

طراحی و شبیه‌سازی میراگر "ام آر" برای خودروهای سبک با استفاده از

برهم‌کنش چند فیزیکی

محمد محسن مدرس قیصری	سعید محبوب مقدس*	علی باقری فهرجی
دکتری دانشکده فنی و مهندسی	دانشیار دانشکده فنی و مهندسی	دانشجوی ارشد دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین(ع)	دانشگاه جامع امام حسین(ع)	دانشگاه جامع امام حسین(ع)
mo_modarres@ihu.ac.ir	smahjoubmoghadass@ihu.ac.ir	ali.bagheri@ihu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

چکیده

ارتعاشات می‌تواند اثرات مطلوب و یا نامطلوبی بر روی سیستم‌ها و یا انسان‌ها وارد آورد. ناراحتی سرنشینان خودروها بر اثر حرکت بر روی جاده‌های ناهموار، نمونه‌ای از اثرات نامطلوب ارتعاشات است. برای جلوگیری از این آسیب‌ها، از انواع میراگرها استفاده می‌شود. میراگرهای مگنتورئولوژیکیال (ام آر) یکی از فناوری‌های پیشرفته در زمینه سیستم‌های تعلیق است. امروزه پژوهش‌های فراوانی در جهت افزایش نیروی میرایی، کاهش هزینه‌های ساخت و نیز طراحی و شبیه‌سازی یک میراگر با قابلیت سهولت ساخت در حال انجام است که بیانگر ضرورت پژوهش پیش‌رو است. در این مقاله پس از بررسی‌های نظری پیرامون این نوع از میراگرها و استخراج معادلات حاکم بر مدل مکانیکی (توسط مدل پلاستیک بینگهام)، میدان الکترومغناطیسی (توسط معادلات ماکسول و قانون آمپر) و نیز میدان جریان (توسط معادله ناور-استوکس)، سعی شد تا یک میراگر ام آر دو میله که نمونه بدیعی از این میراگرها است، از طریق برهم‌کنش چندفیزیکی (سیال-جامد-مغناطیس) به‌وسیله نرم‌افزار کامسول، طراحی و شبیه‌سازی شود و سپس به تحلیل نتایج پرداخته شود. همچنین نمونه طراحی‌شده، برخلاف نمونه‌های قبلی این میراگرها، نیازی به محفظه جبران‌ساز گازی، ندارد. اطلاعات به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با توجه به الزامات یک کمک فنر خودرو سبک که به نیروی میرایی بیشتر از ۱۰۰۰ نیوتن نیاز دارد، این میراگر، یک دستگاه نیمه‌فعال مناسب است و می‌تواند حداقل مقدار نیروی میرایی مورد نیاز را، تولید کرده و به‌صورت گسترده در حمل‌ونقل و زمینه‌های دیگر، همچون سیستم تعلیق خودروهای سبک، مورد استفاده قرار گیرد و سبب بهبود راحتی و افزایش کیفیت عملکرد وسیله نقلیه شود.

واژگان کلیدی: میراگر، ام آر، شبیه‌سازی، حل عددی، طراحی میراگر، سیستم تعلیق

۱. مقدمه

به دسته‌ای از سیالات که خواص رئولوژیکی آنها، به شدت میدان مغناطیسی و یا الکتریکی وابسته است، سیالات هوشمند گفته می‌شود [۱] و کشف این سیالات به دهه ۱۹۴۰ برمی‌گردد. به‌طور کل به خواصی که مربوط به جریان و تغییر شکل‌های سیال که ناشی از تنش‌های تسلیم است، خواص رئولوژیکی یک سیال می‌گویند. یک دسته از سیالات هوشمند، سیالات ام آر هستند. از مهم‌ترین مشخصه‌های این سیالات، این مورد است که تنش تسلیم آنها، به سرعت و به‌طور پیوسته و برگشت‌پذیر، با اعمال میدان مغناطیسی و یا الکتریکی قابل کنترل است که این تغییر در تنش تسلیم، سبب تغییر خواص سیال می‌شود. بنابراین در گسترش دستگاه‌هایی که از سیالات ام آر استفاده می‌کنند، کنترل لزجت سیال، امری بسیار مهم است؛ زیرا لزجت آنها مستقیماً بر روی عملکردشان تأثیر می‌گذارد. سیال ام آر در حالت غیرفعال، یک سیال نیوتونی با ذرات معلق قابل مغناطیسه شدن است، اما در هنگامی که تحت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، رفتاری متفاوت از خود بروز می‌دهد. هنگامی که میدان مغناطیسی به سیال ام آر اعمال می‌شود، سیال تا یک نقطه تسلیم، از خود خواصی نظیر خواص جامد نشان می‌دهد. این تنش تسلیم که همان تنش تسلیم ظاهری است، وابسته به میدان مغناطیسی اعمال شده به سیال است. تنش تسلیم تا یک مقدار خاصی زیاد می‌شود و پس از آن، به دلیل اینکه سیال به اشباع مغناطیسی می‌رسد، افزایش شار مغناطیسی دیگر اثری بر افزایش مقدار تنش تسلیم نخواهد داشت. سیال ام آر از ترکیب ذرات ریز مغناطیسی (مانند کربونیل آهن) در سیال حامل (مانند روغن‌های هیدروکربن) ایجاد شده که در حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد حجم سیال را ذرات مغناطیسی اشغال می‌کند [۲]. در حضور میدان مغناطیسی، این ذرات به شکل زنجیره‌هایی موازی با میدان قرار می‌گیرند که باعث تشکیل یک دوقطبی مغناطیسی می‌شوند و به حالت نیمه‌جامد درمی‌آیند و مسیر جریان سیال را محدود می‌کنند.

همچنین برای جلوگیری از ته‌نشین شدن ذرات، تغییر ویسکوزیته و افزایش پایداری، به سیال مورد نظر افزودنی‌هایی اضافه می‌شود [۳].

سیالات ام آر به‌وسیله یک منحنی که رابطه بین تنش برشی را با شدت میدان مغناطیسی ممکن می‌سازد، دسته‌بندی می‌شوند. میراگرهایی که با سیال ام آر کار می‌کنند، جزء دسته سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال قرار می‌گیرند. بنابراین این دسته از میراگرها، سیستم‌هایی برای کنترل نیمه‌فعال هستند که به دلیل سادگی مکانیکی، دامنه دینامیکی بالا، نیاز به توان کم و ظرفیت نیرویی زیاد، از مستعدترین دستگاه‌ها برای کاهش ارتعاشات ساختاری هستند. از موارد کاربرد این نوع از میراگرها می‌توان به کاربرد آنها در صنایع نظامی (مانند میراگردن ضربه مکانیکی ناشی از حرکت پرتابه در سلاح‌های جنگی)، طراحی لوازم خانگی (مانند میراگردن ارتعاشات در ماشین لباسشویی)، در ماشین‌آلات صنعتی (مانند ماشین‌های تراش)، طراحی خودرو (در طراحی سیستم‌های تعلیق، ترمز، کلاچ و ...)، صنایع ساختمانی (مانند میراگردن نیروهای وارد بر سازه‌های تحت بار و زمین‌لرزه)، صنایع پزشکی و دستگاه‌های توانبخشی اشاره کرد [۴].

در سال ۲۰۰۳ اویادیچی و همکارانش [۵] نشان دادند که یکی از روش‌های افزایش کارایی میراگر ام آر، افزایش تعداد سیم‌پیچ‌های به کار رفته در آنها است. در این روش، افزایش تعداد سیم‌پیچ‌ها، سبب افزایش حجم فعال مغناطیسی و به تبع آن افزایش نیروی میرایی می‌شود که این افزایش نیرو، غالباً خود را در جریان‌های حداکثری نشان داده و در جریان‌های پایین، تأثیر چندانی ندارد. این روش نیز به دلیل افزایش طول پیستون، باعث محدودیت حرکتی پیستون می‌شود.

در یکی از پژوهش‌ها که در سال ۲۰۰۷ انجام شد، نگوین و همکارانش [۶]، به طراحی بهینه میراگرهایی با تعداد سیم‌پیچ متفاوت پرداختند که حاصل پژوهش آنها این بود که درچه ام آر دو سیم‌پیچ، نسبت به درچه تک سیم‌پیچ، بهترین نسبت

دریچه را می‌دهد، اما توان مصرفی بالاتر و پیچیدگی ساخت دریچه دو سیم‌پیچ نسبت به دریچه سیم‌پیچ، باید مدنظر قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۱، پارلاک و ساهین [۷]، تأثیرات تغییرات دمایی را روی رفتار میراگر ام آر مورد بررسی قرار دادند. نتیجه پژوهش آنها این بود که دما به اندازه سرعت بر رفتار سیال ام آر، تأثیرگذار است.

در سال ۲۰۱۳، بائی و همکارانش [۸] به مطالعه، طراحی، ساخت و آزمایش یک میراگر مغناطیسی پرداختند که می‌تواند به‌طور هم‌زمان، محدوده دینامیکی بزرگ و بار ضربه‌ای پایین در سرعت بالای پیستون (در حالت خاموش) ایجاد کند. این دو ویژگی میراگر برای دستیابی به عملکرد مناسب، در سیستم تعلیق خودروهای زمینی، حیاتی هستند.

در همان سال، شیائو و همکارانش [۹]، به طراحی سیستم تعلیق نیمه‌فعال جدید با استفاده از میراگر ام آر، بر روی یک خودروی سبک پرداختند. این مقاله بر تجزیه و تحلیل و کنترل یک سیستم تعلیق نیمه‌فعال، برای وسایل نقلیه سبک وزن با بدنه کوچک، تمرکز داشت. در این پژوهش، یک میراگر ام آر جدید، با شبیه‌سازی کامپیوتری، طراحی و تأیید شد. پس از آن مدل‌هایی از سیستم تعلیق یک چهارم خودرو با فنر و میراگر، ساخته شد. با توجه به پدیده‌های دینامیکی غیرخطی اجزای سیستم، یک کنترل‌کننده منطق فازی خودتنظیم ایجاد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیستم تعلیق طراحی شده با کنترل‌کننده‌اش، عملکرد خوبی در سرکوب ارتعاشات، در شرایط مختلف عملیاتی دارد.

در سال ۲۰۱۴ منگال و همکارانش [۱۰]، یک میراگر MR طراحی و آن را با نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی کردند. اعتبار تحلیل شبیه‌سازی المان محدود از طریق آزمایشات تأیید شد. حداکثر نیروی میرایی ۵۰۰ نیوتن و اختلاف نیروی میرایی بین آزمایش و شبیه‌سازی حدود ۱۰ درصد بود.

در سال ۲۰۱۵، سارکار و همکارانش [۱۱] به بررسی تأثیر اندازه ذرات مغناطیسی موجود در سیال حامل، بر تنش برشی سیال پرداختند و دریافتند که ذرات با اندازه بزرگتر در مقایسه با ذرات کوچکتر، تنش برشی بیشتری را ایجاد می‌کنند.

در یکی از پژوهش‌ها که در سال ۲۰۱۶ انجام شد، اسدی و همکارانش [۱۲]، تحقیقات خود را در جهت دستیابی به عملکرد مطلوب سیستم‌های تعلیق با میراگر ام آر انجام دادند. آنها با طراحی و ساخت یک نمونه از این میراگرها و با انجام آزمایشاتی بر روی آن، توانستند به نیروی میرایی متغیر در محدوده ۱۵۴۰-۱۳۰۲ نیوتن دست یابند.

در سال ۲۰۱۸، باهیودین و همکارانش [۱۳]، به بررسی اثرات دمایی روی برخی از پارامترهای سیال ام آر همچون تنش برشی، تنش تسلیم و میدان مغناطیسی پرداختند و نتایج را در دهامای متفاوت نمایش دادند و روشی را برای رسیدن به بالاترین میزان دقت ارائه دادند.

در سال ۲۰۲۰، السادی و همکارانش [۱۴]، به مقایسه روش‌های عددی و تحلیلی برای به‌دست‌آوردن پارامترهای طراحی سیال ام آر پرداختند. از نتیجه پژوهش‌های آنها مشخص شد که مدل‌های عددی، نسبت به مدل‌های تحلیلی، سودمندتر است. همچنین می‌توان پارامترهای طراحی بیشتری را پیش‌بینی نمود و نیز مفروضات کمتری را نیز شامل می‌شود. در سال ۲۰۲۰، گانشا و همکارانش [۱۵] یک میراگر ام آر دولوله تک سیم‌پیچ طراحی کردند و سپس چگالی شار مغناطیسی میراگر را تحت حالات مختلف، از طریق شبیه‌سازی به‌دست آوردند.

در سال ۲۰۲۱، هو و همکارانش [۱۶]، موفق به طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک نمونه میراگر ام آر با ساختار جدید شدند. همچنین نتایج شبیه‌سازی آنها، هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج نمونه ساخته‌شده داشت. نمونه میراگر ساخته شده آنها توانست در جریان ۱/۴ آمپر، نیروی میرایی برابر با ۱۲۰۰ نیوتن تولید کند.

در سال ۲۰۲۲ مراده و همکارانش [۱۷] به توسعه میراگر مغناطیسی رئولوژیکی بهینه و کم‌هزینه برای خودرو پرداختند. این پژوهش، یک رویکرد سیستماتیک، برای طراحی و توسعه یک خودرو سبک و کم‌هزینه ارائه می‌کند. در این پژوهش، قابلیت انتقال نیرو و نسبت میرایی که پارامترهای مهمی برای کنترل جاده و راحتی سواری هستند، مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی و مشاهده نتایج، مشخص شد که میراگر ام آر ام‌تی بر سیال ام آر کم‌هزینه، عملکرد نیروی میرایی بهتری در مقایسه با میراگرهای غیرفعال دارد. همچنین ممکن است به بهبود هندلینگ و راحتی وسایل نقلیه مسافربری کمک کند. همچنین در همان سال، لیو و همکاران، موفق به ساخت یک نمونه میراگر ام آر با شکاف میرایی پریچ و خم شدند. نتایج شبیه‌سازی و تجربی پژوهش آنها نشان می‌دهد که شاخص‌های عملکرد میرایی میراگر ام آر طراحی شده، نسبت به حالت میراگر ام آر با شکاف میرایی مستقیم، تا حد زیادی بهبود یافته است و نیروی میرایی این میراگر، ۶۹۱۷ نیوتن گزارش شد.

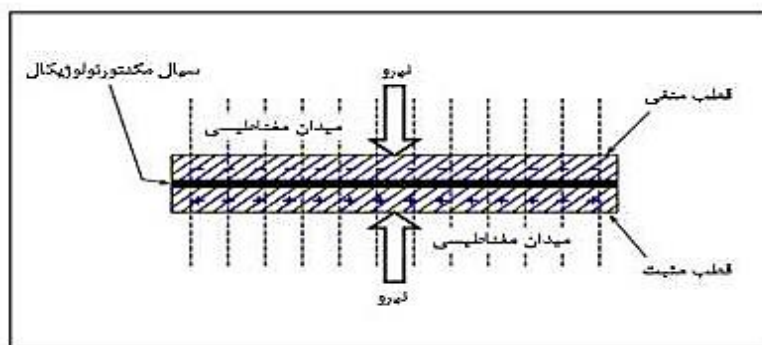
در پژوهش حاضر، ابتدا به بررسی نظری، پیرامون میراگرهای ام آر و استخراج معادلات حاکم بر آن پرداخته شده است. پس از این مراحل، طراحی و شبیه‌سازی میراگر مدنظر با استفاده از

نرم‌افزار کامسول صورت گرفته است و در گام نهایی این پژوهش، به تفسیر نتایج حاصله، پرداخته شده است.

۲. بررسی نظری

۲-۱. حالت‌های کاری سیالات ام آر

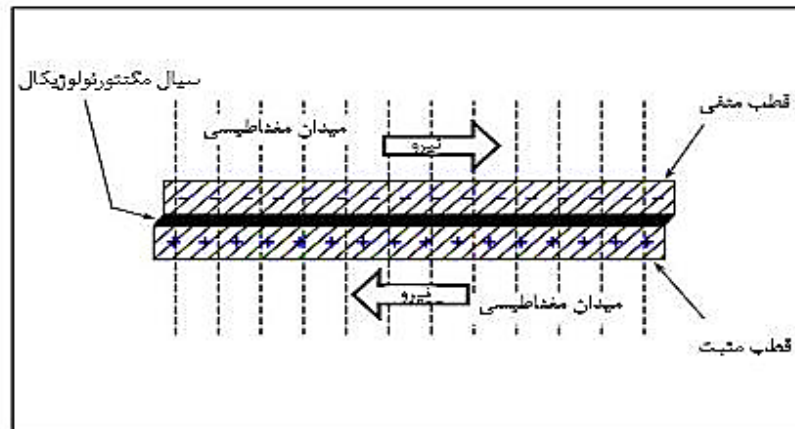
بسته به جریان سیال، سه حالت برای سیالات ام آر وجود دارد. بنابراین به‌طور کلی این سیالات را می‌توان به ۳ روش کلی مورد استفاده قرار داد که عبارتند از حالت فشاری^۲، برشی^۳ و درپجه‌ای^۴. دانستن اینکه می‌توان برای دستیابی به نیروی بزرگتر و کارکرد بیشتر، از بیش از یک حالت سیال ام آر کمک گرفت، دارای اهمیت است. در دستگاهی که از حالت فشاری بهره می‌گیرد، یک لایه نازک از سیال ام آر بین سطوح قطبی ساندویچ می‌شود. در این حالت با اعمال میدان مغناطیسی در راستای عمود بر صفحات، ذرات مغناطیسی با ایجاد زنجیره‌هایی در راستای اعمال میدان مغناطیسی، به صفحات نیرو وارد کرده و این صفحات را نسبت به یکدیگر جابه‌جا می‌کنند که در شکل ۱ نشان داده شده است. این حالت کاری در دامنه ارتعاشات پایین و نیروهای دینامیکی بالا، مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱. سیال ام آر استفاده شده در حالت فشاری [۱۸]

حالت برشی برای تولید میراگرهایی که در آنها، تولید نیروی بزرگ لازم نیست، استفاده می‌شود.

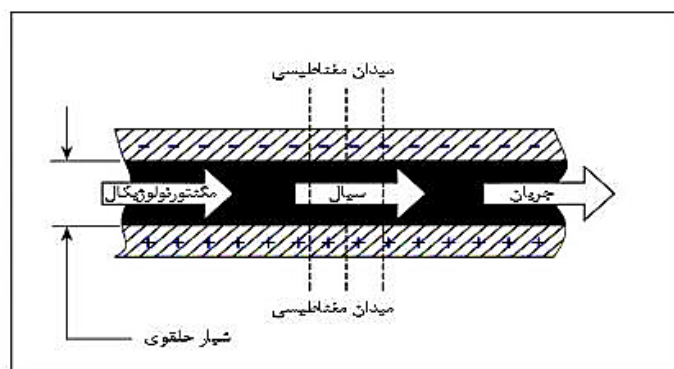
در حالت برشی نیز یک لایه از سیال ام آر، بین دو صفحه که دارای حرکت نسبی هستند، قرار می‌گیرد و راستای میدان اعمالی، عمود بر صفحات که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. سیال ام آر استفاده شده در حالت برشی [۱۹]

راستای میدان آرایش گرفته و در برابر جریان سیال مقاومت می‌کند تا مانع از جریان سیال از یک محفظه به محفظه دیگر شود.

با توجه به شکل ۳، در حالت درپچه‌ای، سیال ام آر با فشار از بین صفحات یک درپچه، جریان است و میدان مغناطیسی، عمود بر راستای جریان سیال اعمال می‌گردد. در این شرایط، با تغییر شدت میدان مغناطیسی، ذرات معلق در سیال ام آر در



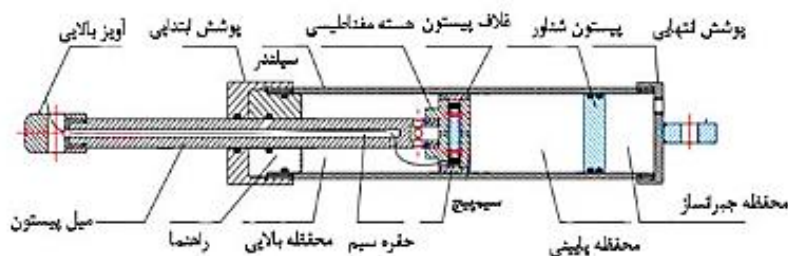
شکل ۳. سیال ام آر استفاده شده در حالت درپچه‌ای [۱۹]

۲-۲. انواع میراگرهای ام آر متداول

در حالت کلی، سه دسته اصلی از میراگرهای ام آر موجود است: میراگر تک لوله‌ای^۵، دو لوله‌ای^۶ و دوسر متحرک^۷. میراگر تک لوله‌ای، رایج‌ترین نوع آن است. این نوع از میراگرها به دلیل قابل استفاده بودن در موقعیت‌های گوناگون و نصب در

همچنین زمانی که سیال ام آر در حالت درپچه‌ای کار می‌کند، مناطقی را که در آن سیال مدنظر در معرض خطوط شار مغناطیسی است را مناطق فعال می‌گویند. خطوط شار در این مناطق، مانع از عبور جریان، از یک طرف پیستون به طرف دیگر می‌شود.

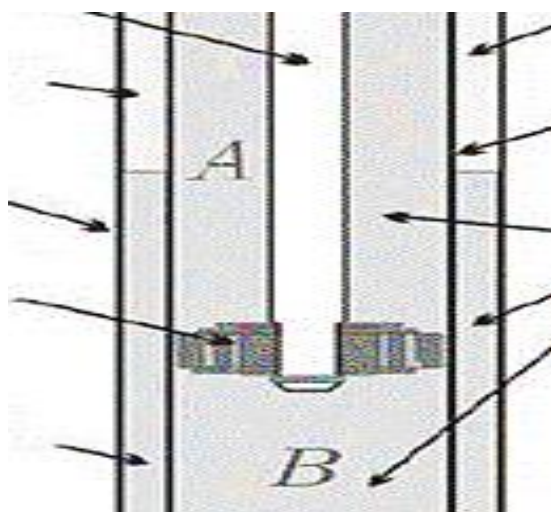
جهت‌های دلخواه و همچنین حجم کم، بیشترین کاربرد را دارند. این نوع از میراگرها تنها دارای یک مخزن سیال ام آر هستند که در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



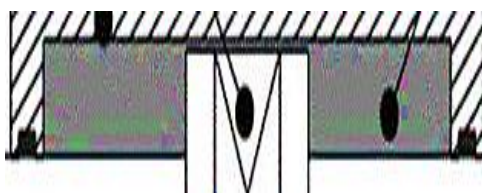
شکل ۴. مقطع یک میراگر ام آر تک لوله‌ای [۲۰]

پستون، یک محفظه خارجی ایجاد شده است که قسمتی از آن با سیال ام آر و قسمتی دیگر با گاز پر شده است [۲۱]. محفظه داخلی و محفظه خارجی به وسیله یک شیر انتهایی، از یکدیگر جدا شده‌اند که در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

میراگرهای دو لوله‌ای، دارای دو محفظه سیال بوده که محفظه داخلی، راهنمای حرکت پستون بوده و عملکردی مشابه سیلندر در میراگر تک لوله‌ای دارد و در محفظه داخلی، تنها سیال ام آر است. برای جبران اختلاف حجم بر اثر حرکت میل



شکل ۵. مقطعی از میراگر دو لوله‌ای ام آر [۲۲]

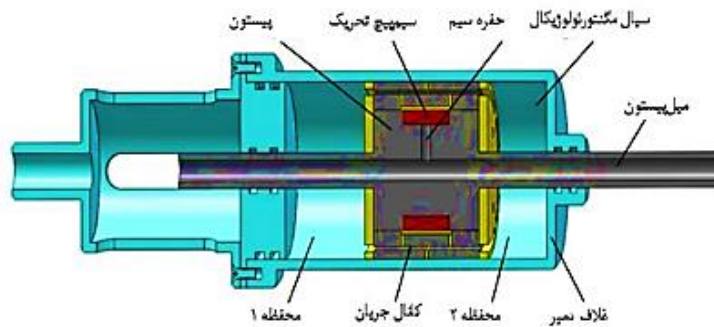


شکل ۶. مقطع میراگر دو طرفه ام آر [۲۳]

هندسه میراگرهای دو سر متحرک به گونه‌ای است که دو دسته پستون با قطر یکسان، از دو طرف سیلندر بیرون آمده است. نمونه ساده شده یک میراگر دو طرفه در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

البته امروزه، انواع میراگرهای ام آر با مکانیزم‌های پیشرفته‌تری ساخته شده است که می‌تواند عملکرد میراگر ام آر را بهبود

بخشد [۲۴]. یک نمونه از این میراگرها در شکل ۷ نمایش داده شده است.



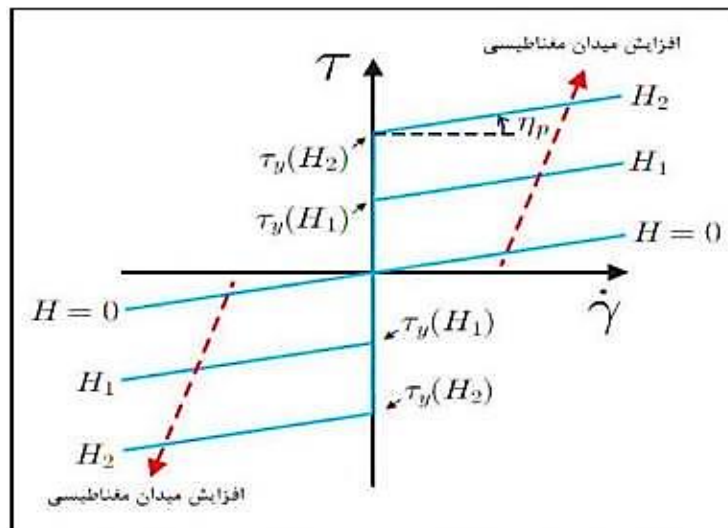
شکل ۷. یک نمونه میراگر ام آر با ساختار جدید [۲۴]

۲-۳. مدل‌های ریاضی ارائه شده برای سیال ام آر

تا به امروز مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی رفتار میراگرهای ام آر پیشنهاد شده است. این مدل‌ها نقش مهمی را در گسترش کاربرد این سیالات ایفا می‌کنند. مدل ویسکوپلاستیک بینگهام^۸، مدل گاموتو و فلیسکو^۹ مدل بوک-ون^{۱۰} چند نمونه از شاخص‌ترین مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده است که برای توصیف خصوصیات رئولوژیکال این سیالات استفاده می‌شود. صحت روش‌های ذکر شده از مقایسه نتایج آنها با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی مورد تأیید قرار گرفته است. این مدل‌ها، علاوه بر حفظ ویژگی‌های غیرخطی و

هیستریزیس میراگر ام آر، از نظر روابط ریاضی نیز کاربردی‌تر و نیز ساده‌تر است.

طبق مدل بینگهام و با توجه به شکل ۸، تا هنگامی که تنش برشی اعمالی از تنش تسلیم سیال کمتر باشد، سیال ساکن مانده و رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهد. اما بعد از عبور تنش برشی اعمالی از تنش تسلیم سیال، این سیال همانند یک سیال نیوتونی جریان می‌یابد. منطقه پیش از تسلیم، ماهیت ویسکوالاستیک دارد. درحالی که منطقه پس از تسلیم، رفتار ویسکوزی غالبی را نشان می‌دهد.



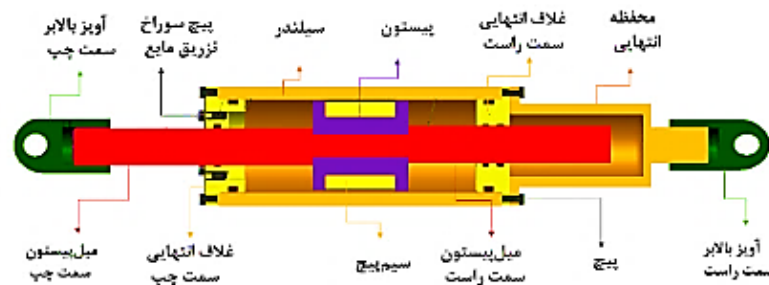
شکل ۸. مدل بینگهام منحنی تنش برشی بر حسب نرخ کرنش برشی

۳. اصول و نحوه کار میراگر مدنظر

عملکرد میراگرهای ام آر بر اساس طراحی و شبیه‌سازی آنها ارزیابی می‌شود. براین اساس، در این مقاله یک روش شبیه‌سازی میراگر ام آر با در نظر گرفتن برهم‌کنش چندفیزیکی ایجاد می‌شود. در این گام، یک میراگر ام آر مناسب برای سیستم تعلیق خودرو طراحی می‌شود که یکی از ملزومات سیستم تعلیق خودرو است. این مدل میراگر، یکی از بدیع‌ترین مدل‌های طراحی شده برای میراگرهای ام آر است که در شکل

۷ آمده است. در این مدل، برخلاف مدل‌های مرسوم و قدیمی (مدل‌های شکل ۴ و ۵)، نیازی به محفظه جبران‌سازی گاز، نیست که سبب سهولت ساخت و نیز ضریب اطمینان بالاتر می‌شود.

مطابق با شکل ۹، میراگر ام آر پیشنهادی از آویز بالابر، میل پیستون، پیچ، غلاف انتهایی، بلوک سیلندر، سیم پیچ تحریک، پیستون و محفظه انتهایی تشکیل شده است. این میراگر ام آر، در حالت برشی و در چپه‌ای کار می‌کند.



شکل ۹. طرح کلی هندسه میراگر ام آر

جریانی اعمال می‌شود، یک میدان مغناطیسی در اطراف سیم پیچ ایجاد می‌شود و خطوط شار مغناطیسی به‌طور متوالی از پیستون و سیلندر عبور می‌کنند و یک حلقه بسته را ایجاد می‌کنند. بدین صورت، سیالات ام آر، اثر رئولوژیکی را در شکاف میرایی با یک میدان مغناطیسی تولید می‌کنند [۲۵] و کنترل جریان سیم پیچ تحریک می‌تواند شدت میدان مغناطیسی را در داخل شکاف میرایی تغییر دهد. این امر باعث می‌شود که ویسکوزیته و تنش تسلیم برشی سیال ام آر که در کانال جریان دارد، تغییر کند و منجر به تغییر اختلاف فشار بین دو محفظه شود و در نتیجه یک اثر کنترلی بر نیروی میرایی خروجی حاصل شود [۲۶].

۴. روابط ریاضی حاکم بر مدل میراگر ام آر

در ادامه، روابط ریاضی حاکم بر هر یک از فیزیک‌ها، استباط شده و مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

۴-۱. مدل مکانیکی

میل پیستون‌های چپ و راست، به‌طور کلی از طریق رزوه به هم متصل می‌شوند و بنابراین پیستون، بین دو میل پیستون ثابت می‌شود. سیم پیچ تحریک به‌طور یکنواخت روی پیستون پیچیده می‌شود و از طریق سوراخ هدایت روی پیستون و میل پیستون، به بیرون از میراگر هدایت می‌شود. پیستون، داخل میراگر را به دو محفظه چپ و راست تقسیم می‌کند و محفظه با مایع ام آر، پر می‌شود. شکاف حلقوی بین پیستون و سیلندر، یک شکاف میرایی را تشکیل می‌دهد که دو محفظه را به هم متصل می‌کند. برای تسهیل تزریق مایع، دو سوراخ تزریق مایع به‌طور یکنواخت، در قسمت انتهایی سمت چپ میراگر، ایجاد شده است. برخلاف میراگرهای معمولی، نیروی میرایی خروجی میراگرهای ام آر، توسط جریان تحریک، تولید می‌شود. هنگامی که میراگر ام آر تحریک می‌شود، حرکت رفت و برگشتی پیستون، باعث تغییر حجم محفظه چپ و راست می‌شود و در نتیجه سیال ام آر را مجبور می‌کند که از طریق کانال میرایی جریان یابد. هنگامی که به سیم پیچ تحریک،

$$F_{23} = 4\pi R_c L_P \tau_y \operatorname{sgn}(v) \quad (6)$$

نیروی میرایی ناشی از میدان مغناطیسی در حالت دریچه‌ای عبارت است از:

$$F_{24} = \frac{2cL_P}{t_d} A_p \tau_y \operatorname{sgn}(v) \quad (7)$$

به روشی مشابه، نیروی میرایی ناشی از اعمال میدان مغناطیسی، برابر است با مجموع معادلات ۶ و ۷.

$$F_2 = \left(4\pi R_c L_P + \frac{2cL_P A_p}{t_d} \right) \tau_y \operatorname{sgn}(v) \quad (8)$$

با تجمیع معادلات ۵ و ۸، نیروی میرایی خروجی میراگر ام آر از رابطه ۹ حاصل می‌شود.

$$F = \left(\frac{2\pi R_c L \eta}{t_d} + \frac{6L \eta A_p^2}{\pi R_c t_d^3} \right) v_p + \left(4\pi R_c L_P + \frac{2cL_P A_p}{t_d} \right) \tau_y \operatorname{sgn}(v) \quad (9)$$

η ویسکوزیته سیال ام آر بدون میدان مغناطیسی است. A_p ناحیه مؤثر پیستون است که از رابطه ۱۰ حاصل می‌شود. v_p سرعت پیستون است. c ضریب تصحیح^{۱۱} است که از رابطه ۱۱ حاصل می‌شود. همچنین τ_y تنش تسلیم سیال ام آر در شکاف میرایی است.

$$A_p = \pi R^2 - \pi R_b^2 - \pi [(R_c + t_d)^2 - R_c^2] \quad (10)$$

$$c = 2.07 + \frac{12\eta Q}{12\eta Q + 0.8\pi R_c t_d^2 \tau_y} \quad (11)$$

تمامی پارامترهای موجود در روابط ۳ تا ۱۱ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در این گام، سعی خواهد شد تا با استفاده از روابط مربوط به سیال و میراگر ام آر در حالت دریچه‌ای و برشی، روابطی براساس مدل پلاستیک بینگهام استخراج شود.

با توجه به مدل بینگهام، نیروی میرایی خروجی، مجموع نیروهای میرایی ناشی از ویسکوزیته و نیروی میرایی ناشی از القاء میدان مغناطیسی در زمان اعمال جریان است که عبارت است از [۲۷]:

$$F = F_1 + F_2 \quad (1)$$

F_1 نیروی میرایی ناشی از ویسکوزیته و F_2 نیروی میرایی ناشی از میدان مغناطیسی است.

با توجه به مطالب ذکر شده، سیال ام آر در محفظه را می‌توان دارای جریان برشی و جریان دریچه‌ای در نظر گرفت. بنابراین نیروی میرایی خروجی به نیروی میرایی تولید شده در حالت برشی و دریچه‌ای تقسیم می‌شود. براساس رابطه بینگهام، نیروی میرایی خروجی به صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود [۲۴، ۲۵]:

$$F = F_3 + F_4 \quad (2)$$

که F_3 نیروی میرایی در حالت برشی و F_4 نیروی میرایی در حالت دریچه‌ای است. بنابراین نیروی میرایی ناشی از ویسکوزیته در حالت برشی از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$F_{13} = \frac{2\pi R_c L \eta}{t_d} v_p \quad (3)$$

و نیروی میرایی ناشی از ویسکوزیته در حالت دریچه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F_{14} = \frac{6L \eta A_p^2}{\pi R_c t_d^3} v_p \quad (4)$$

برای میراگر ام آر در حالت دریچه‌ای و برشی، نیروی میرایی ناشی از ویسکوزیته که توسط سرعت آن ایجاد می‌شود، مجموع معادلات ۳ و ۴ است.

$$F_1 = \left(\frac{2\pi R_c L \eta}{t_d} + \frac{6L \eta A_p^2}{\pi R_c t_d^3} \right) v_p \quad (5)$$

نیروی میرایی ناشی از میدان مغناطیسی در حالت برشی عبارت است از:

رابطه بین چگالی شار مغناطیسی B و پتانسیل مغناطیسی A برابر است با:

$$B = \nabla \times A \quad (15)$$

رابطه بین چگالی شار مغناطیسی B و شدت میدان مغناطیسی H به شرح زیر است [۲۹].

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (16)$$

که در آن μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلاء و μ_r ضریب نفوذپذیری نسبی ماده مغناطیسی است.

با جایگزینی معادلات ۱۳، ۱۵ و ۱۶ در معادله ۱۲، قانون مدار آمپر به صورت زیر تعریف می شود.

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) - \sigma E = J_0 \quad (17)$$

برای مناطقی با مواد غیرمغناطیسی یا مواد با نفوذپذیری ثابت، مانند فولاد ضد زنگ و سیم پیچ تحریک، قانون مدار آمپر را می توان به صورت زیر نشان داد.

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} B) - \sigma E = J_0 \quad (18)$$

برای مواد مغناطیسی غیرخطی مانند سیال ام آر، قانون آمپر را می توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\nabla \times H - \sigma E = J_0 \quad (19)$$

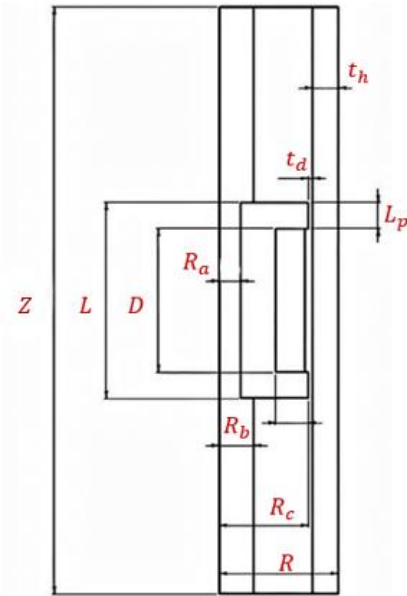
منحنی $B - H$ مواد مغناطیسی نرم غیرخطی را می توان به صورت زیر در نظر گرفت.

$$B = f(H) \quad (20)$$

۳-۴. مدل میدان جریان

هنگام تجزیه و تحلیل میدان جریان داخلی میراگر ام آر، سیال ام آر به عنوان یک سیال تک فاز تراکم ناپذیر در نظر گرفته می شود. اکنون، جریان سیال ام آر در میراگر را می توان با معادله ناویر-استوکس توصیف کرد [۳۰].

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \end{cases} \quad (21)$$



شکل ۱۰. پارامترهای طراحی میراگر ام آر

۲-۴. مدل میدان الکترومغناطیسی

معادلات حاکم بر الکترومغناطیس در میراگر ام آر، شامل معادله ماکسول و قانون آمپر است. طبق قانون میدان الکترومغناطیسی، بردار شدت میدان مغناطیسی H برای میدان مغناطیسی، قانون آمپر را برآورده می کند که به صورت زیر است [۲۸].

$$\nabla \times H = J \quad (12)$$

J چگالی جریان است. رابطه بین چگالی جریان و شدت میدان الکتریکی E به صورت زیر است.

$$J = \sigma E + J_0 \quad (13)$$

J_0 چگالی جریان خروجی و σ رسانایی است. با صرف نظر از جریان گردابی ضعیف تولید شده توسط سیم پیچ تحریک:

$$J = J_0 = \frac{NI}{A} \quad (14)$$

N تعداد دور سیم پیچ تحریک، I جریان تحریک، A مساحت سطح مقطع سیم پیچ تحریک است.

شی پیچیده، برهم‌کنش‌هایی بین میدان‌های فیزیکی مختلف دارد. در کل، فرایند تحلیل این میراگر نیازمند برهم‌کنش چندفیزیکی میان مغناطیس-سیال-جامد است. از آنجاکه مسئله مورد پژوهش، یک مسئله چندفیزیکی است که بخش الکترومغناطیس، مهم‌ترین بخش آن است، بنابراین در این پژوهش از نرم‌افزار کامسول ۵/۵a برای آنالیز المان محدود میراگر ام آر استفاده خواهد شد که قابلیت تحلیل چندفیزیکی را دارا است و نیز قادر است، مسائل فیزیکی مختلف را با استفاده از روش‌های عددی پیشرفته مدل‌سازی و شبیه‌سازی نماید. حال پس از بررسی اصول و نحوه کار میراگر ام آر پیشنهادی، استخراج و استنباط روابط ریاضی حاکم بر آن و نیز با انتخاب نرم‌افزار مربوطه، به سراغ بخش نرم‌افزاری آن رفته تا پس از طراحی و شبیه‌سازی این میراگر که از ادغام فیزیک‌های مختلف ایجاد می‌شود، بتوان نتایج مدنظر را بدست آورد.

۵-۱. انتخاب مختصات و فیزیک مناسب

اولین گام در نرم‌افزار کامسول، انتخاب مختصات مدنظر است. با توجه به اینکه میراگر ام آر پیشنهادی، دارای تقارن محوری منظم حول محور مرکزی است، می‌توان از مدل ۲ بعدی متقارن استفاده کرد. همچنین با توجه به نکات گفته شده، فرایند تحلیل این میراگر نیازمند برهم‌کنش چندفیزیکی مغناطیس-سیال-جامد است. بنابراین در محیط نرم‌افزار می‌بایست تمام فیزیک‌های مطرح شده را اعمال کرد.

۵-۲. طراحی میراگر

در این گام از مقاله و با توجه به اینکه میراگر مورد پژوهش، دارای اجزای گوناگونی است، به ترسیم هر یک از اجزاء پرداخته می‌شود. هندسه میراگر باید به‌طور منطقی ساده شود تا بار محاسباتی کاهش یابد. بنابراین درپوش‌ها، آب‌بندها و بست‌های انتهایی بالا و پایین در روش مدل‌سازی، نادیده گرفته می‌شوند. طبق شکل ۱۱ اجزای اصلی میراگر ام آر شامل چهار بخش اصلی است. A_1 میل‌پیستون است که یک ماده غیرمغناطیسی است.

به‌طوری‌که ρ چگالی سیال، u سرعت جریان، p فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی و F نیروی حجمی است. برای تحلیل جریان آرام حالت پایا، رابطه ۲۱ را می‌توان به‌صورت زیر ساده کرد.

$$\begin{cases} \rho(u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F \\ \nabla \cdot (\rho u) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

همچنین الگوی جریان سیال ام آر در شکاف میرایی را می‌توان با عدد رینولدز تعیین کرد.

$$Re = \frac{\rho v h}{\mu_p} \quad (23)$$

هنگامی که سیال ام آر تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، تنش برشی τ به تنش تسلیم τ_y و نرخ برشی $\dot{\gamma}$ مربوط می‌شود [۳۱].

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_y(B) [1 - \exp(-m(B)\dot{\gamma})] \quad (24)$$

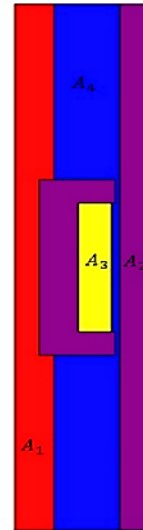
که در آن μ_p ویسکوزیته پلاستیک است. همچنین هر دو تنش تسلیم τ_y و پارامتر مدل m را می‌توان با تابعی چندجمله‌ای برحسب چگالی شار مغناطیسی B تعریف کرد. همچنین با تقسیم دو طرف رابطه به $\dot{\gamma}$ می‌توان ویسکوزیته دینامیکی را به‌دست آورد که در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \mu_p + \frac{\tau_y(B)}{\dot{\gamma}} [1 - \exp(-m\dot{\gamma})] \quad (25)$$

۵. طراحی و شبیه‌سازی میراگر ام آر

از آنجاکه هندسه میراگر ام آر دارای پیچیدگی‌هایی است، بررسی تحلیلی مدار مغناطیسی آن امری بسیار دشوار است. بدین جهت می‌توان از تکنیک حل عددی المان محدود استفاده کنیم که در این راستا نرم‌افزارهایی همچون کامسول^{۱۲} وجود دارد. برای میراگر ام آر مدنظر، توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی بر سیال ام آر تأثیر می‌گذارد. ویسکوزیته سیال ام آر تحت شدت میدان مغناطیسی‌های مختلف نیز متفاوت خواهد بود و تحریک خارجی نیز بر وضعیت میدان جریان تأثیر می‌گذارد. بنابراین، میراگر ام آر، به‌عنوان یک

A_2 بخش سیلندر و پیستون میراگر مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. A_3 قسمت سیم‌پیچ تحریک است که سیم مسی به دور آن پیچیده می‌شود A_4 . نیز بخش مربوط به سیال ام آر است که یک سیال غیرنیوتونی می‌باشد.



شکل ۱۱. اجزای اصلی میراگرام آر پیشنهادی

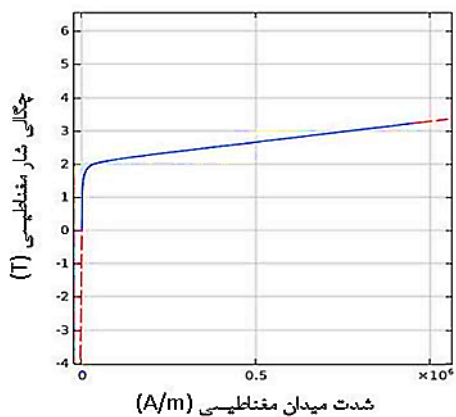
حال به سراغ مشخص کردن ابعاد هندسی قسمت‌های مختلف میراگر مدنظر رفته و با توجه به شکل ۱۰، پارامترها استخراج خواهد شد. مقادیر و عناوین پارامترهای شکل ۱۰ در جدول ۱ ذکر شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر، به صورت پارامتری در نرم‌افزار ایجاد شده و مقادیر انتخابی در جدول ۱، تنها یک مجموعه از مقادیر تعریفی در نرم‌افزار، است. همچنین لازم به ذکر است که مقادیر انتخابی، در محدوده مجاز ابعاد میراگر خودروهای سبک می‌باشد.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای طراحی میراگرام آر توسعه یافته

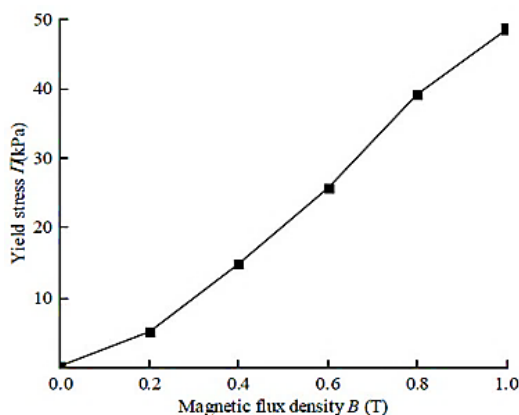
مقدار	عنوان پارامتر طراحی	پارامتر طراحی
۵ میلی‌متر	شعاع سوراخ داخلی پیستون	R_a
۸ میلی‌متر	شعاع میل پیستون	R_b
۲۰/۵ میلی‌متر	شعاع سر پیستون	R_c
۲۷/۵ میلی‌متر	شعاع خارجی سیلندر	R
۱۳۵ میلی‌متر	طول سیلندر	Z
۶ میلی‌متر	ضخامت دیواره سیلندر	t_h
۱ میلی‌متر	ضخامت شکاف میرایی	t_d
۴۵ میلی‌متر	طول سر پیستون	L
۶ میلی‌متر	طول قطب فعال پیستون	L_p
۳۳ میلی‌متر	عرض سیم‌پیچ	D
۷/۵ میلی‌متر	عمق سیم‌پیچ	d
۴۸۵ دور	تعداد دور سیم	N

۳-۵. انتخاب جنس اجزا

ابتدا به انتخاب جنس سیم‌پیچ پرداخته و از کتابخانه مواد نرم‌افزار کامسول، مس را انتخاب کرده و به سیم‌پیچ اختصاص داده می‌شود. سپس برای پیستون و سیلندر، جنس فولاد کم کربن ۱۰۱۸^{۳۱} اختصاص داده می‌شود. دلیل این انتخاب، خاصیت مغناطیسی بالا این ماده است. منحنی $B-H$ این ماده نیز به صورت شکل ۱۲ است.



شکل ۱۲. منحنی B-H برای Steel AISI 1018 [۳۲]



شکل ۱۴. منحنی تنش تسلیم برشی بر حسب چگالی شار برای سیال MRF-J25T

رابطه بین تنش تسلیم برشی و چگالی شار مغناطیسی در شکاف میرایی، به صورت رابطه ۲۶ به دست می آید.

$$\tau_y(B) = a_3 \times B^3 + a_2 \times B^2 + a_1 \times B \quad (26)$$

که در آن a_1 ، a_2 و a_3 نشان دهنده ضرایب چندجمله‌ای تنش تسلیم برشی در شکاف میرایی است که با چگالی شار مغناطیسی تغییر می کند. این ضرایب به ترتیب برابرند با $a_1 = 11.250 \text{ kPa/T}$ ، $a_2 = 58.920 \text{ kPa/T}^2$ و $a_3 = 24.52 \text{ kPa/T}^3$ - رابطه مدل پارامتر نیز به صورت رابطه ۲۷ تعریف می شود [۳۰].

$$m = 0.02536 \times B^2 - 0.5333 \times B + 0.03453 \quad (27)$$

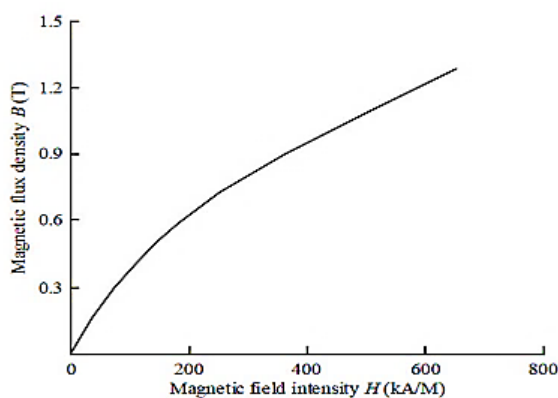
همچنین ویسکوزیته پلاستیک سیال MRF-J25T برابر با 0.8 pa.s است.

۴-۵. اعمال شرایط مرزی

چهار شرط مرز اصلی برای شبیه سازی میراگر مدنظر تعریف شد که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. مرزهای ۱ و ۲، مرز کویلینگ مایع- جامد است. مطابق با معادله حرکت پیستون که برابر است با $x = A \sin(2\pi ft)$ ، شرایط دیوار متحرک برای مرز ۱ اعمال شد. همچنین شرایط دیوار ثابت غیرلغزشی برای مرز ۲ اعمال شد.

از آنجایی که تمرکز شار مغناطیسی می بایست روی شیار حلقوی باشد، جنس میل پیستون باید از ماده غیر مغناطیسی باشد. همچنین میل پیستون می بایست تنش تسلیم بالایی داشته باشد. بنابراین برای میل پیستون، ماده فولاد ضدزنگ ۳۰۴ لحاظ می شود.

برای انتخاب نوع سیال، مسائلی چون تنش برشی، محدوده دمایی سیال ام آر و نیز ویسکوزیته از معیارهای مهم انتخاب نوع سیال است که مشخصات هر سیالی، از کاتالوگ آن سیال قابل مشاهده است. در نهایت و با توجه به نکات گفته شده، سیال MRF_J25T، به عنوان سیال ام آر، برای مدل سازی اختصاص داده می شود. این سیال ساخت یک مؤسسه تحقیقاتی در چین است که از اطلاعات موجود این سیال، برای شبیه سازی استفاده می شود. چگالی این سیال برابر با 5 g/cm^3 است. همچنین می بایست ضریب نفوذپذیری نسبی این سیال را به نرم افزار تعریف کرد. با توجه به اینکه رابطه چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی سیال MRF_J25T غیرخطی است، می بایست منحنی $B-H$ سیال به عنوان ورودی به نرم افزار داده شود که برای سیال مدنظر به صورت شکل ۱۳ است.



شکل ۱۳. منحنی چگالی شار بر حسب شدت میدان برای سیال MRF-J25T [۳۳]

با توجه به داده های ارائه شده توسط سازنده سیال و براساس مدل بینگهام- پاپاناستازو، روابط ریاضی بین تنش برشی و چگالی شار مغناطیسی به صورت غیرخطی است. منحنی تنش تسلیم برشی بر حسب چگالی شار سیال، در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

در مرز ۳، شرط مرزی دیگری وجود دارد که می‌بایست اعمال شود که همان عایق‌بندی مغناطیسی است. نرم‌افزار به صورت پیش فرض و با توجه به هندسه، به عایق‌بندی مغناطیسی پرداخته و به عبارتی میدان مغناطیسی را در خارج از محدوده هندسی میراگر، برابر با صفر لحاظ می‌کند.



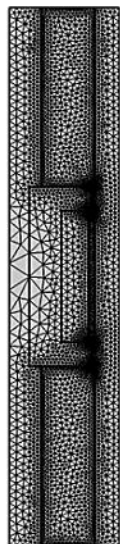
شکل ۱۵. شرایط مرزی اعمالی بر روی میراگر مدنظر

همچنین با توجه به اینکه از مدل ۲ بعدی متقارن برای رسم هندسه میراگر استفاده شده است، نرم‌افزار به صورت پیش فرض خط تقارن را اعمال کرده و آن را به عنوان شرط مرزی تقارن محوری اعمال می‌کند که همان شرط مرزی ۴ در شکل است.

۵-۵. مش‌بندی

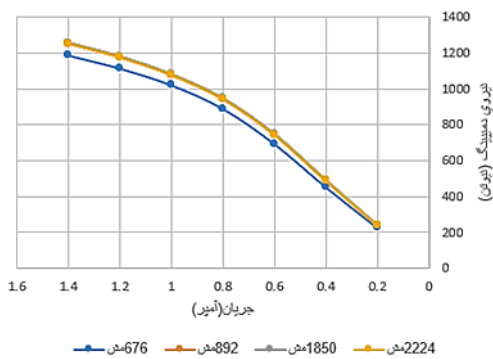
در این مرحله، نرم‌افزار به صورت اتوماتیک و با در نظر گرفتن سطوح و هندسه شکل، میراگر پیشنهادی را المان‌بندی می‌کند که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. از آنجا که محدوده شکاف میرایی، به ویژه در مناطق فعال، برای یافتن پارامترهایی همچون چگالی شار و

شدت میدان مغناطیسی حائز اهمیت بیشتری است، بنابراین در این نواحی می‌بایست مش‌های ریزتری اعمال شود [۲۸]. همچنین در نواحی مانند میل‌پیستون که چگالی شار، کم و فاقد اهمیت است، نیاز به مش ریز نیست.

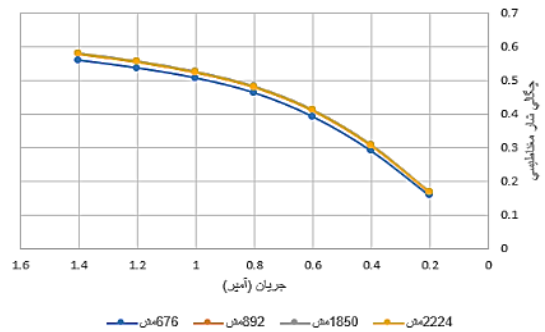


شکل ۱۶. مش اعمالی بر روی هندسه دوبعدی میراگر

برای اطمینان از صحت مش‌زنی، به بررسی استقلال از شبکه پرداخته شد. دو فاکتور اصلی چگالی شار مغناطیسی و نیروی میرایی، در تعداد مش‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفتند. هنگامی که تعداد شبکه‌ها از ۶۷۶ مش به ۸۹۲ مش افزایش یافت، اختلاف نیروی میرایی در حدود ۵.۵٪ و اختلاف چگالی شار مغناطیسی در حدود ۳.۶٪ گزارش شد که با افزایش تعداد مش‌ها به ۱۸۵۰ (و بیشتر) این اختلاف، برای نیروی میرایی و چگالی شار مغناطیسی، به کمتر از ۲٪ کاهش یافت. این اطلاعات در شکل ۱۷ و ۱۸ قابل مشاهده است.

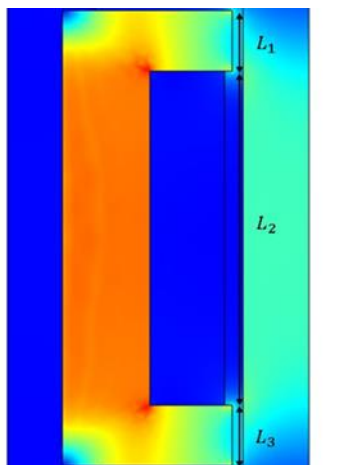


شکل ۱۸. نمودار نیروی میرایی بر حسب جریان در مش بندی های مختلف



شکل ۱۷. نمودار چگالی شار مغناطیسی بر حسب جریان در مش بندی های مختلف

با توجه به نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی، شکاف میرایی را می توان به سه بخش L_1 ، L_2 و L_3 تقسیم کرد. بخش های L_1 و L_3 محل متمرکز شدن خطوط شار مغناطیسی هستند. بنابراین این دو بخش را شکاف میرایی مؤثر یا مناطق فعال می نامند. همچنین مشاهده می شود که توزیع چگالی شار مغناطیسی در شکاف میرایی یکنواخت نیست و چگالی شار مغناطیسی در دو شکاف میرایی مؤثر، نسبتاً بزرگ است، در حالی که چگالی شار مغناطیسی در بخش L_2 نزدیک به صفر است.



شکل ۲۰. تقسیم بندی شکاف میرایی به سه ناحیه

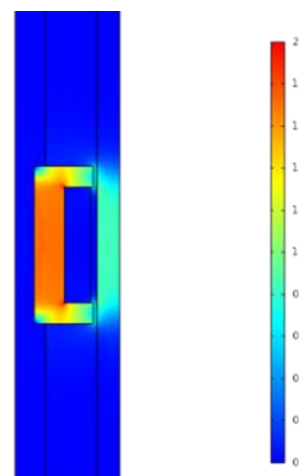
۶-۵. حل مسئله

در این مرحله، نرم افزار باتوجه به تمامی اطلاعات ورودی نظیر تعریف فیزیک مسئله، جریان اعمالی ورودی به سیم پیچ، شرایط مرزی و... شروع به حل مسئله می کند. پس از این مرحله، نتایج قابل مشاهده است.

۶. مشاهده نتایج

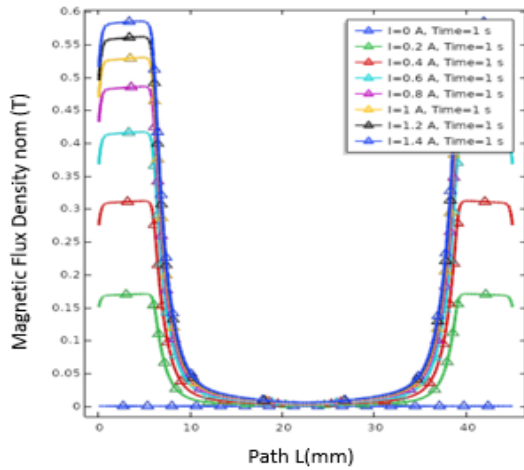
۶-۱. چگالی شار مغناطیسی

در شکل ۱۹ نحوه توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در داخل میراگر، زمانی که جریان تحریک اعمالی برابر ۱ آمپر است، نشان داده شده است که در محدوده ۰ تا ۲ تسلا متغیر است.



شکل ۱۹. توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی (بر حسب تسلا) در

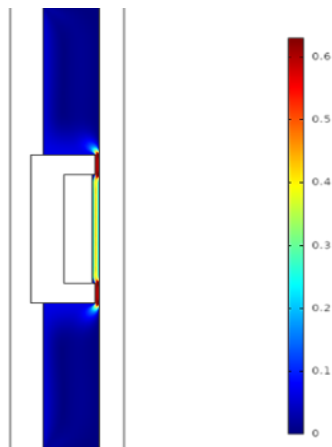
داخل میراگر پیشنهادی در جریان ۱A



شکل ۲۲. توزیع چگالی شار مغناطیسی در طول سرپیستون (ذکر شده در جدول ۱) برای جریان‌های تحریک متفاوت

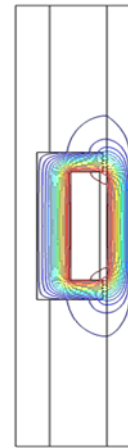
۶-۲. توزیع سرعت جریان

در شبیه‌سازی میدان جریان تحت اثر میدان مغناطیسی، تأثیر دما بر روی خواص رئولوژیکی سیال در نظر گرفته نشد و سیال ام آر به‌عنوان یک سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شد. خواص سیال به‌عنوان یک سیال غیرنیوتنی تعریف شد. معادله حرکت پیستون $x = A \sin(2\pi ft)$ است که دامنه A ، ۱۰ میلی‌متر و فرکانس f ، ۱ هرتز مشخص شد. هنگامی که جریان تحریک ۱ آمپر است، توزیع سرعت جریان (برحسب m/s) در داخل میراگر در موقعیت نهایی، در شکل ۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۳. توزیع سرعت جریان (برحسب m/s) در داخل میراگر در موقعیت نهایی با اعمال جریان 1 A

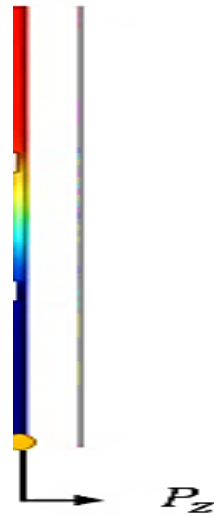
همان‌طور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، خطوط شار مغناطیسی در میراگر از پیستون و سیلندر عبور کرده و یک حلقه بسته را تشکیل می‌دهند. براساس تحلیل نظری مدار مغناطیسی، اکثر خطوط شار مغناطیسی از شکاف‌های میرایی مؤثر L_1 و L_3 عبور می‌کنند.



شکل ۲۱. نحوه توزیع خطوط شار مغناطیسی و ایجاد یک حلقه بسته در داخل میراگر

از شکل ۲۲ می‌توان دریافت که چگالی شار مغناطیسی تحت جریان‌های تحریک با بزرگی مختلف، به‌دلیل تقارن ساختاری در شکاف میرایی به‌طور متقارن در طول مسیر شیار L توزیع شده است. همچنین چگالی شار مغناطیسی در شکاف میرایی L_1 و L_3 از نظر اندازه برای هر جریان برابر است. علاوه‌براین، از آنجا که سیم‌پیچ تحریک دارای نفوذپذیری مغناطیسی نیست، چگالی شار مغناطیسی در ناحیه نزدیک به سیم‌پیچ تحریک به‌شدت کاهش می‌یابد و بنابراین چگالی شار در بخش L_2 به صفر نزدیک می‌شود.

همان‌طور که از شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، سرعت جریان سیال ام آر در محفظه بالا و پایین کم است، در حالی که سرعت جریان در شکاف میرایی، بزرگ است. همچنین سرعت جریان سیال در شکاف‌های میرایی L_1 و L_3 نسبت به بخش L_2 قابل توجه‌تر است. دلیل بزرگی سرعت در این نواحی، عمدتاً به این دلیل است که مساحت عبور بخش L_1 و L_3 کوچکتر است، بنابراین سرعت جریان در این دو بخش، نسبت به مناطق دیگر بیشتر است. در عین حال، می‌توان دریافت که سرعت جریان در دو انتهای شکاف میرایی، مانند یک شعله توزیع می‌شود که بیانگر آن است که سرعت جریان در ورودی و خروجی شکاف دارای تغییرات زیادی است.



شکل ۲۴. توزیع فشار (برحسب Mpa) در داخل میراگر ام آر

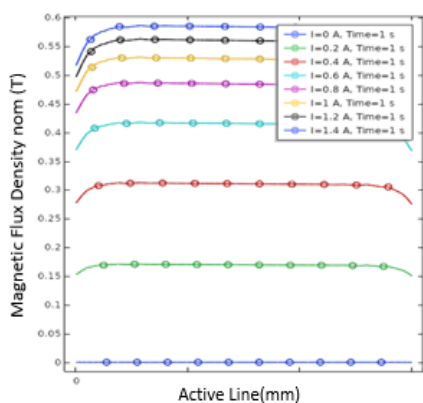
طراحی شده در موقعیت نهایی

۳-۶. توزیع فشار

در شکل ۲۴ نیز توزیع فشار در موقعیت اولیه در داخل میراگر ام آر طراحی شده، نشان داده شده است. نقطه P_z در مرز پایین محفظه میراگر، به‌عنوان مرجع فشار انتخاب شد. یعنی فشار در نقطه P_z روی صفر تنظیم شد که جریان تحریک $1A$ از سیم‌پیچ می‌گذرد. اگرچه توزیع فشار در محفظه پایین و محفظه بالا نسبتاً یکنواخت است، اما اختلاف فشار قابل توجهی بین دو محفظه بالایی و پایینی وجود دارد. همچنین تغییرات فشار، در امتداد کانال میرایی زیاد است. زیرا در موقعیت اولیه، پیستون به سمت بالا کشیده می‌شود تا محفظه بالا را فشرده کند و سیال ام آر را مجبور می‌کند که از محفظه بالا به محفظه پایین، از طریق شکاف میرایی جریان یابد و در نتیجه اختلاف فشار زیادی بین دو محفظه ایجاد می‌شود.

۶-۴. نیروی میرایی

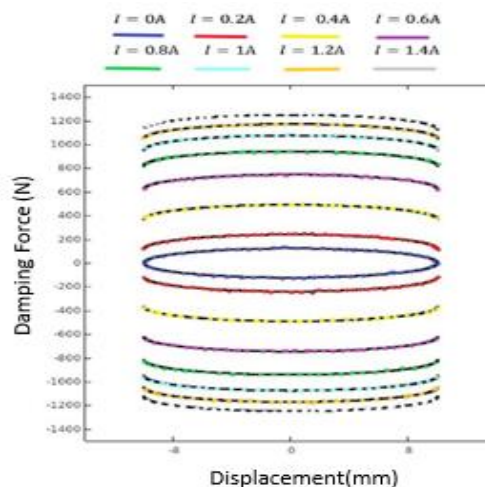
یکی از اهداف بهینه‌سازی میراگر، رسیدن به بیشینه مقدار نیروی میرایی است. این نیرو به عواملی چون ابعاد و هندسه دریچه میراگر، نوع سیال به کار رفته، میزان جریان اعمالی به سیم‌پیچ، سرعت میراگر و... بستگی دارد. مجموع نیروهای واکنش سیال ام آر روی پیستون، نیروی میرایی خروجی میراگر را ایجاد می‌کند که مقدار این نیرو از طریق رابطه ۹ قابل محاسبه است. هنگامی که پیستون تحت یک تحریک سینوسی با دامنه‌ای برابر با ۱۰ میلی‌متر و فرکانسی برابر با ۱ هرتز قرار می‌گیرد، منحنی تغییرات نیروی میرایی خروجی میراگر، تحت تحریک‌های مختلف به دست می‌آید که در شکل ۲۵ قابل مشاهده است. همچنین می‌توان دریافت که نیروی میرایی خروجی با تغییر مکان پیستون تا حدودی تغییر می‌کند.



شکل ۲۶. نمایش اشباع مغناطیسی در ناحیه فعال

در شکل ۲۷ نیز تأثیر فرکانس‌های مختلف ارتعاشی t بر نیروی میرایی خروجی میراگر در جریان $0.4 A$ نشان داده شده است. تحریکات سینوسی با فرکانس‌های مختلف بر روی پیستون آزمایش شد و منحنی رابطه نیروی میرایی خروجی بر حسب جابه‌جایی، در سه فرکانس $1 Hz$ ، $1/25 Hz$ و $1/5 Hz$ ، زمانی که دامنه 10 میلی‌متر است، به دست آمد. در این دامنه، نیروی میرایی خروجی با افزایش فرکانس، کمی افزایش یافت. وقتی جریان تحریک خاصی داده می‌شود، میراگر پیشنهادی دارای نیروهای میرایی ویسکوز و مغناطیسی (تحت تأثیر میدان مغناطیسی) است. نیروی میرایی مغناطیسی فقط مربوط به جریان تحریک است و چون جریان تغییر نمی‌کند، نیروی میرایی مغناطیسی ثابت است. نیروی میرایی ناشی از ویسکوزیته به سرعت جریان سیال ام آر مربوط می‌شود. هرچه سرعت بیشتر باشد، نیروی میرایی ویسکوز بیشتر است. با افزایش فرکانس تحریک، سرعت جریان سیال ام آر در میراگر افزایش می‌یابد و نیروی میرایی ناشی از ویسکوزیته افزایش می‌یابد. از آنجاکه نیروی میرایی ناشی از ویسکوزیته، نسبت کمتری از کل نیروی میرایی است، بنابراین نیروی میرایی خروجی میراگر با افزایش فرکانس، کمی افزایش می‌یابد.

با این حال، با مقایسه نیروی میرایی در مقابل منحنی جابه‌جایی برای هر جریان، می‌توان دریافت که نیروی میرایی خروجی میراگر با افزایش جریان تحریک افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این است که افزایش جریان، باعث افزایش چگالی شار مغناطیسی در شکاف میرایی می‌شود و به تبع آن تنش برشی و نیروی خروجی میراگر نیز افزایش می‌یابد. کل نیروی واکنش سیال ام آر روی پیستون می‌تواند به دو بخش تقسیم شود که عبارت است از نیروی میرایی ناشی از القاء میدان مغناطیسی و نیروی میرایی ناشی از ویسکوزیته. افزایش میدان مغناطیسی، نیروی میرایی مغناطیسی را افزایش می‌دهد و نیروی میرایی خروجی را بزرگتر می‌کند.



شکل ۲۵. نیروی میرایی در برابر جابه‌جایی در جریان‌های مختلف

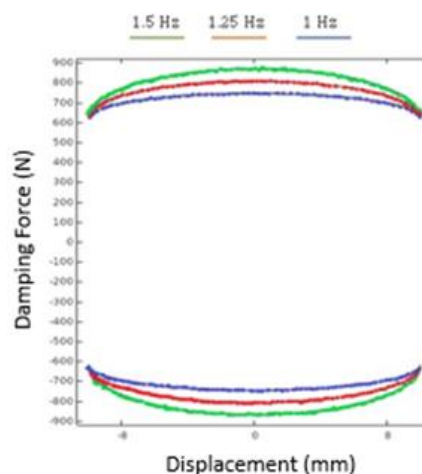
در عین حال، به دلیل اشباع مغناطیسی میراگر، افزایش نیروی میرایی خروجی با افزایش جریان، کمتر می‌شود که در شکل ۲۶ به آن پرداخته شده است.

نمونه میراگر ام آر تحت برهم کنش چند فیزیکی و تحلیل نتایج در نرم افزار کامسول، مشخص شد که نمونه طراحی شده از نظر مشخصه‌هایی همچون نیروی میرایی، محدوده دینامیکی، توزیع سرعت و توزیع فشار بسیار قابل قبول بود و نیاز سیستم تعلیق خودروهای سبک را برطرف می‌کند.

بدین ترتیب، با توجه به الزامات یک کمک فنر خودرو سبک که به نیروی میرایی بیشتر از ۱۰۰۰ نیوتن نیاز دارد، یک میراگر ام آر دو میله، تحت حالت برشی و درجه‌ای طراحی شد. با توجه به آنکه میراگر طراحی شده، نیرویی میرایی بیش از ۱۰۰۰ نیوتن، تولید می‌کند، بنابراین این میراگر، یک دستگاه نیمه فعال مناسب است که برخلاف بسیاری از میراگرهای طراحی شده، که قابلیت تجاری سازی ندارند، می‌تواند به صورت گسترده در حمل و نقل و زمینه‌های دیگر، همچون سیستم تعلیق خودروهای سبک استفاده شود و سبب بهبود راحتی و افزایش کیفیت عملکرد وسیله نقلیه شود.

همچنین، میراگر طراحی شده، برخلاف میراگرهای مرسوم، نیاز به محفظه گاز (برای جبران سازی حجم سیال جابه‌جا شده از طریق میل-پیستون) ندارد که علاوه بر امکان ساخت و تولید آسان تر آن، از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است و از خطرات موجود ناشی از وجود گاز فشرده در محفظه جبران ساز، مصون است.

در مجموع، طراحی و شبیه سازی یک میراگر ام آر که علاوه بر تولید نیرویی میرایی قابل قبول، از سهولت ساخت برخوردار است، از ویژگی‌های مثبت این نوع از میراگرها است که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد و به سمت تجاری سازی، سوق پیدا کند.



شکل ۲۷. منحنی نیرو-جابه‌جایی در سه فرکانس متفاوت، تحت جریان ۰/۴ آمپر و جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر

۷. نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی‌های نظری حول موضوعات مرتبط با میراگرهای ام آر همچون حالت‌های کاری سیالات ام آر، انواع میراگرهای ام آر و روابط ریاضی حاکم بر آنها پرداخته شد. هدف از این بخش، آشنایی با مفاهیم مرتبط با میراگرهای ام آر و نیز انتخاب یک نمونه میراگر مناسب از نظر شاخص‌هایی همچون نیروی میراکننده، محدوده دینامیکی وسیع، سهولت ساخت و ... بود. در نهایت برای طراحی و شبیه سازی، میراگری دو میله با قابلیت فعالیت در حالت درجه‌ای و برشی انتخاب شد که به علت عدم نیاز به تزریق گاز از سهولت ساخت برخوردار است.

پس از انتخاب نوع میراگر ام آر مناسب، به بررسی نحوه عملکرد میراگر مدنظر و سپس استخراج و استنباط روابط حاکم بر میراگر پیشنهادی پرداخته شد. پس از طراحی و شبیه سازی

۸. مأخذ

- [1] Costa, Eduarda, and PJ Costa Branco, "Continuum electromechanics of a magnetorheological damper including the friction force effects between the MR fluid and device walls: analytical modelling and experimental validation", *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, Vol.155, no.1, pp.82-88.

- [2] Rahim, M. S. A., and I. Ismail, "Review of magnetorheological fluids and nanofluids thermal behaviour", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.100, no.1, p.012040. IOP Publishing, 2015.
- [3] Rahman, Mahmudur, Zhi Chao Ong, Sabariah Julai, Md Meftahul Ferdaus, and Raju Ahamed, "A review of advances in magnetorheological dampers: their design optimization and applications", *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2017, Vol.18, no.12, pp.991-1010.
- [4] Oh, Jong-Seok, and Seung-Bok Choi, "Medical applications of magnetorheological fluids—a review", *Magnetic Materials and Technologies for Medical Applications*, 2022, pp.485-500.
- [5] Oyadiji, S. Olutunde, and Paschalis Sarafianos, "Characterisation and comparison of the dynamic properties of conventional and electro-rheological fluid shock absorbers", *International journal of vehicle design*, 2003, Vol.33, no.1-3, pp.251-278.
- [6] Nguyen, Quoc-Hung, Young-Min Han, Seung-Bok Choi, and Norman M. Wereley, "Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method", *Smart Materials and Structures*, 2007, Vol.16, no.6, p.2242.
- [7] Şahin, İsmail, Zekeriya Parlak, and Tahsin Engin, "Investigation of The Effects of Temperature Variations On The Magnetorheological Damper Behaviour", In *15th International Research/Expert Conference, "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*, *TMT*, 2011, pp.63-66.
- [8] Bai, Xian-Xu, Wei Hu, and Norman M. Wereley, "Magnetorheological damper utilizing an inner bypass for ground vehicle suspensions" *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, Vol.49, no.7, pp.3422-3425.
- [9] Zuo, Zhi Hao, Xiaodong Huang, Jian Hua Rong, and Yi Min Xie, "Multi-scale design of composite materials and structures for maximum natural frequencies", *Materials & Design*, 2013, Vol.51, pp.1023-1034.
- [10] Mangal, S., and Ashwani Kumar, "Experimental and numerical studies of magnetorheological (mr) damper", 2014, pp.1-7.
- [11] Sarkar, Chiranjit, and Harish Hirani, "Effect of particle size on shear stress of magnetorheological fluids", *Smart Science*, 2015, Vol.3, no.2, pp.65-73.
- [12] Asadi, Ehsan, Roberto Ribeiro, Mir Behrad Khamesee, and Amir Khajepour, "Analysis, prototyping, and experimental characterization of an adaptive hybrid electromagnetic damper for automotive suspension systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, Vol.66, no.5, pp.3703-3713.
- [13] Bahiuddin, I., S. A. Mazlan, I. Shapiai, F. Imaduddin, and Seung-Bok Choi, "Constitutive models of magnetorheological fluids having temperature-dependent prediction parameter", *Smart Materials and Structures*, 2018, Vol.27, no.9, p.095001.
- [14] Elsaady, Wael, S. Olutunde Oyadiji, and Adel Nasser, "A review on multi-physics numerical modelling in different applications of magnetorheological fluids", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, Vol.31, no.16, pp.1855-1897.
- [15] Ganesha, A., Suraj Patil, Nitesh Kumar, and Amar Murthy, "Magnetic field enhancement technique in the fluid flow gap of a single coil twin tube Magnetorheological damper using

- magnetic shields", *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2020, Vol.14, no.2, pp.6679-6689.
- [16] Hu, Guoliang, Lifan Wu, Yingjun Deng, Lifan Yu, and Bin Luo, "Damping performance analysis of magnetorheological damper based on multiphysics coupling", In *Actuators*, 2021, Vol.10, no.8, p. 76. MDPI, 2021.
- [17] Marathe, Amey Pramod, S. M. Khot, and J. Nagler, "Development of low-cost optimal magneto-rheological damper for automotive application", *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022, Vol.10, no.5, pp.1831-1850.
- [18] GONCALVES, Fernando D., M. Ahmadian, and J. D. Carlson, "Behavior of MR fluids at high velocities and high shear rates", *International Journal of Modern Physics B*, 2005, Vol.19, no.07n09, pp.1395-1401.
- [19] Poynor, James Conner, "Innovative designs for magneto-rheological dampers", PhD diss., Virginia Tech, 2001.
- [20] Saini, Radhe Shyam Tak, Hemantha Kumar, and Sujatha Chandramohan, "Semi-active control of a swing phase dynamic model of transfemoral prosthetic device based on inverse dynamic model", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, Vol.42, pp.1-14.
- [21] Ferdek, Urszula, and Jan Łuczko, "Modeling and analysis of a twin-tube hydraulic shock absorber", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, Vol.50, no.2, pp.627-638.
- [22] Cortés-Ramirez, Jorge A., Leopoldo S. Villarreal-González, and Manuel Martinez-Martinez, "Characterization, modeling and simulation of magnetorheological damper behavior under triangular excitation", In *Mechatronics for safety, security and dependability in a new era*, Elsevier, 2007, pp.353-358.
- [23] Wang, Qiang, Mehdi Ahmadian, and Zhaobo Chen, "A novel double-piston magnetorheological damper for space truss structures vibration suppression", *Shock and Vibration*, 2014.
- [24] Cheng, Ming, Z. B. Chen, and J. W. Xing, "Design, analysis, and experimental evaluation of a magnetorheological damper with meandering magnetic circuit", *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, Vol.54, no.5, pp.1-10.
- [25] Hu, Guoliang, Yi Ru, and Weihua Li, "Design and development of a novel displacement differential self-induced magnetorheological damper", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, Vol.26, no.5, pp.527-540.
- [26] Zhang, Jintao, Wanli Song, Zhen Peng, Jinwei Gao, Na Wang, Seung-Bok Choi, and Gi-Woo Kim, "Microstructure simulation and constitutive modelling of magnetorheological fluids based on the hexagonal close-packed structure", *Materials*, 2020, Vol.13, no.7, p.1674.
- [27] Parlak, Zekeriya, Tahsin Engin, and İsmail Çallı, "Optimal design of MR damper via finite element analyses of fluid dynamic and magnetic field", *Mechatronics*, 2012, Vol.22, no.6, pp.890-903.
- [28] Wei, Liankang, Hongzhan Lv, Kehang Yang, Weiguang Ma, Junzheng Wang, and Wenjun Zhang, "A comprehensive study on the optimal design of magnetorheological dampers for

improved damping capacity and dynamical adjustability", In *Actuators*, 2021, Vol.10, no.3, p.64. MDPI, 2021.

- [29] Case, David, Behzad Taheri, and Edmond Richer, "Multiphysics modeling of magnetorheological dampers", *The International Journal of Multiphysics*, 2013, Vol.7, no.1, pp.61-76.
- [30] Medina, N. Balaguera, M. A. Atuesta, O. A. Nieto, and PA Ospina Henao, "Solution of Navier-Stokes equations for fluids with magnetorheological compensation used in structures with energy dissipaters", In *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, Vol.2159, no.1, p.012007. IOP Publishing, 2022.
- [31] Bullough, W. A., D. J. Ellam, A. P. Wong, and R. C. Tozer, "Computational fluid dynamics in the flow of ERF/MRF in control devices and of oil through piezo-hydraulic valves", *Computers & structures*, 2008, Vol.86, no.3-5, pp.266-280.
- [32] Thanikachalam, J., G. S. Jinu, and P. Nagaraj, "Preparation of MR fluid and Modeling of Magneto rheological Fluid Brake (MRB)", In *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2014, Vol.592, pp.2254-2260.
- [33] Zhang, Jinlong, Shaobo Lu, and Yawen Yu, "Design optimization and experiment of a disc-type MR device considering the centrifugal effect and plug flow region", *Smart Materials and Structures*, 2019, Vol.28, no.8, p.085025.

پی نوشت:

1. Magneto-Rheological
2. Squeeze Mode
3. Shear Mode
4. Valve Mode
5. Mono Tube
6. Twin Tube
7. Double-ended
8. Bingham Model
9. Gamoto and Filisko Model
10. Bouc-Wen Model
11. Correction Factor
12. Comsol MultyPhysics
13. Low Carbon Steel 1018
14. Stainless Steel 4340