

مدل سازی اجزا محدود یک برداشت کننده انرژی نوآورانه با استفاده از آلیاژ حافظه دار مغناطیسی بر پایه تیر موج دار و بررسی پارامترهای موثر بر آن

امید صفری، محمد رضا ذاکرزاده، مصطفی باغانی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۷

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۹

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۸/۱۸

کلمات کلیدی:

آلیاژ حافظه دار مغناطیسی

بازیابی انرژی

تیر موج دار

ارتعاشات

اجزا محدود

خلاصه: در سال های اخیر کاربرد منابع انرژی سیار و در نتیجه سیستم های استحصال انرژی جهت استفاده از منابع انرژی محیط، افزایش پیدا کرده است. در این تحقیق، یک چیدمان نوآورانه برای یک سیستم بازیابی انرژی با استفاده از آلیاژ حافظه دار مغناطیسی ($Ni_{90}Mn_{28}Ga_{21.5}$) تحت بستر یک تیر موج دار یک سر درگیر و تاثیر پارامترهای محیطی بر ولتاژ بدست آمده، به روش اجزاء محدود بررسی شده است. دلیل استفاده از ساختار موج دار، افزایش مقاومت در ضخامت های کم و همچنین افزایش میدان کرنش موثر در المان آلیاژ حافظه دار است که باعث کاهش طول مجموعه و حجم اشغالی آن می شود. مبنای بازیابی انرژی از سیستم مذکور تبدیل انرژی ارتعاشی تیر به انرژی الکتریکی می باشد. یک سیم پیچ مسی حول المان های آلیاژ حافظه دار پیچیده شده و این مجموعه در یک میدان مغناطیسی ثابت قرار دارد. اگر یک میدان تنش یا کرنش به المان های آلیاژ حافظه دار وارد شود، جهت گیری اجزای موسوم به واریانت تغییر کرده و این امر باعث آشفته سازی میدان مغناطیسی اطراف المان آلیاژ حافظه دار می شود که بر اساس قانون فارادی، یک جریان الکتریکی در سیم پیچ القا می کند. این مسئله به وسیله شبیه سازی اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس و استفاده از کد ساختاری ماده به جهت مدل سازی رفتار آلیاژ حافظه دار بررسی شده است. جهت مدل سازی رفتار آلیاژ حافظه دار از مدل غیرخطی گسترش یافته کيفر و لاگوداس استفاده شده است. در این تحقیق، تاثیر شرایط اولیه آلیاژ حافظه دار و میدان مغناطیسی خارجی بر ولتاژ خروجی بررسی شده است.

۱- مقدمه

توسط اولاکو و همکاران [۳] انجام پذیرفت. آلیاژ حافظه دار مغناطیسی مزایای متعددی نسبت به سایر مواد همچون پیزو الکتریک ها دارد؛ از جمله این مزایا می توان به عمر خستگی بالا (10^9 سیکل) و بازده عالی در تحریکات با دامنه بالا و فرکانس کم اشاره کرد [۴]. سیستم بازیابی انرژی با استفاده از آلیاژ حافظه دار مغناطیسی برای ارتعاشات با فرکانس کم (100 هرتز و کمتر) مناسب است که این ویژگی باعث تمایز آن نسبت به سایر سیستم های بازیابی سنتی می شود [۵]. سیستم های بازیابی انرژی به دو دسته کلی تحریک نیرویی و تحریک سرعت تقسیم می شوند [۶]. در تحریک نیرویی، نیروی مستقیمی به انتهای تیر وارد می شود. سیستم بازیابی انرژی با استفاده از آلیاژ حافظه دار مغناطیسی و تحریک نیرویی توسط کارمن و همکاران [۷] بررسی شده است. آن ها از تغییر جهت گیری واریانت ها

امروزه سازه های موج دار نقش کلیدی در صنایع مختلف همچون هوایی، دریایی و خودروسازی بازی می کنند. برای نمونه در هواپیماهای مدرن اکثر قسمت های بال و دم از سازه های موج دار تشکیل شده است. انرژی ارتعاشی یکی از انواع رایج انرژی موجود در طبیعت است. این انرژی منبعی مناسب برای بازیابی و تبدیل به انرژی الکتریکی با توان کم برای استفاده در سیستم های سیار در مقیاس میکرووات و میلی وات است [۲-۱]. آلیاژ حافظه دار مغناطیسی می تواند گزینه مناسبی برای این کاربرد باشد. میدان القا شده حاصل از میدان کرنش در آلیاژ حافظه دار مغناطیسی به صورت گسترده از سال ۱۹۹۶ بررسی شده است. یکی از تحقیقات اولیه در این زمینه *نویسنده عهده دار مکاتبات: baghani@ut.ac.ir



یک سیستم بازیابی انرژی با استفاده از کامپوزیت فلزی پلیمر یون^۲ را بررسی کردند. در این تحقیق، یک سازه با تعدادی سیم پیچ که به دور آن پیچیده شده است در یک محلول غوطه‌ور است. بر اساس این بررسی، آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی یک جایگزین مناسب در سیستم‌های بازیابی انرژی است.

یک طرح نوآورانه در به‌کارگیری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی توسط فرسنگی و همکاران [۱۷] اجرا شده است. در این تحقیق، کاربرد آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در بازیابی انرژی ارتعاشی در بستر یک تیر ساده یک‌سر درگیر و همچنین رابطه بین میدان کرنش و مغناطیس‌سازی^۳ مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر عوامل مختلفی همچون پیش کرنش، تعداد المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و میدان ثابت اعمال شده به مجموعه نشان داده شده است. فرسنگی و همکاران [۱۸] همچنین نتایج تست تجربی حاصل از اتصال یک المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به یک تیر یک‌سر گیردار و بازیابی انرژی حاصل از ارتعاشات تیر را گزارش کرده‌اند. در تحقیقی دیگر، دای و همکاران [۱۹] تاثیر روابط غیرخطی و وابستگی معادلات تحت اثر ضربه به یک تیر ساده را بررسی کرده‌اند.

در روش تحریک سرعت، آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به یک سازه متصل شده است که در اثر اینرسی وزنه متصل به انتهای سازه و حرکت تکیه‌گاه، سازه مرتعش شده و انرژی الکتریکی تولید می‌کند. در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای بر روی مواد پیزوالکتریک و مگنتو استریکتیو^۴ صورت گرفته است [۲۰-۲۱]. رفتار یک تیر یک‌سر درگیر با تعدادی المان موازی پیزوالکتریک تحت تحریک سرعت توسط اتروک و اینمن [۲۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیقی دیگر، سوزا و مارکویی [۲۲] درجات آزادی یک بال هواپیما را به کمک ترکیب فنی‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، محدود کرده و تاثیر ارتعاشات بال بر انرژی الکتریکی تولید شده را بررسی کرده‌اند. همچنین به‌کارگیری مواد مگنتو استریکتیو جهت بازیابی انرژی الکتریکی از ارتعاشات یک‌سر گیردار توسط محمدی و اسفندیاری [۲۱] بررسی شده است. همچنین با در نظر گرفتن مدل ساختاری غیرخطی برای آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی توسط بروویس [۲۳]، نتایج تحریک سرعت در یک تیر یک‌سر گیردار ساده بررسی شده است.

در آلیاژ $Ni_{51.1}Mn_{24}Ga_{24.9}$ تحت میدان مغناطیسی $1/6$ تسلا و بار غیرمحوری استفاده کردند. آن‌ها عوامل موثر در انرژی بازیابی شده را بررسی کردند. آویروویک و همکاران [۸] چیدمانی خلاقانه جهت بازیابی انرژی به کمک مواد پیزوالکتریک طراحی کردند. در این ساختار، المان آلیاژ حافظه‌دار به وسیله اشعه لیزر تحریک شده و باعث ایجاد تغییر شکل در المان پیزوالکتریک می‌شود. در واقع اشعه لیزر با تحریک آلیاژ حافظه‌دار باعث تغییر شکل آن می‌گردد. معادله ساختاری ترمودینامیک آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی با در نظر گرفتن تاثیرات قانون فارادی بر آن توسط برونو و همکاران [۹] بررسی شد. همچنین کاربرد آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در سیستمی مشابه، توسط نیسکانن و لیتینن [۱۰]، مورد مطالعه قرار گرفت. این بررسی با استفاده از روش اجزای محدود انجام شده است. آن‌ها گزارش داده‌اند که ولتاژ خروجی تابعی از میدان مغناطیسی ثابت اطراف مجموعه، خواص مواد و مشخصات سیم پیچ است. گولتیگ و همکاران [۱۱] با استفاده از خاصیت ویژه آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در خصوص تغییر مغناطیس‌سازی تحت تغییر میدان دما، چیدمانی جدید جهت استحصال انرژی الکتریکی از تغییرات دمای محیط پیشنهاد دادند. در این تحقیق، تغییر میدان دما به صورت مصنوعی با دور و نزدیک کردن المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به منبع گرما با فرکانس 200 هرتز شبیه‌سازی شده است. این چیدمان توانایی تولید چگالی انرژی 5 mW/cm^3 تحت میدان تغییر دمای 10 درجه کلون را دارد. همچنین گوسارو و همکاران [۱۲] سیستم بازیابی انرژی حرارتی جدیدی به صورت ترکیبی از مواد پیزوالکتریک و آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی پیشنهاد دادند. آن‌ها به منظور انعطاف‌پذیری بیشتر از پلیمر پی.وی.دی.اف^۱ و به منظور حساسیت میدان کرنش به میدان دما از آلیاژ حافظه‌دار در ساختار این سیستم استفاده کردند. این مجموعه با حجم $27/5 \text{ mm}^3$ توانایی تولید چگالی انرژی $0/41 \text{ mJ/cm}^3$ تحت میدان تغییر دمای 20 درجه سانتی‌گراد را دارد. والداری و همکاران [۱۳] مدل کیفی و لاگوداس [۱۴] را جهت کاربرد در شرایط میدان مغناطیسی ثابت و میدان تنشی ثابت اصلاح کردند.

صیادی و فرسنگی [۱۵] نشان دادند مدل قبلی تخمین غیردقیقی از ولتاژ خروجی داشته است. آن‌ها وابستگی ولتاژ خروجی به ارتعاشات را با استفاده از مدل ساختاری بررسی کردند. اورلی و همکاران [۱۶]

2 IPMCs
3 Magnetization
4 Magnetostrictive

1 PVDF

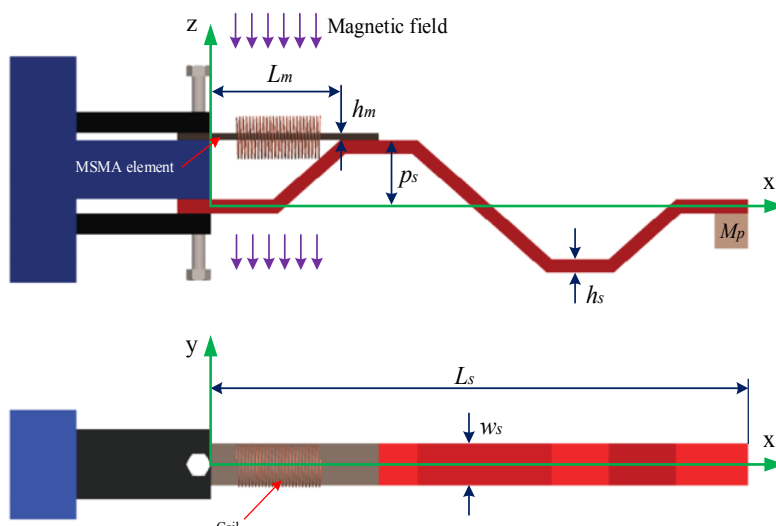


Fig.1 . General arrangement of the proposed energy harvester system\

شکل ۱: چیدمان کلی سیستم بازیابی انرژی بررسی شده

بودن، این هندسه فضای کمتری اشغال می‌کند؛ لذا امکان دست‌یابی به میدان کرنش برابر با چیدمان تیر ساده در ضخامت‌های کمتر و طول اشغالی کمتر فراهم می‌شود. همچنین میانگین مربعات ریشه‌ای ولتاژ خروجی در مقایسه با چیدمان تیر ساده افزایش یافته است. این به آن معناست که فاکتور انرژی بر واحد حجم افزایش یافته است.

۲- الگوسازی نظری

۲-۱- تعریف مسئله

به منظور بازیابی انرژی الکتریکی از ارتعاشات تیر موج‌دار، المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به قسمت بالایی تیر متصل شده است. تیر موج‌دار و المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در قسمت انتهایی به تکیه‌گاه به صورت یک‌سر گیردار متصل شده‌اند. همچنین آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در فاصله تکیه‌گاه تا اولین قله تیر نصب شده است. دلیل این چیدمان، استفاده از حداکثر کرنش موجود در تیر برای المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است. یکی از مزایای استفاده از تیر موج‌دار در مقایسه با تیر ساده، عدم نیاز به در نظر گرفتن پله برای دستیابی به کرنش مورد نظر است (همانند چیدمان مرجع [۱۷]). این چیدمان در شکل ۱ نشان داده شده است. به دلیل ویژگی ساختاری آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، اعمال کرنش مثبت (کششی) باعث

به منظور بهینه‌سازی مشخصات سیستم و خروجی ولتاژ، روش جدیدی توسط کای و هارن [۲۴] به کار گرفته شد. همچنین نتایج شبیه‌سازی با استفاده از تست تجربی صحت‌گذاری شد. آن‌ها از قانون آمپدانس جهت بهینه‌سازی سیستم و بازیابی انرژی ارتعاشات غیرخطی با استفاده از پل یک‌سو ساز کمک گرفتند. مکانیزم جدید و متفاوتی جهت بازیابی انرژی ارتعاشات و تبدیل به انرژی الکتریکی توسط راندی راندی و همکاران [۲۵] طراحی شد. آن‌ها یک سیستم بهینه و کارا جهت بازیابی انرژی به کمک پیزوالکتریک طراحی کردند. توان $70 \text{ mW} / \text{cm}^3$ از این سیستم گزارش شده است.

اگرچه کارهای زیادی در زمینه سیستم‌های بازیابی انرژی و کاربردهای آن انجام شده است، هنوز تحقیقی بر روی بهینه‌سازی پارامترهای مجموعه و فاکتور انرژی تولید شده بر واحد حجم انجام نشده است. در این تحقیق تاثیر شرایط میدان، تعداد المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و پیش کرنش را بر انرژی خروجی نشان خواهیم داد. شبیه‌سازی این تحقیق بر اساس مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و کد مدل ساختاری یومت به منظور بررسی رفتار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی اجرا شده است. در این تحقیق سائز مجموعه به کمک استفاده از سازه موج‌دار کاهش چشم‌گیری داشته است. در این تحقیق، هندسه موج‌دار به دلیل مقاومت بالاتر در ضخامت یکسان نسبت به هندسه ساده انتخاب شده است. همچنین به دلیل موج‌دار

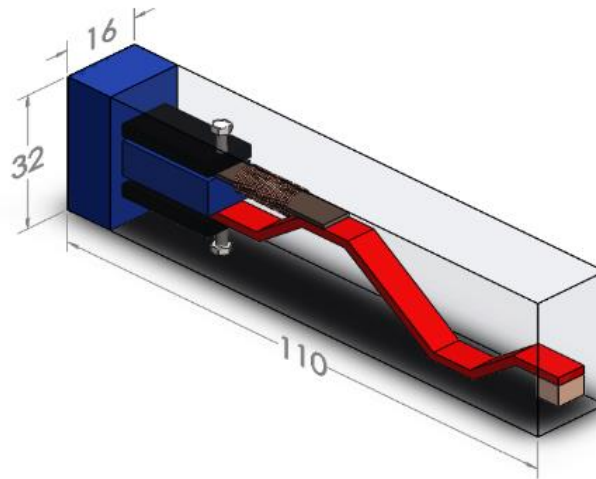


Fig.2 . Approximate dimensions of the system

شکل ۲: ابعاد حدودی مجموعه

۲-۲- مدل ریاضی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی

ویژگی منحصر به فرد آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، تغییر جهت واریانتهای مارتنزیتی است. ساختار کریستالی این مواد در فرآیند خنک‌سازی از حالت آستنیت به مارتنزیت تشکیل می‌شود [۲۶].

خواص ساختاری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در زیر دمای آستنیت نمود پیدا می‌کند. این بدان معناست که المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به صورت کامل در حالت مارتنزیت قرار دارد. ساختار این مواد شامل سلول‌های چهار وجهی است که وقتی در جهت‌های مختلف جهت‌گیری می‌کنند، به شکل یکی از سه مدل واریانت مختلف تبدیل می‌شوند [۲۶]. چیدمان واریانتهای در شکل ۳ نشان داده شده است. در نتیجه اعمال میدان تنش فشاری، مارتنزیت‌ها به صورت واریانت ۱ جهت‌گیری کرده و در صورت باربرداری به صورت واریانت ۲ با محور هم‌جهت با میدان مغناطیسی خارجی در می‌آیند. این محور با عنوان محور آسان^۱ معرفی می‌شود.

مطابق شکل ۳ و با توجه به نوع بارگذاری، تنها واریانتهای ۱ و ۲ تحریک می‌شوند. لذا از معرفی و بررسی واریانتهای ۳ صرف‌نظر شده است. در نتیجه کسر حجمی واریانتهای به صورت ξ_1 و ξ_2 برای جهت‌های ۱ و ۲ قابل تعریف است.

آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی ۲ نوع کرنش قابل بازیابی دارند: کرنش ترموالاستیک^۲ و کرنش شبه‌الاستیک^۳ که از تغییر در

ایجاد خرابی در آن‌ها می‌شود. لذا این مشکل با اعمال یک کرنش منفی ۳ درصد (فشاری) پیش از نصب المان در محل خود و سپس باربرداری در میدان مغناطیسی خنثی برطرف شده است. با این کار یک کرنش منفی ۳ درصد در حالت بی‌باری در قطعه باقی می‌ماند و از مثبت شدن میدان کرنش درون المان جلوگیری می‌کند. در نتیجه میدان کرنش منفی (فشاری) در محدوده ۰ تا ۶ درصد متغیر خواهد بود. تمام معادلات معرفی شده در این تحقیق بر اساس دستگاه مختصات محلی نشان داده شده در شکل ۱ می‌باشد. در این چیدمان تعداد ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در بالای تیر در نظر گرفته شده است.

مقادیر h, W, L به ترتیب معرف طول، عرض و ضخامت تیر است. N_{MSMA} و N_{Coil} به ترتیب نشانگر تعداد دور سیم‌پیچ و تعداد المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی هستند. همچنین نمایه‌های m و s به ترتیب معرف پارامتر مربوط به آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و تیر موج‌دار است. به منظور کاهش فرکانس طبیعی مجموعه از یک وزنه به جرم M_p و ممان اینرسی I_p حول تکیه‌گاه در انتهای تیر استفاده شده است. ارتعاشات تیر یک میدان کرنش نوسانی در آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی ایجاد می‌کند. در نتیجه ولتاژ متناوب به دلیل تغییر میدان اطراف سیم‌پیچ و تغییر در شار عبوری از سیم‌پیچ، القا می‌شود. همچنین ابعاد حدودی مجموعه (به میلی‌متر) جهت درک حجم اشغالی در شکل ۲ نشان داده شده است.

1 Easy Axis
2 Thermoelastic
3 Pseudoelastic

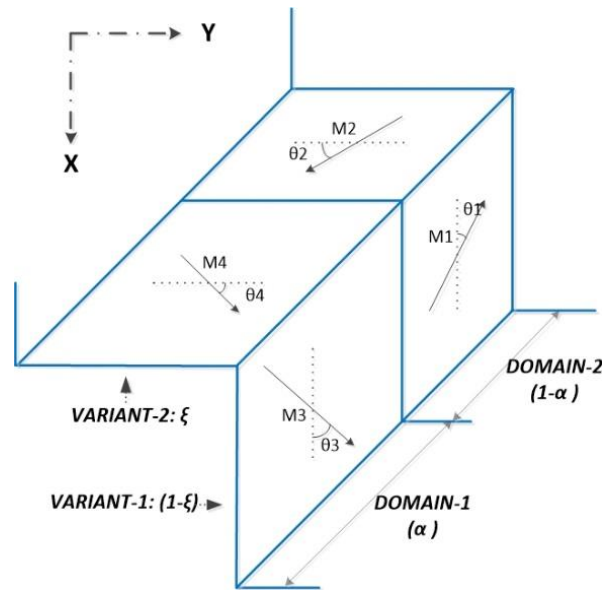


Fig.3 . Variants 1, 2 and magnetic domain distribution with internal magnetization vectors

شکل ۳: واریانت ۱، ۲ و توزیع میدان مغناطیسی با بردارهای مغناطیسی داخلی [۳۱]

در رابطه (۴)، M^{sat} نشانگر پارامتر اشباع مغناطیسی^۱ می‌باشد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در هر یک از چهار معادله بالا، مغناطیس‌سازی M^{sat} در جهت θ_i به کمک چرخش بردار مغناطیس‌سازی حول جهت میدان مغناطیسی مربوطه معرفی شده است. به جهت بررسی میدان مغناطیسی موثر درون المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، معادله (۵) به کار گرفته می‌شود. میدان مغناطیسی موثر در جهت x و z به صورت زیر است:

$$\begin{pmatrix} H_x^{eff} \\ H_z^{eff} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_x^{app} \\ H_z^{app} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} D_{xx} & 0 \\ 0 & D_{zz} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

در معادله (۵)، H_i^{eff} معرف میدان مغناطیسی موثر داخلی و H_i^{app} معرف میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده به مجموعه است که در این بررسی به صورت ثابت فرض شده است. همچنین نمایانگر D_{ii} ضریب تخلیه مغناطیسی^۲ است. در مدل‌سازی کیفی و لاگوداس [۲۷]، ضریب تخلیه مغناطیسی به صورت دویبعدی بررسی شده است. به منظور معرفی ترم‌های موجود در معادله (۵)، معادلات (۶) به صورت همزمان حل می‌شوند. لازم است نامعادله کلایزیوس-دوهم^۳ برای مشخص کردن مقادیر θ_3 و θ_4 برقرار باشد. هر یک از ترم‌های نامعادله کلایزیوس-دوهم توسط کلمن و نل [۲۸] بدست آمده است:

جهت‌گیری مارتنزیت‌ها به وجود می‌آید. میدان کلی کرنش به صورت زیر قابل معرفی است [۱۳]:

$$\varepsilon = \varepsilon^r + \varepsilon^{te} \quad (1)$$

$$\varepsilon^r = -(1 - \varepsilon) \varepsilon^{(r, \max)} \quad (2)$$

در معادله بالا ε معرف کرنش کلی، ε^r معرف کرنش تغییر جهت، ε^{te} معرف کرنش ترموالاستیک و $\varepsilon^{(r, \max)}$ معرف بیشترین مقدار کرنش مجاز حاصل از تغییر جهت می‌باشد. رابطه تنش و کرنش در این مواد به صورت زیر است:

$$\sigma = E_m (\varepsilon - \varepsilon^r) \quad (3)$$

در رابطه (۳) E_m معرف مدول یانگ آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است. مطابق شکل ۳، ممکن است هر دو واریانت به صورت همزمان وجود داشته باشند. لذا کسر حجمی میدان مغناطیسی به صورت α معرفی شده است.

در یک میدان مغناطیسی تکی، مقدار α برابر ۱ می‌باشد. مطابق شکل ۳ بردار مغناطیس‌سازی ممکن است حول محور آسان بچرخد. لذا چهار حالت مختلف مغناطیس‌سازی به صورت زیر خواهد بود [۱۳]:

$$\begin{aligned} M_1 &= -M^{sat} [\cos(\theta_1) \varepsilon_x + \sin(\theta_1) \varepsilon_y] \\ M_2 &= -M^{sat} [\cos(\theta_2) \varepsilon_y - \sin(\theta_2) \varepsilon_x] \\ M_3 &= M^{sat} [\cos(\theta_3) \varepsilon_x + \sin(\theta_3) \varepsilon_y] \\ M_4 &= -M^{sat} [\cos(\theta_4) \varepsilon_y + \sin(\theta_4) \varepsilon_x] \end{aligned} \quad (4)$$

1 Saturation Magnetization
2 Demagnetizing
3 Clausius-Duhem

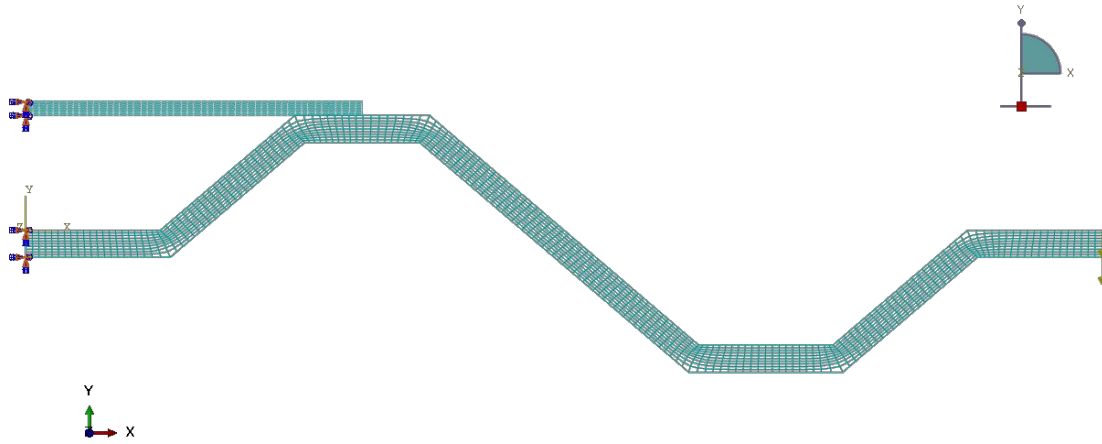


Fig.4. 2 D modeling, elements, loading, and boundary conditions in ABAQUS

شکل ۴: مدل سازی دوبعدی، المان بندی، بارگذاری و شرایط مرزی مجموعه در نرم افزار آباکوس

در معادله (۸)، ΔS معرف تفاوت سازگاری بین واریانت ها، μ_0 معرف نفوذپذیری فضای آزاد و $f^\xi(\xi)$ نمایانگر تابع سفتی می باشد [۱۳].

۳-۲- مدل سازی اجزا محدود

در این بررسی، مدل اجزا محدود مسئله به وسیله نرم افزار آباکوس تشکیل شده است. برای کدنویسی رفتار آلیاژ حافظه دار مغناطیسی از برنامه نویسی به زبان فرترن در محیط ویژوال استفاده شده است. لازم به ذکر است قبل از تحلیل باید ارتباط بین نرم افزار آباکوس و ویژوال استودیو و همچنین اینتل فرترن برقرار شود. به منظور ساده سازی و با توجه به نوع بارگذاری، مدل دوبعدی با المان های چهارگرمی 0.2×0.2 میلی متر در نظر گرفته شده است (مطابق شکل ۴). در شکل ۵ تاثیر پارامتر سایز المان ها و حساسیت خروجی سیستم به آن نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، کوچک تر کردن اندازه المان ها تاثیری در نتایج حاصله و همگرایی سیستم نخواهد داشت. از طرفی با کوچک تر شدن المان ها از 0.05 میلی متر، جهش شدیدی در نمودار مشاهده می شود که نشانگر تکینگی مسئله بوده و جواب ها همراه با خطای بسیار زیاد خواهند بود. همچنین برای شبیه سازی بار ضربه ای، یک نیروی بزرگ برابر 2×10^8 نیوتن در انتهای تیر برای مدت زمان 10^{-4} ثانیه اعمال و پس از آن حذف شده است. نصب یک جرم محک به اندازه ۸ گرم در انتهای تیر در افزایش نیروی اینرسی به آلیاژ نقش مهمی ایفا می کند. در این شبیه سازی، شرایط مرزی سازه تیر و المان آلیاژ حافظه دار

$$\begin{cases} (1-\xi)\mu_0 M^{sat} [-H_x^{eff} \sin(\theta_3) + H_y^{eff} \cos(\theta_3)] - \\ 2\rho K_1 (1-\xi) \sin(\theta_3) \cos(\theta_3) = 0 \\ -\xi\mu_0 M^{sat} [H_x^{eff} \cos(\theta_4) + H_y^{eff} \sin(\theta_4)] - \\ 2\rho K_1 \xi \sin(\theta_4) \cos(\theta_4) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

به منظور برقراری نامعادله کلازیوس-دوهم لازم است نامعادله $\pi^\xi \xi \geq 0$ در تمام شرایط برقرار باشد. این نامعادله با عنوان شرط کوهن-تاکر^۱ شناخته می شود و به صورت زیر تعریف می شود [۱۳]:

$$\Phi^\xi = \begin{cases} \pi^\xi - Y^\xi, \xi > 0 \\ -\pi^\xi - Y^\xi, \xi < 0 \end{cases} \quad (7)$$

کیفر و لاگوداس مدل خود را با استفاده از آزمایش های تجربی در میدان تنش فشاری ثابت کالیبره کردند. همچنین با استفاده از یک میدان مغناطیس-تنش، ضرایب میدان در زمان شروع و پایان تغییر جهت را مشخص کردند [۲۹]. ترم Y ثابت کالیبراسیون مدل ساختاری است و π^ξ معرف نیروی پیشران ترمودینامیک است که با مشتق جزئی گرفتن نسبت به ξ از معادله انرژی آزاد گیبس بدست می آید. این معادله به صورت زیر است [۱۳]:

$$\pi^\xi = \sigma \varepsilon^{r, \max} + \frac{1}{2} \Delta S \sigma^2 - \mu_0 M^{sat} \left[\begin{aligned} & (\cos(\theta_3) + \sin(\theta_4)) H_x^{eff} + \\ & (\sin(\theta_3) - \cos(\theta_4)) H_y^{eff} \end{aligned} \right] + \rho K_1 (\sin^2(\theta_3) - \sin^2(\theta_4)) - \frac{\partial f^\xi}{\partial \xi} \quad (8)$$

¹ Kuhn-Tucker

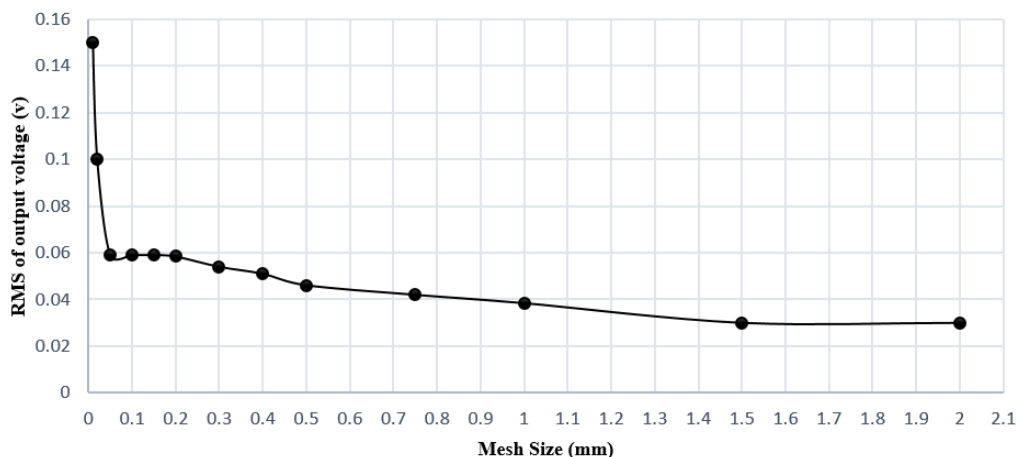


Fig.5 . Diagram of the mesh size dependency

شکل ۵: نمودار حساسیت نتایج به اندازه المان بندی

جدول ۱: مشخصات ساختاری ماده سازنده تیر موج دار

Table 1. Structural properties of corrugated beam's material

مقدار	مشخصات و ضرایب
۴۴۷۵	ρ (kg / m ³)
۱۱۲/۴	E (GPa)
۰/۳	ν

ادامه به منظور مقایسه ولتاژ خروجی و میانگین مربعات ریشه آن‌ها، کد مذکور گسترش یافته است. از طرفی این مدل جهت بررسی رفتار یک المان میله از آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی تشکیل شده و در واقع یک بعدی است و در فضای دوبعدی گسترش داده شده است. به جهت ساده‌سازی، فرض شده که رفتار آلیاژ در راستای عمود بر محور طولی یکسان بوده و از میانگین مقادیر هر یکی از گره‌ها استفاده شده است. همچنین با توجه به نوع بارگذاری سیستم، شبیه‌سازی به روش صریح^۱ انجام شده است. جهت گسسته‌سازی معادلات ساختاری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی مطابق روش اجزا محدود برای مسائل پارابولیک نوشته گلرکین^۲ عمل شده است [۲۶].

۳- نتایج عددی

در قسمت قبلی، روابط بنیادی حاکم بر مسئله بررسی شد. در این بخش نتایج عددی به منظور بررسی رفتار سیستم معرفی می‌شوند.

مغناطیسی مشابه شرایط واقعی و به صورت یک‌سر درگیر در نظر گرفته شده است. در واقع تمامی درجات آزادی گره‌ها در سمت چپ مجموعه صفر فرض شده است. همچنین اتصال آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به سازه تیر موج‌دار به صورت یکپارچه و ثابت در نظر گرفته شده که در شرایط واقعی این اتصال به کمک چسب برقرار می‌شود.

مشخصات مکانیکی ماده سازنده تیر موج‌دار مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. به جهت بررسی رفتار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، از کد یومت بر اساس مدل گسترش یافته شیرانی و کدخدایی [۲۶] استفاده شده است. این کد بر اساس معادلات بهبود یافته حاکم بر رفتار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی که توسط والداری و همکاران [۱۳] ارائه شده، نوشته شده است. معادلات مشخص شده در بخش ۲-۲ که بیانگر معادلات رفتاری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است، مبنای نوشتن این کد قرار گرفته‌اند. کد مذکور فقط رفتار تنش کرنشی ماده را مورد مطالعه قرار داده است؛ لذا به جهت محاسبه مقدار ولتاژ خروجی، تغییراتی در ساختار آن اعمال شده است. در

1 Explicit
2 Galerkin

جدول ۲: پارامترهای ماده، هندسه و کالیبراسیون میدان

Table 2. Parameters of materials, geometry and magnetic field calibration

مقدار	مشخصات و ضرایب
۲۰	L_m (mm)
۸۰	L_s (mm)
۱	h_m (mm)
۲	h_s (mm)
۸/۵	p_s (mm)
۶	W_s (mm)
۸	M_p (gr)
۲۰۰	N_{Coil} (per mm)
۳	N_{MSMA}
۵۷۲۴۹۰	M^{sat} (A.m ⁻¹)
٪ ۶/۴۱	$\epsilon^{r,max}$
۰/۶	H_{app} (T)
$4\pi \times 10^{-7}$	μ_0 (H.m ⁻¹)

انتهای تیر استفاده شده است.

شکل ۶ نشان‌دهنده جابجایی نقطه انتهایی تیر است. دامنه تغییر شکل تیر به واسطه رفتار هیستریزیسی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی کاهش می‌یابد. پس از اعمال نیروی ضربه به انتهای تیر موج‌دار، سازه شروع به ارتعاش می‌کند و در هر پریود از ارتعاش، آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی یک حلقه از نمودار هیستریزیس را طی می‌کند. کل زمان شبیه‌سازی به صورت خودکار توسط نرم‌افزار آباکوس به بازه‌های ۰/۰۰۱ تا 1×10^{-7} تقسیم شده است. با توجه به خاصیت آلیاژهای حافظه‌دار، این مواد با کاهش میدان کرنش و عبور از حد تحریک، تبدیل به یک ماده کاملاً الاستیک شده و لذا حلقه‌های هیستریزیس از نمودار تنش کرنش آن‌ها حذف شده و در نتیجه اتلاف انرژی نخواهند داشت. لذا از این نقطه به بعد اتلاف انرژی در سازه مورد بررسی به صفر رسیده و دامنه ارتعاشات تیر مقدار ثابتی می‌شود. این مورد در شکل ۶ مشخص است. چرا که در بازه ۰/۲ تا ۰/۳ ثانیه، دامنه جابجایی نقطه انتهایی تیر بدون کاهش است.

شکل ۷ نشان‌دهنده رفتار هیستریزیسی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی تحت بارگذاری ارتعاشی است. با گذشت زمان و کاهش انرژی سیستم،

مشخصات آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و ضرایب کالیبراسیون در جدول ۱ مشخص شده است. ضرایب کالیبراسیون مطابق مقادیر بدست آمده توسط فرسنگی و همکاران [۱۷] در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است با توجه به فرض تقارن و نوع بارگذاری، هر یک از المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در هر لحظه فقط تحت تنش فشاری است. همانطور که قبلاً اشاره شد، از یک سازه موج‌دار استفاده شده که ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در قسمت بالای آن متصل شده است. این چیدمان به دلیل محدودیت در طول المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است (کمتر از ۲۰ میلی‌متر). بنابراین تنها امکان اتصال المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی فقط در فاصله تکیه‌گاه تا اولین قله وجود دارد. با توجه به این نکته که لازم است آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی همیشه تحت تنش فشاری باشد، پیش کرنش ۳ درصد اعمال شده است. این المان‌ها قبل از نصب فشرده شده و به کرنش فشاری ۳ درصد می‌رسند. سپس در میدان بایاس صفر، بار فشاری حذف شده و به این ترتیب پیش کرنش ۳ درصد در آن‌ها ایجاد می‌شود. همچنین میدان مغناطیسی بایاس، ۰/۶ تسلا در نظر گرفته شده است. به منظور تحریک مجموعه از یک نیروی ضربه‌ای در

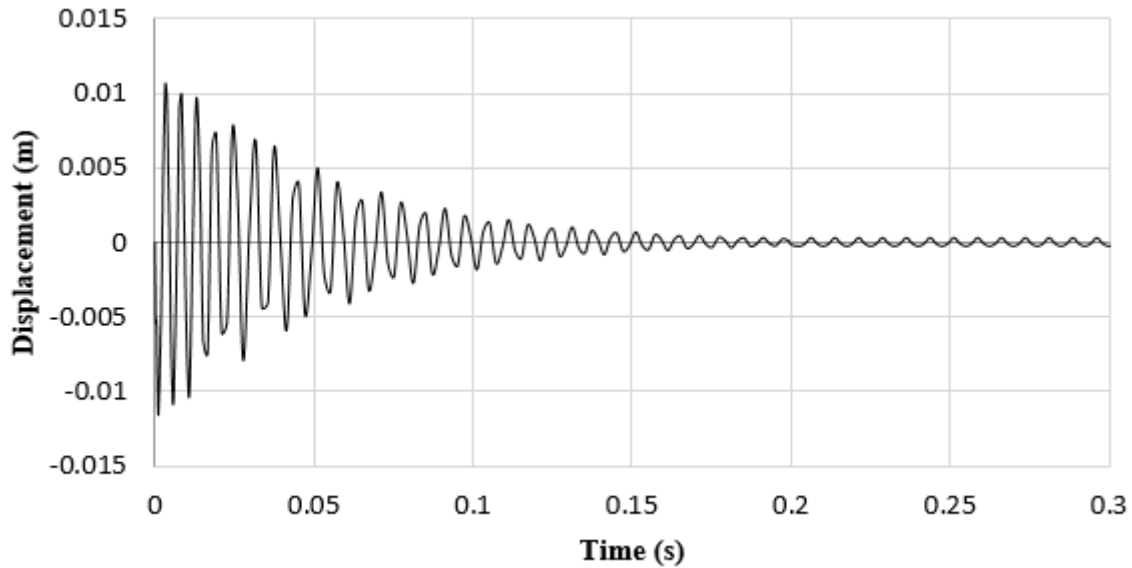


Fig.6 . Diagram of mass point's deflection vs. time

شکل ۶: نمودار جابجایی بر حسب زمان نقطه انتهایی تیر

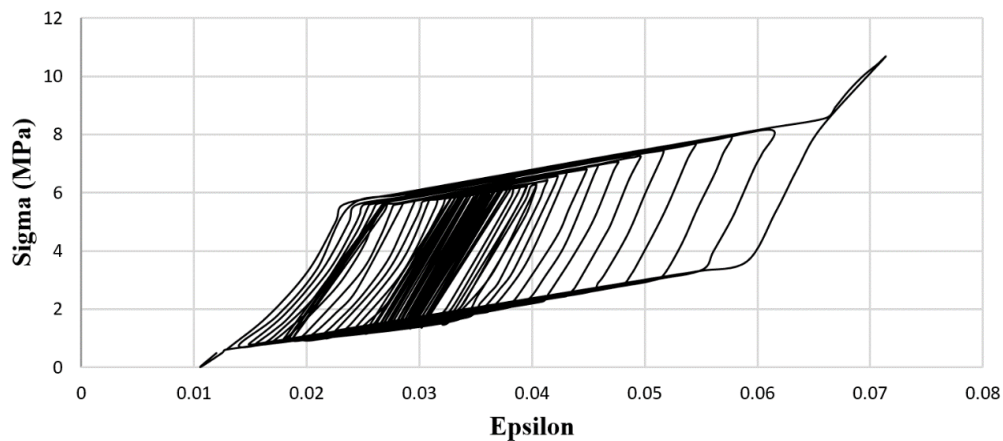


Fig.7 . Stress-strain plots for MSMA elements under 0.6T magnetic field, 3 MSMA elements and 3% compressive pre-strain

شکل ۷: نمودار تنش کرنش آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در حالت ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، پیش کرنش ۳ درصد و میدان بایاس ۰/۶ تسلا

و منفی به صورت قرینه نخواهند بود. پس از ۰/۲ ثانیه، ولتاژ خروجی به سمت صفر میل می‌کند که دلیل آن کاهش میدان کرنش آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و تبدیل شدن نمودار تنش کرنش از حالت حلقه هیستریزیس به الاستیک کامل می‌باشد. پس از زمان ۰/۲ ثانیه بی‌نظمی‌هایی در این نمودار مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد به علت ایجاد موج سینوسی مخرب در المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و برخورد آن با موج سینوسی ارتعاشی تیر می‌باشد.

شکل ۹ نشان‌دهنده ولتاژ خروجی یک برداشت‌کننده انرژی ارتعاشات محیط به‌وسیله آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی تحت تیر ساده

به تدریج مساحت حلقه‌ها کوچکتر شده و پس از مدتی در محدوده پیش کرنش اولیه (۳ درصد) به صورت یک ماده الاستیک کامل تبدیل شده و پس از آن انرژی تولید نخواهد شد. همانطور که قبلاً اشاره شد، بایستی از اعمال کرنش مثبت به آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی پرهیز کرد. با توجه به شکل ۷، کرنش اعمال شده به آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در محدوده حدودی ۱/۱ درصد تا ۶/۷ درصد می‌باشد.

ولتاژ خروجی سیستم در حالت ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، پیش کرنش ۳ درصد و میدان بایاس ۰/۶ تسلا در شکل ۸ مشخص شده است. به دلیل نامتقارن بودن هندسه تیر، ولتاژ خروجی مثبت

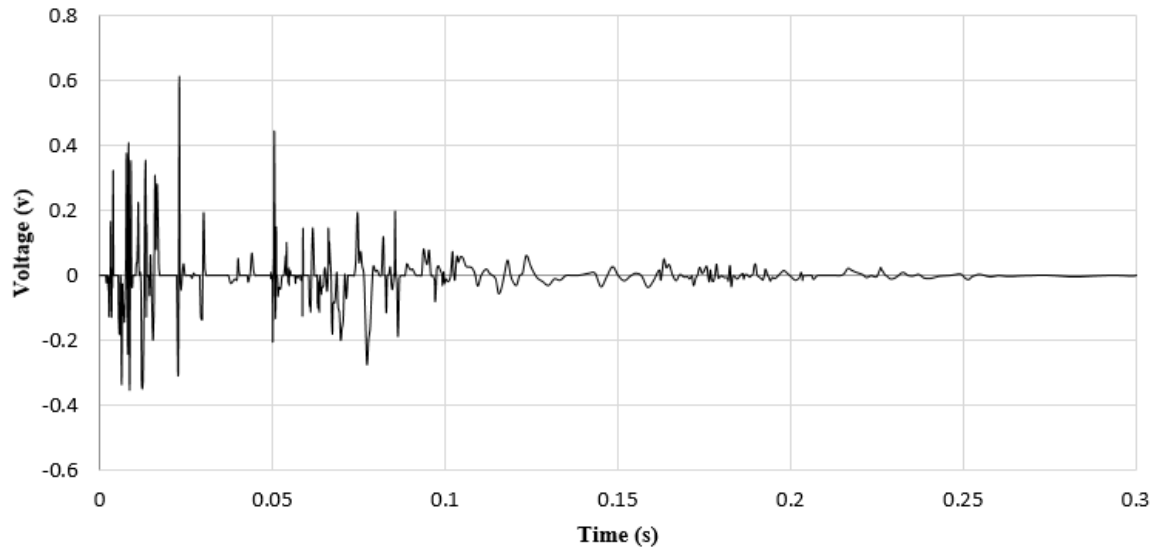


Fig.8. Output voltage vs. time of 3 MSMA elements under 0.6T magnetic field and 3% compressive pre-strain

شکل ۸: ولتاژ خروجی بر حسب زمان در حالت ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، پیش کرنش ۳ درصد و میدان بایاس ۰/۶ تسلا

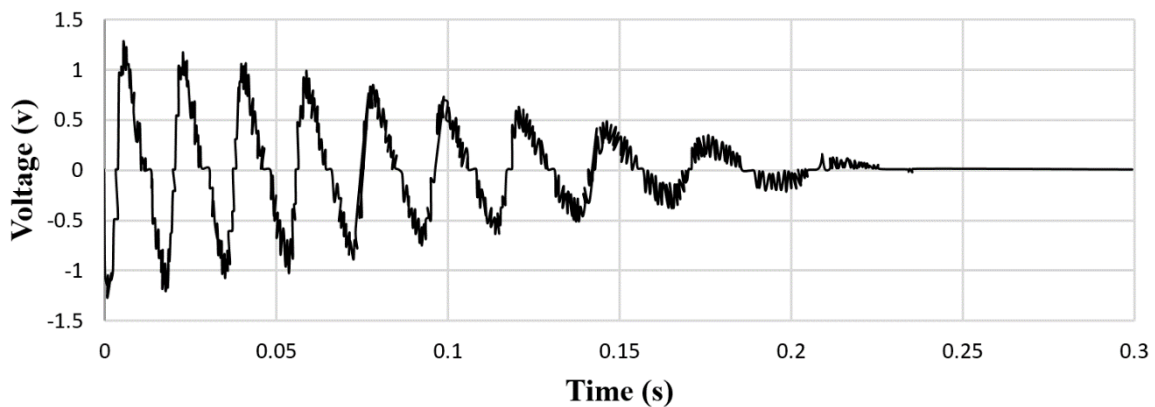


Fig.9. Output voltage vs. time of 6 MSMA elements under 0.6T magnetic field and 3% compressive pre-strain for simple clamped beam

شکل ۹: ولتاژ خروجی بر حسب زمان در حالت ۶ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، پیش کرنش ۳ درصد و میدان بایاس ۰/۶ تسلا برای تیر ساده یک سر درگیر [۱۷].

قابل دستیابی به تعداد المان‌ها تقریباً ثابت مانده است. اما فرکانس ارتعاشات و در نتیجه فرکانس ولتاژ خروجی در سازه تیر موج‌دار به نسبت تیر ساده افزایش یافته که این موضوع باعث افزایش میانگین مربعات ریشه ولتاژ خروجی خواهد شد. اختلافات موجود در دو شکل ۸ و ۹ ناشی از تفاوت هندسه، عدم تقارن سازه تیر موج‌دار، تفاوت تعداد المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و همچنین فرض‌های ساده‌کننده استفاده شده در حل تحلیلی این مسئله می‌باشد.

در شکل ۱۰ تاثیر تعداد المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی بر

یک‌سر درگیر است. این چیدمان توسط فرسنگی و همکاران [۱۷] ارائه شده است. این شبیه‌سازی به روش تحلیلی و توسط نرم‌افزار متلب انجام شده است. این سیستم شامل ۶ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است که در میدان مغناطیسی ۰/۶ تسلا با پیش کرنش منفی ۳ درصد تحریک شده است. لازم به ذکر است نیروی ضربه اولیه در هر دو بررسی مقداری برابر می‌باشد. مقایسه نتایج تحلیلی حاصل از این بررسی و نتایج مدل‌سازی اجزا محدود ارائه شده در این مقاله نشان دهنده این موضوع می‌باشد که نسبت حداکثر ولتاژ

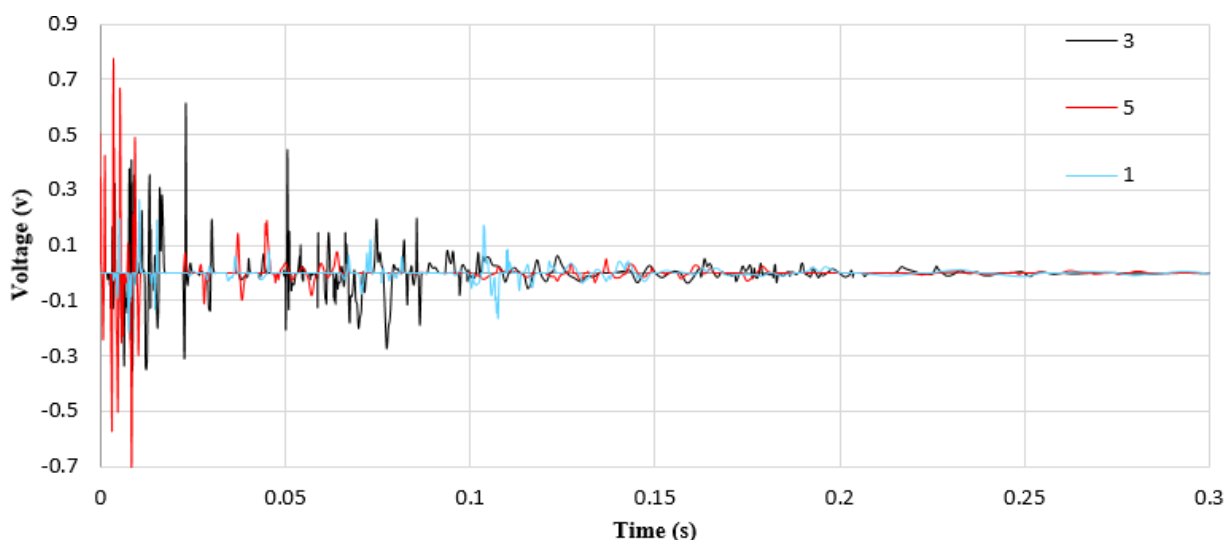


Fig.10 . Comparison of output voltage vs. time for 1, 3 and 5 MSMA elements, 3% pre-strain and 0.6 T bias magnetic field

شکل ۱۰: مقایسه ولتاژ خروجی برای تعداد ۱، ۳ و ۵ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، پیش کرنش ۳ درصد و میدان بایاس ۰/۶ تسلا بر حسب زمان

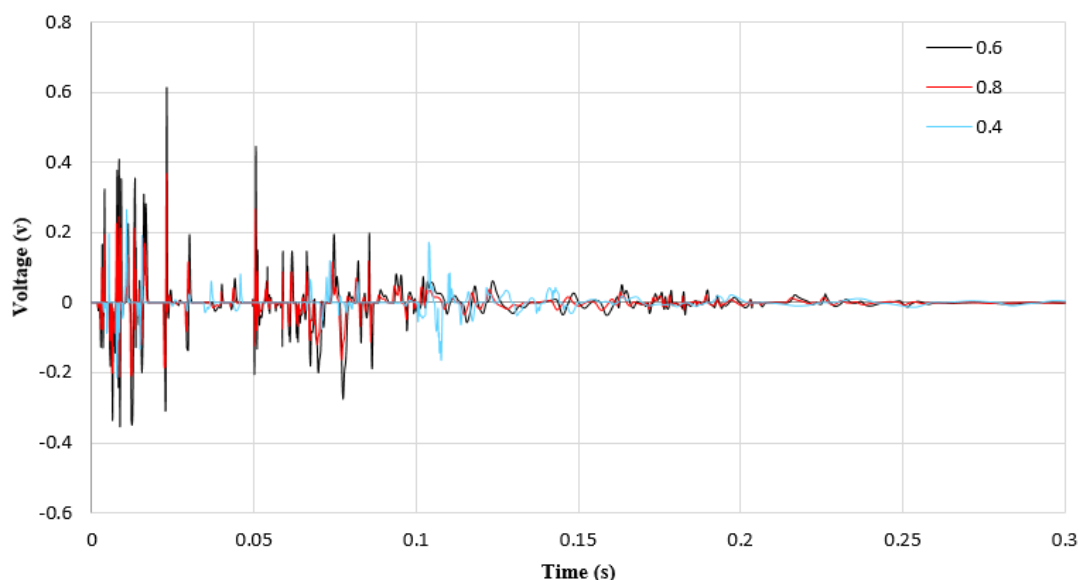


Fig. 11. Comparison of output voltage vs. time for 3 magnetic fields 0.4 Tesla, 0.6 Tesla and 0.8 Tesla

شکل ۱۱: مقایسه ولتاژ خروجی برای ۳ میدان ۰/۴ تسلا، ۰/۶ تسلا و ۰/۸ تسلا بر حسب زمان

افزایش سفتی سازه، میدان کرنش به حداکثر مقدار قابل بهره‌برداری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی نمی‌رسد و عملاً میانگین مربعات ریشه خروجی ولتاژ نسبت به حالت ۳ المان کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۱ تاثیر میدان بایاس بر دامنه ولتاژ خروجی سیستم مشخص شده است. در این حالت از ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، شبیه‌سازی‌ها در میدان ۰/۴ تسلا حاکی از آن است که سیم‌پیچ مسی به شکل مناسب

خروجی سیستم مشخص شده است. این شکل شامل ۳ حالت با ۱، ۳ و ۵ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی از ۱ به ۳، دامنه ولتاژ خروجی، افزایش می‌یابد. اما با افزایش تعداد المان‌ها از ۳ به ۵ اگرچه دامنه ولتاژ خروجی در ابتدای نمودار بیشتر است اما به سرعت کاهش می‌یابد که این موضوع به دلیل افزایش سفتی سازه و کاهش میدان کرنش موثر مجموعه المان‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر با

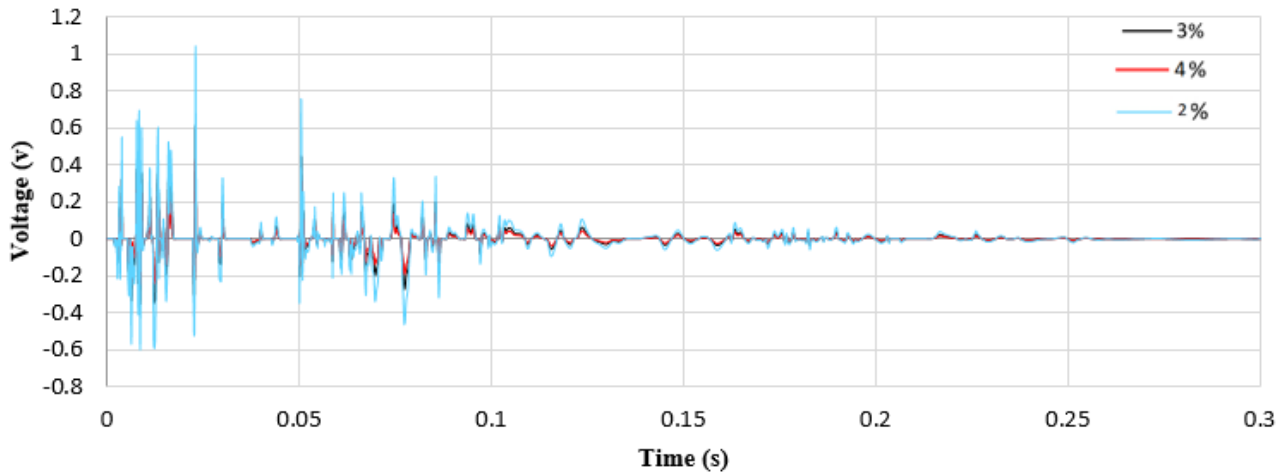


Fig.12 . Comparison of output voltage vs. time for 3 pre- strains 2%, 3% and 4%

شکل ۱۲: مقایسه ولتاژ خروجی برای ۳ پیش کرنش ۲ درصد، ۳ درصد و ۴ درصد بر حسب زمان

به ظاهر پیش کرنش ۲ درصد باعث تولید ولتاژ بیشتر می‌شود، ولی با بررسی نمودار تنش کرنش مشاهده می‌شود که در بعضی نقاط، میدان کرنش آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی مثبت شده که این مورد باعث ایجاد شکست در المان‌ها می‌شود و عملاً قابل استفاده برای کاربرد عملی نخواهد بود؛ چرا که آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی فقط باید در میدان تنش فشاری یا کرنش منفی تحریک گردد. میانگین مربعات ریشه ولتاژ خروجی برای تمام حالات قبل در جدول ۳ آمده است.

در شکل ۱۳ تاثیر ضخامت تیر موج‌دار (h_p) بر خروجی سیستم بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در ضخامت ۲ میلی‌متر، نتایج مشابه شکل ۸ هستند. با افزایش ضخامت تیر به دلیل افزایش سختی سازه، آلیاژ حافظه‌دار تحت تحریک میدان کرنش مناسب قرار نگرفته و لذا خروجی ولتاژ با کاهش چشمگیری همراه است. همچنین به نسبت ضخامت ۲ میلی‌متر زودتر به حالت الاستیک کامل تبدیل شده و حلقه‌های هیستریزس از بین می‌روند. از طرفی با کاهش ضخامت تیر به ۱ میلی‌متر، اگرچه به ظاهر خروجی ولتاژ با افزایش چشمگیری همراه است ولی در عمل این نتیجه حاصل نخواهد شد. چرا که مطابق شکل ۷ برای ضخامت ۲ میلی‌متر، میدان کرنش درون آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به صورت فشاری و در بازه ۱ تا ۶/۴ درصد متغیر است. لذا به کاهش ضخامت، میدان کرنش از این محدوده فراتر خواهد رفت. میدان‌های بیشتر از ۶/۴ درصد، عملاً تاثیر مثبتی بر تحریک آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی ندارند و همچنین میدان‌های کرنش مثبت کششی باعث ایجاد خرابی در قطعه خواهند

تحریک نشده و ولتاژ خروجی دارای بیشترین دامنه حدود ۰/۲ ولت است. با افزایش میدان بایاس و رسیدن به مقدار ۰/۶ تسلا، خروجی ولتاژ سیستم به شکل موثری افزایش یافته و به حداکثر مقدار ۰/۶ ولت می‌رسد. با ادامه روند صعودی میدان بایاس و رسیدن به مقدار ۰/۸ تسلا مشاهده می‌شود که دامنه ولتاژ خروجی مجدداً کاهش یافته که این موضوع به دلیل این است که رفتار شبه‌الاستیک آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در این مورد در ۰/۶ تسلا شروع می‌شود. با اعمال میدان کرنش در یک میدان مغناطیسی ثابت، چگالی شار عبوری در جهت محور آسان به شار عبوری در جهت محور سخت^۱ تغییر می‌یابد. حداکثر فاصله دو منحنی رفت و برگشت در حلقه هیستریزس زمانی رخ می‌دهد که میدان کرنش در شروع سیکل شبه‌الاستیک باشد و این محل در مسئله ما در میدان حدود ۰/۶ تسلا با یکدیگر برابر شده و به نوعی این میدان مقدار بهینه برای این سازه با هندسه مشخص می‌باشد.

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر ولتاژ خروجی، پیش کرنش المان‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است. این موضوع در شکل ۱۲ بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش پیش کرنش از ۲ درصد تا ۴ درصد باعث کاهش ولتاژ خروجی می‌شود. با توجه به محدودیت ساختاری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، با افزایش کرنش و رسیدن آن به ۴ درصد میدان کرنش اعمالی بر المان‌ها از حد مجاز ماده (۶/۴ درصد) عبور کرده و قسمتی از لوپ هیستریزس به صورت خط ممتد تبدیل شده و عملاً انرژی تولید نمی‌کند. همچنین اگرچه

1 Hard-Axis

جدول ۳: خروجی برای حالت‌های مختلف

Table 3. Output for different modes

تعداد المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی (در میدان ۰/۶ تسلا و پیش کرنش ۳ درصد)			میدان مغناطیسی ثابت (تسلا) (برای تعداد المان ۳ و پیش کرنش ۳ درصد)			پیش کرنش (درصد) (برای تعداد المان ۳ و میدان ۰/۶ تسلا)			میانگین مربعات ریشه ولتاژ خروجی (ولت)
۱	۳	۵	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۲	۳	۴	
۰/۰۳۴۲	۰/۰۵۸۴	۰/۰۵۴۴	۰/۰۳۵۰	۰/۰۵۸۴	۰/۰۴۲۶	۰/۰۵۴۹	۰/۰۵۸۴	۰/۰۶۱۸	

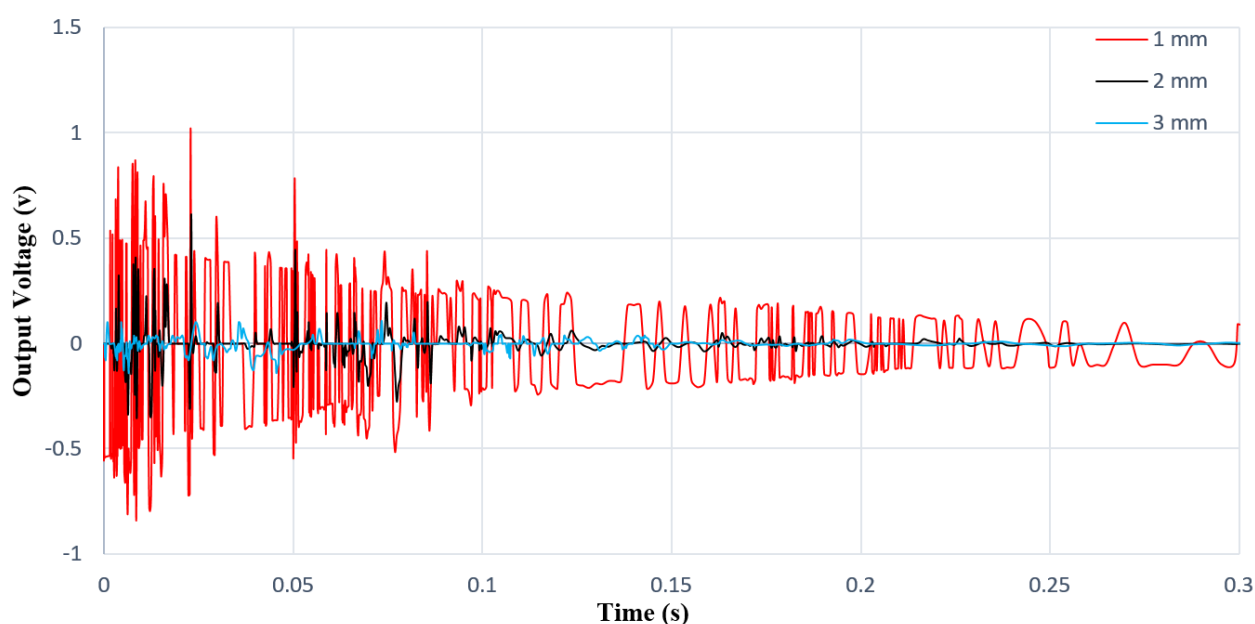


Fig.13 . Output voltage vs. time of 3 MSMA elements under 0.6T magnetic field and 3% compressive pre-strain for different h_s thicknesses

شکل ۱۳: ولتاژ خروجی بر حسب زمان در حالت ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، پیش کرنش ۳ درصد و میدان بایاس ۰/۶ تسلا برای ضخامت‌های مختلف h_s

همانطور که در قسمت قبل بحث شد، با افزایش ارتفاع قله از ۸/۵ میلی‌متر، میدان کرنش موثر بر آلیاژ از میدان کرنش نشان داده شده در شکل ۷ فراتر خواهد رفت. این موضوع باعث قرارگیری میدان کرنش در محدوده بدون تاثیر (بیشتر از ۶/۴ درصد) یا محدوده آسیب‌پذیر (کرنش کششی) خواهد شد. لذا ارتفاع قله P_s انتخاب شده، بهینه‌ترین حالت خواهد بود.

شد. لذا ضخامت h_s انتخاب شده، بهینه‌ترین حالت خواهد بود. در شکل ۱۴ تاثیر ارتفاع قله تیر موج‌دار (P_s) بر خروجی سیستم بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در قله ۸/۵ میلی‌متری، نتایج مشابه شکل ۸ هستند. با کاهش ارتفاع قله به تدریج میدان کرنش موثر بر آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی کاهش یافته و در نتیجه باعث کاهش ولتاژ خروجی می‌شود. در ارتفاع‌های کمتر از ۳ میلی‌متر عملاً ولتاژ خروجی به صفر خواهد رسید. همچنین

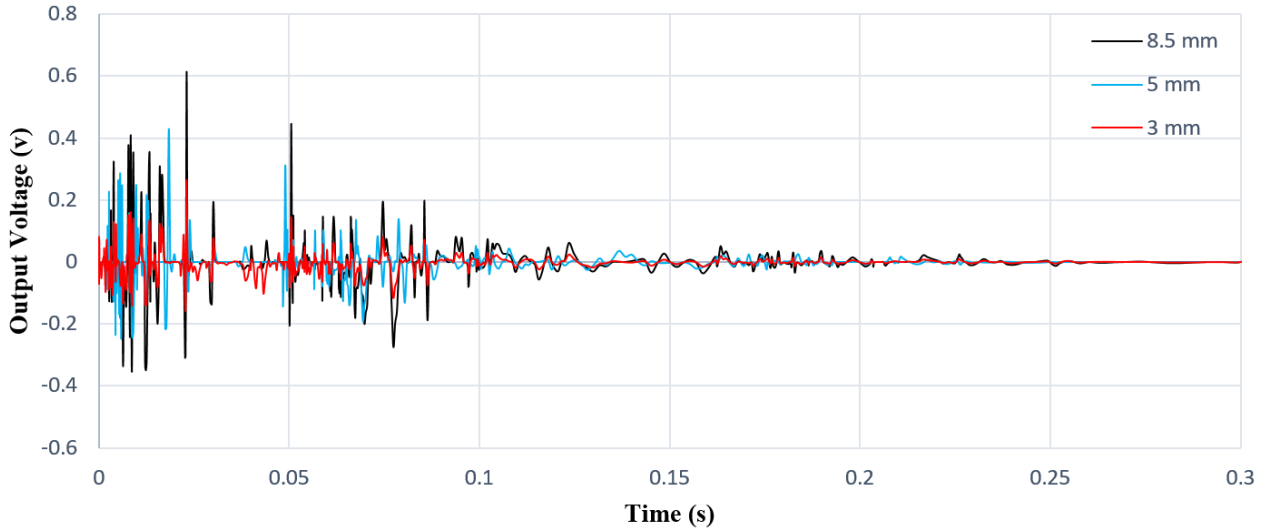


Fig.14 . Output voltage vs. time of 3 MSMA elements under 0.6T magnetic field and 3% compressive pre-strain for different P_s thicknesses

شکل ۱۴: ولتاژ خروجی بر حسب زمان در حالت ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، پیش کرنش ۳ درصد و میدان بایاس ۰/۶ تسلا برای ضخامت‌های مختلف P_s

نتایج بدست آمده، مجموعه فوق با شرایط ۳ المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، پیش کرنش ۳ درصد و میدان مغناطیسی بایاس ۰/۶ تسلا بهترین راندمان را دارا می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، تاثیر پارامتر میدان مغناطیسی بایاس و تعداد المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی بسیار بیشتر از تاثیر پیش کرنش است.

با توجه به نتایج بدست آمده، میانگین مربعات ریشه ولتاژ خروجی در حالت تیر موج‌دار حدود ۱۵ درصد بیشتر از حالت تیر ساده می‌باشد. همچنین با این چیدمان توانستیم حجم اشغالی مجموعه را ۳۰ درصد کاهش دهیم. در نهایت این چیدمان توانایی تولید چگالی انرژی $1/0.5 \mu W / cm^3$ به ازای یک نیروی ضربه را دارا می‌باشد.

مراجع

- [1] S. Priya, D.J. Inman, Energy Harvesting Technologies, Springer US, Boston, MA, 2009.
- [2] K. Takeya, E. Sasaki, Y. Kobayashi, Design and parametric study on energy harvesting from bridge vibration using tuned dual-mass damper systems, Journal of Sound and Vibration, 361 (2016) 50-65.
- [3] K. Ullakko, J.K. Huang, C. Kantner, R.C. O'Handley, V.V. Kokorin, Large magnetic-field-induced strains in Ni 2 MnGa single crystals, Applied Physics Letters, 69 (1996)

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر پارامترهای موثر بر ولتاژ خروجی سیستم بازیابی انرژی بررسی شد. این سیستم شامل یک تیر موج‌دار یک‌سر گیردار و تعدادی المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است. در ابتدا مدل ریاضی حاکم بر مسئله و ساختار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی بررسی شد. در ادامه به کمک نرم‌افزار آباکوس مدل هندسی سازه تشکیل شد و به کمک کد یومت مدل ساختاری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به مدل اضافه شد. در این مدل‌سازی از اثر میرایی سازه تیر چشم‌پوشی شده است. ولتاژ القا شده بر مبنای قانون القای فارادی محاسبه شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که با ارتعاش تیر، مغناطیس‌سازی در طول المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی تغییر می‌کند و این امر موجب ایجاد بی‌نظمی در میدان اطراف المان و سیم‌پیچ می‌شود؛ در نتیجه شار عبوری از سیم‌پیچ در طول زمان تغییر کرده و جریان الکتریکی در آن القا می‌شود. مقدار این جریان در طول زمان به دلیل رفتار هیستریزیسی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی کاهش می‌یابد. این رفتار همچنین باعث کاهش دامنه ارتعاشات می‌شود. در ادامه مقایسه‌هایی بین تاثیر پارامترهای مختلف همچون تعداد المان آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، میدان مغناطیسی بایاس و پیش کرنش اعمال شده به آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی بر ولتاژ خروجی انجام شد. بر طبق

- shape memory alloys, *Smart Materials and Structures*, 21(9) (2012) 094015.
- [14] B. Kiefer, D.C. Lagoudas, Modeling the coupled strain and magnetization response of magnetic shape memory alloys under magnetomechanical loading, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(2) (2009) 143-170.
- [15] H. Sayyaadi, M.A.A. Farsangi, Frequency-dependent energy harvesting via magnetic shape memory alloys, *Smart Materials and Structures*, 24 (2015) 115022.
- [16] M. Aureli, C. Prince, M. Porfiri, S.D. Peterson, Energy harvesting from base excitation of ionic polymer metal composites in fluid environments, *Smart Materials and Structures*, 19 (2010) 015003.
- [17] M.A.A. Farsangi, H. Sayyaadi, M.R. Zakerzadeh, A novel inertial energy harvester using magnetic shape memory alloy, *Smart Materials and Structures*, 25 (2016) 105024.
- [18] M.A.A. Farsangi, F. Cottone, H. Sayyaadi, M.R. Zakerzadeh, F. Orfei, L. Gammaitoni, Energy harvesting from structural vibrations of magnetic shape memory alloys, *Applied Physics Letters*, 110 (2017) 103905.
- [19] Q. Dai, I. Park, R.L. Harne, Impulsive energy conversion with magnetically coupled nonlinear energy harvesting systems, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(11) (2018) 2374-2391.
- [20] A. Erturk, D.J. Inman, An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations, *Smart Materials and Structures*, 18(2) (2009) 025009-025009.
- [21] S. Mohammadi, A. Esfandiari, Magnetostrictive vibration energy harvesting using strain energy method, *Energy*, 81 (2015) 519-525.
- [22] V.C. de Sousa, C. De Marqui Junior, Airfoil-based piezoelectric energy harvesting by exploiting the pseudoelastic hysteresis of shape memory alloy springs, *Smart Materials and Structures*, 24(12) (2015) 125014.
- [23] M. Borowiec, Energy harvesting of cantilever beam system with linear and nonlinear piezoelectric model, *The European Physical Journal Special Topics*, 224 (2015) 2771-2785.
- 1966-1968.
- [4] J. Tellinen, I. Suorsa, I. Aaltio, K. Ullakko, Basic Properties of Magnetic Shape Memory Actuators, in: 8th international conference ACTUATOR 2002, 2002, pp. 10-12.
- [5] S.P. Beeby, M.J. Tudor, N.M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technology*, 17 (2006) R175-R195.
- [6] N. Tran, M.H. Ghayesh, M. Arjomandi, Ambient vibration energy harvesters: A review on nonlinear techniques for performance enhancement, *International Journal of Engineering Science*, 127 (2018) 162-185.
- [7] I. Karaman, B. Basaran, H.E. Karaca, A.I. Karsilayan, Y.I. Chumlyakov, Energy harvesting using martensite variant reorientation mechanism in a NiMnGa magnetic shape memory alloy, *Applied Physics Letters*, 90(17) (2007) 172505-172505.
- [8] D. Avirovik, A. Kumar, R.J. Bodnar, S. Priya, Remote light energy harvesting and actuation using shape memory alloy—piezoelectric hybrid transducer, *Smart Materials and Structures*, 22(5) (2013) 052001.
- [9] N.M. Bruno, C. Ciocanel, H.P. Feigenbaum, A. Waldauer, A theoretical and experimental investigation of power harvesting using the NiMnGa martensite reorientation mechanism, *Smart Materials and Structures*, 21 (2012) 094018.
- [10] A.J. Niskanen, I. Laitinen, Design and Simulation of a Magnetic Shape Memory (MSM) Alloy Energy Harvester, *Advances in Science and Technology*, 78 (2012) 58-62.
- [11] M. Gueltig, H. Ossmer, M. Ohtsuka, H. Miki, K. Tsuchiya, T. Takagi, M. Kohl, High Frequency Thermal Energy Harvesting Using Magnetic Shape Memory Films, *Advanced Energy Materials*, 4(17) (2014) 1400751.
- [12] B. Gusarov, E. Gusarova, B. Viala, L. Gimeno, S. Boisseau, O. Cugat, E. Vandelle, B. Louison, Thermal energy harvesting by piezoelectric PVDF polymer coupled with shape memory alloy, *Sensors and Actuators A: Physical*, 243 (2016) 175-181.
- [13] A.B. Waldauer, H.P. Feigenbaum, C. Ciocanel, N.M. Bruno, Improved thermodynamic model for magnetic

- Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1974, pp. 145-156.
- [29] H.P. Feigenbaum, C. Ciocanel, Experiments and Modeling of the Magneto-Mechanical Response of Magnetic Shape Memory Alloys, in: ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2009, pp. 519-527.
- [30] A.H. Nayfeh, D.T. Mook, Forced Oscillations of Systems Having a Single Degree of Freedom, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 1995.
- [31] K. Haldar, B. Kiefer, D.C. Lagoudas, Finite element analysis of the demagnetization effect and stress inhomogeneities in magnetic shape memory alloy samples, Philosophical Magazine, 91 (2011) 4126-4157.
- [32] V. Thomée, Galerkin Finite Element Methods for Parabolic Problems, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [24] W. Cai, R.L. Harne, Electrical power management and optimization with nonlinear energy harvesting structures, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 30 (2019) 213-227.
- [25] S. Roundy, P.K. Wright, J. Rabaey, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, Computer Communications, 26 (2003) 1131-1144.
- [26] M. Shirani, M. Kadkhodaei, A modified constitutive model with an enhanced phase diagram for ferromagnetic shape memory alloys, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 26 (2015) 56-68.
- [27] B. Kiefer, D.C. Lagoudas, Application of a magnetic SMA constitutive model in the analysis of magnetomechanical boundary value problems, SPIE, 2006.
- [28] B.D. Coleman, W. Noll, The Thermodynamics of Elastic Materials with Heat Conduction and Viscosity, in: The Foundations of Mechanics and Thermodynamics,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

O. Safari, M. R. Zakerzadeh, M. Baghani, Finite Element Modeling of a Novel Magnetic Shape Memory Alloy Based Energy Harvester Using a Corrugated Beam and Investigating the Effective Parameters, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(2) (2021) 799-814.

DOI: [10.22060/mej.2019.16355.6341](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16355.6341)

