



## طراحی بهینه، مدل سازی و ساخت میراگر جریان گردابی با چیدمان آهن ربای دائم

علی اصغر مداح<sup>1</sup>، یوسف حجت<sup>2\*</sup>، مجتبی قدسی<sup>3</sup>، سهیل طالبیان<sup>1</sup>، محمد رضا آشوری<sup>4</sup>

- 1- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
  - 2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
  - 3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
  - 4- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
- \* تهران، صندوق پستی 143-14115، yhojjat@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

هدف این مقاله، به دست آوردن چیدمان بهینه آهن رباهای دائم در یک میراگر جریان گردابی بدون تماس است که منجر به بیشترین ضریب میرایی (c) در بین میراگرهای ساخته شده با ابعاد مشابه شود. در این مقاله تئوری جریان گردابی بررسی شده و با حل معادلات تئوری با استفاده از مدل سازی عددی، پارامترهای مؤثر در میرایی و نسبت بهینه هسته و آهن ربا برای ابعاد مورد نظر به دست آمده است. برای صحت سنجی نتایج، یک میراگر با ابعاد به دست آمده طراحی و ساخته شده است. یک مجموعه آزمایشگاهی نیز برای تست میراگر ساخته شده است. ضریب میرایی به دست آمده از مدل ساخته شده برابر با  $69/5 (Ns/m)$  و ضریب میرایی تجربی  $68/37 (Ns/m)$  بوده که دقت بالای مدل را نشان می دهد. ضریب میرایی میراگر ساخته شده با میراگری با همین ابعاد مقایسه شده که 22/5% افزایش نشان می دهد. با استفاده از نرم افزار متلب و پاسخ فرکانسی بدست آمده، افزایش بهنای باند و کاهش دامنه ارتعاشات در میراگر جریان گردابی مورد بررسی قرار گرفته است که کاهش دامنه در قله های پاسخ فرکانسی را به میزان 20 دسیبل نشان می دهد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 04 فروردین 1393  
پذیرش: 19 خرداد 1393  
ارائه در سایت: 17 آبان 1393  
کلید واژگان:  
میراگر جریان گردابی  
میراگر غیر فعال  
شبیه سازی عددی  
جریان گردابی

## Optimal Design, modeling and manufacturing of the eddy current damper by arrangement permanent magnet

Ali Asghar Maddah<sup>1</sup>, Yousef Hojjat<sup>1\*</sup>, Mojtaba Ghodsi<sup>1</sup>, Soheil Talebian<sup>1</sup>, Mohammad Reza Ashoori<sup>2</sup>

- 1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
  - 2- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
- \* P.O.B. 3519849658 Tehran, Iran, yhojjat@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 24 March 2014  
Accepted 09 June 2014  
Available Online 08 November 2014

**Keywords:**  
Current Dampers  
Passive Dampers  
Numerical Simulation  
Eddy Current

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to obtain an optimal arrangement of permanent magnets in a non-contact eddy current damper in order to achieve the maximum damping coefficient (c) among dampers with the same dimension. Magnetic theory and eddy current equations have been employed and solved by finite element numerical method. The dominant damping parameters and the optimum ratio of the ferrite core and the permanent magnet for the specific dimension have been achieved. A damper with the dimensions obtained from design is manufactured in order to verify the result of simulations. A setup is also designed and manufactured to verify the damping coefficient. The damping coefficient of simulation and experimental setup is 69.50 and 68.37 respectively which shows a close correlation between simulation and experiment results. The damping coefficient of the designed damper has been increased by 22.5% compared with the same dimension damper. Furthermore, frequency response is obtained by MATLAB software and a decrease of vibration amplitude in eddy current damper has been investigated. The result showed 20 dB reduction in the peak amplitude of frequency response in the designed damper.

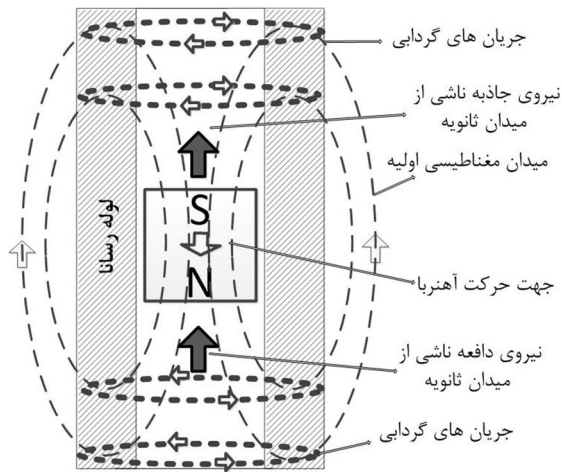
### 1- مقدمه

به میراگری که جریان گردابی آن توسط آهن رباهای دائم ایجاد شود، غیر فعال گفته می شود. عملکرد میراگر غیر فعال به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است. با حرکت آهن ربای دائم در مجاورت سیلندر رسانا، میدان مغناطیسی اولیه و ثانویه ایجاد می شود. میدان مغناطیسی اولیه توسط دوقطبی های مغناطیسی آهن ربا<sup>2</sup> و میدان مغناطیسی ثانویه به دلیل ایجاد جریان های گردابی تشکیل می شود. وقتی آهن ربا در لوله رسانا

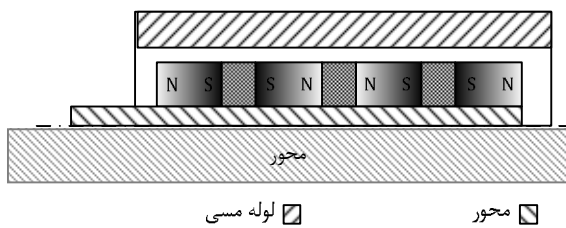
مرسوم ترین میرا کننده ارتعاشی بدون تماس، میراگر جریان گردابی<sup>1</sup> است. جریان گردابی در اثر میدان مغناطیسی خارجی متغیر در یک رسانای الکتریکی تشکیل می شود. کارکرد یک میراگر جریان گردابی بر اساس ایجاد میدان مغناطیسی مخالف با میدان مناطیسی بوجود آورنده خود است. به میراگری که جریان گردابی آن از طریق کوپل ایجاد شود، فعال و

2- Magnetic Moment of Permanent Magnet

1- Eddy Current Damper



شکل 1 شماتیک ایجاد نیروی ناشی از جریان گردابی



شکل 2 شماتیک میراگر جریان گردابه‌ای

در رابطه (1)،  $E$  میدان الکتریکی،  $B$  چگالی میدان مغناطیسی،  $\sigma$  رسانایی الکتریکی و  $v$  سرعت نسبی بین میدان و رسانا می‌باشد. در میراگر مورد بررسی، به دلیل استفاده از آهن‌ربای دائم، میدان مغناطیسی ثابت بوده و بنابراین عبارت اول برابر صفر می‌شود. در عبارت دوم  $(v \times B)$  همان میدان الکتریکی است که به دلیل شکل هندسی سیلندر دورانی شده است. طبق قوانین الکترومغناطیس ماکسول جریان گردابی با میدان الکتریکی رابطه خطی و مستقیم دارد:

$$J = \sigma \cdot E \quad (2)$$

بنابراین، با جایگذاری رابطه (1) در رابطه (2) رابطه (3) بدست می‌آید:

$$J = \sigma \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

کریک در سال 1995 رابطه میدان حول دو حلقه سیم حاوی جریان های مخالف هم را ارائه داد [10]. بر این اساس، چگالی میدان مغناطیسی نقطه  $P$  حول محور  $Z$  طبق رابطه (4) بدست می‌آید (شکل 3).

$$dB_z(r, z) \Big|_{r, \tau_p} = \frac{\mu_0 I}{2\pi \tau_p} \int_{-\tau_p/2}^{\tau_p/2} \frac{(z-z')}{r \sqrt{(R+r)^2 + (z-z')^2}} d\varphi + \frac{d\theta}{\sqrt{1-4Rr[(R+r)^2 + (z-z')^2]} \sin^2(\theta)} dz' + \dots + \int_{-\tau_p/2}^{\tau_p/2} \frac{(R+r)^2 + (z-z')^2}{(R-r)^2 + (z-z')^2} \times \int_{-\tau_p/2}^{\tau_p/2} \sqrt{1-4Rr[(R+r)^2 + (z-z')^2]} \sin^2(\theta) d\theta dz' \quad (4)$$

پارامترهای  $R$  و  $\tau_p$  معرف شعاع و ضخامت آهن‌ربا با  $\mu_0$  نفوذپذیری مغناطیسی هوا،  $r$  فاصله شعاعی مورد نظر از مرکز آهن‌ربا،  $z$  فاصله محوری نقطه

حرکت می‌کند، میدان مغناطیسی متحرک در داخل رسانا باعث ایجاد جریان گردابی شده که خود این جریان ها تولید میدان مغناطیسی کرده و در واکنش به میدان اصلی بنا بر قانون لنز، نیرویی ایجاد می‌کند که بر خلاف جهت حرکت است. این پدیده باعث می‌شود که ارتعاشات جسم رسانا میرا شود.

از مزایای این روش می‌توان به مواردی همچون میرایی بدون تماس و عدم نیاز به سیستم روغن‌کاری و در نتیجه نیاز کمتر به تعمیرات و طول عمر بالاتر اشاره کرد. با وجود این، روش مزبور دارای معایبی مانند لزوم استفاده از مواد هادی (مانند مس و آلومینیوم) و کارکرد نامناسب در فرکانس‌های بالا بوده، اما در بازه فرکانس‌های مکانیکی زیر 100 هرتز مناسب است.

سودانو در سال 2005 برای کم کردن مصرفی میراگرهای فعال جریان گردابی نوع غیر فعال آن را ارائه داده است [1-3]. همین محقق در سال 2006 مدل‌سازی تحلیلی میراگر جریان گردابی را برای کنترل ارتعاشات سازه های فضایی انجام داده است [4]. تونلی در سال 2008 مدلی تحلیلی برای میراگر های جریان گردابی دورانی به صورت کوپله ارائه و با آزمایش، صحت‌سنجی کرده است [5]. میراگرهای جریان گردابی در نوع فعال و غیر فعال ارائه شده‌اند [6-9] که نوع جدیدی از میراگر غیر فعال در سال 2009 ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است [10]. نوع فعال آن با صرف توان بالا، نیروی کمی را میرا می‌کند [11-13]. بیشترین توسعه میراگرهای جریان گردابی غیر فعال در دانشگاه واترلو در سال 2009 با هدف استفاده در کنترل ارتعاشات خودروهای متوسط انجام گرفته که منجر به ساخت میراگر جریان گردابی غیر فعالی با راندمان بالاتر شده است [14-16].

در بررسی پیشینه پژوهش، گزارشی در مورد بهینه سازی مغناطیسی میراگر به منظور کاهش ابعاد یا افزایش ضریب میرایی، مشاهده نشد. همچنین پژوهش های یاد شده در یکی از دو عرصه تئوری یا تجربی انجام گرفته و صحت‌سنجی بین نتایج بدست آمده صورت نگرفته است. در این مقاله طراحی بهینه مغناطیسی از طریق شبیه‌سازی میراگر صورت گرفته و با ساخت نمونه و انجام آزمایش، نتایج بدست آمده حاصل از مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی مشخصات مغناطیسی و هندسی میراگر، در همان ابعاد، خصوصیتی از قبیل نیرو و ضریب میرایی افزایش چشمگیری پیدا می‌کند.

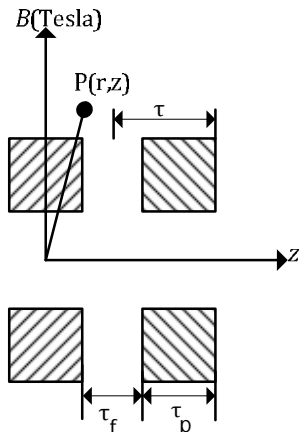
## 2- تئوری و مدل‌سازی جریان گردابی

در این قسمت با استفاده از روابط تئوری الکترو مغناطیس، پدیده جریان گردابی بررسی شده و دانش اولیه برای تعیین فاکتورهای ورودی به طرح آزمایش بدست آمده است. برای ایجاد میدان مغناطیسی، از آهن‌ربای دائم استفاده شده است که این میدان با حرکت آهن‌ربای دائم نسبت به سیلندر رسانا، تغییر می‌کند. آهن‌رباهای دائم، دارای قطبیت محوری<sup>1</sup> و شکل حلقوی است. شماتیک میراگر ساخته شده در شکل 2 نشان داده شده که متشکل از لوله رسانا، محور میراگر و مجموعه‌ای از آهن‌رباها و هسته‌های آهنی است. لوله می‌تواند ثابت باشد و محور به جسم مرتعش متصل شود. از هسته‌های آهنی برای تقویت میدان استفاده شده است.

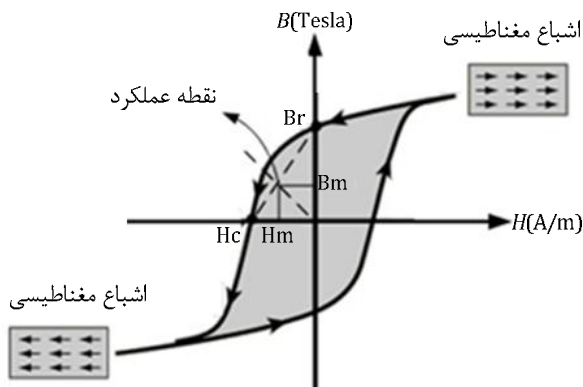
دو عامل موجب پدید آمدن جریانهای گردابی می‌شود که بر اساس قانون القای فاراده به صورت رابطه (1) مشخص شده است.

$$E = E_{trans} + E_{motional} = - \int \frac{dB}{dt} \cdot ds + (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

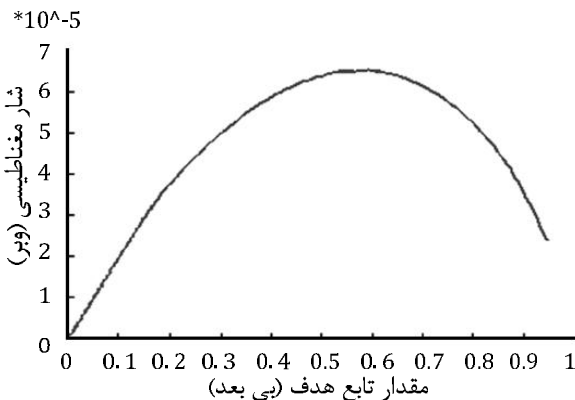
1- Axial magnetic pole



شکل 3 شماتیک چیدمان آهن‌رباها



شکل 4 ناحیه دوم نمودار B-H آهن‌ربا



شکل 5 شار مغناطیسی بر حسب پارامتر ابعادی

نمودار شکل 5 از حل رابطه (9) بدست آمده است که نشان می‌دهد بیشترین شار مغناطیسی گذرنده در حدود  $\tau_p = 0/55$  ایجاد می‌شود. در پژوهش انجام شده در مرجع [10] از این نسبت بی بعد شده ابعادی (0/55) برای مشخص کردن ابعاد هسته و آهن‌ربا استفاده شده است. در حالی که رابطه (9) و نمودار شکل 5 اگرچه مربوط به فاصله AB در شکل 6 است، اما فقط شار مربوط به فاصله  $\tau_r$  را پوشش داده و از مقادیر شار مغناطیسی خارج از این فاصله صرف‌نظر شده است. در صورتی که در فیزیک واقعی مسأله، میراگر در تمام فاصله AB به لوله رسانا نیرو وارد می‌کند. در این مقاله، معیار صحیح برای انتخاب بهینه ابعاد آهن‌ربا و هسته، یعنی بیشینه کردن مقدار میانگین نیرو در تمام فاصله AB در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه نتایج حاصل از این بهینه سازی با نتایج مرجع [10]، فاصله AB و شعاع بیرونی و داخلی آهن‌رباها مشابه مرجع [10] در نظر گرفته شده است (شکل 6).

مورد نظر از مرکز آهن‌ربا و z فاصله محوری یک حلقه فرضی از آهن‌ربا نسبت به مرکز آن است. حل تحلیلی این انتگرال بسیار مشکل است. مشابه این رابطه برای بدست آوردن چگالی شار حول میراگر غیر فعال توسط ابراهیمی ارائه شده اما حل نشده است [10]. در این مقاله با استفاده از حل عددی، چگالی میدان مغناطیسی محاسبه شده و توسط آن نیروی میراکننده میراگر جریان گردابی و ضریب میرایی بدست آمده است.

میدان ایجاد شده توسط این نوع آهن‌ربا شبیه به میدان ایجاد شده توسط سیم پیچ است. فورلانی در سال 2001 جریان عبوری از یک حلقه سیم (I) را با یک آهن‌ربای رینگی شکل معادل‌سازی کرد و جریان داخل یک حلقه سیم با ضخامت آهن‌ربا و مغناطیس شونده آهن‌ربای دائم رینگی شکل (M) را به صورت رابطه (5) ارائه داد [10]:

$$I = M \cdot \tau_p \quad (5)$$

علامت M نشان دهنده قطبیت آهن‌رباها می‌باشد و توسط آن میدان مغناطیسی برای حالت هایی با قطبیت‌های مختلف آهن‌رباها مدل‌سازی شده است. میدان حول دو آهن‌ربای رینگی شکل در شکل 3 به صورت رابطه (6) بدست می‌آید [10]. در این رابطه میدان در شعاع داخلی و خارجی آهن‌ربا محاسبه می‌شود.

$$B_r = 2(B_r(r, z)|_{\text{outside}, \tau_z} - B_r(r, z)|_{\text{inside}, \tau_z}) \quad (6)$$

رابطه‌های (7) و (8) به ترتیب رابطه نیرو و ضریب میرایی بر حسب مشخصات ابعادی آهن‌ربای دائم رینگی شکل با قطبیت محوری است [10].  $d\Gamma$  در رابطه (7) به ترتیب المان حجمی و سرعت در راستای z می‌باشند.

$$F = \int (J \times B) d\Gamma = -\sigma(\tau - \tau_p)v \times \int_0^{2\pi} \int_{\text{rinside}}^{\text{routside}} r B_r^2(r, z_0) dr d\theta \quad (7)$$

$$C = \sigma \int_{\Gamma} B_r^2 d\Gamma \quad (8)$$

در مدل‌سازی میراگر مشابه [10]، شار مغناطیسی خروجی از هر قطب از رابطه (9) تخمین زده شده که در این رابطه،  $L_m$  اختلاف شعاع خارجی و داخلی و s شعاع محور مرکزی است.

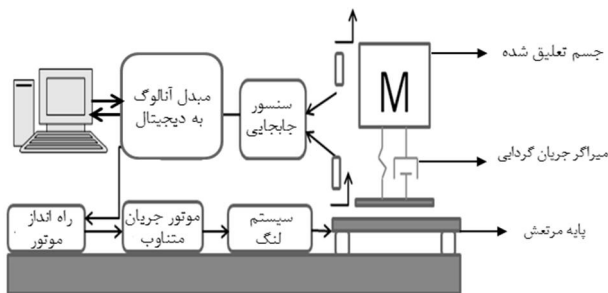
$$\varphi = 2\pi(L_m + s)(\tau - \tau_p)B_r \quad (9)$$

### 3- طراحی بهینه مغناطیسی و ابعادی

منظور از طراحی بهینه مغناطیسی و ابعادی میراگر، انتخاب بهترین چیدمان و ابعاد آهن‌رباها به نحوی است که میراگر بتواند در ازای ابعاد کوچکتر، ضریب میرایی بیشتری داشته باشد. به این منظور، پارامتر ابعادی به صورت تابع بی بعد هدف با رابطه  $\tau_p/\tau$  تعریف و شکل کلی میراگر به صورت پارامتریک در نرم‌افزار ماکسول<sup>1</sup> مدل شد. در شبیه‌سازی از متغیرهایی مانند تغییرات دما صرف‌نظر شده است. پارامتر ابعادی طوری تعیین شده که میدان مغناطیسی میراگر در راستای شعاعی هر قطب (شکل 3) بیشترین مقدار را داشته باشد. به علت تقارن محوری موجود در میراگر، ابعاد آن در نرم‌افزار به صورت دو بعدی<sup>2</sup> شبیه‌سازی شده است. برای هسته فلزی مابین آهن‌رباهای دائم، خواص فولاد سیلیکون‌دار با چگالی میدان 1/6 تسلا در حالت اشباع مغناطیسی در نظر گرفته شد. برای تعریف خواص آهن‌ربای دائم و اختصاص خواص آن، نیاز به منحنی پسماند مغناطیسی است (شکل 4). بدین منظور، خواص آهن‌ربای دائم در محدوده عملکرد آهن‌ربا طبق روابط 10 از روی ناحیه دوم منحنی پسماند شکل 4 به دست آمده است.

1- Maxwell

2- Two Dimension Axisymmetric

شکل 9 تاثیر تغییر ضخامت آهن‌ریا ( $\tau_p$ ) در نیروی میراگر (در 18 میلی‌متر)

شکل 10 نحوه اتصال قسمت‌های مختلف مجموعه

جدول 1 مقایسه پارامترهای ابعادی میراگر

| پارامترهای طراحی میراگر (شکل 6) مرجع [10] (mm) |      | این پژوهش (mm) |      |
|--|------|----------------|------|
| $\tau_p$                                       | 5    | 7              | 7    |
| $\tau_f$                                       | 8    | 4              | 4    |
| AB   | 18   | 18             | 18   |
| $\tau_p / \tau$                                | 0/55 | 0/77           | 0/77 |
| $r_m$  | 6/25 | 6/25           | 6/25 |
| $r_{out}$                                      | 12/5 | 12/5           | 12/5 |
| قطر محور                                       | 12/5 | 12/5           | 12/5 |
| فاصله بین اسلایدر و استاتور                    | 0/5  | 0/5            | 0/5  |

به دلیل محدودیت در انتخاب ابعاد آهن‌ریاهای موجود در بازار، آهن‌ریایی با ضخامت  $\tau_p = 7$  و  $\tau_f = 4$  میلی‌متر، از جنس (نئودیموم آیرون بور) با میدان  $B_r = 1/13$  تسلا استفاده شد.

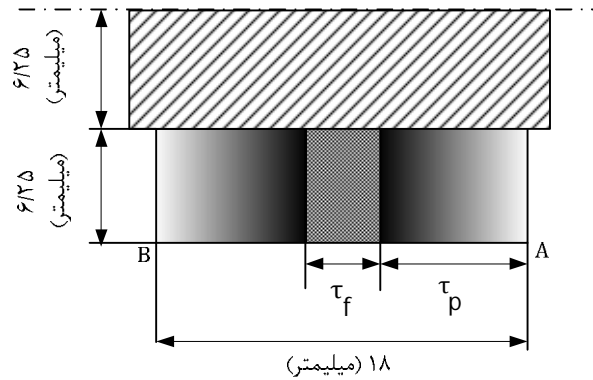
سایر مشخصات ابعادی میراگر در جدول 1 آورده شده است.

#### 4- ساخت میراگر و مجموعه آزمایشگاهی

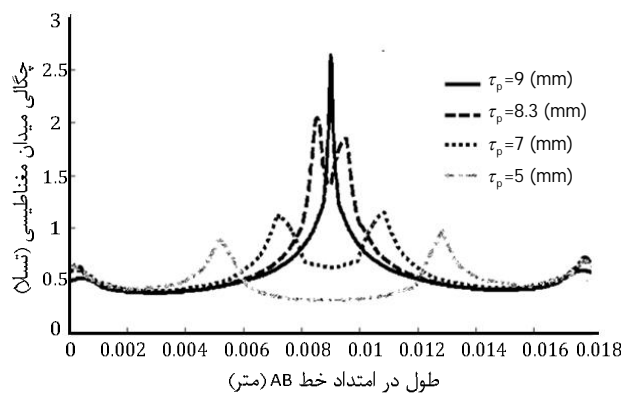
شمای کلی مجموعه آزمایش در شکل 10 نشان شده است. این مجموعه شامل یک میز با پایه‌های قابل تنظیم است و توسط یاتاقان هوایی، جسم مرتعش را در حالت تعلیق نگه می‌دارد تا اصطکاک از سیستم حذف شود. سامانه تحریک هارمونیک پایه شامل لنگ، موتور و گیربکس است. سایر قسمت‌های اصلی عبارتند از میراگر جریان گردابی، سنسورهای جابجایی و فنر خطی (شکل 10).

جسم مرتعش شامل مجموعه آهن‌ریاها و هسته‌های آهنی و نیز پیچ و مهره و یک حمل‌کننده ناودانی شکل فلزی سنگ خورده است که مانند شکل 11 به یکدیگر متصل شده‌اند.

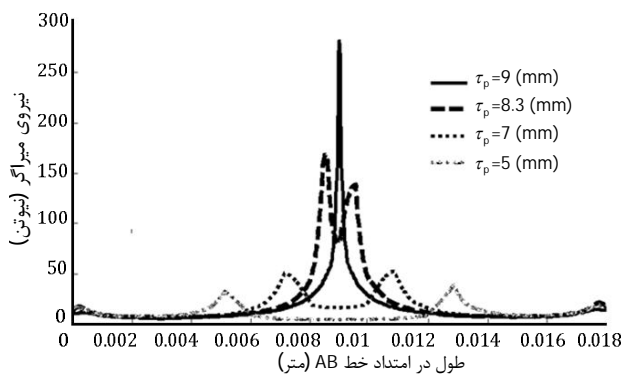
جسم مرتعش در شکل 11 شامل بدنه فلزی است که مجموعه آهن‌ریاها بر روی آن قرار می‌گیرد. راهگاه‌های یاتاقان هوایی به صورت تعادلی از زیر و کناره‌ها، جسم مرتعش را در بر می‌گیرند.



شکل 6 مدل‌سازی پارامتریک مغناطیسی برای دو قطب



شکل 7 میدان مغناطیسی بر حسب طول دو قطب به ازاء ابعاد مختلف



شکل 8 نیروی میرایی بر حسب طول دو قطب به ازاء ابعاد مختلف

با استفاده از نرم‌افزار ماکسول دو قطب به صورت پارامتریک مدل شده است. ضخامت آهن‌ریاها از 0/05 تا 8/95 میلی‌متر با فاصله 0/05 میلی‌متر برای 176 حالت تغییر می‌کند. با تغییر ضخامت آهن‌ریا و هسته، چگالی میدان مغناطیسی بر روی هر نقطه از خط AB به دست آمده است که برای چهار حالت مختلف در شکل 7 نشان داده شده است.

با استفاده از رابطه (7) نیروی میرایی برای هر نقطه از خط AB به ازای سرعت 0/1 متر بر ثانیه بدست آمده است. با انترگرال‌گیری از مقادیر نیرو و استفاده از قضیه مقدار میانگین در انتگرال‌ها، مقدار نیروی متوسط برای ضخامت‌های مختلف آهن‌ریا (از 0/05 تا 8/95 میلی‌متر) بدست آمده است که چهار حالت آن در شکل 8 آورده شده است. برای بدست آوردن مقدار بهینه ابعادی آهن‌ریا و هسته، نیروی متوسط بر حسب ضخامت آهن‌ریا به ازای طول ثابت از هر قطب بدست آمده است (شکل 9). از روی قله نمودار شکل 9 مقادیر بیشینه ابعادی هسته و آهن‌ریا،  $\tau_p = 8/3$  و  $\tau_f = 5/25$  (بدست آمده است.

زمانی نشان می‌دهد. میزان کاهش دامنه ارتعاشات از مقایسه پاسخ سیستم در حالت های بدون میرایی و با میرایی به دست می‌آید. با اندازه‌گیری پاسخ زمانی سیستم توسط سنسور جابجایی، ضریب میرایی به روش کاهش لگاریتمی محاسبه شده است. با استفاده از نرم‌افزار متلب و با قرار دادن پارامترهای دینامیکی در تابع تبدیل سیستم درجه دو، پاسخ فرکانسی برای میراگر بدست آمده است. کاهش جابجایی سیستم در حالت با و بدون میرایی بدست آمده است. سفتی و جرم بر خلاف میرایی نیاز به آزمایش‌های دینامیکی نداشته و با آزمایش‌های استاتیکی تعیین می‌شوند.

ضریب کاهش لگاریتمی از روی نمودار پاسخ زمانی به صورت رابطه (11)

محاسبه می‌شود:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{B_1}{B_{n+1}} \quad (11)$$

$B_1$  دامنه پیک اول انتخاب شده است زیرا بلندترین پیک بوده و کمتر در معرض خطا می‌باشد. برای بدست آوردن ضریب میرایی میراگر، پاسخ زمانی در اثر تحریک ضربه برای بدست می‌آید. پاسخ زمانی به صورت ولتاژ خروجی سنسور جابجایی بدست می‌آید که متناسب با جابجایی جسم مرتعش است. با استفاده از روابط 12 مقدار  $C$  محاسبه می‌شود.

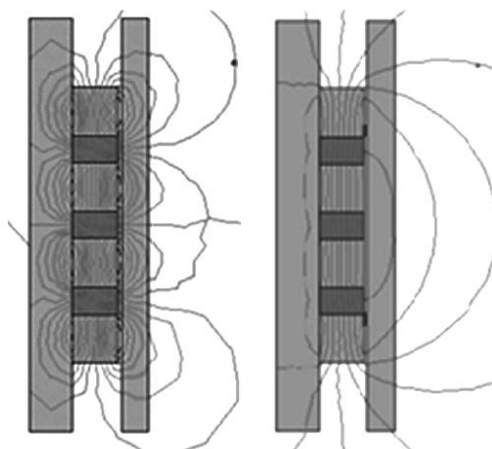
$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (12)$$

$$C = 2\zeta \sqrt{mk}$$

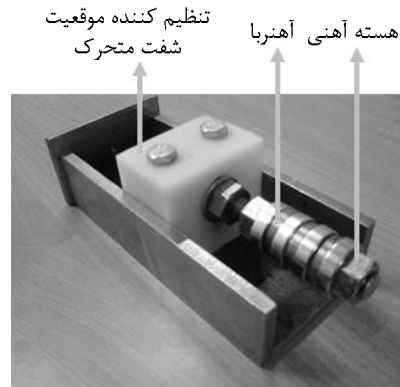
با آزمایش میراگر جریان گردابی بر اساس روش کاهش لگاریتمی، پارامترهای دینامیکی سیستم برای دو نوع میراگر مطابق جدول 2 محاسبه شد. در سیستم یک درجه آزادی، سختی فنر و جرم به ترتیب 10 کیلو نیوتن و 1/83 کیلوگرم در نظر گرفته شده است.

### 5- نتایج

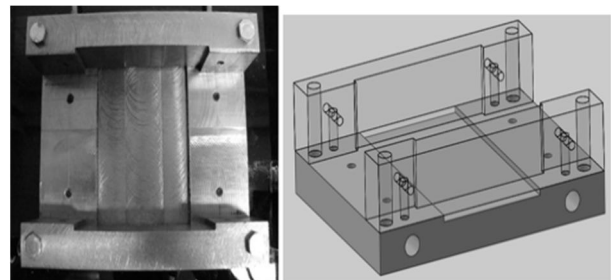
در این مقاله ابتدا تاثیر چیدمان آهن‌رباها بر شار مغناطیسی گذرنده از لوله رسانا مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو چیدمان مختلف از آهن‌رباها (میراگر نوع اول و دوم) در نرم‌افزار المان محدود مدل شده و شار مغناطیسی گذرنده از لوله رسانا به دست آمده است که در شکل 14 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل دیده می‌شود، تراکم خطوط شار میدان مغناطیسی در میراگر نوع دوم بیشتر از میراگر نوع اول است، که این موضوع باعث افزایش نیروی میرایی میراگر جریان گردابی خواهد شد.



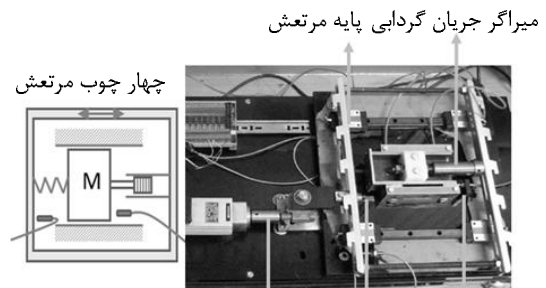
شکل 14 مقایسه خطوط میدان مغناطیسی در میراگر نوع اول و دوم



شکل 11 جسم مرتعش مجموعه شده



شکل 12 تکیه‌گاههای هوایی



شکل 13 مجموعه آزمایشگاهی

جدول 2 پارامترهای آزمایش دینامیکی ارتعاشات آزاد

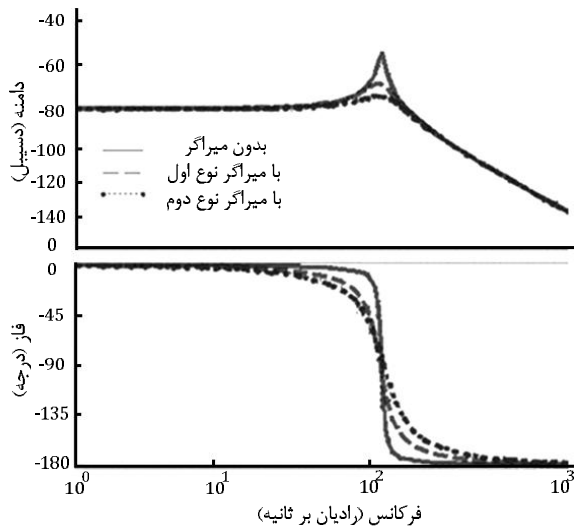
| نوع میراگر | زمان میرایی (s) | $C(N.s/m)$ | $\zeta$ | $\delta$ |
|------------|-----------------|------------|---------|----------|
| دوم        | 0/3             | 68/374     | 1/79    | 0/274    |
| اول        | 0/5             | 38/287     | 0/153   | 0/976    |

جت‌های هوایی در دو نقطه زیری و دو نقطه کناری تعادل دو انتهای جسم مرتعش را تامین می‌کنند (شکل 12). تنظیم فاصله هوایی با تنظیم فشار ورودی به جت های هوایی و تنظیم راهنماهای کناری صورت می‌گیرد.

قسمت‌های مختلف مجموعه آزمایشگاهی در شکل 13 نشان داده شده‌اند. در این مجموعه جسم مرتعش 1/83 کیلوگرمی توسط 4 عدد جت هوا تعلیق شده و نیروی اصطکاک کولمب از بین می‌رود.

دو نوع میراگر جریان گردابی مورد آزمایش قرار گرفته است که دارای چیدمان مشابه بوده اما نوع قرارگیری آهن‌رباها از لحاظ قطبیت مغناطیسی متفاوت می‌باشد. نوع اول میراگری است که قطب‌های غیرهمنام کنار یکدیگر قرار می‌گیرد و نوع دوم میراگری است که قطب‌های همنام آهن‌رباهای دائم در مجاورت هم قرار می‌گیرند.

در آزمایش‌های انجام گرفته، اثر میزان جریان گردابی در میرا کردن ارتعاشات بررسی می‌شود. اثر میرایی ارتعاشات، خود را در حوزه فرکانسی و



شکل 18 مقایسه نمودار بوده میراگر نوع اول و دوم با حالت بدون میرایی

جدول 3 مقایسه نتایج آزمایش ارتعاشات آزاد با میراگر مشابه

| میراگر      | C (NS/m) تجربی | C (NS/m) عددی | $\zeta$ تجربی |
|-------------|----------------|---------------|---------------|
| بدون میرایی | 8/38           | -             | 0/66          |
| این پژوهش   | 38/28          | 37/8          | 0/153         |
| نوع اول     | 68/37          | 69/5          | 0/274         |
| مرجع        | 6/5            | -             | 0/035         |
| [10]        | 53             | -             | 0/28          |

جدول 4 نتایج آزمایش ارتعاشات اجباری در تحریک 63 رادیان بر ثانیه

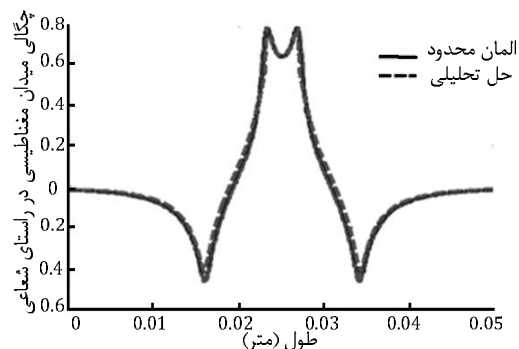
| نوع میراگر                           | جابجایی (mm) |
|--------------------------------------|--------------|
| بدون میرایی                          | 3/4          |
| نوع اول (قطب‌های غیر همنام مجاور هم) | 1/72         |
| نوع دوم (قطب‌های همنام مجاور هم)     | 0/96         |

در ادامه ارتعاشات آزاد و اجباری با به دست آوردن پاسخ زمانی مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از روش کاهش لگاریتمی، ضریب میرایی محاسبه شده است. پاسخ ضربه برای میراگر نوع دوم در شکل 17 بدست آمده که نشان دهنده کاهش دامنه و زمان میرایی سیستم است.

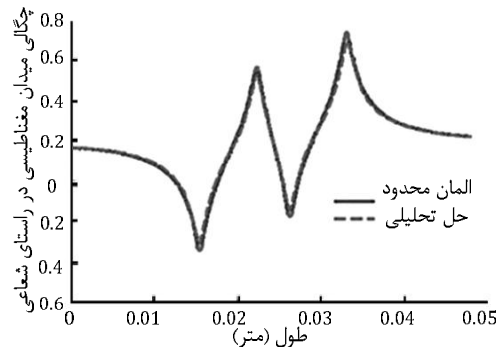
میرایی را اغلب در فرکانس طبیعی مورد بررسی قرار می‌دهند. اولین فرکانس طبیعی مدل یک درجه آزادی در حدود 70 رادیان بر ثانیه (11 هرتز) است که در این فرکانس، جابجایی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به دلیل محدودیت‌های مجموعه آزمایشگاهی، جابجایی تا فرکانس 63 رادیان بر ثانیه (10 هرتز) اندازه‌گیری شده است. ضریب میرایی و کاهش جابجایی در شرایط ارتعاشات اجباری و آزاد در جدول‌های 3 و 4 آورده شده است. همان‌گونه که در جدول 3 نشان داده شده است، مقادیر ضریب میرایی محاسبه شده از مدل تئوری تطابق بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های تجربی دارد (میزان خطا برای میراگر نوع اول 1/3 % و برای میراگر نوع دوم 1/7 % می‌باشد) که این موضوع نشان دهنده امکان استفاده از مدل تئوری معرفی شده در طراحی میراگر جریان گردابی و محاسبه ضریب میرایی و نیروی میرایی است.

با توجه به مقادیر بدست آمده برای ضریب میرایی، جرم و سختی فنر می‌توان پاسخ فرکانسی سیستم را مورد مطالعه قرار داد. بدین منظور تابع تبدیل سیستم بدست آمده و توسط نرم‌افزار متلب، نمودار پاسخ فرکانسی آن برای حالت‌های میرایی مختلف رسم و با هم مقایسه شده است. دیگرام بوده<sup>1</sup> نشان

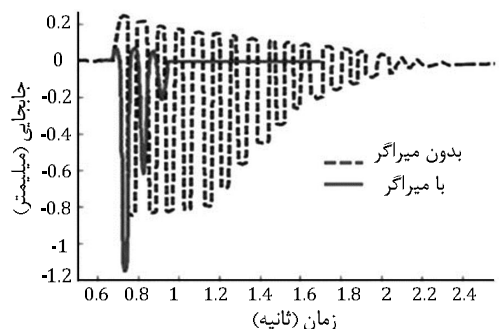
به منظور صحت‌سنجی روابط تحلیلی بدست آمده، مقادیر شار مغناطیسی شعاعی گذرنده از لوله رسانا حاصل از مدل‌سازی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود ماکسول مقایسه شده است. نتایج حاصل از هر دو روش در شکل‌های 15 و 16 نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل‌ها بر می‌آید، مدل تئوری ارائه شده در قسمت‌های قبلی مقاله تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود دارد. بنابراین می‌توان با استفاده از مدل ارائه شده، ضریب میرایی میراگر را محاسبه کرد. مقادیر ضرایب میرایی با محاسبه چگالی میدان برای هر قطب (شکل‌های 15 و 16) و استفاده از روابط (4-6، 8) برای هر دو میراگر نوع اول و دوم به ترتیب 69/5 نیوتن‌ثانیه بر متر و 37/8 نیوتن‌ثانیه بر متر بدست آمده است. نتایج بدست آمده از حل عددی معادلات حاکم بر میراگر غیر فعال جریان گردابی نشان داده که میراگر ساخته شده نوع دوم عملکرد بهتری نسبت به نوع اول داشته و ضریب میرایی آن 83% افزایش داشته است (جدول 3). ضریب میرایی میراگر ساخته شده (نوع دوم) در مقایسه با میراگر مشابه [10] برای پاسخ ضربه مشابه (جرم و فنر مشخص)، 22/5% افزایش داشته است.



شکل 15 چگالی شار مغناطیسی به ازای یک جفت آهن‌ربا (قطب‌های غیر همنام روبروی هم)



شکل 16 چگالی شار مغناطیسی به ازای یک جفت آهن‌ربا (قطب‌های غیر همنام روبروی هم)



شکل 17 مقایسه نمودار پاسخ زمانی ارتعاشات آزاد میراگر با حالت بدون میرایی

1- Bode Diagram (Frequency Response)

- [5] A. Tonoli, Dynamic Modeling and experimental validation of eddy current dampers and couplers, *J. SoundVib*, Vol. 130, No. 2, pp 104-115, 2008.
- [6] H. Arof, A. Eid, K. M.Nor, *Permanent magnet linear generator design using finite element method*, Electronic and Computer Engineering, Cairo, Egypt, pp. 893-896, 2004.
- [7] J.Alanoly, S.Sankar, A new concept in semi-active vibration isolation , *Mechanisms, Transition, and Automation in Design*, Vol. 109, No. 2, pp. 242-247, 1987.
- [8] J. A.Allen, *Design of active suspension control based upon use of tubular linear motor and quartercar model*, MSc. Thesis, Texas A&M University, August 2008.
- [9] E. Anderson, M. Evert, R. Gleese, J. Gooding, S. Pendleton, Satellite ultra-quiete technology experiment (SUIT): Electromechanical subsystems, *Smart Structures and Materials*, Vol. 3674, No. 3, pp. 303-320, 1999.
- [10] B.E brahimi, A novel eddy current damper: theory and experiment, *Applied Physics*, Vol. 42, No. 7, pp. 1088-1101, 2009.
- [11] A. Maddah, Y. Hojjat, Design and manufacturing magnetic damper and active control of beam vibrations using eddy current, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 57-66, 2010. (In Persian)
- [12] B.Ebrahimi, Design of a hybrid electromagnetic/hydraulic damper for automotive suspension systems, *International Conference on Mechatronics and Automation*, August 2009
- [13] M. Ahmadian, N. Vahdati, Transient dynamics of semi-active suspensions with hybrid control, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No. 2, pp. 145-153, 2006.
- [14] B. Anon, *Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration*, International Organization for Standardization, ISO 2631, 1997.
- [15] D. T. Aspinall, R. J. Oliver, *Vehicle riding comfort: the correlation between subjective assessments of vehicle ride and physical measurements of vehicle motion*, Motor Industry Research Association report, 1964.
- [16] B. Ebrahimi, M.B. Khamesee, F. Golnaraghi, Eddy current damper feasibility in automobile suspension: modeling , simulation and testing, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 1, pp. 3-10, 2008.

داده شده در شکل 18 مقایسه پاسخ فرکانسی سیستم برای حالت‌های بدون میراگر و با میراگر (نوع اول و دوم) است که مقدار افزایش میرایی میراگر نوع دوم خود را در کاهش قله پاسخ فرکانسی و نیز افزایش پهنای باند به خوبی نشان داده است.

## 6- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

دو پارامتر ابعادی آهن‌ربا و هسته برای ورودی طراحی در نظر گرفته شده است که در طراحی جدید با تغییر نسبت بین آنها، ضریب میرایی بیشتر شده است. در بررسی نتایج شبیه‌سازی طراحی انجام شده و نتایج آزمایش‌های ارتعاشاتی در میراگر غیر فعال جریان گردابی، مشاهده شد که میراگر ساخته شده نوع دوم ضریب میرایی بالاتری نسبت به نوع اول داشته است. میراگر ساخته شده (نوع دوم) در مقایسه با میراگر مشابه [10] حجم کمتری داشته و ضریب میرایی آن افزایش داشته است. با توجه به نمودارهای پاسخ فرکانسی، دامنه ارتعاشات میراگر نوع دوم در مقایسه صورت گرفته بین حالت‌های با میرایی و بدون میرایی، 20 دسیبل کاهش دامنه ارتعاشی داشته است.

## 7- مراجع

- [1] H. Sodano, D.J. Inman, Concept and model of eddy current damper for vibration suppression of a beam, *J. SoundVib*, Vol. 288, No. 4, pp. 1177-1196, 2005.
- [2] H. Sodano, Improved concept and model of eddy current damper, *J. SoundVib*, Vol. 128, No. 4, pp 294-302, 2005.
- [3] H. Sodano, Non-Contact eddy current excitation method for vibration testing, *Experimental Mechanics*, Vol. 46, No. 5, pp 627-635, 2006.
- [4] H. Sodano, *Development of novel eddy current damping mechanisms for the suppression of structural vibrations*, Department of Mechanical Engineering, PhD Thesis, Virginia Tech University, 2006.