴-۵ نتایج مدل‌سازی دینامیکی	۴-۵
۱۰۱.....	۵-۴-۱ عملکرد مدل میراگر در دمای ثابت	۵-۴-۱
۱۰۳.....	۲-۴-۵ مدل‌کردن اثر دما بر عملکرد میراگر	۲-۴-۵
۱۰۵.....	۵-۵ نتایج کنترل	۵-۵
۱۱۱.....	۶-۵ جمع‌بندی	۶-۵

۱۱۱.....	۱-۶-۵	نتایج ساخت سیال مگنتورئولوژیکال
۱۱۳.....	۲-۶-۵	نتایج مدل سازی دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیکال
۱۱۴.....	۳-۶-۵	نتایج مدل کنترل
۱۱۴.....	۴-۶-۵	پیشنهادات برای پژوهش های آینده
۱۱۵.....		مراجع

- شکل ۱-۱ آرایش ذرات مغناطیس‌پذیر با وجود و نبود میدان مغناطیسی (اثر مگنتورئولوژیکال) [۱] ۳
- شکل ۲-۱ رفتار سیالات مطابق با مدل بینگهام پلاستیک [۱] ۶
- شکل ۳-۱ مدل بایویسکوز ایده‌آل [۱] ۷
- شکل ۴-۱ مدل هرشل-باکلی [۱] ۸
- شکل ۵-۱ مود برشی با اعمال میدان مغناطیسی [۱] ۹
- شکل ۶-۱ مود جریان با اعمال میدان مغناطیسی [۱] ۱۰
- شکل ۷-۱ مود نوسانی با اعمال میدان مغناطیسی [۱] ۱۱
- شکل ۸-۱ ماشین پرداخت مگنتورئولوژیکال [۲۳] ۱۶
- شکل ۹-۱ شماتیک مودهای میراگر مگنتورئولوژیکال [۲۸] ۱۸
- شکل ۱۰-۱ نمای برش میراگر مگنتورئولوژیکال تک مخزنه [۲۳] ۱۹
- شکل ۱۱-۱ نمای برش میراگر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه [۲۳] ۲۰
- شکل ۱۲-۱ نمای برش میراگر مگنتورئولوژیکال دوسر متحرک [۲۳] ۲۰
- شکل ۱۳-۱ شماتیک اجزای داخلی میراگر مگنتورئولوژیکال (مود ترکیبی) [۲۹] ۲۱
- شکل ۱۴-۱ منحنی نیرو بر حسب سرعت پیستون با مشخصه‌ها [۱۹] ۲۴
- شکل ۱-۲ رئومتر (الف) و ویسکومتر (ب) مورد استفاده در آزمایش ۴۸
- شکل ۲-۲ نحوه‌ی اندازه‌گیری ته‌نشینی (راست) سیال MR با ته‌نشینی (چپ) ۴۹
- شکل ۱-۳ شماتیک میراگر مود ترکیبی ۵۵
- شکل ۲-۳ شماتیک پروفیل سرعت MRF در میراگر مود ترکیبی ۵۸
- شکل ۳-۳ المان ناحیه‌ی پلاگ در جریان سیال MR در شیار میراگر ۶۰

- شکل ۳-۴ نمایش روش نیوتون-رافسون به صورت گرافیکی [۶۵]..... ۶۳
- شکل ۳-۵ دیاگرام نشان دهنده‌ی روش محاسبه‌ی دمای میراگر در هر لحظه..... ۶۸
- شکل ۴-۱ پیکربندی میراگر گیره-فضایی [۶۸]..... ۷۲
- شکل ۴-۲ انتقال پذیری سیستم تعلیق غیرفعال [۶۸]..... ۷۲
- شکل ۴-۳ انتقال پذیری سیستم تعلیق با پیکربندی گیره-فضایی [۶۸]..... ۷۲
- شکل ۴-۴ سیستم تعلیق نیمه‌فعال [۶۸]..... ۷۳
- شکل ۴-۵ نمایش نیروی میرایی گیره-فضایی [۶۹]..... ۷۴
- شکل ۴-۶ بلوک دیاگرام منطق کنترل گیره-فضایی [۶۷]..... ۷۵
- شکل ۴-۷ مدل دو درجه آزادی یک‌چهارم خودرو..... ۷۶
- شکل ۴-۸ پروفیل جاده نوع ۱ [۷۱]..... ۷۷
- شکل ۴-۹ پروفیل جاده نوع ۲ [۷۱]..... ۷۸
- شکل ۴-۱۰ شبیه‌سازی سیستم تعلیق غیرفعال مدل یک‌چهارم خودرو..... ۷۹
- شکل ۵-۱ نسبت ته‌نشینی نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکال برحسب زمان (ساعت) در دمای 25°C ... ۸۵
- شکل ۵-۲ لزجت بدون میدان سیالات مگنتورئولوژیکال و سیالات حامل برحسب نرخ برش..... ۸۷
- شکل ۵-۳ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش‌های طراحی شده، به کمک الگوریتم تاگوچی..... ۸۸
- شکل ۵-۴ تنش برشی برحسب نرخ برش در میدانهای مغناطیسی مختلف برای MR2 در دمای 25°C . ۹۰
- شکل ۵-۵ تنش برشی تسلیم بیشینه برحسب میدان مغناطیسی در دما مختلف..... ۹۰
- شکل ۵-۶ لزجت بدون میدان سیال MR2 برحسب نرخ برش در دماهای مختلف..... ۹۱
- شکل ۵-۷ تنش برشی MR2 برحسب نرخ برش در میدانهای مغناطیسی مختلف: (الف) در دمای 40°C (ب) در دمای 60°C (پ) در دمای 70°C (ت) در دمای 80°C ۹۳

- شکل ۵-۸ تنش برشی MR2 برحسب نرخ برش در دماهای مختلف: الف) در میدان 0 kA/m (ب) در میدان 36 kA/m (پ) در میدان 73 kA/m (ت) در میدان 109 kA/m (ث) در میدان 146 kA/m ۹۴
- شکل ۵-۹ تنش برشی تسلیم برحسب دما در میدان‌های مختلف ۹۵
- شکل ۵-۱۰ نمودار نیرو برحسب سرعت تحریک در فرکانس 10 HZ در تنش‌های تسلیم مختلف ۹۸
- شکل ۵-۱۱ نمودار نیرو برحسب سرعت تحریک در فرکانس 10 HZ در تنش‌های تسلیم مختلف ۹۹
- شکل ۵-۱۲ نمودار نیرو برحسب سرعت تحریک در فرکانس 20 HZ در تنش‌های تسلیم مختلف ۹۹
- شکل ۵-۱۳ نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی تحریک در فرکانس 20 HZ در تنش‌های تسلیم مختلف ۱۰۰
- شکل ۵-۱۴ نمودار نیرو برحسب سرعت تحریک در فرکانس 30 HZ در تنش‌های تسلیم مختلف ۱۰۰
- شکل ۵-۱۵ نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی تحریک در فرکانس 30 HZ در تنش‌های تسلیم مختلف ۱۰۱
- شکل ۵-۱۶ تغییرات اختلاف فاز گرادیان فشار شیار عبور سیال برحسب فرکانس تحریک ۱۰۳
- شکل ۵-۱۷ دمای کاری میراگر مگنتورئولوژیکال برحسب زمان ۱۰۴
- شکل ۵-۱۸ نمودار تغییرات نیروی میراگر برحسب زمان کاری در میدان‌های مغناطیسی مختلف ۱۰۵
- شکل ۵-۱۹ شتاب جرم فربندی‌شده (اتاق سرنشین) برحسب زمان برای حالت نیمه‌فعال و غیرفعال با ورودی نوع ۱ جاده و نیروی ثابت بیشینه با: الف) $G=7000$ (ب) $G=3500$ برای کنترل گیره- فضایی... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۰ جابه‌جایی جرم فربندی‌شده (اتاق سرنشین) برحسب زمان برای حالت نیمه‌فعال و غیرفعال با ورودی نوع ۱ جاده و نیروی ثابت بیشینه با: الف) $G=7000$ (ب) $G=3500$ برای کنترل گیره- فضایی... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۱ شتاب جرم فربندی‌شده (اتاق سرنشین) برحسب زمان برای حالت نیمه‌فعال و غیرفعال با ورودی نوع ۲ جاده و نیروی ثابت بیشینه با: الف) $G=7000$ (ب) $G=3500$ برای کنترل گیره- فضایی... ۱۰۹
- شکل ۵-۲۲ جابه‌جایی جرم فربندی‌شده (اتاق سرنشین) برحسب زمان برای حالت نیمه‌فعال و غیرفعال با ورودی نوع ۲ جاده و نیروی ثابت بیشینه با: الف) $G=7000$ (ب) $G=3500$ برای کنترل گیره- فضایی... ۱۱۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۱ مشخصات نمونه‌ی سیال مگنتورئولوژیکال ساخته‌شده در پژوهش‌ها..... ۲۸
- جدول ۱-۲ مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده از سیال مگنتورئولوژیکال..... ۴۶
- جدول ۲-۲ سطوح آزمایش در نظر گرفته شده برای الگوریتم تاگوچی..... ۵۰
- جدول ۱-۵ ضرایب برازش‌شده‌ی مدل هرشل- باکلی برای MR2..... ۸۹
- جدول ۲-۵ دقت اندازه‌گیری ویسکومتر دیجیتال..... ۹۶
- جدول ۳-۵ میزان انحراف مدل پیشنهادی برای تنش تسلیم MR2 از نتایج آزمایشگاهی..... ۹۶
- جدول ۴-۵ اندازه‌ی ضرایب مدل‌سازی..... ۹۷
- جدول ۵-۵ مقادیر عددی مدل یک‌چهارم خودرو [۶۶]..... ۱۰۵

فهرست علائم

علائم لاتین			
مرز داخلی پلاگ	y_{pi}	ارتفاع سیال شفاف	a
مرز خارجی پلاگ	y_{po}	ارتفاع قسمت کدر	b
سرعت دسته پیستون	V_P	میدان مغناطیسی اعمالی	H
دامنه‌ی سرعت تحریک	U	میدان مغناطیسی بحرانی	H_c
دبی سیال ورودی به شیپار	Q_i	زمان	t
دبی سیال جابه‌جاشده توسط پیستون	Q_i	سرعت سیال در راستای جریان	u
شعاع میانگین شیپار حلقوی	R	فشار سیال در هر نقطه	p
نیروی میراگر	F	اندازه‌ی شیپار میراگر	d
ژاکوبین	J	چگالی	ρ
طول ناحیه‌ی پلاگ	δ	فرکانس تحریک	f
دمای محیط	T_a	تنش برشی سیال	τ_{xy}
دمای سیال	T	تنش تسلیم سیال	τ_y
جریان	I	شعاع دسته پیستون میراگر	R_s
مقاومت کل سیم‌پیچ	R	شعاع پیستون میراگر	R_p
ضریب همرفت	h	مساحت دسته پیستون	A_s
جرم فنربندی شده	m_s	مساحت پیستون	A_p
جرم فنربندی نشده	m_w	سرعت زاویه‌ای تحریک	ω
فنر معادل سختی سیستم تعلیق	k_s	دامنه‌ی تحریک هارمونیک	A
فنر معادل سختی تایلر	k_w	جابه‌جایی تحریک	x
میراگر معادل میرایی سیستم تعلیق	C	سرعت تحریک	\dot{x}
جابه‌جایی جاده	x_r	طول قسمت فعال	L
جابه‌جایی چرخ	x_w	سطح خارجی پیستون	A_s
جابه‌جایی بدنه	x_s	لزجت دینامیکی پسا تسلیم	μ
		لزجت سینماتیکی پساتسلیم	ν

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ پیش‌گفتار

در این فصل ابتدا شرحی مختصر درباره‌ی سیالات مگنتورئولوژیکال^۱، ویژگی‌ها و کاربردهای آن ارائه و چگونگی کارکرد سیال، مزایا و محدودیت‌های پیش‌رو در استفاده و توسعه‌ی این فناوری بیان می‌گردد. پس از بیان برخی مفاهیم فیزیکی مربوط به این سیالات هوشمند، انواع دمپرهای مگنتورئولوژیکال معرفی و عمل‌کرد هر یک توضیح داده می‌شود. پژوهش‌های انجام شده در گذشته در زمینه‌ی ترکیب و ساخت سیال MR مرور شده است سپس انواع روش‌های مدل‌سازی میراگر مگنتورئولوژیکال و مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته و در آخر ضرورت انجام تحقیق حاضر و جنبه‌های نوآوری آن بیان گردیده است.

۱-۲ سیالات مگنتورئولوژیکال

مواد هوشمند قادر به تغییر شکل، اندازه یا حالت خود هستند که با یک توان خارجی کنترل می‌شوند و می‌توانند در کاربردهای بسیاری استفاده شوند. خصوصیات این مواد، مانند رسانایی، حجم یا لزجت^۲، می‌تواند به صورت چشم‌گیری با عوامل خارجی مانند دما، میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی تغییر کند. انواع مواد هوشمند عبارتند از مواد پیزوالکتریک^۳ (PZT)، سیالات الکتریکی^۴ (ERF) و سیالات مگنتورئولوژیکال (MRF) [۱]. رئولوژی مطالعه‌ی جریان و تغییر شکل تحت میدان خارجی اعمالی است. این سیال گونه‌ای از مواد هوشمند است که خواص مکانیکی‌اش با میدان مغناطیسی قابل کنترل است؛ به گونه‌ای که با اعمال میدان مغناطیسی در حد هزارم ثانیه از حالت مایع به حالت نیمه جامد تبدیل می‌شود. لزجت ظاهری این سیالات تحت میدان مغناطیسی تا چندین مرتبه تغییر می‌کند به این خاصیت اثر مگنتورئولوژیکال^۵ گفته

¹ Magneto-rheological fluids

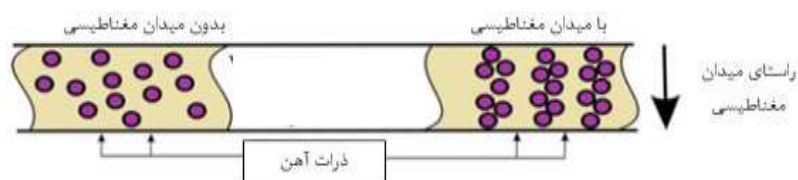
² Viscosity

³ piezoelectric materials

⁴ electro-rheological fluids

⁵ MR effect

می‌شود. سیال مغناطیسی شامل ذرات مغناطیس‌پذیر معلق در سیالات غیرمغناطیسی نظیر روغن‌های معدنی و سیلیکون، پلی‌استرها، هیدروکربن‌های مصنوعی و آب است. عموماً از آهن کربونیل یا پودر آهن به عنوان ذرات فرومغناطیس (تا ۵۰ درصد حجم سیال)، به دلیل اشباع مغناطیسی بالا، استفاده می‌شود [۲]. در مورد آهن کربونیل اندازه ذرات بین ۱ μm تا ۱۰ μm است. بعضی از مشخصات ماده مانند نفوذپذیری مغناطیسی بر روی کنترل اثر مگنتورئولوژیکال بسیار تأثیرگذار است. با اعمال میدان مغناطیسی هریک از ذرات فلزی MRF قطبیده می‌شود و به دلیل خاصیت فرومغناطیس، ذرات مجاور خود را می‌رباید و در راستای میدان زنجیره‌ای را تشکیل می‌دهد. آرایش ذرات مغناطیس‌پذیر در سیال قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است، چون این ذرات در راستای میدان به خط می‌شوند نمی‌توانند در راستای دیگری خارج از خطوط شار مغناطیسی حرکت کنند، در نتیجه در مقابل هر نیروی خارجی مخالف مقاومت می‌کنند. انرژی مکانیکی لازم برای غلبه بر این ساختارهای زنجیرمانند با افزایش میدان اعمالی افزایش می‌یابد. اگر تنش مکانیکی به مقدار بیشینه خود برسد، زنجیره‌ها می‌شکنند و سیال جریان می‌یابد حتی اگر هنوز تحت میدان باقی بماند. به این تنش ماکزیمم، تنش تسلیم گفته می‌شود، به عبارت دیگر مقدار نیروی لازم برای شکستن زنجیره‌های فرومغناطیس منجر به جریان یافتن سیال را نیروی تسلیم گویند. تا زمانی که تنش برشی اعمالی به سیال مغناطیسی از تنش تسلیم ماده فراتر نرود، MRF با برش تغییر شکل می‌یابد. می‌توان با افزایش یا کاهش میدان مغناطیسی اعمالی به سیال، این نیروی تسلیم را به صورت برگشت‌پذیر کنترل نمود [۱، ۳].



شکل ۱-۱ آرایش ذرات مغناطیس‌پذیر با وجود و نبود میدان مغناطیسی (اثر مگنتورئولوژیکال) [۱]

رفتار رئولوژیکال این سیالات را می‌توان به دو ناحیه‌ی مجزای پیش و پس از تسلیم طبقه‌بندی کرد. در رژیم پیش از تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال به دلیل کشش زنجیره و مقاومت آن در برابر نیروی خارجی عمود بر راستای زنجیره‌ها مانند جامدات الاستیک رفتار می‌کند، در حالی که پس از تسلیم بین شکسته شدن زنجیره‌ها و شکل‌گیری دوباره آن‌ها تعادل وجود دارد و سیال با یک لزجت پلاستیک تقریباً ثابت نسبت به حالت بدون میدان جریان می‌یابد که به آن لزجت پس از تسلیم^۱ می‌گویند. تنش تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال علاوه بر میدان مغناطیسی به دما نیز وابسته است، به‌طوری‌که با افزایش شدت میدان، تنش تسلیم بیشینه MRF به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد تا این‌که سیال به حد اشباع مغناطیسی خود برسد اما تغییرات آن با دما رابطه‌ی معکوس دارد [۴].

۱-۲-۱ تسلیم^۲

روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری آزمایشگاهی تنش تسلیم MRF وجود دارد. از طریق آزمایش جریان برشی می‌توان سه تنش تسلیم به‌دست آورد که تنش‌های تسلیم دینامیکی، استاتیکی و حد الاستیک^۳ نامیده می‌شود. تنش حد الاستیک، حداکثر تنش برشی است که می‌توان اعمال نمود به‌طوری‌که پس از حذف آن، MRF کاملاً به حالت قبل از اعمال بار بازگردد. تنش تسلیم استاتیکی، حداقل تنش لازم برای جاری ساختن سیال است و بیشتر مربوط به لغزش صفحه‌ای توده‌ها است تا متلاشی شدن ساختارهای زنجیر مانند تحت برش. تنش تسلیم دینامیکی نیز مقدار تنش برشی لازم برای شکستن مداوم توده‌های زنجیروار شکل گرفته تحت میدان مغناطیسی است، هنگامی‌که مقدار تنش برشی از تنش تسلیم استاتیکی بیشتر می‌شود. تنش تسلیم دینامیکی عموماً بزرگتر از تنش تسلیم استاتیکی است و پراستفاده‌ترین روش برای تخمین تنش تسلیم است. می‌توان از طریق برازش مدل‌های ویسکوپلاستیک با داده‌های

¹ Post yield viscosity

² yielding

³ Elastic limit

آزمایشگاهی در نرخ برش غیرصفر، تنش تسلیم دینامیکی را محاسبه نمود [۵]. در این پژوهش نیز منظور از تنش تسلیم، که در فصول بعدی به آن بیشتر اشاره خواهد شد، تنش تسلیم دینامیکی است.

۱-۲-۲ رفتار جریان

جریان MRF مغناطیس شده، از خود رفتار رقیق شونده^۱ برشی^۱ نشان می دهد. یعنی لزجت سیال با افزایش نرخ برش کاهش می یابد [۲]. تنها عوامل مؤثر بر لزجت پس از تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال، عواملی است که لزجت سیال حامل را تغییر می دهد، به عنوان مثال دما می تواند عاملی تأثیرگذار باشد [۶]. در تنش های پایین تر از تنش تسلیم (کرنش های در مقیاس 10^{-3}) سیال مگنتورئولوژیکال رفتار ویسکوالاستیک^۲ از خود نشان می دهد [۷].

۱-۳ مدل های سیال مگنتورئولوژیکال

مدل های ارائه شده برای سیال مگنتورئولوژیکال نقش مهمی را در گسترش کاربرد این سیالات ایفا می کند. از مدل های غیرخطی نظیر مدل پلاستیک بینگهام^۳، بایویسکوز^۴ و هرشل-باکلی^۵ برای توصیف خصوصیات رئولوژیکال MRF استفاده می شود. برای در نظر گرفتن اثر رقیق شونده برشی، که بر اثر آن لزجت پس از تسلیم وابسته به نرخ برش نیز می شود، مدل هرشل-باکلی می تواند به کار رود [۸].

¹ Shear thinning

² Viscoelastic

³ Bingham plastic

⁴ Biviscous

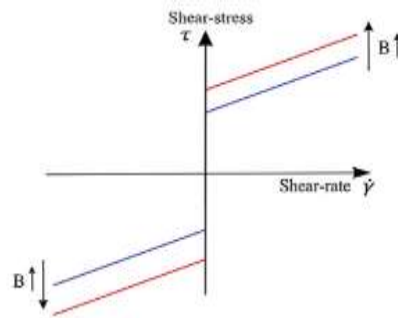
⁵ Herschel-Bulkley

۱-۳-۱ مدل پلاستیک بینگهام

مدل بینگهام برای سیال مگنتورئولوژیکی شامل یک المان کاملاً پلاستیک موازی با یک المان لزجت نیوتونی است که معادله‌ی تنش- کرنش آن به صورت معادله‌ی (۱-۱) بیان می‌شود.

$$\begin{cases} \tau = \tau_y(B) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} & |\tau| > \tau_y \\ \dot{\gamma} = 0 & |\tau| \leq \tau_y \end{cases} \quad (1-1)$$

در این رابطه τ تنش برشی سیال و τ_y تنش تسلیم برشی است که با میدان اعمالی B کنترل می‌شود و می‌تواند با افزایش میدان افزایش یابد. η لزجت نیوتونی و مستقل از میدان است. $\dot{\gamma}$ نرخ برشی و sgn^* تابع علامت است. طبق این مدل، تا زمانی که تنش برشی اعمالی از تنش تسلیم سیال بیشتر نشود سیال ساکن می‌ماند و از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان می‌دهد. پس از عبور تنش برشی از تنش تسلیم MRF مانند سیال نیوتونی جریان می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، سیال مگنتورئولوژیکی با لزجت پساتسلیم جریان می‌یابد [۱، ۸].



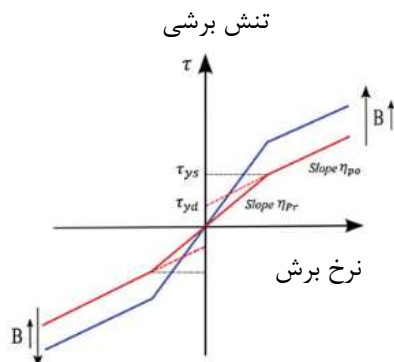
شکل ۱-۲ رفتار سیالات مطابق با مدل بینگهام پلاستیک [۱]

۱-۳-۲ مدل بایویسکوز

معادله‌ی پلاستیک بینگهام حاکم بر تنش برشی می‌تواند به رابطه بایویسکوز تعمیم یابد. این مدل دارای دو لزجت و دو تنش تسلیم است. اولین لزجت، لزجت پیش از تسلیم (η_{pr}) و دومین، لزجت پس از

تسلیم (η_{po}) نامیده می‌شود. تنش‌های تسلیم، تنش تسلیم استاتیکی (τ_{ys}) و دینامیکی (τ_{yd}) در نظر گرفته می‌شود. رابطه‌ی این مدل به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\tau = \begin{cases} \pm\tau_{yd}(B) + \eta_{po}\dot{\gamma} & |\tau| > \tau_{ys} \\ \eta_{pr}\dot{\gamma} & |\tau| < \tau_{ys} \end{cases} \quad (2-1)$$



شکل ۳-۱ مدل بایویسکوز ایده‌آل [۱]

در این رابطه η_{po} و η_{pr} به ترتیب مربوط به خواص الاستیک و سیال لزج است رابطه‌ی (۳-۱) بین τ_{yd} و τ_{ys} برقرار است. این مدل در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.

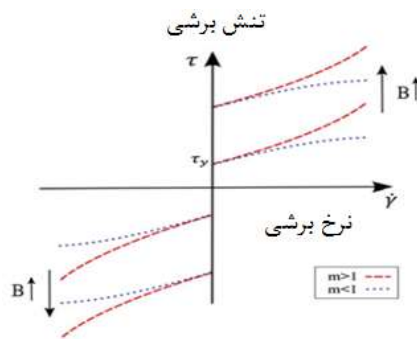
$$\tau_{yd}(B) = \tau_{ys} \left(1 - \frac{\eta_{po}}{\eta_{pr}}\right) \quad (3-1)$$

زمانی که در این مدل $\eta_{pr} \rightarrow \infty$ مدل بینگهام به دست می‌آید [۱، ۸].

۳-۳-۱ مدل هرشل - باکلی

مدل هرشل باکلی مشابه مدل پلاستیک بینگهام است، اما در این مدل بر خلاف مدل پلاستیک بینگهام اثر رقیق‌شوندگی ($m < 1$) و غلیظ‌شوندگی برشی^۱ ($m > 1$) پس از تسلیم نیز در نظر گرفته می‌شود.

¹ Shear thickening



شکل ۴-۱ مدل هرشل-باکلی [۱]

رابطه‌ی (۴-۱) این مدل را نشان می‌دهد [۱، ۸].

$$\begin{cases} \tau = (\tau_y(B)) + (K|\dot{\gamma}|^m)\text{sgn}(\dot{\gamma}) & |\tau| > \tau_y \\ \dot{\gamma} = 0 & |\tau| \leq \tau_y \end{cases} \quad (۴-۱)$$

۴-۱ مدهای سیال مگنتورئولوژیکال

سیال مگنتورئولوژیکال در ابزارها، در حالت‌های مختلفی بسته به تغییر شکل آن به کار می‌رود. معمولاً وسایل به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که ابزار در یکی از حالات برشی^۱، جریانی^۲ یا شیری^۳، نوسانی^۴ و یا ترکیبی از آن‌ها عمل کند.

۱-۴-۱ مود برشی

به این حالت کاری سیال مگنتورئولوژیکال، حالت برش مستقیم^۵ نیز گفته می‌شود. همان‌طور که شکل ۵-۱ نشان می‌دهد در این حالت سیال مگنتورئولوژیکال بین ۲ صفحه که نسبت به یکدیگر حرکت دارند قرار گرفته است و میدان مغناطیسی عمود بر راستای حرکت این دو صفحه اعمال می‌شود. میدان مغناطیسی به‌منظور تغییر لزجت MRF برای کنترل جریان و تولید نیرو بین دو صفحه اعمال می‌شود. این

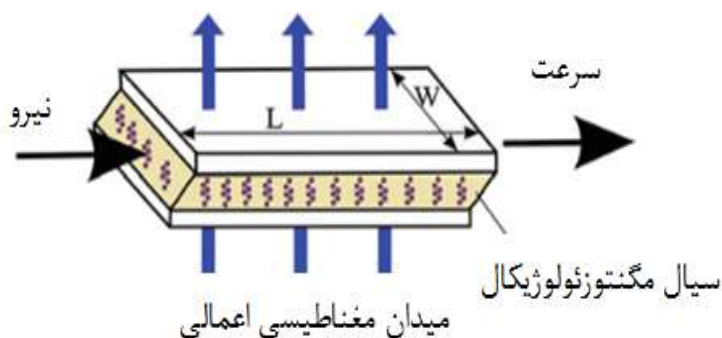
¹ Shear mode
² Flow mode
³ Valve mode
⁴ Squeeze mode
⁵ Direct shear mode

مود می‌تواند از ۲ مؤلفه‌ی ویسکوز مستقل نیرو تولید کند؛ F_{η} به‌عنوان مؤلفه‌ی خالص رئولوژیکال و F_{mr} مؤلفه‌ی مگنتورئولوژیکال که وابسته به میدان مغناطیسی است. می‌توان نیروی ناشی از این حالت را به- صورت زیر نوشت:

$$F = F_{mr} + F_{\eta} \quad (5-1)$$

هرچه نسبت $\frac{F_{mr}}{F_{\eta}}$ بیشتر باشد نشان‌دهنده‌ی این است که دستگاه قادر به تغییر زیاد اندازه‌ی نیرو

در حالت اعمال میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون میدان است [۱].



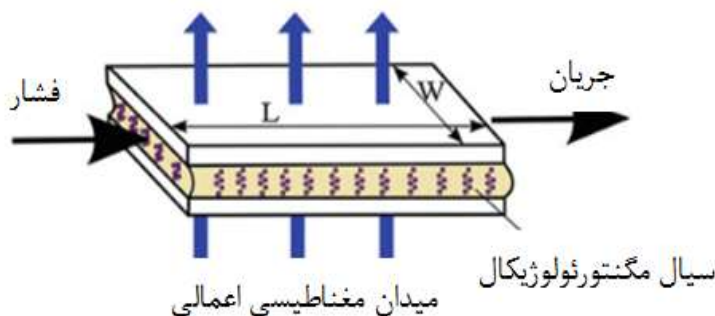
شکل ۵-۱ مود برشی با اعمال میدان مغناطیسی [۱]

۱-۴-۲ مود جریان (شیر)

در این حالت که در شکل ۶-۱ نشان داده شده است، شیر سیال مگنتورئولوژیکال بین دو صفحه ساکن قرار گرفته است. نیروی تولیدی در این حالت ناشی از افت فشار در طول شیر است. زمانی که جریان MRF به‌سوی شیر رانده می‌شود، یک افت فشار معین به‌دلیل مقاومت سیال در شیر حاصل می‌شود که می‌توان با تنظیم شدت میدان مغناطیسی آن را کنترل نمود [۹]. بیشتر دمپ‌های مگنتورئولوژیکال به‌دلیل سادگی ساختار و نیروی زیاد در این مود کاری جای می‌گیرند [۱۰]. مانند مود برشی می‌توان افت فشار نهایی را نتیجه‌ی مجموع مؤلفه‌ی ویسکوز ΔP_{η} و مؤلفه‌ی مگنتورئولوژیکال وابسته به میدان ΔP_{mr} به‌علت تنش تسلیم دانست.

$$\Delta P = \Delta P_{mr} + \Delta P_{\eta}$$

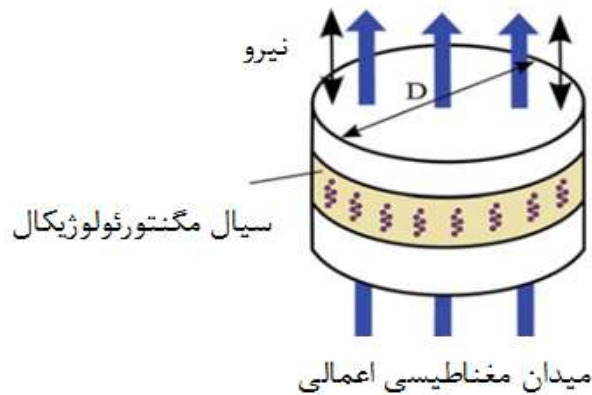
(۶-۱)



شکل ۶-۱ مود جریان با اعمال میدان مغناطیسی [۱]

۱-۴-۳ مود نوسانی

شکل ۷-۱ عمل کرد سیال تحت مود نوسانی را نشان می‌دهد. در این حالت نیز شیار عبور سیال بین دو صفحه قرار دارد با این تفاوت که نیرو در راستای میدان به صفحات وارد می‌شود و آن‌ها را به یکدیگر نزدیک یا از هم دور می‌سازد و یک جریان نوسانی را شکل می‌دهد. در این حالت راستای نیرو، شار میدان اعمالی و زنجیره‌های ذرات مغناطیسی یکسان است و وسیله می‌تواند به نیروی میرایی بالا برسد اما این مود تنها در محدوده‌ی ارتعاشات کوچک کارآمد است [۱۱]. در این مود نیرو بیشتر وابسته به خواص مکانیکی ذرات مغناطیس‌پذیر زنجیره است تا تغییر ویسکوزیته‌ی سیال تحت میدان مغناطیسی، این مود بیشتر در کنترل جاذب‌های ارتعاشات دامنه کوتاه به کار می‌رود. مطالعات کمی به بررسی مود نوسانی در کاربردهای دامنه بزرگ پرداخته‌است، این مطالعات نشان می‌دهد که مود نوسانی نیروی بیشتری نسبت به مودهای برشی و جریان ایجاد می‌کند. کاربرد اصلی این مود در یاتاقان‌های مگنتورئولوژیکال است که قادر به ایجاد نیروی زیاد و جابه‌جایی کم است [۱، ۱۲]



شکل ۱-۷-۱ مود نوسانی با اعمال میدان مغناطیسی [۱]

۱-۵ اجزای سیال مگنتورئولوژیکال

سیال مگنتورئولوژیکال متشکل از سه مؤلفه است؛ فاز پراکنده شونده^۱ (ذرات مغناطیس پذیر)، فاز پیوسته^۲ (سیال حامل) و مقدار کمی افزودنی^۳ یا پایدارساز^۴ این اجزاء را تشکیل می‌دهند که در ادامه به‌طور جداگانه هر یک توصیف شده است.

۱-۵-۱ فاز پراکنده شونده

مهم‌ترین مشخصه‌ی سیال مگنتورئولوژیکال، اندازه و نسبت مقداری ذرات مغناطیس‌پذیر به‌کار رفته در آن است. القای مغناطیس با افزایش میدان تا رسیدن به حد اشباع مغناطیسی سیال مگنتورئولوژیکال، زیاد می‌شود. حد القای ذاتی سیال مگنتورئولوژیکال در میدان مغناطیسی‌ای به اندازه‌ی $J_s \times \varphi$ است. که φ درصد حجمی ذرات مغناطیس‌پذیر سیال و J_s حد اشباع قطبیده شدن ذرات برحسب (تسلا^۵) است [۱]. بیشینه کردن نیروهای بین‌ذره‌ای سیال مگنتورئولوژیکال، به‌عبارت دیگر بیشینه نمودن اثر

¹ Dispersed phase

² Continuous phase

³ Additive

⁴ Stabilizer

⁵ Tesla

مگنتورئولوژیکال، وابسته به اشباع مغناطیسی (J_s) ماده مغناطیس‌پذیر است. J_s بزرگتر به معنای نیروهای بین‌ذره‌ای بزرگتر و اثر مگنتورئولوژیکال بالاتر است. بیشترین ماده‌ای که امروزه به این عنوان استفاده می‌شود پودر آهن کربونیل (Fe) با خلوص بالا است که از رسوب شیمیایی فاز بخار^۱ آهن پنتاکربونیل ($\text{Fe}(\text{Co})_5$) به دست می‌آید. چراکه در این روش خلوص بسیار بالا ($>99.9\%$) قابل استحصال می‌باشد، شکل ذرات کروی است و اشباع مغناطیسی بالایی به دست می‌دهد. بهترین ماده برای این ذرات مغناطیس‌پذیر آلیاژ آهن و کبالت است که دارای $J_s = 2/4$ است اما به دلیل به صرفه نبودن اقتصادی آن، در کاربردهای عملی از پودر آهن تقریباً خالص ($J_s = 2/1$) استفاده می‌شود. اشباع مغناطیسی سایر آلیاژها و اکسیدها پایین‌تر از آن است، در نتیجه MRF حاصل این آلیاژها قدرت ضعیف‌تری دارد [۱۳]. همچنین اندازه‌ی ذرات پراکنده‌شونده تأثیر بسیاری بر روی خواص مغناطیسی از جمله تنش تسلیم می‌گذارد به طوری که با افزایش قطر متوسط ذرات مغناطیس‌پذیر، به دلیل افزایش برهم‌کنش‌های مغناطیس‌ساکن^۲ بین ذرات، تنش تسلیم بیشینه سیال زیاد می‌شود [۱۴].

۱-۵-۲ فاز پیوسته

سیال حامل، سیالی غیرمغناطیسی (سیالی با نفوذپذیری مغناطیسی پایین) است که موجب معلق شدن ذرات فاز فعال مغناطیسی درون آن می‌گردد. این نفوذپذیری پایین به ذرات پراکنده‌شونده اجازه می‌دهد تا نزدیک حد اشباع خود قطبیده شوند. علاوه بر این، سیال حامل بر اساس ویژگی‌های رئولوژیکال و تریبولوژیکال^۳ مانند مقاومت حرارتی انتخاب می‌شود. همچنین این سیال نباید به فاز پراکنده‌شونده و سایر قسمت‌های ابزار در تماس با سیال، واکنشی نشان دهد. زمانی که به MRF میدان مغناطیسی اعمال نمی‌گردد، گرانروی آن کاملاً وابسته به سیال پایه است [۱۳]. از انواع سیال‌های حامل که معمولاً در

¹ Chemical Vapor Deposition (CVD)

² Magnetostatic

³ Tribological

MRF به کار برده می شود می توان به روغن های معدنی، سیلیکون، هیدروکربن های مصنوعی، پلی استرها و آب اشاره نمود که معمول ترین آن در ترکیب سیال مگنتورئولوژیکال یکی از سه نوع سیال حامل روغن سیلیکون، روغن هیدروکربنی مصنوعی^۱ و روغن معدنی^۲ است که با ذرات آهن کربونیل مخلوط می گردد [۱، ۲]. به دلیل تفاوت چگالی سیال حامل با ذرات مغناطیس پذیر، مقداری از این ذرات با گذشت زمان ته نشین می شود. یکی از عوامل مؤثر بر این ته نشینی لزجت و چگالی سیال حامل است. در فصل ۳ بیشتر به این مطلب پرداخته شده است.

۱-۵-۳ افزودنی

چگالی بسیار زیاد ذرات آهن کربونیل نسبت به سیال حامل سبب ته نشینی شدید ذرات مغناطیس پذیر می گردد، این ته نشینی بزرگترین مانع برای رشد کاربرد تجاری این سیالات است [۴]. اضافه کردن افزودنی های^۳ مختلف نظیر نانوتیوب های کربن، گرافیت، سیلیکا، اکسید گرافن و همچنین اثر افزودنی های تیکسوتروپیک^۴ در کمتر کردن ته نشینی ذرات ثابت شده است [۱۵، ۱۶]. افزودن اسیدهای هایدروفوبیک^۵ مانند اسید استئاریک با زنجیره بیش از ۱۴ کربن به سیال مگنتورئولوژیکال منجر به ارتقاء معنی دار پایداری و اثر مگنتورئولوژیکال می گردد [۴]. با وجود روش های گوناگون، استفاده از نانوذرات مغناطیس پذیر و افزودنی های پایدارساز نتایج رضایت بخشی را در افزایش پایداری به دست می دهد [۴] ذرات نانو مقیاس آهن و نانولوله های کربن فضای خالی بین ذرات میکرونی آهن کربونیل را پر می کنند [۱۷]. یکی دیگر از این روش ها استفاده از افزودنی های پایدارساز است. وجود این افزودنی ها معمولاً تأثیری در اثر مگنتورئولوژیکال سیال ندارد اما لزجت حالت بدون اعمال میدان سیال را به شدت افزایش می دهد.

¹ Synthetic oil

² Mineral oil

³ Additives

⁴ Thixotropic additive

⁵ Hydrophobic acid

پژوهش‌گران مواد زیادی را به‌عنوان پایدارساز در سیال‌های مگنتورئولوژیکال با نسبت‌های پایین معرفی -
نموده‌اند که می‌توان به انواع آیروسیل^۱، گریس، اسید استئاریک^۲ و اسید پالمیتیک^۳ اشاره کرد [۴، ۱۸].
این عامل‌ها ته‌نشینی ذرات فرومغناطیس را کاهش و آن‌ها را معلق نگاه می‌دارد.

۱-۶ کاربرد سیالات مگنتورئولوژیکال

سیال مگنتورئولوژیکال به‌گونه‌ای است که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، خواص رئولوژیکال آن به -
سرعت تغییر می‌کند که با تغییر زیاد در تنش تسلیم نمایان می‌شود، به‌گونه‌ای که در حد هزارم ثانیه
می‌تواند از صفر (سیال تقریباً نیوتونی) به ۶۰ kPa (سیال بینگهام) برسد. این فرآیند برگشت‌پذیر و بسیار
سریع است. به همین دلیل این سیال می‌تواند کاربردی عالی در میرایی ارتعاشات و ادوات جذب شوک
داشته‌باشد [۱۹].

۱-۶-۱ ابزار مگنتورئولوژیکال

اکثر وسایلی که از MRF استفاده می‌کنند در دو دسته‌ی قطب ثابت^۴ (مود جریان) و قطب متحرک
نسبی^۵ (مود برش) جای می‌گیرند [۲۰]. کاربرد سیالات مگنتورئولوژیکال در کنترل نیمه‌فعال^۶ است که
انعطاف‌پذیری سیستم‌های فعال و پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های غیرفعال^۷ را دارا است. دو روش
اصلی برای به‌کارگیری سیالات مگنتورئولوژیکال در وسایل و ابزار مهندسی، ابزار مگنتورئولوژیکال رفت و
برگشتی^۸ و ابزار مگنتورئولوژیکال چرخان^۹ است [۱۲]. وسایل چرخان عموماً در مود برش عمل می‌کنند.

¹ Aerosil

² Stearic acid

³ Palmitic acid

⁴ Fixed pole

⁵ Relatively movable pole

⁶ Semi active

⁷ Passive

⁸ Translational MR devices

⁹ Rotational MR devices

بیشتر توجهات برای کاربرد این سیالات به میرایی نیمه فعال و یا وفقی^۱ ارتعاشات معطوف شده است که از جمله‌ی آن می‌توان به کاربرد این سیالات هوشمند در کمک‌فنا^۲ سیستم تعلیق و دسته‌موتورهای خودرو^۳، جذب ارتعاشات صندلی خودروهای سنگین، کاهش لرزه‌های سازه‌ها و ساختمان‌ها مانند محافظت پل‌های کابلی از تحریک باد اشاره نمود. علاوه بر کاربردهای میرایی وفقی، سیال MR می‌تواند در پرداخت سطوح، ترمزها و کلاچ‌های کنترل‌پذیر الکتریکی و یاتاقان‌ها به کار رود. مزیت خاص کلاچ‌های مگنتورئولوژیکال امکان محدود کردن گشتاور انتقالی با کمک شدت میدان مغناطیسی اعمالی است. زمانی که گشتاور ورودی به یک حد از پیش تعیین شده برسد، کلاچ می‌لغزد و گشتاور بیشتری انتقال نمی‌یابد. از طرف دیگر می‌تواند برای سیستم ترمز نیز به کار رود به گونه‌ای که حرکت چرخشی را با گشتاور ترمزگیری مشخص کنترل می‌کند [۲۱]. از کاربردهای این سیالات می‌توان به پرداخت مواد سخت مانند عدسی‌ها اشاره نمود. شکل و سختی قابل کنترل و همچنین تنش تسلیم بالا سیالات مگنتورئولوژیکال را برای پرداخت این مواد مناسب می‌نماید. سیال مگنتورئولوژیکال به یک آهنربای دائمی چرخ‌مانند دوار می‌چسبد. با اعمال میدان مغناطیسی ساینده‌های درون MRF از سطح رانده می‌شود و زمانی که MRF بین آهنربای چرخان و سطح قطعه کار قرار می‌گیرد، تحت تنش برشی مستقیم، ماده را از سطح قطعه کار برمی‌دارد. شکل سطح نهایی عدسی و نتایج پرداخت آن به دقت توسط الگوریتم‌های رایانه‌ای تنظیم و کنترل می‌شود. شکل ۱-۸ یک ماشین پرداخت مگنتورئولوژیکال را نشان می‌دهد. در علوم پزشکی می‌توان به کاربردهای دیگری از سیال مگنتورئولوژیکال مانند استفاده در پای مصنوعی اشاره نمود [۲۲، ۲۳]. یکی از کاربردهای وسیع سیال مگنتورئولوژیکال میراگرهای خطی هوشمند و کنترل‌پذیر است. مزیت اصلی این میراگرها کنترل-پذیری آن‌ها است که نیروی میرایی دلخواه را با تغییر جریان تغذیه تأمین می‌کند.

¹ Adaptive

² Shock absorber

³ Engine mount



شکل ۱-۸- ماشین پرداخت مگنتورئولوژیکال [۲۳]

۱-۶-۲ میراگرهای مگنتورئولوژیکال

نیروی میرایی دمپرهای ویسکوز مرسوم در تمامی سرعت‌های (فرکانس‌ها) کاری تقریباً یکسان است از این روی میراگرهای فعال و نیمه فعال برای تطبیق نیروی خروجی متناسب با شرایط تحریک مختلف ارائه گردید. با آغاز دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی، تلاش‌های زیادی صرف تکنولوژی میراگرهای فعال^۱ جدید گردید. سیستم فعال باید قادر باشد خروجی متناسب با ورودی‌های گسترده را ایجاد نماید. میراگرهای فعال به- دلیل نیاز به عملگر^۲ نیرو، پیچیده و گران‌قیمت هستند؛ لذا میراگرهای نیمه فعال^۳ عملی‌تر و مقرون به- صرفه‌تر هستند. این نوع میراگرها با افزایش یا کاهش ضریب میرایی مؤثر، نیروی میرایی را کنترل می- کنند [۲۴]. در سال‌های اخیر محبوب‌ترین روش به‌کاررفته برای میرایی نیمه‌فعال استفاده از سیال مگنتورئولوژیکال در میراگرها است.

¹ Active damper

² Actuator

³ Semi-active damper

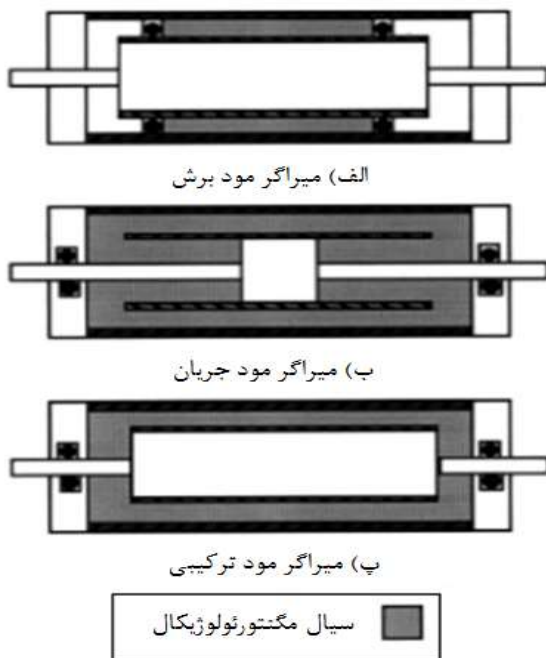
میراگر مگنتورئولوژیکال نوعی میراگر کنترل‌پذیر مبتنی بر تنش تسلیم قابل کنترل سیال MR تحت اعمال میدان مغناطیسی است. این میراگرها وسایلی با کنترل نیمه فعال هستند که قادر به تأمین نیروی موردنیاز کاربردهای مقیاس بزرگ با مصرف توان یک باتری می‌باشند.

کمپانی LORD[®] حدود دو دهه پیش نمونه‌های اولیه‌ی میراگر مگنتورئولوژیکال را به بازار معرفی کرد. در سال‌های اخیر تحقیق و توسعه‌ی میراگرهای مگنتورئولوژیکال و کاربردهای آن‌ها نظر بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است. این میراگرها در صنایع خودروسازی، نظامی و مهندسی عمران در بسیاری از سیستم‌های جاذب مانند افزایش‌دهنده‌های پایداری، سیستم‌های تعلیق نشیمنگاه، تعلیق خودرو و لگد تسلیحات به‌کار می‌رود و محدوده‌ی وسیعی از سازه‌های عمرانی و مکانیکی نظیر ساختمان‌ها، پل‌ها تا تسلیحات، اتومبیل‌ها و وسایل حمل‌ونقل ریلی و هوایی را دربر می‌گیرد. قاعده‌ی کلی و شکل میراگرهای خطی (رفت و برگشتی) مرسوم مبتنی بر مود برش، جریان و یا حالت ترکیبی از آن‌ها است [۸، ۲۵]. تعیین مود کاری سیال مگنتورئولوژیکال امری ضروری است. ابزاری که از سیال مگنتورئولوژیکال استفاده می‌کنند را می‌توان با توجه به حالت جریان و عملکرد MRF به سه مود کاری تقسیم نمود: مود جریان که در آن قطب‌های میراگر ثابت است و سیال توسط اختلاف فشار ایجاد شده بین دو سر پیستون رانده می‌شود و می‌تواند نیروی میرایی و جابه‌جایی زیادی را ایجاد کند در نتیجه این مود مناسب کاربرد در سیستم تعلیق خودرو، دسته‌موتور و شیرهای هیدرولیکی است. با این وجود در مقدار تحریک‌های کم عملکرد کنترلی میراگر در این مود تضعیف می‌شود. برخلاف مود جریان، در مود برش قطب‌ها نسبت به یکدیگر متحرک هستند. مود برش می‌تواند دامنه جابه‌جایی کوچکی ایجاد کند و برای کاربردهای فرکانس متوسط مانند میراگرهایی که نیروی زیادی تولید نمی‌کنند (میراگرهای با کورس کم)، کلاچ و ترمز مناسب است. حالت سوم مود ترکیبی^۱ نام دارد که مجموع مودهای جریان و برش است. یعنی یکی از

¹ Mixed mode

قطب‌ها به صورت دورانی یا رفت و برگشتی حرکت دارد و قطب دیگر ثابت است. استفاده از این مود سبب ایجاد نیروی میرایی بزرگ با تحریک کوچک بدون ایجاد حالت قفل‌شدگی^۱ در چگالی میدان بالا می‌شود به طوری که تنش تسلیم و نیروی میرایی غیرفعال بالاتری را نسبت به دو مود مجزا (برش و جریان) نشان می‌دهد. شکل ۹-۱ شماتیک میراگرها در هر سه مود کاری را نشان می‌دهد [۲۶-۲۸].

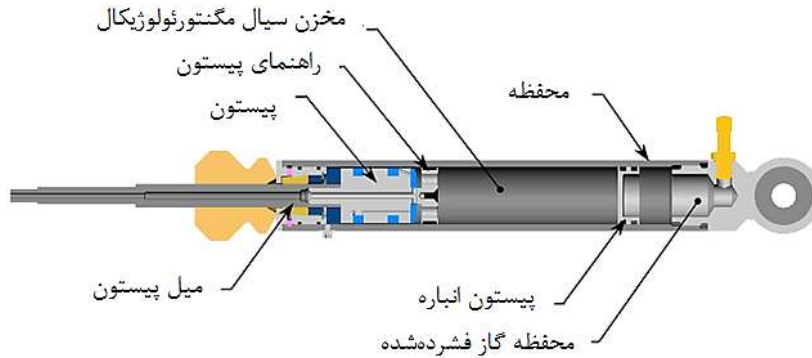
میراگرهای مگنتورئولوژیکال از لحاظ شکل ساختاری نیز به سه دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: تک مخزنه^۲، دو مخزنه^۳، دوسرمتحرک^۴. به دلیل اندازه‌ی کوچک و امکان نصب در هر جهت دلخواه، میراگرهای تک مخزنه از سایر نمونه‌ها متداول‌تر است. میراگر مگنتورئولوژیکال تک مخزنه در مود ترکیبی که در شکل ۱-۱۰ نمایش داده شده است تنها یک محفظه برای سیال و یک انباره^۵ برای تنظیم حجم با جابه‌جایی پیستون دارد.



شکل ۹-۱ شماتیک مدهای میراگر مگنتورئولوژیکال [۲۸]

¹ Lock- up
² Mono tube
³ Twin tube
⁴ Double- ended
⁵ Accumulator

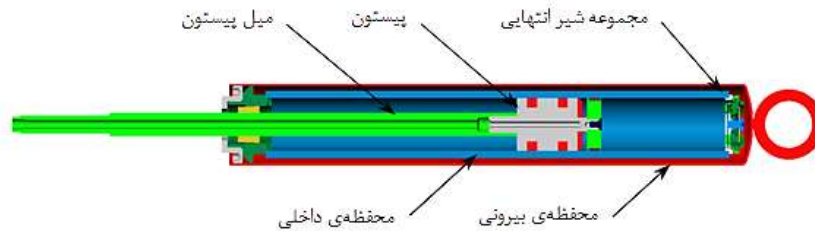
پیستون انباره مانعی بین سیال مگنتورئولوژیکال و گاز فشرده شده (معمولاً نیتروژن) است که برای جبران تغییرات حجم تحت حرکت پیستون در محفظه‌ی سیال به کار می‌رود [۲۳].



شکل ۱-۱۰ نمای برش میراگر مگنتورئولوژیکال تک مخزنه [۲۳]

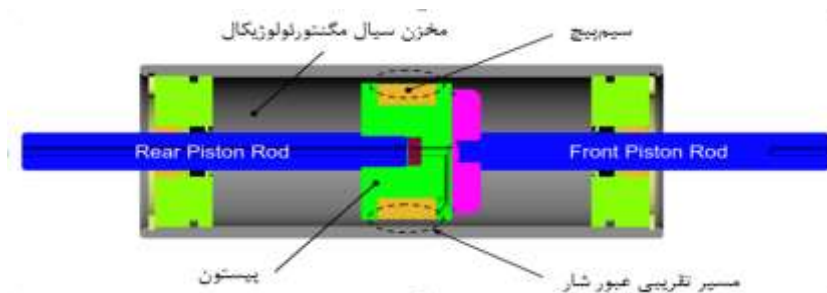
میراگر دومخزنه‌ی مگنتورئولوژیکال دارای دو محفظه می‌باشد، به گونه‌ای که یکی در درون دیگری قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۱-۱۱ مشاهده می‌شود این مدل دارای دو جداره‌ی داخلی و خارجی است. جداره‌ی داخلی مانند حالت تک مخزنه راهنمای پیستون است و حجم محاط شده توسط آن محفظه‌ی داخلی نامیده می‌شود. قسمت بین دو جداره‌ی داخلی و خارجی نیز محفظه‌ی بیرونی نام دارد. مخزن داخلی با سیال مگنتورئولوژیکال پر می‌گردد، برای جبران تغییرات حجم ناشی از حرکت پیستون از مخزن خارجی، که بخشی از آن با MRF پر می‌گردد، استفاده می‌شود. لذا، این مخزن مشابه مکانیزم یک انباره پنوماتیک در یک میراگر تک مخزنه عمل می‌کند. در عمل یک شیر در انتهای محفظه‌ی داخلی (شیر انتهایی^۱) این میراگر تعبیه شده است تا جریان بین دو محفظه را تنظیم کند. زمانی که پیستون وارد میراگر می‌شود سیال از محفظه‌ی داخلی به محفظه‌ی بیرونی جریان می‌یابد که حجم این مقدار سیال برابر با حجم جابه‌جا شده پیستون است. زمانی که پیستون بازمی‌گردد روند جریان سیال معکوس می‌شود. ارتباط سیال MR بین دو محفظه از طریق مجموعه شیر انتهایی صورت می‌گیرد [۲۳].

¹ Foot valve



شکل ۱۱-۱ نمای برش میراگر مگنتورئولوژیکال دو مخزنه [۲۳]

آخرین نوع میراگر مگنتورئولوژیکال مدل دوسر متحرک نام دارد چراکه میل پیستون از هر دو طرف جداره‌ی میراگر خارج می‌شود. شکل ۱۲-۱ نمای برش خورده‌ی این نوع میراگر در مود ترکیبی را نشان می‌دهد. این نوع میراگر نیاز به مکانیزم جبران‌سازی (انباره) ندارد و در سیستم تعلیق دوچرخه، کاهش لگد تسلیحات و برای کنترل حرکت نوسانی ناشی از باد و زلزله‌ی ساختمان‌ها به کار می‌رود [۲۳].



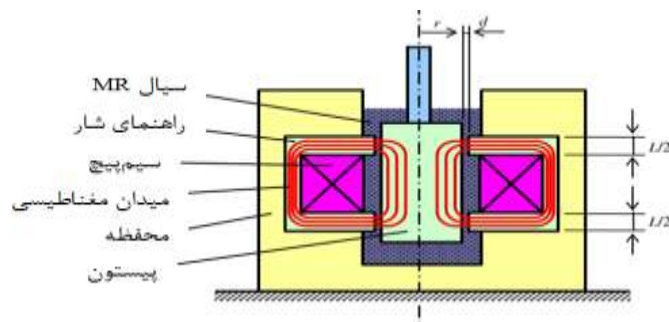
شکل ۱۲-۱ نمای برش میراگر مگنتورئولوژیکال دوسر متحرک [۲۳]

۷-۱ عملکرد میراگر مگنتورئولوژیکال

در میراگرهای ویسکوز معمولی با آغاز حرکت پیستون، سیال به سمت شیار میراگر رانده شده و سبب اختلاف فشار در دو طرف پیستون می‌شود. این اختلاف فشار می‌تواند به صورت آنی نیروهای بسیار بزرگی را در خلاف جهت سرعت نسبی میراگر ایجاد کند. به بیان دیگر انرژی توسط اصطکاک سیال با شیار

مستهلك می‌گردد. از مهم‌ترین مزیت‌های این میراگرها می‌توان به قابلیت اطمینان بالا، قیمت نسبتاً ارزان، سهولت استفاده و ظرفیت نیروی بسیار بالا (۴۰٪ تا ۵۰٪ میرایی بحرانی) اشاره نمود.

در میراگرهای مگنتورئولوژیکال علاوه بر نیروی ناشی از اصطکاک و لزجت سیال، مؤلفه‌ی نیروی ناشی از تنش تسلیم (اثر مگنتورئولوژیکال) نیز اضافه می‌گردد. با ورود جریان الکتریکی به سیم‌پیچ‌های میراگر مگنتورئولوژیکال میدان مغناطیسی در راستای عمود بر شیار عبور سیال ایجاد می‌شود (در شکل ۱-۱۳ مشخص است) و سیال را به یک جامد ویسکوالاستیک تبدیل می‌کند که در برابر حرکت پیستون میراگر مقاومت می‌کند به‌طوری‌که هرچه جریان ورودی به سیم‌پیچ‌ها بیشتر باشد، این مقاومت و بالتبع نیروی میرایی ناشی از اثر مگنتورئولوژیکال افزایش می‌یابد. به بیان دیگر می‌توان با تغییر جریان ورودی به سیم‌پیچ‌های میراگر MR مقدار نیروی مؤلفه‌ی مگنتورئولوژیکال آن را تنظیم نمود. شکل ۱-۱۳ به‌صورت شماتیک اجزای یک میراگر مگنتورئولوژیکال در مود ترکیبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است با حرکت پیستون، سیال MR درون شیار که بین دیواره‌ی محفظه و جداره‌ی خارجی پیستون شکل گرفته است، جریان می‌یابد. به‌علاوه اختلاف فشار ناشی از حرکت پیستون نیز سبب رانش سیال در شیار می‌گردد به‌همین دلیل این میراگر تحت هر دو مود برش و جریان (مود ترکیبی) کار می‌کند [۲۹].



شکل ۱-۱۳ شماتیک اجزای داخلی میراگر مگنتورئولوژیکال (مود ترکیبی) [۲۹].

۱-۷-۱ مشخصه‌های میراگر مگنتورئولوژیکال [۸]

شکل ۱۴-۱ شماتیک نمودار F-V یک میراگر مگنتورئولوژیکال را نشان می‌دهد؛ با توجه به این شکل مشخصه‌های میراگر مگنتورئولوژیکال به صورت اختصار در زیر بیان شده است.

الف) پدیده‌ی پسماند^۱:

حلقه‌ی پسماند میراگر به صورت پادساعتگرد با افزایش زمان گسترش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۴-۱ منحنی بالایی نمودار F-V نشان‌دهنده‌ی تغییرات نیرو با کاهش سرعت است ($\frac{dv}{dt} < 0$) و منحنی پایینی بیان‌گر تغییرات نیرو با افزایش سرعت است ($\frac{dv}{dt} > 0$). شیب میانگین حلقه‌ی پسماند نماینده‌ی ضریب میرایی ویسکوز است که به جریان و شرایط تحریک شامل فرکانس و دامنه وابسته است.

ب) پسماند غیرمقارن:

نمودارهای نیرو برحسب سرعت برخی از میراگرهای MR به‌خصوص در مجاورت سرعت صفر پاسخ پسماند غیرمقارن از خود نشان می‌دهند.

پ) نواحی پیش و پس از تسلیم:

همان‌طور که در شکل ۱۴-۱ نشان داده شده است، میراگر MR در دو ناحیه‌ی رئولوژیکال متمایز عمل می‌کند: ناحیه‌ی پیش از تسلیم و ناحیه‌ی پس از تسلیم. ناحیه‌ی پیش از تسلیم که یک نوع ماده‌ی ویسکوالاستیک است، نشان‌گر رفتار پسماند قوی است. ناحیه‌ی پس از تسلیم نیز پلاستیک با تنش تسلیم غیر صفر است. تنش تسلیم با تغییر جریان الکتریکی ورودی به میراگر تغییر می‌کند.

ت) اثر پیچیدن^۱:

¹ Hysteretic phenomenon

با دقت در شاخه‌ی بالایی منحنی شکل ۱-۱۴، جایی که سرعت کاهش می‌یابد، می‌توان دریافت در سرعت‌های مثبت بزرگ نیروی میرایی به‌صورت خطی با سرعت تغییر می‌کند. با این وجود هنگامی که سرعت کاهش می‌یابد، قبل از این که منفی شود، دیگر رابطه‌ی بین سرعت و نیرو خطی نیست و سریعاً کاهش می‌یابد.

ث) رفتار غیرفعال^۲:

هنگامی که جریانی به میراگر مگنتورئولوژیکال وارد نمی‌شود، تقریباً مانند یک میراگر ویسکوز معمولی رفتار می‌کند و شکل نمودار نیرو - جابه‌جایی آن شبه بیضی و منحنی نیرو- سرعت آن شبه خطی با حلقه پسماند کوچک می‌شود.

ج) کنترل پذیری:

با اضافه کردن جریان ورودی به سیم‌پیچ‌ها نیروی میرایی به‌صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. به بیان دیگر اندازه‌ی قله‌ی نیرو و غیرخطی بودن با افزایش جریان ورودی زیاد می‌شود.

چ) وابستگی دامنه‌ی جابه‌جایی و فرکانس:

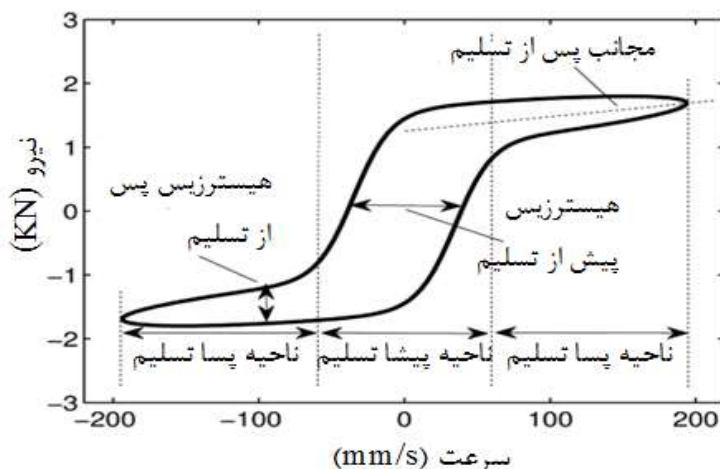
با افزایش فرکانس نیرو افزایش می‌یابد، حلقه‌ی نیرو- سرعت (شکل ۱-۱۴) نشان‌گر یک رابطه‌ی غیر خطی بین سرعت تحریک میراگر با نیروی خروجی از آن است و با افزایش فرکانس این غیرخطی بودن بیشتر می‌شود. این رفتار روی کاربرد این سیالات تأثیر می‌گذارد، همچنین مقدار مطلق بیشینه‌ی نیرو با افزایش دامنه‌ی تحریک افزایش می‌یابد. بنابراین مدل ریاضی مناسب برای کاربردهای عملی این وسایل که تمامی عوامل مؤثر بر عمل کرد میراگر را در نظر بگیرد باید گسترش یابد.

¹ Roll-off

² Passive behavior

ح) اثر دما:

MRF درون میراگر می‌تواند تغییرات دمایی گسترده‌ای را به‌علت تولید گرما از سیم‌پیچ‌ها و حرکت سیال لزج تجربه کند. این افزایش گرما لزجت سیال را کاهش می‌دهد و بر عملکرد میراگر تأثیر می‌گذارد [۱۹].



شکل ۱-۱۴ منحنی نیرو برحسب سرعت پیستون با مشخصه‌ها [۱۹]

۸-۱ پیشینه‌ی ساخت سیال مگنتورئولوژیکال

سیالات مگنتورئولوژیکال در یک پروسه ساخت نسبتاً ساده از اختلاط اجزای سازنده‌ی آن با یکدیگر به دست می‌آید. همان‌طور که در فصل پیش بیان شد، این سیال از سه جزء سیال پایه، ذرات مغناطیسی‌پذیر و عامل پایدارساز تشکیل شده است. دو مشخصه‌ی اصلی سیال MR اثر مگنتورئولوژیکال و پایداری در مقابل ته‌نشینی ذرات مغناطیسی است. ترکیب این مشخصه‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که MRF اثر مگنتورئولوژیکال بالا و ته‌نشینی کمی داشته باشد.

به‌علت تفاوت زیاد چگالی ذرات مغناطیسی با سیال حامل، ته‌نشینی ذرات و به‌تبع آن تشکیل زنجیره ناقص از این ذرات تحت میدان مغناطیسی رخ می‌دهد، در نتیجه پاسخ سیال مگنتورئولوژیکال به

میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد [۱۸]. ته‌نشینی و تشکیل توده‌ی سخت ذرات مغناطیسی، درحالت شدید می‌تواند منجر به خرابی دستگاه دربردارنده‌ی سیال مگنتورئولوژیکال شود. چند روش برای تعیین نرخ ته‌نشینی MRF وجود دارد: اندازه‌گیری نرخ تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی لایه‌ی بالایی MRF و عبور دادن لیزر از ستون سیال مگنتورئولوژیکال [۳۰]. البته مشاهده‌ی بصری ته‌نشینی نیز در بسیاری از موارد به‌عنوان روش اندازه‌گیری پایداری MRF لحاظ شده است [۴، ۱۸] که دارای دقت قابل قبولی نیز هست، اگر چه سرعت تشکیل توده‌ها در آن مشخص نمی‌شود.

در تحقیقات گذشته راه‌حل‌های بسیاری برای جلوگیری از ته‌نشینی و انباشتگی ذرات مغناطیسی ارائه شده است که مهم‌ترین آن روش‌هایی مانند پوشش‌دهی ذرات مغناطیسی، استفاده از نانوذره‌های سیم مانند و نانوذره‌های کروی، استفاده از افزودنی‌های پایدارساز، به‌کارگیری سیالات حامل چگال و روش‌های مکانیکی هستند [۳۰]. بررسی اثر اندازه، شکل و نسبت حجمی یا وزنی ذرات مغناطیسی بر پایداری سیال مگنتورئولوژیکال نشان می‌دهد با افزایش قطر متوسط ذرات مغناطیسی با نسبت وزنی ثابت تنش تسلیم را افزایش و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال را کاهش می‌دهد [۱۴، ۳۱ و ۳۲]. بررسی استفاده از ذرات در اندازه و اشکال مختلف برای افزایش پایداری نشان می‌دهد که افزودن ذرات مغناطیسی در مقیاس نانو با نسبت وزنی کمتر از ۱۵٪ وزن کل ذرات مغناطیسی‌پذیر به ذرات میکرونی باعث افزایش شدید پایداری و تنش تسلیم و همچنین کاهش لزجت بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال می‌شود، اما اضافه نمودن ذرات نانومقیاس بیش از این مقدار علی‌رغم کاهش ته‌نشینی اثر مگنتورئولوژیکال را نیز کاهش می‌دهد [۳۳]. پایداری MRF به‌شدت وابسته به شکل ذرات مغناطیسی‌پذیر است، اگرچه استفاده از اشکال دیگر ذرات مغناطیسی‌پذیر به‌جای شکل کروی فراتر از تحقیقات آکادمیک و آزمایشگاهی نرفته‌است اما به‌عنوان مثال استفاده از میکروذرات مغناطیسی‌پذیر صفحه‌ای به‌جای ذرات کروی پایداری بسیار بهتری را نشان می‌دهد [۳۴]، با افزایش اندازه‌ی این ذرات صفحه‌ای اثر

مگنتورئولوژیکال افزایش و پایداری کاهش می‌یابد اما استفاده از حالت ترکیبی (می‌تواند ترکیبی از ذرات کروی و صفحه‌ای نیز باشد) بهترین نتیجه از نظر اثر مگنتورئولوژیکال و پایداری را به دست می‌دهد [۳۵]، [۳۶]. هم‌چنین مقادیر وزنی متفاوت ذرات مغناطیسی سبب تغییر سرعت ته‌نشینی می‌گردند، به‌گونه‌ای که افزایش مقدار ذرات سبب کاهش ته‌نشینی و افزایش اثر مگنتورئولوژیکال می‌گردد اما در لزجت‌های بدون میدان بالا این افزایش مقدار تأثیر چندانی در این دو مشخصه ندارد [۱۸، ۳۲ و ۳۷]. در ترکیب این سیالات معمولاً یکی از سه نوع سیال حامل روغن سیلیکون، روغن هیدروکربنی مصنوعی و روغن معدنی با ذرات آهن کربونیل مخلوط می‌گردد [۱]. محدوده دمای کاری، واکنش شیمیایی و لزجت عامل محدودکننده‌ی انتخاب این سیالات است. زمانی که گستره‌ی دمایی بالایی مورد نیاز است، روغن سیلیکون بهترین گزینه برای سیال حامل MRF است، چراکه تغییرات رفتاری کمتری با تغییر دما دارد [۳۸]. لزجت MRF در حالت بدون میدان نیز به‌شدت وابسته به لزجت سیال حامل و تغییرات آن است. بالا بودن لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در حالت نبود میدان مغناطیسی، در بسیاری از کاربردهای این سیال امری نامطلوب به حساب می‌آید، زیرا در این حالت اثر مؤلفه‌ی مگنتورئولوژیکال (نیروی ناشی از تنش تسلیم) نیروی میرایی کاهش می‌یابد [۴]. به‌رغم وجود تحقیقاتی که در گذشته تأثیر سیال حامل را بر اثر MR و پایداری سیال مگنتورئولوژیکال بررسی کرده است [۳۲، ۳۵ و ۳۷]، ماده و یا ترکیبی که به‌اندازه‌ی کافی برای کاربردهای صنعتی این نوع سیال رضایت‌بخش باشد، وجود ندارد؛ بنابراین تحقیقات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است. در اکثر تجهیزاتی که از سیالات مگنتورئولوژیکال استفاده می‌کنند، روغن سیلیکون به‌عنوان سیال حامل به‌کار می‌رود [۳۰]. افزودنی‌های پایدارساز متفاوتی توسط تعداد زیادی از محققان برای افزایش پایداری سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. اکثر این پایدارسازها علی‌رغم کاهش ته‌نشینی سبب کاهش اثر مگنتورئولوژیکال و افزایش لزجت بدون میدان می‌شوند. اضافه‌کردن افزودنی‌های مختلف نظیر نانوتیوب‌های کربن، گرافیت، سیلیکا، اکسید گرافن و هم‌چنین اثر افزودنی‌های

تیکسوتروپیک^۱ و پلیمرهای غلیظکننده‌ی غیریونی^۲ با نام‌های تجاری مختلف در کمتر کردن ته‌نشینی ذرات ثابت شده است [۱۵، ۱۶ و ۳۹]. افزودن ۰/۵٪ وزنی گریس به سیال MR مرسوم پایداری را بدون تغییر اثر مگنتورئولوژیکال ۲۰٪ افزایش داده است [۴۰]. تحقیق مشابه دیگری با افزودن اسید استئاریک به مقدار ۳٪ وزنی ذرات مغناطیسی به مخلوط نانوذرات سیسم‌مانند آهن و میکروذرات آهن کربونیل در روغن سیلیکون پایداری و اثر MR مناسبی را اعلام کرده است [۴۱]. افزودن آئروسیل^۳ ۲۰۰ و اسیدهای هایدروفوبیک^۴ مانند اسید استئاریک با زنجیره بیش از ۱۴ کربن به سیال مگنتورئولوژیکال منجر به ارتقاء معنی‌دار پایداری و اثر مگنتورئولوژیکال می‌گردد [۴، ۴۲].

جدول ۱-۱ مشخصات مهم سیالات مگنتورئولوژیکال ساخته‌شده در مقیاس تجاری و تحقیقات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این جدول اطلاعات مربوط به قسمت‌هایی که با علامت " _ " مشخص شده است در منبع موجود نیست.

¹ Thixotropic additive

² Non-ionic thickener

³ Aerosil 200

⁴ Hydrophobic acid

جدول ۱-۱ مشخصات نمونه‌ی سیال مگنتورئولوژی‌کال ساخته‌شده در پژوهش‌ها

مرجع	تنش تسلیم (kPa) / میدان مغناطیسی	مقدار افزودنی	افزودنی	لزجت سیال حامل / دما °C	نوع سیال حامل	مقدار ذرات مغناطیسی	قطر میانگین ذرات / شکل
[۴۳] لرد	۲۸۰/۴۸ kA/m	-	-	-	روغن هیدروکربنی	٪۸۱ وزنی	۸/۸۷ μm / کروی
پریمالاتا ^۱ و همکاران [۴۰]	$10^{-3} \times 9-21$	-۰/۱۵ ۰/۵	گریس	-	روغن سیلیکون	٪۳۹ حجمی	۲۸ μm / کروی
شاه ^۲ و همکاران [۳۵]	kA/m ۲۵۰ / ۳۲	٪۴	گریس	/ ۶۴cSt ۳۷/۸	روغن پارافین	٪۱۶ حجمی	۱۹-۲ μm / صفحه‌ای
جیانگ ^۳ [۴۴]	T ۱/۲ / ۵۹	-	-	/ ۵۰mPa.s ۲۰	روغن سیلیکون	٪۲۵ حجمی	۳ μm / کروی

¹ premalatha

² Shah

³ Jiang

روزنفلد ^۳ و همکاران [۳۴]	A۲ /۱۲	٪۰.۲ وزنی	لسیتین ^۲	سری موبیل DTE20 ^۱	روغن هیدرولیک	٪۰.۶۰ وزنی	nm۱۵ - nm۲۵ / کروی
[۳۴]	A۲ /۲۳	٪۰.۲ وزنی	لسیتین	موبیل DTE20	روغن هیدرولیک	٪۰.۶۰ وزنی	کروی / μm۴۵
[۳۴]	A۲ /۱۹	٪۰.۲ وزنی	لسیتین	موبیل DTE20	روغن هیدرولیک	٪۰.۶۰ وزنی	مخلوط ۵۰/۵۰ وزنی کروی / μm۴۵ nm۲۵
ورلی ^۴ و همکاران [۳۳]	A۲ /۱۲	٪۰.۲ وزنی	لسیتین	موبیل DTE20	روغن هیدرولیک	٪۰.۶۰ وزنی	۸۳ /۱۶ وزنی ۳۰ nm و ۳۰ μm / کروی

¹ Mobil DTE20 series

² Lecithin

³ Rosenfeld

⁴ Wereley

کیم ^۱ و همکاران [۴۵]	kA/m ^{۳۴۲} / ۱۲	-	-	۴ mPa.s	محلول ۲٪ جرمی PEO در آب	۲۰٪ حجمی	۲ μm / کروی
ژانگ ^۳ و همکاران [۳۲]	۱۸/۳۴-۱۴/۲۶ kA/m ^{۲۳۷} /		پلی سوربات-80 ^۲ ، اسپن-80 ^۲ استتاریک اسید و اولئیک اسید		روغن ترانسفورماتور ۴۵	۵۰٪، ۶۰٪، ۷۰٪ و ۸۰٪ وزنی	۲/۳، ۲/۷۳ و ۴/۰۲ μm / کروی
سرکار ^۴ و همکاران [۳۶]	۱۵۲/۱۰، ۵۰، ۶۰ kA/m		اولئیک اسید	در Pa.s ^۰ / ۲۱۸ $\left(\frac{1}{s}\right) 100$	روغن سیلیکون	۹٪، ۱۸٪ و ۳۶٪ حجمی	۹/۲۷، ۱۲۰/۸۵ μm و مخلوط ۵۰/۵۰ وزنی / کروی (اندازه کوچک) و ورقه‌ای (بزرگ)

¹ Kim

² Span-80

³ Zhang

⁴ Sarkar

پیائو ^۳ و همکاران [۱۵]	۳۴۳ / ۴ kA/m	٪. ۰/۱ وزنی	سپولیت ^۲	روغن معدنی سفید و رده سبک سیگمالدریج ^۱	روغن معدنی	٪.۷۰ وزنی	۷ / μm / کروی
تورکزین ^۴ و همکاران [۱۸]	-	٪.۱ و ٪.۲ وزنی	آئروسیل ۲۰۰	۵۰، ۱۵۰، ۲۳۵، mPa.s۵۰۰	روغن سیلیکون	٪.۲۰ و ٪.۴۰ وزنی	۱ / μm / کروی
ربانی و همکاران [۴]	۳۱ / ۲۳۴ / ۳۱ kA/m	٪.۱ و ٪.۲ و ٪.۳ وزنی	استتاریک اسید، پالمتیک اسید	cSt۳۵۰	روغن سیلیکون	٪.۶۰ وزنی	CS grade basf / کروی

¹ Sigma-Aldrich

² Sepiolite

³ Piao

⁴ Turczyn

سیال مگنتورئولوژیکال مطلوب دارای اثر MR بالا و ته‌نشینی و لزجت بدون میدان پایین است. در نتیجه این سه مشخصه‌ی سیال مگنتورئولوژیکال نقشی اساسی در قبول یا رد MRF ساخته‌شده دارد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد با اعمال میدان مغناطیسی به MRF، این سیال از یک سیال تقریباً نیوتونی به یک جامد ویسکوالاستیک تبدیل می‌شود و مشخصه‌های رئولوژیکال آن به شدت تغییر می‌کند. علاوه بر میدان مغناطیسی دما نیز بر خواص رئولوژیکال MRF تأثیر زیادی دارد. عموماً الکترومگنت‌ها مانند سیم‌پیچ یا سلنوئیدها منبع اعمال میدان مغناطیسی در میراگر MR هستند. عمل کرد مداوم این سیم‌پیچ‌ها سبب تولید گرما و در نتیجه افزایش دمای سیال داخل میراگر می‌شود. از این روی به مدلی که در رفتار رئولوژیکال سیال هم اثر میدان مغناطیسی و هم اثر دما را در نظر بگیرد نیاز است. پژوهش‌های کمی اثر دما را نیز بر رفتار رئولوژیکال سیال MR بررسی کرده‌اند. در اکثر موارد مشاهده می‌شود که با افزایش دما تنش برشی این سیالات کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. همچنین نشان داده شده است که با افزایش دما لزجت سیالات حامل مختلف در نبود میدان مغناطیسی تا ۳ برابر تغییر می‌کند [۴، ۴۶ و ۴۷]. کمترین تغییر مربوط به روغن سیلیکون با ۰/۵ برابر است. تنش تسلیم پارامتری اساسی است که رفتار ویسکوپلاستیک سیالات MR را تعیین می‌کند. تحقیقات گذشته نشان داده است که تنش تسلیم MRF به میدان مغناطیسی اعمالی، وزن ذرات به‌کاررفته و دما بستگی دارد. ساهین و همکارانش [۴۸] با بررسی ارتباط تنش تسلیم با دما نشان دادند که این دو کمیت ارتباطی نمایی مانند رابطه‌ی (۷-۱) با یکدیگر دارند.

$$\tau_y \propto \exp(\beta T) \quad (۷-۱)$$

۹-۱ مدل سازی دینامیکی میراگر

به دلیل طبیعت غیرخطی میراگرهای MR، یکی از چالش‌های مهم برای رسیدن به عمل کرد بالا ارتقاء مدل‌های دینامیکی دقیق و الگوریتم‌های کنترلی برای این میراگرها است.

سیال مگنتورئولوژیکال برای اولین بار در سال ۱۹۴۹ توسط رابینو^۱ [۴۹] ابداع شده است. اما چند دهه‌ی بعد شرکت لرد^۲ اولین نمونه‌ی ابتدایی میراگرهای مگنتورئولوژیکال را به بازار عرضه نمود. دلایل اصلی مدل‌سازی میراگرهای مگنتورئولوژیکال و اعتبارسنجی آن عبارت‌است از: طراحی میراگر و پیش‌بینی عمل کرد آن، کنترل و شبیه‌سازی عددی.

طراحی میراگر و پیش‌بینی عمل کرد: قبل از اینکه یک میراگر ساخته شود، وجود یک مدل می‌تواند عمل کرد آن را پیش‌بینی و خصوصیات لازم را برای طراحی میراگر به مهندسان منتقل کند.

شبیه‌سازی عددی و کنترل: میراگرهای مگنتورئولوژیکال به منظور تحقق بخشیدن به سیستم‌های نیمه‌فعال مانند سازه‌ها، سیستم تعلیق خودروها و اعضای مصنوعی هوشمند استفاده شده است؛ لذا مهندسان طراح نیاز به شبیه‌سازی عمل کرد مجموعه میراگر MR و کنترلر مربوطه دارند، از این روی مدل‌سازی دینامیکی میراگرهای مگنتورئولوژیکال امری کلیدی است.

یک مدل دینامیکی باید دارای شرایطی نظیر دقت کافی، سادگی و انطباق‌پذیری با شرایط محیط و تحریک باشد تا از اعتبار برخوردار باشد.

¹ Rabinow

² LORD

۱-۹-۱ انواع مدل‌های ارائه‌شده برای میراگر مگنتورئولوژیکال

تابه‌حال مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیکال پیشنهاد شده است. این مدل‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های پدیده‌شناختی^۱ و مدل‌های فیزیکی^۲. در مدل‌های پدیده‌شناختی، محققان پارامترهای مدل را با برازش آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی استخراج می‌کنند. خود این مدل‌ها به دو دسته پارامتری و غیرپارامتری تقسیم می‌شوند. در مدل‌های پارامتری، پارامترهای مدل دارای مفاهیم فیزیکی از قبیل المان اصطکاک، فنر، میراگر ویسکوز و ... هستند. مدل‌هایی از قبیل بینگهام، بوک-ون^۳، داهل^۴ مدل‌های پارامتری هستند. در مقابل مدل‌های غیر پارامتری الزاماً دارای مفهوم فیزیکی خاصی نیستند که می‌توان به مدل‌های شبکه‌عصبی^۵ و مدل‌های فازی^۶ اشاره نمود. در مقایسه با مدل‌های پدیده‌شناختی، مدل‌های فیزیکی قرار دارند. در مدل‌های فیزیکی نیروی میرایی دمپر مستقیماً از مشخصات هندسی میراگر و خصوصیات سیال مگنتورئولوژیکال محاسبه می‌شود [۵۰]. این مدل‌ها نیز به دو دسته شبه‌استاتیکی^۷ و دینامیکی تقسیم می‌شود. مدل‌های دینامیکی برخلاف مدل‌های شبه-استاتیکی اثر اینرسی سیال و حالت غیرپایا را در نظر می‌گیرند. این مدل‌ها می‌توانند برای انواع اشکال میراگرهای MR به کار روند و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به مدل‌های پدیده‌شناختی دارا هستند، چرا که تنها به اطلاعات پایه‌ای نظیر جنس سیال و هندسه‌ی میراگر بستگی دارند و به فرآیند شناسایی پارامترها و نتایج آزمایشگاهی نیز احتیاجی ندارند. از این روی این مدل‌ها برای فرآیند طراحی میراگرهای هوشمند بسیار مناسب هستند. در ادامه به معرفی و مرور تحقیقات انجام گرفته در این زمینه پرداخته می‌شود.

¹ Phenomenological

² physical

³ Bouc- Wen

⁴ Dahl

⁵ Neural network

⁶ Fuzzy logic

⁷ Quasi static

۱-۱۰ پیشینه‌ی مدل‌سازی میراگر مگنتورئولوژیکال

۱-۱۰-۱ مدل‌های پارامتری و غیرپارامتری

تغییرات در نیروی میرایی تنها به جریان اعمالی وابسته نیست و به شرایط تحریک شامل دامنه و فرکانس تحریک نیز بستگی دارد. در نتیجه مشخصه‌ی پسماند نیرو- سرعت میراگر MR می‌تواند به‌عنوان تابعی از این عوامل در نظر گرفته شود.

$$F(t) = f(I, x, \dot{x}, \ddot{x}) \quad (۸-۱)$$

در این رابطه، $F(t)$ نیروی میرایی دمپر، I جریان اعمالی به میراگر است، x جابه‌جایی پیستون، " \dot{x} " و " \ddot{x} " بالای متغیرها بیان‌گر مشتق‌های اول و دوم نسبت به زمان است.

مدل‌های پارامتری شاخص ارائه‌شده برای فرمول‌بندی تابع پسماند را می‌توان به گروه‌های زیر

تقسیم نمود: مدل بینگهام، مدل بایویسکوز، مدل ویسکوالاستیک- پلاستیک، مدل تابع چندجمله‌ای، مدل پسماند بوک-ون و بوک-ون ارتقاء‌یافته، مدل‌های پایه سیگموئید و سیگموئید تعمیم‌یافته، مدل‌های پسماند داهل و لوگری و مدل‌های تانژانت هایپربولیک [۸].

۲-۱۰-۱ مدل‌های فیزیکی

اولین تحلیل شبه‌استاتیکی در سال ۱۹۹۶ توسط کاماس^۱ و همکاران [۵۱] بر روی یک کمک‌فتر الکتروئولوژیکال^۲ انجام شد. پانگ^۳ و ورلی^۴ [۲۸] در سال ۱۹۹۸ اشکال مختلف میراگر مگنتورئولوژیکال- الکتروئولوژیکال را همراه با شرایط مرزی تحلیل شبه‌استاتیکی هر یک طبقه‌بندی نمودند. در سال بعد

^۱ Kamath

^۲ Electrorheological (ER)

^۳ Pang

^۴ Wereley

یک مدل تحلیلی شبه‌استاتیکی برای یک میراگر MR/ER دارای مسیر برگشت به‌کمک مدل هرشل‌باکلی ارائه شد [۵۲]. دیموک^۱ و همکارانش [۵۳] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از مدل بایپلاستیک بینگهام تلاش نمودند تا اثر رقیق‌شوندگی و غلیظ‌شوندگی برشی را در تحلیل شبه‌استاتیکی یک میراگر مگنتورئولوژیکال در نظر بگیرند. گردانی‌نژاد و وانگ^۲ [۵۴] در سال ۲۰۰۷ اثر تراکم‌پذیری را در تحلیل شبه‌استاتیک میراگر مگنتورئولوژیکال لحاظ نمودند. در سال ۲۰۰۸ ورلی و همکاران [۱۰] یک مدل برای میراگر مگنتورئولوژیکال در مود برش ارائه دادند. هونگ و همکاران [۲۹] در همین سال مدل شبه‌استاتیکی را برای یک میراگر مگنتورئولوژیکال در مود ترکیبی با استفاده از مدل بینگهام ارتقاء دادند و مدل را با نتایج آزمایشگاهی انطباق دادند. ایشان تعدادی متغیر بی‌بعد برای تحلیل شبه‌استاتیکی با اعمال مدل هرشل‌باکلی برای تحلیل میراگر مود جریان معرفی نمودند. در سال ۲۰۰۹ چویی^۳ و نگوین^۴ [۵۵] با استفاده از حل تحلیلی دینامیکی (غیرپایا) جریان بینگهام بین دو صفحه‌ی موازی با استفاده از تبدیل لاپلاس مدلی برای میراگر ER در مود جریان ارائه دادند. وانگ و همکاران تحلیل حالت پایای^۵ جریان سیال MR و ER درون دو صفحه‌ی موازی با استفاده از مدل هرشل-باکلی را بررسی نمودند. آن‌ها یک عبارت تابع جنس-ماده، هندسه و نرخ جریان را برای تعیین افت فشار ارائه دادند. ایشان مدل خود را با تحریک هارمونیک اعتبارسنجی نمودند. در سال ۲۰۱۳ یو و وانگ [۹] جریان غیرپایای^۶ سیال مگنتورئولوژیکال را درون یک میراگر مود جریان با تحریک سینوسی بررسی نمودند. ایشان با استفاده از هردو مدل پلاستیک بینگهام و هرشل‌باکلی پروفیل سرعت و به‌کمک آن نیروی میرایی دمپر را استخراج کردند. در سال ۲۰۱۴ استیکی و همکاران [۵۰] فرمولاسیونی برای تحلیل دینامیکی میراگرهای MRF و MRE ارائه دادند. ایشان

¹ Dimock

² Wang

³ Choi

⁴ Nguyen

⁵ Steady state

⁶ Unsteady

معادلات انتقال در ورتیسیتته^۱ در حالت غیرپایای جریان سیال MR یا ER در مود جریان و ترکیبی را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۲ به صورت عددی حل نمودند. گلداسز و ساینزکی [۵۶] در سال ۲۰۱۵ یک مدل تحلیلی برای جریان غیرپایای MRF در مود نوسانی ارائه دادند. ایشان به کمک نرم افزار FLUENT مدل دیگری برای رفتار MRF درون میراگر ارائه دادند و نتایج حاصل از آن را با نتایج حاصل از مدل تئوری تحلیلی مقایسه کردند .

۳-۱۰-۱ اثر پارامتر دما

در تمامی پژوهش‌های پیش‌گفته مدل‌سازی در یک دمای ثابت و بدون توجه به پارامتر دما انجام شده است. اما در طول زمان کاری میراگر عواملی نظیر مقاومت سیم‌پیچ‌ها، مقاومت سیال لزج و اصطکاک در مقابل حرکت پیستون باعث ایجاد گرما درون میراگر می‌شود در نتیجه سیال MR داخل میراگر اختلاف دمای زیادی را تجربه می‌کند. دما به شدت بر مشخصه‌های رئولوژیکال MRF تأثیر می‌گذارد. لزجت سیال حامل به شدت وابسته به دما است. همچنین فشار پنوماتیک انباره‌ی میراگر نیز مستقیماً وابسته به دمای گاز داخل انباره است [۱۹]. علی‌رغم اهمیت پارامتر دما تحقیقات نه‌چندان زیادی به بررسی اثر دما بر روی عمل کرد میراگر MR پرداخته‌اند. گردانی‌نژاد و بریز^۳ [۵۷] در سال ۱۹۹۹ با نوشتن معادلات تعادل انرژی گرمای تولیدی میراگر مگنتورئولوژیکال را به‌عنوان تابعی از انرژی ورودی از طریق کار الکتریکی و مکانیکی و خروجی از طریق همرفت و رسانش گرمایی پیش‌بینی کردند. در سال ۲۰۰۳ دوگروز^۴ [۵۸] و همکاران با ساخت میراگر MR به صورت آزمایشگاهی اتلاف حرارت از میراگر را از طریق نصب پره‌هایی بر روی آن افزایش دادند. بتربی^۵ و سیمز^۶ [۵۹] در سال ۲۰۰۸ نشان دادند که کنترلرهای فیدبک دار برای

¹ Vorticity

² CFD

³ Breese

⁴ Dogruoz

⁵ Batterbee

⁶ Sims

به‌کارگیری در میراگرهای مگنتورئولوژیکال با افزایش دما، به‌علت کاهش میرایی ویسکوز و نیروی تسلیم، کاهش ردیابی نیرو^۱ را بروز می‌دهند. اگرچه مدل‌های زیادی برای میراگر MR ارائه شده است، اما مدل‌های کمی تأثیر دما را نیز در مدل‌ها لحاظ کرده‌اند. ساهین^۲ و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از مشخصه‌های رئولوژیکال یک گریس MR و با پیشنهاد یک مدل هرشل-باکلی وابسته به دما برای نمایش رفتار آن، نشان دادند که دما تأثیر محسوسی بر تنش تسلیم سیال دارد و می‌تواند نیروی میرایی را به صورت قابل‌ملاحظه‌ای تغییر دهد. همچنین می‌تواند پسماند و رابطه‌ی فاز بین نیرو و جابه‌جایی میراگر را نیز تغییر دهد. در سال ۲۰۱۳ ویلسون^۳ و همکاران [۱۹] با استفاده از تحلیل هیدرومکانیکی یک مدل پارامتری برای شبیه‌سازی رفتار میراگر مگنتورئولوژیکال ارائه دادند. همچنین با ساخت یک میراگر و بررسی اثر تغییرات دمایی در گستره‌ی ۱۰۰ °C بر روی عمل‌کرد آن اعلام کردند که این افزایش دما در جریان ثابت تا ۳۷٪ نیروی میرایی بیشینه را کاهش می‌دهد. ایشان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی پارامترهای مدل را به‌عنوان تابعی از جریان ورودی و دما استخراج نمودند.

۱-۱ معرفی تحقیق حاضر

هدف اصلی این تحقیق مدل‌سازی دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیکال با در نظر گرفتن پارامتر دما، مناسب برای فاز طراحی است. لذا با توجه به لزوم وجود مدلی که تنش تسلیم سیال MR را حساس به تغییرات دما به‌دست دهد، نمونه سیال MR ساخته و تست رئومتری با توجه به تغییرات دما روی آن انجام گرفته است. پایداری و اثر مگنتورئولوژیکال بالا شرط لازم برای قبول نمونه MRF ساخته‌شده است. به‌این منظور در این پژوهش پس از ساخت نمونه‌های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر، عوامل مؤثر بر پایداری و پایدارترین نمونه در مقابل ته‌نشینی و مقاوم با تغییرات دمایی معرفی

¹ Force tracking

² Sahin

³ Wilson

شد و مدلی برای تخمین رفتار رئولوژیکال نمونه MRF ساخته شده‌ی بهینه ارائه گردید که در آن تنش تسلیم علاوه بر میدان مغناطیسی اعمالی تابعی از دمای کاری سیال نیز هست. برای مدل سازی میراگر مود ترکیبی معادلات ناویر استوکس برای جریان یک بعدی MRF در حالت شبه‌استاتیکی بدون در نظر گرفتن جمله‌ی اینرسی و با در نظر گرفتن آن در حالت غیرپایا درون میراگر نوشته شد. ساده سازی معادلات با توجه به شرایط مسئله و جایگذاری شرایط مرزی برای میراگر مود ترکیبی انجام شد. این معادلات با استفاده از مدل پلاستیک بینگهام استخراج گردید. با حل معادلات و به دست آوردن افت فشار بین دو سر میراگر، نیروی میرایی و در نتیجه مدل دینامیکی فیزیکی برای میراگر مگنتورئولوژیکال در مود ترکیبی با تحریک هارمونیک ارائه گردید. با بررسی اثر دما بر روی عملکرد میراگر لزوم در نظر گرفتن دما در فرآیند مدل سازی نشان داده شد و با نوشتن معادلات انرژی توزیع دما بر حسب زمان استخراج و نیروی میراگر با تغییرات دما اصلاح شد. نشان دادن چگونگی عمل کرد سیستم کنترل نیمه فعال و مزیت آن بر سیستم‌های تعلیق رایج دارای میراگرهای غیرفعال امری ضروری است. با استفاده از مدل‌های دینامیکی انجام شده در این پژوهش و با توجه به لزوم سرعت و پایداری کنترلر، یک الگوریتم کنترل مبتنی بر روش گیره- فضایی^۱ به صورت اصلاح شده با کمک مدل شبه‌استاتیکی ارائه و با سیستم میرایی غیرفعال مقایسه گردید.

۱-۱۱-۱ ضرورت و کاربرد موضوع

ارتعاشات وارده به بدنه‌ی خودرو که از طریق سیستم تعلیق به آن وارد می‌شود ناشی از ناهمواری‌های جاده، شتاب و ترمزگیری‌های ناگهانی و گردش‌های سریع هستند در نتیجه سیستم تعلیق خودرو با محدوده‌ی وسیعی از دامنه‌ها و فرکانس‌های تحریک روبه‌رو است که باید توانایی جذب این ارتعاشات و افزایش پایداری را به صورت همزمان داشته باشد، میراگرهای غیرفعال قابلیت تطبیق خود با شرایط

¹ Sky- Hook

تحریک را دارا نیستند از این روی میراگرهای نیمه فعال در دو دهه‌ی اخیر مورد توجه روزافزونی قرار گرفته‌اند. فرآیند طراحی و کنترل پارامترهای میراگر به منظور عمل کرد مناسب نیازمند مدل دینامیکی دقیق است. مدل‌های فیزیکی به دلیل نیاز نداشتن به فرآیند شناسایی پارامترها و در نتیجه ساخت و آزمایش میراگر، برای فاز طراحی مدل‌های بسیار مناسبی هستند چرا که تنها به پارامترهای اولیه نظیر مشخصات رئولوژیکی سیال و مشخصات هندسی میراگر نیاز دارد. میراگرهای مود ترکیبی از برش و جریان به دلیل ظرفیت نیروی بالا و عمل کرد مناسب در فرکانس‌های بالا و پایین برای کاربرد در سیستم تعلیق وسایل نقلیه مناسب است. در نظر گرفتن اینرسی سیال در سرعت‌های بالای میراگر برای تخمین دقیق‌تر عمل کرد آن لازم است. علاوه بر شرایط مستقیم تحریک و خواص سیال، شرایط ثانویه‌ای مانند تغییرات دما به دلیل شرایط کاری میراگر نیز باید در فرآیند مدل‌سازی میراگر MR در نظر گرفته شود چراکه تغییرات دمای کاری بر خواص سیال مگنتورئولوژیکی تأثیر می‌گذارد.

۱-۱۱-۲ جنبه‌های نوآوری پژوهش

در این پژوهش مدل دینامیکی میراگر مود ترکیبی از جریان و برش با در نظر گرفتن اینرسی سیال به صورت تحلیلی ارائه و حل شد. پارامتر دما نیز در این مدل در نظر گرفته شد و نیروی خروجی با توجه به آن اصلاح گردید. مدل کنترلی نیز با اصلاح روش گیره-فضایی به کمک الگوی نیروی استخراج شده از مدل شبه‌استاتیکی در جریان‌های خاص برای میراگر نیمه فعال ارائه شد.

نوآوری‌های تحقیق حاضر را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- بررسی آزمایشگاهی ساخت سیال مگنتورئولوژیکی مقاوم در برابر ته‌نشینی
- مدل‌سازی دینامیکی فیزیکی میراگر مگنتورئولوژیکی در مود ترکیبی
- در نظر گرفتن پارامتر دما در مدل‌سازی میراگر مگنتورئولوژیکی در مدل‌سازی فیزیکی

- ارائه‌ی کنترلر گیره-فضایی اصلاح‌شده مبتنی بر مدل‌سازی شبه‌استاتیکی میراگر

۱-۱۲ جمع‌بندی فصل

روش‌های گوناگونی برای ساخت سیالات مگنتورئولوژیکال پیشنهاد شده است. باوجود نمونه‌های تجاری موجود در بازار اما پژوهشگران به‌دنبال بهبود دو مشخصه‌ی پایداری و اثر مگنتورئولوژیکال سیالات MR هستند به‌همین دلیل تا به امروز روش‌های بسیاری برای افزایش پایداری سیالات مگنتورئولوژیکال پیشنهاد شده است. از میان این روش‌ها اضافه کردن ذرات مغناطیس‌پذیر مسطح یا کروی در مقیاس نانو به میکرو ذرات مغناطیسی به‌نسبت زیر ۲۰٪ و همچنین اضافه کردن افزودنی‌های مناسب برای افزایش پایداری و اثر مگنتورئولوژیکال تا حد امکان، روش‌های عملی‌تر و اقتصادی‌تری است. مدل‌های مختلفی نظیر پلاستیک بینگهام، هرشل باکلی و... برای توصیف رفتار این سیالات پیشنهاد شده است.

یکی از کاربردهای MRF میراگر مگنتورئولوژیکال است. امروزه این میراگرها محدوده‌ی وسیعی از وسایل مهندسی نظیر پل‌ها، ساختمان‌ها، وسایل نقلیه، تسلیحات و اندام‌های مصنوعی را دربر می‌گیرد. میراگرهای به‌کاررفته در سیستم تعلیق خودروهای سواری به‌دلیل میرایی مورد نیاز بالا عمدتاً در مودهای جریان و ترکیبی از جریان و برش عمل می‌کنند. میراگرهای مود ترکیبی به‌علت ظرفیت نیروی میرایی بالا و قفل نشدن در سرعت‌های پایین، برای کاربرد در سیستم تعلیق هوشمند خودروها مناسب است. مدل‌سازی میراگر مگنتورئولوژیکال برای استفاده در فرآیند طراحی و کنترل آن امری ضروری است. در میان انواع مدل‌های پیشنهادی مدل‌های فیزیکی به‌علت تکیه بر مفاهیم پایه‌ای سیال مگنتورئولوژیکال نظیر تنش تسلیم و هندسه‌ی میراگر بدون نیاز به انجام آزمایش برای فرآیند شناسایی پارامترها برای طراحی میراگرهای مگنتورئولوژیکال مناسب است.

در نظر گرفتن پارامتر دما با وجود افزایش دمای زیاد میراگر مگنتورئولوژیکال حین کار مداوم، حلقه‌ی مفقوده‌ی اکثر روش‌های مدل‌سازی موجود است. اگرچه این افزایش دما عملکرد میراگر را به صورت قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما تعداد کمی از پژوهش‌ها این عامل (دما) را نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته‌اند. نیروی تولیدی میراگرهای مگنتورئولوژیکال علاوه بر دامنه و فرکانس تحریک به شدت وابسته به جریان ورودی به سیم‌پیچ‌ها و بالتبع افزایش دمای حاصل از آن می‌باشد؛ لذا گسترش مدل‌سازی ریاضی با در نظر گرفتن این عوامل مؤثر برای کاربردهای عملی این میراگرها ضروری است.

فصل دوم:

ساخت سیال مگنتورئولوژیکال

۱-۲ پیش‌گفتار

در این فصل نمونه‌های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال ساخته و بررسی مقایسه‌ای بین انواع این سیالات آزمایشگاهی از نظر پایداری صورت گرفته و اهمیت عوامل مؤثر بر پایداری بررسی شده است. در انتها رفتار رئولوژیکال نمونه‌ی بهینه در دماها و میدان‌های مغناطیسی مختلف بررسی و مدل ریاضی برای آن به‌عنوان تابعی از میدان مغناطیسی اعمالی و دما تعیین گردید.

۲-۲ مواد آزمایش

در این پژوهش برای ساخت سیال مگنتورئولوژیکال از پودر آهن کربونیل (با نام تجاری بسف^۱ آلمان، با قطر متوسط ذرات $4 \mu\text{m}$ و چگالی $\frac{7}{86} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) استفاده شده است. مراجعه به تحقیقات گذشته نشان می‌دهد ذرات آهن کربونیل با قطر $4 \mu\text{m}$ به دلیل نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بالا و فرآیند تولید نسبتاً ساده گزینه‌ای مناسب برای ساخت سیال مگنتورئولوژیکال می‌باشند. بسته به محدوده‌ی تنش مورد نیاز، نسبت حجمی ذرات مغناطیسی به کاررفته از ۱۰٪ تا ۷۰٪ متغیر است [۳۰]. انتخاب غلظت پودر آهن به کاررفته در سیال مگنتورئولوژیکال اثر مستقیم بر لزجت بدون میدان سیال و اثر مگنتورئولوژیکال آن دارد که این موضوع منجر به محدودیت در انتخاب غلظت پودر آهن می‌گردد. به‌عنوان مثال افزایش غلظت پودر آهن باعث افزایش اثر مگنتورئولوژیکال و افزایش لزجت بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال می‌شود. برای فاز پیوسته یا سیال حامل نیز دو نوع سیال مرسوم (در میراگرهای مگنتورئولوژیکال) در نظر گرفته شده است. این دو نوع سیال شامل روغن معدنی (روغن هیدرولیک کاسپین VG46 با لزجت 46 cSt در دمای 40°C) و روغن سیلیکون (روغن سیلیکون کی‌سی‌سی^۲ کره با لزجت 350 cSt در دمای 40°C) است.

¹ Basf

² KCC

روغن سیلیکون دارای لزجت و مقاومت گرمایی بالاتری نسبت به روغن هیدرولیک است. برای افزایش پایداری سیال، مقداری اسید استتاریک (اپلیکم^۱ آلمان) به عنوان افزودنی به کاررفته است.

۲-۳ ساخت سیال

پس از توزین مواد با توجه به نسبت‌های وزنی مورد نظر، اسید استتاریک به سیال پایه (روغن سیلیکون یا روغن هیدرولیک) اضافه شده و محلول به مدت ۳۰ دقیقه با کمک همزن مغناطیسی^۲ در دمای حدود ۱۰۰°C مخلوط می‌گردد تا محلول شفاف حاصل شود. سپس پودر آهن به محلول اضافه و برای اختلاط آن از دو روش همزن مکانیکی^۳ یا آسیاب‌کاری^۴ با گلوله‌ی فولادی استفاده می‌گردد. در نمونه‌هایی که اختلاط آن با همزن مکانیکی انجام می‌شود، پس از اضافه نمودن پودر آهن، به مدت ۳۰ دقیقه سوسپانسیون با همزن مکانیکی با دور ۳۰۰۰rpm هم زده می‌شود. برای اختلاط به روش آسیاب‌کاری نیز، سوسپانسیون حدود ۱۰ ساعت با ساچمه‌های فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر و نسبت حجمی $\left(\frac{\text{حجم پودر آهن}}{\text{حجم گلوله}}\right)$ برابر ۱/۵ با دور ۳۰rpm آسیاب می‌گردد. مشخصات نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده در جدول ۱-۲ آمده است. مقدار افزودنی (استتاریک اسید) نقش مؤثری بر لزجت بدون میدان و پایداری MRF دارد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته مقدار اسید استتاریک اضافه شده به هریک از نمونه‌ها مطابق آنچه در مرجع [۴] به کاررفته است انتخاب شده است که برابر با ۰.۳٪ وزنی کل سوسپانسیون است. با توجه به نمونه‌های ساخته شده می‌توان اثر غلظت فاز پراکنده شونده، سیال حامل و همچنین روش اختلاط اجزاء را بر پایداری MRF در دمای ثابت بررسی نمود.

^۱ Applichem

^۲ Magnetic stirrer

^۳ Overhead mechanical stirrer

^۴ Ball milling

جدول ۱-۲ مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده از سیال مگنتورئولوژیکال

نمونه	روش اختلاط	فاز پیوسته (درصد وزنی)	درصد وزنی آهن کربونیل
MR1	همزن مکانیکی	روغن سیلیکون (۴۷٪)	۵۰٪
MR2	همزن مکانیکی	روغن سیلیکون (۳۷٪)	۶۰٪
MR3	همزن مکانیکی	روغن سیلیکون (۲۷٪)	۷۰٪
MR4	آسیاب گلوله‌ای	روغن هیدرولیک (۴۷٪)	۵۰٪
MR5	آسیاب گلوله‌ای	روغن هیدرولیک (۳۷٪)	۶۰٪
MR6	آسیاب گلوله‌ای	روغن هیدرولیک (۲۷٪)	۷۰٪
MR7	همزن مکانیکی	روغن سیلیکون (۴۷٪)	۵۰٪
MR8	همزن مکانیکی	روغن سیلیکون (۳۷٪)	۶۰٪
MR9	همزن مکانیکی	روغن سیلیکون (۲۷٪)	۷۰٪
MR10	آسیاب گلوله‌ای	روغن هیدرولیک (۴۷٪)	۵۰٪
MR11	آسیاب گلوله‌ای	روغن هیدرولیک (۳۷٪)	۶۰٪
MR12	آسیاب گلوله‌ای	روغن هیدرولیک (۲۷٪)	۷۰٪

۲-۴ آزمایش سیال مگنتورئولوژیکال

مطابق بسیاری از تحقیقات گذشته، تعیین پایداری و ته‌نشینی با مشاهده‌ی تغییر مکان مرز بین بخش شفاف و کدر سیال مغناطیسی در دمای اتاق انجام شده است [۱۸] به‌منظور بررسی اثر غلظت فاز پراکنده‌شونده، روش اختلاط و نوع سیال حامل بر روی پایداری و لزجت بدون میدان، آزمایش‌هایی

طراحی گردیده است، به گونه‌ای که به سه غلظت مختلف ذرات مغناطیسی، دو نوع سیال حامل و دو روش اختلاط و در مجموع تعداد ۱۲ نمونه برای اندازه‌گیری میزان تأثیر هریک از این پارامترها بر روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال مورد نیاز است. هر یک از نمونه‌ها حدود ۱۷۰ ساعت در یک محل ثابت قرار داده شده است. به دلیل تقریباً صفر شدن نرخ ته‌نشینی اکثر نمونه‌ها در مدت ۷ روز، این بازه‌ی زمانی برای بررسی پایداری در نظر گرفته شده است. نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکال در شرایط یکسان، درون لوله‌های آزمایش به قطر ۱۸ mm و طول ۱۷۵ mm به مدت یک هفته نگهداری شده است. با استفاده از نتایج آزمایش ته‌نشینی و به کمک روش تاگوچی^۱ در نرم‌افزار مینی‌تب^۲ بهترین ترکیب متغیرهای مختلف برای تعیین سیال مگنتورئولوژیکال پایدار و تأثیر هر کدام از عوامل بر روی ته‌نشینی استخراج شده است. با توجه به نتایج آزمون ته‌نشینی، نمونه‌های مورد قبول در آزمایش پایداری انتخاب شده و ادامه‌ی آزمایش‌ها و مطالعات رئومتری روی این نمونه‌ها انجام گرفته است. برای بررسی رفتار لزجت بدون میدان نمونه‌های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال، از ویسکومتر دیجیتالی (بروکفیلد^۳ مدل DV-E آمریکا) استفاده شده است (شکل ۱-۲) تا لزجت برخی نمونه‌ها بدون اعمال میدان مغناطیسی در دمای اتاق استخراج گردد. لزجت نمونه‌ها در دمای ۲۵°C توسط ویسکومتر دیجیتالی در نرخ برش‌های ۰/۳ تا ۱۰۰ دور بر دقیقه بدون اعمال میدان مغناطیسی استخراج گردیده است. همچنین لزجت و تنش برشی سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان‌های مغناطیسی مختلف در گستره‌ی دمایی ۲۵-۸۰°C نیز به دست آمده است که این اطلاعات در نرخ برش‌های ۰/۰۱ تا $(\frac{1}{5})$ ۱۰۰۰ توسط رئومتر (آنتون پار^۴ مدل MCR ۳۰۰ اتریش) با شیار^۵ ۱ mm بین صفحات موازی آن استخراج شده است (شکل ۱-۲ الف). به این منظور برای هر آزمایش حدود

¹ Taguchi method

² Minitab

³ Brookfield

⁴ Anton Paar

⁵ Gap

۳ml سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. دقت این دستگاه در اندازه‌گیری لزجت دینامیکی برای نمونه‌ی مورد استفاده ± 100 cp در محدوده‌ی نرخ برش مورد نظر است. دماهای انتخاب شده ۲۵، ۴۰، ۶۰، ۷۰ و 80°C است و میدان مغناطیسی رئومتر نیز بین میدان‌های ۰، ۱۸، ۳۶، ۵۵، ۷۳، ۹۱، ۱۰۹ و 146 kA/m متغیر در نظر گرفته شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۱-۲ رئومتر (الف) و ویسکومتر (ب) مورد استفاده در آزمایش

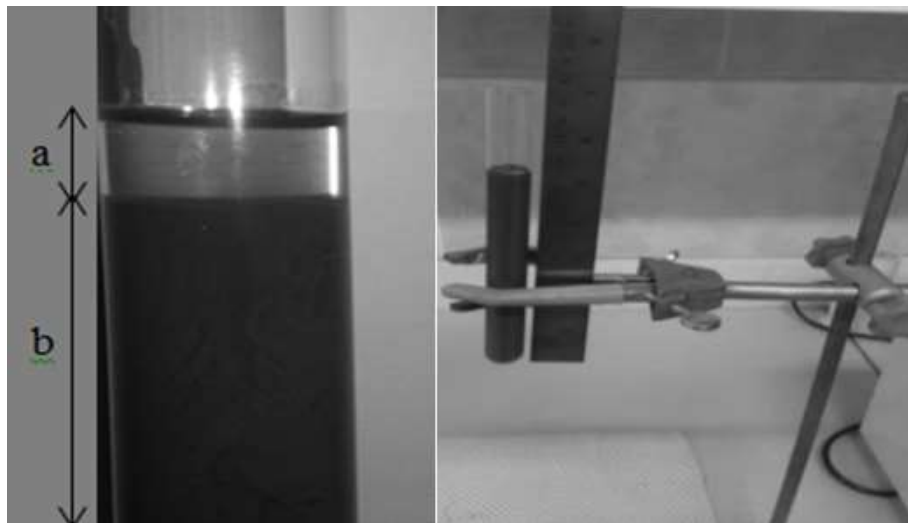
۲-۵ پایداری سیالات مگنتورئولوژیکال

درصد ته‌نشینی عبارت است از نسبت حجم قسمت شفاف سوسپانسیون به حجم کل آن که توسط رابطه-ی (۱-۲) ارائه شده است [۱۸]:

$$R = \frac{a}{(a + b)} \times 100\% \quad (1-2)$$

در این رابطه، a ارتفاع سیال شفاف و b ارتفاع قسمت کدر سوسپانسیون می باشد. همچنین مکانیزم اندازه‌گیری ارتفاع قسمت شفاف و کدر نیز در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. با اندازه‌گیری طول قسمت شفاف سوسپانسیون و ارتفاع کل با کمک رابطه‌ی (۱-۲) درصد ته‌نشینی در زمان‌های

مختلف برای هر نمونه محاسبه شده است. با توجه به اندازه گیری ارتفاع قسمت ها با خط کش، دقت اندازه گیری ارتفاع هر قسمت برابر ۱ mm است.



شکل ۲-۲ نحوه اندازه گیری ته نشینی (راست) سیال MR با ته نشینی (چپ)

۲-۶ تعیین تأثیر پارامترها بر روی پایداری به کمک روش تاگوچی

جدول ۲-۲ هر یک از سطوح آزمایش تعریف شده برای الگوریتم تاگوچی به کمک نرم افزار مینی تب را نشان می دهد. این الگوریتم، تعدادی آزمایش پیشنهاد می دهد به طوری که هریک از ردیف های طراحی آزمایش ترکیبی از سطوح فاکتورهای مورد استفاده در یک آزمایش را نشان می دهد. هدف استفاده از الگوریتم طراحی تاگوچی یافتن ترکیبی از عوامل است که اختلاف آن با هدف کمینه باشد. پس از وارد نمودن نتایج آزمون ته نشینی و انجام محاسبات توسط نرم افزار، نمودار نسبت سیگنال به نویز به دست می آید. این مقدار هرچه بزرگ تر باشد نتیجه به مقدار مطلوب خروجی (پایداری) نزدیک تر است.

جدول ۲-۲ سطوح آزمایش در نظر گرفته شده برای الگوریتم تاگوچی

سطح	روش اختلاط	غلظت آهن کربونیل	نوع سیال حامل
۱	همزن مکانیکی	wt % ۵۰	روغن سیلیکون
۲	آسیاب کاری	wt % ۶۰	روغن هیدرولیک
۳	-	wt % ۷۰	-

۲-۷ بررسی رفتار رئولوژیکال

رفتار کلی رئولوژیکال سیال مگنتورئولوژیکال از مدل هرشل-باکلی تبعیت می‌کند. می‌توان با برازش این نمودار با مدل هرشل-باکلی (معادله ۱-۴)، تنش تسلیم را محاسبه نمود. تعیین پارامترهای مدل هرشل-باکلی در نرخ برش‌های پایین مشکل است، به همین دلیل تعدادی از محققان [۳۳، ۶۰ و ۶۱] نتایج آزمایشگاهی خود را با مدل بینگهام، در نرخ برش‌های بالا برازش کرده‌اند و بیشینه تنش تسلیم ممکن را گزارش نموده‌اند، اما این مدل به نسبت مدل هرشل-باکلی از دقت کمتری برخوردار است و قادر به مدل‌سازی رفتار غلیظ‌شوندگی و یا رقیق‌شوندگی برشی سیال نیست. مدل هرشل-باکلی مشابه مدل بینگهام پلاستیک فرض می‌کند که در تنش‌های زیر تنش تسلیم، سیال رفتار صلب را نشان می‌دهد و در تنش‌های بالاتر از تنش تسلیم سیال مانند سیال ویسکوز جریان می‌یابد؛ با این تفاوت که در این مدل برخلاف مدل بینگهام اثر رقیق‌شوندگی و یا غلیظ‌شوندگی برشی^۱ سیال پس از تسلیم نیز در نظر گرفته می‌شود [۱]. به همین علت در این پژوهش از مدل هرشل-باکلی برای مدل‌سازی سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است.

¹ Shear thickening

۲-۷-۱ اثر میدان مغناطیسی بر رفتار رئولوژیکال

برای مدل‌سازی وابستگی تنش تسلیم سیال به میدان مغناطیسی از رابطه‌ی ارائه‌شده توسط پیائو و همکاران [۱۵] استفاده شده است. مطابق آن H_c میدان مغناطیسی بحرانی است که اگر ارتباط تنش تسلیم با میدان را با دو خط تخمین زده شود، محل تغییر شیب خط است. به بیان دیگر به‌ازای میدان‌های کوچکتر از میدان بحرانی، تنش تسلیم رابطه‌ی توانی متفاوتی با میدان مغناطیسی نسبت به مقادیر بزرگتر از H_c دارد. این رابطه تنها وابستگی تنش تسلیم به میدان مغناطیسی اعمالی را بیان می‌کند. ضرایب رابطه نیز از برازش با نتایج به‌دست می‌آید.

$$\tau_y \propto a \left(\frac{H}{H_c} \right)^n \tanh\left(\sqrt{\frac{H}{H_c}} \right) \quad (2-2)$$

۲-۷-۲ اثر دما بر رفتار رئولوژیکال

اثر دما بر مشخصه‌های رئولوژیکال MR2 در دماهای مختلف بین $25 - 80^\circ\text{C}$ ارزیابی شده است. به‌دلیل یکسان بودن طبیعت تنش تسلیم و لزجت سیال مگنتورئولوژیکال مشابه رابطه‌ی آرنیوس^۱ که ارتباط بین دما و لزجت سیال را مشخص می‌کند رابطه‌ی (۲-۳) برای تنش تسلیم بیشینه‌ی سیال و دما در نظر گرفته شده است.

$$\tau_y \propto A \times \exp(-\beta T) \quad (3-2)$$

در این رابطه T دمای سیال برحسب درجه‌ی کلون و A و β ضرایبی هستند که از برازش با نتایج آزمایشگاهی به‌دست می‌آیند.

¹Arrhenius

۳-۷-۲ مدل سازی تنش تسلیم

مبتنی بر روابط (۲-۲) و (۳-۲) رابطه‌ای برای بیان وابستگی تنش تسلیم بیشینه به میدان مغناطیسی و دما به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_y = \alpha \left(\frac{H}{H_c} \right)^n \tanh\left(\sqrt{\frac{H}{H_c}} \right) \exp(-\beta T) \quad (۴-۲)$$

ضرایب این معادله که عبارتند از α ، n و β از برازش رابطه‌ی (۴-۲) با تنش‌های تسلیم استخراج شده از نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آیند. در این رابطه دما (T) برحسب درجه‌ی کلوین و میدان مغناطیسی اعمالی به سیال (H) می‌تواند برحسب هرواحد یکسان با H_c باشد. H_c شدت میدانی است که آهنگ برازش خطی تنش تسلیم بیشینه در آن میدان تغییر کند.

۲-۸ جمع بندی

در ابتدا نمونه‌های سیال از پراکندن ذرات آهن کربونیل با غلظت‌های مختلف در روغن سیلیکون و روغن هیدرولیک به کمک دو روش اختلاط مکانیکی و آسیاب گلوله‌ای ساخته شده است. هدف از ساخت نمونه‌های مختلف بررسی اثر متغیرهایی شامل غلظت ذرات مغناطیس‌پذیر، نوع و لزجت سیال حامل و روش اختلاط اجزاء بر پایداری سیال مگنتورئولوژیکال است. به کمک الگوریتم طراحی آزمایش تاگوچی در نرم افزار مینی تب اهمیت هر یک از این پارامترها بر پایداری MRF تعیین شد. با استفاده از مدل‌های موجود، ارتباط تنش تسلیم MRF و میدان مغناطیسی اعمالی تعیین و با توجه به یکسان بودن طبیعت تنش تسلیم و لزجت سیال از رابطه‌ی آرهنیوس برای مدل سازی ارتباط تنش تسلیم MRF با دما استفاده شد، به بیان دیگر مدل ارائه شده برای تنش تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال تابعی از میدان مغناطیسی اعمالی و دما است. ضرایب این مدل از برازش با نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آید.

فصل سوم:

مدل سازی دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیکال

۱-۳ پیش‌گفتار

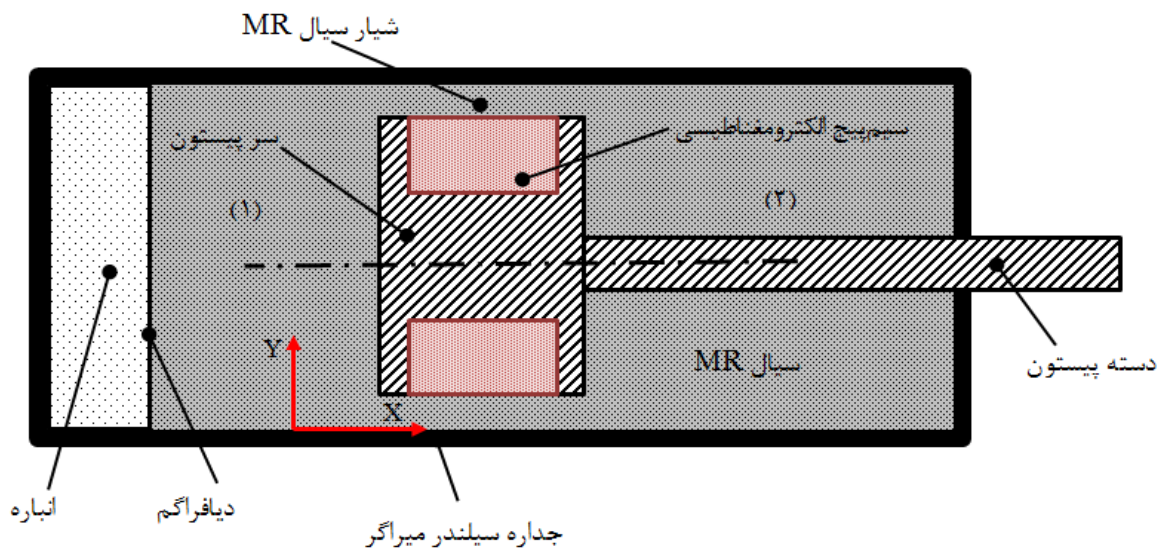
در این فصل مدل تحلیلی جدیدی برای میراگر مگنتورئولوژیکال مود ترکیبی در حالت ناپایا با در نظر گرفتن تغییرات دما در حین کار میراگر ارائه شد. معادلات حاکم بر دینامیک سیال درون میراگر مود ترکیبی به کمک روش مختلط حل شد. حل عددی معادلات حاصله نیروی میراگر به همراه اختلاف فاز، گرادیان فشار و اندازه‌ی ناحیه‌ی پلاگ با هر تحریک و در هر لحظه را مشخص می‌کند. به کمک انرژی تبادل شده بین میراگر و محیط دمای درون میراگر در هر لحظه استخراج شد و با توجه به مدل ارائه شده برای سیال مگنتورئولوژیکال نیروی میراگر با توجه به دما در هر لحظه اصلاح شد.

۲-۳ معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سیال در شیار

شکل ۱-۳ یک میراگر مود ترکیبی از جریان و برش را نشان می‌دهد. در میراگر مود ترکیبی، هم اختلاف فشار و هم برش حاصل از حرکت پیستون سبب رانش سیال در شیار حلقوی میراگر می‌گردد. از آن جاکه نسبت عرض پیستون به اندازه‌ی شیار عبور سیال بسیار بزرگ است، شبیه‌سازی جریان سیال درون میراگر با جریان بین دو صفحه‌ی موازی معتبر است؛ لذا از دستگاه مختصات کارتیزین همان‌طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده استفاده گردیده است. فرض پایا بودن جریان سیال درون شیار برای میراگرهایی که در فرکانس و کورس پایین کار می‌کنند معتبر است و برای عمل کرد میراگر در فرکانس و کورس بالا باید اثر اینرسی سیال و ناپایا بودن جریان آن در شیار میراگر را در نظر گرفت [۹، ۲۹] به علاوه با فرض تراکم‌ناپذیر بودن سیال هوشمند، آرام^۱ بودن رژیم سیال و جریان یک بعدی سیال معادله‌ی مومنوم برای MRF درون شیار به صورت رابطه‌ی (۱-۳) نوشته می‌شود. از آن جا که عرض شیار حلقوی نسبت به عرض مقاطع

^۱ Laminar

محفظه‌های بالایی و پایینی میراگر بسیار کوچکتر است می‌توان از افت فشار جریان درون محفظه‌ها نسبت به شیار صرف نظر نمود [۹، ۲۹، ۵۰ و ۵۱]:



شکل ۱-۳ شماتیک میراگر مود ترکیبی

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad 0 \leq y \leq d \quad (1-3)$$

در رابطه‌ی (۱-۳)، u و τ_{xy} به ترتیب سرعت و تنش برشی در عرض شیار هستند، ρ چگالی

سیال مگنتورئولوژیکال و $\frac{\partial p}{\partial x}$ گرادیان فشار جریان است. به دلیل بسیار زیاد بودن طول شیار نسبت به

عرض شیار عبور سیال ($L \gg d$) می‌توان به صورت کلی جریان را توسعه یافته فرض کرد و $\frac{\partial p}{\partial x}$ را ثابت و

تنها تابع زمان در نظر گرفت. با فرض تبعیت رفتار رئولوژیکال سیال از مدل پلاستیک بینگهام می‌توان

رابطه‌ی (۱-۳) را به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\Delta p}{L} = cte \quad 0 \leq y \leq d \quad (2-3)$$

در صورت مشخص بودن توزیع فشار به عنوان تابعی از زمان می‌توان پاسخ معادله‌ی بالا را

استخراج نمود، اما در اینجا پروفیل فشار نامعلوم است و به صورت غیرمستقیم با توجه به نرخ دبی حجمی

جریان که مقداری مشخص دارد تعیین می‌گردد. معمولاً برای سنجش خصوصیات میراگر مگنتورئولوژیکیال نظیر نمودار کار (نیرو- جابه‌جایی) و نمودار مشخصه (نیرو- سرعت) تحریک جابه‌جایی هارمونیک به آن اعمال می‌شود؛ در این پژوهش نیز بارگزاری سینوسی برای پیستون میراگر MR انتخاب شده است که تابع آن به صورت رابطه‌ی زیر است.

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (3-3)$$

در رابطه‌ی بالا $x(t)$ تحریک جابه‌جایی سینوسی است و A و ω به ترتیب دامنه و سرعت زاویه‌ای تحریک سینوسی است. با توجه به حل تحلیلی ارائه‌شده برای جریان سیال ویسکوز درون لوله تحت تحریک سینوسی [۶۲، ۶۳] با تکیه بر این حقیقت که با این تحریک گرادیان فشار نیز به صورت سینوسی نوسان خواهد کرد [۶۴] از این‌روی گرادیان فشار به صورت هارمونیک دارای اختلاف فاز با سرعت در نظر گرفته خواهد شد. گرادیان فشار بخش حقیقی قسمت سمت راست معادله‌ی (۳-۴) است که به صورت مختلط نوشته شده است.

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\Delta p(t)}{L} = \rho K e^{i(\omega t + \phi)} \quad (4-3)$$

در رابطه‌ی بالا ϕ اختلاف فاز گرادیان فشار با پروفیل سرعت و ω برابر با فرکانس تحریک دسته- پیستون است. K مقداری متغیر با زمان است. با جایگزینی گرادیان فشار در رابطه‌ی (۳-۲) می‌توان برای معادله‌ی دیفرانسیل پاره‌ای^۱ حاصل (معادله‌ی (۳-۵)) با توجه به شرایط اولیه و مرزی مربوطه جواب تحلیلی یافت.

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = K e^{i(\omega t + \phi)} \quad (5-3)$$

پاسخ معادله‌ی (۳-۵) به صورت مختلط در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که با فرکانسی برابر با فرکانس تحریک دسته پیستون نوسان می‌کند.

¹ Partial differential equation (PDE)

$$u(y, t) = V(y)e^{i\omega t} \quad (6-3)$$

با جایگذاری رابطه‌ی بالا در رابطه‌ی (5-3):

$$i\omega V - \nu V'' = Ke^{i\phi} \quad (7-3)$$

معادله‌ی (7-3) یک معادله‌ی دیفرانسیل معمولی (ODE) است که مجموع پاسخ عمومی و خصوصی آن به صورت زیر است:

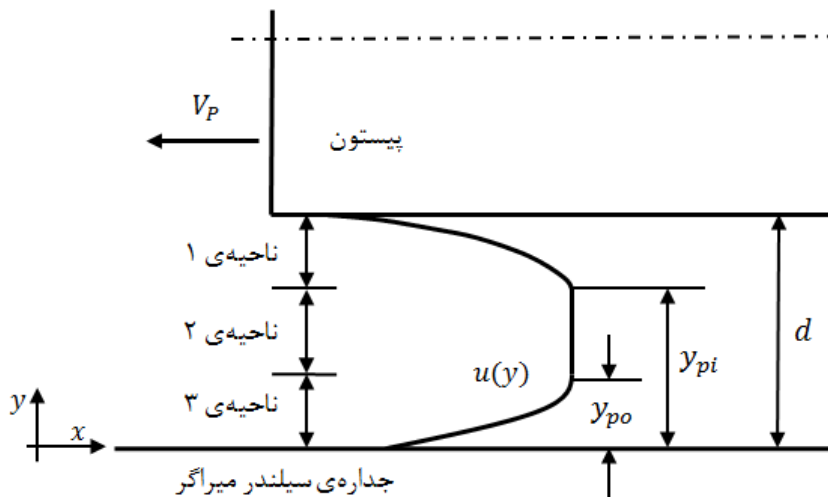
$$V(y) = C_1 \exp\left(\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} y\right) + C_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{\nu}} y\right) + \frac{K}{i\omega} e^{i\phi} \quad (8-3)$$

در این رابطه، C_1 و C_2 ثابتی هستند که با اعمال شرایط مرزی استخراج می‌شوند.

۳-۳ شرایط مرزی

شکل ۲-۳ پروفیل سرعت سیال مگنتورئولوژیکال درون شیار میراگر را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل فرض می‌شود که پیستون با سرعت V_p در خلاف جهت محور X حرکت می‌کند. پروفیل سرعت در راستای مثبت محور X ها ناشی از اختلاف فشار بین دوسر پیستون و در خلاف جهت محور به علت حرکت پیستون است. در این شکل d اندازه‌ی شیار، y_{pi} و y_{po} به ترتیب محل مرزهای داخلی و خارجی ناحیه‌ی پلاگ^۱ را مشخص می‌کند. سه ناحیه‌ی متمایز برای عبور سیال در کانال در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. ناحیه‌ی ۱ ($y_{pi} \leq y \leq d$) و ناحیه‌ی ۳ ($0 \leq y \leq y_{po}$)، نواحی پساتسلیم ($|\tau| > \tau_y$) هستند و ناحیه‌ی ۲ ($y_{po} \leq y \leq y_{pi}$) پیشاتسلیم ($|\tau| < \tau_y$) یا ناحیه‌ی پلاگ نامیده می‌شود. از آن‌جا که سه ناحیه-ی متفاوت برای جریان سیال موجود است، پروفیل سرعت در هر یک از نواحی باید جدا در نظر گرفته شود. یعنی رابطه‌ی (5-3) باید برای هر ناحیه با توجه به شرایط مرزی مربوط به آن حل شود.

¹ Plug region



شکل ۲-۳ شماتیک پروفیل سرعت MRF در میراگر مود ترکیبی

ناحیه ۱:

$$\begin{cases} u_1(d, t) = -V_p \\ \frac{\partial u_1}{\partial y}(y_{pi}, t) = 0 \end{cases} \quad (9-3)$$

ناحیه ۲:

$$u_2(y \leq y_{pi} \leq y_{po}, t) = u_1(y_{pi}, t) = u_3(y_{po}, t) \quad (10-3)$$

ناحیه ۳:

$$\begin{cases} u_3(0, t) = 0 \\ \frac{\partial u_3}{\partial y}(y_{po}, t) = 0 \end{cases} \quad (11-3)$$

با جایگذاری شرایط مرزی در رابطه‌ی (۸-۳)، ضرایب ثابت برای پروفیل سرعت هر ناحیه استخراج می‌شود

و در نهایت پروفیل سرعت جریان سیال MRF درون شیار تعیین می‌گردد.

۳-۴ رابطه‌ی پیوستگی

با استخراج کامل پروفیل سرعت جریان MRF درون شیار، می‌توان به کمک رابطه‌ی پیوستگی ارتباطی

بین سرعت و گرادیان فشار برقرار نمود. با حرکت پیستون دبی جریان انتقال یافته درون شیار برابر با

حجم کاهش یافته از حرکت پیستون در محفظه‌ی بالایی است. مقدار این دبی کمیتی معلوم است و برابر با قسمت حقیقی رابطه‌ی زیر است:

$$Q = U_0 e^{i\omega t} (A_p - A_r) = 2\pi R \int_0^d V(y) e^{i\omega t} dy \quad (۱۲-۳)$$

در این رابطه R شعاع میانگین شیار حلقوی میراگر است. A_p سطح پیستون، A_r مساحت دسته‌پیستون و U_0 دامنه‌ی سرعت تحریک دسته‌پیستون است. $e^{i\omega t}$ از دو طرف رابطه‌ی (۱۲-۳) حذف می‌شود و مجموع انتگرال قسمت حقیقی هرناحیه برابر با دبی حجمی جریان سیال درون شیار می‌گردد. حاصل قسمت موهومی نیز صفر است، به بیان دیگر:

$$U_0 (A_p - A_r) = 2\pi R \times \text{Real} \left(\int_{y_{pi}}^d V_1(y) dy + \int_{y_{po}}^{y_{pi}} V_2(y) dy + \int_0^{y_{po}} V_3(y) dy \right) \quad (۱۳-۳)$$

و

$$\text{Imaginary} \left(\int_{y_{pi}}^d V_1(y) dy + \int_{y_{po}}^{y_{pi}} V_2(y) dy + \int_0^{y_{po}} V_3(y) dy \right) = 0 \quad (۱۴-۳)$$

برای تعیین کامل گرادیان فشار جریان MRF درون میراگر ۴ مجهول وجود دارد $(K, \phi, y_{pi}$ و

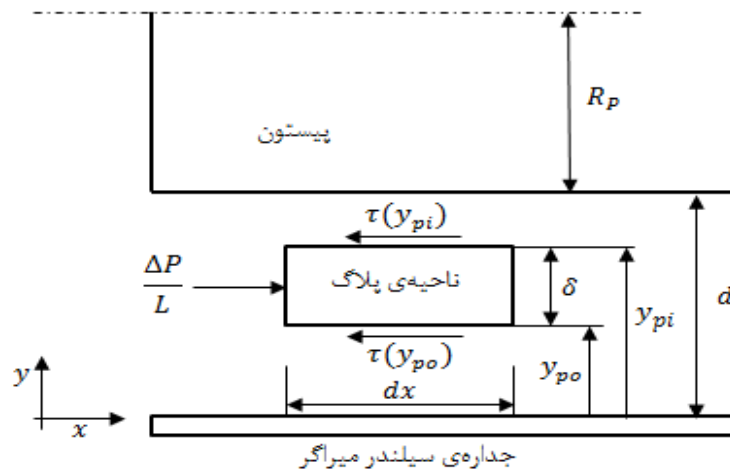
y_{po})، لذا باتوجه به روابط (۱۳-۳) و (۱۴-۳) دو معادله‌ی دیگر نیز مورد نیاز است. در هر لحظه توزیع تنش برشی سیال در عرض شیار ثابت است و اندازه‌ی تنش برشی در مرز تغییر نواحی پروفیل سرعت برابر با تنش تسلیم است. ناحیه‌ی جریان پلاگ به‌صورت یک‌تکه است و اختلاف تنش برش دو طرف آن برابر است با: $|\tau(y_{pi}) - \tau(y_{po})| = 2\tau_y$ ، طبق شکل ۳-۳ تعادل نیرویی برای ناحیه‌ی پلاگ نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} = m \vec{a} &\Rightarrow \frac{\Delta P}{L} \left(R_p + d - \frac{(y_{pi} + y_{po})}{2} \right) \times 2\pi\delta - \tau(y_{po}) \times 2\pi(R_p + d - y_{po}) \\ &\quad - \tau(y_{pi}) \times 2\pi(R_p + d - y_{pi}) \\ &= \rho \left(R_p + d - \frac{(y_{pi} + y_{po})}{2} \right) \times 2\pi\delta \frac{\partial u_2}{\partial t} \Rightarrow \\ \delta &= \frac{2\tau_y}{\left| \rho \frac{\partial u_2}{\partial t} - \frac{\Delta P}{L} \right|} \end{aligned} \quad (15-3)$$

همان‌طور که در شکل ۳-۳ مشخص شده است δ برابر است با $y_{pi} - y_{po}$ و شعاع پیستون میراگر همان‌طور که در شکل ۳-۳ مشخص شده است δ برابر است با $y_{pi} - y_{po}$ و شعاع پیستون میراگر است. ضخامت ناحیه‌ی پلاگ مطابق رابطه‌ی (۱۵-۳) به دست می‌آید. در نتیجه برای یافتن توزیع فشار تنها به یک معادله‌ی دیگر نیاز است. این معادله از شرط مرزی ناحیه‌ی دوم استخراج می‌شود:

$$u_1(y_{pi}, t) = u_3(y_{po}, t) \Rightarrow V_1(y_{pi}) = V_3(y_{po}) \quad (16-3)$$

روابط (۱۳-۳)، (۱۴-۳)، (۱۵-۳) و (۱۶-۳) چهار معادله‌ی مورد نیاز برای تعیین کامل پروفیل سرعت و گرادین فشار است. با تعیین کامل پروفیل سرعت جریان سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان مغناطیسی درون میراگر می‌توان نیروی میراگر را از روی توزیع فشار سیال استخراج نمود.



شکل ۳-۳ همان ناحیه‌ی پلاگ در جریان سیال MR در شیار میراگر

۳-۵ نیروی میراگر

نیروی میرایی دمپر مگنتورئولوژیکال می‌تواند به صورت پیوسته با شدت میدان مغناطیسی کنترل شود. با صرف نظر از تراکم پذیری MRF و اصطکاک، نیروی میرایی دمپر مگنتورئولوژیکال می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$F_d = P_1 A_p - P_2 (A_p - A_r) + \tau_w A_w \quad (17-3)$$

در رابطه‌ی بالا A_p سطح پیستون، A_r مساحت دسته پیستون است. مطابق شکل ۳-۱ شماتیک میراگر مود ترکیبی P_1 فشار مطلق محفظه‌ی (۱) و P_2 فشار مطلق محفظه‌ی (۲)، τ_w تنش برشی وارد شده ناشی از حرکت سیال لزج بر دیواره‌ی پیستون میراگر روی سطح A_w است و F_d نیروی میراگر است. فشار مطلق سیال در محفظه‌ی ۱ و ۲ نسبت به فشار گاز درون انباره (P_A) و فشار دو سر پیستون طبق رابطه‌ی زیر استخراج می‌شود:

$$P_1 = P_A + \Delta P_{A-1} \cong P_A \quad (18-3)$$

$$P_2 = P_A - \Delta P \quad (19-3)$$

در این روابط ΔP_{A-1} و ΔP به ترتیب افت فشار MRF از محفظه‌ی پایینی (۱) تا انباره و افت فشار درون شیار عبور سیال است. با جایگذاری فشار مطلق دو محفظه از روابط بالا، نیروی میرایی دمپر مگنتورئولوژیکال به گونه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$F_d = P_A A_r + \Delta P (A_p - A_r) + \tau_w A_w \quad (20-3)$$

تغییر حجم گاز درون انباره‌ی میراگر برابر با اختلاف حجم سیال جابه‌جا شده در دوسر پیستون میراگر است.

$$\Delta V_g = A_p X_p - (A_p - A_r) X_p = A_r X_p \quad (21-3)$$

X_p جابه‌جایی پیستون میراگر و ΔV_g تغییر حجم گاز انباره ناشی از حرکت پیستون است. با استفاده از مدول بالک^۱ سیال (β) در دمای ثابت، می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت:

$$\beta = \left(\frac{d\rho}{dP}\right)_T = \frac{\Delta\rho}{\Delta P} \quad (22-3)$$

با در نظر گرفتن تغییر حجم گاز داخل انباره ناشی از حرکت پیستون و تغییرات چگالی، می‌توان فشار گاز را در هر لحظه استخراج نمود. P_0 و V_0 به ترتیب حجم و فشار اولیه‌ی گاز درون انباره است.

$$P_A = \frac{\rho}{\beta} \left(\frac{A_r X_p}{V_0 - A_r X_p} \right) + P_0 \quad (23-3)$$

در نهایت می‌توان نیروی میراگر مگنتورئولوژیکال را از رابطه‌ی زیر استخراج نمود

$$F_d = \left(\frac{\rho}{\beta} \left(\frac{A_r X_p}{V_0 - A_r X_p} \right) + P_0 \right) A_r + \Delta P (A_p - A_r) + \tau_w A_w \quad (24-3)$$

برای یافتن نیروی میرایی میراگر مود ترکیبی در حالت ناپایا باید اختلاف فشار دو سر پیستون در هر لحظه ($\Delta P(t)$) را استخراج و طبق رابطه‌ی (۳۲-۳) در همان لحظه نیروی میرایی دمپر را یافت. نیروی میراگر مگنتورئولوژیکال را می‌توان به صورت مجموع دو مؤلفه‌ی ویسکوز و MR نوشت. اگر اختلاف فشار بین دو طرف پیستون دمپر تعیین شود علاوه بر مؤلفه‌ی MR مؤلفه‌ی ویسکوز نیز می‌تواند به عنوان تابعی از هندسه‌ی میراگر نشان داده شود [۵۸].

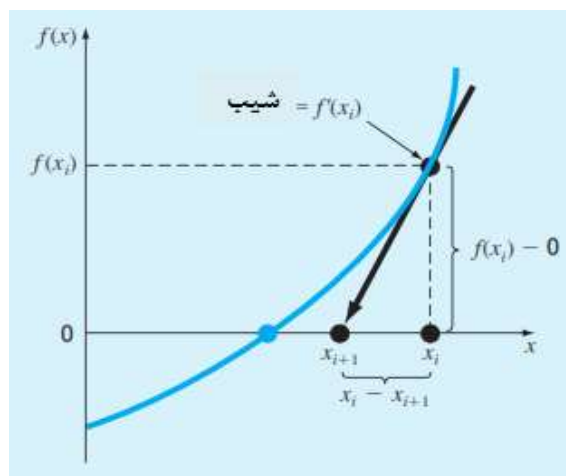
¹ Bulk module

۳-۶ حل عددی

دستگاه معادلات غیرخطی حاصل از حل تحلیلی معادلات مومنتوم سیال درون شیار در حالت ناپایا به-کمک روش نیوتون-رافسون^۱ حل شده است. در این روش محل برخورد خط مماس بر منحنی در طول اولیه با محور متغیر (محور افقی) ریشه جدید خواهد بود. این فرآیند تا رسیدن به اختلاف مشخصی از مقدار متغیر در حالت جدید و قدیم ادامه می‌یابد. شکل ۳-۴ به صورت گرافیکی این فرآیند را نشان می‌دهد.

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + (x_{i+1} - x_i)f'(x_i) \quad (۳-۲۵)$$

در رابطه‌ی بالا x_i حدس اولیه برای ریشه، x_{i+1} نقطه‌ای است که خط مماس بر آن محور افقی را قطع می‌کند. رابطه‌ی (۳-۲۵) شکل تک معادله‌ی روش نیوتون-رافسون را نشان می‌دهد. شکل چند معادله‌ای آن (رابطه‌ی (۳-۲۶)) نیز به روشی مشابه به دست می‌آید [۶۵].



شکل ۳-۴ نمایش روش نیوتون-رافسون به صورت گرافیکی [۶۵]

¹ Newton-Raphson

$$\{x_{i+1}\} = \{x_i\} - [J]^{-1}\{f\} \quad (26-3)$$

در این رابطه $[J]$ ماتریس ژاکوبین، $\{x_i\}$ و $\{x_{i+1}\}$ به ترتیب شکل برداری مقادیر اولیه و نهایی ریشه است و $\{f\}$ مقادیر تابع به‌ازای ریشه‌های قدیمی است. هریک از این بردارها و ماتریس‌ها در زیر معرفی شده است.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{1,i}}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_{2,i}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{2,i}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{2,i}}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{n,i}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{n,i}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{n,i}}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (27-3)$$

نماد i نشان‌گر سعی i ام برای یافتن ریشه‌ی $(i+1)$ است و اعداد ۱، ۲ و n نیز نشان‌دهنده‌ی تعداد معادلات در دستگاه است. به‌عنوان مثال در دستگاه سه معادله $n=3$ است.

$$\{x_i\}^T = [x_{1,i} \quad x_{2,i} \quad \dots \quad x_{n,i}] \quad (28-3)$$

و

$$\{x_{i+1}\}^T = [x_{1,i+1} \quad x_{2,i+1} \quad \dots \quad x_{n,i+1}] \quad (29-3)$$

و

$$\{f\}^T = [f_{1,i} \quad f_{2,i} \quad \dots \quad f_{n,i}] \quad (30-3)$$

دستگاه‌های معادلات غیرخطی حاصل از حل تحلیلی معادلات ناویر استوکس به کمک کد نیوتون رافسون نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب حل شد.

۳-۱۷ اثر دما

جریان ورودی به سیم‌پیچ‌های میراگر و همچنین لزجت و مقاومت سیال در مقابل حرکت پیستون سبب تولید گرما و افزایش دمای MRF داخل میراگر می‌گردد. با مدل‌سازی افزایش دما درون میراگر مگنتورئولوژیکال، بهتر می‌توان افزایش دما و تأثیر آن بر عمل‌کرد میراگر را بررسی نمود. مطابق تحقیقات

انجام گرفته توسط گردانی نژاد و دوگروز^۱ [۵۸] برای میراگر مگنتورئولوژیکال از تحلیل سیستم متمرکز^۲ استفاده می‌شود، زیرا که عدد بایوت^۳ در این نمونه‌ها کمتر از ۰/۱ است. اگر مقدار عدد بایوت کمتر از ۰/۱ باشد اختلاف دمای سیستم کمتر از ۰/۵٪ است و می‌توان کلیه اجزای سیستم را یک‌دما فرض کرد [۶۶] برای یک سیستم بسته معادله انرژی را به فرم زیر می‌توان نوشت [۵۸]:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \quad (31-3)$$

در این رابطه \dot{Q} نرخ انتقال حرارت به سیستم، \dot{W} نرخ کار انجام‌شده توسط سیستم و $\frac{dU}{dt}$ نرخ تغییرات انرژی درونی سیستم است. با فرض ثابت بودن مقادیر ظرفیت گرمایی سیستم در دمای اتاق سمت راست معادله (۳۱-۳) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_n m C_p \frac{dT}{dt} \quad (32-3)$$

در این رابطه $\sum_n m C_p$ ظرفیت گرمایی کل سیستم است. جمله اول سمت چپ رابطه (۳۱-۳) نرخ تبادل حرارتی سیستم با محیط است. این جمله ترکیبی از گرمای تولیدشده ناشی از سیم-پیچ‌ها (گرمای تولیدشده در سیستم) و گرمای انتقال یافته به محیط توسط فرآیند همرفت در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{Q} = RI^2 - hA_s(T(t) - T_a) \quad (33-3)$$

در رابطه بالا A_s سطح کل میراگر در تماس با محیط، T دمای میراگر در هر لحظه، T_a دمای محیط، h ضریب همرفت سطح میراگر با محیط، R مقاومت کل و I جریان ورودی به سیم‌پیچ‌ها است. جمله دوم سمت چپ معادله (۳۱-۳) نشان‌دهنده نرخ کار انجام‌شده توسط سیستم است. که در اینجا کار ناشی از حرکت پیستون است:

¹ Dogrouz

² Lumped system

³ Biot number (Bi)

$$\dot{W} = -F\dot{x}(t)\text{sgn}(\dot{x}(t)) \quad (34-3)$$

در این رابطه F نیروی خروجی میراگر و \dot{x} سرعت پیستون است. علامت منفی نشان گر کار انجام شده توسط محیط بر روی سیستم (میراگر) است. برای ورودی سینوسی سرعت دسته پیستون به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{x}(t) = X\omega\cos(\omega t) \quad (35-3)$$

با جایگذاری، رابطه ی (33-3) به صورت زیر بازنویسی شده است:

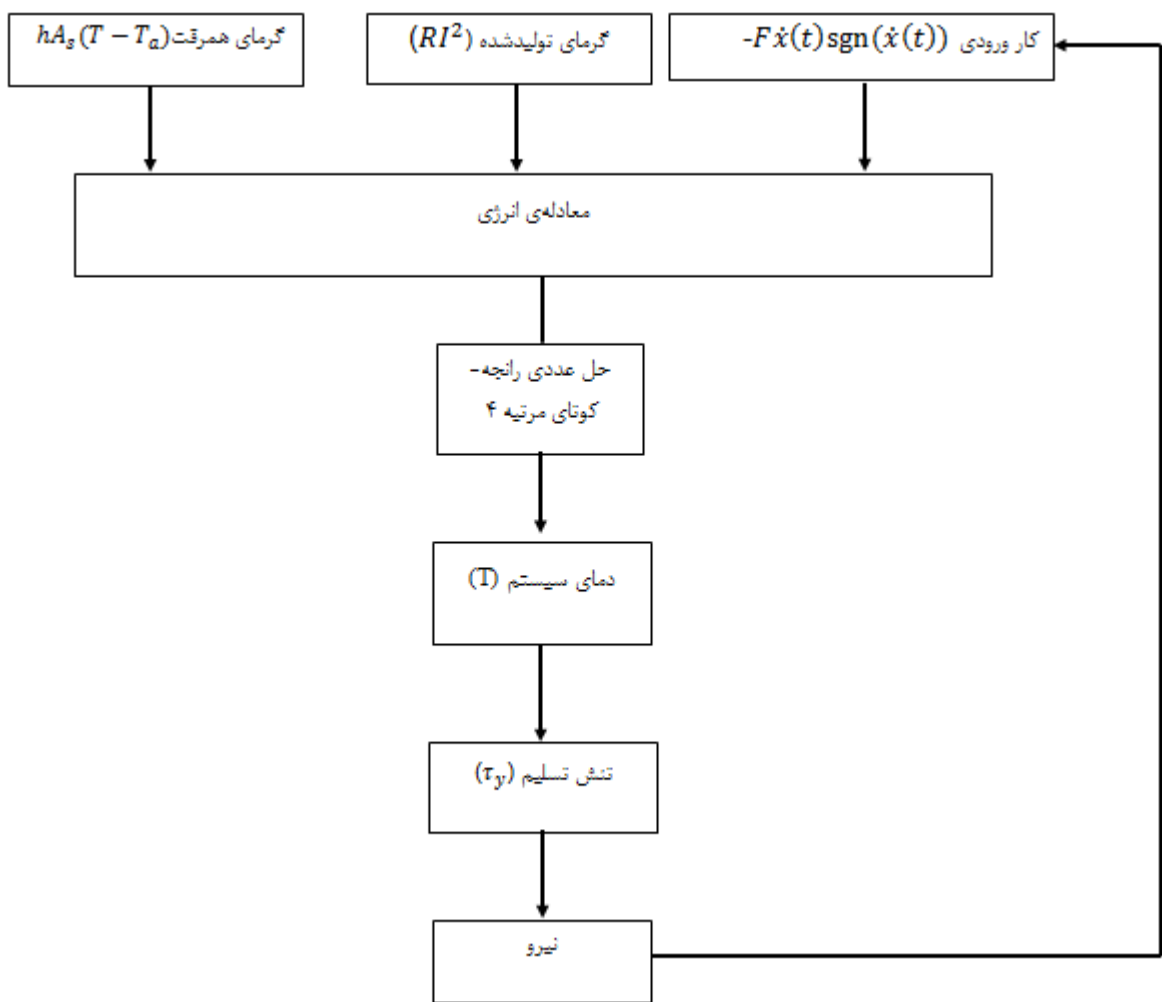
$$\frac{dT}{dt} = \frac{FX\omega \cos(\omega t) \text{sgn}(\dot{x}(t)) + RI^2 - hA_s(T(t) - T_a)}{\sum mc_p} \quad (36-3)$$

معادله ی بالا یک معادله ی دیفرانسیل معمولی با ضرایب غیرخطی است. این غیرخطی مربوط به جمله ی نیرو است، چراکه خود نیز تابعی غیرخطی از دما است. در این پژوهش، معادله ی (36-3) با استفاده از متد رانجه¹ مرتبه 4 حل شده است. همچنین نیرو نیز از مدل سازی غیرپایا جایگزین F در این معادله شده است. پس از استخراج T (دما) با توجه به مدل ارائه شده برای سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده (معادله ی (1-6)) از روی آن تنش تسلیم و نیروی جدید محاسبه می شود و پروسه به صورت تکراری ادامه می یابد. روش محاسباتی برای استخراج نیرو وابسته به دما و همچنین دمای میراگر در هر لحظه به صورت دیاگرام شکل 3-5 است. در این تحلیل دمای محیط برابر 25°C در نظر گرفته شده است. عمل کرد میراگر مگنتورئولوژیکال در طول زمان با توجه به افزایش دمای میراگر بررسی و نتایج آن در فصل 5 بیان می گردد.

¹ Runge-Cutta

۳-۸ جمع بندی:

تفاوت مدل سازی دینامیکی و شبه استاتیکی میراگر در نظر گرفتن جمله ی اینرسی سیال است. به منظور تحلیل دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیکال در مود ترکیبی، ابتدا معادلات حاکم بر میراگر نوشته و پس از ساده سازی تحت تحریک هارمونیک و اعمال شرایط مرزی، در حالت غیرپایا به صورت تحلیلی حل شد. با کمک روش عددی نیوتون رافسون توزیع فشار دو سر پیستون میراگر در هر لحظه استخراج و مقدار نیروی میراگر در هر لحظه از پروفیل فشار تعیین گردید. به منظور مقایسه با تحلیل شبه استاتیکی، مشابه همین روند بدون در نظر گرفتن جمله ی اینرسی برای معادلات حاکم انجام شد. با نوشتن معادلات انرژی و به-کمک روش رانجه- کوتای مرتبه ۴ توزیع دمای درون میراگر بر حسب دما استخراج شد و با استفاده از مدل ارائه شده برای سیال مگنتورئولوژیکال در فصل قبل نیروی میراگر با توجه به دما در هر لحظه اصلاح گردید.



شکل ۵-۳ دیاگرام نشان‌دهنده روش محاسبه‌ی دمای میراگر در هر لحظه

فصل چهارم:

کنترل نیمه فعال در سیستم تعلیق خودرو با
استفاده از میراگر مگنتورئولوژیکال

۴-۱ پیش‌گفتار

در این فصل مدل کنترل گیره- فضایی برای سیستم تعلیق نیمه‌فعال با توجه به مدل دینامیکی شبه- استاتیکی میراگر مگنتورئولوژیکال ارائه شد. شبیه‌سازی سیستم تعلیق خودرو با مدل یک‌چهارم برای حالت‌های غیرفعال و نیمه‌فعال انجام شد. دو نوع پروفیل جاده پرکاربرد در حوزه زمان به‌عنوان ورودی به شبیه‌سازی وارد گردید.

۴-۲ سیستم‌های کنترل ارتعاشات

برپایه‌ی مقدار توان خارجی مورد نیاز سیستم، سیستم‌های کنترل ارتعاشات به سه دسته‌ی غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال تقسیم‌بندی می‌شوند. واحدهای کنترل ارتعاشات غیرفعال متشکل از یک عضو ارتجاعی (فنر) و یک مستهلک‌کننده‌ی انرژی (میراگر) برای جذب انرژی هستند. سیستم‌های کنترل ارتعاشات غیرفعال به‌خصوص جاذب‌های ارتعاشی بعضاً به‌دلیل تغییر پارامترهای سیستم و یا شرایط تحریک عمل‌کردشان کاهش می‌یابد. به‌منظور جبران این محدودیت‌ها از سیستم‌های کنترل فعال ارتعاشات استفاده شد. این سیستم‌ها از یک نیروی فعال اضافی که نسبت به اغتشاشات و منبع ورودی کنترل می‌شود بهره می‌برد. سیستم‌های فعال عموماً عمل‌کرد کنترل‌شده‌ی بالایی را در محدوده‌ی وسیعی از فرکانس‌ها دارا هستند اما مشکل اصلی آن‌ها نیاز به توان خارجی بالا، ابزار مورد نیاز پیچیده نظیر سنسورها، سروولوها و الگوریتم‌های کنترل پیچیده است. سیستم‌های نیمه‌فعال ترکیبی از دو حالت پیش‌گفته است به این ترتیب که الگوریتم کنترل تنظیم‌شونده را با یک سیستم غیرفعال قابل تنظیم جمع می‌کند که مولد نیرو جایش را به اجزای متغیر تنظیم‌شونده می‌دهد. در نتیجه سیستم‌های تعلیق نیمه‌فعال می‌توانند عمل‌کردی مناسب بدون نیاز به منبع انرژی بالا و اجزای گران‌قیمت داشته باشند. در کنترل نیمه‌فعال سیستم تعلیق،

قوانین کنترلی زیادی نظیر منطق گیره-فضایی^۱، گیره-زمین^۲، کنترل هایبرید^۳، کنترل منطقی فازی و کنترل شبکه عصبی استفاده شده است. در این پژوهش از کنترلر گیره-فضایی استفاده شده است.

۴-۲-۱ منطق گیره-فضایی

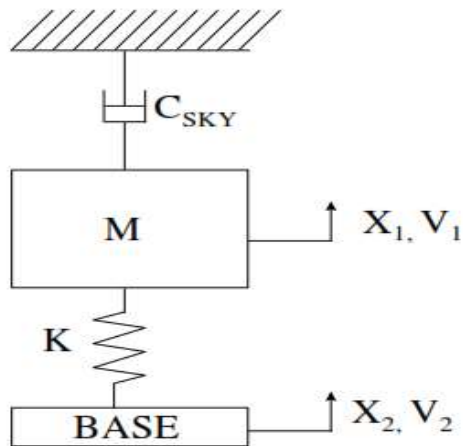
بیش از سه دهه پیش برای اولین بار ایده‌ی استفاده از کنترلر گیره-فضایی را برای کاربرد در کنترل سیستم تعلیق وسایل نقلیه پیشنهاد شد. همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود میراگر به‌صورت کاملاً انتزاعی به یک مرجع اینرسیال در فضا متصل شده است. در این شکل C_{sky} ضریب میرایی گیره-فضایی ایده‌آل است. در این شکل پیکربندی میراگر گیره-فضایی رانشان داده شده است. جرم فنربندی-شده (m_1) و جرم بدون فنربندی (m_2) در این شکل مشخص شده است. میراگر گیره-فضایی به یک مرجع اینرسیال در فضا متصل است [۶۷]. ایده‌ی این روش از این حقیقت نشئت گرفته است که در سیستم تعلیق غیرفعال با افزایش میرایی آن، دامنه‌ی ارتعاشات و انتقال پذیری در محدوده‌ی فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد ولی با میرایی بزرگ، در فرکانس‌های تحریک بالاتر از فرکانس طبیعی ایزولاسیون ارتعاشات کاهش می‌یابد. شکل ۴-۲ این چالش بین کنترل رزونانس و ایزولاسیون ارتعاشات در فرکانس‌های بالا را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش ضریب استهلاک سیستم (γ) انتقال‌پذیری ارتعاشات در محدوده‌ی فرکانس طبیعی سیستم کاهش و در فرکانس‌های بالاتر از آن افزایش می‌یابد.

یک روش برای حذف تناقض بین کنترل رزونانس و ایزولاسیون فرکانس بالا انتقال میراگر از پایه به بالا است. برای سیستم تعلیق غیر فعال مشخص شده در شکل ۴-۱ با افزایش C_{sky} انتقال پذیری در محدوده‌ی فرکانس طبیعی و در فرکانس‌های تحریک بالاتر کاهش می‌یابد. شکل ۴-۳ این مفهوم را به-خوبی نشان می‌دهد [۶۸].

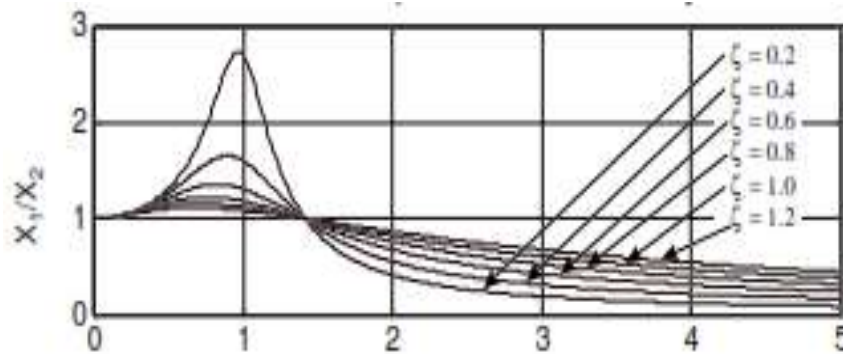
¹ Skyhook control

² Groundhook control

³ Hybrid control

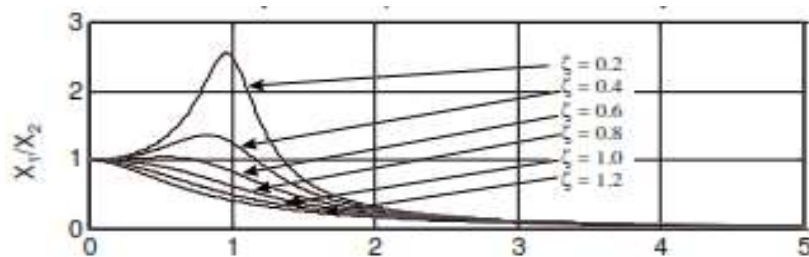


شکل ۴-۱ پیکربندی میراگر گیره-فضایی [۶۸]



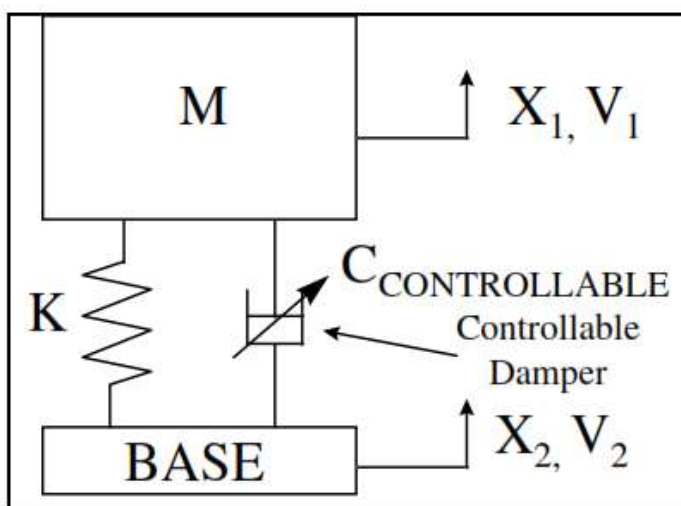
شکل ۴-۲ انتقال پذیری سیستم تعلیق غیرفعال [۶۸]

مطالعات زیادی اثربخشی کنترل گیره-فضایی را بررسی نموده‌اند، اکثر این مطالعات نشان می‌دهند که کنترل گیره-فضایی استراتژی کنترل مطلوب به علت جداسازی ارتعاشات جرم معلق از تحریک پایه است.



شکل ۴-۳ انتقال پذیری سیستم تعلیق با پیکربندی گیره-فضایی [۶۸]

یک روش برای ایجاد نیروی میرایی گیره- فضایی حذف سیستم تعلیق غیرفعال و جایگزینی آن با یک مولد نیروی فعال از قبیل یک عملگر هیدرولیکی است. اما این گونه سیستم‌ها نسبتاً پیچیده هستند و مصرف انرژی بالایی دارند به همین دلیل از میراگرهای نیمه‌فعال نیز برای تولید نیروی گیره- فضایی استفاده شد. شکل ۴-۴ یک مدل یک درجه آزادی نیمه‌فعال را نشان می‌دهد که ضریب میرایی آن ($C_{\text{controllable}}$) در طول زمان تغییر می‌کند.



شکل ۴-۴ سیستم تعلیق نیمه‌فعال [۶۸]

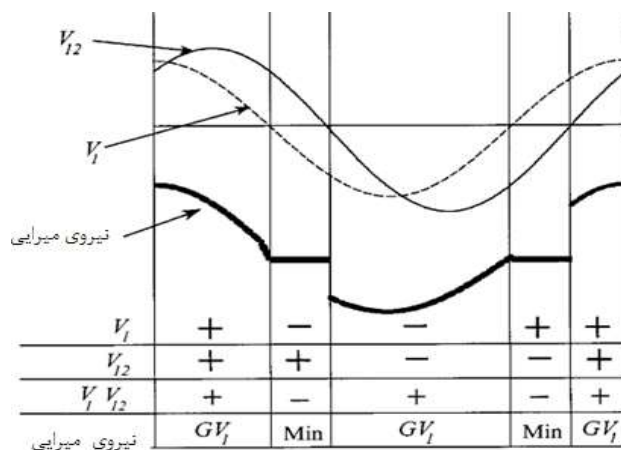
کنترل گیره- فضایی که در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است، بیان می‌کند زمانی که سرعت مطلق جرم فنربندی شده^۱ و سرعت نسبی سیستم تعلیق هم‌علامت باشند، میراگر در مقابل حرکت جرم فنربندی شده مقاومت می‌کند و نیروی میرایی وابسته به سرعت جرم فنربندی شده مطلوب است. در غیر این صورت نیروی میرایی در مقابل حرکت جرم فنربندی شده مقاومت نمی‌کند و باید مقداری کمینه داشته باشد. این مفهوم مانند میراگر غیرفعال است که بین جرم فنربندی شده و یک فضای مجازی گرفته شده است، از این روی این مدل گیره- فضایی نامیده می‌شود. رابطه‌ی (۴-۱) معادله‌ی حاکم بر کنترل گیره- فضایی را برای

¹ Sprung mass

سیستم تعلیق نیمه فعال بیان می کند، مطالعات بسیاری کنترل گیره- فضایی را برای سیستم تعلیق نیمه- فعال دارای میراگر مگنتورئولوژیک پیاده سازی کرده اند [۶۷-۷۲].

$$\begin{cases} V_1 V_{12} > 0 \\ V_1 V_{12} < 0 \end{cases} \quad \begin{cases} F_{sh} = G_s V_1 \\ F_{sh} = 0 \end{cases} \quad (1-4)$$

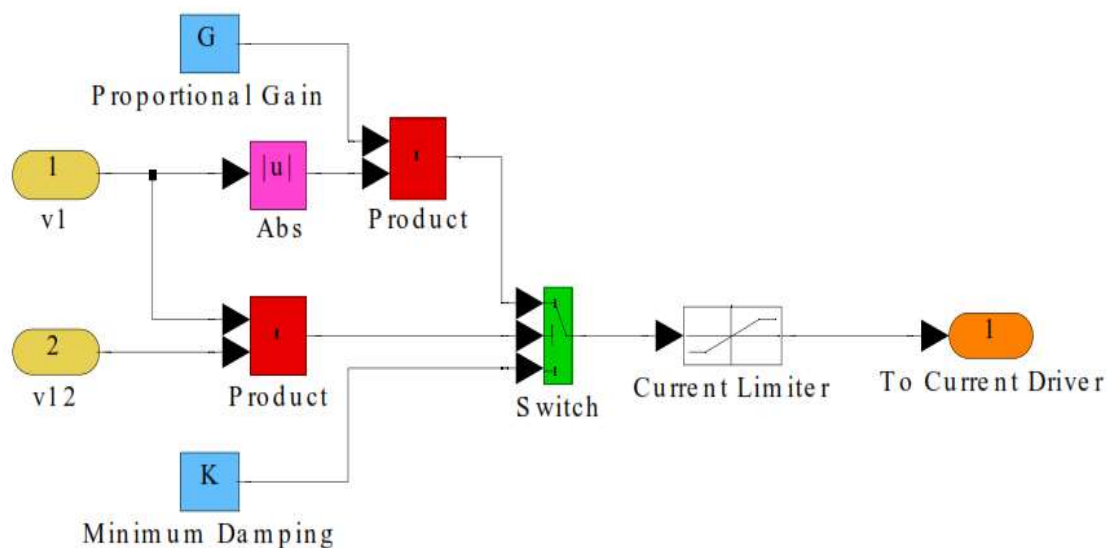
در رابطه‌ی بالا V_1 سرعت مطلق جرم فنربندی شده، V_{12} سرعت نسبی سیستم تعلیق و G_s ضریب بهره^۱ و F_{sh} نیروی میرایی گیره- فضایی است. برای میراگر مگنتورئولوژیکال نیروی صفر ناممکن است لذا در این حالت نیروی میرایی باید کمینه شود یا به بیان دیگر نیروی حالت بدون میدان برای F_{sh} ، در حالتی که $V_1 V_{12} < 0$ است، در رابطه‌ی بالا قرار داده شود. زمانی که $V_1 V_{12} > 0$ نیروی بیشینه متناسب با سرعت جرم فنربندی شده برای F_{sh} قرار داده می شود. مقدار بهره‌ی قانون کنترل را می توان از نتایج تست آزمایشگاهی و از کمینه کردن جابه جایی عمودی سیستم تعلیق به دست آورد [۶۸]. مدل کنترلر با استفاده از منطق گیره- فضایی به کمک سیمولینک متلب شبیه سازی شده است. بلوک دیاگرام شکل ۴-۶ همان قانون کنترل گیره- فضایی را نشان می دهد؛ چنانچه حاصل ضرب V_1 و V_{12} بزرگتر یا برابر صفر باشد، نیروی میرایی متناسب با V_1 است، در غیر این صورت نیروی میرایی کمینه است.



شکل ۴-۵ نمایش نیروی میرایی گیره- فضایی [۶۹]

¹ Gain

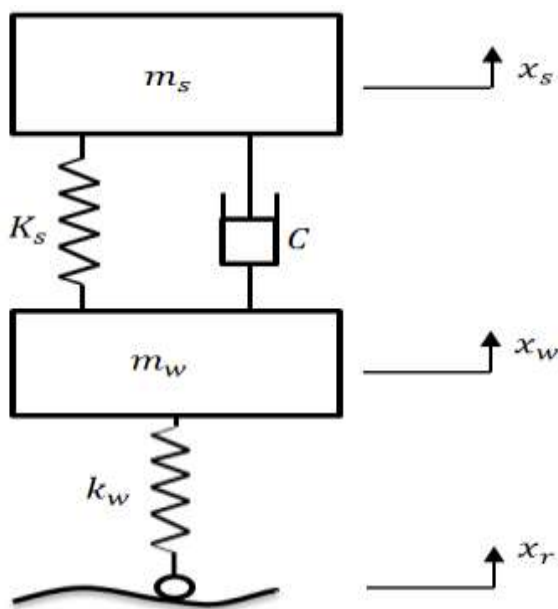
پارامترهایی که در فرآیند کنترل بررسی می‌شود جابه‌جایی جرم اصلی (جرم فنربندی شده) و شتاب وارده به سرنشینان خودرو است. هدف کمینه شدن این پارامترها است.



شکل ۴-۶ بلوک دیاگرام منطق کنترل گیره-فضایی [۶۷]

۳-۴ شبیه‌سازی خودرو

شکل ۴-۷ مدل دو درجه آزادی یک‌چهارم خودرو در نظر گرفته شده برای فرآیند شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، این مدل ترکیبی از جرم با فنربندی (m_s) و جرم بدون فنربندی (m_w)، فنر معادل سختی تایر (k_w)، فنر معادل سختی سیستم تعلیق (k_s) و دمپر معادل میرایی سیستم تعلیق (C) است. x_s و x_w جابه‌جایی به ترتیب جاده، مجموع چرخ و تایر و بدنه‌ی خودرو است. معادلات حرکت مدل یک‌چهارم از خودرو به صورت روابط (۴-۲) و (۴-۳) نوشته می‌شود.



شکل ۷-۴ مدل دو درجه آزادی یک چهارم خودرو

$$m_s \ddot{x}_s = -k_s(x_s - x_w) - C(\dot{x}_s - \dot{x}_w) \quad (۲-۴)$$

$$m_w \ddot{x}_w = k_s(x_s - x_w) + C(\dot{x}_s - \dot{x}_w) - k_w(x_w - x_r) \quad (۳-۴)$$

در شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل مدل‌های ساده‌تری نیز برای شبیه‌سازی رفتار میراگر مگنتورئولوژیکال در سیستم تعلیق خودرو می‌تواند به کار رود. مدل دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیکال در فصل قبلی استخراج شد. می‌توان به صورت مستقیم نیروی میراگر را با استفاده از مدل دینامیکی در معادلات (۲-۴) و (۳-۴) قرار داد و آن‌ها را بازنویسی نمود.

$$\ddot{x}_s = \frac{-k_s(x_s - x_w)}{m_s} - \frac{F}{m_s} \text{sign}(\dot{x}_s - \dot{x}_w) \quad (۴-۴)$$

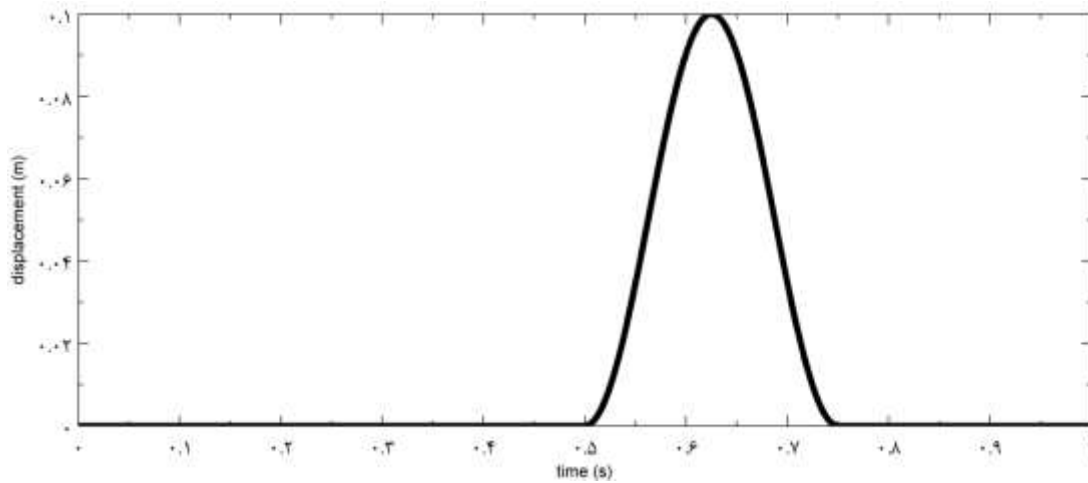
$$\ddot{x}_w = \frac{k_s(x_s - x_w)}{m_w} + \frac{F}{m_w} \text{sign}(\dot{x}_s - \dot{x}_w) - \frac{k_w(x_w - x_r)}{m_w} \quad (۵-۴)$$

با توجه به مدل دینامیکی پیشنهادی، مدل سیمولینک^۱ برای شبیه‌سازی رفتار خودرو ارائه گردید. دو نوع اغتشاش جاده به‌عنوان ورودی مدل در بسیاری از تحقیقات به‌کاررفته است. در پروفیل جاده‌ی ۱ فرض می‌شود تنها دارای یک دست‌انداز مطابق معادله‌ی زیر است [۷۱]:

$$r(t) = \begin{cases} \frac{a(1 - \cos(8\pi t))}{2} & 0.5 \leq t \leq 0.75 \\ 0 & \text{در سایر زمان‌ها} \end{cases} \quad (۶-۴)$$

دامنه‌ی پروفیل ۱ برابر ۰/۱ m و فرکانس آن ۸ HZ است. شکل ۴-۸ این پروفیل را نشان می‌دهد.

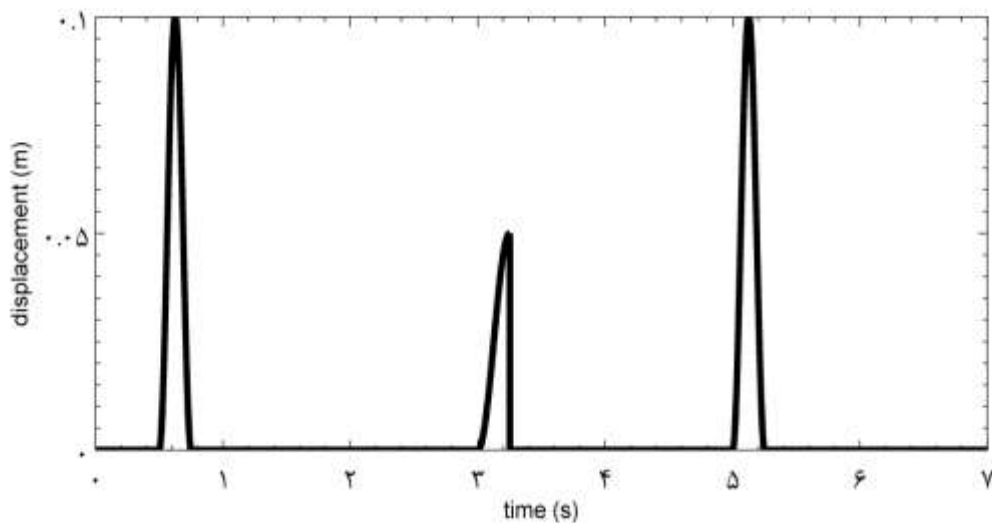
فرض می‌شود پروفیل جاده نوع ۲ دارای سه دست‌انداز پشت سرهم با فرکانس‌های ۸HZ، ۴HZ و ۸HZ مطابق معادله‌ی (۷-۴) است. شکل ۴-۹ این پروفیل سرعت را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸ پروفیل جاده نوع ۱ [۷۱]

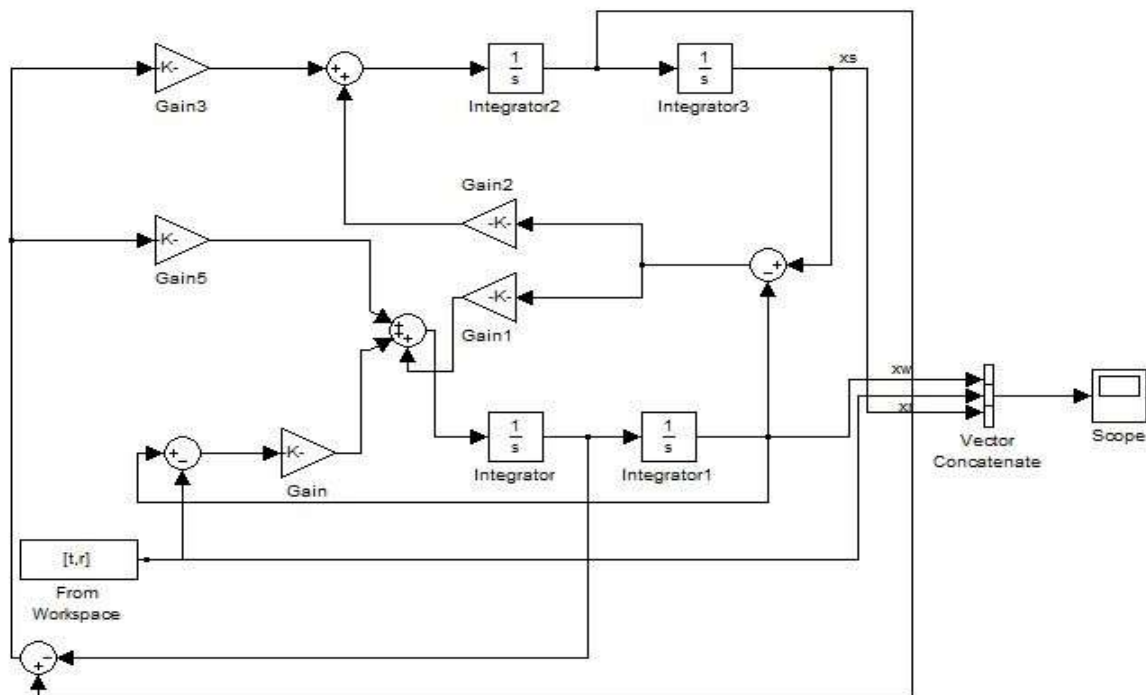
¹ SIMULINK

$$r(t) = \begin{cases} \frac{a(1 - \cos(8\pi t))}{2} & 0.5 \leq t \leq 0.75 \\ \frac{a(1 - \cos(4\pi t))}{4} & 3 \leq t \leq 3.25 \\ \frac{a(1 - \cos(8\pi t))}{2} & 5 \leq t \leq 5.25 \\ 0 & \text{در سایر زمان‌ها} \end{cases} \quad (7-4)$$



شکل ۹-۴ پروفیل جاده نوع ۲ [۷۱]

به منظور مقایسه‌ی سیستم تعلیق غیرفعال و نیمه‌فعال برای مدل یک‌چهارم خودرو مدل بلوک-دیاگرام در نرم‌افزار سیمولینک متلب برای هر دو حالت ایجاد شد. مدل سیمولینک تعلیق غیرفعال در شکل ۱۰-۴ مشخص شده است.



شکل ۴-۱۰ شبیه‌سازی سیستم تعلیق غیرفعال مدل یک‌چهارم خودرو

۴-۴ جمع‌بندی

مدل کنترل اصلاح‌شده‌ی گیره- فضایی برای سیستم تعلیق نیمه‌فعال با توجه به مدل شبه‌استاتیکی میراگر مگنتورئولوژیکال ارائه شد. کنترلر گیره- فضایی اصلاح‌شده به‌گونه‌ای است که از بین حالت بدون جریان و ۶ جریان ورودی مختلف، جریانی را برای ورود به میراگر انتخاب می‌کند که کمترین شتاب را برای بدنه‌ی خودرو حاصل کند. شبیه‌سازی سیستم تعلیق خودرو با مدل یک‌چهارم برای حالت‌های غیرفعال و نیمه‌فعال با دو نوع پروفیل جاده پرکاربرد در حوزه زمان به‌عنوان ورودی انجام و مقایسه شد.

فصل پنجم:

تحليل نتايج

۱-۶ پیش‌گفتار

در این فصل نتایج پژوهش بیان می‌گردد. در ابتدا نتایج حاصل از ساخت نمونه‌های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال بیان گردید. ارزیابی مقایسه‌ای بین نتایج تست پایداری و انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری میزان تأثیر عوامل مختلف بر پایداری MRF را مشخص نمود و از بین نمونه‌ها مناسب‌ترین نمونه از نظر پایداری و لزجت بدون میدان معرفی گردید. آزمایش‌های رئومتری صورت‌گرفته بر روی نمونه‌ی بهینه میزان پاسخ سیال به میدان مغناطیسی در دماهای مختلف را نشان داد. با توجه به نتایج آزمون رئومتری MRF مدلی وابسته به دما و میدان مغناطیسی برای تنش تسلیم سیال از برازش با داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمد.

نتایج مدل‌سازی دینامیکی با در نظر گرفتن جمله‌ی اینرسی در معادلات ناویر استوکس جریان سیال درون میراگر مگنتورئولوژیکال در مود ترکیبی تحت تحریک هارمونیک و به کمک روش عددی نیوتون رافسون به‌دست آمد. توزیع فشار دو سر پیستون میراگر در هر لحظه استخراج و مقدار نیروی میراگر در هر لحظه با توجه به آن تعیین گردید. پروفیل‌های سرعت سیال که در در دامنه‌ها، فرکانس‌ها و جریان‌های مختلف استخراج شده است اثر در نظر گرفتن اینرسی سیال را نشان می‌دهد. با به‌دست آوردن دمای سیال درون میراگر در حین عمل کرد آن، نیروی میرایی دمپر با توجه به آن اصلاح شد.

در پایان نتایج حاصل از پیاده‌سازی کنترلر گیره- فضایی به میراگر مگنتورئولوژیکال مود ترکیبی در سیستم تعلیق و مقایسه‌ی آن با میراگر غیر فعال بیان شد. این میراگر بر روی مدل یک‌چهارم خودرو پیاده شد.

۶-۲ نتایج ساخت و مدل سازی سیال مگنتورئولوژیکال

همان طور که در فصل ۲ بیان شد، نمونه های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال با مقادیر مختلف غلظت پودر آهن، دو نوع سیال حامل و روش اختلاط ساخته شد. نتایج پایداری هریک و سایر نتایج آزمایشات و تحلیل های صورت گرفته روی این نتایج در این فصل بیان شده است.

۶-۲-۱ پایداری سیال مگنتورئولوژیکال

همان طور که از مقایسه ی منحنی های شکل ۶-۱ استنباط می شود کمترین ته نشینی در محدوده ی زمانی ۱۷۰ ساعت متعلق به دو نمونه با سیال حامل روغن سیلیکون و درصد وزنی آهن ۶۰٪ و ۷۰٪ است. می توان پس از مدت یک هفته نتیجه ی مقایسه ی پایداری نمونه های مختلف سیال را بر حسب بیشترین مقدار پایداری به صورت زیر نوشت:

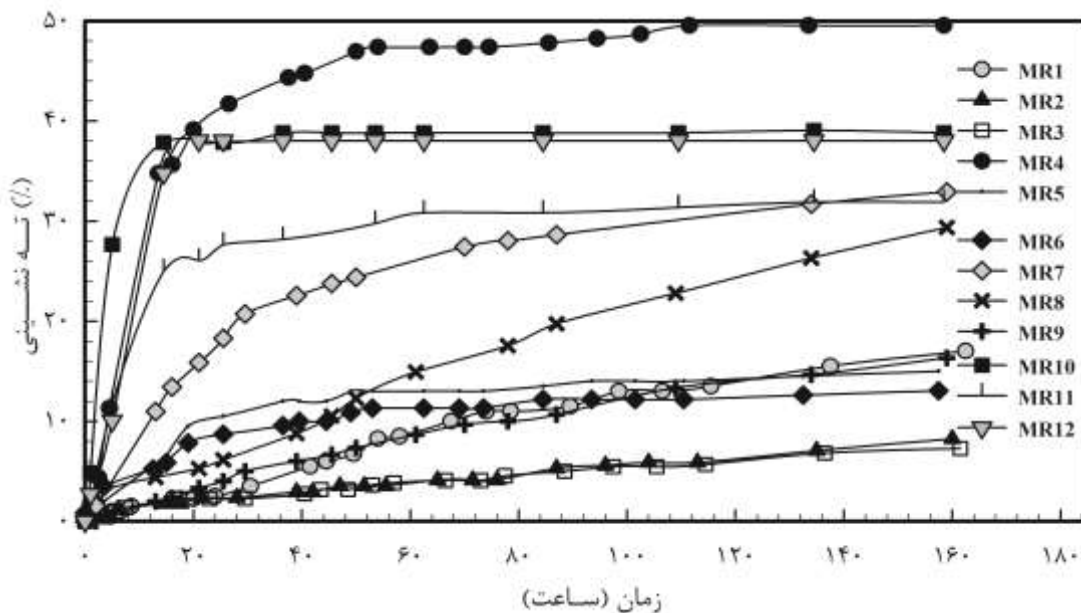
MR3>MR2>MR6>MR5>MR9>MR1>MR8>MR11>MR7>MR12>MR10>MR4

با توجه به شکل ۶-۱ رفتار بعضی از نمونه ها به گونه ای است که در ابتدای بازه ی زمانی ۷ روزه دارای سرعت ته نشینی بسیار زیاد هستند و به مرور با کاسته شدن از سرعت ته نشینی در انتهای این بازه ی زمانی به تعادل می رسند. پس از این مدت، درصد پایداری تغییر قابل ملاحظه ای نمی کند؛ اما بعضی از نمونه ها مانند MR7 و MR8 پس از بازه ی ۷ روز نیز نرخ ته نشینی بالایی را نشان می دهند، در نتیجه برای بررسی پایداری آن ها باید بازه ی زمانی بزرگتری را اختصاص داد. در تست ته نشینی بیشترین پایداری در مقابل ته نشینی مربوط به سیال مگنتورئولوژیکال با نسبت ترکیبی ۷۰٪ وزنی آهن با سیال پایه ی روغن سیلیکون و اختلاط با همزن مکانیکی (MR3) است. در این نمونه درصد ته نشینی پس از گذشت هفت روز معادل ۷٪ است، اما MR2 با اندکی ته نشینی بیشتر در ۱۶۸ ساعت (۸/۲٪) سرعت ته نشینی تقریباً برابری را در انتهای بازه ی زمانی آزمایش نشان می دهد. این امر می تواند نشان گر این باشد که در سیال

مگنتورئولوژیکیال با سیال حاملی که دارای لزجت بالا است، افزودن مقدار زیاد ذرات پراکنده‌شونده تأثیر محسوسی بر پایداری سیال مگنتورئولوژیکیال ندارد.

۶-۲-۱۲ اثر اختلاط، نوع سیال و غلظت فاز پراکنده‌شونده در پایداری سیال

شکل ۶-۱ نتایج پایداری نمونه‌های مختلف ساخته‌شده‌ی سیال مگنتورئولوژیکیال را در بازه‌ی زمانی ۱۶۸ ساعت نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این شکل و بررسی تهنشینی سیالات مگنتورئولوژیکیال مختلف، ملاحظه می‌شود افزایش غلظت ماده‌ی مغناطیس‌پذیر عموماً موجب افزایش پایداری می‌گردد. به بیان دیگر با افزایش نسبت وزنی پودر آهن سیال، پایداری MRF افزایش می‌یابد این افزایش پایداری با افزایش لزجت سیال حامل کمتر می‌شود، یعنی در نمونه با سیال پایه روغن سیلیکون، افزایش غلظت ذرات مغناطیسی تأثیر کمتری در پایداری سیال مگنتورئولوژیکیال به نسبت سیال پایه روغن هیدرولیک دارد. اختلاط سوسپانسیون با کمک همزن مکانیکی در صورت یکسان بودن سایر شرایط، پایداری بهتری را نسبت به آسیاب با گلوله‌ی فلزی نشان می‌دهد به‌علاوه زمان و هزینه‌ی انجام آن نیز بسیار کمتر است. در این روش، پراکندن ذرات آهن احتمالاً به دلیل انرژی بیشتری که در همزن مکانیکی منتقل می‌شود، بهتر رخ می‌دهد و سیال همگن‌تری را به‌دست می‌دهد. مقایسه‌ی نمونه‌ی بهینه MRF ساخته‌شده با نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکیال ساخته‌شده در سال‌های اخیر [۷، ۱۵، ۳۲ و ۳۵] پایداری بهتری را نشان می‌دهد.

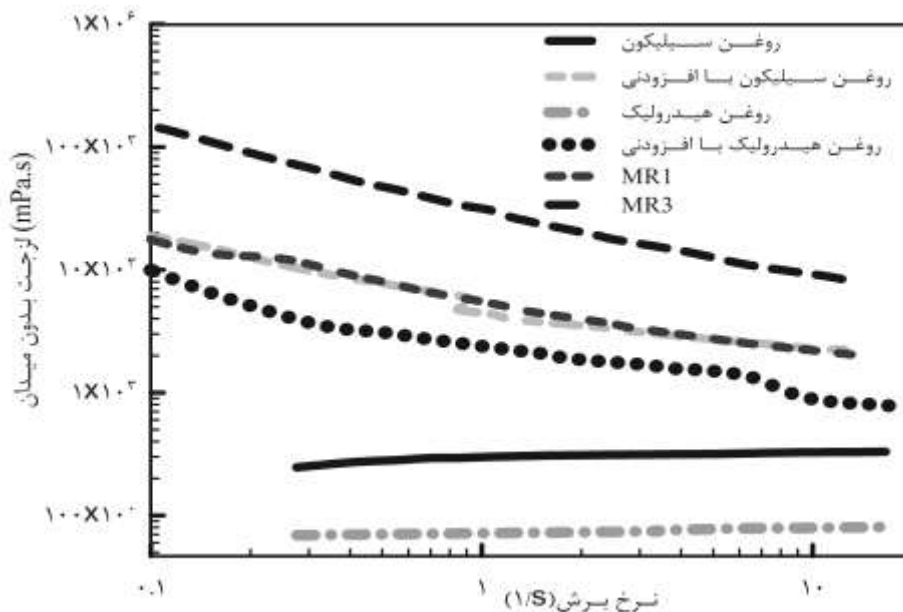


شکل ۶-۱ نسبت ته‌نشینی نمونه‌های سیال مگنتورئولوژیکال برحسب زمان (ساعت) در دمای ۲۵ °C

۳-۲-۶ لزجت حالت بدون میدان

عموماً با افزایش لزجت سیال مگنتورئولوژیکال، پایداری آن نیز افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال نمونه‌های MR4 و MR10 (سیال حامل روغن هیدرولیک و ۵۰٪ وزنی پودر آهن) دارای کمترین لزجت و بیشترین ته‌نشینی یا کمترین پایداری است. از عوامل مؤثر بر لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در نبود میدان مغناطیسی می‌توان به نسبت ترکیبی فاز پراکنده‌شونده، لزجت سیال حامل و نوع و مقدار افزودنی اشاره کرد. همان‌طور که در شکل ۶-۲ مشخص است در غیاب میدان مغناطیسی، لزجت ظاهری سیال مگنتورئولوژیکال با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد که به این خاصیت سیالات غیرنیوتونی، رقیق‌شوندگی برشی می‌گویند. این رفتار برای سیالات مگنتورئولوژیکال مناسب است چون در فرکانس‌های بالا گرمای تولیدشده ناشی از اصطکاک سیال میراگر افزایش می‌یابد و هرچه لزجت سیال کمتر باشد این گرمای تولیدی کمتر می‌شود. همچنین سیالات حامل نیز تقریباً رفتاری نیوتونی از خود نشان می‌دهند و با تغییر نرخ برش لزجتشان تقریباً ثابت باقی می‌ماند، اما با افزودن اسید استتاریک لزجت این سیالات به‌شدت بالا

می‌رود و تشکیل یک حالت ژله مانند می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که حتی لزجت محلول روغن سیلیکون و اسید استئاریک تقریباً برابر با MR1 می‌شود. رفتار این محلول اسید استئاریک در سیال حامل نیز رقیق‌شونده برشی است. لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در حالت بدون میدان باید به‌گونه‌ای باشد که در صورت خرابی قسمت فعال بتواند مقدار نیروی میرایی کافی را منتقل کند. در این حالت (بدون وجود میدان مغناطیسی) نیروی میراگر تنها ناشی از نیروی ویسکوز سیال است، اما با اعمال میدان مغناطیسی، مؤلفه‌ی دیگر نیرو ناشی از اثر مگنتورئولوژیکال نیز بر مؤلفه‌ی ویسکوز اضافه می‌گردد که بر آن غالب است، در نتیجه لزجت بدون میدان زیاد، اثر مگنتورئولوژیکال را محدود می‌کند که امری نامطلوب است. در این مطالعه کاربرد سیال مگنتورئولوژیکال در میراگرهای جذب ارتعاشات خودرو در نظر گرفته شده است. با افزایش مقدار اسید استئاریک اضافه‌شده به سیال هم پایداری و هم لزجت سیال مگنتورئولوژیکال افزایش می‌یابد. نتایج سایر تحقیقات نشان می‌دهد با افزایش اسید استئاریک به بیش از ۳٪ وزنی، لزجت ظاهری بدون افزایش قابل ملاحظه‌ی پایداری، به‌صورت نامطلوبی بالا می‌رود [۴]. همچنین اثر لزجت سیال پایه بر روی لزجت سیال مگنتورئولوژیکال نیز در شکل ۶-۲ مشخص است. به‌طوری‌که ویسکوزیته‌ی روغن سیلیکون انتخاب‌شده حدود ۷ برابر روغن هیدرولیک است، اما سیال مگنتورئولوژیکال با سیال پایه‌ی مختلف و یکسان بودن سایر شرایط، تفاوت کمتری را در لزجت بدون میدان نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل (شکل ۶-۲) مشاهده می‌شود با افزایش نسبت پودر آهن کربونیل، لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در حالت بدون میدان تا ۶ برابر نیز (آهن کربونیل ۷۰٪ نسبت به ۵۰٪ در نرخ برش‌های پایین) افزایش می‌یابد. تأثیر این تفاوت با افزایش نرخ برش، بر لزجت میدان صفر کاهش می‌یابد.

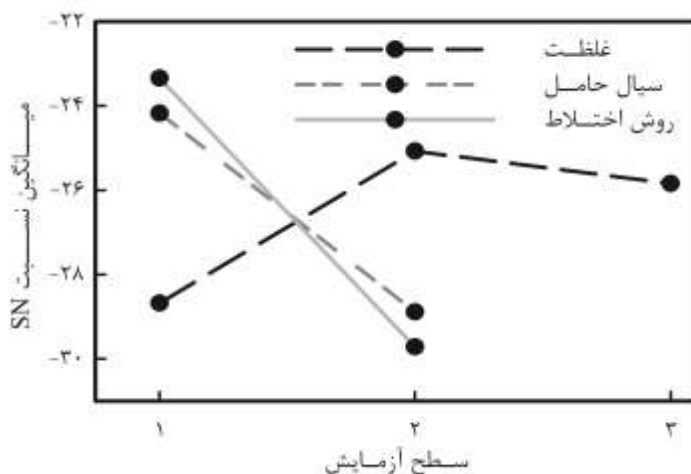


شکل ۶-۲ لزجت بدون میدان سیالات مگنتورئولوژیکیال و سیالات حامل بر حسب نرخ برش

۴-۲-۶ اهمیت‌سنجی تأثیر پارامترها بر روی پایداری MRF

با توجه به تحلیل انجام‌گرفته روی نتایج آزمایش پایداری توسط نرم‌افزار مینی‌تب، خروجی نمودار نسبت سیگنال به نویز (شکل ۶-۳) نشان‌دهنده‌ی بهترین ترکیب پارامترها و همچنین تأثیر هر یک از آن‌ها بر پایداری MRF است. هرچه مقدار SNR بالاتر باشد به مقدار مطلوب نزدیک‌تر است. بر این مبنا این نمودار بهترین نمونه از لحاظ پایداری را نمونه‌ای که با روش همزن مکانیکی و با سیال حامل روغن سیلیکون و غلظت ۶۰٪ پودر آهن تهیه شده است، معرفی می‌کند (MR2). چون در این نمودار تمامی فاکتورها به یک مقیاس باهم سنجیده شده است، می‌توان میزان اهمیت مستقل هر کدام از متغیرها بر روی پارامتر خروجی که همان تهنشینی است را نیز نشان داد. با توجه به این شکل می‌توان گفت انتخاب نحوه‌ی اختلاط بیشترین تأثیر را روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکیال دارد و پس‌از آن نوع سیال حامل در درجه دوم اهمیت قرار دارد و تأثیر غلظت دارای اهمیت کمتری است؛ البته تغییرات غلظت پودر آهن کربونیل از ۵۰٪ به ۶۰٪ نسبت به تغییر ۶۰٪ به ۷۰٪ تأثیر بیشتری بر روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکیال دارد.

باتوجه به خروجی الگوریتم تاگوچی نمونه‌ی بهینه از نظر پایداری (MR2) انتخاب و سایر مطالعات و آزمایشات مربوط به رفتار رئولوژیکال با این نمونه سیال انجام شده است.



شکل ۳-۶ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش‌های طراحی شده، به کمک الگوریتم تاگوچی

۵-۲-۶ اثر میدان مغناطیسی و دما بر رفتار رئولوژیکال MRF

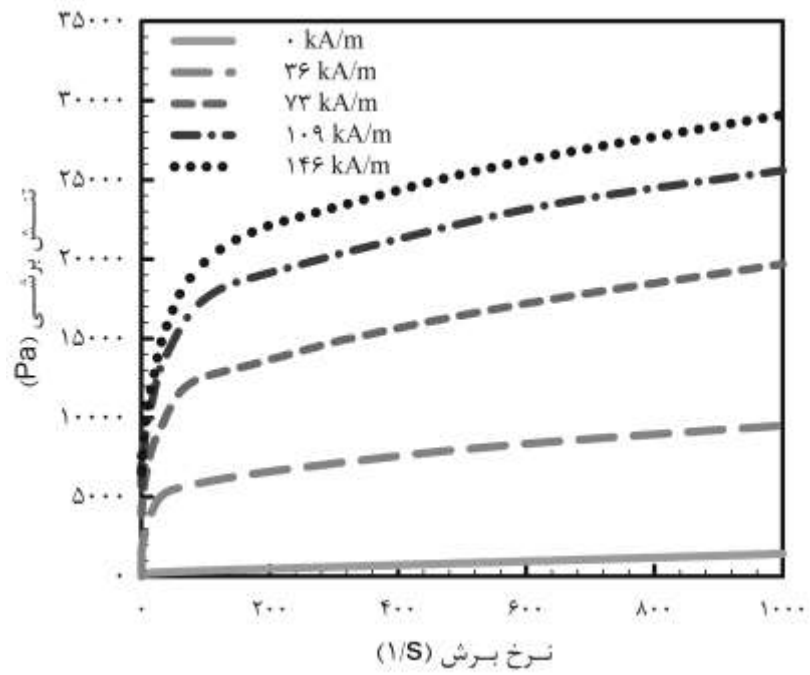
تنش‌های تسلیم سیال با برآزش مدل هرشل-باکلی بر منحنی‌های حاصل از تست‌های رئومتری در میدان‌های و دماهای مختلف استخراج می‌شود. جدول ۱-۶ متغیرهای مدل هرشل-باکلی (معادله‌ی (۴-۱)) را نشان می‌دهد. این ضرایب به کمک جعبه‌ابزار برآزش منحنی^۱ نرم‌افزار متلب به دست آمده است. نتایج رئومتری روی مناسب‌ترین نمونه از نظر پایداری و لزجت بدون میدان (نمونه بهینه که MR2 با غلظت ۶۰٪ آهن کربونیل و سیال حامل روغن سیلیکون، اختلاط با همزن مکانیکی است) در یک دمای ثابت نشان می‌دهد که اعمال میدان مغناطیسی تنش برشی و لزجت سیال مگنتورئولوژیکال را افزایش می‌دهد، به طوری که هرچه میدان مغناطیسی- تا رسیدن به حد اشباع- زیاد شود تنش برشی و لزجت به نحو چشم‌گیری افزایش می‌یابد، این امر ویژگی اصلی اثر مگنتورئولوژیکال است.

^۱ Curve fitting toolbox

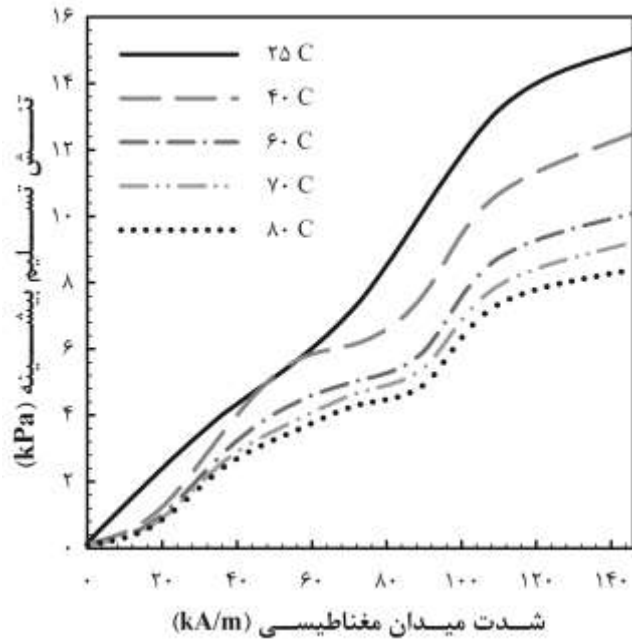
جدول ۱-۶ ضرایب برازش شده‌ی مدل هرشل - باکلی برای MR2

۸۰			۷۰			۶۰			۴۰			دما °C
k	m	τ_y	k	m	τ_y	k	m	τ_y	k	m	τ_y	ضرایب میدان
۴/۱	۰/۶۵	۹۶	۴/۱	۰/۶۷	۱۰۱	۴/۳	۰/۶۸	۱۱۲	۲/۴	۰/۸۱	۱۳۲/۱	۰
۴۰۳	۰/۲۶	۷۰۰	۲۸۳	۰/۳۲	۷۵۰	۳۱۳	۰/۳	۸۳۰	۳۸۲	۰/۲۶	۱۰۴۰	۱۸
۶۵۸	۰/۲۶	۲۴۰۰	۴۸۳	۰/۳۱	۲۵۶۸	۵۷۲	۰/۳	۲۸۳۳	۲۳۴	۰/۴۳	۳۴۵۰	۳۶
۵۹۹	۰/۳۵	۳۵۰۰	۶۴۴	۰/۳۴	۳۸۰۰	۵۷۴	۰/۳۶	۴۵۴۰	۲۱۶/۵	۰/۵	۵۶۰۰	۵۵
۱۲۸۰	۰/۲۸	۴۳۳۰	۱۶۰۸	۰/۲۵	۴۷۰۰	۱۲۱۴	۰/۳	۵۰۶۰	۵۴۸/۵	۰/۴۱	۶۲۰۰	۷۳
۵۶۳۳	۰/۴۳	۵۰۱۰	۱۰۲۶	۰/۳۵	۵۵۳۰	۱۳۸۶	۰/۳۱	۶۰۵۰	۷۹۱	۰/۳۷	۷۸۰۰	۹۱
۴۵۹	۰/۴۶	۷۳۰۰	۳۶۴	۰/۵	۷۸۶۰	۵۵۵	۰/۴۴	۸۶۸۰	۳۷۳	۰/۴۶	۱۰۶۰۰	۱۰۹
۳۰۶	۰/۵۳	۸۴۰۰	۴۱۵	۰/۴۸	۹۲۲۰	۳۳۹	۰/۵۲	۱۰۱۰۰	۱۵۷	۰/۵۸	۱۲۵۰۰	۱۴۶

شکل ۴-۶ تغییرات تنش برشی MR2 را برحسب نرخ برش در میدان‌های مغناطیسی مختلف نشان می‌دهد، آزمایش نشان داد افزایش شدت میدان به بیش از ۱۴۶ kA/m تأثیر قابل ذکری بر تنش تسلیم و تنش برشی سیال نداشت. تنش تسلیم بیشینه حدود ۱۵ kPa در دمای ۲۵ °C به‌ازای میدان ۱۴۶ kA/m به‌دست آمد که مقداری قابل قبول است. شکل ۵-۶ تغییرات تنش تسلیم با تغییر میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. تغییرات شدید تنش تسلیم با تغییر میدان مغناطیسی به‌خوبی در این شکل مشاهده می‌شود. همچنین می‌توان دریافت که وابستگی تنش تسلیم بیشینه به میدان مغناطیسی بیشتر از دما است. از روی ضرایب مربوط به متغیر m رابطه‌ی (۴-۱) که در جدول ۱-۶ آمده است، می‌توان دریافت که MRF ساخته‌شده خاصیت رقیق‌شوندگی برشی دارد چرا که تمامی مقادیر متغیر m کوچکتر از ۱ است.

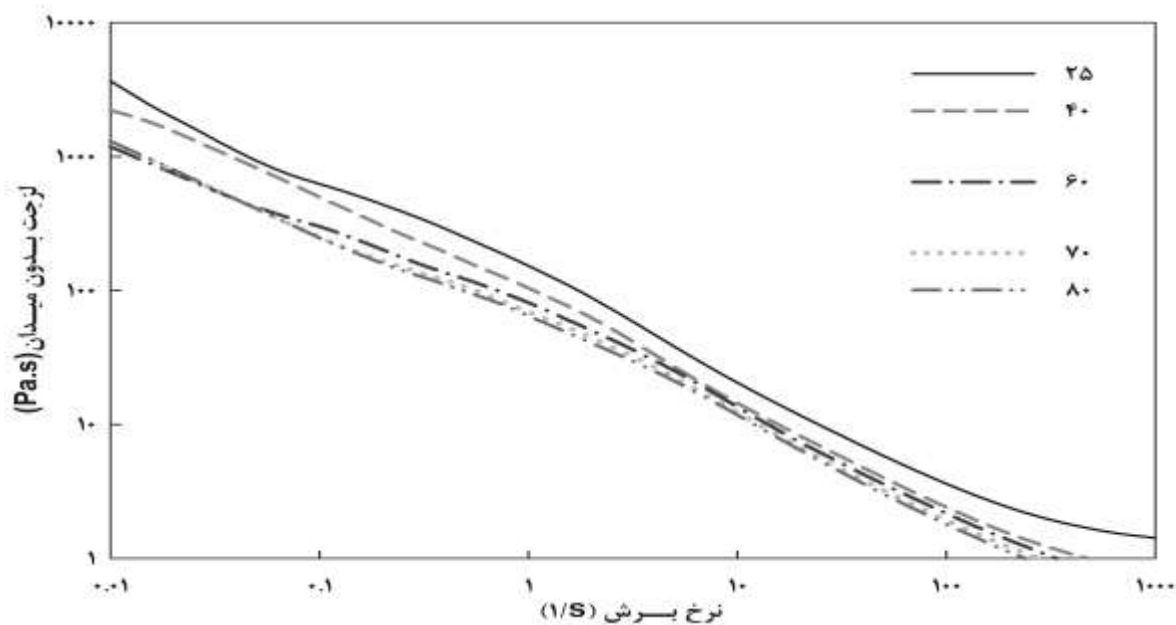


شکل ۴-۶ تنش برشی برحسب نرخ برش در میدان‌های مغناطیسی مختلف برای MR2 در دمای ۲۵ °C



شکل ۵-۶ تنش برشی تسلیم پیشینه برحسب میدان مغناطیسی در دما مختلف

شکل ۶-۶ تغییرات لزجت بدون میدان MRF را برحسب نرخ برش نشان می‌دهد. مطابق این شکل اثر دما بر لزجت بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال نشان می‌دهد که در نرخ دما و برش‌های پایین، با افزایش دما لزجت بدون میدان به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که در نرخ برش‌ها و به خصوص دماهای بالا این تغییر کمتر می‌شود به گونه‌ای که می‌توان گفت در دماهای بالاتر از $70^{\circ}C$ لزجت سیال مگنتورئولوژیکال بدون میدان تنها تابع نرخ برش است و به دما بستگی ندارد.



شکل ۶-۶ لزجت بدون میدان سیال MR2 برحسب نرخ برش در دماهای مختلف

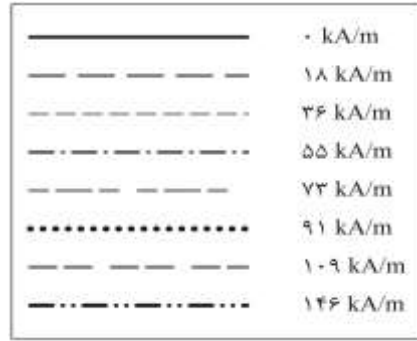
تغییرات تنش برشی برحسب نرخ برش در دماهای مختلف در شکل ۶-۴ و شکل ۶-۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد تنش برشی سیال به شدت وابسته به میدان مغناطیسی، نرخ برش و دما است. هرچه میدان مغناطیسی افزایش یابد تأثیر آن بر تنش برشی کمتر می‌شود تا اینکه سیال به حالت اشباع مغناطیسی برسد. از آن به بعد افزایش میدان مغناطیسی تأثیری در تنش برشی ندارد و تنها به نرخ برش و دما وابسته است. همچنین با کاهش دما تنش برشی در میدان ثابت کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۶-۸ بهتر می‌توان این مطلب را استنباط نمود. این شکل نشان می‌دهد که افزایش دما به خصوص در

دماهای پایین سبب کاهش تنش برشی در میدان مغناطیسی ثابت می‌گردد. شکل ۶-۹ تغییرات تنش تسلیم سیال نسبت به دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶-۸ و شکل ۶-۹ مشاهده می‌شود این تغییر تنش میزانی قابل ملاحظه است و باید در مدل‌سازی رفتار رئولوژیکال سیال لحاظ شود. به‌عنوان مثال با توجه به شکل ۶-۹ در میدان ثابت ۱۴۶ kA/m تنش تسلیم سیال MR2 از ۱۵۰۷۰ Pa در دمای ۲۵°C به ۸۴۰۰ Pa در دمای ۸۰°C می‌رسد. از روی این شکل می‌توان استنباط نمود که تغییر تنش تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال در یک میدان مغناطیسی ثابت نسبت به دما به‌صورت نمایی است. به بیان دیگر با افزایش دما در میدان مغناطیسی ثابت، تنش تسلیم بیشینه‌ی سیال به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد و با افزایش دما تأثیر دما بر تنش تسلیم کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل ۶-۵ می‌توان با تقریب برای سیال نمونه‌ی مورد نظر مقدار H_c را ۷۳ kA/m در نظر گرفت. با برازش رابطه‌ی (۲-۴) با تنش‌های تسلیم استخراج‌شده، توسط جعبه‌ابزار برازش منحنی نرم‌افزار متلب مدل زیر برای ارتباط تنش تسلیم MR2 با میدان مغناطیسی و دما به‌دست می‌آید:

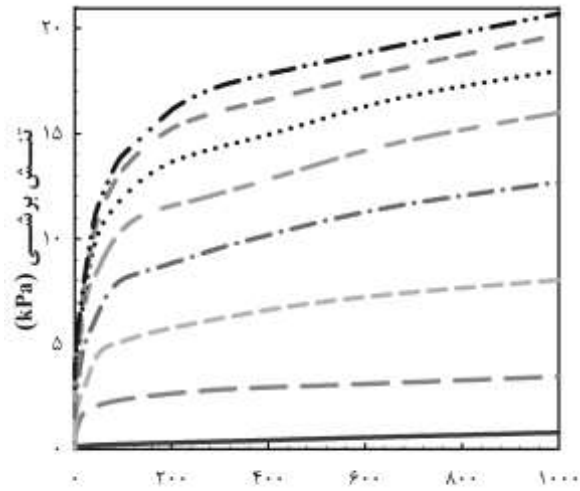
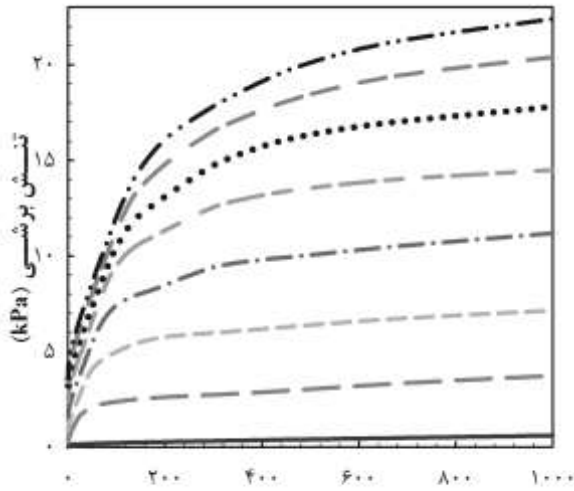
$$\tau_y = 28 \times 10^4 \left(\frac{H}{H_c} \right)^{0.71} \tanh\left(\sqrt{\frac{H}{H_c}} \right) \exp(-0.011T) \quad (1-6)$$

در این رابطه τ_y به‌دست آمده برحسب Pa است. ضرایب به‌گونه‌ای توسط نرم‌افزار ارائه شده است که دارای کمترین انحراف از نتایج آزمایشگاهی باشد. جدول ۶-۳ کیفیت برازش و میزان خطا از نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

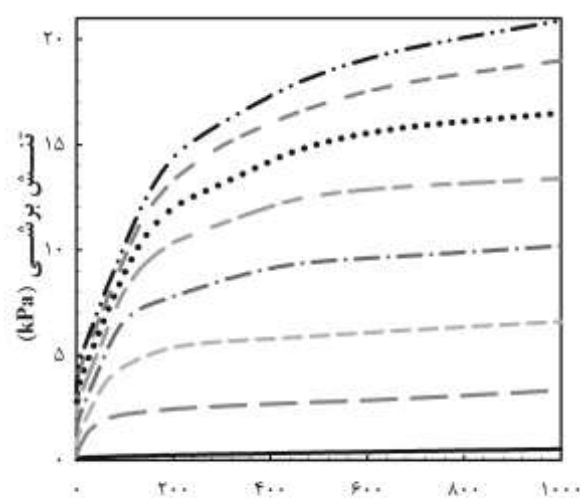
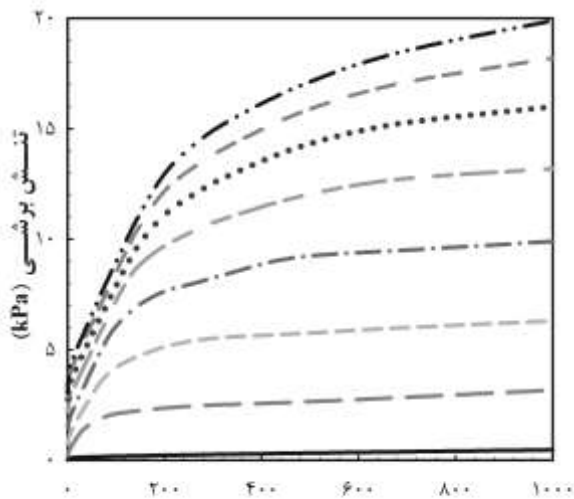


نرخ برش (1/s)

نرخ برش (1/s)

(ت)

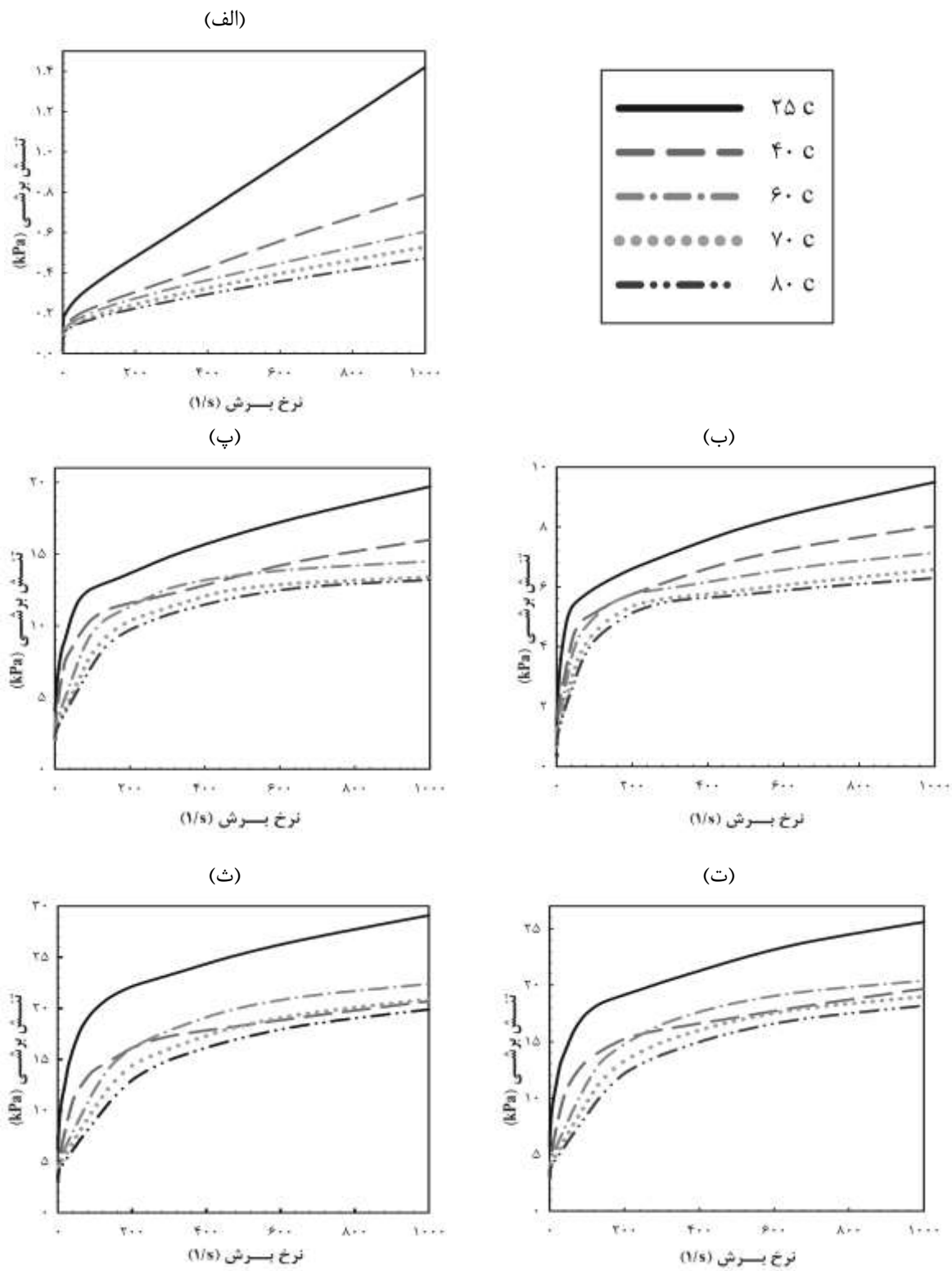
(پ)



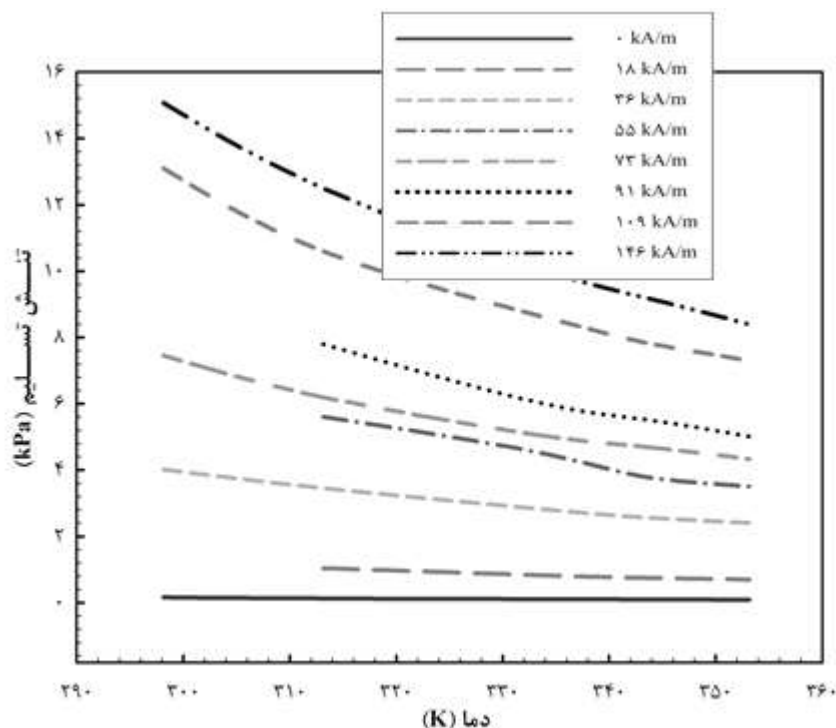
نرخ برش (1/s)

نرخ برش (1/s)

شکل ۶-۷ تنش برشی MR2 بر حسب نرخ برش در میدان‌های مغناطیسی مختلف: الف) در دمای 40°C (ب) در دمای 60°C (پ) در دمای 70°C (ت) در دمای 80°C



شکل ۶-۸ تنش برشی MR2 برحسب نرخ برش در دماهای مختلف: الف) در میدان ۰ kA/m (ب) در میدان ۳۶ kA/m (پ) در میدان ۷۳ kA/m (ت) در میدان ۱۰۹ kA/m (ث) در میدان ۱۴۶ kA/m



شکل ۹-۶ تنش برشی تسلیم برحسب دما در میدان‌های مختلف

۳-۶ تحلیل خطا

حداکثر خطای لزجت‌سنجی دستگاه با توجه به ویسکوزیته‌ی نمونه‌های مختلف، متفاوت است (با توجه به اسپیندل به کار رفته در دستگاه متناسب با لزجت سیال) که مقادیر آن در جدول ۲-۶ آورده شده است، بیشترین خطای اندازه‌گیری مربوط به کمترین نرخ برش و خطای کمتر مربوط به نرخ برش بیشینه‌ی هر نمونه است. برای رئومتر مورد استفاده نیز دقت دستگاه در اندازه‌گیری لزجت دینامیکی برای نمونه‌ی مورد استفاده ± 100 cp در محدوده‌ی نرخ برش 0.1 تا $1000 \frac{1}{s}$ است. خطای نسبی اندازه‌گیری ته‌نشینی باتوجه به رابطه‌ی (۱-۲) برابر با مجموع خطای نسبی اندازه‌گیری ارتفاع کل سیال و ارتفاع قسمت شفاف

جدول ۲-۶ دقت اندازه‌گیری ویسکومتر دیجیتالی

MR3	MR1	روغن هیدرولیک با افزودنی	روغن هیدرولیک	روغن سیلیکون با افزودنی	روغن سیلیکون	نمونه
۱۰۰ - ۱۱K	۲۰ - ۴K	۲۰ - ۱K	۵-۶۰	۲۰ - ۱K	۵-۶۰	خطای دستگاه (cp)

در این جدول K برابر با ۱۰۰۰ است.

است. با توجه به دقت اندازه‌گیری ابزار به صورت میانگین خطای نسبی اندازه‌گیری تهنشینی حدود ۰/۲/۵ محاسبه شده است.

در جدول ۳-۶ مقادیر خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و R^2 برای بیان کیفیت برازش انجام

شده برای تعیین ضرایب رابطه‌ی (۲-۴) آورده شده است. این مقادیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

مجذور همبستگی بین مقدار اندازه‌گیری شده و برازش شده را R^2 نامیده می‌شود که مقداری بین ۰ و ۱ دارد و هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، یعنی همبستگی بیشتر است (برازش بهتری انجام شده است). به عنوان مثال $R^2 = ۰/۸۲۳$ یعنی برازش نشان می‌دهد ۸۲/۳ درصد از پراکندگی کل داده‌ها حول میانگین است. خطای جذر میانگین مربعات می‌تواند به صورت رابطه‌ی زیر بیان شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad (۲-۶)$$

که همان میانگین مجموع مربع انحراف از معیار (انحراف مقادیر تخمینی از مقادیر اندازه‌گیری شده) است.

جدول ۳-۶ میزان انحراف مدل پیشنهادی برای تنش تسلیم MR2 از نتایج آزمایشگاهی

۸۰	۷۰	۶۰	۴۰	۲۵	دما °C	
						مشخصات برازش
۰/۹۸۲	۰/۹۸۶	۰/۹۸۳	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶		R^2
۳۹۴	۳۷۴	۴۵۶/۸	۵۰۷/۳	۷۲۸/۵		RMSE

۴-۶ نتایج مدل سازی دینامیکی

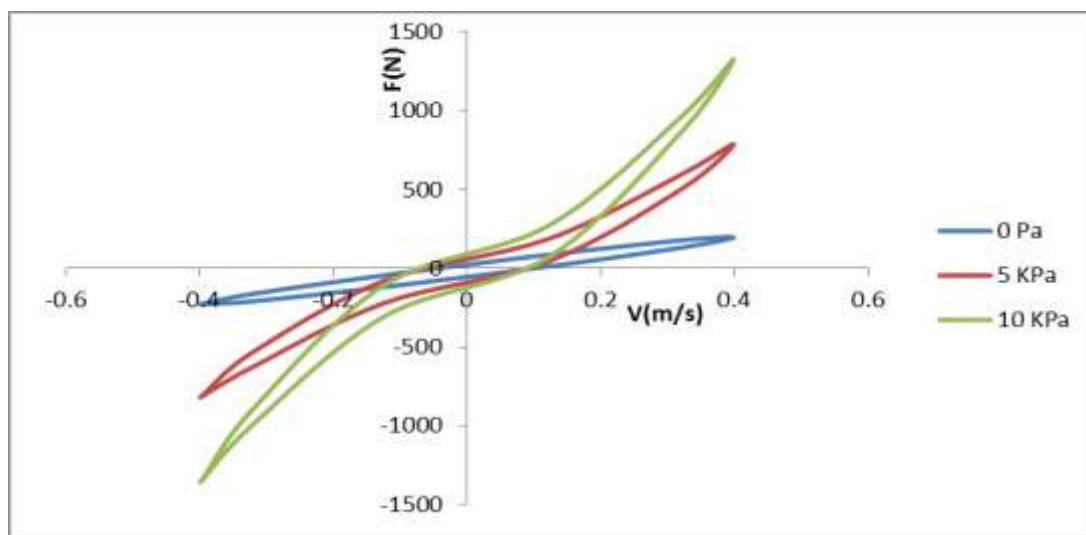
در این پژوهش نمودارهای مشخصه (F-V) و کار (F-D) با استفاده از تحلیل دینامیکی با در نظر گرفتن اینرسی سیال مشخص شده است. مشخصه‌های سیال مگنتورئولوژیکال با سیال MRF-132LD محصول شرکت LORD و مشخصات هندسی میراگر از روی دمپر مود ترکیبی ساخته شده توسط ویلسون و همکاران [۷۲] تنظیم شده است. این مشخصه‌ها در جدول ۴-۶ آمده است.

جدول ۴-۶ اندازه‌ی ضرایب مدل سازی

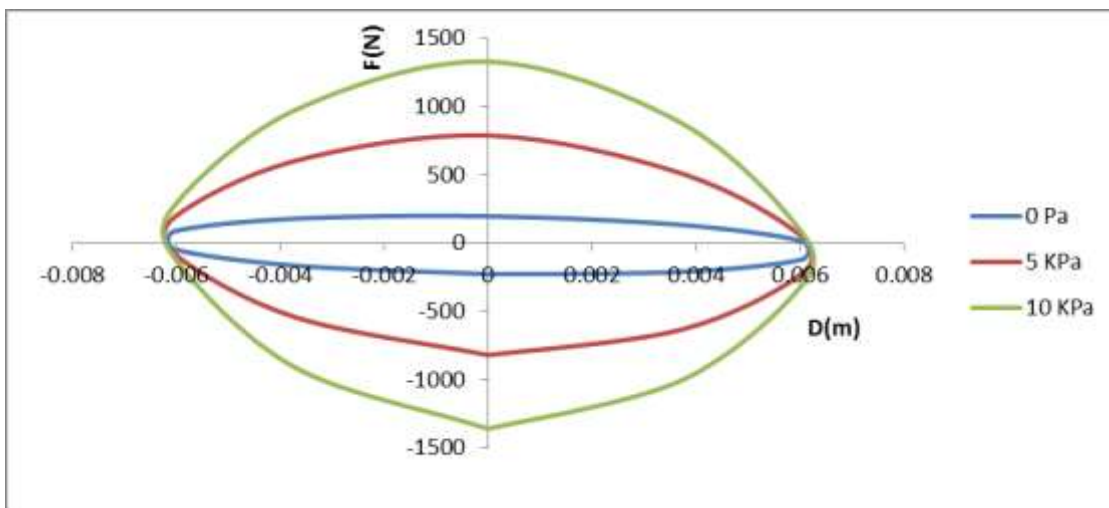
پارامتر (نماد)	مقدار
دامنه‌ی تحریک (A)	۶/۳۵ mm
فرکانس تحریک سینوسی (f)	۳۰-۲۰-۱۰ (HZ)
عرض شیار عبور سیال در میراگر (d)	۱/۳mm
طول فعال شیار عبور سیال (L)	۳۰mm
شعاع پیستون میراگر (R_p)	۲۴/۵mm
شعاع دسته پیستون میراگر (R_s)	۵ mm
شعاع متوسط شیار حلقوی (R)	۲۵/۱۵mm
چگالی سیال مگنتورئولوژیکال (ρ)	۲۶۵۰ kg/m^3
لزجت دینامیکی بدون میدان سیال (μ)	۰/۱۴ pa.s
فشار اولیه‌ی محفظه‌ی انباره (P_0)	۲۰۰ kPa
حجم اولیه‌ی محفظه‌ی انباره (V_0)	۱۱۰۰۰۰ mm^3

تحت یک تحریک سینوسی مشخص، نیروی میرایی دمپر با استفاده از محاسبات عددی تحت فرکانس‌ها و تنش‌های تسلیم مختلف در حالت غیرپایا استخراج شده است. ارتباط بین نیروی میراگر (پاسخ) با جابه‌جایی و سرعت تحریک در تنش‌های تسلیم ۰، ۵۰۰۰ Pa و ۱۰۰۰۰ Pa در فرکانس‌های تحریک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ HZ با دامنه‌ی تحریک ۶/۳۵ mm و دمای ثابت ۲۵°C به دست آمده است.

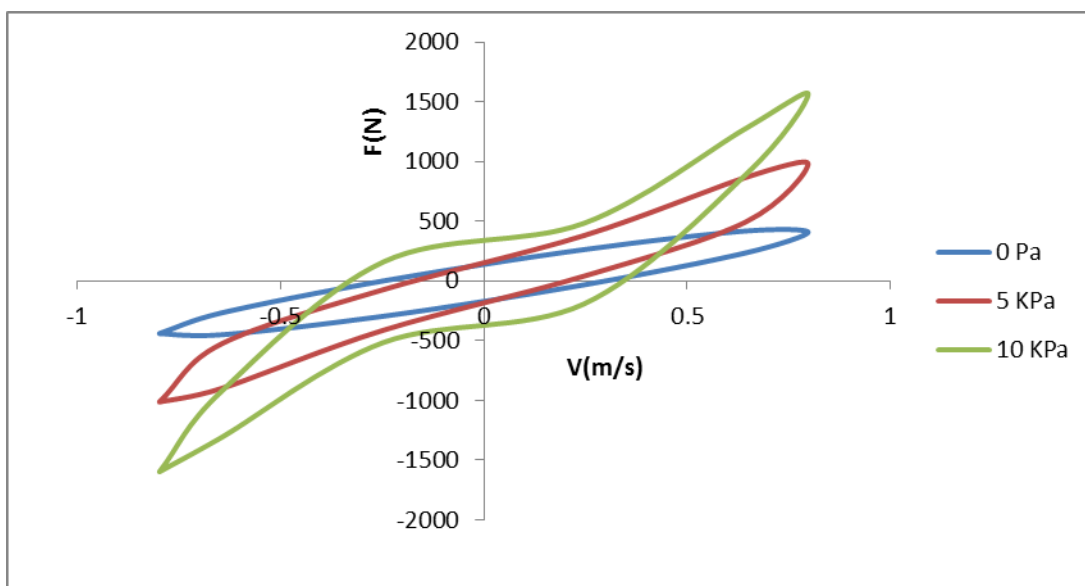
در شکل ۱۰-۶ و شکل ۱۱-۶ نیروی میراگر مود ترکیبی در فرکانس ۱۰ HZ و در میدان‌های مغناطیسی مختلف به ترتیب برحسب سرعت و جابه‌جایی تحریک نمایش داده شده است. با تغییر فرکانس تحریک به فرکانس‌های بالاتر و ثابت ماندن سایر شرایط و پارامترهای تحریک می‌توان اثر تغییر فرکانس تحریک بر حلقه‌ی پسماند، نیروی بیشینه و اختلاف فاز گرادیان فشار و پروفیل سرعت را یافت. شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱ نمودارهای نیرو برحسب سرعت و جابه‌جایی تحریک در فرکانس ۲۰ HZ را نشان می‌دهد.



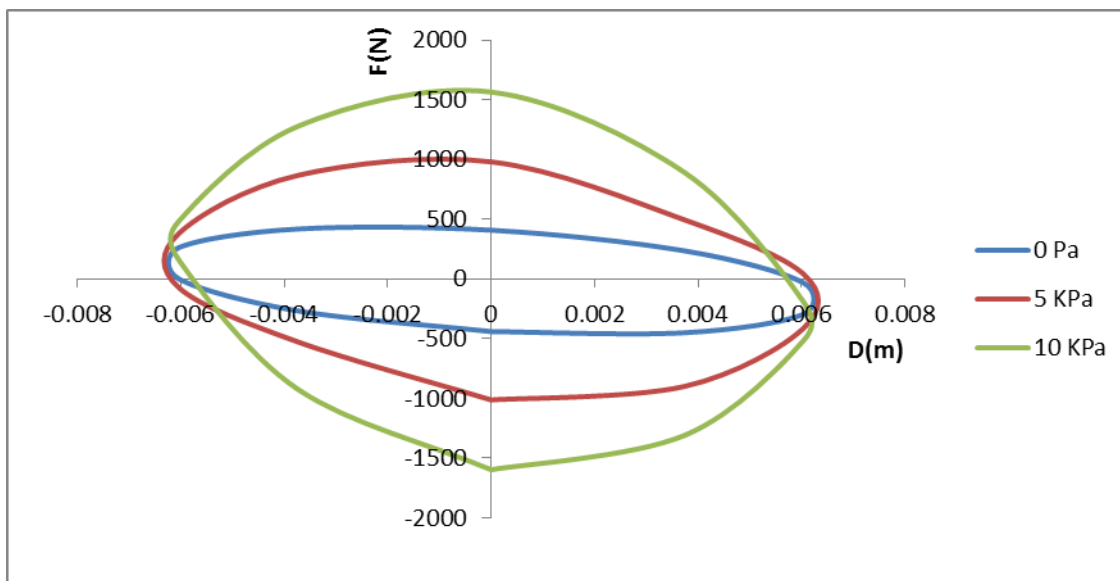
شکل ۱۰-۶ نمودار نیرو برحسب سرعت تحریک در فرکانس ۱۰ HZ در تنش‌های تسلیم مختلف



شکل ۱۱-۶ نمودار نیرو بر حسب سرعت تحریک در فرکانس ۱۰ HZ در تنش‌های تسلیم مختلف



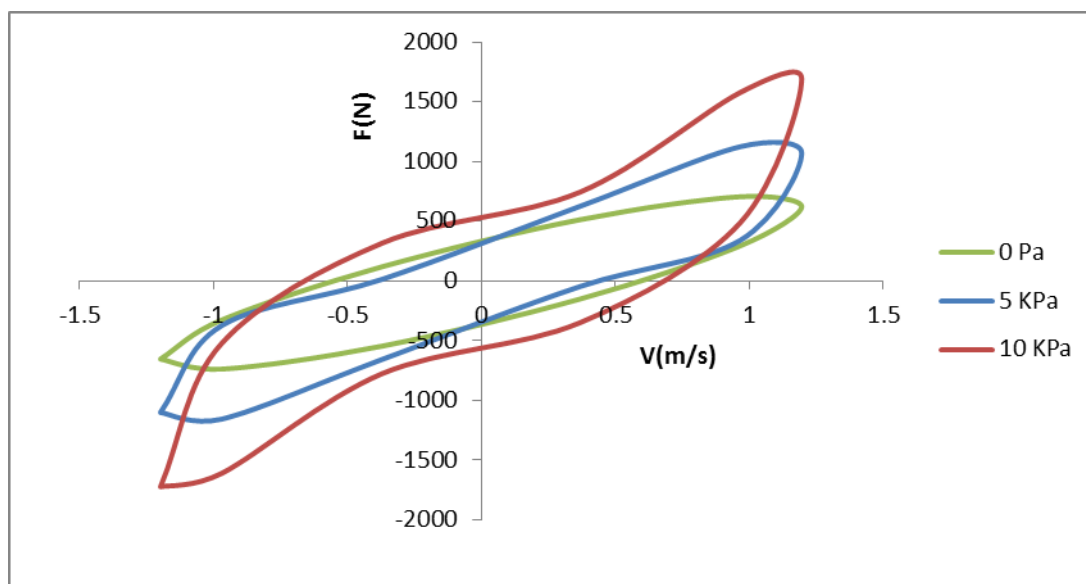
شکل ۱۲-۶ نمودار نیرو بر حسب سرعت تحریک در فرکانس ۲۰ HZ در تنش‌های تسلیم مختلف



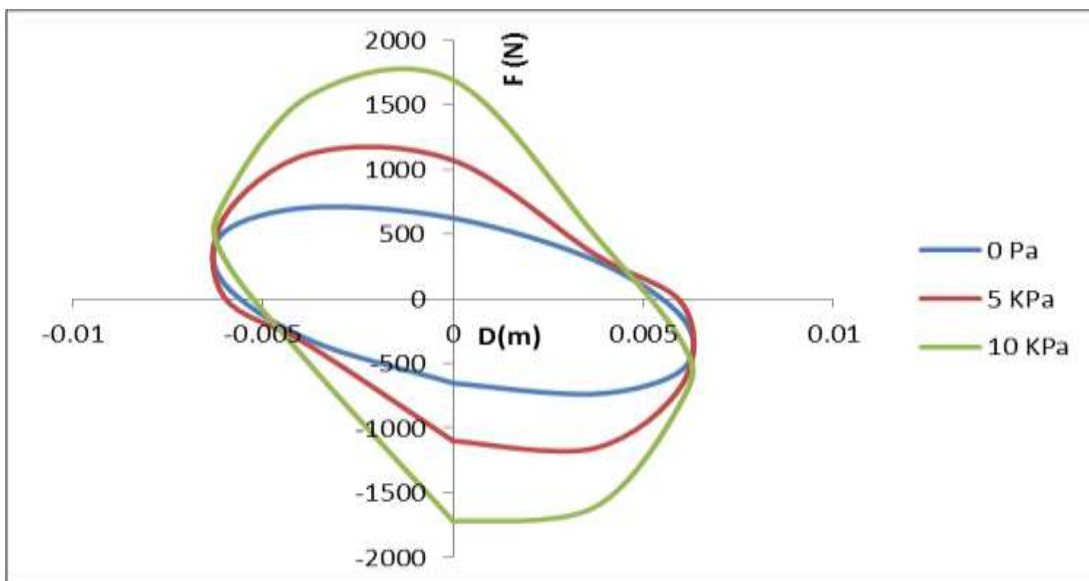
شکل ۱۳-۶ نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی تحریک در فرکانس ۲۰ HZ در تنش‌های تسلیم مختلف

نمودارهای مشخصه و کار میراگر مود ترکیبی در فرکانس تحریک ۳۰ HZ و میدان‌های مغناطیسی

مختلف به ترتیب در شکل ۱۴-۶ و شکل ۱۵-۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۴-۶ نمودار نیرو بر حسب سرعت تحریک در فرکانس ۳۰ HZ در تنش‌های تسلیم مختلف



شکل ۱۵-۶ نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی تحریک در فرکانس ۳۰ HZ در تنش‌های تسلیم مختلف

۱-۴-۶ عمل کرد مدل میراگر در دمای ثابت

۱-۱-۴-۶ وابستگی به میدان مغناطیسی اعمالی

همان‌طور که قبلاً بیان شد زمانی که تنش وارد شده به سیال مگنتورئولوژیکال میراگر کمتر از تنش تسلیم باشد، میراگر در محدوده‌ی پیشاتسلیم و اگر بیشتر از آن باشد در منطقه‌ی پساتسلیم عمل می‌کند. مدل پلاستیک بینگهام می‌تواند به‌دقت رفتار پساتسلیم میراگر را مدل کند. افزایش میدان مغناطیسی اعمالی بر میراگر مگنتورئولوژیکال نیروی میرایی را به‌شدت افزایش می‌دهد. با نزدیک شدن به مقدار اشباع سیال مگنتورئولوژیکال این افزایش کمتر می‌شود و پس از رسیدن به حالت اشباع مغناطیسی، افزایش میدان نقشی در تغییر نیروی میرایی دمپر مگنتورئولوژیکال ندارد. شکل‌های بالا به‌وضوح این مطلب را نشان می‌دهند. افزایش تنش تسلیم، نیروی میرایی بیشینه را به‌شدت افزایش می‌دهد.

۲-۱-۴-۶ وابستگی به فرکانس تحریک

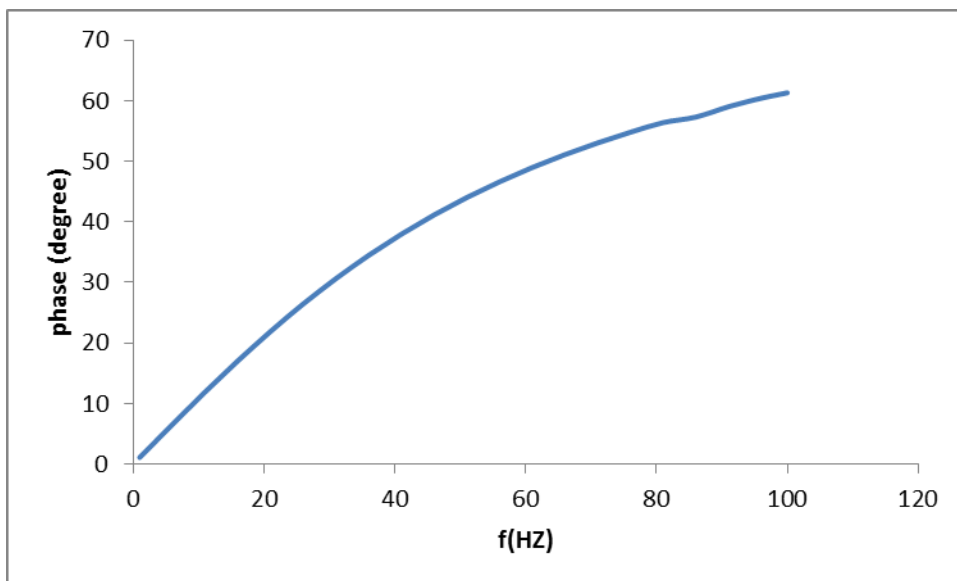
رابطه‌ی بین نیرو- جابه‌جایی و نیرو- سرعت در تنش‌های تسلیم مختلف (۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ Pa) با فرکانس‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ HZ در دامنه‌ی ثابت (۶/۳۵ mm) مشخص شده است. در شکل‌های بالا نمودارهای نیرو-جابه‌جایی و نیرو- سرعت در میدان‌ها و فرکانس‌های مختلف در دامنه‌ی ثابت نمایش داده شده است، همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد با افزایش فرکانس، نیروی میرایی در هر لحظه افزایش می‌یابد. رفتار بینگه‌م‌گونه‌ی MRF در نمودارهای نیرو- سرعت (شکل ۶-۱۰، شکل ۶-۱۲ و شکل ۶-۱۴) دیده می‌شود. با توجه به این اشکال افزایش رفتار غیرخطی حلقه‌ی نیرو بر حسب سرعت در فرکانس‌های بالا مشهود است.

۳-۱-۴-۶ وابستگی به دامنه‌ی تحریک

اثر دامنه‌ی تحریک بر عمل‌کرد میراگر مگنتورئولوژیکال شبیه فرکانس است. مقایسه‌ی نمودارهای مشخصه (نیرو-سرعت) و کار (نیرو- جابه‌جایی) در دما، میدان و فرکانس تحریک یکسان نشان می‌دهد که افزایش دامنه‌ی تحریک میراگر سبب افزایش نیروی میرایی بیشینه غیرپایا است. افزایش سطح زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی بیان‌گر افزایش استهلاک انرژی توسط میراگر است.

۴-۱-۴-۶ اختلاف فاز گرادیان فشار و سرعت تحریک

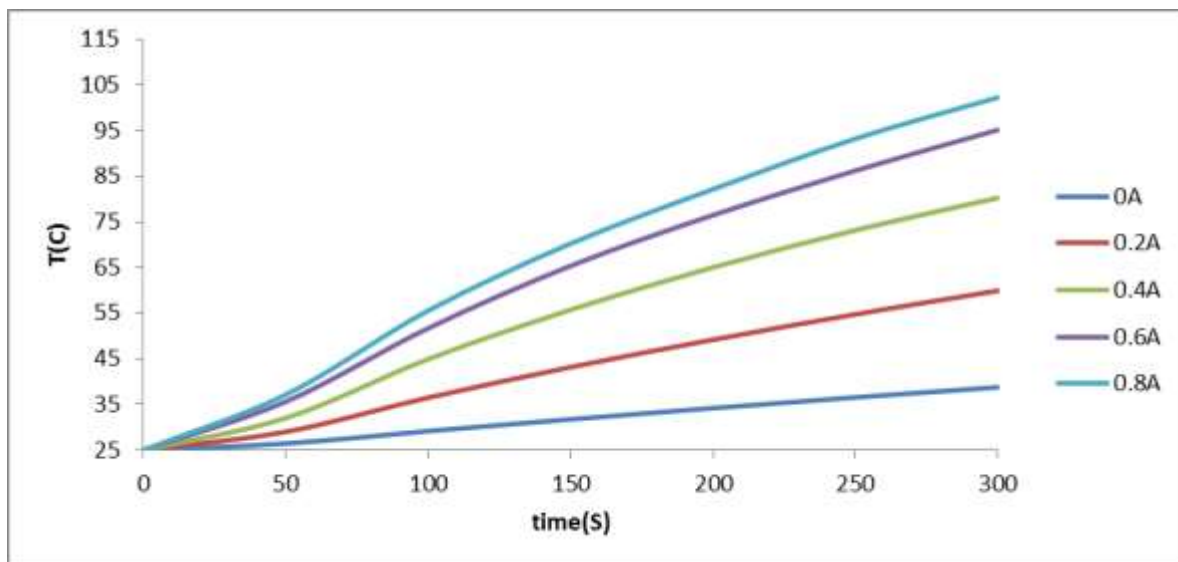
نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک اختلاف فاز بین گرادیان فشار و پروفیل سرعت سیال افزایش می‌یابد. شکل ۶-۱۶ رابطه‌ی بین فاز و فرکانس را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش میدان اعمالی بر MRF نیز این اختلاف فاز کاهش می‌یابد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد در فرکانس‌های بالا (حدود ۱۰۰ هرتز) اختلاف فاز بالایی حدود ۶۰ درجه بین گرادیان فشار و پروفیل سرعت تحریک میراگر برقرار است.



شکل ۶-۱۶ تغییرات اختلاف فاز گرادیان فشار شیار عبور سیال برحسب فرکانس تحریک

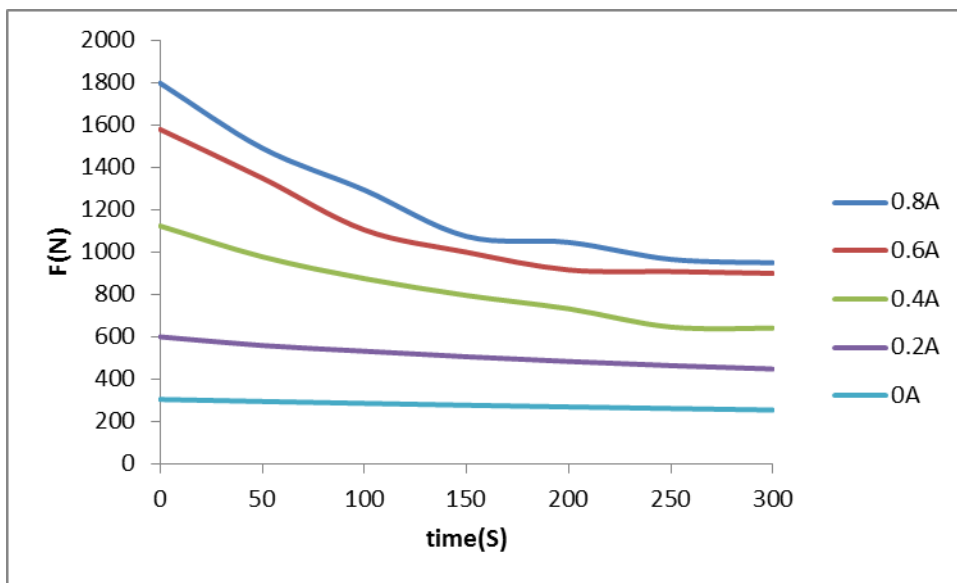
۶-۴-۲ مدل کردن اثر دما بر عمل کرد میراگر

بررسی تغییرات دمای میراگر و همچنین نیروی بیشینه‌ی آن در زمان ۳۰۰ ثانیه با فرکانس ۱۰ HZ در جریان‌های ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸A انجام شده است. میزان تغییر نمودارهای مشخصه و کار میراگر مگنتورئولوژیکیال در طول زمان کار آن نشان‌گر میزان اهمیت پارامتر دما در عمل کرد میراگر مگنتورئولوژیکیال است. شکل ۶-۱۷ تغییرات دمای میراگر حین کار را برحسب زمان را در فرکانس ۱۰ HZ و جریان‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه‌ی زمانی حدود ۵ دقیقه میراگر افزایش دمایی مختلفی را تجربه می‌کند. این افزایش دما با افزایش جریان ورودی به سیم‌پیچ‌های میراگر بیشتر می‌شود. باتوجه به معادله‌ی (۶-۱) با افزایش دما تنش تسلیم کاهش می‌یابد، در نتیجه نیروی میرای دمپر نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۶-۱۷ دمای کاری میراگر مگنتورئولوژیکال بر حسب زمان

این مطلب به وضوح در شکل ۶-۱۸ دیده می شود، این افزایش دما تا زمانی که کار و گرمای تولید و مبادله شده بین میراگر و محیط تعادل نیابد ادامه پیدا می کند. در فصل قبل نتایج آزمایشگاهی نیز تأثیر شدید دما بر تنش تسلیم را تأیید می کرد، لذا دما پارامتر مهمی در عمل کرد میراگر مگنتورئولوژیکال است. همان طور که شکل ۶-۱۸ نشان می دهد افزایش دما ظرفیت نیروی میراگر را به شدت کاهش می دهد. به طوری که با افزایش حدوداً ۷۵ درجه ای دما نیروی بیشینه حدود ۴۵٪ کاهش می یابد. به عنوان مثال پس از گذشت زمان ۳۰۰ ثانیه دمای سیال با دامنه و فرکانس تحریک به ترتیب ۶/۳۵ mm و ۱۰ Hz با جریان ورودی ۰/۸ A از ۲۵°C به ۱۰۰°C افزایش می یابد، این تغییر دما سبب کاهش نیروی میراگر از ۱۸۰۰ N به ۹۶۰ N می گردد. در پژوهش های مشابه که عمل کرد میراگر مگنتورئولوژیکال را با توجه به افزایش دمای سیال گزارش نموده اند [۵۸، ۱۹] نتایج آزمایشگاهی کاهش حدود ۴۰٪ را با افزایش دمای سیال مگنتورئولوژیکال درون میراگر تا ۷۵ - ۱۰۰ C گزارش می دهند



شکل ۶-۱۸ نمودار تغییرات نیروی میراگر برحسب زمان کاری در میدان‌های مغناطیسی مختلف

۵-۶ نتایج کنترل

شبیه‌سازی برپایه‌ی مدل ریاضی یک‌چهارم خودرو با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک/ متلب انجام شد. همان‌طور که در فصل قبل توضیح داده شد ۲ نوع پروفیل جاده به‌عنوان ورودی به سیستم وارد می‌شود. مقادیر عددی مدل یک‌چهارم مطابق [۷۳] در جدول (۴-۲) آمده است.

جدول ۵-۶ مقادیر عددی مدل یک‌چهارم خودرو [۷۲]

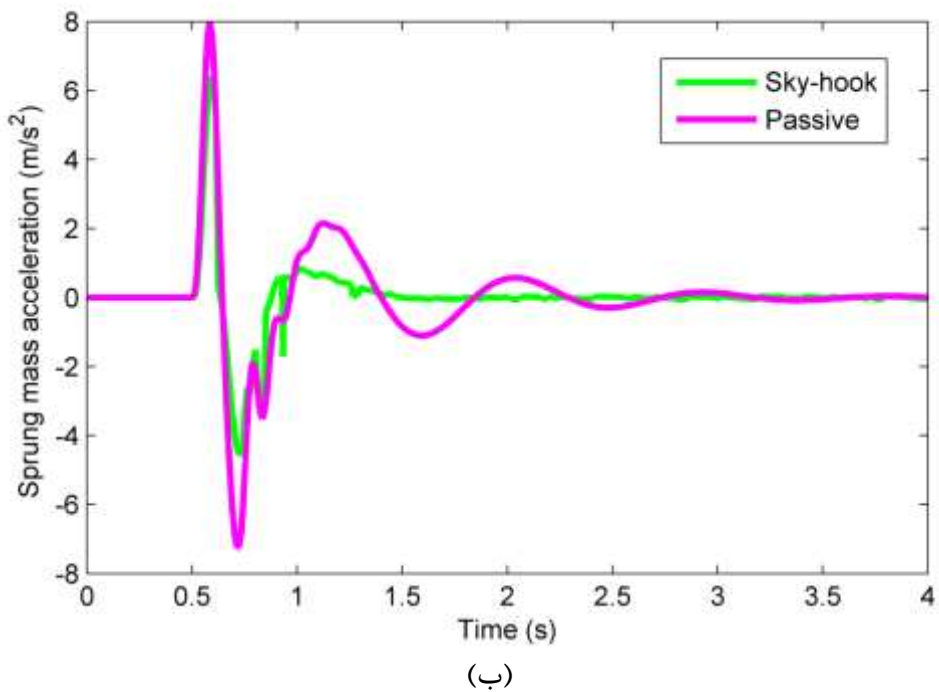
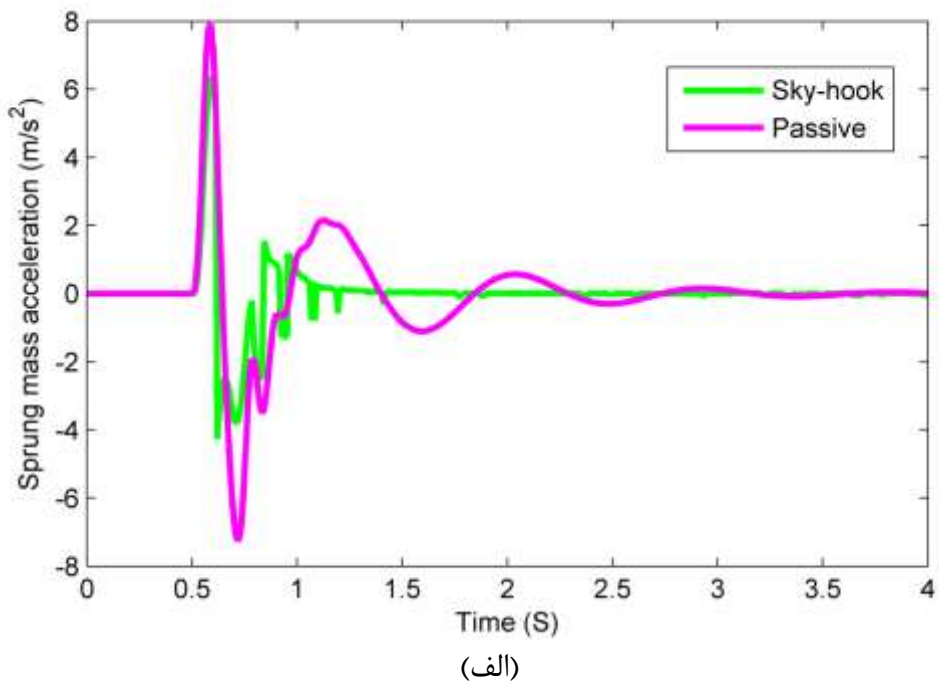
$m_s = 290 \text{ kg}$	$m_w = 59 \text{ kg}$	$k_s = 16183 \text{ N/m}$	$k_s = 190000 \text{ N/m}$	$C = 1000 \text{ Ns/m}$
------------------------	-----------------------	---------------------------	----------------------------	-------------------------

پارامترهای خروجی عبارت است از جابه‌جایی و شتاب سرنشین برای مدل یک‌چهارم. شکل ۶-۱۹

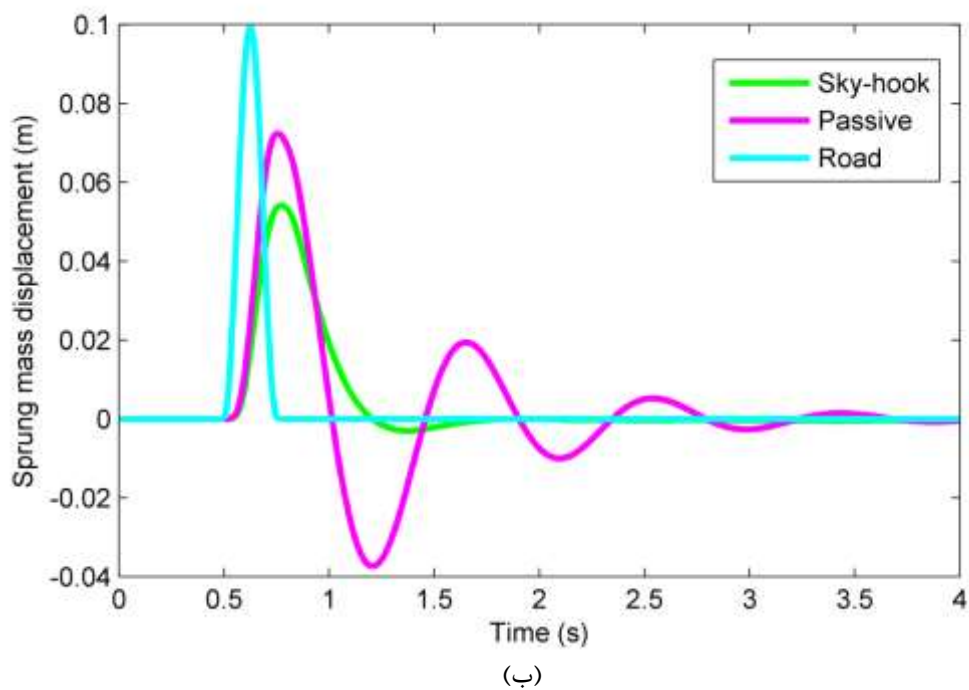
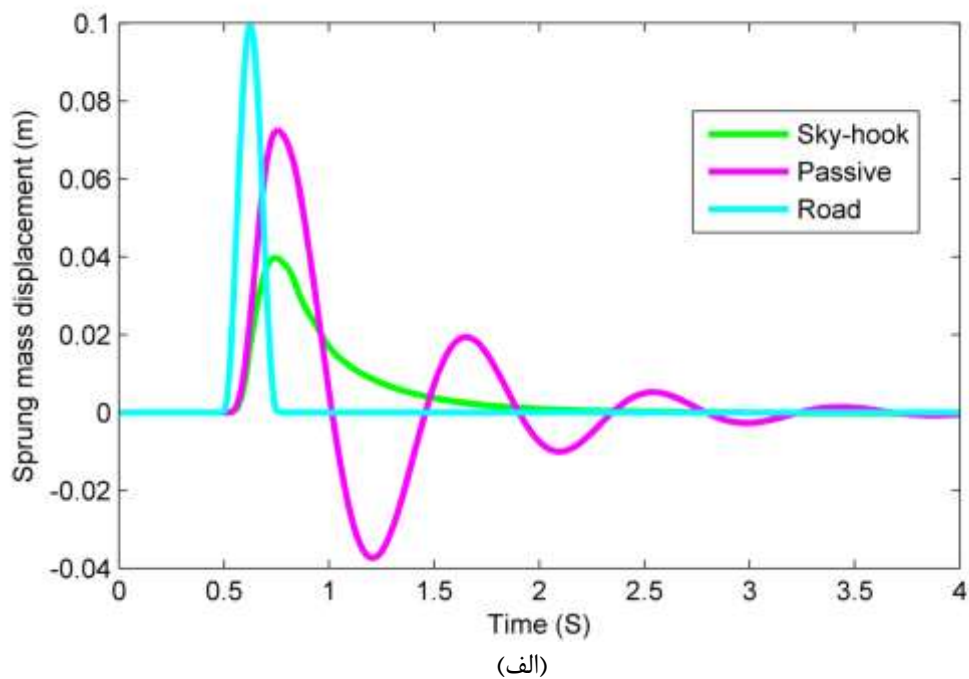
و شکل ۶-۲۰ نتایج شبیه‌سازی سیستم تعلیق نیمه‌فعال با منطق کنترل گیره- فضایی و غیرفعال یک-چهارم خودرو با ورودی پروفیل نوع ۱ نشان می‌دهد. با توجه به مشخصات هندسی میراگر در نظر گرفته شده بهره‌ی کنترل برابر با ۷۰۰۰ در نظر گرفته شده است [۷۲]. برای بررسی اثر گین بر عملکرد میراگر در $G = 3500$ نیز شبیه‌سازی انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۶-۱۹ مشاهده می‌شود سیستم

تعلیق نیمه‌فعال با کنترل گیره- فضایی در ورودی نوع ۱ در هردو بهره‌ی کنترل عمل‌کرد بهتری را در کاهش شتاب وارده به سرنشینان نسبت به سیستم غیرفعال دارا است اما در $G=3500$ نوسانات شتاب وارده به سرنشین کمتر از حالت $G=7000$ است. در این حالت (با کنترل گیره- فضایی) هم اندازه‌ی شتاب بیشینه‌ی وارده و هم زمان نشست^۱ کاهش یافته است. شکل ۶-۲۰ جابه‌جایی وارده به سرنشینان بر اثر تحریک پروفیل نوع ۱ در دو بهره‌ی کنترلی مختلف را نشان می‌دهد. بررسی شکل ۶-۱۹ و شکل ۶-۲۰ نشان می‌دهد به‌صورت کلی افزایش جریان ورودی علی‌رغم کاهش محسوس بیشینه‌ی جابه‌جایی، سبب افزایش اندازه‌ی شتاب بیشینه وارده به سرنشینان خودرو و همچنین افزایش زمان نشست می‌گردد. در هردو حالت سیستم تعلیق نیمه‌فعال (گیره- فضایی) عمل‌کرد بهتری در جذب ارتعاشات نسبت به تعلیق غیرفعال دارد. شکل ۶-۲۱ و شکل ۶-۲۲ عمل‌کرد سیستم‌های تعلیق نیمه‌فعال و غیرفعال را با ورودی جاده نوع ۲ نشان می‌دهد. دو مدل جریان ورودی به سیستم نیمه‌فعال با کنترلر گیره- فضایی اعمال می‌شود. کنترلر گیره- فضایی روشن/ خاموش مشابه ورودی نوع ۱، در بهره‌ی کنترلی بالاتر (جریان بزرگتر) دامنه‌ی جابه‌جایی بدنه‌ی خودرو کاهش و بیشینه‌ی شتاب و زمان نشست افزایش می‌یابد. در مجموع می‌توان گفت که کنترلر گیره- فضایی برای میراگر مگنتورئولوژیکال در یک سیستم تعلیق نسبت به حالت غیرفعال عمل‌کرد مناسب تری را فراهم می‌کند چرا که در هر دو نوع پروفیل جاده، سیستم نیمه‌فعال با کنترلر گیره- فضایی شتاب، جابه‌جایی بیشینه و زمان نشست کمتری نسبت به سیستم غیرفعال دارد.

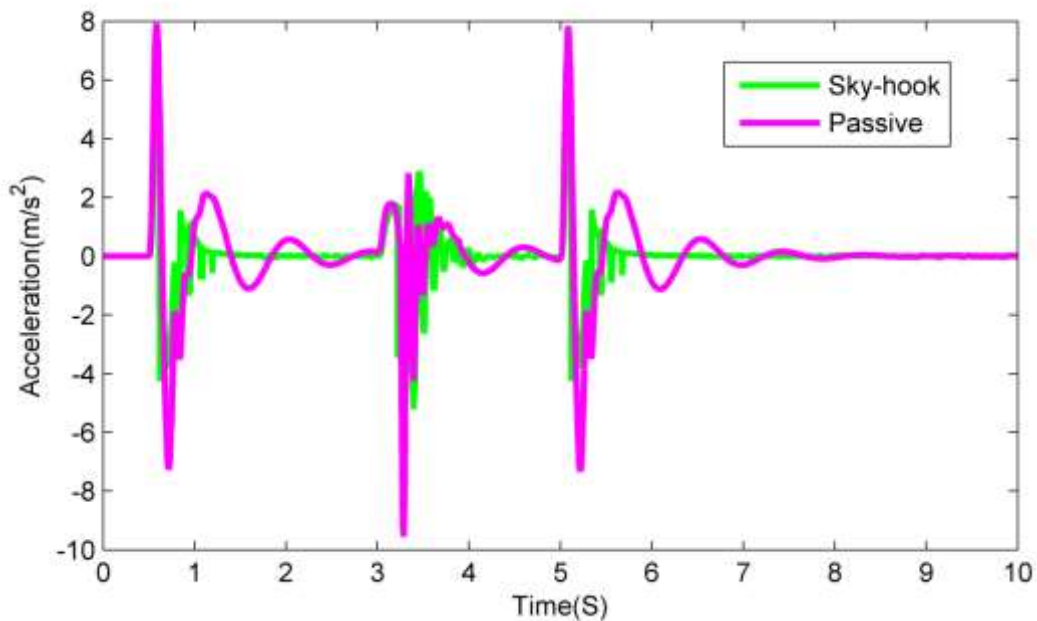
¹ Settling time



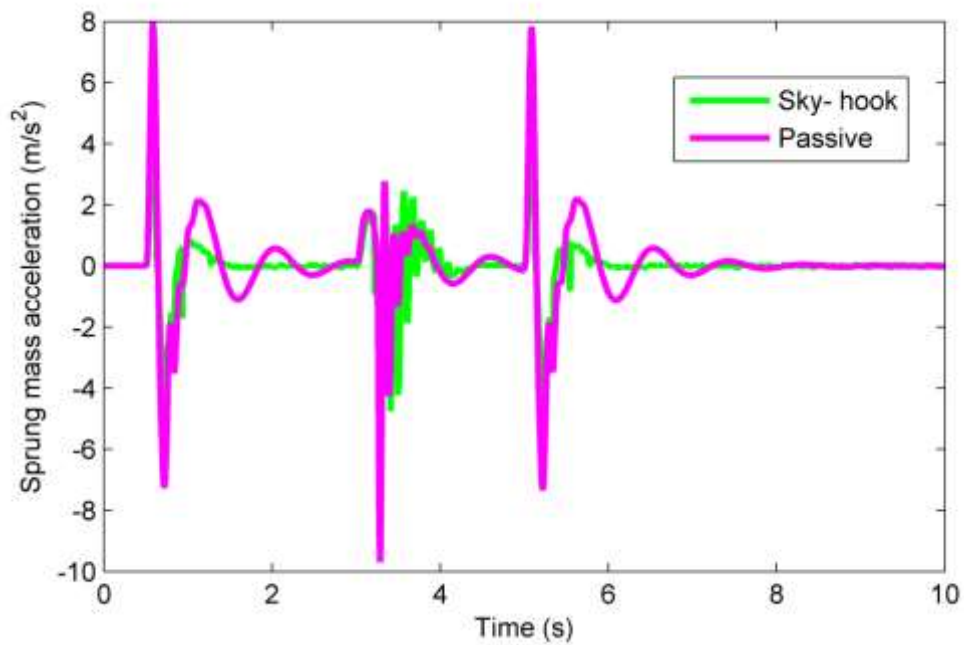
شکل ۶-۱۹ شتاب جرم فنربندی شده (اتاق سرنشین) برحسب زمان برای حالت نیمه فعال و غیرفعال با ورودی نوع ۱ جاده و نیروی ثابت بیشینه با: الف) $G=7000$ ب) $G=3500$ برای کنترل گیره-فضایی



شکل ۶-۲۰ جابه‌جایی جرم فنربندی‌شده (اتاق سرنشین) برحسب زمان برای حالت نیمه‌فعال و غیرفعال با ورودی نوع ۱ جاده و نیروی ثابت بیشینه با: (الف) $G=7000$ (ب) $G=3500$ برای کنترل گیره-فضایی

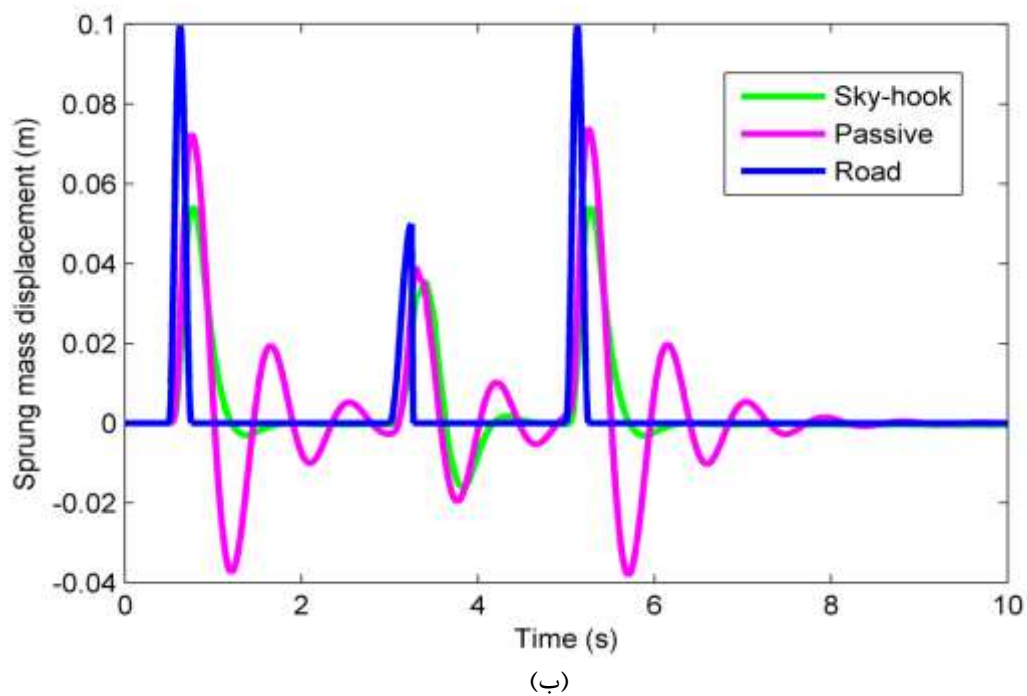
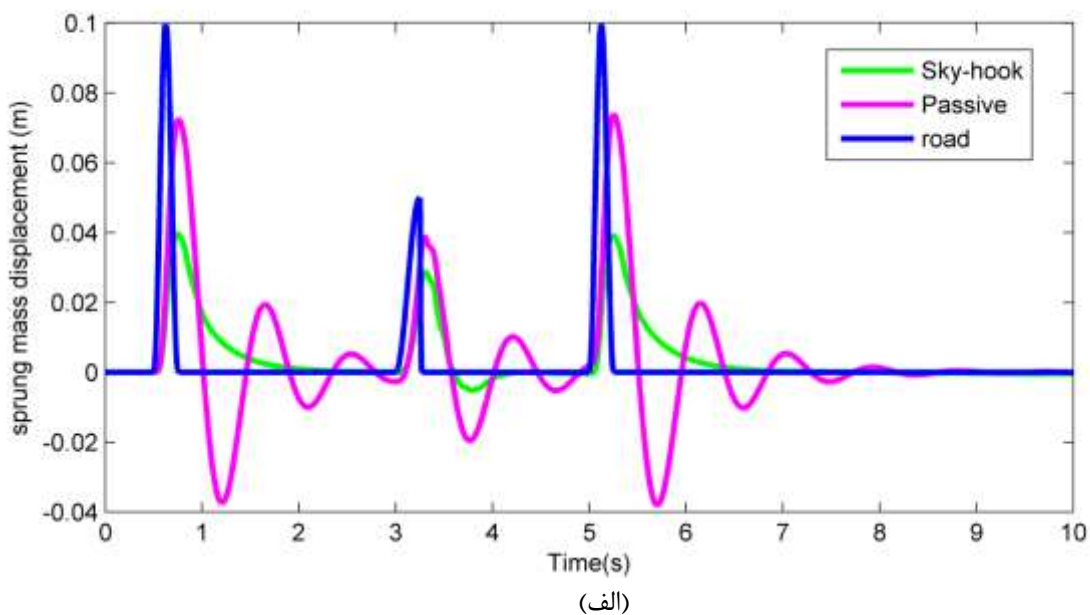


(الف)



(ب)

شکل ۶-۲۱ شتاب جرم فنربندی شده (اتاق سرنشین) برحسب زمان برای حالت نیمه فعال و غیرفعال با ورودی نوع ۲ جاده و نیروی ثابت بیشینه با: الف) $G=7000$ ب) $G=3500$ برای کنترل گیره-فضایی



شکل ۶-۲۲ جابه‌جایی جرم فنربندی‌شده (اتاق سرنشین) برحسب زمان برای حالت نیمه‌فعال و غیرفعال با ورودی نوع ۲ جاده و نیروی ثابت بیشینه با: (الف) $G=7000$ (ب) $G=3500$ برای کنترل گیره-فضایی

۶-۶ جمع بندی

۶-۶-۱ نتایج ساخت سیال مگنتورئولوژیکال

در تحقیق حاضر پایداری نمونه‌های مختلف سیال مگنتورئولوژیکال با شرایط متغیر نظیر دو نوع سیال حامل شامل روغن سیلیکون و روغن هیدرولیک، دو روش پراکندن ذرات مغناطیسی در سیال حامل یکی با کمک همزن مکانیکی و دیگری آسیاب کاری با گلوله‌ی فلزی و سه غلظت متفاوت ۵۰٪ wt ، ۶۰٪wt و ۷۰٪ wt برای ذرات مغناطیسی بررسی گردید. حساسیت سنجی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال نسبت به هرکدام از پارامترهای متغیر، با کمک الگوریتم تاگوچی انجام و پایدارترین سیال با توجه به کاربرد در جاذب‌های ارتعاشی خودرو معرفی شد. پایداری این سیال ۹۱.۸٪ پس از گذشت ۱۹۶ ساعت است. همچنین به منظور بررسی تأثیر غلظت فاز پراکنده‌شونده و نوع سیال حامل روی لزجت بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال، آزمون لزجت‌سنجی روی برخی از نمونه‌ها انجام گردید. با ارزیابی رفتار رئولوژیکال سیال بهینه در مجموع می‌توان نتایج زیر را ارائه نمود:

- استفاده از روغن سیلیکون نسبت به روغن هیدرولیک به‌عنوان سیال حامل، پایداری بیشتری برای سیال ایجاد می‌کند. این امر می‌تواند به دلیل افزایش لزجت سیال مگنتورئولوژیکال به علت افزایش لزجت سیال حامل باشد.
- نحوه‌ی اختلاط تأثیر چشمگیری بر پایداری سیال دارد؛ به طوری که استفاده از همزن مکانیکی برای اختلاط اجزای سیال مگنتورئولوژیکال، نمونه سیال پایدارتری را ایجاد می‌کند.
- افزودن اسید استئاریک لزجت ابتدایی بدون میدان سیال مگنتورئولوژیکال را به شدت افزایش می‌دهد؛ اما پایداری و اثر مگنتورئولوژیکال قابل قبولی را به دست می‌دهد.

- به صورت کلی می‌توان گفت افزایش غلظت پودر آهن کربونیل سیال مگنتورئولوژیکال، لزجت بدون میدان و پایداری آن را افزایش می‌دهد؛ اما در لزجت‌های بالا از اثر آن کاسته می‌شود به طوری که در لزجت‌های بسیار بالا افزودن ذرات مغناطیسی تأثیری در پایداری ندارد.
 - نحوه‌ی اختلاط بیشترین تأثیر را روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال دارد. پس از آن نوع سیال حامل در درجه دوم اهمیت و تغییرات غلظت پودر آهن کربونیل نیز در مرتبه سوم اهمیت قرار دارد و در غلظت‌های پایین تأثیر بیشتری بر روی پایداری سیال مگنتورئولوژیکال دارد.
 - پایداری سیال بهینه ارائه شده بیشتر از دو برابر پایداری بسیاری از سیالات مگنتورئولوژیکال مرسوم است [۷، ۱۵، ۳۲ و ۶۷].
 - با وجود افزایش نسبی لزجت حالت بدون میدان MR2، این سیال مگنتورئولوژیکال تنش تسلیم قابل قبولی برابر با ۱۵ kPa در شدت میدان مغناطیسی ۱۴۶ kA/m در دمای ۲۵ °C از خود نشان می‌دهد.
 - پس از اشباع مغناطیسی یا در میدان‌های نزدیک به آن، لزجت سیال مگنتورئولوژیکال در دمای ثابت تنها تابعی از نرخ برش است و به میدان مغناطیسی بستگی ندارد.
 - پاسخ تنش تسلیم سیال به تغییرات دما زیاد است، به گونه‌ای که تغییر دما از ۲۵ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش حدوداً ۴۰٪ تنش تسلیم می‌شود.
 - نتیجه‌ی مدل‌سازی تنش تسلیم MRF بهینه به عنوان تابعی از دما و میدان مغناطیسی رابطه‌ای به شکل رابطه‌ی (۶-۱) است.
- مقدار تنش تسلیم بیشینه و محدوده‌ی لزجت MR2، مناسب بودن آن را برای کاربرد در میراگرهای مغناطیسی سیستم تعلیق هوشمند تأیید می‌کند.

۶-۶-۲ نتایج مدل سازی دینامیکی میراگر مگنتورئولوژیکال

مدل سازی فیزیکی میراگر مگنتورئولوژیکال با استفاده از معادلات دینامیکی و مشخصات هندسی میراگر و خصوصیات سیال برای میراگر مود ترکیبی از جریان و برش با فرض جریان توسعه یافته، آرام و یک بعدی با سیال تراکم ناپذیر در حالت غیر پایا انجام شد. پس از حل معادلات PDE به صورت تحلیلی اعداد مختلط با استفاده از روش نیوتون-رافسون چند معادله ای توزیع فشار نسبت به زمان به دست آمد. از روی اختلاف فشار دو سر پیستون میراگر می توان نیروی آن را حساب نمود. با افزایش میدان مغناطیسی اعمالی به سیال درون میراگر، حلقه ی نمودار نیرو- جابه جایی بزرگتر می شود که این به معنای افزایش انرژی اتلاف شده توسط میراگر است. همچنین عرض ناحیه ی پلاگ نیز افزایش می یابد و متوسط سرعت سیال کمتر می شود که این به معنای افزایش کار دمپر در ناحیه ی پیشاتسلیم است. با افزایش دامنه و فرکانس تحریک نیز بیشینه ی نیروی میرایی و همچنین پسماند در نمودار نیرو- سرعت بیشتر می گردد. مدل دینامیکی ارائه شده قادر به در نظر گرفتن حلقه ی پسماند برای نمودارهای نیرو- سرعت است که مهم ترین مزیت آن نسبت به تحلیل های شبه استاتیکی است. مقایسه ی نتایج حاصل از این مدل سازی با مدل تحلیلی شبه- استاتیکی از تفاوت قابل توجه دو مدل در دامنه و فرکانس های کاری بالا به دلیل به حساب آوردن جمله ی اینرسی در معادلات حکایت دارد.

با نوشتن معادلات انرژی برای کار و گرمای مبادله شده بین میراگر و محیط پیرامون، دمای سیال درون دمپر با فرض یکپارچه بودن سیستم در هر زمان به دست آمد. نیروی لازم در معادلات انرژی از مدل سازی دینامیکی میراگر در یک گام زمانی قبلی جایگزین شد. پس از استخراج دما با توجه به مدل ارائه شده برای MRF تنش تسلیم و نیروی میراگر اصلاح می شود. نتایج نشان از افزایش قابل ملاحظه ی دما در حین عمل کرد میراگر تا زمان رسیدن به تعادل حرارتی دارد. در طول زمان ۳۰۰ ثانیه دمای سیال MR حدود ۷۵ C افزایش می یابد. همان طور که قبلا بیان شد تغییرات دما بر رفتار رئولوژیکال سیال

تأثیر محسوسی دارد به گونه‌ای که با افزایش دمای MRF تا 100°C نیروی بیشینه‌ی میراگر حدود ۴۵٪ افت می‌کند.

۳-۶-۶ نتایج مدل کنترل

منطق کنترل گیره- فضایی برای میراگر مگنتورئولوژیکال ارائه و به کمک سیمولینک در یک سیستم تعلیق نیمه‌فعال پیاده شد. شبیه‌سازی سیستم تعلیق خودرو با مدل یک‌چهارم برای حالت‌های غیرفعال و نیمه‌فعال با دو نوع پروفیل جاده پرکاربرد در حوزه زمان به‌عنوان ورودی نشان داد تعلیق نیمه‌فعال گیره- فضایی عمل‌کرد بهتری نسبت به سیستم تعلیق نیمه‌فعال دارد به طوری که اندازه‌ی شتاب وارده به سرنشین و بیشینه‌ی جابه‌جایی و همچنین زمان نشست کاهش می‌یابد.

۴-۶-۶ پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

باتوجه به مطالعات انجام‌گرفته موضوعات زیر برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌گردد:

- ساخت سیال مگنتورئولوژیکال مقاوم در برابر تغییرات دما و ته‌نشینی به کمک سایر روش‌ها نظیر مخلوط کردن نانوذرات آهن با پودر آهن میکرو مقیاس و...
- ساخت میراگر مود ترکیبی درمقیاس خودروهای سواری و نظامی به کمک روش پیشنهادی
- ارائه‌ی کنترلر غیرخطی بدون جرک، مناسب برای میراگر مگنتورئولوژیکال

مراجع

- [١] A. A. Alghamdi, R. Lostado, A.-G. Olabi, *Magneto-Rheological Fluid Technology*, in: *Modern Mechanical Engineering*, Eds., pp. 43-62: Springer, 2014 .
- [٢] J. de Vicente, D. J. Klingenberg, R. Hidalgo-Alvarez, Magnetorheological fluids: a review, *Soft Matter*, Vol. 7, No. 8, pp. 3701-3710, 2011 .
- [٣] A. Grunwald, A. G. Olabi, Design of magneto-rheological (MR) valve, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 148, No. 1, pp. 211-223, 11/4/, 2008 .
- [٤] Y. Rabbani, M. Ashtiani, S. H. Hashemabadi, An experimental study on the effects of temperature and magnetic field strength on the magnetorheological fluid stability and MR effect, *Soft matter*, Vol. 11, No. 22, pp. 4453-4460, 2015 .
- [٥] P. C. F. Møller, A. Fall, D. Bonn, Origin of apparent viscosity in yield stress fluids below yielding, *EPL (Europhysics Letters)*, Vol. 87, No. 3, pp. 38004, 2009 .
- [٦] S. G. Sherman, L. A. Powell, A. C. Becnel, N. M. Wereley, Scaling temperature dependent rheology of magnetorheological fluids, *Journal of Applied Physics*, Vol. 117, No. 17, pp. 17C751, 2015 .
- [٧] s. mohamadi, *design and fabrication of smart damper with hydraulic oil based magnetorheological fluid*, MSc Thesis, Mechanical engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, 2014. (in Persian (فارسی))
- [٨] D. Wang, W. H. Liao, Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling, *Smart materials and structures*, Vol. 20, No. 2, pp. 023001, 2011 .
- [٩] M. Yu, S. Wang, J. Fu, Y. Peng, Unsteady analysis for oscillatory flow of magnetorheological fluid dampers based on Bingham plastic and Herschel–Bulkley models, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp. 1045389X13476151, 2013 .
- [١٠] N. Wereley, J. Cho, Y. Choi, S. Choi, Magnetorheological dampers in shear mode, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 1, pp. 015022, 2008 .
- [١١] A. Grunwald, A.-G. Olabi, Design of magneto-rheological (MR) valve, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 148, No. 1, pp. 211-223, 2008 .
- [١٢] A. Spaggiari, Properties and applications of Magnetorheological fluids, *Fracture and Structural Integrity*, No. 23, pp. 48-61, 2012 .
- [١٣] R. Delivorias, W. Witteman, J. Wismans, M. Geers, Research on smart materials: application of er and mr fluid in an automotive crash energy absorber, *Eindhoven: Eindhoven University of Technology De-partment of Mechanical Engineering*, 2004 .

- [14] H. Chiriac, G. Stoian, Influence of particle size distributions on magnetorheological fluid performances, in *Proceeding of*, IOP Publishing, pp. 072095 .
- [15] S. H. Piao, W. L. Zhang, H. J. Choi, Magnetic carbonyl iron suspension with sepiolite additive and its magnetorheological property, *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-4, 2014 .
- [16] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*: Courier Corporation, 2013 .
- [17] K. H. Song, B. J. Park, H. J. Choi, Effect of magnetic nanoparticle additive on characteristics of magnetorheological fluid, *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol. 45, No. 10, pp. 4045-4048, 2009 .
- [18] R. Turczyn, M. Kciuk, Preparation and study of model magnetorheological fluids, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 27 ,No. 2, pp. 131-134, 2008 .
- [19] N. L. Wilson, N. M. Wereley, W. Hu, G. J. Hiemenz, Analysis of a magnetorheological damper incorporating temperature dependence, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 63, No. 2-3, pp. 137-158, 2013 .
- [20] J. D. Carlson, D. Catanzarite, K. St. Clair, Commercial magneto-rheological fluid devices, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 10, No. 23n24, pp. 2857-2865, 1996 .
- [21] N. Wereley, *Magnetorheology: advances and applications*: Royal Society of Chemistry .2013 ,
- [22] K.-I. Jang, J. Seok, B.-K. Min, S. J. Lee, An electrochemomechanical polishing process using magnetorheological fluid, *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 50, No. 10, pp. 869-881, 2010 .
- [23] J. C. Poynor, *Innovative designs for magneto-rheological dampers*, Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001 .
- [24] R. Richards, *Comparison of Linear, Nonlinear, Hysteretic, and Probabilistic MR Damper Models*, Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007 .
- [25] X.-X. Bai, N. M. Wereley, A fail-safe magnetorheological energy absorber for shock and vibration isolation, *Journal of Applied Physics*, Vol. 115, No. 17, pp. 17B535, 2014 .
- [26] E. Guglielmino, T. Sireteanu, C. W. Stammers, G. Ghita, M. Giuclea, *Semi-active suspension control: improved vehicle ride and road friendliness*: Springer Science & Business Media, 2008 .
- [27] K.-G. Sung, S.-B. Choi, H.-G. Lee, K.-W. Min, S.-H. Lee, Performance comparison of MR dampers with three different working modes: shear, flow and mixed mode, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 19, No. 07n09, pp. 1556-1562, 2005 .

- [۲۸] N. M. Wereley, L. Pang, Nondimensional analysis of semi-active electrorheological and magnetorheological dampers using approximate parallel plate models, *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 5, pp. 732, 1998 .
- [۲۹] S. Hong, N. Wereley, Y. Choi, S. Choi, Analytical and experimental validation of a nondimensional Bingham model for mixed-mode magnetorheological dampers , *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 312, No. 3, pp. 399-417, 2008 .
- [۳۰] M. Ashtiani, S. Hashemabadi, A. Ghaffari, A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 374, pp. 716-73 .۲۰۱۵ ,.
- [۳۱] A.-M. Trendler, H. Böse, Influence of particle size on the rheological properties of magnetorheological suspensions, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 19, No. 07n09, pp. 1416-1422, 2005 .
- [۳۲] J. Zhang, J.-q. Zhang, J.-f. Jia ,Characteristic analysis of magnetorheological fluid based on different carriers, *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 15, pp. 252-255, 2008 .
- [۳۳] N. Wereley, A. Chaudhuri, J.-H. Yoo, S. John, S. Kotha, A. Suggs, R. Radhakrishnan, B. Love, T. Sudarshan, Bidisperse magnetorheological fluids using Fe particles at nanometer and micron scale, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No. 5, pp. 393-401, 2006 .
- [۳۴] N. Rosenfeld, N. M. Wereley, R. Radakrishnan, T. S .Sudarshan, Behavior of Magnetorheological Fluids Utilizing Nanopowder Iron, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 16, pp. 2392-2398, 2002 .
- [۳۵] K. Shah, M.-S. Seong, R. Upadhyay, S.-B. Choi, A low sedimentation magnetorheological fluid based on plate-like iron particles, and verification using a damper test, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 027001, 2013 .
- [۳۶] C. Sarkar, H. Hirani, Effect of particle size on shear stress of magnetorheological fluids, *Smart Science*, Vol. 3, No ,۲ .pp. 65-73, 2015 .
- [۳۷] K. Shah, S.-B. Choi, The influence of particle size on the rheological properties of plate-like iron particle based magnetorheological fluids, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 1, pp. 015004, 2014 .
- [۳۸] B. K. Kumbhar, S. R. Patil, A Study on Properties and Selection Criteria for Magneto-Rheological (MR) Fluid Components, *International Journal of ChemTech Research*,, vol6 (6), pp. 3303-3306, 2014 .
- [۳۹] M. Lita, A. Han, D. Susan-Resiga, Characterization of sedimentation and high magnetic field flow behavior of some magnetorheological fluids, in *Proceeding of*, IOP Publishing, pp. 012071 .

- [۴۰] S. E. Premalatha, R. Chokkalingam, M. Mahendran, Magneto mechanical properties of iron based MR fluids, *American Journal of Polymer Science*, Vol. 2, No. 4, pp. 50-55, 2012 .
- [۴۱] W. Jiang, Y. Zhang, S. Xuan, C. Guo, X. Gong, Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 24, pp. 3246-3250, 2011 .
- [۴۲] M. Kciuk, S. Kciuk, R. Turczyn, Magnetorheological characterisation of carbonyl iron based suspension, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 33, No. 2, pp. 135-141, 2009 .
- [۴۳] MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid ,L. corporation, ed., 2011 .
- [۴۴] J. Jiang, Y. Tian, D. Ren, Y. Meng, An experimental study on the normal stress of magnetorheological fluids, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 085012, 2011 .
- [۴۵] M. S. Kim, Y. D. Liu, B. J. Park, C.-Y. You, H. J. Choi, Carbonyl iron particles dispersed in a polymer solution and their rheological characteristics under applied magnetic field, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 18, No. 2, pp. 664-667, 2012 .
- [۴۶] M. Ocalan, G. H. McKinley ,High-flux magnetorheology at elevated temperatures, *Rheologica Acta*, Vol. 52, No. 7, pp. 623-641, 2013 .
- [۴۷] S. Behrens, S. Essig, A facile procedure for magnetic fluids using room temperature ionic liquids, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 22, No. 9, pp. 3811-3816, 2012 .
- [۴۸] H. Sahin, X. Wang, F. Gordaninejad, Temperature dependence of magnetorheological materials, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, No. 18, pp. 2215-2222, 2009 .
- [۴۹] J. Rabinow, *Magnetic-Fluid Control Devices*, 0148-7191, SAE Technical Paper, pp. 1949 .
- [۵۰] K. Esteki, A. Bagchi, R. Sedaghati, Dynamic analysis of electro-and magnetorheological fluid dampers using duct flow models, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 3, pp. 035016, 2014 .
- [۵۱] G. M. Kamath, M. K. Hurt, N. M. Wereley, Analysis and testing of Bingham plastic behavior in semi-active electrorheological fluid dampers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 5, pp. 576, 1996 .
- [۵۲] D.-Y. Lee, N. M. Wereley, Quasi-steady Herschel-Bulkley analysis of electroand magnetorheological flow mode dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, No. 10, pp. 761-769, 1999 .
- [۵۳] G. A. Dimock, J.-H. Yoo, N. M. Wereley, Quasi-steady Bingham biplastic analysis of electrorheological and magnetorheological dampers, *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 13, No. 9, pp. 549-559, 2002 .

- [۵۴] X. Wang, F. Gordaninejad, Field-controllable electro-and magneto-rheological fluid dampers in flow mode using Herschel-Bulkley theory, in *Proceeding of, International Society for Optics and Photonics*, pp. 232-243 .
- [۵۵] Q.-H. Nguyen, S.-B. Choi, Dynamic modeling of an electrorheological damper considering the unsteady behavior of electrorheological fluid flow, *Smart materials and structures*, Vol. 18, No. 5, pp. 055016, 2009 .
- [۵۶] J. Gołdasz, B. Sapiński, Application Of CFD To Modeling Of Squeeze Mode Magnetorheological Dampers, *acta mechanica et automatica*, Vol. 9, No. 3, pp. 129-134, 2015 .
- [۵۷] D. G. Breese, F. Gordaninejad, Heating of magneto-rheological fluid dampers: a theoretical study, in *Proceeding of, International Society for Optics and Photonics*, pp. 2-10 .
- [۵۸] M. B. Dogruoz, E. L. Wang, F. Gordaninejad, A. J. Stipanovic, Augmenting heat transfer from fail-safe magneto-rheological fluid dampers using fins, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, No. 2, pp. 79-86, 2003 .
- [۵۹] D. Batterbee, D. Sims, Temperature sensitive controller performance of MR dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2008 .
- [۶۰] A. Ghaffari, S. H. Hashemabadi, M. Ashtiani, A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 26, No. 8, pp. 881-904, 2۰۱۵
- [۶۱] R. Bell, J. Karli, A. Vavreck, D. Zimmerman, G. Ngatu, N. Wereley, Magnetorheology of submicron diameter iron microwires dispersed in silicone oil, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 1, pp. 015028, 2008 .
- [۶۲] Gołdasz, J. and Alexandridis, A.A., 2012. Medium-and high-frequency analysis of magnetorheological fluid dampers. *Journal of Vibration and Control*, 18(14), pp.2140- 2148.
- [۶۳] Pascal, J. P., and H. Pascal. "On some non-linear shear flows of non-Newtonian fluids." *International journal of non-linear mechanics* 30, no. 4 (1995): 487-500.
- [۶۴] Das, D., and J. H. Arakeri. "Unsteady laminar duct flow with a given volume flow rate variation." *Journal of applied mechanics* 67, no. 2 (2000): 274-281
- [۶۵] S. C. Chapra, Applied numerical methods, *With MATLAB for Engineers and Scientists*, 2012 .
- [۶۶] Y. A. Cengel, J. Hernán Pérez, Heat transfer: a practical approach. Transferencia de calor, 2004 .

- [۶۷] F. D. Goncalves, Dynamic analysis of semi-active control techniques for vehicle applications, 2001 .
- [۶۸] Reichert Jr, Brian Anthony. *Application of magnetorheological dampers for vehicle seat suspensions*. Diss. Virginia Tech, 1997.
- [۶۹] M. Ahmadian, X. Song, S. C. Southward, No-jerk skyhook control methods for semiactive suspensions, *Journal of vibration and acoustics*, Vol. 126, No. 4, pp. 580-584, 2004 .
- [۷۰] شیپانی. م، (۱۳۸۹)، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، "مدل‌سازی و کنترل دمپر مگنتورئولوژیک"، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [۷۱] A. Agharkakli, G. S. Sabet, A. Barouz, Simulation and analysis of passive and active suspension system using quarter car model for different road profile, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Vol. 3, No. 5, pp. 636-644, 2012 .
- [۷۲] Wilson, Nicholas Louis. "Semi-active six degree of freedom vibration control." (2012).
- [۷۳] K. Shah, M.-S. Seong, R. Upadhyay, S.-B. Choi, A low sedimentation magnetorheological fluid based on plate-like iron particles, and verification using a damper test, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 027001, 2014 .

Abstract

Magnetorheological fluids (MRFs) are type of smart materials that its rheological properties change with applying magnetic field. These fluids due to the yield stress and controllable viscosity have vast applications such as dampers, electronic clutches and rotary brakes, medical instruments, polishing and,... hence in a past two decades numerous studies have been performed on fabrication and application of MRFs. Magnetorheological fluids construct from dispersion of magnetizable particles into carrier fluid. Because of density mismatch between particles and carrier fluid, Stabilizer will be added to MRFs, nevertheless MRFs stability is the main problem on these fluids development. The other usage problem of MRF is considerable effect of temperature on rheological behavior, since it is generally works in small container with large heat generation. In this study various kinds of MR fluids were made. These samples were compared in term of sedimentation. Because of high heat capacity Silicon oil for reduction of temperature effect on rheological behavior were used for MRF samples fabrications. The relation between MRF yield stress and applied field and temperature are presented. Design, evaluate the performance and control of the magnetorheological damper need an appropriate dynamic model. Types of presented model for the magnetorheological damper can be categorized into two classes: phenomenological and physical modeling. Phenomenological models need to damper fabrication and experiment to parameter identification but physical models are only dependent to geometrical properties of the damper and fluid properties. For this reason these models are appropriate to design phase. Mixed mode MR dampers due to high force capacity and suitable performance on all piston velocity (even in low velocities) are suitable for vehicles applications. For the first time dynamic modeling of the mixed mode MR damper with considering inertia term was done in this study and in addition considering temperature changes in modeling process is considered. Despite of importance of considering temperature duo to high changes of temperature of working MRF, few study have been considered temperature in a dynamic model. In order to represent efficiency of MR damper into passive suspension system, Sky- Hook control logic was applied to one quarter vehicle model. A comparison between passive and semi active suspension with magnetorheological damper including Sky- Hook controller have been performed.

Keyword: Magnetorheological fluid, mixed mode magnetorheological damper, dynamic model, temperature



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

MSc Theseis in Mechanical Engineering Applied Mechanics

**Parametric dynamic modeling and control of
magnetorheological damper, considering temperature effects**

by:ehsan kiyumarsi

Supervisers:

Amir jalali

Mahmood norouzi

Advisor:

Mojtaba ghattee

September 2016