

## مدلیزاسیون رفتار مکانیکی یک میراگر مگنتورئولوژیکال دوار

ایمان باقرزاده<sup>۱</sup>

علی معظمی گودرزی<sup>۲</sup>  
goudarzi@nit.ac.ir

### چکیده

تحلیل و بررسی رفتار مکانیکی یک نمونه میراگر مگنتورئولوژیکال دوار بهینه سازی شده موضوع این مقاله می باشد. میراگر مورد مطالعه تشکیل شده است از یک دیسک دوار که درون یک محفظه استوانه ای بسته، پر شده با سیال مگنتورئولوژیکال، قرار می گیرد و حول محور خود با سرعتی ثابت می چرخد. با تغییر جریان الکتریکی گذرنده از سیم پیچی که به دور استوانه پیچیده شده است، میدان مغناطیسی درون استوانه ایجاد می شود که به تغییر ویسکوزیته اسمی در سیال مگنتورئولوژیکال می انجامد و با تغییر آن، گشتاور مقاوم سیال در برابر دوران دیسک تغییر می کند. بر این اساس می توان با تغییر شدت جریان الکتریکی ضریب میرایی را مدیریت نمود. در راستای اهداف این مقاله، پس از تعیین مقادیر بهینه برای پارامتر های هندسی میراگر مانند شعاع و ضخامت دیسک فرومغناطیس با توجه به محدودیت های ابعاد هندسی که در طراحی اولیه لحاظ شده، اثر شدت جریان الکتریکی بر رفتار مکانیکی میراگر مورد بررسی قرار می گیرد.

**واژه های کلیدی:** سیال مگنتورئولوژیکال، میراگر فعال، میدان مغناطیسی، گشتاور مقاوم، آنالیز اجزاء محدود

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

## ۱- مقدمه

میراگرهای پیچشی که با استفاده از خواص فیزیکی قابل کنترل سیالات مگنتورئولوژیکال<sup>۱</sup> ارتعاشات وارده را میرا می نمایند اصطلاحاً میراگرهای مگنتورئولوژیکال دوار نامیده می شوند. سیال مگنتورئولوژیکال تشکیل شده است از ذرات مغناطیسی، عموماً کربونیل آهن یا آلیاژهای آهن/کبالت، در اندازه میکرونی، که در یک سیال حامل غوطه ورنند. معمولاً از روغنهای معدنی، روغنهای هیدرو کربنی سنتز شده، روغنهای سیلیکونی و یا حتی آب بنابر مورد استفاده می توان به عنوان سیال حامل استفاده کرد. از مزایای استفاده از این گونه میراگرها می توان به سرعت بالای پاسخ دهی آنها به فرامین کنترل، سادگی در مکانیزم عملکرد، کنترل آسان گشتاور خروجی و همچنین توان الکتریکی اندک مورد نیاز برای کارکرد سیستم اشاره نمود. این میراگرها از نوع ویسکوز بوده و سیالات مگنتورئولوژیکال که در آنها استفاده می شوند از مخلوط ذرات فرومغناطیس با پسماند آهنربایی پایین در یک سیال حامل بدست می آیند. با اعمال میدان مغناطیسی ذرات موجود در سیال بصورت رشته های در هم تنیده در راستای خطوط شار مغناطیسی آرایش می گیرند و با ایجاد موانع فیزیکی در مسیر جریان سیال، ویسکوزیته اسمی آنها تغییر می دهند و سیال را به حالتی نیمه جامد تبدیل می نمایند. قابلیت ایجاد گشتاور مقاوم در میراگرهای مگنتورئولوژیکال دوار به طور عمده وابسته به دو مولفه به شرح ذیل می باشد:

1. تنش برشی لازم برای گسستن رشته های در هم تنیده از ذرات فرومغناطیس موجود در سیال که در راستای خطوط شار مغناطیسی آرایش گرفته اند
2. تنش برشی لازم برای غلبه بر ویسکوزیته اسمی سیال پایه ای که ذرات نامبرده را در بر گرفته است

بنابراین شناخت خصوصیات رئولوژیکال این سیال تحت این نیروهای برشی که عمدتاً در حین کارکرد میراگر رخ می نماید، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از جمله کارهای پژوهشی انجام شده برای شناختن این اثر در شرایط کاری متفاوت می توان به موارد زیر اشاره کرد:

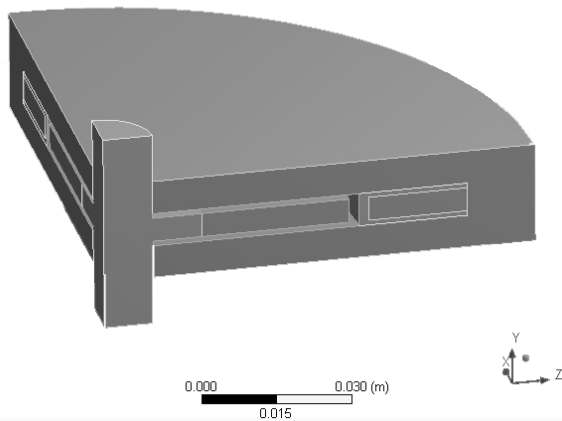
1. در سال ۱۹۸۴، Rabinow [1] سیال مگنتورئولوژیکال را اختراع کرد و به عنوان یک کاربرد یک

- نمونه کلاچ مگنتورئولوژیکال ساخت، در ادامه محققان بیشتری در این زمینه فعالیت کردند،
2. Li و همکارانش [2] کاربرد دمپر مگنتورئولوژیکال را در یک نمونه عملگر جوی استیک دو درجه آزادی بررسی نمود و رابطه بین جریان و گشتاور مقاوم و همچنین اثر هیسترسیس را مورد مطالعه قرار داد.
  3. Di و همکارانش [3] توزیع دما در یک نمونه میراگر مگنتورئولوژیکال را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند.
  4. Bansbach [4] یک کلاچ مگنتورئولوژیکال دو صفحه ای و یک نمونه از نوع چند صفحه ای برای قرار گیری بین موتور و دیفرانسیل اتومبیل پیشنهاد کرد.
  5. Park و همکارانش [5] یک نمونه کلاچ چند صفحه ای مگنتورئولوژیکال را طراحی کرده و به بررسی پارامترهایی نظیر دما و گشتاور پرداخته است.
  6. Shtarkman [6,7] یک جاذب ضربه دورانی را به وسیله سیال مگنتورئولوژیکال توسعه داد، که می تواند برای میرایی فعال سیستم های تعلیق اتومبیل استفاده شود. این سیستم به شاسی اتومبیل وصل شده و به وسیله حرکت در یک جاده واقعی آزمایش شد، یک کاهش شدید در رزونانس بدنه مشاهده گردید و رانندگی راحت تر انجام شد. مقدار گشتاور عکس العمل برای هر آمپر از انرژی ورودی از 5.56 تا 113 Nm بوده است.
  7. Iskandarani و همکارانش [8] رفتار هیسترسیس را بر روی میراگرهای مگنتورئولوژیکال دوار به صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی کردند.

## ۲- تئوری مسئله

رفتار یک سیال مگنتورئولوژیکال به گونه ای است که در نبود میدان مغناطیسی همانند یک سیال نیوتنی عمل می نماید و با اعمال میدان مغناطیسی بصورت یک سیال نیمه جامد درمی آید. با افزایش شدت میدان مغناطیسی تنش برشی لازم برای جابجایی سیال طبق نمودار شکل ۱ تغییر می کند.

<sup>1</sup> Magnetorheological fluid (MRF)



شکل ۲: نمای برش خورده از طرح میراگر

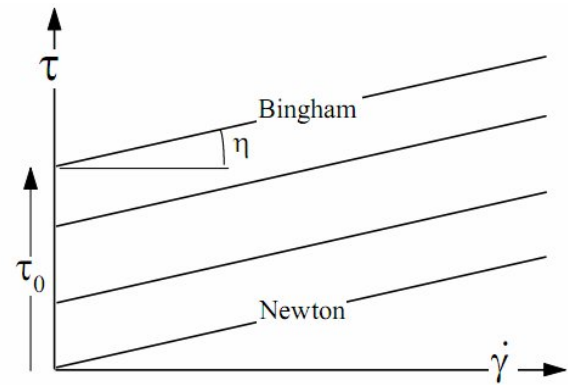
همچنانکه پیش از این آمد، قابلیت انتقال گشتاور توسط میراگرهای مگنتورئولوژیکال دوار به تنش برشی ناشی از اثر میدان مغناطیسی بر ذرات فرومغناطیس مخلوط در سیال و ویسکوزیته کلی سیال مگنتورئولوژیکال در نبود میدان مغناطیسی وابسته است، بر این اساس دانستن توزیع شدت میدان مغناطیسی و همچنین خصوصیات رئولوژیکی سیال مگنتورئولوژیکال تحت نیروی برشی اعمال شده برای تحلیل رفتار مکانیکی میراگرهای مگنتورئولوژیکال لازم است. در این پژوهش برای محاسبه نیروی مقاوم سیال از مدل پلاستیک بینگهام<sup>۵</sup> [9] استفاده شده است. بر اساس این مدل، برای یک دیسک که با سیال مگنتورئولوژیکال در تماس است، تنش برشی موضعی از معادله زیر بدست می آید:

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \frac{\omega r}{h} \quad (1)$$

که در آن:  $\tau_y$  تنش برشی ناشی از تاثیر شدت میدان مغناطیسی  $H$  بر سیال،  $\eta$  ویسکوزیته سیال در غیاب میدان مغناطیسی،  $\omega$  سرعت زاویه ای دیسک،  $r$  فاصله شعاعی نسبت به مرکز دیسک و  $h$  ضخامت سیال می باشد.

با دانستن تنش برشی موضعی گشتاور مقاوم ناشی از آن بصورت زیر محاسبه می شود:

$$T = \int_{R_i}^{R_o} (\tau 2\pi r^2 dr) \quad (2)$$



شکل ۱: نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب کرنش برشی

بر این اساس می توان با کنترل شدت میدان مغناطیسی تنش برشی سیال را کنترل نمود. از ویژگیهای مهم کاربرد این نوع سیال می توان به کنترل لحظه ای و آبی تنش برشی آن، همچنین توان الکتریکی کم مورد نیاز برای انجام این کار نام برد. کاربردهای سیال مگنتورئولوژیکال بر سه دسته به شرح ذیل می باشند:

- ۱- حالت برشی<sup>۲</sup>: سیال در بین دو صفحه که نسبت به یکدیگر در حرکت هستند قرار دارد و راستای میدان مغناطیسی اعمال شده عمود بر صفحات است.
- ۲- حالت درپچه ای<sup>۳</sup>: سیال با فشار از میان دیواره های یک درپچه در جریان است و میدان مغناطیسی عمود بر راستای جریان سیال اعمال می شود.
- ۳- حالت فشاری<sup>۴</sup>: برای ایجاد تغییر مکانهای کوچک استفاده می شود، در این حالت سیال مابین دو صفحه قرار دارد که می توانند در راستای عمود بر سطح نسبت به همدیگر حرکت کنند. با اعمال میدان مغناطیسی در راستای عمود بر صفحات، ذرات مغناطیسی با تشکیل زنجیره ای در راستای میدان به صفحات نیرو وارد می نمایند.

میراگر مورد مطالعه در این پژوهش به گونه ای طراحی شده است که در حالت برشی عمل نماید. این میراگر از یک دیسک دوار تشکیل شده است که درون یک محفظه استوانه ای بسته، پر شده با سیال مگنتورئولوژیکال، قرار گرفته و حول محور خود با سرعتی ثابت می چرخد. با تغییر جریان الکتریکی گذرنده از سیم پیچی که به دور استوانه پیچیده شده است میدان مغناطیسی وارده بر سیال تغییر می کند. (شکل ۲)

<sup>2</sup> Shear mode

<sup>3</sup> Valve mode

<sup>4</sup> Squeeze-flow mode

<sup>5</sup> Bingham

شده است. اجزاء مدل به ترتیب شماره های مشخص شده در نمای برش خورده شکل ۴ به شرح ذیل می باشد:

- ۱- محور دیسک؛ پارامغناطیس است و از جنس مس انتخاب شده است.
- ۲- دیسک دوار؛ فرو مغناطیس است و از جنس فولاد ۱۰۱۸ انتخاب شده است.
- ۳- پوسته بیرونی میراگر؛ فرو مغناطیس است و از جنس فولاد ۱۰۱۸ انتخاب شده است.
- ۴- سیال مگنتورئولوژیکال؛ بر اساس فرمول سیال "MRF-122EG" شرکت لرد<sup>۶</sup> انتخاب شده است.
- ۵- قاب سیم پیچ؛ پارامغناطیس است و از جنس آلومینیوم انتخاب شده است.
- ۶- سیم پیچ؛ از جنس مسی و به تعداد ۹۵ دور حلقه شده است.

میراگر مورد استناد در این پژوهش به شرح ابعاد توصیف شده در شکل ۵ و جدول ۱ طراحی شده است.

جدول ۱: ابعاد میراگر مورد مطالعه

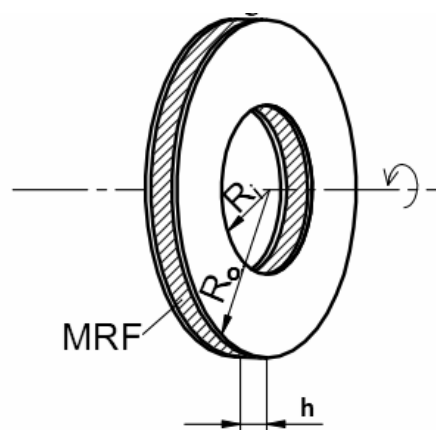
اندازه	توضیحات	علامت
10 (mm)	شعاع محور دیسک	$R_i$
50 (mm)	شعاع بیرونی دیسک	$R_o$
88 (mm)	شعاع میراگر	C
21 (mm)	پهنای میراگر	D

با استفاده از آنالیز المان محدود سه بعدی در نرم افزار انسیس<sup>۷</sup> و با در نظر گرفتن تقارن محوری سیستم، یک ربع از میراگر را مدل کرده، که از المان نوع مکعبی و ۲۰ گره ای استفاده شده است و تاثیر تعدادی از پارامترهای هندسی همچون شعاع دیسک و ضخامت آن بر توزیع شدت میدان مغناطیسی وارده بر سیال در حالتی که جریان ۳ آمپر از سیم پیچ می گذرد بررسی می گردد. با توجه به نمودارهای شکل های ۶ و ۷ که توسط شرکت سازنده سیال ارائه شده اند و نمودار شماره ۸ که مشخصه رفتار مغناطیسی

که با توجه به شکل ۳،  $R_i$  شعاع داخلی دیسک و  $R_o$  شعاع بیرونی آن می باشد.

با ترکیب معادلات (۱) و (۲)، معادله (۳) بدست می آید. بر این اساس گشتاور مقاوم را می توان ناشی از دو اثر متفاوت دانست: یکی ناشی از اثر میدان مغناطیسی بر سیال و دیگری ناشی از اثر ویسکوزیته سیال. بررسی معادله (۳) چنین می نماید که گشتاور ناشی از اثر ویسکوزیته در مقابل بخش اول قابل صرف نظر کردن است. از آنجایی که اثر عامل مغناطیسی بر گشتاور مقاوم به سرعت زاویه ای بستگی ندارد، رابطه آن را می توان از نوع میراگر کلمبی دانست.

$$T = \int_{R_i}^{R_o} (\tau(H)2\pi r^2 dr) + \frac{\pi\eta\omega}{h}(R_o^4 - R_i^4) \quad (3)$$



شکل ۳: طرح نمادین از مجموعه دیسک و سیال

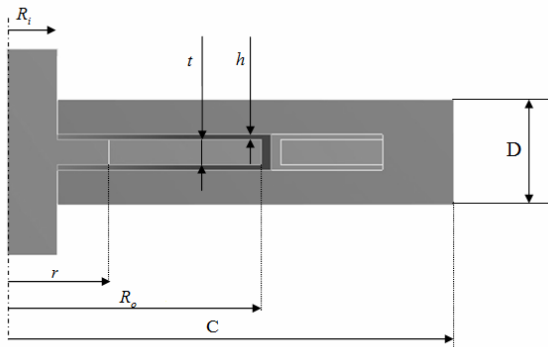
از آنجائیکه شارهای مغناطیسی در مدارهایی تشکیل می شوند که کمترین مقاومت مغناطیسی را در پی داشته باشد، برای تمرکز بیشتر شارها در سیال و در نتیجه افزایش شدت میدان مغناطیسی در این فضا لازم است تا میراگر به گونه ای مهندسی شده طراحی شود. با توجه به این خصوصیت در این مقاله سعی شده است تاثیر تعدادی پارامتر هندسی بر این خصوصیت مورد بررسی قرار گیرد، که از جمله این پارامترها اندازه قسمت فرومغناطیس دیسک و همچنین ضخامت آن می باشد.

### ۳- آنالیز المان محدود

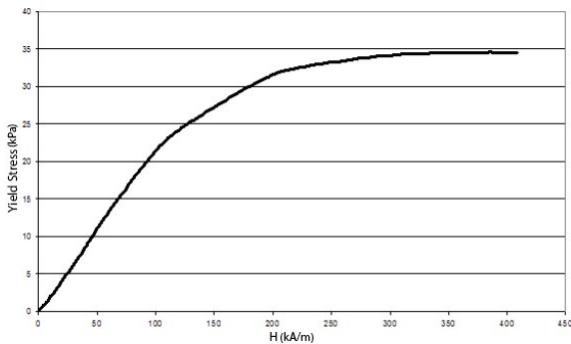
مدل هندسی مورد استناد برای آنالیز المان محدود، میراگر دوار را که در حالت برشی عمل می کند بصورت شکل ۳ در نظر گرفته

<sup>6</sup> Lord

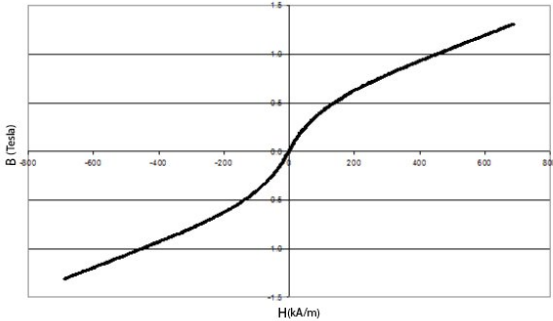
<sup>7</sup> ANSYS



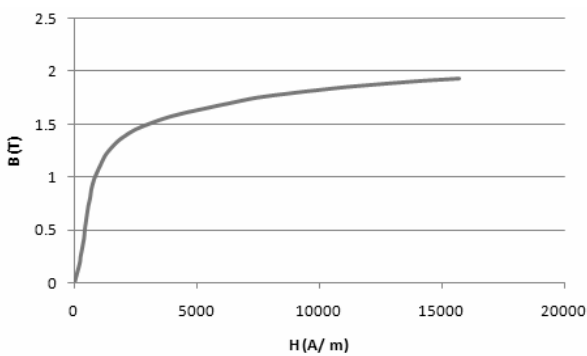
شکل ۵: نمای اندازه گذاری شده از میراگر مورد مطالعه



شکل ۶: نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب شدت میدان



شکل ۷: نمودار تغییرات B-H در سیال مگنتورئولوژیکال



شکل ۸: نمودار تغییرات B-H در فولاد ۱۰۱۸

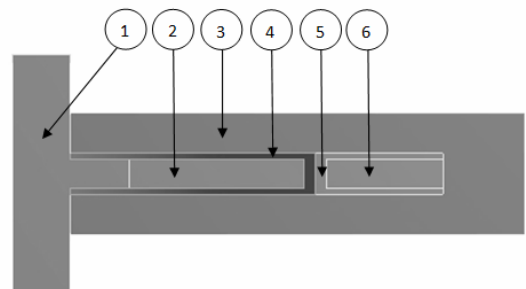
فولاد ۱۰۱۸ می‌باشد و در بانک داده‌های نرم‌افزار ذخیره شده است، با دانستن توزیع چگالی شار مغناطیسی (B) و شدت میدان مغناطیسی (H) در سیال، تنش برشی در نقاط مختلف سیال قابل محاسبه می‌باشد. برای تایید مدل ریاضی ایجاد شده توسط انسیس، یک نمونه آزمایشی مطابق شکل ۹ با اجزای تشکیل دهنده مطابق جدول ۲، همچنین ابعاد مشخص شده در شکل ۱۰ و شعاع

طراحی شده و اثر تغییرات جریان بر گشتاور مقاوم بدست آمده است. این نمونه آزمایشی از یک مولد جریان

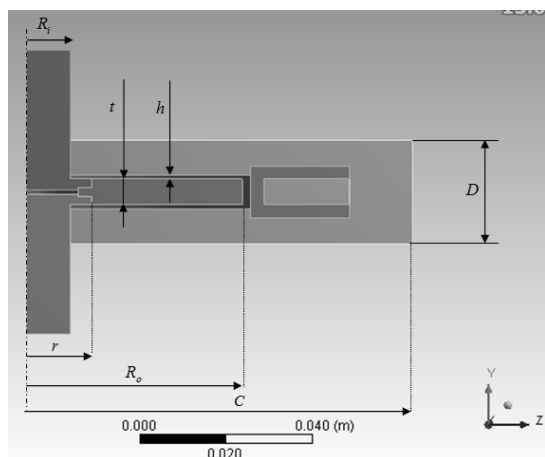
با دقت

که شدت جریان آن قابل کنترل می باشد و یک دینامومتر با دقت اندازه گیری

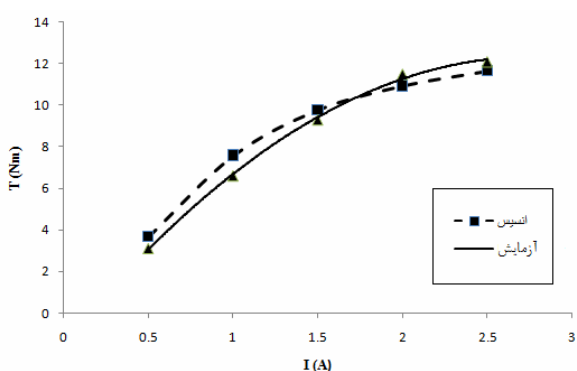
که توسط یک کولپینگ به میراگر مورد مطالعه متصل شده است، تشکیل شده است. در این نمونه تعداد دور سیم پیچ برابر ۲۱۵ دور و میراگر توسط رابط های دیا مغناطیس از شاسی دینامومتر و محیط اطراف که از جنس آهن و فرو مغناطیس است، برای حفظ مدار مغناطیسی، ایزوله می باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده از نمونه آزمایشی و مدل ریاضی ایجاد شده توسط انسیس، همانند شکل ۱۱، مشاهده می شود که با میانگین مربع خطایی در حدود ۰,۰۱ نتایج انطباق خوبی با هم داشته، لذا اینگونه نتیجه می شود که مدل ایجاد شده توسط انسیس قابل استناد می باشد.



شکل ۴: نمای برش خورده از مدل هندسی طرح میراگر



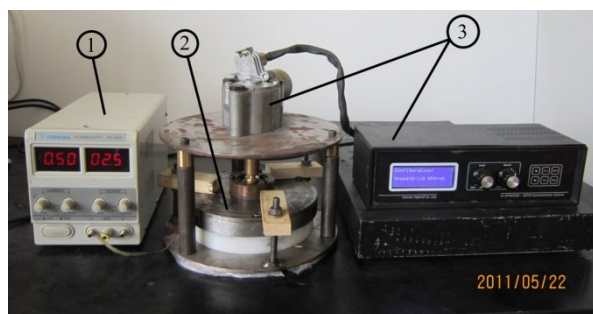
شکل ۱۰: نمای اندازه گذاری شده از میراگر مورد مطالعه



شکل ۱۱: مقایسه نمودار گشتاور مقاوم بر حسب شدت جریان در میراگر حاصل از مدل ریاضی و تجربی

#### ۴- نتایج

پس از تایید درستی مدل ریاضی، آنرا در چند مرحله با تغییر در شعاع داخلی دیسک ( $I$ ) اجرا می‌نماییم و بر اساس داده‌های بدست آمده رابطه این پارامتر با گشتاور مقاوم محاسبه می‌گردد. تغییرات شدت میدان مغناطیسی در راستای شعاعی در مرز بین دیسک و سیال برای شعاع‌های داده شده  $r=10,15,20,25,30$  mm در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با داشتن توزیع میدان مغناطیسی و با استفاده از نمودار شکل ۶، تغییرات تنش برشی را محاسبه نموده و با انتگرال گیری از قسمت اول معادله (۳) بین شعاع‌های داخلی و خارجی  $R_o$  و  $R_i$  گشتاور مقاوم حاصل از تغییرات شدت میدان مغناطیسی بدست می‌نماییم (شکل ۱۳). همچنین با محاسبه قسمت دوم معادله (۳) و تجمیع آن با گشتاور ناشی از شدت میدان مغناطیسی، گشتاور کل حاصله را محاسبه می‌نماییم. در اینجا سرعت زاویه ای دیسک برابر



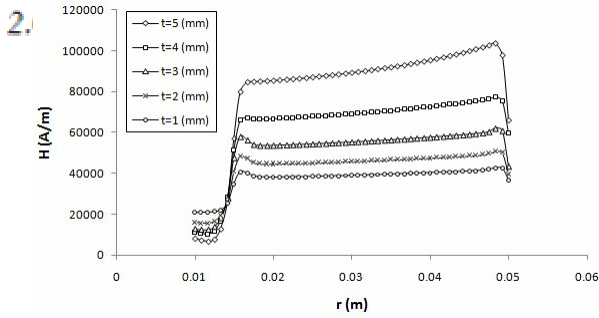
شکل ۹: نمونه آزمایشی مورد مطالعه

جدول ۲: اجرای تشکیل دهنده جهت آزمایش میراگر مگنتورئولوژیکال در شکل ۹

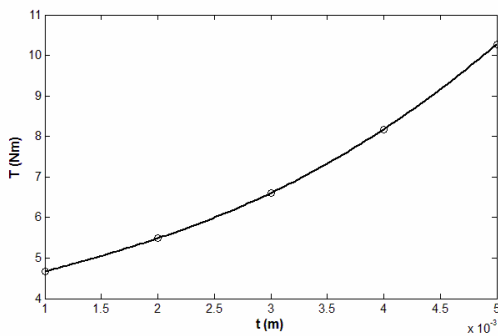
شماره	توضیحات
۱	مولد جریان
۲	میراگر مگنتورئولوژیکال
۳	دینامومتر

جدول ۳: ابعاد میراگر مورد آزمایش قرار داده شده برای تایید مدل ریاضی

علامت	توضیحات	اندازه
$R_i$	شعاع محور دیسک	10 (mm)
$R_o$	شعاع بیرونی دیسک	50 (mm)
C	شعاع میراگر	89.5 (mm)
D	پهنای میراگر	24 (mm)
t	ضخامت دیسک	6 (mm)
h	ضخامت سیال	1 (mm)

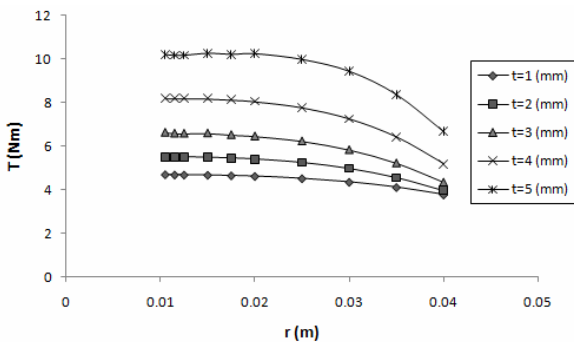


شکل ۱۴: نمودار تغییرات شدت میدان مغناطیسی  $H$  در سیال به ازای ضخامت‌های متفاوت دیسک  $t$  در حالتی که شعاع داخلی دیسک  $r=15$  mm باشد



شکل ۱۵: تغییرات گشتاور مقاوم  $T$  به ازای ضخامت‌های متفاوت دیسک  $t$  در حالتی که شعاع داخلی دیسک  $r=15$  mm باشد

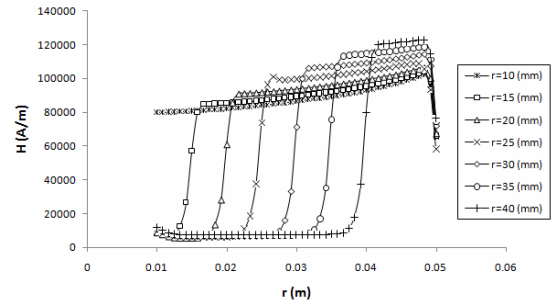
این عمل به ازای شعاع‌های داخلی مختلف  $r=10, 11.5, 12.5, 15, 17.5, 20, 25, 30, 35, 40$  mm تکرار می‌شود و با محاسبه گشتاورهای مقاوم ایجاد شده در هر ترکیب  $r$  و  $t$  نتایج در نمودار شکل ۱۶ نشان داده شده است.



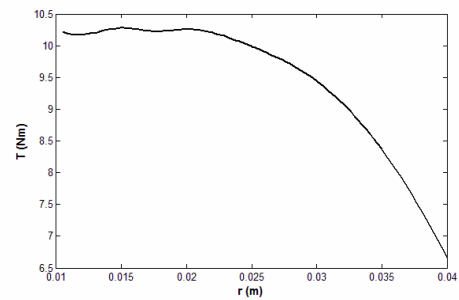
شکل ۱۶: نمودار تغییرات گشتاور مقاوم  $T$  برحسب شعاع داخلی  $r$  و ضخامت دیسک  $t$

با توجه به نمودارهای به دست آمده مشاهده می‌شود که گشتاور مقاوم در ضخامت  $t=5$  mm و شعاع داخلی  $r=15$  mm بیشترین

و ویسکوزیته سیال در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۷: نمودار توزیع تنش برشی در سیال به ازای شعاع‌های داخلی متفاوت دیسک در حالتی که ضخامت دیسک  $t=5$  mm باشد

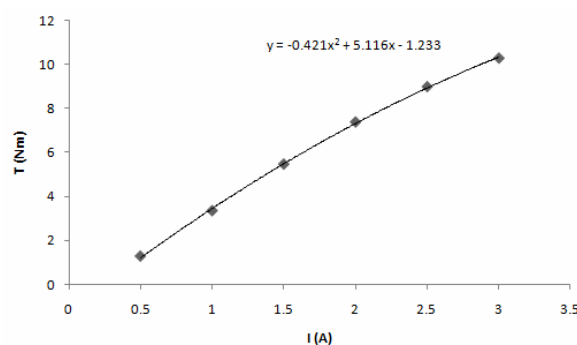


شکل ۱۸: تغییرات گشتاور  $T$  مقاوم به ازای شعاع‌های داخلی متفاوت دیسک  $t$  در حالتی که ضخامت دیسک  $t=5$  mm باشد

برای بررسی تاثیر تغییرات ضخامت دیسک بر گشتاور مقاوم میراگر در یک قطر داخلی مشخص، با ثابت گرفتن قطر داخلی (در اینجا  $r=15$  mm) تغییرات شدت میدان مغناطیسی و در نتیجه تغییرات گشتاور مقاوم به ازای ضخامت‌های دیسک متفاوت  $t=1, 2, 3, 4, 5$  mm محاسبه می‌گردد. نتایج تحلیل در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

مقدار خود را دارد. مقدار گشتاور در این حالت برابر  $T=10.27656Nm$  برآورد می‌گردد.

همچنان که پیش از این به آن اشاره شد عامل موثر بر گشتاور مقاوم، شدت میدان مغناطیسی است که خود تابعی از شدت جریان در سیم پیچ می‌باشد. از آنجایی که در این رابطه گشتاور مقاوم مستقل از سرعت زاویه ای و تحت تاثیر شدت جریان می‌باشد، رابطه این دو را می‌توان از نوع میراگر کلمبی دانست. تغییرات گشتاور مقاوم بر حسب شدت جریان در حالت طراحی بهینه با یک معادله درجه دو با ضریب تشخیص  $R^2 = 0.999$  تقریب زده می‌شود. (شکل ۱۷)



شکل ۱۷: نمودار تغییرات گشتاور مقاوم  $T$  بر حسب شدت جریان  $I$  در حالتی که شعاع داخلی دیسک  $r=15\text{ mm}$  باشد

فهرست علائم تنش برشی شدت میدان مغناطیسی چگالی شار مغناطیسی -  
گشتاور ویسکوزیته سیال سرعت زاویه ای شعاع ضخامت سیال ضخامت -  
دیسک

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر پارامترهای هندسی در بزرگی گشتاور مقاوم در یک میراگر مگنتورئولوژیکال به ازای دیسک های با قطر داخلی و ضخامت های متفاوت در یک مدل شبیه سازی شده به کمک آنالیز المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. مدل نامبرده در یک شرایط آزمایشگاهی بصورت فیزیکی آزموده شد و درستی آن با دقت قابل قبولی اثبات شد. شرایط آزمایش با توجه به داده های واقعی ارائه شده توسط شرکت های تامین کننده اجزاء میراگر تعیین شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین گشتاور در حالتی که ضخامت  $t=5\text{ mm}$  و شعاع داخلی  $r=15\text{ mm}$  باشد رخ می‌دهد. مقدار گشتاور در این حالت برابر  $T=10.27656Nm$  برآورد می‌گردد و رابطه میان گشتاور مقاوم و شدت جریان با یک معادله درجه دو تقریب زده شد.



magnetorheological brake", *Mechatronics*, No.18, 2008, pp 434–447

- [6] Shtarkman, E. M.; " Fluid response to magnetic field", US Patent, No: 4,992,190. 1991.
- [7] Shtarkman, E. M.; " Fluid response to magnetic field", US Patent, No: 5,167,850. 1992.
- [8] Iskandarani, y., Karimi, H. R.; "Hysteresis modeling for the rotational magnetorheological damper", *Recent Researches in Geography, Geology, Energy, Environment and Biomedicine* , pp 479-485
- [9] Bingham, E.C.; "An Investigation of the Laws of Plastic Flow", U.S. Bureau of Standards Bulletin, No.13, 1916, pp 309–353

۶- مراجع

- [1] Rabinow, J.; "The magnetic fluid clutch", *AIEE Trans*, No.67, 1948, pp 1308–1315.
- [2] Li, W.H., Liu, B., Kosasih, P.B., Zhang, X.Z.; " A 2-DOF MR actuator joystick for virtual reality applications", *Sensors and Actuators A*, No.137, 2007, PP 308–320.
- [3] Di, Z., Wencong, Y., Liyong, H., Yimin, D., Jianming, Z.; " Numerical and Experimental Studies on Temperature Field of Rotary MRF Dampers", *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2009. pp 42-46
- [4] Bansbach, E.A.; "Torque Transfer Apparatus Using Magnetorheological Fluids", US Patent, No: 5,845,753. 1998.
- [5] Park, E.J., Karakoc, K., Suleman , A.; "Design considerations for an automotive