



## طراحی، ساخت و تست دمپر مگنتورئولوژیک جدید شامل سیال ام آر حاوی نانو ذرات پایدار کننده سیلیکون

حامد ادیبی<sup>1\*</sup>، ابراهیم یارعلی<sup>2</sup>، امیرحسین رمضان شمس<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- کارشناسی ارشد، مدیریت اجرایی، شرکت کارخانجات ایندامین سایپا، تهران

\*تهران، صندوق پستی 1591634311، hadibi@aut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 28 فروردین 1396  
پذیرش: 31 خرداد 1396  
ارائه در سایت: 20 مرداد 1396

کلید واژگان:

سیال مگنتورئولوژیک

دمپر هوشمند

دمپر مگنتورئولوژیک

آهن کربونیل

نانو پودر سیلیکون

### چکیده

هدف در این پژوهش طراحی و ساخت یک نمونه دمپر دو مخزنه مگنتورئولوژیکال (ام آر) حاوی ذرات میکرونی آهن کربونیل و نانو ذرات پایدار کننده سیلیس است که در ابتدا سیال مگنتورئولوژیک برحسب نیاز طراحی و ساخته شد، سپس تست‌های پایداری و مگنترومتری در حالت برشی روی آن انجام شد که نتایج تست پایداری نشان می‌دهد که پس از ده روز مقدار ته‌نشینی سیال ام آر ساخته شده 15% و بیشینه تنش برشی در بیشینه میدان مغناطیسی حدود 20kpa که مطلوب است، سپس بخش مغناطیسی پژوهش با استفاده از روابط موجود و نرم‌افزار مکسول انجام شد. در انتها با استفاده از این داده‌های موجود ابعاد هندسی دمپر ام آر طراحی و ساخته شد. دمپر مورد نظر از نوع دمپر دو مخزنه و در مد ترکیبی از مد برشی و شیری است. پس از ساخت دمپر مورد نظر توسط دستگاه تست دمپینگ، تست دمپینگ روی دمپر مورد نظر انجام شد که با توجه به گراف‌های دریافتی از تست در جریان‌های 0، 1 و 2 آمپر و سرعت 0.05m/s مقدار نیروی دمپینگ نسبت به حالت جریان صفر (دمپر معمولی) در بیشترین شدت میدان مغناطیسی ( $H_{mr}$ ) پنج برابر شده که این تغییرات نیرو همان کاربرد اصلی دمپر ام آر است.

## Design, fabricate and testing the novel Magnetorheological damper involving stabilizer nanoparticles of silicone

Hamed Adibi<sup>1\*</sup>, Ebrahim Yarali<sup>1</sup>, AmirHossein RamezanShams<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Indamin Saipa Corporation, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1591634311, Tehran, Iran, hadibi@aut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 17 April 2017  
Accepted 21 June 2017  
Available Online 11 August 2017

#### Keywords:

Magnetorheological fluid  
Intelligent damper  
Magnetorheological damper  
Carbonyl iron  
Silicone nano powder

### ABSTRACT

The aim of this study was the design and fabrication of a prototype of double-tube magnetorheological damper (MR damper) involving micron sized and soft ferro magnetic of carbonyl iron (CI) particles and stabilizer nanoparticles of silicone (SiO<sub>2</sub>). Initially required magnetorheological fluid was designed and fabricated. Then sedimentation and magnetorheometry tests (in mode of shear) were done. Results of sedimentation test illustrated that, after 10 days the value of sedimentation just was 15% and maximum of shear stress in maximum current was about 20KPa, which was desired. Then the magnetic section of the research was conducted using the existing relationships and Maxwell software. By using these data, the geometric dimensions of the MR damper was designed and fabricated. This damper was double tube type and it was worked in shear mode. Then, damping test was carried out on damping test machine. Results shows that at the electricity currents of 0, 1 and 2 amps, speed of 0.05m/s and at saturate magnetic intensity ( $H_{mr}$ ), the magnitude of damping force was 5 times more than conventional damper.

### 1- مقدمه

وینسلو کشف شدند که توسط میدان الکتریکی (به عنوان تحریک خارجی) تحریک می‌شوند و با تغییر کردن ویسکوزیته ظاهری آن‌ها خواص رئولوژی آن‌ها تغییر می‌کند که با کشف سیالات ام آر در سال 1948 پس از ده سال، سیالات ای آر، جای خود را به سیالات ام آر دادند، چرا که سیالات ای آر نسبت به سیالات ام آر دارای تنش تسلیم پایین، محدوده دمایی پایین، مصرف انرژی بالا بودند [4,3]. سیالات فروفلوئید در سال 1960 کشف شدند و در واقع

مواد هوشمند موادی است که به نیروی خارجی که با تغییرات خواص آن‌ها ایجاد می‌شود، پاسخ می‌دهند و دارای خواص چندگانه است (شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی، مکانیکی و حرارتی) [2,1]. سیالات مگنتورئولوژیک، الکترومگنتورئولوژیک، فروفلوئید و فروفلوئید بر پایه سیالات مگنتورئولوژیک از جمله مواد هوشمند (سیالات هوشمند) است. سیالات ای آر سال 1947 توسط

Please cite this article using:

H. Adibi, E. Yarali, A. H. RamezanShams, Design, fabricate and testing the novel Magnetorheological damper involving stabilizer nanoparticles of silicone, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 252-258, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مورد استفاده در آن (مانند تنش تسلیم، ویسکوزیته پلاستیک و...) بسیار مهم است. سیالات ام آر در مدهای ویسکوالاستیک مختلفی کار می کنند که بینگهام پلاستیک، هرشل بالکی و بای ویسکوز از مدهای رایج آن است. مدل بینگهام پلاستیک مدل بسیار رایجی در مدل سازی سیال ام آر در تجهیزات ام آر که در این پژوهش نیز از آن استفاده شده است. مدل بینگهام پلاستیک به صورت رابطه (1) است [15,14].

$$\tau = \tau_y(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

$\tau$  برابر تنش برشی سیال ام آر،  $\tau_y(H)$  برابر با تنش برشی تسلیم سیال در حضور میدان مغناطیسی  $H$  است.  $\dot{\gamma}$  برابر با نرخ کرنش اعمالی بر سیال و  $\eta$  برابر با ویسکوزیته پلاستیک سیال ام آر در عدم حضور میدان مغناطیسی است.

مکانیک اثر سیال ام آر به این صورت است که مطابق شکل 1-a وقتی هیچ میدان مغناطیسی به ذرات اعمال نمی شود، ذرات به صورت کاملاً اتفاقی دارای راستا و جهات مختلف است و سیال شبیه مایع با همان ویسکوزیته معمولی خود عمل می کند. وقتی که سیال در حضور میدان مغناطیسی مانند شکل 1-b قرار می گیرد ذرات مغناطیسی داخل سیال جهت گیری می کنند و همه آن ها قطبی شده و در یک جهت خاصی قرار می گیرند، همچنین سبب افزایش ویسکوزیته سیال ام آر می شوند و در نتیجه سیال حالت شبه جامد به خود می گیرد.

سیالات ام آر و تجهیزات ام آر در مدهای کاری مختلفی چون مد شیری، برشی، فشاری و ترکیبی از این ها کار می کنند. در این پژوهش برای مد کاری دمپر ام آر مورد نظر از ترکیبی از مد شیری و برشی استفاده شده است. برای به دست آوردن معادلات نیروها و فشارهای تولید شده توسط دمپر ام آر از ترکیب روابط پیوستگی و ناویراستوکس و همچنین بینگهام پلاستیک استفاده شده است که به صورت خلاصه در رابطه (2) اشاره می شود [17].

$$F = \left( \frac{12\eta L_a A_p^2}{\pi h^3 (h + D_c)} \right) v_p + \left( \frac{3L_a \tau_y}{h} \right) A_p \quad (2)$$

$$D = \frac{\pi (h + D_c) \tau_y h^2}{4\eta A_p v_p}$$

$F$  نیروی دمپینگ کل تولید شده است که شامل دو ترم مؤلفه نیروی دمپینگ ناشی از اجزای ویسکوز (ترم اول سمت راست معادله بالا) و مؤلفه نیروی دمپینگ ناشی از تنش القایی توسط میدان مغناطیسی (ترم دوم سمت راست معادله بالا) است.  $L_a$  طول قطب مغناطیسی سیم پیچ،  $A_p$  سطح مقطع مؤثر شیر کنترل (پیستون)،  $h$  ضخامت سیال ام آر بین سیلندر داخلی و شیر کنترل (اندازه گپ)،  $D_c$  قطر داخلی سیلندر داخلی،  $v_p$  سرعت حرکت میل پیستون و  $D$  دامنه دینامیکی که برابر با نسبت نیروی کل خروجی دمپر به نیروی غیرقابل کنترل است. پارامترهای یادشده در شکل 2 که شماتیکی دوبعدی از پیستون است.

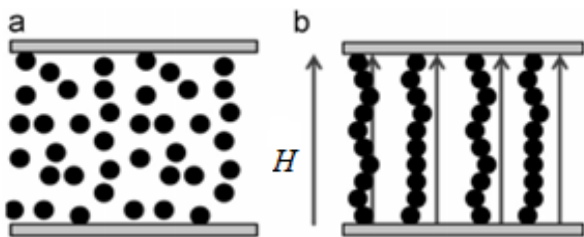


Fig. 1 State of MR fluid, a- in the absence of magnetic field and b- in present of magnetic field [16]

شکل 1 حالت سیال ام آر، الف- در غیاب میدان مغناطیسی، ب- در حضور میدان مغناطیسی [16]

سوسپانسیونی کلونیدی از نانو ذراتی است که به صورت پایدار و یکنواخت در سیال پایه ای پخش<sup>1</sup> می شوند و توسط سورفکتانت های<sup>2</sup> محاصره می شوند و در اثر اعمال یک میدان مغناطیسی ساختار زنجیره مانند ایجاد می کنند که موازی با جهت میدان مغناطیسی بوده و حرکت سیال را محدود می کند [5]. این نوع سیالات در اثر میدان مغناطیسی، میدان جاذبه و حتی نیروهای گریز از مرکز به راحتی ته نشین نمی شوند. سیالات فروفلوئید چون تنش تسلیم بسیار کمی نسبت به باقی سیالات داشتند و در عوض پایداری بالایی داشتند؛ بنابراین ترکیب دو سیال ام آر و فروفلوئید را نیز ساختند و توسط گیندر<sup>3</sup> و وانگ و گردانی نژاد<sup>4</sup> سیالات فروفلوئید بر پایه ام آر نام گرفت [7,6]. سیالات ام آر یکی از رایج ترین سیالات مورد استفاده در دمپرها و سیستم های نیمه فعال برای رسیدن به ضریب دمپینگ متغیر و دارای ویژگی های داشتن پاسخ زمانی کمتر از 10 میلی ثانیه نیاز به توان کمتر است و بنابراین کنترل ارتعاشات در گستره زیادی از کاربردهای اتومبیل مؤثرتر و مناسب تر می شود [8,2].

حال یکی از کاربردهای سیالات ام آر به عنوان سازه های هوشمند دمپرهای ام آر است. در سال 2001 نخستین نوع دمپرهای ام آر صندلی خودروهای سنگین توسط شرکت لورد ساخته شد که می توان آن را شروع تکنولوژی دمپرهای ام آر دانست [4]. این نوع دمپرها در صنعت خودرو سازی، تجهیزات نظامی، تجهیزات پزشکی، مهندسی عمران و سایر صنایع دیگر کاربرد دارد [9,4,11]. در بیشتر خودروهای موجود مقدار ضریب میرایی کمک فنرهای مورد استفاده در سیستم تعلیق آن ها ثابت است، به عبارت دیگر دارای سیستم تعلیق غیرفعال است (چرا که نوع روغن و اندازه اوریفیس پیستون آن ها در حین کارکرد ثابت و غیرقابل تغییر است)؛ بنابراین میزان راحتی و آسایش سرنشینان در این حالت کمتر است، ولی وقتی که از این نوع دمپر استفاده می شود (در واقع استفاده از سیستم تعلیق نیمه فعال که این نسل جدید سیستم تعلیق با ورود کمک فنرهای هوشمند، رایج شدند)، چون که ضریب میرایی آن به واسطه میدان مغناطیسی که در آن ایجاد می شود و همچنین تغییر ویسکوزیته سیال ام آر داخل دمپر تغییر می کند. با کنترل بهینه ضریب میرایی (با کنترل جریان اعمالی به دمپر) می توان راحتی و آسایش سفر بیشتری را برای مسافران فراهم کرد. دمپرهای ام آر علاوه بر ویژگی متغیر بودن ضریب میرایی آن ها حالت ایمن- خاموش در آن ها وجود دارد، یعنی وقتی که سمتی از سیستم کنترلی دچار مشکل می شود سیستم تعلیق و کمک فنر حالت غیرفعال می شوند و سیستم تعلیق همچنان کارایی خود را تحت پارامترهای عملکردی خاصی که به ویژگی های سیال ام آر بستگی دارد خواهد داشت.

دمپرهای ام آر از نظر طراحی و پیکربندی اساساً به سه نوع دمپرهای تک مخزنه، دو مخزنه و دوطرفه<sup>5</sup> و همچنین از لحاظ مد کاری به چهار نوع مد فشاری، برشی، شیری و ترکیبی از این سه نوع است [12,4]. مشکل اصلی این نوع دمپرها پایداری سیال ام آر آن هاست [13] که در این پژوهش، سعی شده است که به آن پرداخته و یک نمونه سیال مورد قبول از لحاظ پایداری و خواص رئولوژی ساخته شود.

## 2- مبانی تئوریک

در طراحی دمپرهای ام آر به دست آوردن خواص و ویژگی های سیال ام آر

<sup>1</sup> Dispersed

<sup>2</sup> Surfactant

<sup>3</sup> Ginder et al

<sup>4</sup> Wang and Gordaninejad

<sup>5</sup> Double-ended

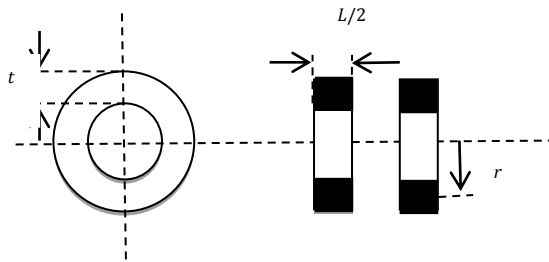


Fig. 3 Cross section view of control valve with two coils [20]

شکل 3 تصویری از سطح مقطع شیر کنترل با دو کویل [20]

$$L_{co} = \frac{4\pi^2 N_{co}^2 r^2 K_n}{l} \times 10^{-6}$$

$$K_n = \frac{1}{1 + 0.9 \frac{L}{L_c} + 0.32 \frac{L}{r} + 0.84 \frac{L}{L_c}} \quad (8)$$

$r$  برابر شعاع کویل،  $t$  برابر با ضخامت (عرض) کویل و  $L$  برابر طول کویل و  $K_n$  برابر ضریبی برحسب هندسه شکل است.

### 3- ساخت سیال ام آر و دمپر ام آر

برای ساخت سیال ام آر در این پژوهش از پودر آهن کربونیل با اندازه ذرات کمتر از 4 میکرون، دانسیته 7.86 کیلوگرم بر متر مکعب، ساخت شرکت بائف آلمان و با درصد وزنی 30% استفاده شده است، به این دلیل از آهن کربونیل استفاده شد که حد اشباع مغناطیسی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بالایی دارد [23-21,3]. ذرات آهن کربونیل برای بررسی کردن میزان کروی بودن تحت آزمایش با میکروسکوپ الکترونی قرار داده شد که تا حد مطلوبی ذرات کروی بودند.

برای روغن پایه از روغن پلی دی متیل سیلوکسان (روغن سیلیکون با ویسکوزیته 100cst، چگالی 0.959gr/ml<sup>3</sup> Korea, KCC) به دلیل محدوده دمایی کارکرد بالا استفاده شد، همچنین میزان پایداری ذرات آهن کربونیل در آن بالاست و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در آن پایین است.

برای مواد پایدارکننده سیال ام آر با توجه به این که مهم ترین مشکل دمپرهای ام آر بحث پایداری آنهاست، در این پژوهش سعی شده که رفع شود؛ بنابراین از سه ماده پایدارکننده، نانو پودر سیلیکون (SiO<sub>2</sub>)، فسفریک اسید و استتاریک اسید استفاده شده است.

نانو پودر سیلیکون (SiO<sub>2</sub>): این ماده نسبت حجم به وزن بالایی دارد و سبب افزایش زیاد چگالی سیال نمی شود و همچنین پایداری سیال ام آر را با به دام انداختن ذرات میکرونی آهن کربونیل و کاهش کشش سطحی سیال افزایش می دهد. برای این کار از 1% وزنی نانو پودر سیلیکون ساخت شرکت ابروسیل (AEROSIL) آلمان با چگالی 2.4 gr/ml<sup>3</sup> و اندازه ذرات بین 20-30 نانومتر استفاده شده که نتایج آزمایش SCM روی این پودر حاکی از کروی بودن بالای این ماده است [24,18].

فسفریک اسید: با چگالی 1.885gr/ml<sup>3</sup> و به اندازه 1% وزنی سوسپانسیون استفاده شده است و سبب افزایش پایداری و عدم آلودگی شدن ذرات آهن کربونیل می شود.

استتاریک اسید: با چگالی 0.9408gr/ml<sup>3</sup> و به اندازه 1% وزنی سوسپانسیون استفاده شده است و سبب افزایش پایداری و عدم آلودگی شدن ذرات آهن کربونیل می شود [25].

هم زدن سیال ام آر در بحث پایداری آن بسیار مهم است. در این پژوهش ابتدا روغن پایه، نانو پودر سیلیکون، فسفریک اسید و استتاریک اسید در چند

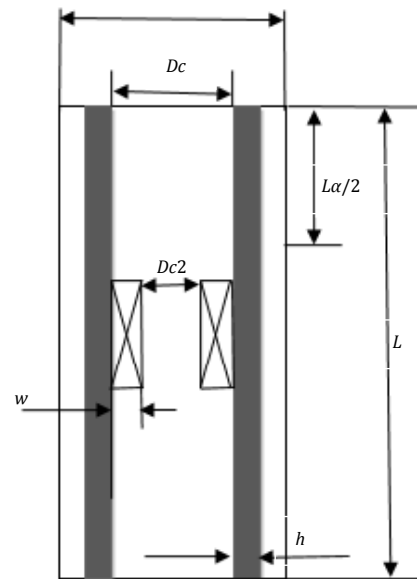


Fig. 2 Approximated of 2-D scheme of control valve

شکل 2 تقریبی از شماتیک دوبعدی شیر کنترل (پیستون) [3]

طراحی شیر کنترل (پیستون) بخش مهم دیگر در طراحی دمپر ام آر که می توان گفت مهم ترین بخش طراحی دمپر است. پارامترهای مورد نظر اندازه گپ  $h$  تعداد دور سیم پیچ، قطر سیم لاک، طول قسمت سیم پیچی شده و قطر میل پیستون است.

نخست با توجه به بیشینه نیروی مورد نظر طراحی، قطر میل پیستون ( $d_{rod}$ ) با توجه به تنش تسلیم جنس میل پیستون به صورت رابطه (3) به دست می آید.

$$d_{rod} = 2 \sqrt{\frac{F_{max}}{\pi \sigma_y}} \quad (3)$$

قطر سیم لاک هم با توجه به رابطه چگالی جریان الکتریکی به صورت رابطه (4) به دست می آید.

$$d_w = 0.255I \quad (4)$$

که  $I$  برابر با بیشینه جریانی است که به ازای آن سیال ام آر اشباع می شود، که از طریق تست مگنتورئومتری سیال ام آر به دست می آید. تعداد دور سیم پیچ هم با اعمال قانون آمپر به شیر کنترل و فرضیات ساده کننده به صورت رابطه (5) به دست می آید [19,18].

$$N_{co} = \frac{2H_{mr}h}{l} \quad (5)$$

$H_{mr}$  شدت میدان مغناطیسی که به ازای آن سیال ام آر اشباع می شود.

سایر پارامترهای ابعادی هسته سیم پیچ با روابط (6) به دست می آید [18].

$$\frac{D_c}{2} = L_a$$

$$w_c = \sqrt{\frac{D_c^2}{4} - L_a^2} - L_a$$

$$h = \frac{D_c}{2} w_c - \frac{D_c^2}{2} \quad (6)$$

$w_c$  برابر با عرض سیم پیچ است.

با توجه به شکل 3 برای بررسی پاسخ زمانی کویل برحسب ضریب خودالقایی کویل مغناطیسی می توان رابطه (7) را داشت.

$$\tau = \frac{L_{co}}{R_{co}} \quad (7)$$

$L_{co}$  برابر ضریب خودالقایی کویل،  $R_{co}$  برابر با مقاومت کویل و  $\tau$  برابر

زمان پاسخ کویل که  $L_{co}$  برابر با مقدار روابط (8) است [20].

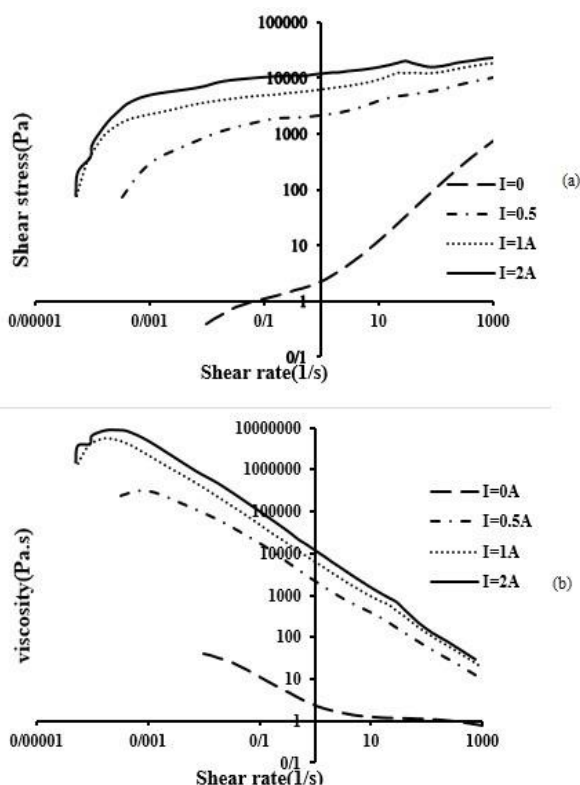


Fig. 5 Plot of a- shear stress and b- viscosity versus strain rate at the different magnetic field

شکل 5 نمودار تغییرات تنش برشی و ویسکوزیته سیال ام آر با نرخ کرنش در شدت میدان‌های مختلف

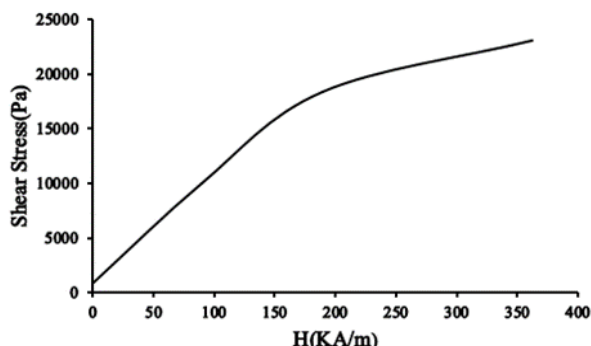


Fig. 6 Plot of shear stress versus magnetic field intensity

شکل 6 نمودار تغییرات تنش برشی برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی

رادگاید، سیال ام آر و بوش استوپ است. در این مدل دمپر از دو سیم پیچ استفاده شده که دلیل آن یکنواختی بیشتر توزیع شار و خطوط مغناطیسی و افزایش بیشتر نیروی دمپینگ است.

نمایی از شکل دو بعدی مجموعه پیستون‌ها در شکل 7 نشان داده شده است. با توجه به تحلیل نرم افزار ماکسول نوع بستن سیم پیچ‌ها هم به صورت سری انتخاب شد. در حالت سری تعداد خطوط میدان مغناطیسی و شار مغناطیسی در لبه‌های شیر کنترل نسبت به حالت موازی بیشتر است، اگرچه در حالت سری سیستم جریان‌یابی بیشتری می‌کشد و همچنین براساس روابط مغناطیس چون ضریب خوالقایی در این حالت بیشتر می‌شود زمان پاسخ سیستم نیز افزایش می‌یابد. در این حالت تولید نیروی دمپینگ بیشتری وجود دارد که این حالت انتخاب شد و در شکل 6 نحوه مقدار چگالی و شدت میدان و شار مغناطیسی نشان داده شده است. نحوه سری یا موازی بستن

مرحله به هم اضافه شدند و توسط همزن مغناطیسی FALCA به مدت 30 دقیقه در دمای 80 درجه سلسیوس هم زده شد (افزایش دما برای حل شدن بهتر ذرات استتاریک اسید اعمال شد)، سپس به محلول حاصل پودر آهن کربونیل را در چند مرحله اضافه کرده و هر مرحله با دستگاه همزن آلتراسونیک 500 وات شرکت هیشلر آلمان هم زده شد.

#### 4- نتایج آزمایشگاهی تست سیال ام آر

در این پژوهش دو تست تنشینی و مگنتورئومتری روی سیال ام آر انجام شد که همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده بیشینه تنشینی سیال در دمای اتاق پس از 10 روز 15% است (مقدار تنشینی با اندازه‌گیری میزان تنشینی سیال در هر روز در یک لوله آزمایش انجام می‌گرفت) که عدد بسیار مطلوبی است. شکل‌های 5 و 6 با انجام آزمایش مگنتورئومتری در دمای اتاق (با دستگاه MCR300 ساخت شرکت Physica) برای یافتن خواص سیال ام آر از قبیل تنش تسلیم برشی و ویسکوزیته پلاستیک به دست آمد. نرخ کرنش اعمال شده در این تست به سیال مورد نظر در بازه حدود 0.001 تا 1000 بر ثانیه است که برای چهار حالت مختلف در چهار جریان (یا میدان مغناطیسی برحسب کیلو آمپر بر متر)، 0، 0.5، 1، 189 و 2، 362 انجام شد که سیال ام آر جدید در هر بار تست گرفتن جایگزین می‌شد تا اثر هیستریزس میدان مغناطیسی پاسخ مسأله را تحت تأثیر قرار ندهد. با توجه به شکل‌های 5 و 6 مقدار ویسکوزیته پلاستیک 0.765 Pa.s، تنش تسلیم برشی 22000 پاسکال و مقدار شدت میدان مغناطیسی و جریان بیشینه هم به‌ترتی 300kA/m و 2 آمپر به دست آمد.

با درون‌یابی نمودار شکل 6 و در نظر گرفتن مدل بینگهام پلاستیک رابطه (9) به دست آمد.

$$\tau = (765 + 105.52H - 0.003H^2) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + 0.765\dot{\gamma} \quad (9)$$

H و  $\tau$  به ترتیب برحسب kA/m و Pa است.

#### 5- ساخت دمپر ام آر

دمپر ام آر در این پژوهش از نوع دو مخزنه و با مد ترکیبی برشی و شیری است. این دمپر از دو مخزن داخلی و خارجی سیال ام آر ساخته شده است. یک مخزن داخلی در واقع فضای سیلندر داخلی و مخزن خارجی که فضای بین پوسته خارجی و سیلندر داخلی است. اجزای این دمپر شامل میل پیستون، شیر کنترل (شامل دو هسته مغناطیسی با دو سیم پیچ و یک پیستون معمولی)، سیلندر داخلی با جنس فولاد کم کربن فرومغناطیس نرم، پوسته خارجی با جنس فولاد کم کربن فرومغناطیس نرم، درپوش، کاسه نمد،

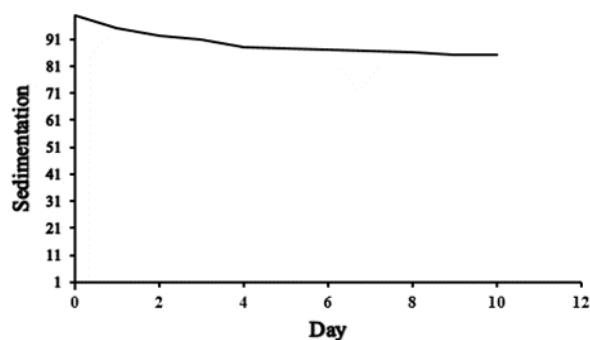


Fig. 4 Plot of sedimentation rate of MR Fluid at the different days

شکل 4 میزان نرخ تنشینی سیال ام آر برحسب روز



Fig. 9 Set of control valve

شکل 9 مجموعه شیر کنترل



Fig. 10 The final MR damper fabricated

شکل 10 دمپر ام آر نهایی ساخته شده

Table 1 The value of MR damper and MR fluid parameters

جدول 1 مقادیر پارامترهای سیال و دمپر ام آر ساخته شده

| پارامتر   | مقدار                |
|-----------|----------------------|
| $L = L_a$ | 8mm                  |
| $h$       | 1mm                  |
| $D_p$     | 32mm                 |
| $L_g$     | 40mm                 |
| $W_c$     | 30mm                 |
| $D_c$     | 28mm                 |
| $d_{rod}$ | 20mm                 |
| $D_{c2}$  | 16mm                 |
| $d_w$     | 0.7mm                |
| $I_{max}$ | 2A                   |
| $N_{co}$  | 300 دور              |
| $H_{mr}$  | 300kA/m              |
| $\eta$    | 0.765Pa.s            |
| $\tau_0$  | 765Pa                |
| $\rho$    | 1.3g/ml <sup>3</sup> |

است. با استفاده از دستگاه تست دمپینگ هیدرولیکی کمک فنر (شرکت Lunik اسپانیا) با ظرفیت 1 تن، بیشینه فرکانس کاری 4.7 هرتز، کورس 300 میلی متر انجام شد. با توجه به ابعاد و نوع کمک فنر مورد نظر تست یاد شده در سرعت 0.05m/s و فرکانس 3.6Hz مطابق شکل 11 انجام گرفت. در واقع این دستگاه نیروی فشاری (جمع شدن کمک فنر) و نیروی کششی

سیم پیچ ها به هندسه شیر کنترل هم وابسته است و امکان دارد در حالت شیر کنترل تک کویله حالت موازی مطلوب تر باشد [26,20]. براساس شکل 8 بیشینه چگالی میدان مغناطیسی برابر 1 تسلا است. با توجه به این که بیشینه جریان اعمالی 2 آمپر و یا به عبارت دیگر بیشینه شدت میدان مغناطیسی اعمالی به سیال ام آر برابر با 450.1 کیلو آمپر بر متر است این مقدار تغییرات چگالی میدان مغناطیسی برای حالت اشباع مغناطیسی قابل قبول است. در شکل 9 مجموعه شیر کنترل قابل مشاهده است. پارامترهای دمپر مورد نظر با روابط بیان شده و نتایج حاصل از تست سیال ام آر طراحی و در جدول 1 نوشته شد. دمپر ام آر نهایی ساخته شده نیز در شکل 10 قابل مشاهده است.

## 6- تست دمپر ام آر ساخته شده

تست نیرویی دمپینگ برای انجام تست بر دمپر مورد نظر مهم ترین تست

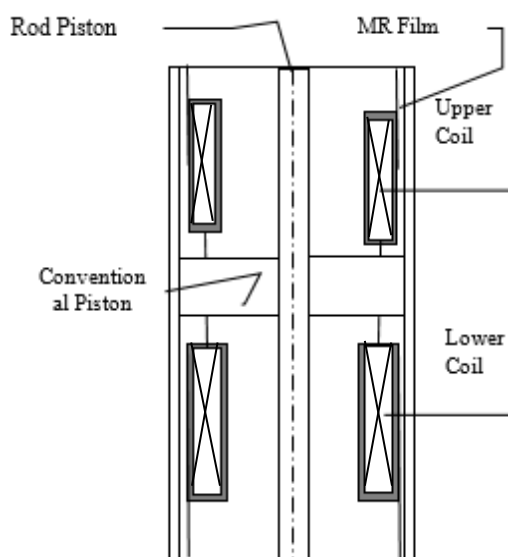


Fig. 7 Schematics of control valve set Geometry

شکل 7 نمایی از هندسه سیم پیچ های دمپر ام آر مورد نظر

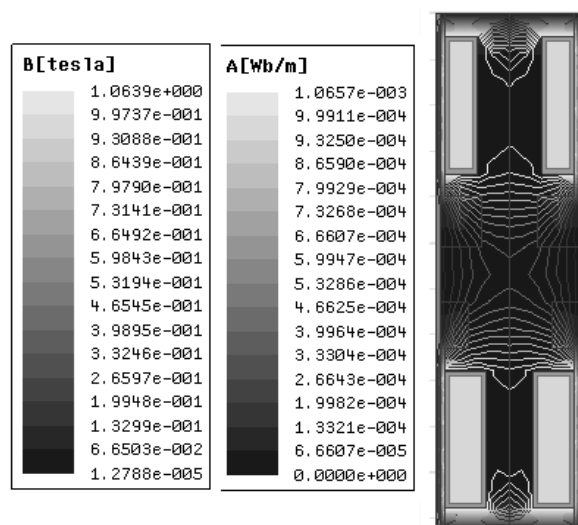


Fig. 8 Distribution of flux and magnetic field intensity at the series circuit and in line polarity in 2A current

شکل 8 توزیع خطوط شار و شدت میدان مغناطیسی در حالت سری با پلاریته همسو در جریان 2 آمپر

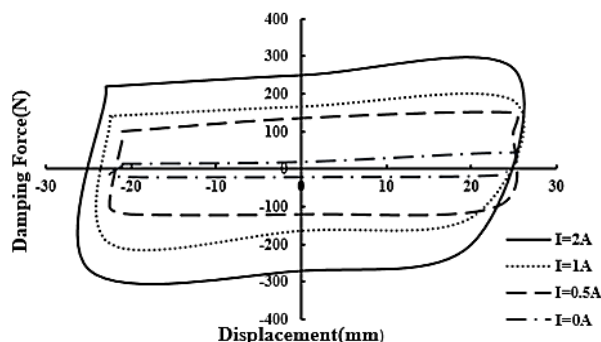


Fig. 12 Experimental damping force versus displacement

شکل 12 نمودار تجربی نیروی دمپینگ برحسب جابه‌جایی میل‌پیستون

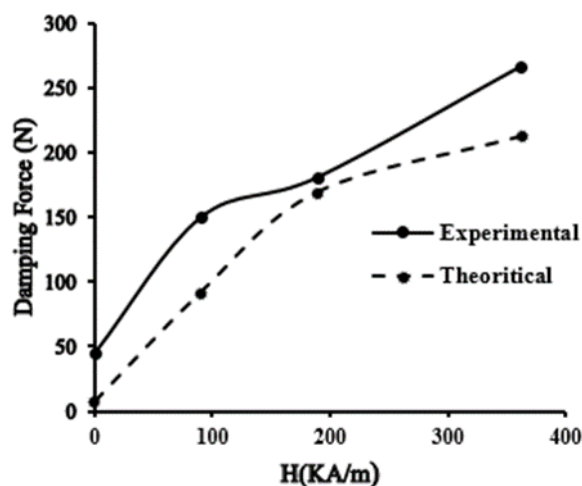


Fig. 13 Experimental and theoretical damping force versus magnetic field intensity

شکل 13 نمودار تجربی و تئوری نیروی دمپینگ برحسب شدت میدان مغناطیسی

کاهش کشش سطحی ذرات باعث افزایش قابل توجه پایداری سیال می‌شود [24]، استتاریک اسید با 1% وزنی (سبب افزایش قابل توجه پایداری سیال می‌شود) [25] و فسفریک اسید با 1% وزنی (سبب افزایش پایداری و عدم آلوده شدن ذرات CI می‌شود) استفاده شد. دمپر ام آر ساخته شده از نوع دو مخزنه و با ترکیبی از دو مد برشی و شیری است که شیر کنترل آن شامل دو پیستون که سیم پیچ در آن جای گذاری شده و یک پیستون معمولی برای تولید نیروی دمپینگ ثابت است، با اعمال جریان‌های 0، 0.5، 1 و 2 آمپر در سرعت 0.05m/s میل پیستون، تست تعیین گراف نیروی دمپینگ برحسب جابه‌جایی مطابق شکل 12 استخراج شد. نیروی دمپینگ در یک کورس حرکت میل پیستون (فشاری و کششی) با افزایش مقدار جریان اعمالی به کمک فنر از 48 به 287 نیوتون می‌رسد، یعنی حدود 5 تا 6 برابر می‌شود که از نظر کاربرد و عملکرد دمپر ام آر بسیار مطلوب است. برای مشاهده تغییرات نیروی دمپینگ برحسب شدت میدان مغناطیسی اعمالی بر کمک فنر نمودار شکل 13 در دو حالت تجربی که از داده‌های تست دمپینگ به دست آمد و حالت تئوری که از روابط نوشته شده در قسمت تئوری استفاده شده است. نیروی دمپینگ در این نمودار با افزایش  $H$  افزایش می‌یابد.

## 8- مراجع

- [1] H. Sahin, *Theoretical and Experimental Studies of Magnetorheological (MR) Fluids and MR Greases/Gels: From Rheology to System Application*, PHD Thesis, Mechanical Engineering, Nevada, Reno, University of Nevada, Reno, 2008

(باز شدن کمک فنر) را به ازای یک جابه‌جایی معین در طول کورس حرکت میل پیستون نمایش می‌دهد که در نهایت گراف نیروی دمپینگ کم فنر در یک کورس حرکتی کششی- فشاری کمک فنر را نمایش می‌دهد. قابل توجه است که نیروی دمپینگ توسط نیروسنجی که روی دستگاه سوار بود، خوانده می‌شد. ابتدا آن را به صورت تغییر ولتاژ (بیشینه 10 ولت) دریافت کرده و به کمک تبدیلی به نیرو تبدیل می‌شود. تست کمک فنر ابتدا در جریان صفر آمپر، جریان 1 آمپر، جریان 1.5 آمپر و در نهایت جریان 2 آمپر صورت گرفت. جریان اعمالی از نوع DC است و با استفاده از یک منبع تغذیه جریان مستقیم به کمک فنر اعمال شد.

خروجی تست دمپینگ یاد شده نمودار نیروی دمپینگ برحسب جابه‌جایی میل پیستون در شکل 12 قابل مشاهده است.

براساس شکل 12 گراف نیرو برحسب جابه‌جایی کمک فنر با افزایش شدت جریان اعمالی به کمک فنر بازتر شده و نیروی دمپینگ افزایش یافته که این مقدار افزایش حدود 5 برابر است. دلیل افزایش نیرو این است که ذرات داخل سیال ام آر با افزایش شدت میدان مغناطیسی جهت‌گیری کرده و زنجیره‌های CI را عمود بر جهت جریان تشکیل می‌دهد و سبب افزایش ویسکوزیته سیال ام آر و همچنین افزایش نیروی دمپینگ کمک فنر می‌شود. در این جا برای این که منحنی تغییرات نیروی دمپینگ برحسب شدت میدان مغناطیسی مشاهده شود در دو حالت تجربی و تئوری در شکل 13 رسم شده است.

با درون‌یابی کردن نمودار شکل 13 و در نظر گرفتن تقریب چندجمله‌ای مرتبه 2 برای تغییرات نیروی دمپینگ تجربی (N) برحسب شدت میدان مغناطیسی (KA/m) رابطه (10) به دست می‌آید.

$$F = -0.001H^2 + 0.9469H + 52.883 \quad (10)$$

## 7- نتیجه‌گیری

با توجه به این که یکی از مشکلات اصلی دمپرهای ام آر بحث پایداری سیال ام آر داخل آن‌هاست؛ بنابراین در این پژوهش سعی بر این شده که با استفاده از سورفکتانت‌های مورد استفاده در سیال ام آر پایداری سیال را به طور چشم‌گیری افزایش داد. با توجه به نمودارهای به دست آمده بیشینه میزان ته‌نشینی پس از ده روز 15% و از لحاظ خصوصیات سیال ام آر نیز برای کاربرد در دمپر ام آر اعداد به دست آمده برای تنش تسلیم برشی و ویسکوزیته پلاستیک مورد مطلوب بود. با انجام تست رئومتری روی سیال ام آر مقدار شدت میدان مغناطیسی و جریان بیشینه به ترتیب 300kA/m و 2 آمپر به دست آمد. برای افزایش پایداری سیال ام آر از سورفکتانت‌های نانو ذرات سیلیکون با 1% وزنی ساخت شرکت ابروسیل (با به دام انداختن ذرات CI و



Fig. 11 A view of fabricated MR damper under damping test

شکل 11 نمایی از کمک فنر ام آر ساخته شده در حال تست دمپینگ

- M. N. Islam, Finite element analysis and simulation of a magneto-rheological damper, *Innovative Research in Science & Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 12-19, 2014.
- [16] A. C. Becnel, S. Sherman, W. Hu, N. M. Wereley, Nondimensional scaling of magnetorheological rotary shear mode devices using the Mason number, *Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 380, No. 1, pp. 90-97, 2015.
- [17] Y. Ding, L. Zhang, H. Zhu, Z. Li, Simplified design method for shear-valve magnetorheological dampers, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 13, No. 4, pp. 637-652, 2014.
- [18] J. Góldasz, B. Sapiński, *Insight into Magnetorheological Shock Absorbers*, pp.105-108, Switzerland, Springer International Publishing, 2015.
- [19] N. Golinelli, A. Spaggiari, Design of a novel magnetorheological damper with internal pressure control, *Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 32, No.1, pp. 13-23, 2015
- [20] S. P. Kelso, Experimental characterization of commercially practical magnetorheological fluid damper technology, *Proceeding of International Society for Optics and Photonics*, Vol. 4332, No. 1, pp. 292-299, 2001.
- [21] T. I. Ahamed, R. Sundarajan, G. Prasaath, V. Raviraj, Implementation of magneto-rheological dampers in bumpers of automobiles for reducing impacts during accidents, *Procedia Engineering*, Vol. 97, No. 1, pp. 1220-1226, 2014.
- [22] E. Świtoński, A. Męzyk, S. Duda, S. Kciuk, Prototype magnetorheological fluid damper for active vibration control system, *Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 55-62, 2007.
- [23] W. W. Chooi, S. O. Oyadiji, Design, modelling and testing of magnetorheological (MR) dampers using analytical flow solutions, *Computers & Structures*, Vol. 86, No. 3, pp. 473-482, 2008.
- [24] M. Ashtiani, S. H. Hashemabadi, The effect of nano-silica and nano-magnetite on the magnetorheological fluid stabilization and magnetorheological effect, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 26, No. 14, pp. 1887-1892, 2015.
- [25] A. J. H. Kiyumarsi, M. Norouzi, M. Ghatee, An experimental investigation of iron based magnetorheological fluid stability and rheology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 301-308, 2016. (in Persian)
- [26] J. Zheng, Z. Li, J. Koo, J. Wang, Magnetic circuit design and multiphysics analysis of a novel MR damper for applications under high velocity, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 402501, 2014.
- [2] S. Mangal, A. Kumar, Experimental and numerical studies of magnetorheological (mr) damper, *Engineering*, Vol. 2014, No.1, pp. 1-7, 2014.
- [3] S. B. Choi, Y. M. Han, *Magnetorheological Fluid Technology: Applications In Vehicle Systems*, pp. 33-45, New York: CRC Press, 2012.
- [4] R. Ahamed, M. M. Ferdous, Y. Li, Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review, *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 28, No. 4, pp. 355-379, 2016.
- [5] S. Z. R. R. Tikani, M. Esfahanian, Simulation and experimental evaluation of a magneto-rheological hydraulic engine mount, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 43-49, 2014. (in Persian)
- [6] Y. Wang, *Magnetic Particles Study and Their Applications*, Thesis, University of York, 2014.
- [7] Y. Yang, L. Li, G. Chen, Static yield stress of ferrofluid-based magnetorheological fluids, *Rheologica Acta*, Vol. 48, No. 4, pp. 457-466, 2009.
- [8] S. Sun, D. Ning, J. Yang, H. Du, S. Zhang, W. Li, A seat suspension with a rotary magnetorheological damper for heavy duty vehicles, *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 10, pp. 105032, 2016.
- [9] Q. Wang, Z. B. Chen, M. Ahmadian, W. T. Liu, Design and modeling of a novel double-piston magnetorheological damper, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 574, No. 1, pp. 588-595, 2014.
- [10] P. N. S. A. Jakirahamad, B. Makandar, Introduction to magneto-rheological fluid technology & its application, *Innovation in Engineering Research and Technology[IJERT]*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-5, 2015
- [11] M. Ahmadian, J. A. Norris, Rheological controllability of double-ended MR dampers subjected to impact loading, *Proceedings of SPIE:Smart Structures and Materials: Damping and Isolation*, Bellingham, USA, 29-30 Dec, 2004.
- [12] 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.
- [13] S. Wahid, I. Ismail, S. Aid, M. Rahim, Magneto-rheological defects and failures: A review, *Proceeding of, IOP Publishing*, Vol. 114, No. 1, pp. 1-11, 2016.
- [14] D. Wang, W. H. Liao, Magnetorheological fluid dampers: A review of parametric modelling, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 2, pp. 023001, 2011.
- [15] D. Paul, A. Moinuddin, M. M. N. Islam, M. D. Paul, M. A. Moinuddin, M.