



## بررسی اثر ابعاد بر برداشت کننده‌ی انرژی با آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در دو پیکربندی مختلف

حسن صیادی<sup>1\*</sup>، حسین رستمی نجف آبادی<sup>2</sup>، محمد امین عسکری فرسنگی<sup>3</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\* sayyaadi@sharif.edu، 11155-9567، صندوق پستی

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 شهریور 1395

پذیرش: 03 دی 1395

ارائه در سایت: 19 دی 1395

کلید واژگان:

آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی

برداشت انرژی

فاکتور مغناطیس‌زدائی

مدار مغناطیسی

### چکیده

در این مقاله، مدل ساختاری پایه ترمودینامیکی برای مدلسازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی طی اعمال کرنش در یک سیستم برداشت‌کننده انرژی بکار برده شده است. در این سیستم با اعمال کرنش به آلیاژ، مغناطش داخلی آن تغییر کرده و در نتیجه شار اطراف آن تغییر می‌کند. با قرار دادن یک سیم‌پیچ می‌توان این تغییر شار را به ولتاژ تبدیل نمود. برای بررسی اثر تغییر ابعاد در انرژی استحصالی، فاکتور مغناطیس‌زدائی برای ابعاد مختلف از رابطه تحلیلی مواد فرومغناطیسی مکعب مستطیل محاسبه و نتایج با داده‌های مرجع راستی آزمایی شده‌اند. با استفاده از این رابطه اثر تغییر ابعاد در مقادیر فاکتور مغناطیس‌زدائی بررسی شده‌اند. با افزایش ضخامت آلیاژ، فاکتور مغناطیس‌زدائی در راستای طولی بیشتر و در راستای عرضی کمتر می‌شود در حالی که این فاکتور برای هردو راستا با افزایش عرض قطعه افزایش می‌یابد. مدل ساختاری آلیاژ برای پیکربندی که سیم‌پیچ برداشت‌کننده دور آلیاژ پیچیده می‌شود و برای پیکربندی که از هسته فرومغناطیسی برای هدایت شار استفاده می‌شود، بکار برده شده است. شبیه‌سازی در ضخامت‌های مختلف آلیاژ نشان می‌دهد افزایش ضخامت در پیکربندی که سیم‌پیچ دور آلیاژ قرار دارد باعث افزایش ولتاژ بصورت خطی می‌شود در صورتی که برای پیکربندی هسته‌دار افزایش ضخامت در ضخامت‌های کم باعث افزایش ولتاژ و در ضخامت‌های زیاد افزایش کمتر ولتاژ رادر پی دارد. با افزایش عرض آلیاژ، هردو پیکربندی افزایش ولتاژ خطی دارند اگرچه در سیستم هسته‌دار شیب خط افزایش ولتاژ بیشتر است. افزایش طول هم بدون این که در ولتاژ خروجی پیکربندی با سیم‌پیچ دور آلیاژ تغییری ایجاد کند باعث افزایش ولتاژ خروجی سیستم هسته‌دار می‌شود.

## An investigation on effectiveness of dimension on Magnetic Shape Memory Alloy based energy harvester with two different configurations

Hassan Sayyaadi\*, Hossein Rostami Najafabadi, Mohammad Amin Askari Farsangi

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 11155-9567, Tehran, Iran, sayyaadi@sharif.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 23 August 2016  
Accepted 23 December 2016  
Available Online 08 January 2017

#### Keywords:

Magnetic shape memory alloy  
Energy harvesting  
Demagnetization factor  
Magnetic circuit

### ABSTRACT

In this paper, a thermodynamic based constitutive model was used to model the behavior of magnetic shape memory alloy (MSMA) while applying strain in an energy harvester. In this type of energy harvester, applying strain changes the internal magnetization of MSMA and as a result changes the flux density around it. Using a coil the flux change can be converted to voltage. In order to study the effect of changing MSMA dimensions on the amount of harvested energy, the demagnetization factor for different dimensions is derived from an analytic expression for ferromagnetic prisms and the results are validated by reference data. Increasing MSMA thickness results in increasing longitudinal demagnetization factor and decreasing transversal demagnetization factor. The constitutive model of MSMA is used in modeling an energy harvester using two different configurations; one, a pickup coil turned around MSMA and second, a system with ferromagnetic core to conduct magnetic flux and the pickup coil around core. Simulation of two models at different thicknesses shows that increasing thickness in system with coil around MSMA results in linear increase of voltage while this parameter in the second configuration leads to a nonlinear increase of voltage. Furthermore, simulations show that increase of MSMA width results in linear increase of output voltage in both configurations but with steepest rate for system with ferromagnetic core. Finally, increasing the length of MSMA specimen shows no changes in voltage for the system with coil around MSMA, while linear increase in voltage for the system with core is recorded.

### 1- مقدمه

با توجه به اهمیت حیاتی و کاربردهای روزافزون برداشت کننده‌های انرژی، بیسیم، توجه محققان و دانشمندان در سال‌های اخیر به زمینه برداشت خصوصاً در مدارهای کم‌مصرف الکترونیکی نظیر سنسورها و سیستم‌های

### Please cite this article using:

H. Sayyaadi, H. Rostami Najafabadi, M. A. Askari Farsangi, An investigation on effectiveness of dimension on Magnetic Shape Memory Alloy based energy harvester with two different configurations, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 136-144, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

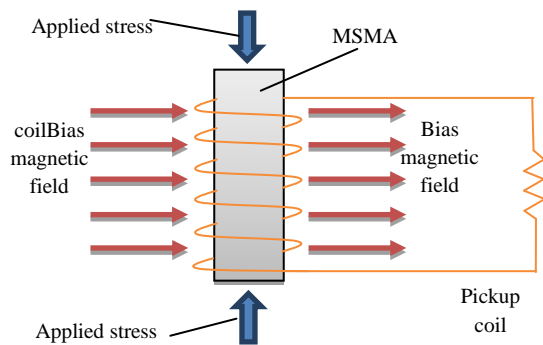


Fig. 1 Schematic of energy harvesting system with configuration 1

شکل 1 شماتیک سیستم برداشت کننده انرژی با پیکربندی 1

نشان دادند که وقتی نمونه به صورت دوسر گیردار تحت کرنش قرار گیرد ولتاژ بیشتری نسبت به حالت یکسر درگیر تولید می‌شود. در پژوهش آن‌ها اگرچه اثرات ناچیز شرایط مرزی آلیاژ در میزان انرژی برداشتی بررسی شده است ولی سایر پارامترهای موثر مانند ابعاد آلیاژ بررسی نشده است. صیادی و عسکری [13] با استفاده از یک تابع سخت‌شوندگی هایپربولیک و افزودن معادلات نفوذ<sup>5</sup> در روابط ساختاری آلیاژ، مطابقت مدل با نتایج تجربی برونو را خصوصاً در فرکانس‌های بالا و ضخامت‌های زیاد آلیاژ بهبود دادند. در این مدل هم به دلیل محاسبه فاکتورهای مغناطیس‌زدائی از روش اجزاء محدود برای هر نمونه، قابلیت بررسی اثر تغییرات ابعاد به طور مستقیم و پیوسته وجود ندارد بنابراین نمی‌توان از این مدل در الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرد.

در پیکربندی دوم، همان‌طور که در "شکل 2" نشان داده شده است، یک هسته فرومغناطیسی شار ایجاد شده توسط آهنربای الکتریکی را هدایت می‌کند. آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در فاصله هوایی هسته قرار می‌گیرد و تغییر مغناطش در راستای ضخامت آن باعث تغییرات شار عبوری از هسته می‌شود. در این حالت سیم‌پیچ برداشت‌کننده دور هسته فرومغناطیسی پیچیده می‌شود و تغییرات شار را به ولتاژ خروجی تبدیل می‌کند. این پیکربندی به علت قابلیت ایجاد میدان مغناطیسی با یاس توسط آهنرباهای دائم مورد توجه محققان و شرکت‌های فعال در این زمینه واقع شده است [6, 14-16]. معمولاً در مداری که انرژی برداشتی را مصرف می‌کند، اندوکتانس سیم‌پیچ برداشت‌کننده باعث می‌شود قسمتی از انرژی به صورت توان غیرفعال<sup>6</sup> هدر رود و همواره توان حقیقی از توان ظاهری کمتر باشد. برای رفع این مشکل، استفاده از خازن سری برای هر فرکانس در مدار الکتریکی می‌تواند با ایجاد تشدید، کل توان برداشتی را به صورت توان فعال و به واحد مصرف کننده تحویل نماید [14, 16].

برای اولین بار سورسا و همکاران [6] یک سیستم با پیکربندی مشابه "شکل 2" را برای انجام آزمایشات برداشت انرژی به کار بردند. در این تحقیق برای مدل‌سازی سیستم، مدار مغناطیسی معادل "شکل 2" با پارامترهای گسسته در نظر گرفته شده و رفتار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی از منحنی مغناطش آلیاژ (چگالی شار برحسب میدان) در کرنش‌های مختلف بدست می‌آید. نیسکانن و لایتینن [14] از شرکت آداپتامت<sup>7</sup> با ساخت یک نمونه از این پیکربندی با قابلیت تغییر میدان با یاس، اثرات تغییر میدان را بر توان

انرژی<sup>1</sup> جلب شده است [2, 1]. مشکلات و محدودیت‌های باتری‌ها و تجهیزات انتقال توان دلایل اصلی برای برداشت انرژی الکتریکی از منابع انرژی محیطی می‌باشد [3]. در میان گزینه‌های مختلفی که برای برداشت انرژی الکتریکی از ارتعاشات وجود دارد، استفاده از مواد هوشمند<sup>2</sup> و به صورت خاص آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی<sup>3</sup> دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود می‌باشد. طول عمر بالا، قابلیت استفاده در فرکانس‌های پایین، امکان اعمال تحریک با دامنه بالا و عدم محدودیت به کارکرد در شرایط تشدید از ویژگی‌ها و در مقابل، نیاز به سیم‌پیچ و میدان مغناطیسی با یاس و کارکرد در شرایط دمایی مشخص از محدودیت‌های این روش هستند [4-8]. برای تحریک این آلیاژ، کرنش‌هایی تا 6 درصد در یک راستا به آن اعمال می‌شود که دوقلویی شدن ساختار مارتنزیتی را به همراه دارد [9]. تکرارپذیری این فرایند با وجود یک میدان مغناطیسی با یاس در راستای عمود بر راستای کرنش میسر می‌شود. با حذف کرنش، این میدان با یاس آلیاژ را به موقعیت اولیه باز می‌گرداند. نکته کلیدی در برداشت انرژی به کمک آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، تغییر مغناطش این آلیاژ در اثر اعمال کرنش است. این تغییر مغناطش، شاری متغیر با زمان ایجاد می‌کند که می‌تواند به کمک یک سیم‌پیچ و براساس قانون القای فارادی<sup>4</sup> به ولتاژ تبدیل شود. به طور کلی دو پیکربندی مختلف برای استفاده از این تغییر مغناطش ارائه شده است. در پیکربندی اول، سیم‌پیچ دور آلیاژ پیچیده می‌شود به طوری که مطابق "شکل 1" محور آن در راستای اعمال تنش-کرنش قرار بگیرد. تغییر مغناطش آلیاژ در راستای طول، به طور مستقیم شار عبوری از سیم‌پیچ برداشت کننده را تغییر می‌دهد و باعث القای ولتاژ می‌گردد. نخستین بار کارامان و همکاران [10] با قرار دادن سیم‌پیچ دور آلیاژ و اعمال تنش فشاری متناوب در راستای محور سیم‌پیچ مطابق پیکربندی "شکل 1" ولتاژ و توان خروجی از سیستم را اندازه‌گیری کردند. در این مکانیزم میدان مغناطیسی با یاس برای برگشت‌پذیری کرنش‌ها توسط آهن-رباهای الکترومغناطیسی قوی ایجاد شده‌اند. با اعمال کرنش‌هایی تا فرکانس 10 هرتز آن‌ها توانستند اثرات دامنه کرنش و فرکانس را بر ماکزیمم ولتاژ و توان اندازه‌گیری کنند. برای مدل‌سازی سیستم آن‌ها رفتار مغناطش آلیاژ را به صورت تقریب خطی بین حالت کرنش کامل و حالت بدون کرنش در نظر گرفتند. این تقریب خطی خطای نسبتاً قابل توجهی را در مدل‌سازی ایجاد می‌کند و همچنین مدل ارائه شده را نیازمند استخراج منحنی مغناطش با آزمایش تجربی در هر میدان با یاس و هر ابعاد آلیاژ می‌کند. برونو و همکاران [11] با انتخاب پیکربندی "شکل 1" و مدل‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به کمک روابط ساختاری پایه ترمودینامیکی، مدلی ضمنی برای محاسبه ولتاژ خروجی سیستم ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها تا فرکانس 70 هرتز با اضافه کردن اثرات میدان مغناطش‌زدا مطابقت خوبی با نتایج آزمایشات نشان داد. این مدل به دلیل استفاده از تابع سخت‌شوندگی سینوسی و در نظر نگرفتن نحوه توزیع نفوذ میدان در آلیاژ خطای زیادی (تا 38 درصد) در پیش‌بینی رفتار آلیاژ در فرکانس‌های بالا و ضخامت‌های زیاد آلیاژ دارد. همچنین به دلیل محاسبه فاکتورهای مغناطیس‌زدائی از روش اجزاء محدود و طولانی بودن این روش، تنها برای یک حالت ابعادی فاکتورها به دست آمده و اثر ابعاد به طور مستقیم بررسی نشده است. نلسون و همکاران [12] با محاسبات تئوری و انجام آزمایشات تجربی با استفاده از تجهیزات برونو اثرات شرایط مرزی دو سر نمونه آلیاژ را روی ولتاژ برداشتی بررسی کردند. آن‌ها

<sup>1</sup> Energy harvesting

<sup>2</sup> Smart materials

<sup>3</sup> Magnetic shape memory alloys (MSMAs)

<sup>4</sup> Faraday's induction law

<sup>5</sup> Diffusion Equation

<sup>6</sup> Reactive power

<sup>7</sup> Adapta Mat

محدود محاسبه شود. همین محدودیت سبب شده تا در کارهای قبلی، اثر تغییر ابعاد آلیاژ در برداشت انرژی بررسی نشود. علاوه بر این، تحقیقات ذکر شده روی یکی از پیکربندی‌های 1 یا 2 به صورت جداگانه انجام شده و بعلت یکسان نبودن ابعاد و پارامترها، از لحاظ انرژی برداشتی و سایر قابلیت‌ها قابل مقایسه نیستند.

به بیان خلاصه‌تر، با توجه به اطلاعات نویسندگان تاکنون تحقیقی در ارتباط با بررسی اثر ابعاد بر میزان ولتاژ برداشتی از برداشت کننده‌های آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در دو پیکربندی ذکر شده صورت نپذیرفته است، و در این مقاله به مطالعه‌ی این موضوع پرداخته شده است. این تحقیق می‌تواند علاوه بر مشخص نمودن رفتار برداشت کننده نسبت به تغییرات ابعاد، مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی ابعادی این نوع برداشت کننده‌ها را فراهم آورد.

در این مقاله ابتدا مدل‌های دو مکانیزم با پیکربندی‌های 1 و 2 ارائه می‌شوند به طوری که رفتار آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی از معادلات ساختاری استخراج شود. در ادامه معادله تحلیلی برای محاسبه فاکتور مغناطیس‌زدائی در نمونه‌های مکعب مستطیل فرومغناطیسی برای آلیاژ استفاده شده و با نتایج موجود در کارهای قبلی مقایسه می‌شود. نهایتاً هر دو مدل با تغییر ابعاد آلیاژ شبیه‌سازی شده و نتایج مقایسه و بررسی می‌شوند.

## 2- مدل سازی برداشت کننده انرژی

### 2-1- مدل آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی

تاکنون برای شبیه‌سازی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی در فاز مارتنزیت مدل‌های زیادی با رویکردهای مختلف ارائه شده است. با توجه به ورودی‌های کرنش و خروجی خواص مغناطیسی آلیاژ که برای شبیه‌سازی سیستم برداشت انرژی لازم است، روش پایه ترمودینامیکی کیفی و لاگوداس گزینه مناسبی می‌باشد [18,17]. در این روش، ابتدا فرض می‌شود که آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی از سه متغیر<sup>2</sup> مارتنزیتی تشکیل شده که سه جهت‌گیری ممکن یک سلول مکعب مستطیل را نشان می‌دهد. در شرایط بارگذاری دوماحوری، فرضیات به وجود تنها دو متغیر مارتنزیتی نوع 1 و 2 محدود می‌شود. متغیر 2 با کسر حجمی  $\xi$  در راستای  $y$  مغناطیسی می‌شود درحالی‌که متغیر 1 با کسر حجمی  $\xi - 1$  بردارهای مغناطیسی در راستای  $x$  دارد. اعمال میدان مغناطیسی یا تنش-کرنش تک محوره در یک راستا باعث افزایش کسر حجمی متغیر مربوطه می‌شود.

در غیاب میدان مغناطیسی، این دو متغیر می‌توانند تنها در یکی از دو حوزه مغناطیسی ماده موجود باشند. کسر حجمی ناحیه‌ی مغناطیسی با  $\alpha$  مشخص می‌شود بنابراین متغیرهای نوع 1 و 2 در کسر حجمی  $(1 - \alpha)$  از ماده وجود ندارند. البته آزمایشات نشان می‌دهد که اعمال میدان‌های مغناطیسی اندک (نسبت به میدان‌های بایاس مورد استفاده در برداشت انرژی) کسر حجمی ناحیه مغناطیسی را به یک می‌رساند.

در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی، بردارهای مغناطیسی می‌توانند از محور اصلی‌شان منحرف شوند. "شکل 3" جهت بردارهای مغناطیسی و محورهای اصلی مغناطیسی (محور آسان<sup>3</sup>) را به همراه زوایای انحرافشان نشان می‌دهد.

با توجه به "شکل 3" و در نظر گرفتن بارگذاری دو بعدی در سیستم‌های برداشت انرژی مورد نظر، معادله مغناطش ماده را می‌توان بصورت رابطه (1) نوشت.

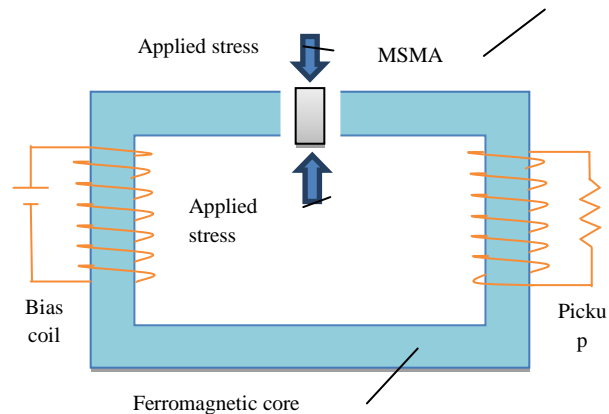


Fig. 2 Schematic of energy harvesting system with configuration 2

شکل 2 شماتیک سیستم برداشت کننده انرژی با پیکربندی 2

برداشتی به صورت تجربی بررسی کردند. همچنین با تغییر مقاومت مصرف کننده الکتریکی و افزودن خازن بصورت سری، شرایط تحویل حداکثر توان به مدار را در فرکانس‌های تا 80 هرتز مدل‌سازی و آزمایش کردند. در این مدل برای بررسی اثرات المان‌های الکتریکی مصرف کننده، علاوه بر مدار مغناطیسی مدار الکتریکی هم اضافه شده است. در فرکانس‌های بالاتر تا 300 هرتز، سارن و همکاران [16] با ارائه مدل و پیکربندی مشابه، توان تحویلی به مدار الکتریکی را نزدیک به نتایج تجربی حتی در شرایط تشدید الکتریکی مصرف کننده شبیه‌سازی کردند. کول و همکاران [15] یک برداشت کننده با پیکربندی مشابه "شکل 2" و ابعاد مینیا توری (کمتر از چند سانتی‌متر) ساختند و با استفاده از مدار معادل مغناطیسی و منحنی مغناطش آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی رفتار آن را مدل کردند. نتایج آزمایشات آن‌ها در فرکانس‌های چند هرتز با محاسبات مدل مطابقت قابل قبولی داشتند. همه‌ی مدل‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی رفتار سیستم با پیکربندی "شکل 2" از منحنی تجربی مغناطش آلیاژ برای به دست آوردن این رفتار استفاده کرده‌اند که نیازمند استخراج منحنی مغناطش در هر میدان بایاس و هر ابعاد آلیاژ است. بنابراین در هیچ کدام از مدل‌های ارائه شده برای پیکربندی "شکل 2" اثرات تغییر ابعاد آلیاژ بر انرژی برداشتی بررسی نشده است.

همان‌طور که در مدل‌سازی مکانیزم برداشت کننده با پیکربندی 1 اشاره شده، در مورد مکانیزم با پیکربندی 2 هم می‌توان با استفاده از یک مدل مناسب مثل مدل ترمودینامیکی کیفی و لاگوداس [17] رفتار مغناطیسی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی را تحت تنش-کرنش شبیه‌سازی کرد. با وارد کردن این نتایج در مدل مدار مغناطیسی، می‌توان رفتار سیستم را پیش‌بینی کرد [13]. این روش به علت استفاده از معادلات ساختاری برای به دست آوردن مغناطش آلیاژ در شرایط بارگذاری مختلف، قابلیت پیش‌بینی تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف مثل ابعاد آلیاژ، کرنش اعمالی، میدان بایاس و ... را دارد. همچنین با توجه به ارائه نتایج در هر مقدار کرنش، الگوی رفتار با دقت مناسب در هر لحظه از بارگذاری قابل دسترسی است [13]. از طرفی استفاده از این مدل نیازمند داشتن مشخصاتی از آلیاژ مثل ثوابت کالیبراسیون و فاکتورهای مغناطیس‌زدائی<sup>1</sup> است. ثوابت کالیبراسیون به ترکیب آلیاژ و نحوه ساخت آن وابسته است و با آزمایش روی یک نمونه برای سایر نمونه‌های مشابه قابل استفاده است. در مورد فاکتور مغناطیس‌زدائی که میدان مغناطیسی داخلی ماده فرومغناطیس در جهت مخالف میدان اعمالی را نشان می‌دهد، با توجه به وابستگی به ابعاد نمونه، باید برای هر قطعه با آزمایش یا روش‌های المان

<sup>2</sup> variant  
<sup>3</sup> Easy axis

<sup>1</sup> Demagnetization factor

که  $\sigma$  تنش اعمالی،  $\epsilon^{r,max}$  حداکثر کرنش جهت گیری مجدد متغیرها،  $\Delta S$  اختلاف سختی،  $\mu_0$  گذردهی خلأ و  $f^\xi(\xi)$  تابع سخت شوندهگی هستند. برای آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی، توابع سخت شوندهگی متفاوتی از جمله نمایی، مثلثاتی، چند جمله ای و ... به کار گرفته شده اند [17-19]. در این پژوهش برای افزایش دقت نتایج با توجه به شرایط بارگذاری از تابع سخت شوندهگی هایپربولیک به صورت رابطه (5) استفاده می شود [13].

$$f^\xi(\xi) = \begin{cases} \int_0^\xi A(1 + \tanh^{-1}(2\xi - 1))d\xi + (B_1 + B_2)\xi, & \xi > 0 \\ \int_0^\xi C(1 + \tanh^{-1}(2\xi - 1))d\xi + (B_1 - B_2)\xi, & \xi < 0 \end{cases} \quad (5)$$

در نهایت  $\xi$  به کمک شرط کن-تاکر<sup>4</sup> که به صورت رابطه (6) است، بدست خواهد آمد.

$$\pi^\xi = \begin{cases} +Y, & \xi > 0 \\ -Y, & \xi < 0 \end{cases} \quad (6)$$

در روابط (5) و (6)،  $A$  و  $C$  و  $B_1$  و  $B_2$  و  $Y$  ثوابتی هستند که به وسیله کالیبراسیون تعیین می شوند. مدل با در نظر گرفتن میدان مغناطیسی اعمالی ثابت و بارگذاری متغیر کالیبره می شود. در این روش از مقادیر نیروی محرکه-ی ترمودینامیکی در آغاز و پایان فرایند چرخش بردار متغیرهای داخلی از 1 به 2 و بالعکس در میدان موردنظر بعلاوهی شرط پیوستگی انرژی آزاد گیبس مطابق روابط (7) استفاده می شود.

$$\begin{aligned} \pi_{1 \rightarrow 2}^{\xi,s} &= +Y \\ \pi_{1 \rightarrow 2}^{\xi,f} &= +Y \\ \pi_{2 \rightarrow 1}^{\xi,s} &= -Y \\ \pi_{2 \rightarrow 1}^{\xi,f} &= -Y \end{aligned} \quad (7)$$

که نماد  $s$  بیانگر شروع و نماد  $f$  بیانگر پایان فرایند جهت گیری مجدد بردار متغیرهای داخلی و رابطه آخر شرط پیوستگی انرژی آزاد گیبس است.

حل عددی معادلات (1) تا (7) به کمک نرم افزارهای محاسباتی مثل متلب<sup>5</sup>، رفتار آلیاژ از جمله مغناطش آن را در هر راستا بدست می دهد. باید توجه داشت که بازه های زمانی برای حل عددی باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شوند تا بتوانند رفتار آلیاژ را به طور کامل مشخص کنند. از سوی دیگر، کوچک کردن بیش از اندازه این بازه ها باعث افزایش حجم محاسبات و در نتیجه بیشتر شدن زمان حل می شود در حالی که افزایش دقت نتایج را در پی ندارد. برای انتخاب بازه های زمانی مناسب کافیست بازه ها تا همگرایی جواب کوچک شوند [18].

## 2-2- محاسبه فاکتور مغناطیس زدائی

وقتی میدان مغناطیسی خارجی به قطعه ای از ماده فرومغناطیسی اعمال می شود، مطابق "شکل 4" تعدادی از قطب های مغناطیسی داخل ماده در جهت مخالف میدان اعمالی قرار می گیرند و باعث ایجاد میدان مغناطیسی داخلی ماده در جهت خلاف میدان اعمالی می شوند. این میدان مغناطیسی داخلی که میدان مغناطیس زدائی<sup>6</sup> نامیده می شود، با مغناطش ماده متناسب است. ضریب این تناسب فاکتور مغناطیس زدائی نامیده می شود و با نسبت میدان مغناطیس زدائی به مغناطش ماده برابر است. به این ترتیب شدت واقعی میدان در قطعه با تفاضل میدان مغناطیس زدائی از میدان مغناطیسی اعمالی مطابق رابطه (2) بدست می آید.

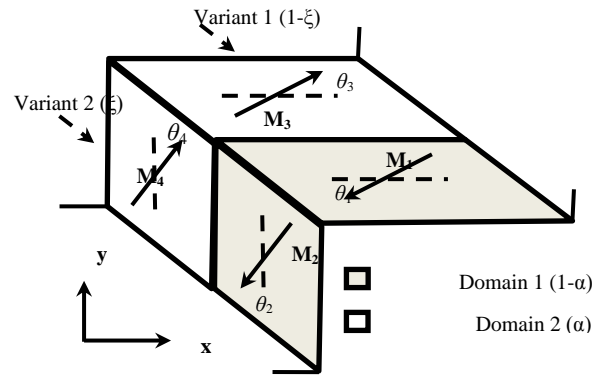


Fig. 3 Variants and magnetic domains in MSMA [13]

شکل 3 متغیرها و حوزه های مغناطیسی در آلیاژ حافظه دار مغناطیسی [13]

$$M = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix} = \xi M^{\text{sat}} \begin{pmatrix} \sin(\theta_4) \\ \cos(\theta_4) \end{pmatrix} + (1 - \xi) M^{\text{sat}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) \end{pmatrix} \quad (1)$$

که در آن  $M^{\text{sat}}$  مغناطش اشباع آلیاژ و  $\theta_i$  ها انحراف بردار مغناطش داخلی از محور اصلی هستند. برای مواد فرومغناطیسی، میدان مغناطیسی مؤثر با میدان مغناطیسی اعمالی به علت وجود اثرات مغناطیس زدائی متفاوت بوده و از رابطه (2) بدست می آید.

$$\begin{pmatrix} H_x^{\text{eff}} \\ H_y^{\text{eff}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_x^{\text{app}} \\ H_y^{\text{app}} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} D_{xx} & 0 \\ 0 & D_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $H_i^{\text{eff}}$  میدان مغناطیسی مؤثر،  $H_i^{\text{app}}$  میدان مغناطیسی اعمالی،  $D_{ii}$  فاکتور مغناطیس زدائی و  $M_i$  مغناطش داخلی نمونه در جهت  $i$  هستند.

از آنجائی که میدان مغناطیسی تنها در یک جهت مثلاً  $y$  اعمال می شود، بنابراین  $H_x^{\text{app}}$  صفر بوده و با جایگذاری رابطه (1) در رابطه (2) می توان عبارتی برای میدان مغناطیسی مؤثر برحسب کسر حجمی متغیر 2، فاکتور مغناطیس زدائی، زوایای چرخش بردار مغناطیسی و مغناطش اشباع بدست آورد. با استفاده از نامسای کلایوس-دوهم<sup>1</sup> برای چرخش بردارهای مغناطش داخلی از محور اصلی می توان معادلات (3) را نوشت.

$$\begin{aligned} & \left( M^{\text{sat}}(1 - \xi)(D_{yy} - D_{xx}) + \frac{2\rho K_1}{\mu_0 M^{\text{sat}}} \right) \sin(\theta_3) \cos(\theta_3) \\ & + M^{\text{sat}} \xi (D_{xx} \sin(\theta_3) \sin(\theta_4) + D_{yy} \cos(\theta_3) \cos(\theta_4)) \\ & - H_y^{\text{app}} \cos(\theta_3) = 0 \\ & \left( M^{\text{sat}} \xi (D_{yy} - D_{xx}) - \frac{2\rho K_1}{\mu_0 M^{\text{sat}}} \right) \sin(\theta_4) \cos(\theta_4) \\ & + M^{\text{sat}}(1 - \xi)(D_{xx} \cos(\theta_3) \cos(\theta_4) + D_{yy} \sin(\theta_3) \sin(\theta_4)) \\ & - H_y^{\text{app}} \sin(\theta_4) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

عبارت  $\rho K_1$  انرژی ناهمسانگردی کریستالی مغناطش<sup>2</sup> است که در برابر چرخش مغناطش مقاومت می کند. معادلات (3) سیستمی از معادلات جبری هستند که می توان همزمان برای  $\theta_3$  و  $\theta_4$  حل کرد و در رابطه (2) قرار داد.

برای پیدا کردن  $\xi$ ، از نیروی محرکه ترمودینامیکی چرخش متغیرها استفاده می شود. این نیروی محرکه ترمودینامیکی با استفاده از مشتق گیری جزئی عبارت انرژی آزاد گیبس<sup>3</sup> نسبت به  $\xi$  مطابق رابطه (4) بدست می آید.

$$\begin{aligned} \pi^\xi &= \sigma \epsilon^{r,max} + \frac{1}{2} \Delta S \sigma^2 - \mu_0 M^{\text{sat}} H_x^{\text{eff}} (\cos(\theta_3) + \sin(\theta_4)) \\ & + \mu_0 M^{\text{sat}} H_y^{\text{eff}} (\cos(\theta_4) - \sin(\theta_3)) \\ & + \rho K_1 (\sin^2(\theta_3) - \sin^2(\theta_4)) - \frac{\partial f^\xi(\xi)}{\partial \xi} \end{aligned} \quad (4)$$

<sup>4</sup> Kuhn-Tucker

<sup>5</sup> MATLAB

<sup>6</sup> Demagnetizing field

<sup>1</sup> Clausius-Duhem

<sup>2</sup> Magneto crystalline anisotropy energy

<sup>3</sup> Gibb's free energy

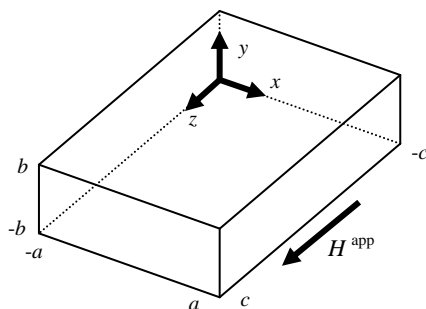


Fig. 5 The coordinate system on prismatic MSMA specimen

شکل 5 دستگاه مختصات روی قطعه آلیاژ حافظه دار مغناطیسی مکعب مستطیل

جدول 1 نشان می دهد مقادیر خطای نسبی در محاسبه فاکتور مغناطیس زدائی به این روش قابل قبول هستند و با توجه اهمیت محاسبه تحلیلی، می توان با تقریب خوبی از این روش در سیستم برداشت انرژی استفاده کرد به طوری که مقادیر فاکتور مغناطیس زدائی به صورت تابعی از ابعاد نمونه محاسبه شوند.

لازم به ذکر است، رابطه ی تحلیلی به کار گرفته شده تقریب بیشتری در محاسبه ی مقدار  $D_{xx}$  دارد ولی این پارامتر در محدوده ابعاد مورد بررسی با توجه به مقادیر کم آن تاثیر ناچیزی در میدان مغناطیس زدائی نمونه دارد. همچنین مقدار  $D_{yy}$  که مقادیر بزرگی دارد و تاثیر اصلی را در میدان مغناطیس زدائی و محاسبات رفتار آلیاژ می گذارد با خطای حداکثر 7 درصد راستی آزمائی شده است. لذا می توان با توجه به میزان تاثیر هر یک از پارامترهای  $D_{xx}$  و  $D_{yy}$  بر ولتاژ، می توان نتایج را معتبر دانست.

### 2-3- مدل مدار مغناطیسی

در مورد پیکربندی 1، با توجه به این که تغییرات مغناطش به طور مستقیم باعث تغییر شار می شوند، تنها کافیسیت شار عبوری از آلیاژ در راستای محور سیم پیچ از رابطه (9) محاسبه شود.

$$\varphi = BA = \mu_0(H^{app} + M) \quad (9)$$

که  $B$  چگالی شار و  $A$  سطح مقطع سیم پیچ است. برای بدست آوردن مدار هم ارز مغناطیسی پیکربندی 2، المان های مدار مطابق "شکل 6" مدل می شوند. در این مدار، سیم پیچ ایجاد کننده میدان بایاس یا همان منبع نیروی محرکه

جدول 1 مقایسه مقادیر فاکتور مغناطیس زدائی با داده های مرجع

شماره نمونه	ابعاد (mm)	اجزاء محدود $D_{xx}$ [21,11]	تجزیه $D_{xx}$	اجزاء محدود $D_{yy}$ [21,11]	تجزیه $D_{yy}$
1	19.8	0.080	0.066	0.490	0.468
	2.93				
	2.91				
2	18.7	0.070	0.072	0.480	0.474
	3.08				
	2.94				
3	19.9	0.090	0.069	0.490	0.455
	2.98				
	3.13				
4	18.9	0.080	0.073	0.490	0.466
	3.09				
	3.06				
5	10	0.087	0.088	0.457	0.456
	2				
	2				

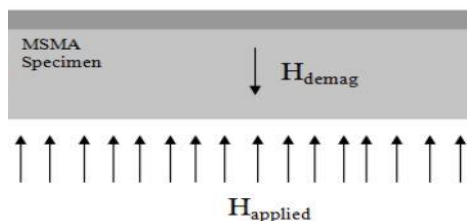


Fig. 4 Demagnetizing field in MSMA specimen[11]

شکل 4 میدان مغناطیس زدائی در یک قطعه آلیاژ حافظه دار مغناطیسی [11]

مقادیر فاکتور مغناطیس زدائی برای مقاطع بیضوی و ساده که مغناطش یکنواخت دارند به صورت دقیق محاسبه می شود ولی در سایر موارد روش های تجربی، تقریبی و یا المان محدود برای تقریب این فاکتور براساس هندسه قطعه به کار می روند.

با توجه به فیزیک مساله برداشت انرژی و قطعات تجاری موجود آلیاژ حافظه دار مغناطیسی، شکل قطعه به صورت مکعب مستطیل در نظر گرفته شده و فاکتور مغناطیس زدائی با توجه به ابعاد به دست می آید. برای محاسبه فاکتور مغناطیس زدائی در یک قطعه مکعب مستطیل شکل، ابتدا فرض می شود که ماده یکنواخت و همگن است. سپس دستگاه مختصات کارترین مطابق "شکل 5" در گوشه مکعب مستطیل قرار داده می شود به طوری که محورهای آن موازی وجوه مکعب مستطیل باشند. میدان مغناطیسی هم در راستای محور  $z$  اعمال می شود [20].

با توجه به ابعاد در نظر گرفته شده برای مکعب مستطیل مطابق "شکل 5" با استفاده از تئوری محاسبه انرژی مغناطیسی، فاکتور مغناطیس زدائی از رابطه (8) به دست می آید [20]. لازم به ذکر است که در این مرجع صرفاً یک رابطه تحلیلی و تقریبی برای محاسبه فاکتور مغناطیس زدائی در مواد فرومغناطیس ارائه شده است و به مدل سازی آلیاژ و بررسی انرژی برداشتی از آن پرداخته نشده است.

$$\pi D_{zz} = \frac{b^2 - c^2}{2bc} \ln \left( \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} - a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} + a} \right) + \frac{a^2 - c^2}{2ac} \ln \left( \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} - b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} + b} \right) + \frac{b}{2c} \ln \left( \frac{\sqrt{a^2 + b^2} + a}{\sqrt{a^2 + b^2} - a} \right) + \frac{a}{2c} \ln \left( \frac{\sqrt{a^2 + b^2} + b}{\sqrt{a^2 + b^2} - b} \right) + \frac{c}{2a} \ln \left( \frac{\sqrt{b^2 + c^2} - b}{\sqrt{b^2 + c^2} + b} \right) + \frac{c}{2b} \ln \left( \frac{\sqrt{a^2 + c^2} - a}{\sqrt{a^2 + c^2} + a} \right) + 2 \arctan \left( \frac{ab}{c\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) + \frac{a^3 + b^3 - 2c^3}{3abc} + \frac{a^2 + b^2 - 2c^2}{3abc} \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} + \frac{c}{ab} (\sqrt{a^2 + c^2} + \sqrt{b^2 + c^2}) - \frac{(a^2 + b^2)^{3/2} + (b^2 + c^2)^{3/2} + (c^2 + a^2)^{3/2}}{3abc} \quad (8)$$

بنابراین برای محاسبه فاکتور مغناطیس زدائی در راستای دلخواه، کافیسیت ابعاد قطعه مکعب مستطیل و محورهای مختصات مطابق نمادگذاری فوق در نظر گرفته شده و از رابطه (8) استفاده شود. برای ارزیابی رابطه (8) در محاسبه فاکتور مغناطیس زدائی نمونه های آلیاژ حافظه دار مغناطیسی، نتایج حل تحلیلی رابطه (8) با مقادیر به دست آمده به کمک روش اجزاء محدود (نرم افزار کامسول<sup>1</sup>) و مقادیر به دست آمده به کمک روش اجزاء محدود و اندازه گیری تجربی مرجع [21] در جدول 1 مقایسه شده اند.

<sup>1</sup> COMSOL

با کالیبره کردن مدل آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و انتخاب پارامترهای سیستم برداشت کننده می‌توان مقادیر ولتاژ خروجی را در هر دو پیکربندی پیش‌بینی و مقایسه کرد.

### 3- شبیه‌سازی و استخراج نتایج

از آنجائی که فاکتور مغناطیس‌زدائی بیانگر مقاومت ماده در برابر اعمال میدان مغناطیسی است، هرچه این فاکتور در یک میدان اعمالی ثابت کمتر شود، میدان مؤثر بیشتری داخل قطعه وجود خواهد داشت. برای بررسی اثر تغییر ابعاد روی مقادیر فاکتور مغناطیس‌زدائی در راستاهای مختلف یک نمونه آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، می‌توان از رابطه (8) استفاده کرد. با توجه به این که در فرآیند برداشت انرژی میدان بایاس در راستای ضخامت و کرنش در راستای طولی به آلیاژ وارد می‌شوند، مطابق رابطه (2) فاکتورهای مغناطیس‌زدائی در دو راستای ضخامتی و طولی وارد معادلات ساختاری می‌شوند. "شکل 7" اثر تغییر عرض قطعه در ضخامت‌های مختلف را بر فاکتور مغناطیس‌زدائی راستای طولی در یک قطعه با طول 15 میلی‌متر نشان می‌دهد.

همان‌طور که "شکل 7" نشان می‌دهد، مقادیر فاکتور مغناطیس‌زدائی در راستای طولی نسبتاً کوچک هستند ولی با افزایش عرض و یا ضخامت افزایش پیدا می‌کنند. همچنین افزایش این فاکتور با افزایش عرض قطعه در ضخامت‌های بیشتر سریع‌تر است. به‌طور مشابه، "شکل 8" اثر تغییر عرض را در ضخامت‌های مختلف قطعه روی فاکتور مغناطیس‌زدائی راستای ضخامت نشان می‌دهد.

فاکتور مغناطیس‌زدائی در راستای ضخامت مطابق "شکل 8" مقادیر بزرگی را اختیار می‌کند. در واقع قسمت زیادی از میدان اعمالی در راستای ضخامت مطابق رابطه (2) بعنوان میدان مؤثر عمل نمی‌کند. مقدار میدان مؤثر در قطعات نازک حتی به کمتر از نصف میدان اعمالی می‌رسد. همچنین "شکل 8" نشان می‌دهد که فاکتور مغناطیس‌زدائی در راستای ضخامت با زیاد شدن عرض قطعه افزایش می‌یابد و این افزایش در ضخامت‌های بالا سریعتر می‌شود.

برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های برداشت انرژی با پیکربندی‌های 1 و 2، ابتدا باید مدل ساختاری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی کالیبره شود. برای این کار مقادیر کمیت‌های لازم در مورد آلیاژ پرکاربرد نیکل-منگنز-گالیم مطابق جدول 2 از مرجع استخراج شده‌اند [18].

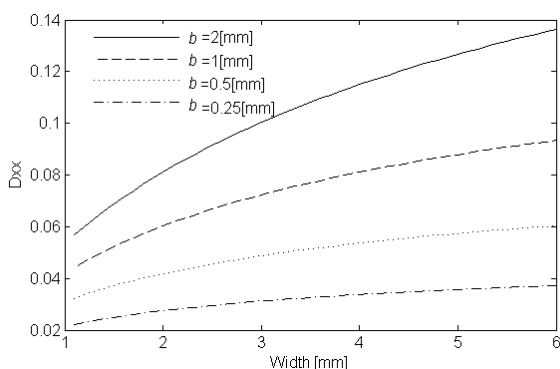


Fig. 7 Demagnetization factor along length of specimen versus width in various thicknesses

شکل 7 تغییرات فاکتور مغناطیس‌زدائی در راستای طول با تغییر عرض در ضخامت‌های مختلف

مغناطیسی با MMF نشان داده شده است. همچنین مقاومت مغناطیسی یا رلوکتانس<sup>1</sup> اجزاء مدار شامل هسته، فاصله هوایی، آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی و شار نشستی به ترتیب با R1 تا R4 نشان داده شده‌اند. از آنجائیکه رلوکتانس آلیاژ و فاصله هوایی در حین اعمال کرنش تغییر می‌کند، این المان‌ها به صورت متغیر نشان داده شده‌اند.

برای به دست آوردن مقادیر رلوکتانس اجزای مدار مغناطیسی "شکل 6" که شار مغناطیسی از آن‌ها عبور می‌کند، به جز قسمت شار نشستی، از رابطه (10) استفاده می‌شود [22].

$$R_i = \frac{l}{\mu A}, i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

که در رابطه (10) طول مسیر عبور شار، A مساحت مقطع عمود بر شار و  $\mu$  گذردهی مغناطیسی ماده است. طی اعمال کرنش به آلیاژ، فاصله هوایی فقط در اثر تغییر ابعاد دارای رلوکتانس متغیر است در صورتی که آلیاژ علاوه بر تغییرات ابعاد، تغییر مغناطش هم می‌دهد که گذردهی را عوض می‌کند. در مورد قسمتی که شارنشستی عبور می‌کند، می‌توان از رابطه (11) برای تقریب زدن رلوکتانس استفاده کرد [23].

$$R_4 = \frac{1}{0.26\mu_0 w} \quad (11)$$

که w عرض فاصله هوایی یا همان عرض هسته فرومغناطیسی است و در طول اعمال کرنش ثابت باقی می‌ماند. بنابراین رلوکتانس این قسمت در طی فرآیند تغییر نمی‌کند. البته در عمل این مقدار با تغییر رلوکتانس قسمت‌های مجاور عوض می‌شود ولی تغییرات آن نسبت به مقادیر مربوط به آلیاژ و فاصله هوایی ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است.

پس از محاسبه مقادیر رلوکتانس اجزاء مدار مغناطیسی در هر حالت، مقدار معادل آن‌ها با توجه به سری یا موازی بودن محاسبه می‌شود. نهایتاً با استفاده از رابطه (12) شار عبوری از هسته فرومغناطیسی مدار و همچنین سیم‌پیچ برداشت کننده محاسبه می‌گردد.

$$\varphi = \frac{MMF}{R} \quad (12)$$

شار عبوری از سیم‌پیچ برداشت کننده در پیکر بندی 1 و 2 به ترتیب از روابط (9) و (12) به دست آمده و تغییرات آن نسبت به زمان با ولتاژ خروجی متناسب است. قانون القای فاراده مطابق رابطه (13) این تناسب را با ضرب منفی تعداد دور سیم‌پیچ برداشت کننده به تساوی تبدیل می‌کند.

$$V = -N \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (13)$$

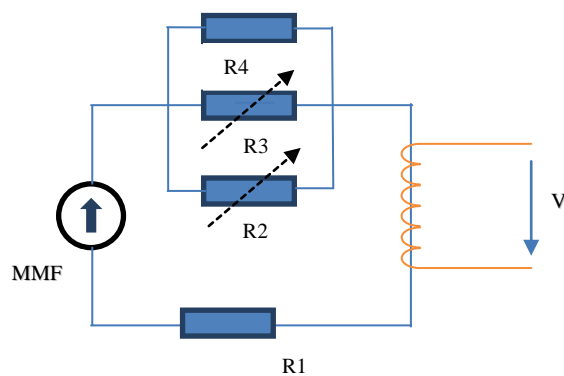


Fig. 6 Equivalent magnetic circuit of configuration 2

شکل 6 مدار مغناطیسی معادل پیکربندی 2

<sup>1</sup> Reluctance

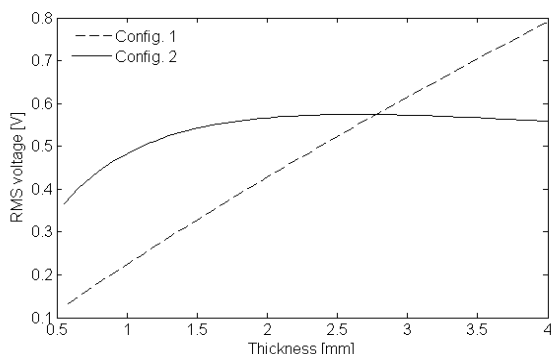


Fig. 9 RMS voltage versus MSMA thickness in two configurations

شکل 9 تغییرات ولتاژ خروجی با تغییر ضخامت آلیاژ در دو پیکربندی 1 و 2

برای پیکربندی 2 افزایش ضخامت باعث افزایش ولتاژ خروجی با شیب کمتر و به صورت غیرخطی در ضخامت‌های کم (تا 2 میلی‌متر در این مسئله) می‌شود. در ضخامت‌های بیشتر ولتاژ خروجی ثابت می‌شود و نهایتاً با شیب بسیار کم کاهش می‌یابد. برای تفسیر این رفتار می‌توان گفت که از یک سو میدان مغناطیس‌زدا در راستای ضخامت مطابق "شکل 8" کاهش می‌یابد و از سوی دیگر با افزایش رلوکتانس مسیر شامل آلیاژ، قسمت کمتری از شار از این مسیر عبور می‌کند. بنابراین با افزایش ضخامت، اثرات کاهش میدان مغناطیس‌زدا کم شده و اثر افزایش رلوکتانس بیشتر می‌شود تا جایی که اثر رلوکتانس بر اثر میدان مغناطیس‌زدا غلبه می‌کند.

به‌طور کلی و برای ابعاد مساوی آلیاژ در دو پیکربندی، در ضخامت‌های کمتر از 2.5 میلی‌متر ولتاژ خروجی پیکربندی 2 نسبت به پیکربندی 1 بیشتر است و در ضخامت‌های بالاتر بالعکس می‌شود. البته در واقعیت سیستم‌هایی با ضخامت آلیاژ بالاتر از 2 میلی‌متر بعلت نیاز به میدان‌های اعمالی خیلی قوی کاربرد عملی ندارند.

به‌طور مشابه، شبیه‌سازی با پارامترهای جدول 3 در حالتی که عرض نمونه آلیاژ تغییر می‌کند در "شکل 10" نشان داده شده است. منظور از عرض آلیاژ همان بعد عمود بر صفحه در "شکل‌های 1 و 2" است.

همان‌طور که "شکل 10" نشان می‌دهد، به‌طور کلی افزایش عرض آلیاژ در هر دو پیکربندی باعث افزایش ولتاژ خروجی به صورت خطی می‌شود. البته شیب این خط در پیکربندی 2 بیشتر از پیکربندی 1 است. در پیکربندی 1 افزایش ولتاژ به‌علت زیاد شدن سطح مقطع سیم‌پیچ برداشت کننده است در صورتی که در پیکربندی 2 ولتاژ بخاطر افزایش شار عبوری از مسیر شامل آلیاژ زیاد می‌شود. مزیتی که افزایش عرض آلیاژ در تولید ولتاژهای بالاتر دارد، این است که نیاز به میدان اعمالی بیشتری ندارد و فقط باعث بزرگ شدن ابعاد برداشت کننده می‌شود.

برای بررسی اثر تغییر طول نمونه آلیاژ در ولتاژ خروجی برداشت کننده، مدل پیکربندی‌های 1 و 2 با پارامترهای جدول 3 در طول‌های مختلف آلیاژ شبیه‌سازی شده‌اند. منظور از طول بعدی از نمونه است که در راستای اعمال کرنش نمونه قرار دارد. "شکل 11" نتایج این شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. مطابق "شکل 11"، ولتاژ خروجی پیکربندی 1 با تغییر طول نمونه عوض نمی‌شود. دلیل این رفتار ثابت ماندن رفتار مغناطیسی آلیاژ در راستای طولی و کم بودن تأثیر میدان مغناطیس‌زدائی در این راستا است. از سوی دیگر عرض و ضخامت نمونه آلیاژ ثابت است و سطح مقطع سیم‌پیچ برداشت‌کننده عوض نمی‌شود. بنابراین مطابق رابطه (9) تغییرات شار عبوری ثابت بوده و ولتاژ خروجی با توجه به سایر پارامترها مقدار ثابتی باقی می‌ماند.

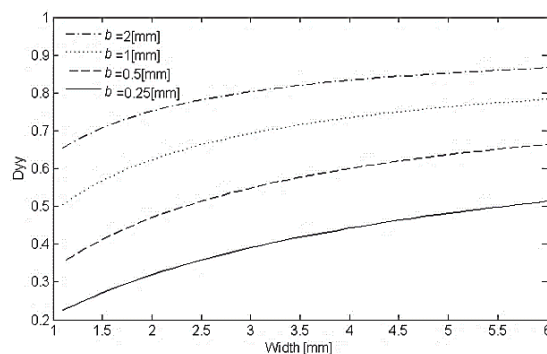


Fig. 8 Demagnetization factor along thickness of specimen versus width in various thicknesses

شکل 8 تغییر فاکتور مغناطیس‌زدائی در راستای ضخامت با تغییر عرض در ضخامت‌های مختلف

بعد از کالیبراسیون مدل با استفاده از داده‌های جدول 2، پارامترهای دو پیکربندی 1 و 2 مطابق جدول 3 طوری انتخاب می‌شوند که به مقادیر واقعی نزدیک بوده و قابلیت ساخت داشته باشند.

نتایج شبیه‌سازی مدل هریک از دو پیکربندی 1 و 2 با پارامترهای ارائه شده در جدول 3 در حین تغییر ضخامت آلیاژ در "شکل 9" نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی فرض شده که فاصله هوایی بین آلیاژ و هسته در پیکربندی 2 همواره ثابت می‌ماند. در واقع با هر مقدار افزایش ضخامت آلیاژ، طول فاصله هوایی به همان اندازه زیاد می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی در "شکل 9" نشان می‌دهد که برای پیکربندی 1 افزایش ضخامت به‌طور خطی ولتاژ خروجی را افزایش می‌دهد. این افزایش بعلت زیاد شدن ضخامت آلیاژ و در نتیجه افزایش سطح مقطع سیم‌پیچ برداشت کننده است. البته میدان مغناطیس‌زدائی هم روی تغییرات مغناطش اثر دارد که بعلت کوچک بودن مقادیر آن مطابق "شکل 7"، اثرات ناچیزی روی مغناطش ماده و نتیجتاً ولتاژ خروجی دارد.

جدول 2 خواص آلیاژ حافظه دار نیکل-منگنز-گالیم و داده‌های کالیبراسیون [18]

Table 2 MSMA properties and calibration data[18]					
کمیت	مقدار	واحد	کمیت	مقدار	واحد
$\rho K_1$	$1.9 \times 10^5$	$\text{j.m}^{-3}$	$\sigma^{s(2,1)}$	-2.3	MPa
$M^{sat}$	572490	$\text{A.m}^{-1}$	$f^{(2,1)}$	-3.3	MPa
$\epsilon^{r,max}$	6.412	%	$\sigma^{s(1,2)}$	-1.0	MPa
$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$	$\text{H.m}^{-1}$	$f^{(1,2)}$	0.0	MPa
$\bar{\sigma}$	$1.613 \times 10^8$	$\text{S.m}^{-1}$	$S1=S2$	$5.29 \times 10^{-11}$	$\text{Pa}^{-1}$

جدول 3 پارامترهای انتخاب شده برای سیستم برداشت انرژی

Table 3 Selected parameters for energy harvesting system		
پارامتر	مقدار	واحد
حداکثر کرنش	4	%
میدان یاباس	0.6	T
تعداد دور سیم‌پیچ برداشت کننده	500	tum
ابعاد آلیاژ	$15 \times 2.5 \times 1$	$\text{mm}^3$
ابعاد مقطع هسته	$15 \times 3.5$	$\text{mm}^2$
گذردهی نسبی هسته	2000	-
طول هسته	10	cm
عرض هسته	5	cm

ضخامت آلیاژ به صورت خطی افزایش می‌یابد. در پیکربندی هسته‌دار این رابطه خطی نیست و حتی فقط در ضخامت‌های کم افزایشی است و بعد از آن متوقف شده و حتی به صورت کاهشی در می‌آید.

افزایش عرض آلیاژ در هردو پیکربندی افزایش ولتاژ را با رابطه‌ای خطی در پی دارد. البته در پیکربندی هسته‌دار مقادیر این ولتاژها بیشتر بوده و شیب افزایش آن هم بیشتر است.

با افزایش طول آلیاژ، ولتاژ در پیکربندی که سیم‌پیچ دور آلیاژ قرار دارد تغییری نمی‌کند در حالی که در پیکربندی هسته‌دار علاوه بر بیشتر بودن مقادیر به صورت خطی هم افزایش می‌یابد.

چنانچه طول و عرض آلیاژ با توجه به محدودیت ساخت نمونه تعیین گردد، آلیاژ با ضخامت 2 میلی‌متر در پیکربندی 2 بیشترین انرژی برداشتی را ارائه می‌دهد. از سوی دیگر تامین میدان بایاس مورد نیاز برای برگشت‌پذیری کرنش‌ها در چنین فاصله‌ای (0.6 تسلا) با استفاده از آهنرباهای دائم امکان پذیر است. این در صورتیست که در پیکربندی 1 هرچه عرض و ضخامت آلیاژ را افزایش دهیم، ولتاژ برداشتی نیز افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که در مورد ابعاد بهینه آلیاژ که بیشترین ولتاژ را در سیم‌پیچ برداشت‌کننده القا کند بدون در نظر گرفتن اثر سایر متغیرها مثل میدان مغناطیسی بایاس، هسته فرومغناطیسی (در پیکربندی 2) و حتی اثر ابعاد بر یکدیگر نمی‌توان منحصرأ پاسخی ارائه کرد. برای به دست آوردن ابعاد بهینه در هر سیستم مورد نظر کافیست مطابق روش ارائه شده با مشخص کردن پارامترهایی که از محدودیت‌های تولید یا کاربرد هستند ابعاد بهینه آلیاژ را برای برداشت ماکزیمم انرژی مشخص کرد.

#### 5- مراجع

- [1] R. T. M. Karimi, S. Ziaeerad, Piezoelectric energy harvesting from bridge vibrations under moving consecutive masses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 108-118, 2016. (in Persian)
- [2] K. J. M. R. Asgharzade, A. Kianpour, M. Homayounsadeghi, Investigating Energy Harvesting from Unimorph Trapezoidal Beam Vibrations Using Distributed Parameters Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 96-102, 2014. (in Persian)
- [3] S. P. Beeby, M. J. Tudor, N. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 12, pp. R175, 2006.
- [4] R. J. Tickle, *Ferromagnetic shape memory materials*, PhD Thesis, University of Minnesota, Minneapolis, 2000.
- [5] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, *Introduction to electricity, electronics, and electromagnetics*, pp. 310-318: Prentice Hall, 2002.
- [6] I. Suorsa, J. Tellinen, K. Ullakko, E. Pagounis, Voltage generation induced by mechanical straining in magnetic shape memory materials, *Journal of Applied Physics*, Vol. 95, No. 12, pp. 8054-8058, 2004.
- [7] V. A. Chernenko, S. Besseghini, Ferromagnetic shape memory alloys: Scientific and applied aspects, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 142, No. 2, pp. 542-548, 2008.
- [8] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. Sankar, J. P. Liu, Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient, *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 7, pp. 821-842, 2011.
- [9] M. R. Zakerzadeh, S. Shaki, M. Ayati, O. Jedinia, Modeling and experimental verification of a magnetic shape memory alloy actuator behavior using modified generalized rate-dependent Prandtl-Ishlinskii model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 389-396, 2016. (in Persian)
- [10] I. Karaman, B. Basaran, H. Karaca, A. Karsilayan, Y. Chumlyakov, Energy harvesting using martensite variant reorientation

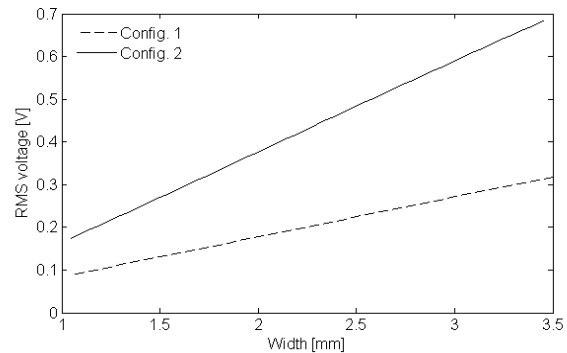


Fig. 10 RMS voltage versus MSMA width in two configurations

شکل 10 تغییرات ولتاژ با تغییر عرض آلیاژ در دو پیکربندی 1 و 2

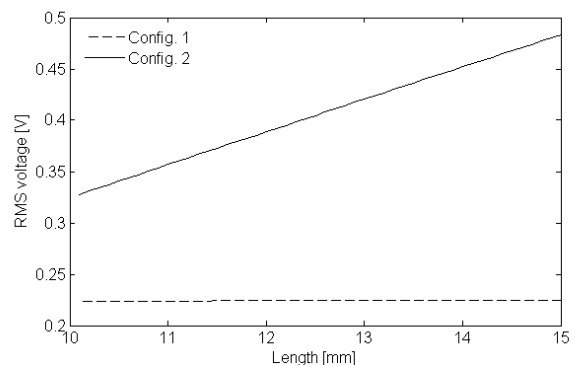


Fig. 11 RMS voltage versus MSMA length in two configurations

شکل 11 تغییرات ولتاژ با تغییر طول آلیاژ در دو پیکربندی 1 و 2

در مورد پیکربندی 2، "شکل 11" افزایش ولتاژ را با زیاد کردن طول نمونه نشان می‌دهد. در این پیکربندی با افزایش طول نمونه آلیاژ، قسمت بیشتر شار از مسیر شامل آلیاژ عبور می‌کند و در نتیجه، بیشتر تحت تأثیر تغییرات مغناطش حین کرنش قرار می‌گیرد و تغییرات شار و به دنبال آن ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد.

به طور خلاصه، چنانچه طول و عرض آلیاژ با توجه به محدودیت ساخت نمونه تعیین گردد، آلیاژ با ضخامت 2 میلی‌متر در پیکربندی 2 بیشترین انرژی برداشتی را ارائه می‌دهد. از سوی دیگر تامین میدان بایاس مورد نیاز برای برگشت‌پذیری کرنش‌ها در چنین فاصله‌ای (0.6 تسلا) با استفاده از آهنرباهای دائم امکان پذیر است. این در صورتیست که در پیکربندی 1 هرچه عرض و ضخامت آلیاژ را افزایش دهیم، ولتاژ برداشتی نیز افزایش می‌یابد.

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش، دو مدل از پیکربندی رایج در برداشت انرژی با آلیاژ حافظه دار مغناطیسی برای بررسی تغییرات ولتاژ خروجی در اثر تغییر ابعاد آلیاژ به کار گرفته شدند. در این مدل‌ها رفتار آلیاژ طی اعمال کرنش از روابط ساختاری به دست می‌آید. در ابعاد مختلف مقادیر فاکتور مغناطیس‌زدائی که در روابط ساختاری به کار می‌روند با استفاده از رابطه تحلیلی موجود برای نمونه‌های مواد فرومغناطیسی مکعب مستطیلی محاسبه و با داده‌های موجود در مرجع ارزیابی شده است. همچنین اثر تغییرات ابعاد روی مقادیر فاکتور مغناطیس‌زدائی در راستای طولی و راستای ضخامت بررسی و در تحلیل نتایج شبیه‌سازی دو سیستم بکار می‌رود.

تغییر ابعاد آلیاژ در هر دو پیکربندی باعث ایجاد تغییرات در ولتاژ خروجی می‌شود. ولتاژ خروجی در پیکربندی با سیم‌پیچ دور آلیاژ با افزایش



- Vol. 24, No. 9, pp. 95-101, 2015.
- [17] B. Kiefer, D. C. Lagoudas, Magnetic field-induced martensitic variant reorientation in magnetic shape memory alloys, *Philosophical Magazine*, Vol. 85, No. 33-35, pp. 4289-4329, 2005.
- [18] A. B. Waldauer, H. P. Feigenbaum, C. Ciocanel, N. M. Bruno, Improved thermodynamic model for magnetic shape memory alloys, *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, No. 9, 2012.
- [19] 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*, Vol. 26, No. 1, pp. 56-68, 2015.
- [20] A. Aharoni, Demagnetizing factors for rectangular ferromagnetic prisms, *Journal of applied physics*, Vol. 83, No. 6, pp. 3432-3434, 1998.
- [21] T. Shield, Magnetomechanical testing machine for ferromagnetic shape-memory alloys, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 74, No. 9, pp. 4077-4088, 2003.
- [22] J. D. Irwin, R. M. Nelms, *Basic engineering circuit analysis*, 9th ed., pp. 175-176: Wiley Publishing, 2008.
- [23] W. A. Roshen, Fringing field formulas and winding loss due to an air gap, *IEEE*, Vol. 43, No. 8, pp. 3387-3394, 2007.
- mechanism in a NiMnGa magnetic shape memory alloy, *Applied Physics Letters*, Vol. 90, No. 17, pp. 172505, 2007.
- [11] 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*, Vol. 21, No. 9, pp. 094018, 2012.
- [12] I. Nelson, C. Ciocanel, D. LaMaster, H. Feigenbaum, The Impact of Boundary Conditions on the Response of NiMnGa Samples in Actuation and Power Harvesting Applications, *Proceeding of ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, Utah, USA, September 16-18, 2013.
- [13] H. Sayyaadi, M. A. A. Farsangi, Frequency-dependent energy harvesting via magnetic shape memory alloys, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 11, pp. 115022, 2015.
- [14] A. J. Niskanen, I. Laitinen, Design and simulation of a magnetic shape memory (MSM) alloy energy harvester, *Advances in Science and Technology*, Vol. 78, No. 2, pp. 58-62, 2013.
- [15] M. Kohl, R. Z. Yin, V. Pinneker, Y. Ezer, A. Sozinov, A miniature energy harvesting device using martensite variant reorientation, *Materials Science Forum*, Vol. 738, No. 8, pp. 411-415, 2013.
- [16] A. Saren, D. Musiienko, A. Smith, J. Tellinen, K. Ullakko, Modeling and design of a vibration energy harvester using the magnetic shape memory effect, *Smart Materials and Structures*,