

# طراحی و ساخت میراگر مغناطیسی و کنترل فعال ارتعاشات تیر با استفاده از جریان گردابی

علی اصغر مداح<sup>۱</sup>، یوسف حجت<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵. yhojjat@modares.ac.ir

**چکیده** - روشهای مختلفی برای میرا نمودن ارتعاشات وجود دارد، ولی تعداد معدودی از این روشها قادرند بدون تماس، میرا کننده ارتعاشات باشند. یکی از این روشها، استفاده از نیروی جریان گردابی است. جریان گردابی در اثر تغییرات میدان مغناطیسی القاء شده در یک رسانا بوجود می آید. در این پژوهش نوع فعال و نیمه فعال میراگر جریان گردابی ساخته شده و پاسخ ورودی ضربه برای حالتیهای مختلف میرایی به طور تجربی و عددی به دست آمده است. جهت تحریک تیر آلومینیومی یکسر گیردار، از ضربه جریان گردابی استفاده شده است و سختی و ضریب میرایی توسط روش کاهش لگاریتمی از روی پاسخ زمانی به دست آمده است. پاسخ ضربه در محیط سیمولینک نرم افزار متلب شبیه سازی شده، و با نتایج به دست آمده مقایسه گردیده است. میرا نمودن ارتعاشات تیر با کاهش در قله های پاسخ فرکانسی خود را نشان می دهد. برای به دست آوردن پاسخ فرکانسی، در دو قسمت آزمایشهایی انجام شده است. ابتدا توسط آزمایش مودال در حالت نیمه فعال، نتایج نمایانگر کاهش ارتعاشات به میزان ۱۰ دسیبل می باشد. برای بررسی حالت فعال، مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده است که نتایج نشان دهنده کاهش قابل توجه دامنه در پیک اول و دوم طیف فرکانسی و نیز افزایش پهنای باند می باشد.

**کلید واژگان:** میراگر جریان گردابی، میراگر فعال، میراگر نیمه فعال، ضربه جریان گردابی، شبیه سازی عددی.

## Design and Manufacturing Magnetic Damper and Active Control of Beam Vibrations using Eddy current

A. Maddah<sup>1</sup>, Y. Hojjat<sup>2\*</sup>

1- ph. D. Student of Mechanical Eng. Dept., Tech. and Eng. Faculty, Tarbiat Modarres Univ.

2- Assoc. Prof. of Mechanical Eng. Dept., Tech. and Eng. Faculty, Tarbiat Modarres Univ.

\*P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. yhojjat@modares.ac.ir

**Abstract**- There is different methods to damp the vibration. However, the numbers of contactless methods are limited. Eddy current dampers are of these procedures. Eddy current is produced in a nonmagnetic conductive material when it is subjected to a time varying magnetic field. In this research, active and semi-active types of eddy current dampers are manufactured and input impulse responses for different damping modes are determined experimentally and numerically. The Aluminium cantilevered beam is stimulated by an eddy current impact. The stiffness and damping coefficient are derived by a reduced logarithmic method according to the time response. The response to impulse is simulated by Simulink of MATLAB and the outcomes are compared with experimental results. Both results show significant decrease in the peak of frequency responses. The results of modal semi-active experiments show the effective suppress of vibration by more than 10 dB. Experiments on the active damper demonstrate a remarkable decrease in the first and second peak of frequency spectrum and increase in bandwidth over previously used eddy current methods.

**Keywords:** Eddy Current Dampers, Active Dampers, Semi-active Dampers, Eddy Current impact, Numerical Simulation.

## ۱- مقدمه

می باشد. ۴- عدم نیاز به گریس، روغن، پمپ، لوله، مخزن و فیلتر. ۵- نیاز به تعمیرات کمتر بدلیل سادگی و نداشتن تماس مکانیکی و در نتیجه طول عمر بالا.

با وجود این، روش مزبور معایبی مانند موارد زیر را دارد:

۱- تنها ارتعاشات مواد هادی (مانند مس و آلومینیوم) با این روش میرا می شود ۲- حساس بودن نسبت به شکافها بر روی جسم مرتعش ۳- عمق نفوذ جریان گردابی در رسانا محدود می باشد و در طراحی میراگر محدودیت ایجاد می کند.

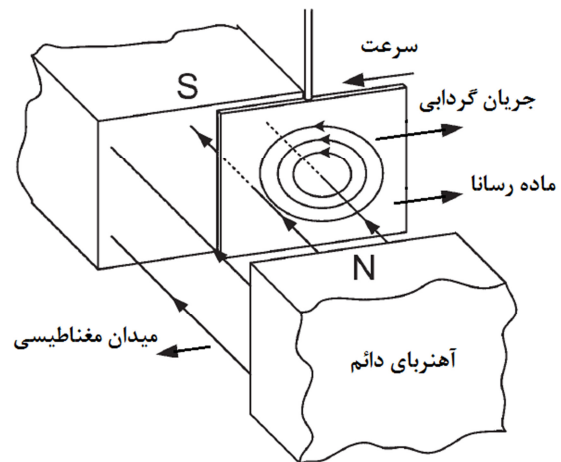
## ۲- آزمایش ها

در این مقاله اثر میرایی جریان گردابی در میرا نمودن ارتعاشات تیر یکسر گیردار بررسی می شود. دمپر جریان گردابی در حالت های غیر فعال و نیمه فعال بررسی شده است. بدلیل تاثیر نویز در سیگنال تجهیزات اندازه گیری آزمایشگاه مودال، در این تحقیق آزمایشها به دو قسمت تقسیم می شود.

قسمت اول آزمایش های مربوط به میراگر جریان گردابی نوع نیمه فعال است که در آزمایشگاه مودال بررسی می شود. در این قسمت میرا نمودن ارتعاشات تیر خود را با کاهش در قله های پاسخ فرکانسی نشان می دهد که از مقایسه پاسخ فرکانسی سیستم در حالت های بدون میرایی و با میرایی، میزان میرایی ارتعاشات تیر به دست می آید.

قسمت دوم آزمایش ها مربوط به نوع فعال میراگر جریان گردابی می باشد و توسط مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده انجام می گردد. جهت کنترل نیروی تحریک ضربه، مجموعه تولید پالس جریانی و نیز چکش مغناطیسی که شامل سیم پیچ نوع تخت می باشد، طراحی و ساخته شده است. پاسخ زمانی بوسیله سنسور جابه جایی و مبدل های آنالوگ به دیجیتال در نرم افزار متلب تبدیل به سیگنال کنترلی می گردد و از یک تقویت کننده برای تقویت ولتاژ کنترلی استفاده شده است. پاسخ زمانی تحریک ضربه، در نرم افزار متلب به دست آمده و ضریب میرایی به روش کاهش لگاریتمی محاسبه می گردد. با استفاده از ابزار محاسباتی نرم افزار متلب و با قرار دادن پارامترها دینامیکی در تابع تبدیل سیستم درجه دو، پاسخ فرکانسی نیز به دست آمده است. برای به دست آوردن میزان میرایی در فرکانسهای مختلف از ابزار FFT نرم افزار متلب استفاده شده است.

عنصر فنری، بازگشتی متناسب با جابه جایی تولید می کند، که می تواند به صورت رفت و برگشتی یا فشاری باشد، از طرف دیگر عنصر میرایی از سرعت نسبی در امتداد خودش جلوگیری می کند. یک روش ساده برای رسیدن به میرایی، استفاده از یک میرا کننده است که رفتاری مشابه یک جاذب ارتعاشی دارد [۱]. اصول کارکرد یک دمپر جریان گردابی بر اساس اتلاف انرژی بوجود آمده به سبب ایجاد جریانهای گردابی در داخل یک رسانا خواهد بود و مانند شکل ۱- شامل یک قسمت رسانا و یک قسمت مغناطیسی مولد میدان مغناطیسی می باشد. وقتی قسمت رسانا در میدان مغناطیسی حرکت می کند در داخل رسانا جریان گردابی ایجاد شده که خود این جریانها تولید میدان مغناطیسی کرده و در واکنش به میدان اصلی بنا بر قانون لنز ایجاد نیروی دافعه ای می کند که در میراگرهای جریان گردابی همان نیروی میرا کننده ارتعاشات می باشد. این موضوع باعث می شود که دامنه ارتعاشات جسم رسانا محدود شده و عبور از فرکانس بحرانی را تضمین نماید.



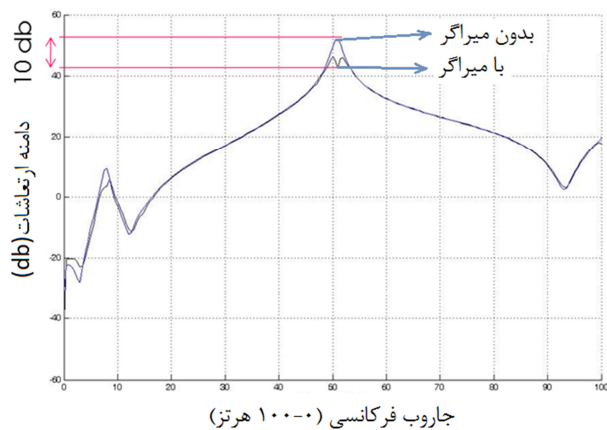
شکل ۱ مجاورت میدان مغناطیسی با صفحه رسانا [۲]

از میان مزایای این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد [۳]:  
 ۱- بدون تماس. ۲- سرعت میرایی بالا. ۳- نیرو می تواند در زمان بسیار کوتاهی انتقال یابد (کمتر از ۴ میلی ثانیه) و برای بوجود آوردن یک ضربه بسیار مناسب می باشد [۴]. نرخ انتقال انرژی در این روش، در طی اعمال ضربه بالا می باشد که با توجه به این ویژگی، بیشترین کاربرد آن در صنعت شکل دهی فلزات

### ۳- بررسی میراگر نیمه فعال

تیر آلومینیومی استفاده شده، ۵۰ گرم وزن دارد که وزن آن در مقایسه با گیره چدنی ناچیز است. برای بررسی میراگر جریان گردابی نیمه فعال، طول تیر آلومینیومی به صورتی انتخاب شده است که یکی از فرکانسهای طبیعی آن با فرکانس برق شهری منطبق باشد. با تکرار آزمایش مودال و تغییر طول تیر، فرکانس طبیعی قالب در فرکانس ۵۰ هرتز خود را در نمودار FRF نشان می دهد. همانطور که در شکل ۲- مشخص است از یک لرزاننده برای تحریک تیر و از یک نیروسنج برای اندازه گیری نیروی تحریک و از یک شتاب سنج جهت به دست آوردن پاسخ سیستم استفاده شده است. برای بالا بردن تکرار پذیری آزمایش، لرزاننده توسط نگهدارنده‌ای که به جرثقیل سقفی متصل است از روی میز آزمایش بالا آورده شده و لرزش میز تاثیری بر ارتعاش تیر ندارد. نیروی اعمال شده توسط آمپلیفایر به مقدار ناچیزی تنظیم می گردد تا کمترین جابه جایی انتهای تیر در مود اول ارتعاشی مشاهده شود. با این عمل پارامترهای غیرخطی سیستم حذف خواهد شد. میراگر نیمه فعال هیچ کنترلی بر پاسخ سیستم نداشته و در انتهای تیر یک سرگردار بر روی پایه نصب می گردد.

بوسیله یک منبع تغذیه ولتاژ متغیر، برق شهری ۲۲۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز به ولتاژ متناوب ۳۰ ولت تبدیل شده و میراگر جریان گردابی را تغذیه می کند. مقاومت سیم پیچ عملگر ۱۰ اهم می باشد و سبب بوجود آمدن جریان متناوب در سیم پیچ می شود که بیشترین مقدار آن ۳ آمپر می باشد. افزایش جریان عبوری متغیر با فرکانس ۵۰ هرتز سبب بالا رفتن دانسیته جریان گردابی در تیر شده و افزایش نیروی میراگر را باعث می گردد. در این آزمایش تاثیر فرکانس میراگر بر روی کاهش دامنه بررسی می گردد. آزمایش در حالت های بدون میرایی و با میرایی انجام گرفته و پاسخ سیستم به ازاء تحریک سینوسی و جاروب فرکانسی ۰ تا ۱۰۰ هرتز به صورت نمودار FRF طبق شکل ۳- به دست آمده است.

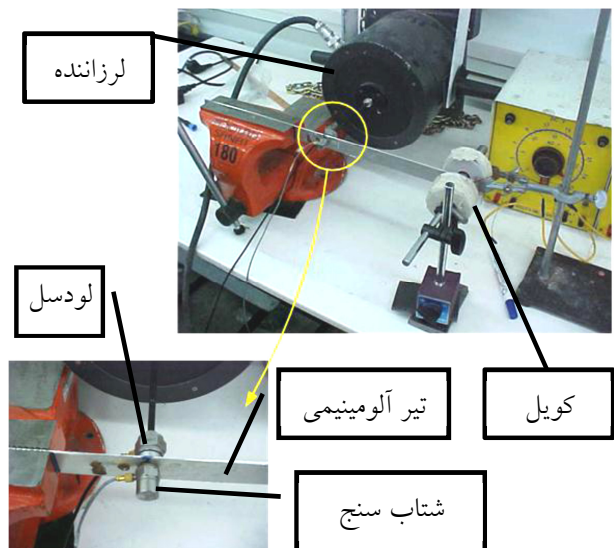


شکل ۳ مقایسه نمودارهای FRF

در این آزمایش مشخص گردید، میراگر در فرکانس ۵۰ هرتز بیشترین کاهش دامنه را به همراه داشته است و در فرکانس های بالاتر از ۵۰ هرتز نیروی میرایی کاهش داشته و بیشتر انرژی تولید شده توسط جریانهای گردابی، به صورت گرما مستهلک می گردد.

### ۴- بررسی میراگر فعال

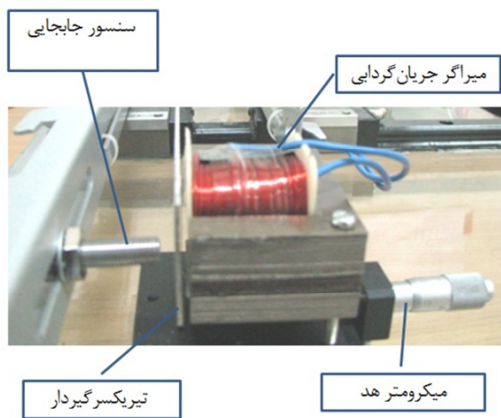
اصطلاح فعال<sup>۱</sup> نشان دهنده این واقعیت است که این گونه از سیستم ها نیاز به منبع قدرت خارجی دارند [۴]. نحوه اتصالهای



شکل ۲ چیدمان مجموعه آزمایشگاهی مودال

پایداری سیستم می باشد که به صورت ولتاژ در کامپیوتر مشخص می شود. این معیار با اندازه ولتاژ خروجی سنسور مقایسه می گردد. بعد از تحریک ضربه، سیگنال خروجی سنسور به کامپیوتر ارسال شده و توسط کنترلر طراحی شده در نرم افزار متلب، تبدیل به سیگنالی کنترلی می گردد. سیگنال کنترلی توسط مدارهای تقویت کننده به عملگر تولیدکننده میدان مغناطیسی متغییر تحویل داده می شود و سیگنال متناسب با آن جهت میرا نمودن ارتعاشات به میراگر فرستاده می شود و سپس دانسیته جریان گردابی در محل اعمال نیروی میرایی تغییر می کند. دانسیته جریان گردابی با تغییر دامنه و فرکانس جریان عبوری از کویل تغییر می کند که متناسب با آن نیروی میرایی به تیر یکسر گیردار اعمال می شود.

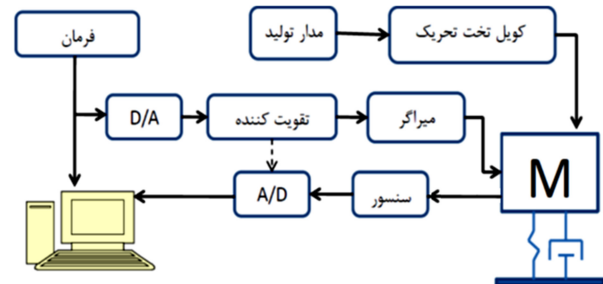
سنسور القایی استفاده شده در این قسمت از آزمایشها، می تواند فواصل ۰ تا ۴ میلیمتر را اندازه گیری کند و خروجی آن ولتاژی بین ۰ تا ۱۰ ولت می باشد. نمودار خروجی این سنسورها غیرخطی می باشد و باید یک ناحیه خطی مناسب برای اندازه گیری، انتخاب گردد.



شکل ۶ مجموعه آزمایشگاهی

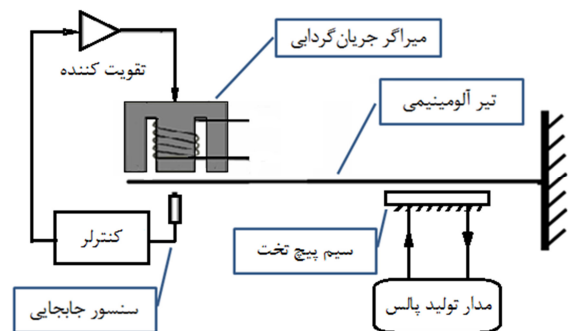
بهترین فاصله سنسور از تیر مرتعش که در آن سنسور به صورت خطی عمل کند، فاصله ۲ میلیمتر است. به همین جهت فاصله سنسور از تیر به گونه ای انتخاب شده است که در حالتی که تیر در وسط قرار می گیرد خروجی سنسور، ۵ ولت را نشان دهد. خروجی این سنسورها به ازای هر میکرومتر

قسمت های مختلف در شکل ۴ مشخص گردیده است. مرکز یا هسته یک کنترل کننده فعال ارتعاشی، یک سیستم ریزپردازنده با مبدل های آنالوگ به دیجیتال می باشد.



شکل ۴ نحوه اتصالهای قسمت های مختلف

مجموعه آزمایش شامل یک میز شیشه ای با پایه های قابل تنظیم می باشد که توسط گیره قابل تنظیم نصب شده بر روی آن، تیر به صورت یکسر گیر دار در موقعیت مشخص قرار می گیرد. عضوهای دیگری نیز در مجموعه آزمایش در رابطه با این تیر وجود دارد. اول کویل تخت جهت اعمال ضربه جریان گردابی (تحریک ضربه تیر). دوم کویل میراگر جریان گردابی و سوم سنسور جابه جایی که بر روی پایه قابل تنظیم همانند شکل ۵- مشخص شده است. جهت تنظیم فاصله تیر و کویل از میز مینیاتوری موقعیت دهی دقیق استفاده شده است همانند شکل ۶- استفاده شده است.

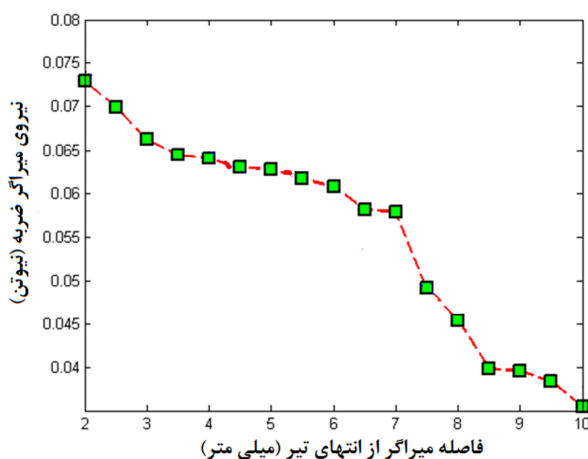


شکل ۵ چیدمان اجزاء آزمایش

وظیفه عملگر ضربه جریان گردابی، تحریک طیف فرکانسی سازه می باشد. فرمان پیشنهادی که همان نقطه مرجع یا نقطه

در معادله-۱، طول سیم پیچ را با  $l$  و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلاء را با  $\mu_0$  نشان می‌توان و  $I_1, I_2$  جریانهای بوجود آمده در تیر و کوئل می‌باشند که به‌دست آوردن آن کار مشکلی است زیرا جریان مستهلک شده در رسانا را نمی‌توان به‌دست آورد. در این مقاله نیرو میراگر فعال جریان گردابی به روش استاتیکی محاسبه شده است. نیروی میراگر جریان گردابی در حالتی که تیر در وضعیت پایداری خود قرار دارد بسیار ناچیز است و برای مشاهده نیروی میرایی می‌بایست تیر از وضعیت تعادل خود خارج گردد که توسط ضربه جریان گردابی تیر مرتعش می‌گردد. ضربه با دشارژ شدن بانک خازنی به میزان ۷۰ ولت توسط سیم‌پیچ تخت ایجاد می‌گردد. میز موقعیت‌دهی دقیق را طوری تنظیم می‌کنیم که سیم‌پیچ در فاصله ۱ میلی‌متری از تیر قرار بگیرد. سیم‌پیچ هر بار به اندازه ۱ میلی‌متر از تیر دور می‌شود و به‌ازاء تحریک ضربه‌ای ثابت و با دامنه‌های یکسان، جابه‌جایی انتهایی تیر در هر تغییر فاصله، توسط سنسور القایی اندازه‌گیری می‌شود که بیشترین مقدار جابه‌جایی در انتهای تیر مشخص می‌گردد. با توجه به روابط مقاومت مصالح تیر یکسرگیردار، نیرو از معادله-۲ محاسبه می‌گردد و منحنی نیروی میراگر جریان گردابی فعال بر حسب بیشترین مقدار جابه‌جایی تیر محاسبه می‌گردد (شکل-۸).

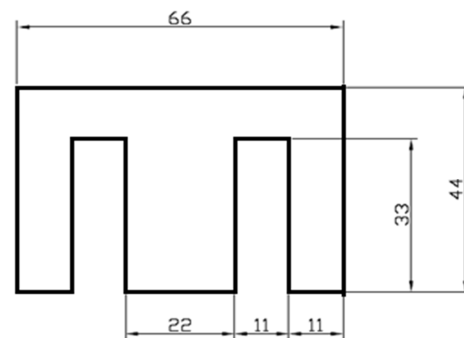
$$F_{\max} = \frac{3EI}{L^3} * X_{\max} (N) \quad (2)$$



شکل ۸ نیروی میراگر ضربه

تغییرات در فاصله، به مقدار ۰/۰۰۲۵ ولت تغییر می‌کند. مبدل دیجیتالی به آنالوگ انتخاب شده باید قادر باشد که این تغییرات ولتاژ را بخواند که برای این منظور از شماره محصول ۱۷۱۶ تولید شده توسط شرکت Advantech استفاده شده است.

انتخاب مناسب تعداد دورها و قطر سیم برای سیم پیچ، به نحوی است که میراگر بتواند نیروی دافعه مغناطیسی کافی را با عبور جریانی کمتر از جریان مجاز اعمال نماید. سیم‌پیچ استفاده شده در این سیستم، یک سیم‌پیچ E شکل است. دور سیم پیچ ۲۰۰ دور است و قطر سیم برابر با ۰/۶۵ میلی‌متر انتخاب شده است. مقاومت سیم پیچ نیز برابر ۱۰ اهم می‌باشد. هسته E شکل از جنس آهن سیلیسیم دار می‌باشد که جهت جلوگیری از بروز جریان گردابه‌ای به‌صورت لایه-لایه و از ورق با پوشش عایق انتخاب شده است. جریان مجاز حداکثر جریانی است که می‌تواند بدون آسیب زدن به سیم و گرم کردن بیش از حد سیم پیچ از سیم عبور نماید که مقدار آن برابر ۳ آمپر است.



شکل ۷ ابعاد هسته بر حسب میلی‌متر

با توجه به ابعاد استاندارد هسته در شکل-۷، می‌توان سطح مقطعی را که سیم پیچی می‌شود را به‌صورت زیر محاسبه نمود.

$$\text{سطح مقطع سیم پیچ برابر است با: } 11 \times 33 = 363 \text{ mm}^2$$

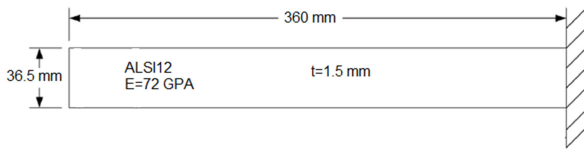
$$\text{لذا جریان مجاز برابر است با: } \frac{(11 \times 33) \times 3}{200} = 5.445 \text{ A}$$

عدد ۲۰۰ در مخرج کسر نشانگر

تعداد دورهای سیم پیچ است. نیروی بوجود آمده در اثر تشکیل جریانهای گردابی [۵] به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi d} \quad (1)$$

گردید. با استفاده از روش کاهش لگاریتمی، ضریب میرایی برای حالت‌های بدون میرایی و با میرایی به دست آمده است. ابعاد تیر در شکل ۷ مشخص شده است.



شکل ۱۰ ابعاد تیر یکسر گیردار

مشخصات تیر آلومینیومی به صورت زیر می‌باشد:

$$\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$E = 72 \text{Gpa} = 72 \times 10^9 \text{pa}$$

$$I = \frac{1}{12} \times (1.5 \times 36.5) \times 10^{-12} = 1.02656E - 11$$

$$m = \rho AL = 0.05223 \text{Kg}$$

با توجه به حل تحلیلی معادله اویلر برنولی منجر به معادله ۳ و معادله ۴ می‌شود که فرکانس‌های طبیعی تیر یکسر گیردار به دست می‌آید.

$$\omega = \frac{\gamma}{L^3} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3)$$

ثابت  $\gamma$  نیز از حل تحلیلی به دست می‌آید [۷] که عبارتند از:

$$\gamma_1 = 3.516 \quad \gamma_2 = 22.034 \quad \gamma_3 = 61.701 \quad \gamma_4 = 120.91$$

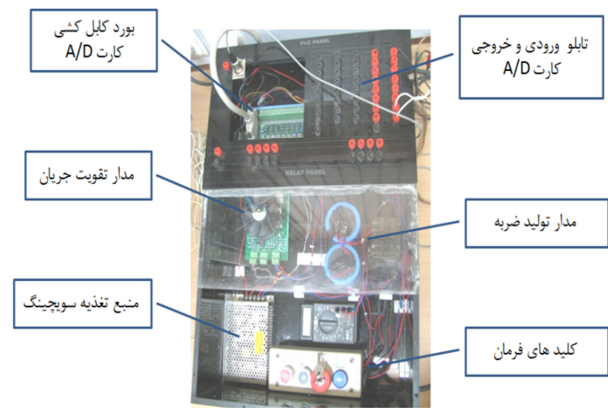
با دانستن مقادیر به دست آمده از بالا، چهار فرکانس طبیعی اول تیر از معادله ۳ به صورت زیر به دست آمده است:

$$\omega_1 = 10.75 \quad \omega_2 = 65.06 \quad \omega_3 = 175.3 \quad \omega_4 = 220.11$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (4)$$

$$f_1 = 1.711 \quad f_2 = 10.356 \quad f_3 = 27.90 \quad f_4 = 35.032$$

برای اعمال ضربه در این آزمایش از یک منبع تولید پالس جریانی با دو عدد خازن موازی ولتاژ بالا (۳۵۰ ولت،  $\mu F$ ، ۱۵۰۰) استفاده شده است. یک پل دیود، برق متناوب شهری را به جریان مستقیم تبدیل می‌کند. با قرار دادن یک مدار فرمان و تحریک رله قدرتی دو سر خازن‌ها در سیم پیچ تخت دشارژ می‌شود که جریانی حدود ۳۰ آمپر به طور لحظه ایی از سیم پیچ تخت عبور می‌کند. این جریان باعث ایجاد یک پالس مغناطیسی در اطراف سیم پیچ تخت می‌شود. نرخ تغییرات میدان مغناطیسی بسیار بالا بوده و باعث ایجاد ضربه جریان گردابی به تیر آلومینیومی می‌شود.



شکل ۹ پانل کنترلی

ضریب میرایی پارامتری است که معمولاً محاسبه و تخمین آن بسیار مشکل است. سفتی و جرم توسط آزمایش‌های استاتیکی تعیین می‌شوند اما اندازه گیری میرایی نیاز به آزمایش‌های دینامیکی دارد. حال اگر سیستمی داشته باشیم که امکان انجام آزمایش دینامیکی نیز روی آن امکان پذیر باشد، روش کاهش لگاریتمی روشی مناسب جهت تخمین ضریب میرایی (ک) است [۶]. طراحی مجموعه آزمایشی به طوری است که می‌توان با تکرارپذیری بالا آزمایش‌هایی جهت به دست آوردن ضریب میرایی در پاسخ ضربه انجام داد. تیر توسط گیره قابل تنظیم مقید شده و ضربه جریان گردابی توسط سیم پیچ تخت در ولتاژ ۶۰ ولت اعمال می‌گردد. با این روش ضربه‌های یکسانی جهت تحریک سیستم به تیر وارد

مقادیر  $B_1$  و  $B_{n+1}$  از نویز های محیطی که بر موج اصلی سوار شده اند صرف نظر شده است. نحوه محاسبه ضریب میرایی:

$$\{n = 4, t = 0.287\}$$

$$\{B_1 = 3.938, B_{n+1} = 3.401, V = 60 \text{ volt}\}$$

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{B_1}{B_{n+1}} = \frac{1}{4} \ln \frac{3.938}{3.401} = 0.0366$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{\varepsilon \pi^2 + \delta^2}} = 0.005823$$

$$p = \frac{t}{n} = \frac{0.287}{4} = 0.07175$$

$$w_d = \frac{2\pi}{p} = 90.405 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$w_n = \frac{w_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} = 90.414 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$k = m w_n^2 = 426.96 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\text{پریود تپش} = \frac{\varepsilon \pi}{w_d + w_n} = 0.0794 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

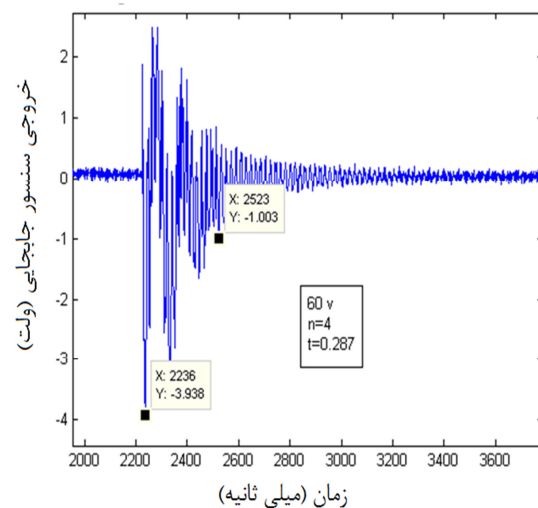
$$\text{پریود ارتعاشات} = \frac{2\pi}{|\omega_d - \omega_n|} = 698.13 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

تابع bode شکلی از نمودارهای پاسخ فرکانسی است که از واحد دسیبل برای نشان دادن دامنه ارتعاشات و واحد رادیان بر ثانیه برای نشان دادن محور فرکانسی لگاریتمی استفاده می کند. بوسیله نرم افزار متلب از تابع تبدیل، جهت انتقال مناسب و اتوماتیک رنج فرکانسی نمودارها، استفاده شده است. شکل-۱۲ نشان دهنده دیاگرام Bode به دست

ضریب کاهش لگاریتمی از روی نمودار پاسخ زمانی به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{B_1}{B_{n+1}} \quad (5)$$

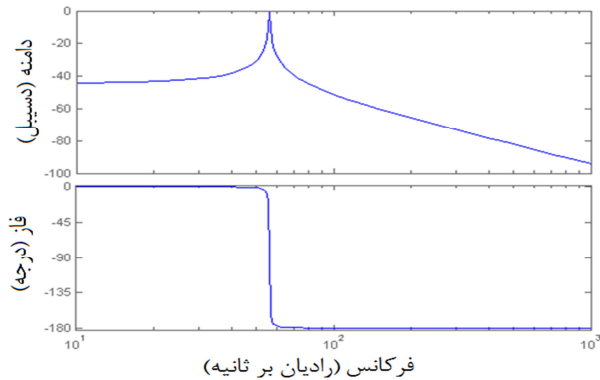
$B_1$  دامنه پیک اول انتخاب شده است زیرا بلندترین پیک بوده و کمتر در معرض خطا می باشد، اما حتما نباید اینگونه باشد و این فرمول می تواند برای هر دو سیکل با فاصله  $n$  به کار رود. برای به دست آوردن ضریب میرایی، ضربه ای به تیر وارد کرده و میراگر را به صورت کنترل فعال قرار می دهیم. پاسخ زمانی تیر در اثر تحریک ضربه جریان گردابی به صورت شکل-۱۱ به دست آمده است.



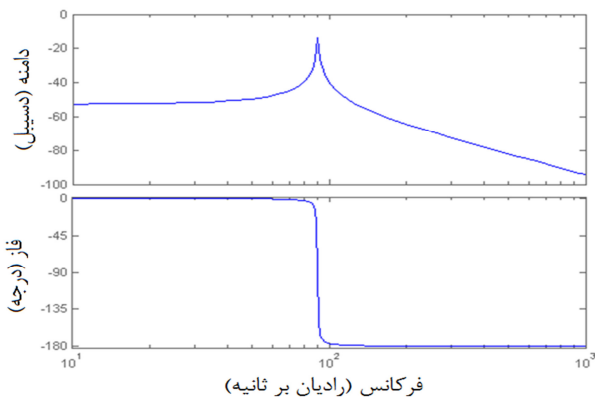
شکل ۱۱ پاسخ زمانی تیر (ضربه ۶۰ ولت و میراگر فعال)

برای استفاده از روش کاهش لگاریتمی و محاسبه ضریب میرایی، مقدار ولتاژ خروجی سنسور که متناسب با جابه جایی انتهای تیر می باشد در قله اول تا چهارم در نرم افزار متلب به دست آمده است. تیر آلومینیومی نازک عوامل اغتشاش همچون فن کامپیوتر و سیستم تهویه متبوع را همانند شکل ۱۱ کاملا نمایان می کند. به همین علت برای مشخص کردن

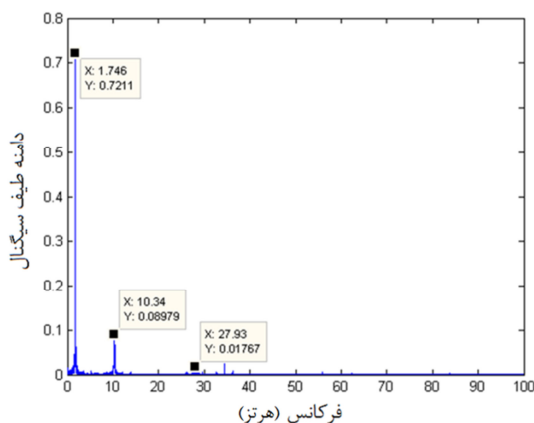
میرایی ارتعاشات تیر، با کاهش دادن دامنه قله‌ها در نمودار پاسخ فرکانسی مشخص می‌گردد.



شکل ۱۲ نمودار بود (ضربه ۶۰ ولت، میراگر غیر فعال)



شکل ۱۳ نمودار بود (ضربه ۶۰ ولت، میراگر فعال)



شکل ۱۴ FFT جابه‌جایی (ضربه ۵۰ ولت، میراگر غیر فعال)

آمده از تابع تبدیل سیستم درجه دو تحت ضربه جریان گردابی می‌باشد. تابع تبدیل سیستم با گرفتن تبدیل لاپلاس از مدل یک درجه آزادی به صورت معادله ۶- به دست می‌آید [۸].

$$G(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (6)$$

میراگر جریان گردابی از مدار خارج شده و پارامترهای سیستم برای حالت بدون میرایی دوباره به دست آمده است. تابع تبدیل سیستم برای حالت بدون میراگر تشکیل شده و توسط نرم‌افزار متلب، نمودار پاسخ فرکانسی آن رسم شده شد.

همانطور که در شکل- ۱۲ نمایان است، قله دامنه ارتعاشات کاملا تیز و در نتیجه پهنای باند آن کوچک می‌باشد. پاسخ فرکانسی سیستم، با فعال کردن میراگر همانند حالت قبلی به دست آمده و به صورت شکل- ۱۳ نمایش داده شده است. با بررسی کاهش دامنه ارتعاشات قله‌های پاسخ فرکانسی در حالت‌های بدون میرایی و با میرایی می‌تواند مقدار میرایی میراگر نوع فعال را مشخص نماید [۹].

دیگرام‌های *Bode* در حالت‌های با میرایی و بدون میرایی نشان داد که حدود ۱۰ دسیبل کاهش دامنه ارتعاشات بوجود آمده است.

## ۵- بررسی میراگر فعال در فرکانس‌های مختلف

بررسی اثر میرایی توسط نمودار پاسخ فرکانسی صورت گرفته است. با بکارگیری تبدیل فوریه و گرفتن FFT از پاسخ زمانی سیستم، پاسخ فرکانسی در حالت‌های بدون میرایی و با میرایی به دست آمده است. فرکانس‌های طبیعی در روش حل تحلیلی با دقت بسیار خوبی در نمودار FFT خود را نشان می‌توان.

میرا نمودن ارتعاشات در فرکانس‌های پایین عموماً مشکل‌تر از میرا نمودن ارتعاشات در فرکانس‌های بالاست [۱۰]. نمودارهای شکل- ۱۴ و شکل- ۱۵ نمایانگر دامنه ارتعاشات در فرکانس‌های مختلف هستند. تحریک توسط ضربه جریان گردابی باعث تحریک تمامی فرکانسها در تیر می‌شود و توانایی میراگر در

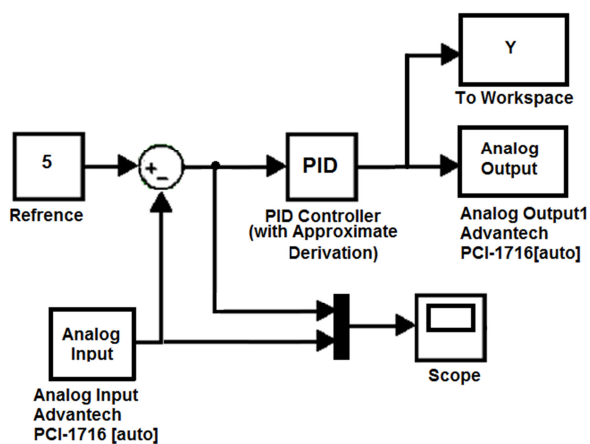


نمودار پاسخ زمانی ضربه ورودی به سیستم میراکننده فعال به ازاء تحریک ضربه ۶۰ ولت در شکل-۱۶ مشخص شده است.

مقادیر P,D,I با روش سعی و خطا برای به دست آوردن پاسخ ضربه جریان گردابی به صورت زیر به دست آمده است:

$$P=0.9 \quad I=0.23 \quad D=0.11$$

قسمتهای مختلف واحد کنترل فعال و نحوه ارتباط آنها با یکدیگر، در شکل-۱۸ مشاهده می گردد.

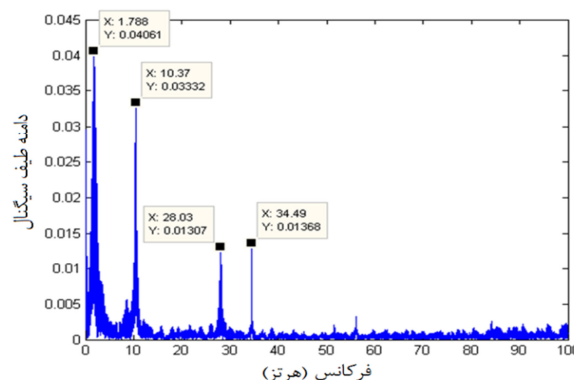


شکل ۱۷ تحقق کنترلر PID در محیط سیمولینک

از روی نمودار پاسخ زمانی ورودی ضربه در حالت ۶۰ ولت دشارژ خازن (شکل-۱۱)، پارامترهای دینامیکی بوسیله روش کاهش لگاریتمی به دست آمده است که در نتیجه، تابع تبدیل سیستم به صورت زیر می گردد:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{0.05223s^2 + 0.0549s + 426.964}$$

با توجه به شکل-۱۸ مشاهده می شود که به ازاء ورودی ضربه جریان گردابی مدل شده در نرم افزار متلب، پاسخ سیستم میرا به دست آمده است.



شکل ۱۵ جابه جایی FFT (ضربه ۵۰ ولت، میراگر فعال)

### ۶- شبیه سازی پاسخ زمانی ضربه جریان گردابی

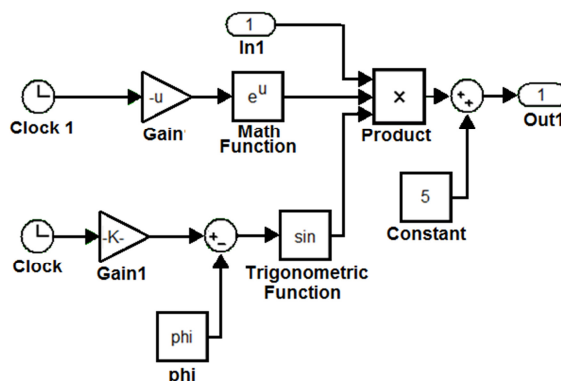
شکل کلی نیروی ضربه به صورت تابعی سینوسی و لگاریتمی کاهنده می باشد که به صورت رابطه زیر در سیمولینک متلب مدل شده است:

$$y(t) = ae^{-\zeta\omega_n t} \cdot \sin(\omega_d t) \quad \text{معادله ۷}$$

با مشاهده ضربه جریان گردابی در اسیلوسکوپ، زمان اعمال ضربه کمتر از ۲/۵ میکروثانیه مشخص گردید.

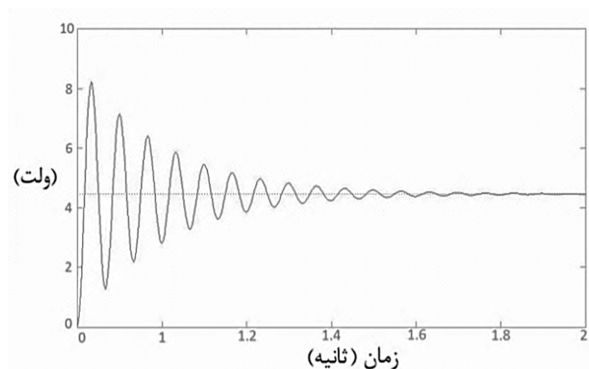
هر ۲/۵ ولت دریافتی از سنسور جابه جایی برابر یک میلی متر جابه جایی در انتهای تیر می باشد که در نتیجه ۳/۹۳۸ ولت پیک اول منحنی بالا، نشانگر ۱/۵۷۶ میلی متر جابه جایی انتهای تیر می باشد که این مقدار در معادله-۷ برابر  $a_0$  در نظر گرفته شده است.

ورودی ضربه به صورت تابعی سینوسی با کاهش نمایی همانند معادله-۷ در نرم افزار متلب مدل شده است. بلوک های مورد نظر جهت مدل کردن ضربه ورودی مانند شکل-۱۷ به هم متصل می گردند.



شکل ۱۶ مدل ضربه ورودی به سیستم

- Damper for Vibration Suppression of a Beam, J.Sound Vib, Vol.74, 2004; pp 560-580
- [2] PhD thesis, Jianhuishang M.S, electro magnetically Assisted Sheet Metal Stamping, Ohio State University, 2006; Vol.62, pp 305-320
- [3] PhD thesis, Sodano, Deveolpment of Novel Eddy Current Damping Mechanisms for the Suppression of Structural Vibrations, Virginia Tech University, 2005; pp 50-80.
- [4] Babak Ebrahimi, Permanent magnet configuration in design of an eddy current damper, Technical paper, 2008; pp 1-4
- [5] Sodano, Improved Concept and Model of Eddy Current Damper, J.Sound Vib, Vol.86, 2004; pp 163-170.
- [6] ارتعاشات مکانیکی، ویلیم جی پالم، ترجمه دکتر انوشیروان فرشیدیان فر، جلد دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۸، ص ص ۳۶۱-۳۵۳.
- [7] ارتعاشات مکانیکی، ویلیم جی پالم، ترجمه دکتر انوشیروان فرشیدیان فر، جلد اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۸، ص ص ۲۷۶-۲۰۵.
- [8] مهندسی کنترل، کاتسوهیکو اگاتا، ترجمه محمود دبانی، ویراست چهارم، ۱۳۸۳، ص ص ۱۶۸-۱۶۱ [www.ndtuk.com](http://www.ndtuk.com)
- [9] C.M.Harris and A.G.Piersol, eds., Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill, New York, 2002; pp 430-478
- [10] E.L. Bruno, ed. High Velocity Forming of Metals, Revised Edition., ASTM; 1978. pp 65-70
- [11] Sodano, H, Non-Contact Eddy Current Excitation Method for Vibration Testing. J.Sound Vib Vol.83, 2006; pp 83-86.
- [12] W.Palm, Analysis and Control of Dynamics Systems, John Wiley & Sons, New York, 2000; pp 300-320



شکل ۱۸ شبیه‌سازی پاسخ زمانی تیر (میراگر فعال)

## ۷- نتیجه‌گیری

کاهش دامنه ارتعاشات میراگر جریان‌گردابی در حالت نیمه فعال در فرکانس ۵۰ هرتز محسوس است و پهنای باند در نمودار پاسخ فرکانسی با فعال کردن میراگر افزایش داشته است. بررسی میراگر جریان‌گردابی در حالت فعال نشان داد که در پاسخ ضربه ۵۰ ولت، کاهش دامنه ارتعاشات در طیف فرکانسی به‌صورتی است که میزان دامنه ارتعاشات در قله اول طیف فرکانسی در حالت بدون میرایی ۱۸ برابر حالت میرایی و در قله دوم طیف فرکانسی در حالت بدون میرایی ۲/۴۲ برابر حالت میرایی می‌باشد. در قله سوم طیف فرکانسی میراگر معکوس عمل کرده و دامنه ارتعاشات در حالت میرایی ۳ برابر حالت بدون میرایی شده است. میراگر جریان‌گردابی نوع فعال در فرکانسهای پایین، کاهش قابل توجه دامنه ارتعاشات را به همراه داشته است. پیشنهاد می‌شود با طراحی کنترلر مناسب، میرایی در فرکانسهای بالاتر نیز حاصل گردد.

## ۸- سپاسگزاری

مولفان بدینوسیله از همکاریهای آزمایشگاه مودال دانشگاه سمنان و جناب آقای دکتر آشوری تشکر می‌نمایند.

## ۹- منابع

- [1] Sodano, H. A., Bae, J. S., Inman, D. J., and Belvin, W. K., Concept and Model of Eddy Current

