



کنترل ارتعاشات تیر ساندویچی با لایه‌ی مغناطیسی بر پایه‌ی منطق فازی

حسن ملائکه^۱، حمید معین فرد^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

*مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، h_moeenfar@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۱۱/۱۹

پذیرش: ۹۵/۳/۱۰

کلیدواژگان:

لایه‌ی مگنتورئولوژیکال

ارتعاشات ناخواسته

تیر ساندویچی

کنترل فازی

در این مقاله به بررسی تأثیر استفاده از لایه‌ی هوشمند مغناطیسی در کاهش و سرکوب ارتعاشات ناخواسته در تیرهای هوشمند پرداخته شده است. تیری سه‌لایه متشکل از یک لایه‌ی الاستومر مگنتورئولوژیکال که به‌صورت ساندویچی بین دو لایه‌ی الاستیک قرار دارد، در نظر گرفته شده است. با مدل‌سازی رفتار لایه‌ی مگنتورئولوژیکال به‌صورت ماده‌ی ویسکوالاستیک در ناحیه‌ی قبل از تسلیم، معادلات حاکم بر حرکت تیر ساندویچی به‌همراه شرایط مرزی متناظر با استفاده از اصل همپلتون به‌دست آمده است. به‌علت وابسته‌بودن مدول برشی لایه‌ی مگنتورئولوژیکال به میدان مغناطیسی، با تغییر میدان وارد بر هسته، سختی و میرایی تیر هوشمند می‌تواند به سرعت تغییر کند و از این قابلیت برای کنترل و میراسازی ارتعاشات ناخواسته‌ی وارد بر سیستم استفاده شده است. انتخاب میدان مغناطیسی مناسب برای رسیدن به پاسخ گذرای مطلوب، توسط یک کنترلر فازی با استفاده از جابه‌جایی و سرعت مودال، به‌عنوان ورودی‌های کنترلر انجام می‌شود. پارامترهای مودال تیر ساندویچی شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل‌مودهای متناظر به‌دست آمده و با نتایج موجود مقایسه و صحت‌گذاری شده است. در ادامه از روش گلرکین برای رسیدن به معادله‌ی زمانی حاکم بر تیر، با در نظر گرفتن اثر میدان مغناطیسی، استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که لایه‌ی هوشمند مغناطیسی به‌همراه کنترلر طراحی شده بر اساس منطق فازی می‌تواند به‌طور موثری در میراسازی ارتعاشات ناخواسته‌ی وارد بر سیستم مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در طراحی و تحلیل تیرهای هوشمند، به‌عنوان اجزای اصلی سازه‌های پیشرفته‌ی مهندسی برای بهبود عملکرد دینامیکی این سیستم‌ها استفاده شود.

Vibration suppression of MR sandwich beams based on fuzzy logic

Hasan Maleeke, Hamid Moeenfar^{*}

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*P.O.B. 9177948974, Mashhad, Iran, h_moeenfar@um.ac.ir

Keywords

Magneto-rheological layer

Unwanted vibrations

Sandwich beam

Fuzzy controller

Abstract

In this paper, the vibration suppression capabilities of magneto-rheological layer in smart beams is investigated. A three-layered beam including magneto-rheological elastomer layer sandwiched between two elastic layers is considered. By assuming the properties of magneto-rheological layer in the pre-yield region as viscoelastic materials behavior, the governing equations of motion and the corresponding boundary conditions are derived using Hamilton's principle. Due to field-dependent shear modulus of magneto-rheological layer, the stiffness and damping properties of the smart beam can be changed by application of magnetic field. This feature is utilized to suppress the unwanted vibration of the system. The appropriate magnetic field applied over the beam is chosen through a fuzzy controller for improving the transient response. The designed fuzzy controller uses the modal displacement and velocity of the beam as its inputs. The modal parameters of the sandwich beam including the natural frequencies and mode shapes are obtained and validated with existing results. Using the Galerkin method, the temporal equation governing beam's motion is obtained and then the vibration of smart sandwich beam is investigated using numerical simulations. The results show that the magneto-rheological layer along with the designed fuzzy controller can be effectively used to suppress the unwanted vibration of the system. The qualitative and quantitative knowledge resulting from this research is expected to enable the analysis, design and synthesis of smart beams for improving the dynamic performance of smart engineering structures.

Please cite this article using:

Maleeke, H. and Moeenfar, H., "Vibration suppression of MR sandwich beams based on fuzzy logic", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 359-368, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

۱- مقدمه

خواص فیزیکی مواد مگنتورئولوژیکال^۱ از جمله ویسکوزیته و مدول برشی آن‌ها، می‌تواند تحت تاثیر میدان مغناطیسی به سرعت تغییر کند. این مواد از ذرات بسیار کوچک رسانا (در ابعاد میکرون) و معلق در یک محیط واسطه تشکیل شده‌اند. تغییر خواص رئولوژی این مواد به صورت برگشت‌پذیر و در زمان بسیار کمی (در حد میلی ثانیه) رخ می‌دهد. به همین سبب، کاربرد این مواد در کنترل نویز و ارتعاشات سازه‌ها مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. از طرفی چون این مواد از ترکیب ساده‌ی اجزا رسانا در یک محیط وابسته تشکیل شده‌اند، می‌توان با تغییر خواص اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها به خواص متفاوتی دست یافت و در شرایط مختلف از آن بهره گرفت. از کاربردهای تجاری این مواد می‌توان به استفاده موفق در تجهیزات قابل کنترل از جمله میراگرهای هوشمند، کلاچ‌ها، ترمزها و سوپاپ‌ها اشاره کرد [۱-۳]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی استفاده از الاستومرهای ام-آر^۲ در سازه‌های هوشمند صورت گرفته است [۴-۶]. الاستومرهای ام-آر از ذرات رسانای معلق در پلیمرهای الاستیک تشکیل شده‌اند و با کاربرد آن‌ها می‌توان سازه‌ها را در برابر بارهای متغیر و ارتعاشات ناخواسته مانند زلزله مقاوم ساخت. سازه‌های هوشمند بر پایه‌ی مواد ام-آر، با قراردادن لایه‌ی ام-آر بین لایه‌های الاستیک و اعمال میدان مغناطیسی متغیر بر سازه وجود می‌آیند. در مرجع [۷] مرور کاملی از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی مدل‌سازی دینامیک سازه‌های ساندویچی ام-آر و استفاده از آن‌ها در کنترل ارتعاشات آورده شده است. از بررسی‌های اولیه در زمینه‌ی ارتعاشات تیرهای ساندویچی می‌توان به تحقیقات دیتاراتو [۸] و مید و مارکوس [۹] که در دهه‌ی ۷۰ میلادی صورت گرفت، اشاره کرد. یالسینتس و دای [۱۰] پاسخ دینامیکی تیر ساندویچی با تکیه‌گاه ساده تحت بارگذاری محوری را با رویکرد انرژی مدنظر قرار دادند. آن‌ها همچنین به مقایسه‌ی تیرهای ساندویچی ام-آر با تیرهایی شامل هسته‌ی ای-آر^۳ پرداخته و دریافتند که استفاده از هسته‌ی ام-آر در تیر ساندویچی می‌تواند منجر به فرکانس‌های طبیعی بسیار بالاتری نسبت به تیر با هسته‌ی ای-آر شود. سان و همکاران [۱۱] نیز به بررسی پاسخ دینامیکی تیر ساندویچی ام-آر به صورت تحلیلی و تجربی پرداختند و رابطه بین میدان مغناطیسی اعمالی و مدول برشی مختلط ماده‌ی ام-آر را با استفاده از رئومتري^۴ به‌دست آوردند. راجاموهان و همکاران [۱۲] به مدل‌سازی تیر ساندویچی با هسته‌ی ام-آر با در نظر گرفتن اثرات برش در هسته پرداختند. آن‌ها روش‌های اجزا محدود و ریتز را مورد استفاده قرار دادند و اثر تغییر شدت میدان مغناطیسی و پارامترهای هندسی را بر ویژگی‌های دینامیکی تیر مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مرجع [۱۳] به بررسی استفاده از لایه‌ی ام-آر به صورت جزئی پرداختند و تاثیر محل و طول لایه بر شکل‌مدهای تیر را برای شرایط مرزی گوناگون مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از لایه‌ی جزئی علاوه بر کاهش وزن، می‌تواند عملکرد بهتری در مقایسه با لایه‌ی کامل ام-آر داشته باشد. آن‌ها محل بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های جزئی را با هدف بیشینه کردن پنج ضریب استهلاک اول مورد بررسی قرار دادند. در پژوهشی دیگر، راجاموهان و رامامورتی [۱۴] به بررسی تیرهای ام-آر چندلایه پرداختند. آن‌ها دریافتند که فرکانس‌های طبیعی و ضرایب استهلاک نه تنها تابع میدان که تابعی از مکان لایه نیز می‌باشد. همچنین ناهمگنی لایه‌ی ام-آر باعث

تغییر در نحوه‌ی تغییرشکل تیر، مخصوصاً در نقاطی با حداکثر جابجایی می‌شود. در مرجع [۱۵]، عسگری و دیگران ارتعاشات آزاد ورق‌های ساندویچی ساخته شده از مواد مرکب با هسته‌ی ام-آر و یک لایه‌ی مقیدکننده را مورد مطالعه قرار داده و با روش نویر، حل تحلیل ورق با تکیه‌گاه ساده را ارائه کردند. آن‌ها برای سه نوع لایه‌چینی مختلف، ویژگی‌های ورق را مورد بررسی قرار دادند. ملک‌زاده‌فرد و همکاران [۱۶] نیز تحلیل ارتعاشات آزاد و ضربه‌های سرعت پایین را برای ورق ساندویچی ام-آر مطالعه نمودند. در زمینه‌ی مطالعه‌ی ارتعاشات اجباری تیرهای ساندویچی ام-آر می‌توان به پژوهش انجام شده توسط نایاک و همکاران [۱۷] اشاره کرد که ارتعاشات این سازه‌ها را تحت تحریک چندفرکانسی بررسی کردند. آن‌ها با تغییر دامنه و فرکانس میدان متناوب، پایداری تیرهای ساده و گیردار را به کمک روش اغتشاشی مقیاس‌های چندگانه بررسی کردند. آن‌ها در مرجع [۱۸] به مطالعه‌ی پایداری دینامیکی تیرهای چرخان ساندویچی با هسته‌ی ام-آر تحت تحریک محوری هارمونیک پرداختند و اثرات میدان مغناطیسی، سرعت دوران، قطر هاب و بارهای استاتیکی و دینامیکی را با روش بالانس هارمونیک بررسی کردند.

در حالی که محققین بسیاری به بررسی ارتعاشات و قابلیت‌های تیرهای ساندویچی با لایه‌ی ام-آر و ای-آر پرداختند، اما بخش عمده‌ای از تحقیقات مربوط به تحلیل کنترل سازه‌های هوشمند، به استفاده از میراگرهای شامل سیالات ام-آر و ای-آر در کنترل سازه‌ها اختصاص پیدا کرده است. به منظور طراحی کنترلر برای سازه‌های هوشمند می‌توان از تئوری‌های کنترلی مختلفی از جمله پایداری لیاپونوف، مد لغزشی، بازخورد خطی تناسبی، شبکه‌های عصبی و غیره استفاده کرد. ران و جوشی [۱۹] کنترل تیرهای ساندویچی ای-آر را با استفاده از تئوری پایداری لیاپونوف بررسی کردند. ونگ و دیگران [۲۰] طراحی کنترلر بر پایه‌ی تئوری مد لغزشی برای سیستم‌های با مواد ای-آر را مدنظر قرار دادند. چرزن و کارلسون [۲۱] طراحی میراگر با استفاده از الاستومرهای ام-آر پرداخته و با موفقیت توانستند از آن در کنترل ارتعاشات ماشین‌های لباسشویی استفاده کنند. هو و همکاران [۲۲] توانستند به کاهش قابل ملاحظه‌ای در دامنه‌ی جابجایی تیرهای ساندویچی ام-آر دست یابند. همچنین گزارش شده است که افزایش شدت میدان مغناطیسی علاوه بر کاهش دامنه، تغییرات شدید حداکثر دامنه را نیز کاهش می‌دهد [۲۳]. کنترل ارتعاشات تیرهای ساندویچی تحت اثر تحریک اتفاقی نیز توسط نی و همکاران [۲۴] بررسی شده است. آن‌ها با استفاده از روش گلرکین و تئوری ارتعاشات اتفاقی، ارتعاشات یک تیر گیردار با لایه‌ی مغناطیسی را تحت تحریک اتفاقی پایه مطالعه کردند. نتایج نشان داد که لایه مغناطیسی باعث کاهش شدید سرعت پاسخ تیر می‌شود. کنترل بهینه‌ی تیر ساندویچی با لایه‌ی ام-آر جزئی نیز توسط داینویسز و همکاران [۲۵] انجام شد. آن‌ها با مدل‌سازی رفتار تیر ساندویچی با تکیه‌گاه ساده، از یک الگوریتم بهینه‌سازی برای رسیدن به کنترل بهینه‌ی تیر ساندویچی استفاده کردند.

در این مقاله به بررسی تاثیر استفاده از لایه‌ی هوشمند مغناطیسی در کاهش و سرکوب ارتعاشات ناخواسته در تیرهای هوشمند پرداخته شده است. بدین منظور به طراحی یک کنترلر فازی برای تغییر هدفمند میدان مغناطیسی وارد بر هسته‌ی تیر و استفاده از خواص متغیر مواد ام-آر پرداخته شده است. تیری سه‌لایه متشکل از یک لایه‌ی هوشمند مغناطیسی که به صورت ساندویچی بین دو لایه‌ی الاستیک قرار دارد، در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر حرکت تیر به همراه شرایط مرزی متناظر با استفاده از اصل همپلتون به‌دست آمده است. پاسخ ارتعاشات آزاد تیر شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل‌مدهای متناظر به‌دست آمده و با نتایج موجود مقایسه شده

1. Magnetorheological (MR)
2. MR elastomers
3. Electrorheological (ER)
4. Rheometry

که γ نشان دهنده نرخ کرنش برشی است. همچنین G و η به ترتیب مدول ذخیره و مدول اتلاف نامیده می‌شوند و به ترتیب بیانگر میانگین انرژی ذخیره شده و تلف شده بر واحد حجم ماده در یک سیکل تغییر شکل می‌باشند. به طور کلی، مدول ذخیره و اتلاف الاستومرهای ام-آر تابعی از دما، فرکانس و میدان مغناطیسی اعمالی هستند. در پژوهش حاضر، فرض شده است که دما ثابت بوده و از وابستگی خواص الاستومر به دما صرف نظر شده است. همچنین به علت این که تاثیر میدان مغناطیسی بر خواص لایه الاستومر بیشتر از فرکانس اعمالی است، تنها تابعیت خواص به میدان مغناطیسی در مدل سازی لحاظ شده است. رابطه‌ی مقادیر G و η بر حسب تابعی از میدان مغناطیسی بر حسب گاوس در مرجع [۱۳] به صورت زیر داده شده است.

$$\begin{cases} G(B) = -3.3691B^2 + 4997.5B + 0.873 \times 10^6 \\ \eta(B) = -0.9B^2 + 0.8124 \times 10^3 B + 0.1855 \times 10^6 \end{cases} \quad (2)$$

که B بیانگر شدت میدان مغناطیسی است.

به منظور به دست آوردن معادلات حرکت سیستم از اصل همیتون استفاده می‌شود. ابتدا لازم است که عبارات انرژی پتانسیل، انرژی جنبشی و کار نیروهای خارجی نوشته شوند. انرژی پتانسیل ناشی از تغییر شکل‌های کششی و خمشی در لایه‌های الاستیک عبارت است از:

$$U = \int_0^L EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dx + \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (3)$$

که A و I به ترتیب مساحت و ممان اینرسی دوم سطح مقطع تیرها و E مدول الاستیسیته ماده می‌باشند.

در صورت ثابت بودن کرنش برشی در راستای ضخامت لایه میانی، انرژی برشی در هسته ام-آر به صورت زیر بیان می‌شود.

$$U_s = \frac{1}{2} \int_0^L GA_s \gamma^2 dx \quad (4)$$

که A_s و γ به ترتیب بیانگر مساحت تحت برش و کرنش برشی هسته ویسکوالاستیک می‌باشند. با توجه به نمای بزرگنمایی شده نشان داده شده در شکل ۱، می‌توان رابطه‌ی بین تغییر شکل برشی γ و تغییر شکل‌های طولی و عرضی تیر به صورت زیر به دست آورد.

$$\gamma = \frac{c+h}{c} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{2u}{c+h} \right) \quad (5)$$

با فرض اینکه تیر تحت اثر بار گسترده‌ی $f(x,t)$ قرار دارد، کار مجازی انجام شده توسط نیروی خارجی عبارت است از:

$$\delta w = \int_0^L f(x,t) \delta w(x,t) dx \quad (6)$$

همچنین با صرف نظر از میرایی تیرها در مقایسه با میرایی هسته ویسکوالاستیک، کار مجازی نیروی میرایی عبارت خواهد بود از:

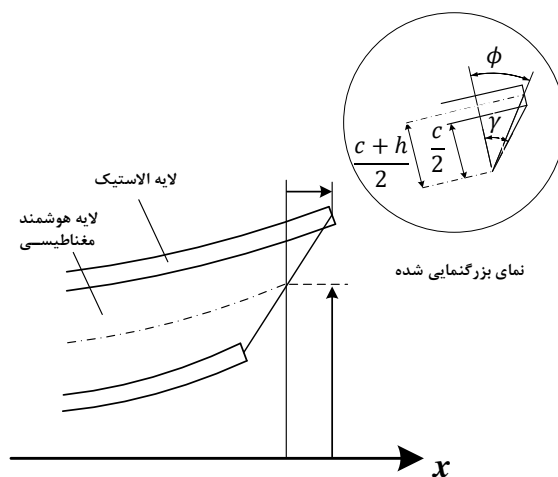
$$\delta w_c = - \int_0^L \eta A_s \dot{\gamma} \delta \gamma dx \quad (7)$$

انرژی جنبشی سیستم ناشی از جابجایی در جهت‌های محوری و عرضی به صورت رابطه (۸) قابل بیان است.

است. سپس از روش گلرکین برای رسیدن به معادلات زمانی حاکم بر تیر، با در نظر گرفتن اثر میدان مغناطیسی، استفاده شده است. با تغییر میدان مغناطیسی وارد بر هسته مغناطیسی، سختی و میرایی تیر به سرعت تغییر می‌کند که از این قابلیت برای کنترل و میراسازی ارتعاشات ناخواسته‌ی وارد بر سیستم استفاده شده است. انتخاب میرایی مناسب توسط یک کنترلر فازی با استفاده از جابجایی و سرعت مودال، به عنوان ورودی‌های کنترلر انجام و سرعت مودال سیستم پایه‌ریزی شده است. در انتها به شبیه‌سازی عددی ارتعاشات آزاد و اجباری تیر ساندویچی هوشمند پرداخته شده است.

۲- مدل سازی ریاضی

در این بخش معادلات حرکت تیر ساندویچی با لایه هوشمند ام-آر به صورت نشان داده شده در شکل ۱ به دست می‌آید. این سیستم از لایه الاستومر ام-آر با ضخامت c که به صورت ساندویچی بین دو لایه الاستیک با ضخامت h قرار گرفته، تشکیل شده است. بر اثر تغییر شکل عرضی $w(x,t)$ ، لایه‌های الاستیک خم شده و در هسته ام-آر تغییر شکل برشی γ ایجاد می‌شود. تغییر شکل برشی در لایه میانی منجر به تغییر شکل طولی $u(x,t)$ شده که در مدل سازی در نظر گرفته می‌شود. به دلیل نسبت بالای طول به ضخامت لایه‌های الاستیک بیرونی، مدل سازی براساس فرضیات تیر اویلر-برنولی انجام خواهد شد. در این تئوری از چرخش سطح مقطع در مقایسه با حرکت انتقالی آن صرف می‌شود. علاوه بر این، اعوجاج سطح مقطع بر اثر برش در مقایسه با تغییر شکل ناشی خمش ناچیز فرض می‌شود [۲۶]. همچنین از هرگونه لغزش احتمالی بین لایه‌های الاستیک و لایه میانی صرف نظر شده است. به منظور مدل سازی رفتار هسته ام-آر فرض می‌شود که تغییر شکل‌های برشی به گونه‌ای باشد که ماده در ناحیه‌ی قبل از تسلیم قرار داشته باشد که در نتیجه می‌توان آن را به صورت ماده ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفت [۲۷]. لازم به ذکر است که در صورت کوچک بودن کرنش‌ها (کمتر از ۰/۱ درصد)، فرض خطی بودن معتبر بوده و اختلاف بسیار ناچیزی با مدل‌های غیرخطی دارد.



شکل ۱ تغییر شکل تیر ساندویچی با هسته ام-آر

با در نظر گرفتن مدل کلونین برای ماده ویسکوالاستیک می‌توان رابطه‌ی (۱) را بین تنش، کرنش و نرخ کرنش برشی نوشت [۲۸].

$$\tau = G\gamma + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \delta u \Big|_0^1 = 0 \quad (پ-۱۵)$$

۲-۱- ارتعاشات آزاد

برای یک تیر بلند با نسبت لاغری کوچک، اینرسی محوری در مقایسه با ارتعاشات عرضی قابل صرف‌نظر است [۲۹]. بنابراین معادله‌ی (۱۴) به صورت زیر ساده می‌شود.

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta I \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) + GI \left(\frac{\partial w}{\partial x} + u \right) = 0 \quad (۱۶)$$

فرکانس‌های طبیعی و شکل‌مدهای مربوطه با در نظر گرفتن پاسخ ارتعاشات آزاد سیستم به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد.

$$w(x,t) = W_n(x) e^{i\omega_n t}, \quad u(x,t) = U_n(x) e^{i\omega_n t} \quad (۱۷)$$

که فرکانس طبیعی مود n م سیستم است. با جایگذاری رابطه‌ی فوق در شکل همگن معادلات (۱۳) و (۱۴) و همچنین صرف‌نظر از جملات شامل میرایی می‌توان نوشت.

$$\frac{d^4 W_n}{dx^4} - G_0 \left(\frac{d^2 W_n}{dx^2} + \frac{dU_n}{dx} \right) - \omega_n^2 W_n = 0 \quad (۱۸)$$

$$-\frac{d^2 U_n}{dx^2} + G_0 I \left(\frac{dW_n}{dx} + U_n \right) = 0 \quad (۱۹)$$

در معادلات فوق، G_0 مقدار مدول ذخیره هسته‌ی ام-آر در غیاب میدان مغناطیسی است که با صفر قراردادن میدان مغناطیسی B در رابطه‌ی (۲) به‌دست می‌آید. معادلات (۱۸) و (۱۹) دارای پاسخ کلی زیر می‌باشند.

$$W_n(x) = e^{\lambda_n x}, \quad U_n(x) = R_n e^{\lambda_n x} \quad (۲۰)$$

که نسبت دامنه‌ی جابجایی محوری به عرضی است. جایگذاری رابطه‌ی (۲۰) در معادله‌ی (۱۹) رابطه (۲۱) را نتیجه می‌دهد.

$$R_n = -\frac{G_0 I \lambda_n}{\lambda^2 + G_0 I} \quad (۲۱)$$

با جایگذاری معادله‌ی (۲۰) و (۲۱) در معادله‌ی (۱۸)، معادله‌ی مشخصه به صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\lambda_n^6 + G_0 (I-1) \lambda_n^4 - \omega_n^2 \lambda_n^2 - G_0 I \omega_n^2 = 0 \quad (۲۲)$$

با حل معادله‌ی فوق به همراه ۶ شرط مرزی قابل استخراج از روابط معادله‌ی (۱۵)، فرکانس‌های طبیعی و شکل‌مدهای سیستم به‌دست می‌آیند.

برای تیر با تکیه‌گاه ساده، شکل‌مدها به صورت سینوسی و با فرکانس $\lambda_n = n\pi$ می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت.

$$\begin{cases} w_n(x,t) = q_n(t) \sin(n\pi x) \\ u_n(x,t) = R_n q_n(t) \cos(n\pi x) \end{cases} \quad (۲۳)$$

که نسبت دامنه‌ی جابجایی محوری به عرضی و $q_n(t)$ مختصات عمومی است که با جایگذاری معادله‌ی (۲۳) در معادله‌ی (۲۱) به صورت رابطه (۲۴) به‌دست می‌آید.

$$R_n = -\frac{G_0 I n \pi}{n^2 \pi^2 + G_0 I} \quad (۲۴)$$

$$K = \int_0^L \rho A (\dot{u}^2 + \dot{w}^2) dx \quad (۸)$$

با به‌کارگیری روابط (۸)-(۳) در اصل همیلتون، معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی سیستم و شرایط مرزی مربوطه به صورت زیر به‌دست می‌آیند.

$$2EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \eta A_s \left(\frac{c+h}{c} \right)^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + \frac{2}{c+h} \frac{\partial u}{\partial t} \right) - \left(\frac{c+h}{c} \right)^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(G A_s \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{2u}{c+h} \right) \right) + 2\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = f(x,t) \quad (۹)$$

$$-2EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{2\eta A_s}{c+h} \left(\frac{c+h}{c} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + \frac{2}{c+h} \frac{\partial u}{\partial t} \right) + \frac{2G A_s}{c+h} \left(\frac{c+h}{c} \right)^2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{2u}{c+h} \right) + 2\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (۱۰)$$

شرایط مرزی:

$$\left[-2EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + G A_s \left(\frac{c+h}{c} \right)^2 \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{2u}{c+h} \right) + \eta A_s \left(\frac{c+h}{c} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + \frac{2}{c+h} \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] \delta w \Big|_0^L = 0 \quad (الف-۱۱)$$

$$EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_0^L = 0 \quad (ب-۱۱)$$

$$EA \frac{\partial u}{\partial x} \delta u \Big|_0^L = 0 \quad (پ-۱۱)$$

به منظور ساده‌سازی معادلات، متغیرهای بی‌بعد زیر معرفی می‌شوند.

$$x^* = \frac{x}{L}, \quad w^* = \frac{w}{L}, \quad u^* = \frac{2u}{c+h}, \quad t^* = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}, \quad \eta^* = \frac{\eta A_s L^2}{2TEI} \left(\frac{c+h}{c} \right)^2, \quad G^* = \frac{G A_s L^2}{2EI} \left(\frac{c+h}{c} \right)^2, \quad f^* = \frac{L^3 f}{2EI}, \quad I^* = \frac{4I}{A(c+h)^2}, \quad D = \frac{I}{AL^2} \quad (۱۲)$$

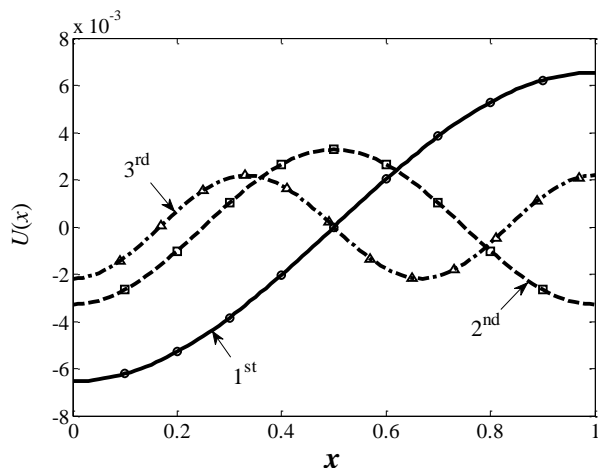
با استفاده از پارامترهای بی‌بعد معرفی شده در معادله‌ی (۱۲) و حذف علامت ستاره برای راحتی بیشتر، معادلات حرکت و شرایط مرزی بدون‌بعد زیر به‌دست می‌آیند.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^{*4}} - \eta^* \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^* \partial t^*} + \frac{\partial u}{\partial t^*} \right) - \frac{\partial}{\partial x^*} \left(G^* \left(\frac{\partial w}{\partial x^*} + u \right) \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial t^{*2}} = f(x,t) \quad (۱۳)$$

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^{*2}} + \eta I \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^* \partial t^*} + \frac{\partial u}{\partial t^*} \right) + G I \left(\frac{\partial w}{\partial x^*} + u \right) + D \frac{\partial^2 u}{\partial t^{*2}} = 0 \quad (۱۴)$$

$$\left[-\frac{\partial^3 w}{\partial x^{*3}} + G \left(\frac{\partial w}{\partial x^*} + u \right) + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^* \partial t^*} + \frac{\partial u}{\partial t^*} \right) \right] \delta w \Big|_0^1 = 0 \quad (الف-۱۵)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^{*2}} \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x^*} \right) \Big|_0^1 = 0 \quad (ب-۱۵)$$



شکل ۳ شکل‌مدهای محوری تیر ساندوچی با هسته مغناطیسی

۲-۲- ارتعاشات اجباری

معادله‌ی حاکم بر ارتعاشات اجباری سیستم را می‌توان بر حسب مختصات عمومی به صورت زیر بیان کرد.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = Q_n(t) \quad (27)$$

که $Q_n(t)$ بیانگر نیروی عمومی وارد بر سیستم است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Q_n(t) = \int_0^1 f(x,t) W_n(x) dx \quad (28)$$

در صورت اعمال بار $f(x,t)$ به صورت نقطه‌ای در $x = x_a$ ، نیروی عمومی $Q_n(t)$ به صورت رابطه (۲۹) است.

$$Q_n(t) = F(t) W_n(x_a) \quad (29)$$

که $F(t)$ بخش زمانی نیروی اعمالی و $W_n(x_a)$ بیانگر شکل‌مدهای m ام سیستم در نقطه‌ی بارگذاری است. در نتیجه رابطه‌ی حاکم بر ارتعاشات اجباری سیستم به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = F(t) W_n(x_a) \quad (30)$$

در ادامه، به منظور کنترل ارتعاشات سیستم به طراحی یک سیستم کنترلی بر اساس تئوری مجموعه‌های فازی پرداخته شده و از ویژگی‌های مواد ام-آر در خنثی کردن ارتعاشات ناخواسته استفاده می‌شود.

۳- طراحی کنترلر برای کاهش ارتعاشات

در این بخش به طراحی کنترلر برای تیر مورد بررسی پرداخته می‌شود. هدف کنترلی، کاهش ارتعاشات تیر بوده و سیگنال کنترلی، شدت میدان مغناطیسی و در نتیجه میرایی لایه‌ی ام-آر می‌باشد. استفاده موثر از خواص متغیر مواد ام-آر بستگی به شیوه‌ی کنترل میدان مغناطیسی وارد بر تیر دارد. کنترلر بایستی شدت میدان مغناطیسی را با توجه به وضعیت لحظه‌ای سیستم به صورت موثری تنظیم کند تا ارتعاشات سیستم را تا حد امکان کاهش دهد. اگرچه برای نیل به این مقصود می‌توان از تئوری‌های کنترلی مختلف بهره گرفت، در این پژوهش از یک کنترلر فازی شده است. سیستم‌های کنترل فازی بر اساس تئوری مجموعه‌های فازی که در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی‌زاده ارائه شده، به مدل‌سازی عدم قطعیت در سیستم‌های

با به‌کارگیری معادلات (۲۳)، (۲۴) و (۱۳) و قرار دادن $f(x,t) = 0$ معادله مودال به صورت رابطه (۲۵) به‌دست می‌آید.

$$\ddot{q}_n(t) + \eta_0 \left(\frac{n^4 \pi^4}{n^2 \pi^2 + G_0 I} \right) \dot{q}_n(t) + \left(n^4 \pi^4 + \frac{G_0 I n^4 \pi^4}{n^2 \pi^2 + G_0 I} \right) q_n(t) = 0 \quad (25)$$

با توجه به این معادله، فرکانس و میرایی مودال به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{cases} \omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{1 + \frac{G_0 I}{n^2 \pi^2 + G_0 I}} \\ \zeta_n = \frac{\eta_0}{2 \omega_n} \left(\frac{n^4 \pi^4}{n^2 \pi^2 + G_0 I} \right) \end{cases} \quad (26)$$

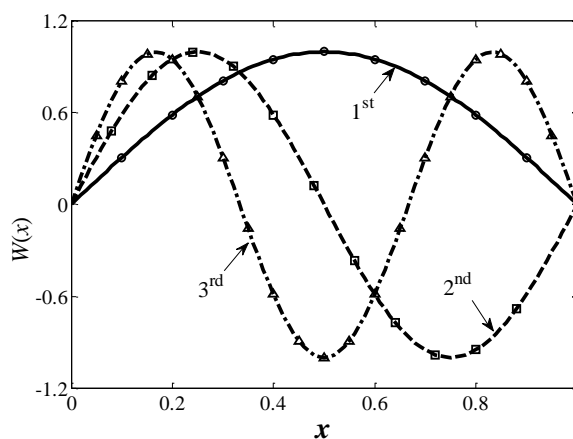
که η_0 مقدار مدول اتلاف الاستومر ام-آر در غیاب میدان مغناطیسی است.

در پژوهش حاضر، بررسی تیر ساندوچی با تکیه‌گاه ساده مدنظر است. در عین حال، تحلیل ارتعاشات آزاد تیر ساندوچی با شرایط مرزی دلخواه در پیوست الف ارائه شده است.

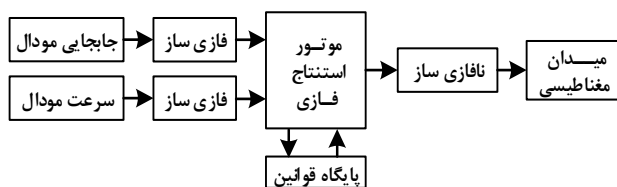
در جدول ۱، سه فرکانس مودال اول تیر ساندوچی با مشخصات بیان شده در مرجع [۳۰] را در غیاب میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج به‌دست آمده در مراجع [۳۰] و [۳۱] نیز برای مقایسه آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده در کار حاضر تطابق مناسبی با نتایج سایر محققین دارد. هم‌چنین شکل مدهای عرضی و محوری مربوط به سه مود اول تیر (رابطه (۲۱)) در شکل‌های ۲ و ۳، به‌صورت تحلیلی و عددی مقایسه شده‌اند که با یکدیگر کاملاً همخوانی داشته و صحت نتایج را تایید می‌کند. در این شکل‌ها، خطوط پیوسته نشان‌دهنده‌ی حل تحلیلی و نقاط گسسته حل عددی را نشان می‌دهند.

جدول ۱ مقایسه‌ی فرکانس‌های مودال تیر ساندوچی با هسته‌ی مغناطیسی

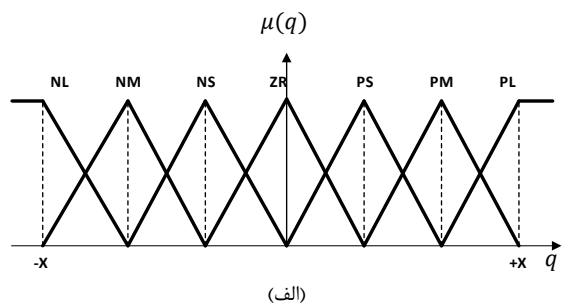
شماره مود	پژوهش حاضر	فرکانس مودال بدون بعد		رای و کار درصد
		دیگران [۳۰]	خطا	
۱	۹.۸۷	۱۰.۱۶	۲.۸	۱.۳
۲	۳۹.۴۸	۳۹.۷۷	۰.۷۲	۰.۰۵
۳	۸۸.۸۳	۸۹.۱۲	۰.۳۲	۰.۱۹



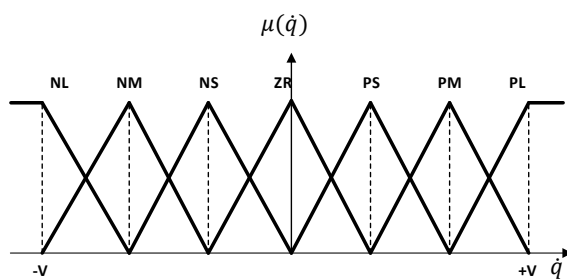
شکل ۴ شکل‌مدهای عرضی تیر ساندوچی با هسته مغناطیسی



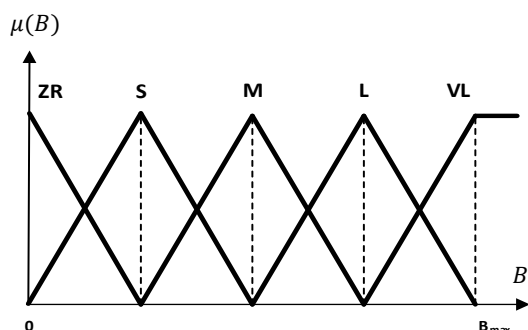
شکل ۴ اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سیستم فازی



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵ توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی کنترلر فازی: الف) ورودی اول (جایابی مودال)، ب) ورودی دوم (سرعت مودال)، پ) میدان مغناطیسی خروجی

جدول ۲ پایگاه قوانین کنترلر فازی طراحی شده

جایابی مودال							
NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	
VL	VL	M	L	ZR	ZR	ZR	NL
VL	L	M	M	ZR	ZR	S	NM
L	M	S	S	ZR	M	M	NS
L	M	S	ZR	S	M	L	ZR
M	M	ZR	S	S	M	L	PS
S	ZR	ZR	M	M	L	VL	PM
ZR	ZR	ZR	L	M	VL	VL	PL

توابع خروجی

واقعی می‌پردازد [۳۲]. منطق فازی در شاخه‌های گوناگون علم از به صورت موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است. تئوری کنترل فازی یکی از حوزه‌های پرکاربرد منطق فازی است. کنترلرهای فازی در عین سادگی ساختاری، از بهره‌وری بسیار موثری برخوردارند [۳۳].

یک سیستم فازی شامل فازی‌ساز، مجموعه قوانین، موتور استنتاج و نافازی‌ساز می‌باشد و بدین طریق به شبیه‌سازی منطق استدلالی بشر می‌پردازد. بدین صورت که متغیرهای فیزیکی ورودی توسط فازی‌ساز تبدیل به مجموعه‌های فازی مشخصی شده و در مرحله‌ی بعد، توسط موتور استنتاجی کنترلر پردازش می‌شوند. خروجی موتور استنتاج که به صورت یک مجموعه‌ی فازی است، وارد بخش نافازی‌ساز کنترلر شده و به پارامترهای فیزیکی قابل حس توسط سنسورها و محرک‌ها تبدیل می‌شوند. به منظور طراحی یک کنترلر فازی، ابتدا متغیرهای ورودی و خروجی کنترلر و بازه‌ی تغییرات آن‌ها توسط طراح مشخص می‌شود. بدین منظور طراح می‌تواند از داده‌های تجربی، تجربه متخصصین و یا شبیه‌سازی سیستم استفاده کند. سپس توابع عضویت در بازه‌ی تغییرات هر متغیر ساخته می‌شوند.

در این پژوهش، به منظور تعیین شدت میدان مورد نیاز برای کنترل ارتعاشات سیستم، از کنترلر فازی شکل ۴ در سیستم حلقه بسته استفاده می‌شود. جایابی و سرعت عمومی سیستم به عنوان ورودی‌های کنترلر فازی و شدت میدان مغناطیسی وارد بر هسته‌ی ام-آر، خروجی آن در نظر گرفته می‌شود.

به ازای هریک از ورودی‌های کنترلر، ۷ مجموعه‌ی فازی NL (منفی بزرگ)، NM (منفی متوسط)، NS (منفی کوچک)، ZR (صفر)، PS (مثبت کوچک)، PM (مثبت متوسط) و PL (مثبت بزرگ) با توابع عضویت مثلثی نشان داده شده در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر، محدوده‌ی تغییر این ورودی‌ها $[-X, X]$ با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی سیستم در سیستم حلقه‌باز به‌دست می‌آید. همچنین خروجی سیستم توسط ۵ مجموعه‌ی فازی ZR (صفر)، S (کوچک)، M (متوسط)، L (بزرگ) و VL (خیلی زیاد) در مجموعه‌ی جهانی B با توابع عضویت شکل ۵-پ تعریف شده است. در این شکل، B_{max} بیانگر حداکثر میدان مغناطیسی تولید شده محرک مورد استفاده در سیستم است.

جدول ۲ پایگاه قوانین سیستم فازی مورد نظر را نشان می‌دهد. منطق مورد استفاده در تدوین این قوانین بدین صورت است که اگر تیر در حال دور شدن از نقطه‌ی تعادلش باشد، با افزایش شدت میدان مغناطیسی و در نتیجه افزایش ضریب میرایی، دامنه‌ی حرکت تیر کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، اگر حرکت تیر به سمت نقطه‌ی تعادلش باشد، با کاهش شدت میدان، تیر با نیروی مقاوم کمتری به حرکت خود ادامه می‌دهد.

با استفاده از فازی‌ساز منفرد، موتور استنتاج حاصل ضرب و نافازی‌ساز میانگین مراکز، سیگنال کنترلی یا به عبارتی میدانی که باید برای میراسازی ارتعاشات به سیستم اعمال شود به‌صورت رابطه (۳۱) به‌دست می‌آید.

$$B = \frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 \bar{y}_{ij} \mu_i(q) \mu_j(\dot{q})}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 \mu_i(q) \mu_j(\dot{q})} \quad (31)$$

که \bar{y} نشان‌دهنده‌ی مرکز تابع عضویت مجموعه‌ی فازی خروجی قانون مربوطه است. بخش بعد به شبیه‌سازی عددی سیستم مدل‌سازی شده با استفاده از روابط به‌دست‌آمده در بخش ۲ و کنترلر فازی طراحی شده در این بخش اختصاص دارد.

۴- نتایج و شبیه‌سازی عددی

در این قسمت به شبیه‌سازی عددی سیستم مدل‌سازی شده در این مقاله پرداخته می‌شود. بدین منظور تیر ساندویچی با مشخصات داده شده در جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

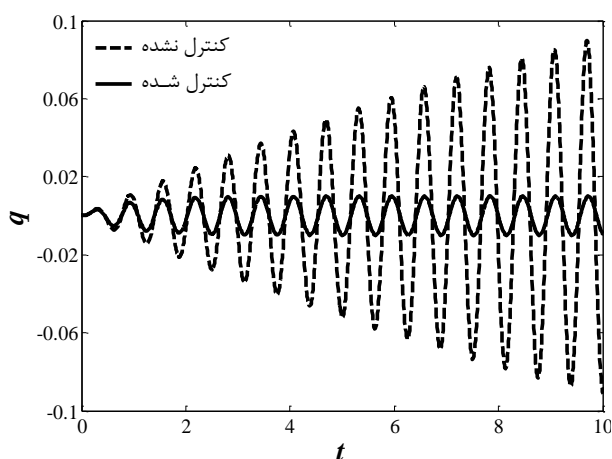
جدول ۳ مشخصات فیزیکی و هندسی تیر هوشمند ساندویچی

پارامتر	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته لایه‌های الاستیک	GPa	۷۰
چگالی لایه‌های الاستیک	kg/m ³	۲۷۱۰
ضخامت لایه‌های الاستیک	mm	۰.۵۳
ضخامت لایه میانی	mm	۲
عرض تیر	mm	۲۵.۴
طول تیر	mm	۲۵۴

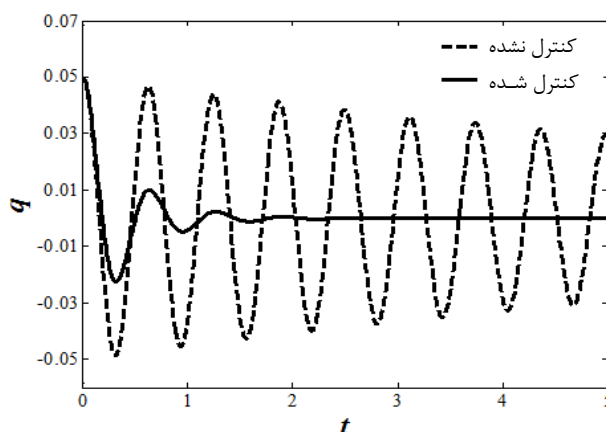
شکل ۶ پاسخ گذرای بدون بعد حلقه‌بسته و حلقه‌باز سیستم به شرایط اولیه‌ی مشخص شده نشان می‌دهد. از مقایسه‌ی پاسخ سیستم در دو وضعیت استفاده از کنترلر و بدون استفاده از آن می‌توان دریافت که لایه‌ی هوشمند مغناطیسی به خوبی می‌تواند در کاهش و سرکوب ارتعاشات تیر ساندویچی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، تغییرات خروجی کنترلر در این شرایط در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مورد انتظار است، پس از مدت کوتاهی که دامنه‌ی ارتعاشات سیستم به سمت نقطه‌ی تعادل نزدیک می‌شود، تلاش کنترلی لازم نیز کاهش یافته و خروجی کنترلر به مقدار ثابتی می‌رسد.

در شکل ۸ پاسخ کنترل‌نشده و کنترل‌شده‌ی سیستم در شرایط تشدید نشان داده شده است. بدین‌صورت که باری نوسانی با فرکانسی برابر با فرکانس طبیعی اول سیستم به وسط تیر اعمال شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، کنترلر فازی طراحی شده با استفاده از قابلیت تغییر میرایی لایه‌ی ام-آر به طور موثری منجر به کاهش دامنه‌ی ارتعاشات سیستم و کاهش آسیب احتمالی وارد بر سیستم شده است. هم‌چنین شکل ۹، تغییرات میدان مغناطیسی اعمالی برای رسیدن به میرایی مطلوب را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که نیروی اعمالی به‌طور پیوسته اعمال شده و موجب انتقال انرژی به سیستم می‌شود، نوسانات سیستم به‌طور کامل میرا نمی‌گردد و خروجی کنترلر بین این دو مقدار مشخص نوسان می‌کند.

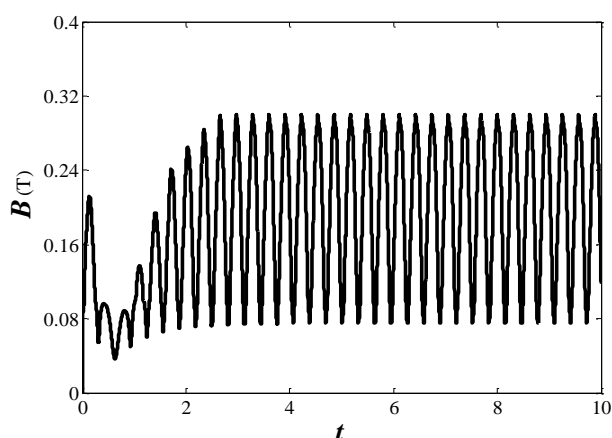
به منظور بررسی قابلیت کنترلر فازی طراحی شده در کاهش ارتعاشات سیستم در برابر بارهای ناگهانی، پاسخ سیستم در دو حالت کنترل‌نشده و در حضور کنترلر به تحریک شوک بررسی شده و نتایج آن در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. از بررسی این شکل می‌توان دریافت که در صورت استفاده از کنترلر فازی و اعمال میدان مغناطیسی بر تیر هوشمند، ورودی شوک تاثیر کمی بر سیستم دارد، در حالی که پاسخ سیستم بدون استفاده از کنترلر دچار تغییر ناگهانی شده و می‌تواند به اجزا سیستم صدمه بزند. شکل ۱۱ تغییرات شدت میدان مغناطیسی را در این شرایط نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ورودی شوک به صورت یک نیم‌موج سینوسی با دامنه‌ی ۱ که در زمان بدون بعد $t = 5$ به وسط تیر اعمال می‌شود، مدل‌سازی شده است.



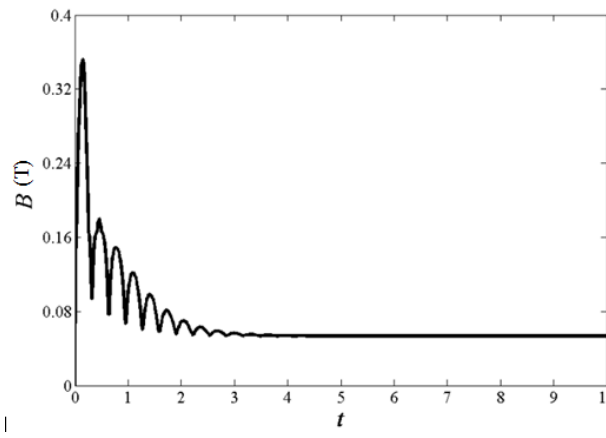
شکل ۸ پاسخ بدون بعد سیستم در حالت تشدید



شکل ۶ پاسخ گذرای بدون بعد سیستم به شرایط اولیه



شکل ۹ تغییرات میدان مغناطیسی اعمالی (تلاش کنترلی) در حالت تشدید



شکل ۷ تغییرات میدان مغناطیسی اعمالی (تلاش کنترلی) در پاسخ به شرایط اولیه

ام-آر در کاهش ارتعاشات و افزایش پایداری تیر ساندویچی استفاده کند. روش ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند به طور موثری در افزایش پایداری سازه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

۶- پیوست الف

این بخش به بررسی ارتعاشات آزاد تیر ساندویچی با شرایط مرزی دلخواه اختصاص داده شده است. معادله مشخصه‌ی (۲۲)، یک معادله از درجه‌ی ۶ است که باتوجه به وجود توان‌های زوج λ ، با تغییر متغیر $\delta = \lambda^2$ تبدیل به یک معادله از درجه ۳ می‌شود.

$$\delta^3 + G_0(I-1)\delta^2 - \omega_n^2\delta - G_0I\omega_n^2 = 0 \quad (۱-پ)$$

در این صورت، پاسخ کلی سیستم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\begin{cases} w(x,t) = e^{i\omega_n t} \sum_{i=1}^6 c_i e^{\lambda_i x} \\ u(x,t) = e^{i\omega_n t} \sum_{i=1}^6 R_i c_i e^{\lambda_i x} \end{cases} \quad (۲-پ)$$

که λ_i ها ریشه‌های معادله‌ی مشخصه می‌باشند.

با به‌کارگیری معادله‌ی (۲-پ) در روابط معادله‌ی (۱۵)، معادلات حاکم بر شرایط مرزی تیر به صورت زیر قابل بیان است.

$$\sum_{j=1}^6 a_{ij} c_j = 0 \quad i=1, \dots, 6 \quad (۳-پ)$$

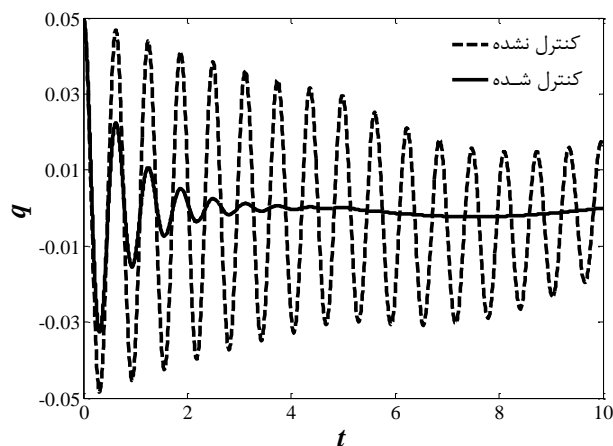
که

$$\begin{aligned} a_{1j} &= 1, \quad a_{2j} = \lambda_j, \quad a_{3j} = R_j, \quad a_{4j} = \lambda_j^2 e^{\lambda_j} \\ a_{5j} &= R_j \lambda_j e^{\lambda_j}, \quad a_{6j} = G(R_j + \lambda_j) - \lambda_j^3 \end{aligned} \quad (۴-پ)$$

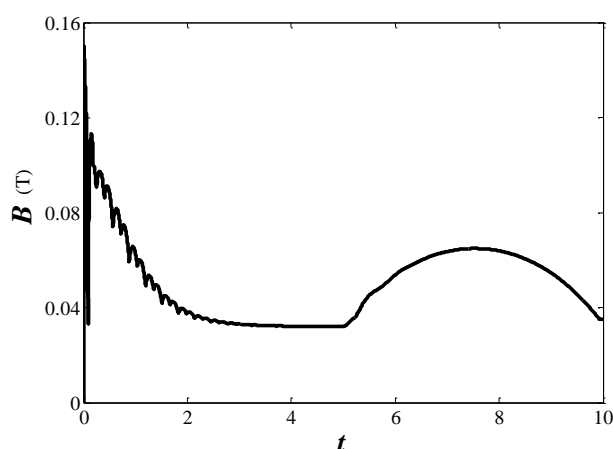
با صفر قراردادن دترمینان ماتریس ضرایب معادله‌ی (۳-پ)، فرکانس‌های طبیعی تیر به‌دست می‌آید. همچنین به‌ازای هر فرکانس طبیعی، شکل مود مربوطه نیز با به‌دست آمدن c_i ها و جایگذاری در رابطه‌ی (۲-پ) قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که فرکانس‌های طبیعی و شکل‌مودهای تیر ساندویچی را می‌توان به روش سعی و خطا نیز به‌دست آورد، بدین صورت که با حدس فرکانس طبیعی، مقادیر λ_i ها از معادله مشخصه‌ی (۲۲) به‌دست می‌آیند. در صورتی که ازای مقادیر به‌دست‌آمده λ_i ، دترمینان ماتریس ضرایب معادله‌ی (۳-پ) صفر شود، فرکانس موردنظر یکی از فرکانس‌های طبیعی سیستم خواهد بود.

۷- مراجع

- [1] Carlson, J. D., "Portable controllable fluid rehabilitation devices," Google Patents, 1998.
- [2] Carlson, J. D. Catanzarite, D. and Clair, K. St., "Commercial magnetorheological fluid devices," International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, No. 23-24, pp. 2857-2865, 1996.
- [3] Carlson, J. D., Chrzan, M. J. and James, F. O., "Magneto-rheological fluid devices," Google Patents, 1995.
- [4] Ginder, J. Clark, S. Schlotter, W. and Nichols, M., "Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers," International Journal of Modern Physics B, Vol. 16, pp. 2412-2418, 2002.
- [5] Han, Y. Hong, W. and Faidley, L. E., "Field-stiffening effect of magnetorheological elastomers," International Journal of Solids and Structures, Vol. 50, pp. 2281-2288, 2013.
- [6] Danas, K. Kankanala, S. and Triantafyllidis, N., "Experiments and modeling of iron-particle-filled magnetorheological elastomers," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 60, pp. 120-138, 2012.
- [7] Eshaghi, M. Sedaghati, R. and Rakheja, S., "Dynamic characteristics and control of magnetorheological/electrorheological sandwich structures:



شکل ۱۰ پاسخ بدون بعد سیستم به تحریک شوک



شکل ۱۱ تغییرات میدان مغناطیسی اعمالی در پاسخ به تحریک شوک

۵- نتیجه‌گیری

اهمیت میراسازی ارتعاشات ناخواسته در سازه‌های مختلف مهندسی برکسی پوشیده نیست. در این مقاله به بررسی تاثیر استفاده از لایه‌ی هوشمند مغناطیسی در کاهش و سرکوب ارتعاشات ناخواسته در تیرهای هوشمند پرداخته شد. سختی و میرایی لایه‌ی ام-آر تحت تاثیر میدان مغناطیسی دستخوش تغییر می‌شود که با کنترل شدت میدان قابل کنترل است. توانایی استفاده صحیح و بهینه از این خاصیت در سرکوب ارتعاشات، بستگی به روش کنترلی مورد استفاده دارد. در کار حاضر از یک کنترلر فازی برای تغییر میدان مغناطیسی استفاده شده است. تیری سه‌لایه متشکل از لایه‌ی هوشمند ام-آر که به صورت ساندویچی بین دو لایه‌ی الاستیک قرار دارد، در نظر گرفته شد. ابتدا معادلات ریاضی حاکم بر حرکت تیر ساندویچی با استفاده از روابط سازگاری و هندسی حاکم و به کمک اصل همپلتون به‌دست آمد. سپس فرکانس‌های طبیعی و شکل‌مودهای مربوطه با در نظر گرفتن اثر میدان مغناطیسی به‌دست آمده و با نتایج سایر محققین مقایسه و صحت‌گذاری شد. با استفاده از روش گلرکین، معادلات دیفرانسیل زمانی حاکم بر حرکت تیر پایهریزی گردید. در ادامه، به توسعه‌ی یک کنترلر فازی به منظور کنترل ارتعاشات وارد بر تیر طراحی پرداخته شد. با به‌کارگیری کنترلر طراحی‌شده و بهره‌گیری از خواص مواد ام-آر، شبیه‌سازی عددی ارتعاشات آزاد و اجباری تیر ساندویچی هوشمند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کنترلر فازی طراحی‌شده به‌خوبی توانسته است از خواص متغیر الاستومر

- A state-of-the-art review," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp. 1045389X15620041, 2015.
- [8] DiTaranto, R., "Theory of vibratory bending for elastic and viscoelastic layered finite-length beams," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 32, No. 4, pp. 881-886, 1965.
- [9] Mead, D. and Markus, S., "The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions," *Journal of sound and vibration*, Vol. 10, No. 2, pp. 163-175, 1969.
- [10] Yalcintas, M. and Dai, H., "Magnetorheological and electrorheological materials in adaptive structures and their performance comparison," *Smart Materials and Structures*, Vol. 8, No. 5, pp. 560, 1999.
- [11] Sun, Q. Zhou, J.-X. and Zhang, L., "An adaptive beam model and dynamic characteristics of magnetorheological materials," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 261, No. 3, pp. 465-481, 2003.
- [12] Rajamohan, V. Sedaghati, R. and Rakheja, S., "Vibration analysis of a multi-layer beam containing magnetorheological fluid," *Smart Material Structures*, Vol. 19, p. 5013, 2010.
- [13] Rajamohan, V. Rakheja, S. and Sedaghati, R., "Vibration analysis of a partially treated multi-layer beam with magnetorheological fluid," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp. 3451-3469, 2010.
- [14] Rajamohan, V. and Ramamoorthy, M., "Dynamic characterization of non-homogeneous magnetorheological fluids based multi-layer beam," in *Applied Mechanics and Materials*, 2012, pp. 105-112.
- [15] Asgari, M. Payganeh, Gh. Malekzade Fard, K. and Rashed Saghavaz, F., "A parametric study of the free vibration analysis of composite sandwich plate with magneto-rheological smart core," (In Persian), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 396-404, 2015.
- [16] Malekzade Fard, K. Payganeh, Gh. Rashed and Saghavaz, F., "Free vibration and Low velocity impact Analysis of sandwich plates with Smart Flexible cores," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 191-200, 2015 (In Persian).
- [17] Nayak, B. Dwivedy, S. and Murthy, K., "Multi-frequency excitation of magnetorheological elastomer-based sandwich beam with conductive skins," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 47, pp. 448-460, 2012.
- [18] Nayak, B. Dwivedy, S. and Murthy, K., "Dynamic stability of a rotating sandwich beam with magnetorheological elastomer core," *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 47, pp. 143-155, 2014.
- [19] Rahn, C. D. and Joshi, S., "Modeling and control of an electrorheological sandwich beam," *Journal of vibration and acoustics*, Vol. 120, No. 1, pp. 221-227, 1998.
- [20] Wang K., Kim Y. and Shea D., "Structural vibration control via electrorheological-fluid-based actuators with adaptive viscous and frictional damping," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 177, No. 2, pp. 227-237, 1994.
- [21] Chrzan, M. J. and Carlson, J. D., "MR fluid sponge devices and their use in vibration control of washing machines," in *Proceeding of*, pp.370-378, 2001.
- [22] Hu, G. Guo, M. Li, W. Du, H. and Alici, G., "Experimental investigation of the vibration characteristics of a magnetorheological elastomer sandwich beam under non-homogeneous small magnetic fields," *Smart materials and structures*, Vol. 20, p. 127001, 2011.
- [23] Sun, Q. Zhou, J.-X. and Zhang, L., "An adaptive beam model and dynamic characteristics of magnetorheological materials," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 261, pp. 465-481, 2003.
- [24] Ni, Y. Ying, Z. and Chen, Z., "Micro-vibration suppression of equipment supported on a floor incorporating magneto-rheological elastomer core," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, pp. 4369-4383, 2011.
- [25] Dyniewicz, B. Bajkowski, J. M. and Bajer, C. I., "Semi-active control of a sandwich beam partially filled with magnetorheological elastomer," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 60, pp. 695-705, 2015.
- [26] S. S. Rao, "Vibration of continuous system", John Wiley & Sons, pp. 320-356, 2007.
- [27] Li, W. Du, H. Chen, G. Yeo, S. and Guo, N., "Nonlinear rheological behavior of magnetorheological fluids: step-strain experiments," *Smart materials and structures*, Vol. 11, No. 2, pp. 209, 2002.
- [28] Christensen, R., "Theory of viscoelasticity: an introduction", Elsevier, pp. 141-152, 2012.
- [29] Nayfeh, A. H. and Mook, D. T. "Nonlinear oscillations": John Wiley & Sons, 2008.
- [30] Nayak, B. Dwivedy, S. and Murthy, K., "Dynamic analysis of magnetorheological elastomer-based sandwich beam with conductive skins under various boundary conditions," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, pp. 1837-1859, 2011.
- [31] Ray, K. and Kar, R., "Parametric instability of a sandwich beam under various boundary conditions," *Computers & structures*, Vol. 55, pp. 857-870, 1995.
- [32] Yager, R. R. and Zadeh, L. A., "An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems," Springer Science & Business Media, Vol. 165: 2012.
- [33] Wang, L.-X., *A course in fuzzy systems*: Prentice-Hall press, USA, 1999.

