

آشنایی، کاربرد و خواص مواد حافظه‌دار مغناطیسی

چکیده: آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی زیر مجموعه‌ای از مواد محرک می‌باشند که شکل ماده و سایر ویژگی‌های مکانیکی آن در پاسخ به میدان‌های مغناطیسی و مکانیکی تغییر می‌کند. آلیاژهای حافظه‌دار در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان از جمله مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً بالا، خواص مکانیکی نسبتاً خوب، خستگی طولانی، شکل‌پذیری بالا و قابلیت انطباق با بدن در طیف گسترده‌ای از صنایع مورد توجه قرار گرفته‌اند. این آلیاژها مواد هوشمندی هستند که پس از تغییر شکل می‌توانند شکل اولیه خود را به یاد آورند. هدف از ارائه این مقاله آشنایی، کاربرد و بررسی خواص مواد حافظه‌دار مغناطیسی می‌باشد. در واقع با ارائه چند مدل مطالعه شده، معادلات ساختاری، خواص، کاربرد آن‌ها در حوزه‌های مختلف و نمودارها سعی در بررسی این مواد داشته‌ایم و به چالش‌های موجود از جمله وجود هیستریزس وابسته به نرخ نامتقارن همراه با اشباع‌های بزرگ و ارائه راهکار آن پرداخته‌ایم.

واژه‌های راهنما: مواد حافظه‌دار مغناطیسی، آلیاژ، کاربرد، خواص.

امین اسکندرزاده ثابت

دانشجوی دکتری

امیر نجیبی*

استادیار،

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه
سمنان، سمنان

مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶

A review of Introduction, application and properties of magnetic shape memory materials

**Amin
Eskandarzadeh
Sabet**
PhD student

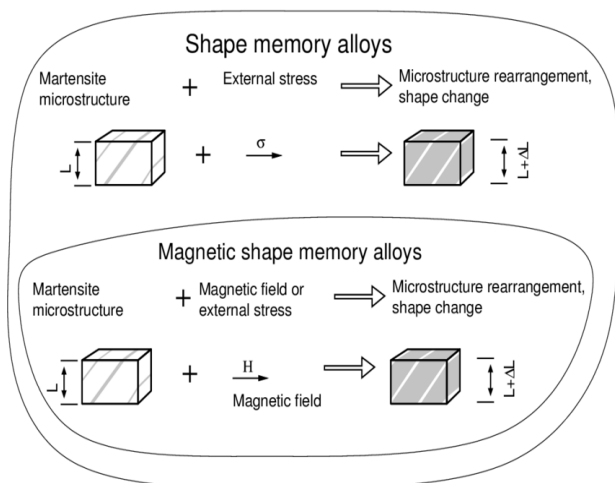
Amir Najibi*
Assistant Professor,
Faculty of
Mechanical Engineering,
Semnan University,
Semnan

Abstract: Magnetic shape memory alloys are a subset of excitatory materials whose material shape and other mechanical properties change in response to magnetic and mechanical fields. Memorable alloys in recent years due to their unique properties such as high corrosion resistance, relatively high electrical resistivity, relatively good mechanical properties, long fatigue, high ductility and adaptability to the body in a wide range of Industries have been considered. These alloys are smart materials that can recall their original shape after deformation. The purpose of this paper is to introduce, apply and study the properties of magnetic memory materials. In fact, by presenting several studied models, structural equations, properties, their application in different fields and diagrams, we have tried to study these materials and we have discussed the existing challenges, such as the existence of asymmetric rate-dependent hysteresis with large saturations and its solution.

Keywords: Magnetic shape memory materials, alloy, application, properties.

۱- مقدمه

تغییرات غیر خطی صورت میگیرد. به طور کلی آلیاژهای حافظه-دار مغناطیسی ممکن است بر اثر اعمال میدان مغناطیسی، تنش یا تغییرات دمایی دچار تغییر شکل شوند [۳]. در حالتی که تغییرات دمایی مورد نظر نباشند، در دماهای پایین و نزدیک دمای اتاق، ساختار این آلیاژها کریستالی مارتنزیتی است و با اعمال تنش و یا میدان مغناطیسی دچار تغییر شکل می‌شوند [۴]. خواص جالب و منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی از یک طرف و رفتار پیچیده آنها از طرف دیگر نیاز به مدل سازی رفتار این آلیاژها را روشن می‌سازد [۴]. تا کنون مدل‌های متعددی برای مدل‌سازی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی ارائه شده است. رویکرد به کار گرفته شده در اکثر این مدل‌ها کمینه کردن تابع انرژی آزاد سیستم به منظور یافتن ساختار تعادلی می‌باشد [۵]. مطابق شکل (۱) آنچه آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی را از آلیاژهای حافظه‌دار معمولی متمایز می‌کند و آن را در بین هر ماده ای کاملاً منحصر به فرد می‌کند این است که می‌توان با قرار گرفتن در معرض یک میدان مغناطیسی، ریز ساختار مارتنزیت را دستکاری کرد، این پدیده می‌تواند منجر به کرنش‌های بزرگ ماکروسکوپی چندین درصد شود که فقط توسط میدان مغناطیسی القا می‌شوند [۶].



شکل ۱ آلیاژهای حافظه‌دار و رابطه آن با آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی [۴]

۲- تعدادی مدل ترمومکانیکی مغناطیسی مواد MSMA (حافظه‌دار مغناطیسی)

مدل سازی MSMA در ۲ انجمن مورد بررسی قرار گرفته است. ۱: تیم متخصصان مغناطیس به ویژه مواد مغناطو کشسان. ۲: تیمی متشکل از فیزیکدان‌ها و مهندسين [۷]. جنبه اصلی مطالعه ما در پیوستگی نیروها می‌باشد، در انستیتو FEMTO-ST فرانسه یک تیم از مهندسان مکانیک روی این موضوع کار نمودند. تمایز بین مدل‌های مغناطیسی و مکانیکی را می‌توان در انتخاب نوع مقیاس بررسی کرد [۷]. در مقیاس میکروسکوپی بررسی کریستالوگرافی اطلاعات مکانیکی، چرخشی و مغناطیسی را به همراه دارد [۸]. در مقیاس موزوسکوپی، مرزهای بین فاز و نوع، همراه با مطالعه ریزساختار

آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی دسته جدیدی از مواد هوشمند به شمار می‌آیند که خواصی همچون کرنش‌های برگشت پذیر بزرگ و فرکانس عملکرد بالا از خود نشان می‌دهند. مشابه با آلیاژهای حافظه‌دار پاسخگو به حرارت، به آلیاژهای حافظه‌داری که در پاسخ به میدان مغناطیسی اعمالی خارجی، دچار تغییر شکل و ایجاد تنش می‌شوند، آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی می‌گویند.

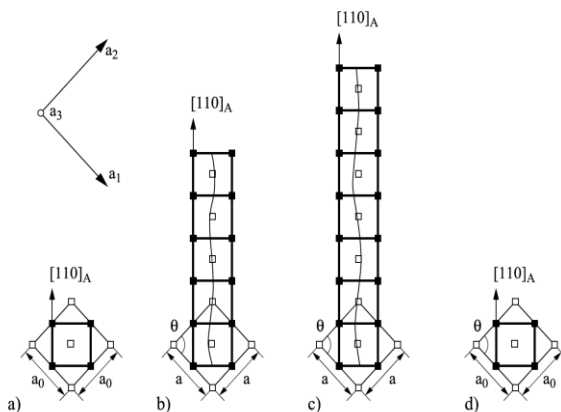
این مواد، همانند مواد مغناطو کشسان (magnetostrictive) بوده و عموماً آلیاژی از نیکل، منگنز و گالیوم می‌باشند. در مواد فرو مغناطیس، بازآرایی مجدد مغناطیسی در نتیجه هم‌راستا شدن ممان‌های مغناطیسی میکروسکوپی، در جهت میدان اعمالی می‌باشد. آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، هنگامی که حرکات دقیق و سریع نیاز باشد، مانند ربات‌ها، ابزارهای بیومدیکال، سوپاپ‌های حساس، دمپ کننده‌ها و ... کاربرد دارند. امروزه انواع زیادی از آلیاژهای حافظه‌دار کشف شده و توسعه پیدا کرده‌اند، بدون شک آلیاژهای حافظه‌دار جلوه‌ای از پیشرفت علم مواد همگام با صنعت و نیازهای روز جامعه است، به طوری که هم‌اکنون آلیاژهای حافظه‌دار در بسیاری از زمینه‌ها، از کاربردهای زیست پزشکی تا کاربردهای فضایی، استفاده‌های فراوانی پیدا کرده‌اند.

مواد حافظه‌دار مغناطیسی برای اولین بار در سال ۱۹۹۶، هنگامی که اوکالا و همکاران [۱] توانستند کرنش‌هایی تا میزان ۰/۲٪ را تحت میدان مغناطیسی متوسط و در غیاب تنش مکانیکی در تک کریستال Ni_2MnGa مشاهده کنند، به عنوان نوع جدیدی از مواد هوشمند شناخته شدند. تا به امروز، بیشترین کرنش برگشت پذیر مشاهده شده در این آلیاژها، تا میزان ۱۲٪ توسط سوزینوف و همکاران [۲] گزارش شده است، که این میزان کرنش یک یا حتی دو مرتبه بزرگتر از کرنشی است که در اثر میدان مغناطیسی در مواد مغناطو کشسان معمولی ایجاد می‌شود. این میزان کرنش حتی خیلی بزرگتر از کرنش ناشی از میدان الکتریکی در پیزوالکتریک‌ها می‌باشد. در آلیاژهای حافظه‌دار معمولی، سرعت فرآیند استتال مارتنزیتی به واسطه مدت زمان نسبتاً زیاد لازم برای انتقال حرارت محدود شده است اما از آنجاکه عملگری در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی بر اثر بازچینی واریانت‌های مارتنزیتی انجام می‌گیرد. فرکانس عملکرد این آلیاژها بسیار بالاتر از فرکانس عملکرد آلیاژهای حافظه‌دار معمولی و در حدود چند کیلوهرتز می‌باشد. کرنش‌های برگشت پذیر بزرگ به همراه فرکانس عملکرد بالا، این آلیاژها را به عنوان گزینه‌ای مناسب در طراحی عملگرها، حسگرها و برداشت کننده‌های انرژی مطرح کرده است. کرنش ناشی از میدان مغناطیسی در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، غیر خطی، وابسته به میزان تنش اعمالی، همراه با هیستریزس و در نتیجه وابسته به تاریخچه بارگزاری است، پدیده غیرخطی هیستریزس در این آلیاژها یک چالش اساسی در استفاده از آنها می‌باشد [۳]. در کنار کرنش غیرخطی و تکرار پذیر ناشی از اعمال بارگذاری مکانیکی و میدان مغناطیسی به طور همزمان، در خواص مغناطیس شوندگی ماده

۵-۱- انواع فازها

در اینجا نیکل، منگنز- گالیوم با ترکیبی مشابه ترکیب استوکیومتری $Ni_2 - Mn - Ga$ مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۴]. در دمای بالا، فاز آستنیت A یک ساختار هسلر $L2_1$ را که مجموعه‌ای از هشت شبکه مکعب می‌باشد را نشان می‌دهد [۱۴]. یک نمایش ساده را در نظر می‌گیریم: یک مکعب با طول ضلع a_0 ، در پی خنک شدن یا اعمال تنش این ماده می‌تواند به ۳ مرحله اصلی دیگر تبدیل گردد (شکل ۲) [۱۴].

- مارتنزیت درجه ۲، با تعدیل اتمی از یک دوره تناوبی، ۵ لایه اتمی $5M$ نامیده می‌شود، که به وسیله‌ی ۲ پارامتر شبکه a مربوط به ۲ محور طولانی و c مربوط به محور کوتاه مشخص شده است [۱۵].
- مارتنزیت مونوکلینیک مرکزی همراه با یک مدولاسیون اتمی، با تناوبی از ۷ لایه، $7M$ نامیده می‌شود. که به وسیله‌ی ۴ پارامتر a و b مرتبط با ۲ محور طولانی، c مرتبط با محور کوتاه و یک زاویه اعوجاج مشخص شده است [۱۵].
- مارتنزیت درجه دوم غیرمدولاسیون، همچنین به عنوان NMT (برای ساختار چهارضلعی غیرمدولاسیون) شناخته می‌شود، با ۲ پارامتر شبکه‌ای a مربوط به ۲ محور کوتاه و c محور طولانی مشخص می‌گردد [۱۵].



شکل ۲ ساختار کریستالوگرافی (a) $NiMnGa$ آستنیت $L2_1$ (b) مارتنزیت درجه ۲ ($5M$) (c) مارتنزیت مونوکلینیک مدوله شده ($7M$) (d) مارتنزیت درجه ۲ غیرمدوله شده (NMT) [۴]

مقادیر پارامترهای شبکه‌ای بسته به ترکیب آلیاژ مورد نظر متفاوت است. با این حال، حداکثر مقادیر تغییر شکل با بازآرایی مارتنزیتی به ترتیب ۶٪، ۵٪، ۱۱٪، ۱۰٪ و ۱۹٪-۱۵٪ برای مارتنزیت $5M$ ، $7M$ و NMT می‌باشد [۱۶]. فعال سازی میدان مغناطیسی اکنون در دو مورد اول امکانپذیر است [۱۶]. با این حال در مورد مارتنزیت NMT فقط بازآرایی توسط تنش مکانیکی در آزمایشات مشاهده شده است [۱۶]. جزئیات بیشتری در خصوص مارتنزیت $7M$ و NMT توسط سوزینو و همکاران بررسی گردیده است [۱۶]. از این پس ما بر روی مارتنزیت $5M$ تمرکز بیشتری خواهیم نمود زیرا در حال حاضر این ساختار پرکاربردترین ماده

انواع جفت و حوزه‌های Weiss مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا مروری بر تعدادی مدل ارائه می‌نماییم. مدل‌هایی که در این قسمت ارائه شده در واقع شامل بازآرایی مارتنزیت بشقابی می‌باشد [۹]. چرنکو و همکاران، پونز و همکاران و هیرسینگر و همکاران به تحول فاز شبه الاستیک پرداخته‌اند. از آنجاکه جهت-گیری مجدد مارتنزیت بشقابی توسط یک میدان مغناطیسی نیروی اصلی تحریک می‌باشد بر روی این اثر تمرکز شده است [۱۰].

۳- مدل هندلی، موری و همکاران

در مدل تک بعدی آنها، نویسندگان ۲ شکل از انرژی را در نظر گرفتند. منشاء یکی مکانیکی با یک عملکرد ترکیبی از تنش اعمال شده و دیگری با منشاء مغناطیسی $M_s H$ متناسب با H . پارامترهای M_s و ϵ_0 و σ_0 ثابت می‌باشند. به علاوه فرض می‌شود کرنش دارای ۲ مقدار ϵ_0 و σ_0 می‌باشد، مرز بین این ۲ مقدار از رابطه تعادل انرژی $M_s H = (\sigma + \sigma_0) \epsilon_0$ به دست می‌آید [۱۰]. همان نویسندگان رویکرد دومی را بر اساس ترمودینامیک با بیان انرژی آزاد با در نظر گرفتن انرژی Zeeman، انرژی ناشی از ناهمسانگرد مغناطیسی، انرژی الاستیک و یک انرژی ناشی از تنش خارجی ارائه نمودند [۱۱]. با به حداقل رساندن انرژی آنها کسر حجمی از مارتنزیت را به عنوان تابع میدان مغناطیسی و تنش به دست آوردند [۱۱]. آنها یک میدان اجباری مغناطیسی (منفی یا مثبت بستگی به جهت تغییرات میدان دارد) که بستگی به تنش داشته را به جهت محاسبه هیستریزس مکانیکی ایجاد شده اضافه نمودند [۱۲].

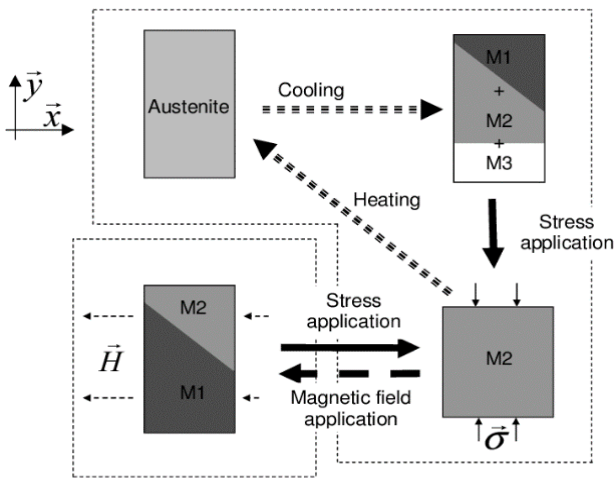
۴- ریز مغناطیسی

تیکل و جیمز یک مدل ۳ بعدی که در آن ۳ گونه مارتنزیتی برای تبدیل مکعب به درجه دوم می‌باشد را در نظر گرفتند [۱۳]. با اضافه نمودن اثر میدان مغناطیسی زدایی، مقدار تغییرات با حداقل نمودن انرژی به دست می‌آید. دسیمور و جیمز تئوری ریزمغناطیسی که برای مواد مغناطوکشسان و مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گرفت را به MSMA بسط دادند [۱۳]. هدف از چنین مدلی توصیف تغییرات ریز ساختار مغناطیسی به عنوان تابع میدان مغناطیسی اعمال شده و استنباط روابط ماکروسکوپی بین تغییر شکل و میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۳].

۵- کریستالوگرافی Ni_2MnGa

در روش مورد بررسی توسط مولنر و همکاران خصوصیات مکانیکی به ریزساختارهای ماده وابسته می‌باشد [۱۳]. با استفاده از اندازه‌گیری پراش اشعه X همراه با میکروسکوپ الکترونی عبوری، میتوان شبکه‌های آستنیتی و مارتنزیتی را شناسایی نمود و بررسی کرد که چه تحول کریستالوگرافی در حال انجام می‌باشد، همچنین پارامترهای شبکه اندازه‌گیری می‌گردد. این کار روی یک نمونه $NiMnGa$ توسط Ga و همکاران انجام گرفت [۱۴].

تغییر می‌دهد. استفاده از میدان مغناطیسی گزینه‌ایست که محور مغناطیسی ساده (یکسان با محور کوتاه) در امتداد جهت میدان می‌باشد (در شکل ۵) و سبب تغییر شکل می‌گردد. از تعادل بین این ۲ اثر می‌توان برای ایجاد محرک استفاده کرد [۱۷].



شکل ۵ تبدیل و بازآرایی مارتنزیتی [۱۷]

۵-۳- محاسبه میکروساختارها

در اینجا به طور خلاصه تعدادی المان را بررسی می‌کنیم. F_k تانسور گرادیان تبدیل آستنیت A به نوع مارتنزیت M به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷].

$$dx(M) = F_k \cdot dX(A)$$

(۱) تانسور کرنش لاگرانژ گرین به صورت رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$E_k^{tr} = \frac{1}{2} (F_k^T F_k - 1) = \frac{1}{2} (u_k^2 - 1) \quad (2)$$

با تنوع سه گانه برای مکعب (تبدیل درجه ۲) [۱۷]

$$U_1 = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$

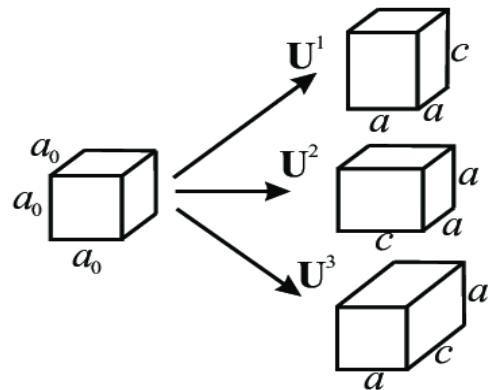
$$U_3 = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix}$$

$$\text{و } \beta = \frac{c}{a_0}, \alpha = \frac{a}{a_0} \text{ (مطابق شکل ۳)}$$

برای تغییر جهت مجدد M_k به M_l تانسور کرنش به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$E_{kl}^{re} = \frac{1}{2} (U_1^2 - U_2^2) \quad (4)$$

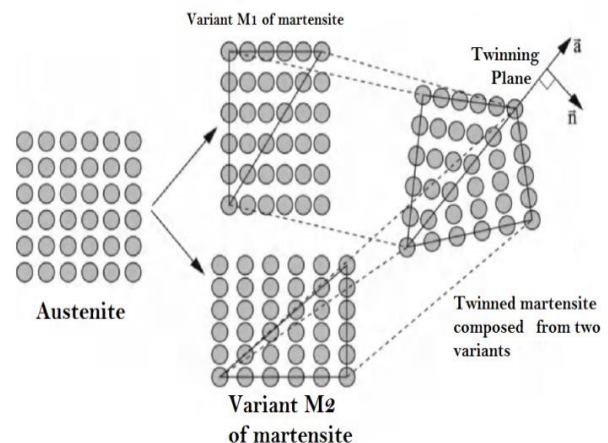
مارتنزیتی می‌باشد، در نتیجه آزمایشات بیشتری در این خصوص وجود دارد و مواد به راحتی در دسترس هستند [۱۶]. با این وجود ابزارهای مورد استفاده به اندازه کافی عمومی بوده که در انواع مختلف MSMA قابل استفاده هستند [۱۶]. یک مارتنزیت 5M ممکن است در ۳ فرم وجود داشته باشد. این بدلیل ساختار درجه دوم آن می‌باشد. این اقسام در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. از علامت‌های M_1 ، M_2 و M_3 برای نشان دادن انواع مختلفی از مارتنزیت که به ترتیب محور کوتاه خود را در امتداد محورهای x ، y و z دارند استفاده می‌نماییم [۱۷].



Austenite

Martensite

شکل ۳ ۳ نوع مارتنزیت با تغییر شکل از شبکه مکعبی به شبکه درجه ۲ [۲۶]



شکل ۴ موقعیت دو بعدی: یک مکعب (چپ) و دو نوع مارتنزیت M_1 و M_2 کنار هم [۱۷]

۵-۲- تبدیل و بازچینی

شکل ۵ رفتار کلی یک MSMA را نشان می‌دهد. در دمای بالا، آلیاژ در حالت آستنیتی قرار دارد. پس از خنک شدن، نمونه شامل ۳ نوع مارتنزیت با نسبت مساوی است. در نتیجه هیچ تغییر شکل ماکروسکوپی رخ نمی‌دهد. استفاده از تنش فشاری باعث ایجاد آن می‌شود که محور کوتاه آن در جهت آن تنش قرار داشته باشد (M_2 در شکل ۵) و در نتیجه شکل هندسی نمونه را

(۲) برای پیدا کردن راه حل، محاسبه می‌نماییم:

$$\lambda = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{2}{\delta}} \right) \quad (۱۳)$$

$$\beta = \frac{c}{a_0} = \alpha = \frac{a}{a_0} = 1.0188 \text{ Ni}_2 - \text{Mn} - \text{Ga} \text{ برای}$$

$$\lambda = 0/3083, 0/9589$$

- برای M_1 به M_2 :

$$E_{12}^{re} = \frac{1}{2} (U_2^2 - U_1^2) = \text{diag}(0/0593, -0/593, 0) \quad (۱۴)$$

- برای A به (M_2, M_1) :

$$E^{tr} = \frac{1}{2} (U_{tw}^2 - 1) \quad (۱۵)$$

برای $U_{tw} = \lambda U_2 + (1 - \lambda) U_1$ و نهایتاً

$$E^{tr} = \text{diag}(-0/0224, 0/0004, 0/0190)$$

۶- خصوصیات و کاربردها

در اینجا به بررسی خصوصیات آلیاژ حافظه دار مغناطیسی تولیدی شرکت GoodFellow می‌پردازیم:

۶-۱- خواص

- اثر حافظه دار بودن مغناطیسی تا ۶٪ ازدیاد طول در یک میدان مغناطیسی [۱۹].
- این مواد اثر معکوس مغناطوکشسان یا ویلاری را به نمایش می‌گذارند [۱۹].
- اثر آلیاژ حافظه دار با تغییر شکل ناشی از اعمال میدان مغناطیسی همانند تغییر شکل ناشی از دما می‌باشد [۱۹].
- اگر ماده کاملاً کشیده یا فشرده شود تغییری در مقاومت ایجاد می‌شود [۲۰].
- خواص فنر کنترل شده را به نمایش می‌گذارد [۲۰].

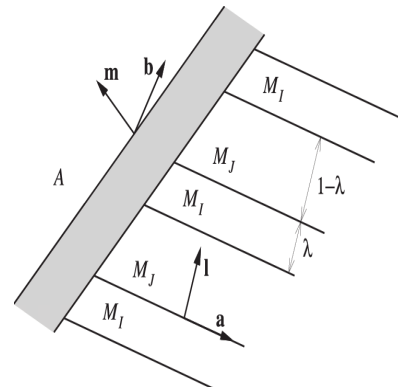
خصوصیات ماده در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ خصوصیات ماده حافظه پذیر مغناطیسی

ماده	NiMnGa تک کریستال
افزایش طول در میدان مغناطیسی	تا ۶٪- غالباً ۵٪-۳٪
پاسخ	۱-۲ KHZ
چگالی نیرو	حدود ۲ Mpa
میدان مغناطیسی	< ۰/۸ T
دمای کوری	۹۵ - ۱۰۵ C
حد دمای بالا	تبدیل مارتنزیت به آستنیت در ۷۰ C

توجه داشته باشید که رابطه بین آستنیت و مارتنزیت فقط در قالب دو قلو در مقابل آستنیت می‌تواند وجود داشته باشد (شکل ۶). در واقع، CTM (تئوری کریستالوگرافی مارتنزیت) راه حل معادله دوقلوسازی را ارائه می‌دهد [۱۷]:

$$QU_i - U_j = a \otimes \hat{n} \quad (۵)$$



شکل ۶ مارتنزیت دوقلو و تشکیل یک رابط با آستنیت [۲۵]

اجازه دهید این را برای مکعب به کار ببریم، ما باید اقسام ۱ و ۲ را مشابه محاسبات زیر به دست آوریم. در اینجا R چرخش ۱۸۰ درجه ماتریس حول محور \hat{e} بوده که به صورت زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$\hat{e} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۶)$$

به راحتی $U_2 = R^T U_1 R$ و به دست می‌آوریم [۱۷]:

$$a = \frac{\sqrt{2}(\beta^2 - \alpha^2)}{\beta^2 + \alpha^2} \begin{pmatrix} -\beta \\ \alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \hat{n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۷)$$

$$a = \frac{\sqrt{2}(\beta^2 - \alpha^2)}{\beta^2 + \alpha^2} \begin{pmatrix} -\beta \\ -\alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \hat{n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۸)$$

توجه شود که تمام این محاسبات در شکل ۴ نشان داده شده است. در صورت لزوم Q از معادله ۵ به دست می‌آید. معادله سازگاری بین آستنیت و چند نوع مارتنزیت M_i/M_j به ترتیب $1 - \lambda$ و λ به صورت زیر است [۱۷]:

$$Q'(\lambda QU_j - (1 - \lambda) U_i) = 1 + b \otimes m \quad (۹)$$

ما فرض خواهیم کرد که معادله دوقلو برای انواع i و j یک راه حل دارد. بال و جیمز روشی را برای دستیابی به راه حل معادله رابط آستنیت / مارتنزیت ارائه داده‌اند [۱۸].

(۱) محاسبه

$$\delta = a \cdot U_i (U_i^2 - 1)^{-1} \hat{n} \quad (۱۰)$$

$$\eta = \text{tr}(U_i^2) - \det(U_i^2) - 2 + \frac{\|a\|^2}{2\delta} \quad (۱۱)$$

معادله برای رابط آستنیت / مارتنزیت راه حلی دارد اگر و تنها

اگر:

$$\delta \leq -2 \quad \text{و} \quad \eta \geq 0 \quad (۱۲)$$

۶-۲- کاربردها

مغناطیسی متغیر تحت تنش متفاوت می‌باشد، که می‌تواند برای برداشت کننده‌های انرژی ارتعاشی استفاده شود [۲۶].

۶-۲-۱- عملگرها

۶-۲-۴- دمپرهاى ارتعاشی

از همان خصوصیتی که برای ایجاد برداشت کننده‌های انرژی استفاده شده است می‌توان برای کاهش ارتعاشات مکانیکی استفاده نمود [۲۶].

۶-۲-۵- سنسورها

سنسور (sensor) یا حس کننده می‌تواند کمیت‌هایی مانند سرعت، میدان مغناطیسی، کرنش، فاصله، فشار، حرارت، رطوبت، دما، و ... را به کمیت‌های الکتریکی پیوسته (آنالوگ) یا غیرپیوسته (دیجیتال) تبدیل کند و آن‌ها را محاسبه کند بنابراین می‌توان با استفاده از خصوصیات مواد آن‌ها را ساخت [۲۶].

۷- دسترسی پذیری

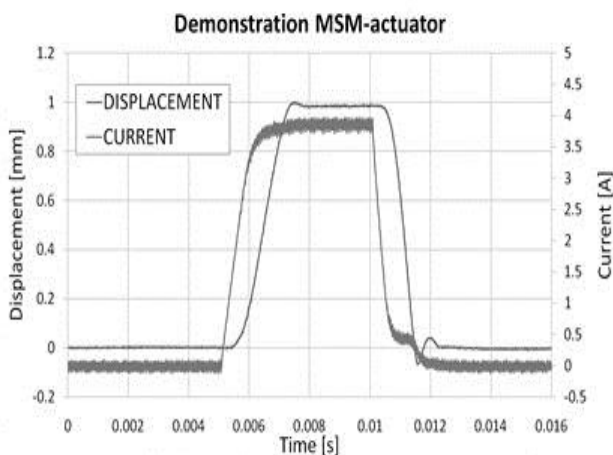
به جهت به حداقل رساندن انرژی مغناطیسی مورد نیاز برای کشیدن مواد، یک مقطع عرضی نازک و گسترده ترجیح داده می‌شود و از آنجا که کشش یک مضرری از طول می‌باشد یک نوار نسبتاً طولانی ترجیح داده می‌شود. به عنوان مثال شرکت GoodFellow موادی با ابعاد زیر پیشنهاد می‌دهد:

- $1T \times 2/5W \times 20L$ in mm
- $1T \times 5W \times 20L$ in mm
- $2T \times 5W \times 20L$ in mm

این ابعاد استاندارد شرکت‌های تولیدی می‌باشد [۱۹]. در جدول ۲ به مقایسه کرنش، فرکانس و چگالی انرژی مواد هوشمند پرداخته شده است.

۸- نمودار

در زیر اشکال ۹-۷ بررسی عملکرد مواد حافظه‌دار مغناطیسی را نشان می‌دهند [۱۹]:



شکل ۷ پاسخ آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به سیگنال کنترلی [۱۹]

وظیفه عملگر، یا Actuator که نوعی موتور است در شیرهای کنترل، تأمین نیروی لازم جهت باز و بسته کردن شیر و قراردادن آن در موقعیت مطلوب و متناسب با سیگنال ارسالی از طرف کنترلر ... است [۲۰]. عملگرها در انواع مختلف پنوماتیکی، الکتریکی یا خود عملگر (Self Acting) موجود بوده و با توجه به وضعیت سیستم انتخاب و استفاده می‌گردند [۲۰]. در واقع از اثر مواد حافظه‌پذیر مغناطیسی برای طراحی عملگرهایی استفاده می‌گردد که آن عنصر بر اساس یک میدان مغناطیسی کشیده می‌شود [۲۱]. کشیدگی می‌تواند با استفاده از میدان مغناطیسی در زاویه ۹۰ درجه نسبت به میدان اصلی، یا به طور موثر با استفاده از فنر معکوس گردد [۲۱]. تغییر شکل بسیار سریع بوده و سیکل آن ۱ تا 3 KHZ می‌باشد [۲۲]. در طول آزمایش عمر خستگی چندین میلیون چرخه بوده است [۲۲]. این مواد دارای خروجی کرنش بیشتری نسبت به مواد دیگر می‌باشند (۱۰ تا ۱۰۰ برابر) [۲۲]. آن‌ها همچنین تراکم انرژی بالاتری را به طور معمول تا $100 \frac{KJ}{m^3}$ در مقایسه با $14-30 \frac{KJ}{m^3}$ مواد مغناطوکشسان و $2-0/8 \frac{KJ}{m^3}$ مواد پیزو دارا می‌باشند [۲۳].

۶-۲-۲- سوئیچ‌های مدار شکن / فیوزها

این قطعه که به آن مدار شکن یا قطع کننده مدار گفته می‌شود، یک کلید قطع و وصل (سوئیچ) اتوماتیک است که از مدار الکتریکی در برابر آسیب‌های ناشی از اضافه جریان که معمولاً به خاطر اضافه بار یا اتصال کوتاه ایجاد می‌شود، محافظت می‌کند [۲۴].

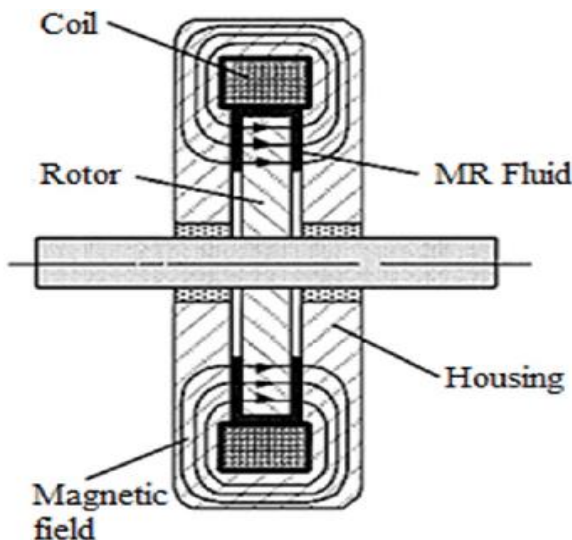
۶-۲-۳- برداشت کننده‌های انرژی

برداشت انرژی یا جمع‌آوری انرژی به معنای جمع‌آوری انرژی‌های کوچکی است که ممکن است به هر شکلی هدر رود. می‌تواند به صورت نور، صدا، گرما، لرزش و یا حرکت باشد [۲۵]. از این انرژی جمع‌آوری شده در موارد زیر استفاده می‌شود [۲۵]:

- افزایش کارایی یا راندمان مانند استفاده از گرمای کامپیوتر
- برای تأمین بخشی از انرژی خود کامپیوتر
- به وجود آمدن تکنولوژی‌های جدید مانند شبکه سنسورهای بی‌سیم
- همچنین در این روش می‌توان برای وسایل الکترونیکی از باتری‌های بسیار کوچک تری استفاده کرد. که این امر خود مزایای بسیاری دارد، از قبیل:
- عدم نیاز به نگهداری و تعمیر باتری
- مناسب با محیط زیست
- استفاده در تجهیزات جدید مانند استفاده از سنسورهای زیر آب
- کشش یا فشرده‌سازی مواد موجب تغییر هر میدان مغناطیسی که در آن قرار گرفته است می‌گردد، که معروف به نفوذپذیری

این آلیاژها موارد استفاده وسیعی در صنعت، هنر، پزشکی، مهندسی و ... دارند که در زیر به کاربرد آنها اشاره گردیده است: اتصال لوله، فعال کننده نیرو در مدارهای الکتریکی، شیر اطمینان، شیر کنترل سیال، قاب عینک، شیشه‌های فوتوکرومیک، دندانپزشکی، ایمپلنتهای پزشکی، فیلتر خونی از جنس سیمهای NiTi، ظروف ترموستاتیک قهوه، stent های جراحی، نگهدارنده‌ها (clamps)، مجسمه‌ها، اجزای دمپرها سازها برای جلوگیری از خسارات ناشی از زلزله، اتصال تاندون به استخوان در پزشکی، پینها و سیمهای راهنما در پزشکی، ابزارهای جراحی خمشو، آنتن ماهواره، کنترل تعادل تیغه‌های روتور هلی کوپترها، کاهنده صدای موتور هواپیما، باتیک، کلاچ و ترمز خودرو، سیستم تعلیق و ...

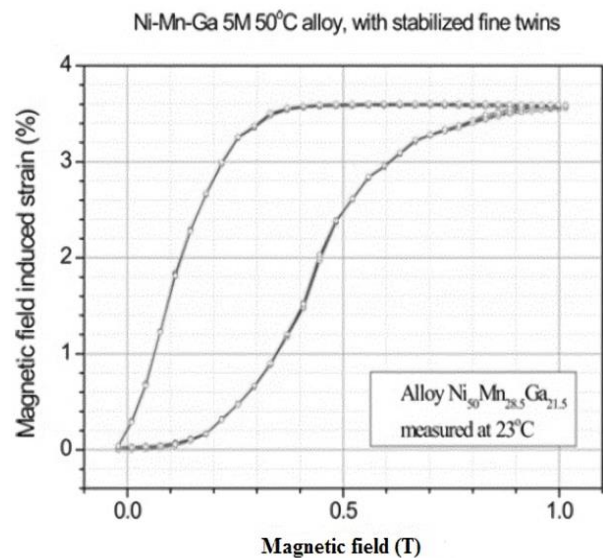
به عنوان مثال یک روش نوین در سیستم ترمز خودرو استفاده از سیال مغناطیسی می‌باشد در واقع وظیفه اصلی سیستم ترمز کاهش سرعت یا توقف کامل مکانیزم در حال حرکت یا خودرو است. از ترمز برای تنظیم یا محدود کردن سرعت خودرو استفاده می‌شود. از فواید ترمزهای سیال مغناطیسی میتوان به کنترل گشتاور ترمزی مورد نیاز به کمک تنظیم قدرت میدان مغناطیسی، کاهش ارتعاش و نویز، پاسخ سریع، کاهش ساییش و انرژی مصرفی پایین و ساختار ساده اشاره کرد. در شکل ۱۰ ساختار متداول این ترمزها را می‌توان مشاهده کرد. همان طور که مشخص است، در این کاربرد از مود برشی سیال مغناطیسی استفاده شده است. برای استفاده گسترده سیال مغناطیسی در کاربردهای متنوع مهندسی باید ثبات و پایداری این مواد بررسی شود.



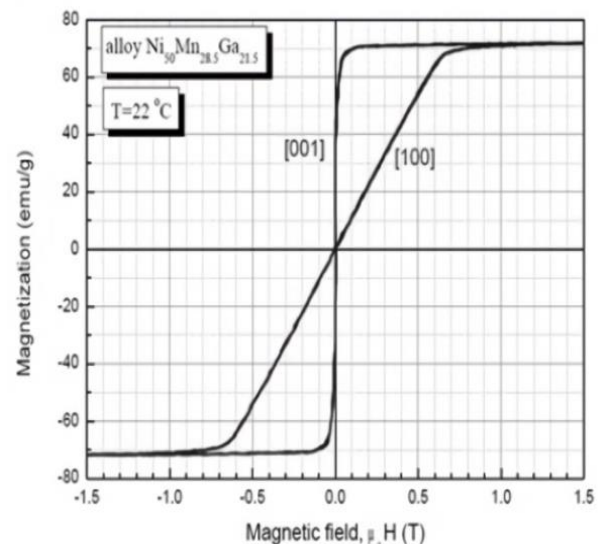
شکل ۱۰ شماتیک ترمز سیال مغناطیسی [۲۴]

۱۰- نتیجه گیری

آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی Ni-Mn-Ga موادی با کاربرد در حوزه‌های سنسور، محرک و ... با چشم انداز بسیار خوبی می‌باشند. هدف از ارائه این مقاله آشنایی، کاربرد و خواص مواد حافظه‌دار مغناطیسی می‌باشد. در واقع با ارائه چند مدل مطالعه شده، معادلات ساختاری، خواص، کاربرد و نمودارها سعی در



شکل ۸ وابستگی کرنش به رفتار سطح [۱۹]



شکل ۹ میدان مغناطیسی در حالت‌های فشاری و کششی [۱۹]

جدول ۲ مقایسه مواد

نوع ماده	کرنش	فرکانس	چگالی انرژی
حافظه‌دار مغناطیسی	<۶٪	<۲ KHZ	<۱۰۰ $\frac{KJ}{m^3}$
ماده حافظه‌دار حرارتی	<۸٪	<۳ HZ	۱۰۰۰۰ $\frac{KJ}{m^3}$
ماده پیزوالکتریک	۰/۰۴ - ۰/۰۷٪	۱۰۰۰ S KHZ	۰/۸ - ۲ $\frac{KJ}{m^3}$
ماده مغناطوکشسان	۰/۱۴ - ۰/۲٪	۱۰۰۰ S KHZ	۱۴ - ۳۰ $\frac{KJ}{m^3}$

۹- نمونه‌های کاربردی

مراجع

- [1] Chen, Xue, and Yongjun, He., Thermo-magneto-mechanical coupling dynamics of magnetic shape memory alloys, *International Journal of Plasticity* 129 (2020): 102686.
- [2] Sozinov, A., Lanska, N., Soroka, A., Zou, W., 12% magnetic field-induced strain in Ni-Mn-Ga-based non-modulated martensite, *Applied Physics Letters*, Vol. 102, No. 2, pp. 021902, (2013).
- [3] Golub, V., et al., "Magnetism of nanotwinned martensite in magnetic shape memory alloys." *Journal of Physics: Condensed Matter* 32.31 (2020): 313001.
- [4] Yan, Hai-Le., et al. "Impact of B alloying on ductility and phase transition in the Ni-Mn-based magnetic shape memory alloys: Insights from first-principles calculation." *Journal of Materials Science & Technology* 74 (2021): 27-34.
- [5] D'Silva, Glen J., Heidi P. Feigenbaum, and Constantin Ciocanel., Visualization of magnetic domains and magnetization vectors in magnetic shape memory alloys under magneto-mechanical loading, *Shape memory and superelasticity* 6.1: 67-88, (2020).
- [6] MOOSAVI, M. R., & Arghavani, J. (2017). A thermodynamically consistent two-dimensional constitutive model for magnetic shape memory alloys. (2017).
- [7] Gauthier, J., Modélisation des alliages à mémoire de forme magnétiques pour la conversion d'énergie et leur commande, PhD thesis, University of Franche Comté, (2007).
- [8] Chernenko, V., L'vov, V., Cesari, E., Rudenko, A., Date, H., Matsumoto, M., Kanomatad, T., Stress-strain behaviour of Ni-Mn-Ga alloys: experiment and modelling, *Mat. Sc and Eng. A*, vol. 378, pp. 349-352, (2004).
- [9] Pons, J., Cernenko, V., Cesari, E., L'vov V., Stress - strain-temperature behavior for martensitic transformation for Ni-Mn-Ga single crystal compressed along $\langle 001 \rangle$ and $\langle 110 \rangle$ axes, *J. de Phys. IV*, vol. 112, pp. 939-942, (2003).
- [10] Hirsinger, L., Creton, N., Lexcellent, C., Stress-induced phase transformations in Ni-Mn-Ga alloys: experiments and modelling, *Mat. Sc and Eng. A*, vol. 378, pp. 365-369, (2004).
- [11] Caputo, Matthew P., et al., 4D printing of net shape parts made from Ni-Mn-Ga magnetic shape-memory alloys. *Additive Manufacturing* 21, pp. 579-588, (2018).

بررسی این مواد داشته‌ایم. یکی از مهمترین چالش‌ها در استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی وجود هیستریزیس وابسته به نرخ نامتقارن و همراه با اشباع‌های بزرگ می‌باشد. برای رفع این مشکل، رفتار هیستریزیس موجود در این مواد را مدلسازی می‌کنند. مدل پرنتل-ایشلینسکی بدلیل سادگی و دارا بودن معکوس تحلیلی، یکی از مدل‌های پرکاربرد در این حوزه می‌باشد. این مدل در دو نوع مستقل از نرخ و وابسته به نرخ ارائه شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک، هیستریزیس موجود در رفتار آلیاژهای مغناطیسی افزایش می‌یابد. بنابراین مدل مستقل از نرخ پرنتل-ایشلینسکی نمی‌تواند این تغییرات را در نظر بگیرد. برای حل این مشکل با استفاده از تست تجربی، ولتاژ ورودی در فرکانس‌های تحریک 0.05 تا 0.4 هرتز به عملگر آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی اعمال شده و خروجی موقعیت عملگر نیز بوسیله سنسور القایی اندازه‌گیری می‌شود. مدلسازی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی با مدل تعمیم یافته پرنتل-ایشلینسکی وابسته به نرخ ارائه شده و مدل اصلاح شده آن نیز پیشنهاد شده است. برای افزایش توانایی مدل در توصیف رفتار هیستریزیس اشباع و نامتقارن آلیاژهای مغناطیسی مدل اصلاح شده جدیدی با به کار بردن تابع تانژانت هیپربولیک در خروجی مدل ارائه شده است. برای آموزش مدل‌های مذکور دو فرکانس تحریک 0.05 و 0.2 هرتز انتخاب شده و پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با این مجموعه داده بدست آمده است. اعتبارسنجی مدل‌ها نیز در فرکانس 0.1 ، 0.3 و 0.4 هرتز انجام گرفته است. که نتایج نشان می‌دهد مدل اصلاح شده بدلیل استفاده از تابع تانژانت هیپربولیک بهتر توانسته هیستریزیس‌های نامتقارن و بسیار اشباع شده در رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی را توصیف کند.

کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، هنگامی که حرکات دقیق و سریع نیاز باشد، مانند ربات‌ها، ابزارهای بیومدیكال، سوپاپ‌های حساس، دمپ‌کننده‌ها و... دوچندان می‌گردد. حوزه‌های بررسی شده در خصوص این مواد در مراحل ابتدایی بوده و یکی از اولویت‌های اصلی صنایع مختلف به واسطه نرخ کرنش، فرکانس و چگالی انرژی مناسب می‌باشد.

۱۱- علائم و اختصارات

M	فاز مارتنزیت
A	فاز آستنیت
F_k	تانسور گرادیان تبدیل آستنیت A به نوع مارتنزیت M
E_k^{tr}	تانسور کرنش لاگرانژ گرین
dx	المان خط در پیکربندی مرجع
dX	المان خط در پیکربندی جاری
U_k	تغییر مکان ذره
R	تانسور چرخش متعامد
\otimes	ضرب کرونگر
diag	ماتریس قطری
tr	جمع عنصرهای قطر اصلی ماتریس
\hat{n}	بردار نرمال
a و C	ابعاد در فاز مارتنزیت
a_0	ابعاد در فاز آستنیت
Q	دوران

- [19] <https://www.azom.com/> Magnetic Shape Memory Alloy – Introduction, Properties and Applications, Azo Materials, 2014.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_shape-memory_alloy, (2020).
- [21] Kők, Medika, S., Burcu Durğun, and Ecem Özen., Thermal analysis, crystal structure and magnetic properties of Cr-doped Ni–Mn–Sn high-temperature magnetic shape memory alloys." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 136.3, pp. 1147-1152, (2019).
- [22] Shi, Hu, et al., Design and performance analysis of magnetic shape memory alloy actuator with a compact electromagnetic coil configuration, *IEEE Transactions on Magnetics*, 56.8, pp. 1-13, (2020).
- [23] Rameš, M., et al., Magnetic properties of Ni-Mn-Ga-Co-Cu tetragonal martensites exhibiting magnetic shape memory effect, *Scripta Materialia*, 142, pp. 61-65, (2018).
- [24] Ahamed, Raju., Md Meftahul Ferdous., and Yancheng Li., Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review, *Korea-Australia Rheology Journal* 28.4, pp. 355-379, (2016).
- [25] Maciejewski, G., Stupkiewicz, S., and Petryk, H., Elastic micro-strain energy at the austenite-twinned martensite interface, *Archives of Mechanics* 57.4, pp. 277-297, (2005).
- [26] Awan, Iqra Zubair., and Abdul Qadeer Khan., Fascinating Shape Memory Alloys, *Journal of the Chemical Society of Pakistan* 40.1, (2018).
- [12] Benguerine, O., et al. Structural, elastic, electronic, and magnetic properties of Ni₂MnSb, Ni₂MnSn, and Ni₂MnSb_{0.5}Sn_{0.5} magnetic shape memory alloys, *Revista mexicana de física* 66.2, pp. 121-126, (2020).
- [13] Wei, Z. Y., et al., Elastocaloric effect of all-d-metal Heusler NiMnTi (Co) magnetic shape memory alloys by digital image correlation and infrared thermography, *Applied Physics Letters* 114.10 (2019): 101903.
- [14] Richard M., Feuchtwanger J., Schanel, D., Lograsso, T., Allen, S., O'handley, R., Crystal structure and transformation behavior of Ni-Mn-Ga martensites, *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 1797-1801, (2006).
- [15] Sun, X. M., et al., Giant negative thermal expansion in Fe-Mn-Ga magnetic shape memory alloys, *Applied Physics Letters* 113.4 (2018): 041903.
- [16] Haldar, Krishnendu., and Dimitris C. Lagoudas., Dynamic magnetic shape memory alloys responses: Eddy current effect and Joule heating. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 465, 278-289, (2018).
- [17] LExcellent, Christian., *Shape-memory alloys handbook*. John Wiley & Sons, (2013).
- [18] Emre, Baris, et al., Martensitic transformation and magnetocaloric properties of NiCoMnSn magnetic shape memory alloys, *Intermetallics* 106, pp. 65-70, (2019).