

بررسی تأثیر تنش جانبی بایاس‌کننده بر رفتار مکانیکی - مغناطیسی تک‌کریستال آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی

حسن صیادی* (استاد)

مریم هویت‌طلب (مربی)

محمد مهدی محرابی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۸ (ص. ۱-۳، شماره ۱، ص. ۱-۳)

آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی گروه جدیدی از مواد هوشمندند که به دلیل خواص ویژه - مانند کرنش بالای قابل بازگشت، عمر خستگی بالا و پاسخ زمانی سریع - به گزینه‌ی مناسب برای سیستم‌های برداشت‌کننده‌ی انرژی، عملگرها و سنسورها بدل شده‌اند. برای استفاده از این مواد در سیستم‌های مذکور همواره به یک سازوکار برگشت نیاز است تا نمونه‌ی آلیاژ را به حالت اولیه برگرداند. روش رایج در برداشت‌کننده‌های انرژی استفاده از یک میدان مغناطیسی بایاس است ولی در این نوشتار با قرار دادن یک تنش بایاس در کنار میدان بایاس، عملکرد سازوکار برگشت بهبود داده می‌شود. به این منظور، اثر اعمال یک تنش فشاری در راستای میدان بایاس بر یک تک‌کریستال آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تنش فشاری می‌تواند ناشی از پیش‌کرنش یا یک سیستم فنری باشد. بدین منظور روابط حاکم بر مسئله در حالت بارگذاری دوبعدی با استفاده از مدل‌های پایه ترمودینامیکی موجود استخراج می‌شود و در بخش شبیه‌سازی، در هر قسمت با تغییر تنش فشاری بایاس‌کننده، اثر این تنش بر خواص مکانیکی - مغناطیسی ماده مطالعه می‌شود. با اضافه کردن این تنش مشاهده می‌شود سازوکار برگشت عملکرد بهتری از خود نشان داده، به طوری که میزان تغییرات مغناطیس شونده‌ی ماده که بر ولتاژ خروجی اثر می‌گذارد، افزایش می‌یابد. همچنین مشخص می‌شود که میدان بایاس به طور کامل قابل حذف نیست و بهترین عملکرد در میدان مغناطیسی ۲۴/۰ تسلا و تنش فشاری ۰/۳ مگاپاسکال اتفاق می‌افتد.

واژگان کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، برداشت انرژی، میدان بایاس، سازوکار برگشت.

۱. مقدمه

حافظه‌دار مغناطیسی به عنوان ویژگی خاص در مقابل سایر موادی که به عنوان ماده هوشمند شناخته می‌شوند، یک مزیت به حساب می‌آید. در کنار کرنش غیرخطی و تکرارپذیر ناشی از اعمال بارگذاری مکانیکی و میدان مغناطیسی به طور همزمان، در خواص مغناطیس‌شوندگی ماده تغییرات غیرخطی صورت می‌گیرد.^[۱] به طور کلی آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی ممکن است بر اثر اعمال میدان مغناطیسی، تنش یا تغییرات دمایی دچار تغییر شکل شوند. در حالتی که تغییرات دمایی مورد نظر نباشد، در دماهای پایین و نزدیک دمای اتاق، ساختار این آلیاژها کریستالی مارتزیتی است، و با اعمال تنش یا میدان مغناطیسی دچار تغییر شکل می‌شوند.^[۲]

به منظور بهبود محصولات که در آنها از آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی - عموماً سنسورها، محرک‌ها و برداشت‌کننده‌های انرژی - استفاده می‌شود، بررسی و مطالعه‌ی

کرنش ناشی از میدان مغناطیسی در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی - که «اثر حافظه‌داری مغناطیسی» نامیده می‌شود - اولین بار توسط گروهی تحقیقاتی در سال ۱۹۹۶ رؤیت شد. این گروه طی آزمایشات خود شاهد کرنش ۰/۲ درصدی ناشی از میدان مغناطیسی در یک نمونه‌ی تک‌کریستال آلیاژ نیکل - منگنز - گالیوم بودند. سپس در سال ۱۹۹۹، در این نوع آلیاژ و در فاز مارتزیتی با ساختار تترگونال شاهد کرنش ۵ درصدی و نیز در سال ۲۰۰۲ شاهد کرنش بالای ۱۰ درصد با ساختار اورتورهمبیک در دمای اتاق بوده‌اند.^[۱] وجود این کرنش‌های بالا در آلیاژهای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۸/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱/۲۱، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۲۴

DOI:10.24200/J40.2018.10827.1446

دقیق خواص مکانیکی - مغناطیسی این نوع آلیاژها ضرورت می‌یابد. این آلیاژها از حدود ۲۰ سال قبل که کشف شدند، همواره مورد پژوهش بوده‌اند.^[۲] در به کار بردن آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در سیستم‌های برداشت انرژی یا تحریک همواره سازوکاری جهت برگشت ماده به حالت اولیه لازم است. در کاربرد برداشت انرژی، روش رایج در تکرارپذیری فرایند، ایجاد یک میدان مغناطیسی بایاس‌کننده در راستای عمود بر راستای بارگذاری است. با حذف کرنش ناشی از بارگذاری، این میدان بایاس، آلیاژ را به موقعیت اولیه بازمی‌گرداند. نکته‌ی کلیدی در برداشت انرژی به کمک آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، تغییر ماهیت مغناطیسی این آلیاژ بر اثر اعمال کرنش است. این تغییر ماهیت، شاری متغیر با زمان ایجاد می‌کند که می‌تواند به کمک یک سیم‌پیچ و بر اساس قانون القای فارادی به ولتاژ تبدیل شود. نیاز به سیم‌پیچ و میدان مغناطیسی بایاس و کارکرد در شرایط دمایی مشخص، از جمله محدودیت‌های این روش است.^[۳]

همچنین می‌توان سازوکار برگشت در سیستم‌های برداشت انرژی را با استفاده از یک تنش فشاری (معمولاً عمود بر بارگذاری) و در سیستم‌های تحریک در راستای بارگذاری، ایجاد کرد. در کاربردهای تحریک، برای سازوکار برگشت در یک سیستم تحریک، با استفاده از فیلم نازک آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، از یک فنر از جنس مس - قلع استفاده شده است.^[۵] محققین در پژوهش خود با تغییر ضریب سفتی فنر و تغییر طول‌های اولیه‌ی متفاوت، وضعیت بهینه‌ی برای سازوکار خود ایجاد کردند. آنها همچنین سه طراحی مختلف با سازوکارهای برگشت متفاوت به منظور ایجاد یک سیستم تحریک با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی ارائه کرده‌اند.^[۶] در طرح اول از یک میدان مغناطیسی بایاس در جهت عمود بر میدان مغناطیسی تحریک استفاده شده است. در طرح دوم یک نمونه از آلیاژ زیر یک پیستون قرار گرفته است و پیستون به یک فنر متصل است. با اعمال میدان مغناطیسی، طول نمونه آلیاژ افزایش می‌یابد و پیستون به بالا حرکت می‌کند و فنر متصل به آن فشرده می‌شود. با کاهش میدان مغناطیسی، فنر فشرده شده به نمونه آلیاژ نیرو وارد می‌کند و آن را به طول و وضعیت اولیه برمی‌گرداند.

در طرح سوم، دو قطعه آلیاژ به وسیله‌ی یک میله به هم متصل شده‌اند؛ و برای هر کدام از قطعه‌ها یک سیم‌پیچ به منظور ایجاد میدان مغناطیسی تحریک تعبیه شده است. زمانی که میدان مغناطیسی در یکی از قطعه‌ها فعال می‌شود، طول قطعه‌ی مربوطه افزایش می‌یابد و با اعمال نیرو از طریق میله قطعه‌ی دیگر فشرده می‌شود. با کاهش میدان مغناطیسی قطعه‌ی فشرده شده همچون یک فنر عمل کرده و قطعه‌ی دیگر را به وضعیت اولیه برمی‌گرداند.

در سیستم‌های برداشت انرژی، ایجاد سازوکار برگشت با استفاده از فنر به معنی دوبعدی کردن بارگذاری مکانیکی است و در گذشته به دلیل محدودیت‌هایی که در مدل‌های ارائه شده برای آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی وجود داشت، در تمامی پژوهش‌ها بارگذاری‌های مکانیکی به صورت یک بعدی بوده و از میدان بایاس به عنوان سازوکار برگشت استفاده شده است. در سال‌های گذشته تلاش‌هایی برای ارائه‌ی مدل‌های چند بعدی صورت گرفته است. در تمامی این مدل‌ها، مدلی که به عنوان مدل مادر محسوب می‌شود^[۷] و فقط برای حالت خاصی از بارگذاری اعتبار دارد، تعمیم داده شده و با راهبردهای مختلف روابط بازنویسی شده است. از جمله می‌توان به مدلی دوبعدی اشاره کرد^[۸] که در آن، معادلات برای حالت بارگذاری مکانیکی دوجبهه به دست آمده است. همچنین از آن‌جا که در مدل پیشین، ثابت‌های مدل که در کالیبراسیون به دست می‌آیند، برای بارگذاری‌های مختلف یکسان نیستند، در مدل جدید از روش کالیبراسیون بهتری استفاده شده، به طوری که ثابت‌ها در بارگذاری‌های مختلف ثابت می‌مانند. همچنین تاریخچه‌ی بارگذاری در این مدل لحاظ شده و به

همین دلیل نمودارهای فازی دوبعدی تبدیل به سه بعدی شده است. در این مدل اما، بارگذاری تماماً به صورت مکانیکی بوده و میدان مغناطیسی در روابط وارد نشده است.

در مدل دیگری^[۹] روابط برای هر نوع بارگذاری دوبعدی مکانیکی - مغناطیسی استخراج شده است. در این مدل فقط به ۳ ثابت تجربی برای کالیبراسیون نیاز داریم که از مزایای مدل محسوب می‌شود. همچنین در این مدل سازوکار حرکت دیواره‌ی مغناطیسی که در مدل‌های قبلی نادیده گرفته شده، مدل شده است.^[۱۰] در یکی از این مدل‌ها^[۱۱] تمام اصلاحاتی که در دیگر مدل‌های اشاره شده گفته شد، لحاظ شده و نیز نحوه‌ی فرمول‌بندی بسیار ساده‌تر از سایر مدل‌هاست. به دلیل کمبود داده‌های آزمایشگاهی برای بارگذاری‌های سه بعدی، امکان ارزیابی مدل در این نوع بارگذاری‌های وجود ندارد ولی برای حالت دوبعدی، مدل دقت مناسبی دارد. این مدل‌ها اگرچه در بارگذاری‌های چندمحوره دقت بسیار بالایی ندارند، در مطالعه‌ی کیفی بسیار مفیدند.

از آن‌جا که در سیستم‌های برداشت انرژی، اثر استفاده از سازوکارهای برگشتی که در آنها از فنر یا عموماً خاصیت فنری استفاده می‌شود، به صورت تنش فشاری عمود بر راستای بارگذاری ظاهر می‌شود. در این پژوهش با استفاده از یک مدل دوبعدی، برای یک تکه کربن نیکل - منگنز - گالیوم از تنش فشاری و میدان بایاس به منظور سازوکار برگشت استفاده می‌شود و اثرات اضافه کردن این تنش بر رفتار مکانیکی - مغناطیسی ماده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا روابط ریاضی برای شبیه‌سازی به دست می‌آید و در ادامه با کالیبره کردن مدل نتایج شبیه‌سازی آورده می‌شود و در نهایت نتیجه‌گیری کلی در مورد این ایده ارائه می‌شود.

۲. مدل‌سازی ریاضی

به طور کلی سه ساختار مارتنزیتی برای آلیاژ نیکل - منگنز - گالیوم وجود دارد؛ بسته به این که چه ترکیبی از این سه عنصر در یک نمونه آلیاژ وجود داشته باشد، هنگام تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت، یکی از این سه ساختار شکل می‌گیرد. در بین این سه ساختار، ساختار تراگونال ۵ لایه به دلیل امتیازاتش نسبت به ساختارهای دیگر، مورد توجه مهندسان قرار گرفته است.^[۱۲] به واحدهای شبکه در این ساختار و رینت مارتنزیتی گفته می‌شود. ساختار تراگونال ۵ لایه دارای ۳ رینت مختلف است که با تغییر رینت‌های یک نمونه از این آلیاژ به وسیله‌ی بارگذاری و اعمال میدان مغناطیسی، نمونه دچار کرنش غیرکسسان می‌شود و خواص مغناطیسی نمونه تغییر می‌کند.^[۷] رویکرد مدل‌سازی ریاضی در این ماده، ایجاد رابطه‌ی بین بار مکانیکی و میدان مغناطیسی اعمالی با کرنش و بردار مغناطیس‌شوندگی ماده است. تاکنون تمامی مدل‌های ارائه شده برای ساختار تراگونال ۵ لایه بوده و هدف مدل کردن سه سازوکار اصلی حرکت دیواره‌های مغناطیسی، چرخش بردار مغناطیسی داخلی و بازچینی مجدد رینت‌های مارتنزیتی در این ماده بوده است. بدین منظور ابتدا تعدادی متغیر داخلی معرفی و سپس با استفاده از کمینه کردن انرژی آزاد سیستم روابط استخراج می‌شود. در این قسمت این روابط برای یک مدل دوبعدی استخراج می‌شود تا از این طریق مسئله‌ی مورد پژوهش شبیه‌سازی شود.

۱.۲. متغیرهای داخلی

به طور کلی متغیرهای داخلی تعریف شده در اکثر مدل‌های ارائه شده، شامل کسر حجمی دامنه‌های مغناطیسی، زاویه‌ی بردار مغناطیسی نسبت به محور آسان مغناطیس و به

۲.۲. فرمول‌بندی انرژی آزاد گیبس

در این قسمت با استفاده از انرژی آزاد گیبس، فرم کلی معادلات برای حل مسئله به دست می‌آید. این انرژی در واقع میانگین وزنی انرژی وضعیت هریک از ورینت‌ها و حوزه‌های مغناطیسی است.^[۶] فرم کلی این انرژی عبارت است از:^[۱۱]

$$g = g^{mech} + g^{mag} + g^{int} + g^{con} \quad (۳)$$

البته در رابطه‌ی ۳ عبارت مربوط به انرژی حرارتی حذف شده است، زیرا دمای نمونه در حین بارگذاری ثابت فرض می‌شود. g^{mech} انرژی ذخیره شده در ماده بر اثر تغییر شکل کشسان است و انرژی مربوط به برهم‌کنش میان تنش و بخش غیرکشسان کرنش را توصیف می‌کند. این انرژی چنین تعریف می‌شود:^[۱۱]

$$g^{mech} = \frac{-1}{2\rho} \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{S} : \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}_n \quad (۴)$$

عبارت اول در سمت راست رابطه‌ی ۴ مربوط به تغییر شکل کشسان و عبارت دوم مربوط به انرژی کرنشی ناشی از بازچینی ورینت‌هاست. همچنین در این رابطه، $\boldsymbol{\sigma}$ تانسور تنش، ρ چگالی ماده، $\boldsymbol{\varepsilon}_n$ تانسور کرنش ناشی از بازچینی ورینت‌ها و \boldsymbol{S} تانسور نرمی کشسانی ماده است که در رابطه‌ی ۵ صدق می‌کند:^[۷]

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = \frac{1+\nu}{E} \boldsymbol{\sigma} - \frac{\nu}{E} \text{trace}(\boldsymbol{\sigma}) \mathbf{1} = \boldsymbol{S} : \boldsymbol{\sigma} \quad (۵)$$

E ، ν و $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ در رابطه‌ی ۵، به ترتیب معرف ضریب پواسون، مول یانگ و کرنش کشسان ماده‌اند. در رابطه‌ی ۶، رابطه‌ی بین کرنش‌ها معرفی شده که در واقع جمع کرنش کشسان و کرنش غیرکشسان برابر کرنش کل است.^[۷]

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^n + \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (۶)$$

تانسور $\boldsymbol{\varepsilon}^n$ در مدل‌های سه بعدی با استفاده از رابطه‌ی ۷ مشخص می‌شود:^[۹]

$$\boldsymbol{\varepsilon}^n = - \begin{bmatrix} \xi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \xi_2 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_3 \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}^{rmax} \quad (۷)$$

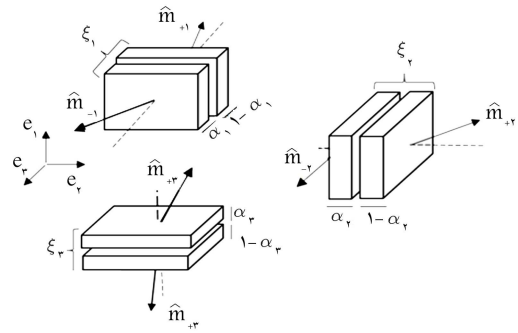
که در آن، $\boldsymbol{\xi}^{rmax}$ بیشینه کرنش ناشی از بازچینی ورینت‌هاست که می‌تواند به صورت آزمایشگاهی به دست آید؛ و با استفاده از رابطه‌ی ۸ تخمین زده می‌شود:^[۷]

$$\boldsymbol{\xi}^{rmax} = \frac{a-c}{a} \quad (۸)$$

a و c در رابطه‌ی ۸، به ترتیب معرف طول بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین ضلع در یک تک‌کریستال تتراگونال نمونه است که به عنوان پارامترهای شبکه شناخته می‌شوند. g^{mag} انرژی مغناطیسی سیستم از رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:^[۱۱]

$$g^{mag} = \frac{-\mu_0}{\rho} \vec{M} \cdot \vec{H} + \sum_{i=1}^2 \xi_i \alpha_i K_I (1 - (\hat{e}_i \cdot \hat{m}_{+i})^2) + \sum_{i=1}^2 \xi_i (1 - \alpha_i) K_I (1 - (\hat{e}_i \cdot \hat{m}_{-i})^2) \quad (۹)$$

که در آن، μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلاء و \vec{M} بردار مغناطیس‌شوندگی کل در یک نقطه‌ی مادی است که از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید. همانطور که در این رابطه



شکل ۱. متغیرهای داخلی برای تعریف مدل سه بعدی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی.

کسر حجمی ورینت‌های مارتنزیتی است. در برخی از مطالعات انجام شده، به جای استفاده از زاویه‌ی بردار مغناطیسی نسبت به محور آسان مغناطیس، بردارهای یکه در راستای بردارهای مغناطیس شونده‌ی تعریف شده است.^[۱۱] (شکل ۱). همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت سه‌بعدی مجموعاً ۱۲ متغیر داخلی تعریف می‌شود که البته برای استفاده از مدل در حالت‌های یک‌بعدی یا دوبعدی، بسیاری از این متغیرها حذف می‌شوند. در این پژوهش با توجه به دوبعدی بودن مسئله، در تمامی روابط عبارت‌های مربوط به ورینت سوم حذف شده است.

۲.۱.۲. کسر حجمی ناحیه‌های مغناطیسی

برای ورینت‌های مارتنزیتی ν_i متغیر α_i بیان‌گر کسر حجمی دامنه‌ی مغناطیسی است که در غیاب میدان مغناطیسی در آن دامنه، در راستای $\hat{e}_i + \hat{e}_i$ است. بدیهی است $1 - \alpha_i$ کسر حجمی دامنه‌ی مغناطیسی است که در غیاب میدان مغناطیسی، راستای بردار مغناطیسی در آن، در جهت $-\hat{e}_i$ است. متغیر داخلی α_i همواره مقداری بین صفر و ۱ را به خود اختصاص می‌دهد. تغییر در مقادیر این متغیر داخلی نشان‌دهنده‌ی سازوکار حرکت دیواره‌ی مغناطیسی است.

۲.۱.۲. بردارهای یکه مغناطیس‌شوندگی

به منظور مدل کردن سازوکار چرخش بردار مغناطیس‌شوندگی داخلی، بردارهای ویژه در راستای بردارهای مغناطیس شونده‌ی تعریف می‌شود. در شکل ۱ این بردارهای یکه به صورت \hat{m}_{+i} و \hat{m}_{-i} و تعریف شده که در آن i نشان‌گر شماره ورینت است. به طور کلی دو بردار یکه‌ی مغناطیس‌شوندگی برای هر ورینت در جهات مثبت و منفی تعریف شده که لزومی ندارد حتماً در یک راستا باشند و به صورت مستقل از هم، زوایای متفاوتی را به خود می‌گیرند. بدیهی است قید اندازه‌ی رابطه‌ی ۱ برای این بردارها باید لحاظ شود.

$$\|\hat{m}_{+i}\| = 1 \quad (۱)$$

$$\|\hat{m}_{-i}\| = 1$$

۳.۱.۲. کسر حجمی ورینت‌های مارتنزیتی

به منظور مدل کردن سازوکار بازچینی ورینت‌های مارتنزیتی در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، کسرهای حجمی ورینت‌های مارتنزیتی را تعریف می‌کنیم. این متغیرها در شکل ۱ با نمادهای ξ_i مشخص شده، که در آن i شماره ورینت است. رابطه‌ی ۲ شامل قیود مورد نیاز برای این متغیرهای داخلی است.

$$\begin{cases} \xi_1 + \xi_2 = 1 \\ \xi_i \geq 0 \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (۲)$$

که در آن، H^{sat} برابر با کمترین مقدار میدان خارجی است که در این میدان بردار مغناطیس‌شوندگی داخلی به حالت اشباع می‌رسد. این ثابت از پارامترهای مادی محسوب می‌شود که از طریق آزمایش محاسبه می‌شود. البته شرط لازم در آزمایش صورت گرفته این است که فقط سازوکار حرکت دیواره‌های مغناطیسی در ماده اتفاق بیفتد.

۲.۳.۲. تعیین بردارهای یکه‌ی مغناطیس‌شوندگی

از آنجا که سازوکار چرخش بردار مغناطیسی داخلی کاملاً برگشت پذیر بوده و هیچ‌گونه اتلاف انرژی وجود ندارد، بنابراین نیروی محرک برای چرخش بردارهای یکه‌ی مغناطیس‌شوندگی برابر صفر می‌شود. [۱۵] این شرط در رابطه‌ی ۱۵ نشان داده شده است:

$$\vec{\pi}_{+i}^{\dot{m}} = -\rho \frac{\partial g}{\partial \dot{m}_{+i}} = 0 \quad (15)$$

همچنین برای بردارهای یکه در جهات منفی هم می‌توان مانند رابطه‌ی ۱۵ نیروی محرکه را به دست آورد و برابر صفر قرار داد. با جایگزین کردن مقدار g با استفاده از رابطه‌ی ۳ و یک سری عملیات ریاضی، رابطه‌ی ۱۶ برای بردارهای یکه‌ی مغناطیسی داخلی استخراج می‌شود. [۱۱] این رابطه متشکل از ۴ معادله‌ی مستقل است که به وسیله‌ی آن بردارهای یکه‌ی مغناطیسی داخلی در جهات مثبت به دست می‌آید. همچنین برای بردار یکه در جهات منفی هم با استفاده از همین روش ۴ معادله‌ی مستقل استخراج می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} (I - \hat{m}_{+i} \otimes \hat{m}_{+i}) \left\{ \begin{array}{l} \mu_0 M^{sat} \vec{H} + \\ \gamma \rho K_I (\hat{e}_i \otimes \hat{e}_i) \hat{m}_{+i} = \vec{0} \end{array} \right. \\ (I - \hat{m}_{-i} \otimes \hat{m}_{-i}) \left\{ \begin{array}{l} \mu_0 M^{sat} \vec{H} + \\ \gamma \rho K_I (\hat{e}_i \otimes \hat{e}_i) \hat{m}_{-i} = \vec{0} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (16)$$

$$i = 1, 2$$

۳.۳.۲. تعیین کسر حجمی ورینت‌های مارتنزیتی

به منظور به دست آوردن روابط لازم برای محاسبه‌ی مقادیر کسرهای حجمی ورینت‌های مارتنزیتی باید نیروی محرکه‌ی لازم برای سازوکار بازچینی مجدد ورینت‌ها را مطابق رابطه‌ی ۱۷ به دست آورد:

$$\pi^{\xi_i} = -\rho \frac{\partial g}{\partial \xi_i} \quad (17)$$

حال با استفاده از نامساوی کلازیوس - دوهوم و با دانستن این مسئله که سازوکار بازچینی مجدد ورینت‌ها تنها سازوکار همراه با اتلاف انرژی است، رابطه‌ی ۱۸ به دست می‌آید: [۹]

$$\pi^{\xi_1} \dot{\xi}_1 + \pi^{\xi_2} \dot{\xi}_2 \geq 0 \quad (18)$$

از آنجا که نرخ تغییر کسر حجمی ورینت‌های یک و دو از لحاظ اندازه برابر و از لحاظ علامت با هم قرینه‌اند، رابطه‌ی ۱۸ به صورت رابطه‌ی ۱۹ ساده می‌شود:

$$(\pi^{\xi_1} - \pi^{\xi_2}) \dot{\xi}_1 \geq 0 \quad (19)$$

نامساوی رابطه‌ی ۱۹ با استفاده از یک تابع حدی، مطابق رابطه‌ی ۲۰ به تساوی تبدیل می‌شود:

$$\pi^{\xi_1} - \pi^{\xi_2} = Y \quad (20)$$

مشخص است بردار مغناطیس‌شوندگی داخلی به هر سه نوع متغیر داخلی وابسته است و در واقع هر سه سازوکار داخلی ماده در آن نقش دارند. [۱۱]

$$\vec{M} = \left\{ \sum_{i=1}^2 \xi_i \alpha_i m_{+i} + \sum_{i=1}^2 \xi_i (1 - \alpha_i) m_{-i} \right\} M^{sat} \quad (10)$$

همچنین عبارت اول در سمت راست معادله‌ی ۹ انرژی زمان نامیده می‌شود که برهم‌کنش میدان مغناطیسی با مغناطیس‌شوندگی کل را در نظر می‌گیرد؛ عبارت‌های دوم و سوم نیز مربوط به انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی‌اند. [۱۱]

انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی به صورت میزان انرژی تعریف می‌شود که لازم است تا بردار مغناطیسی داخلی از محور کوچک ورینت بچرخد تا هم‌جهت با میدان اعمالی شود. [۱۳] این مقدار انرژی زمانی که میدان مغناطیسی اعمالی در جهت محور کوچک ورینت باشد، کمترین مقدار خود را دارد و زمانی که بردار مغناطیسی داخلی به اندازه‌ی ۹۰ درجه بچرخد، بیشترین مقدار خود را دارد. [۱۴] این انرژی مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود: [۷]

$$g^{an} = \sum_{n=1}^N \kappa_n^i \sin^n(\theta_i) \quad (11)$$

که در آن، θ زاویه‌ی انحراف بردار مغناطیس‌شوندگی نسبت به جهت آسان مغناطیس است. البته در مدل‌سازی ریاضی برای سادگی، فقط جمله‌ی اول سری در نظر گرفته می‌شود و عبارت مربوط به انرژی ناهمسانگردی به صورت $\kappa_1 \sin^2(\theta)$ در روابط وارد می‌شود که κ_1 از خصوصیت مادی نمونه به حساب می‌آید و از طریق آزمایش به دست می‌آید. g^{int} انرژی برهم‌کنش سیستم است که از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید: [۷]

$$g^{int} = \frac{1}{\rho} f(\xi_1, \xi_2) \quad (12)$$

و در آن، $f(\xi_1, \xi_2)$ تابع سخت‌شوندگی نامیده می‌شود. در مدل‌های ارائه شده توابع مختلفی به عنوان تابع سخت‌شوندگی در نظر گرفته شده است. [۱۱] مدل سه بعدی این تابع به صورت رابطه‌ی ۱۳ در نظر گرفته شده است:

$$f = \frac{1}{n} \kappa_1 (\xi_1^n + \xi_2^n) \quad (13)$$

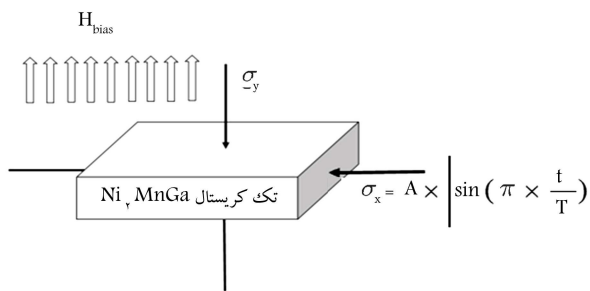
که در آن، n ثابت مادی است که از نتایج تجربی به دست می‌آید. g^{con} مربوط به قیدهای منطقی داخلی روی مسئله است، همچون مقادیری که متغیرهای داخلی می‌توانند اختیار کنند. تعریف مفصل این قیدها در دسترس [۱۱] است.

۳.۲. تعیین متغیرهای داخلی و روش حل

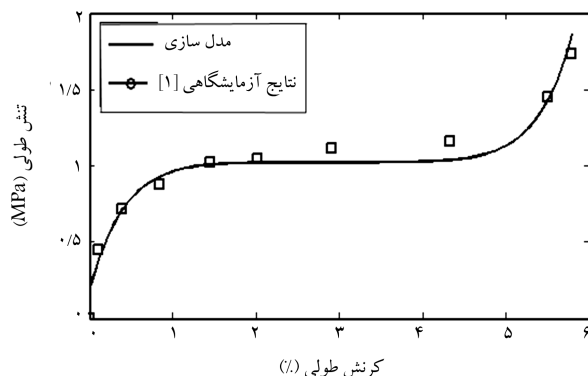
۱.۳.۲. تعیین کسر حجمی ناحیه‌های مغناطیسی

در اکثر مدل‌های ارائه شده برای آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، با فرض بزرگ بودن مقدار میدان خارجی به اندازه‌ی کافی، مقادیر α همواره برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. با این حال، به منظور بالاتر بردن دقت مدل، رابطه‌ی ۱۴ برای مقدار کسر حجمی ناحیه‌های مغناطیسی معرفی شده است: [۹]

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1}{\gamma} + \frac{H_i}{\gamma H^{sat}} & H_i < H^{sat} \\ \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \text{sign}(H_i) & H_i \geq H^{sat} \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (14)$$



شکل ۲. نحوه بارگذاری روی تک کریستال نیکل - منگنز - گالیوم.



شکل ۳. منحنی تنش - کرنش در یک آزمایش فشار تک محوره^[۱] و برازش منحنی به منظور کالیبره کردن مدل.

جدول ۱. پارامترهای انتخاب شده برای سیستم برداشت انرژی.

پارامتر	مقار	واحد
M^{eat}	5×10^5	A/m
$\epsilon^{\tau, \max}$	۵٫۸	%
ρK_I	$1/65 \times 10^5$	J/m ^۳
$\mu \cdot H_{ea}$	۰٫۲۴	Tesla
E	5×10^3	MPa
ν	۰٫۳	-
κ_1	$4/89 \times 10^4$	J/m ^۳
n	۱۳	-
Y_0	$5/91 \times 10^4$	J/m ^۳
κ_2	۰٫۳	MPa

اول در غیاب تنش جانبی و وجود میدان مغناطیسی عرضی ۰٫۴ تسلا، بارگذاری در جهت طولی اعمال می‌شود و منحنی‌های تنش - کرنش و مغناطیس‌شوندگی - تنش با داده‌های آزمایشگاهی موجود^[۱] مقایسه می‌شود. در حالت دوم در غیاب میدان مغناطیسی و وجود تنش جانبی ثابت ۹ مگاپاسکال، بارگذاری در جهت طولی اعمال می‌شود و منحنی تنش - کرنش با داده‌های آزمایشگاهی^[۱۰] مقایسه می‌شود. از آن‌جا که در حالت دوم میدان مغناطیسی وجود ندارد، مغناطیس‌شوندگی ماده همیشه صفر است و بنابراین منحنی آن رسم نمی‌شود. منحنی‌های تنش - کرنش و مغناطیس‌شوندگی - تنش در حالت اول و منحنی تنش - کرنش در حالت

شرط بازچینی و رینت این است که نیروی ترمودینامیکی مؤثر به مقدار نیروی محرک بحرانی (Y) برای شروع بازچینی و رینت برسد. این مقدار بحرانی به صورت رابطه‌ی ۲۱ معرفی شده است:^[۱۱]

$$Y = Y_0 + \kappa_1 \left(e^{\frac{\sqrt{J_T(\sigma)}}{\kappa_2}} - 1 \right) (\xi_1^{n-1} - \xi_2^{n-1}) \quad (21)$$

که در آن، Y_0 ، κ_2 ثوابت مادی هستند که به طریق تجربی به دست می‌آید؛ κ_1 و n در روابط ۱۱ و ۱۳ معرفی شده‌اند. همچنین $J_T(\sigma)$ مقدار ناوردای دوم تانسور تنش است.

برای حل مسئله در یک بازه زمانی لازم است بازه به گام‌های زمانی تقسیم شود و با استفاده از روابط مربوطه، متغیرهای داخلی برای هر گام زمانی محاسبه شود. با دانستن متغیرهای داخلی در هر گام زمانی، می‌توان در گام زمانی بعدی مقدار این متغیرها را به دست آورد. با محاسبه‌ی متغیرهای داخلی می‌توان با استفاده از روابط ۵، ۶، ۷ و ۹ کرنش و بردار مغناطیس‌شوندگی کل را به دست آورد که به عنوان خروجی مدل نامیده می‌شوند.

۳. شبیه‌سازی

در این قسمت با استفاده از مدل ریاضی به دست آمده، مسئله‌ی مورد پژوهش، بررسی می‌شود. در شکل ۲ فیزیک مسئله نشان داده شده است. نمونه‌ی مورد بررسی یک تک کریستال آلیاژ نیکل - منگنز - گالیوم است که مشهورترین آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی است. بدیهی است که بارگذاری مکانیکی در جهت طولی (محور x) بوده و میدان مغناطیسی بایاس در جهت جانبی (محور y) است. همچنین تنش جانبی σ_y به منظور ایجاد خاصیت برگشت‌پذیری در نمونه، اعمال می‌شود. تنش طولی σ_x به صورت سینوسی است که در رابطه‌ی آن A و T ثابت و t متغیر زمان است. در ادامه، تأثیر حضور این تنش جانبی بر پاسخ مکانیکی و مغناطیسی ماده مورد بحث قرار می‌گیرد.

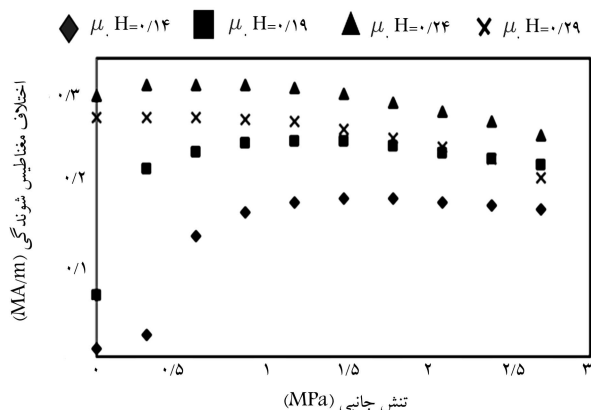
۳.۱. کالیبراسیون مدل و تعیین ثوابت مادی

به منظور شبیه‌سازی ابتدا باید ثوابت مادی موجود در مدل ریاضی مشخص شود. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده^[۱] برای یک نمونه تک کریستال Ni_۲MnGa، ۶ عدد از این ثوابت مشخص می‌شود که به صورت ۶ ثابت اول در جدول ۱ آمده‌اند. در هر مدل ساختاری آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی نیاز به یک روش برای کالیبراسیون مدل است تا بقیه‌ی ثوابت مجهول تعریف شده در مدل، به دست آید. با استفاده از یک آزمون فشار تک محوره‌ی موجود^[۱] و برازش منحنی سه پارامتر مادی κ_1 ، Y_0 و n مشخص می‌شوند که در شکل ۳ نشان داده شده است.

آخرین ثابت باقی‌مانده ثابت κ_2 است که با استفاده از داده‌های یک آزمون فشار دوم‌محوره‌ی موجود مشخص می‌شود.^[۱۰] در جدول ۱ تمامی ثابت‌های به دست آمده ارائه شده است.

۳.۲. اعتبارسنجی مدل

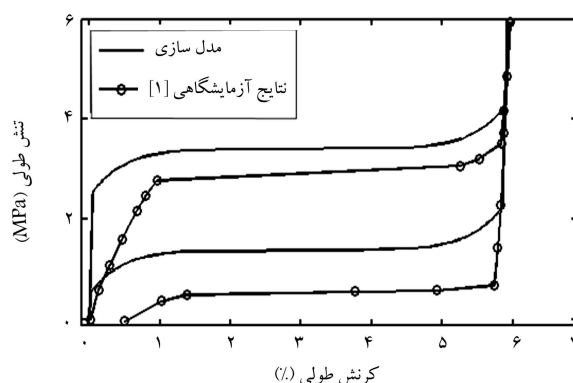
در این قسمت، صحت مدل ریاضی مورد استفاده را بررسی می‌کنیم. از آن‌جا که تا به حال در هیچ کار آزمایشگاهی یا نظری، تنش و میدان مغناطیسی جانبی به طور هم‌زمان وجود نداشته، به منظور اعتبارسنجی دو حالت را در نظر می‌گیریم: در حالت



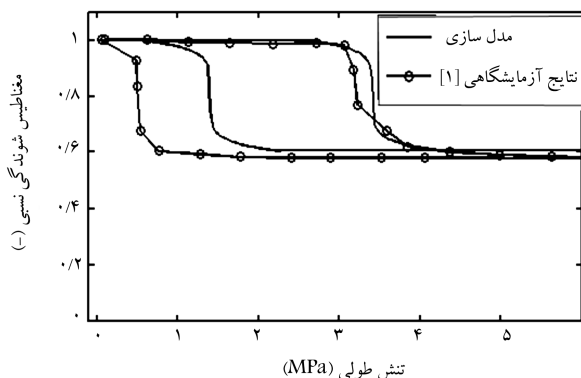
شکل ۷. اختلاف بیشینه و کمینه مغناطیس‌شوندگی در یک چرخه‌ی بارگذاری برحسب تنش و میدان مغناطیسی جانبی.

۳.۳. نتایج شبیه‌سازی

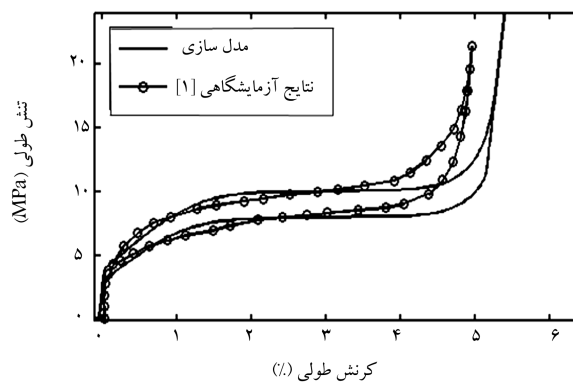
زمانی که از آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی در یک سیستم برداشت انرژی یا سیستم تحریک استفاده می‌شود، مؤلفه‌ی مهم عبارت است از اختلاف بیشینه و کمینه مغناطیس‌شوندگی داخلی در یک جهت خاص (عموماً جهتی که میدان بایاس وارد می‌شود) در یک چرخه‌ی تناوبی. به عنوان مثال، در سیستم برداشت انرژی هرچه این اختلاف بیشتر باشد ولتاژ خروجی بیشتر می‌شود که این مسئله مطلوب است. در ادامه‌ی مقاله هرجا صحبت از مغناطیس‌شوندگی است، منظور مغناطیس‌شوندگی جانبی است. همچنین اعداد به دست آمده برای نمونه با ثبات مادی مشخص شده می‌باشند و برای دیگر نمونه‌ها تفاوت‌های کوچک وجود دارد، ولی از آنجا که این ثبات برای نمونه‌های مختلف مادی ذکر شده با ساختار مشخص تقریباً یکسان است، نتایج کلی به دست آمده در مورد رفتار ماده برای همه عمومیت دارد. بدین منظور در شکل ۷ نمودار مغناطیس‌شوندگی نسبی در جهت جانبی (جهتی که میدان بایاس وارد می‌شود) برحسب تنش جانبی (تنش بایاس)، برای ۴ مقدار متفاوت میدان بایاس رسم شده است. چنانکه مشاهده می‌شود در تمام مقادیر تنش بایاس، بیشترین اختلاف مغناطیس‌شوندگی نسبی در میدان بایاس ۰/۲۴ تسلا اتفاق می‌افتد. با بررسی نمودار مغناطیس‌شوندگی برحسب میدان خارجی، [۱۵] میدان خارجی بحرانی که در این میدان کسر حجمی ناحیه‌های مغناطیسی برابر با ۱ می‌شود و کسر حجمی ناحیه مغناطیسی ورینت دوم به حالت اشباع می‌رسد، برابر با ۰/۲۴ تسلا است؛ از آنجا که این متغیر داخلی با توجه به رابطه‌ی ۱۰ تأثیر مستقیم بر مغناطیس‌شوندگی کل دارد، دلیل بیشتر بودن اختلاف مغناطیس‌شوندگی در این مقدار میدان توجیه می‌شود. دلیل کم شدن این اختلاف را در میدانی بیشتر از ۰/۲۴، مانند میدان ۰/۲۹ تسلا در شکل ۷، می‌توان در تأثیر میدان بر بردارهای یک‌ه‌ی مغناطیسی (رابطه‌ی ۱۶) یافت. با افزایش میدان، بردارهای مغناطیس‌شوندگی ورینت طولی، همواره به سمت جهت جانبی متمایل می‌شوند و مؤلفه‌ی بزرگتری ایجاد می‌کنند و در نتیجه این بردارها به طور کامل از جهت جانبی به جهت طولی نمی‌چرخند و اختلاف کوچک‌تری ایجاد می‌کنند. با توجه به شکل ۷ و با افزایش میدان بایاس، بیشینه مغناطیس‌شوندگی نسبی در تنش‌های جانبی کمتری اتفاق می‌افتد. در واقع محل بیشینه به سمت چپ جابه‌جا می‌شود. این بدان دلیل است که با کاهش میدان، به تنش جانبی کوچک‌تری نیاز است تا ورینت‌ها و بردارهای مغناطیس‌شوندگی همراه با آن‌ها کاملاً به حالت اولیه برگردند. برای تنش‌های جانبی کوچک تراز مقدار مناسب و لازم، ورینت‌ها ابتدا به طور کامل می‌چرخند ولی برگشت



شکل ۴. منحنی تنش - کرنش در میدان مغناطیسی ثابت حاصل از مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی [۱].

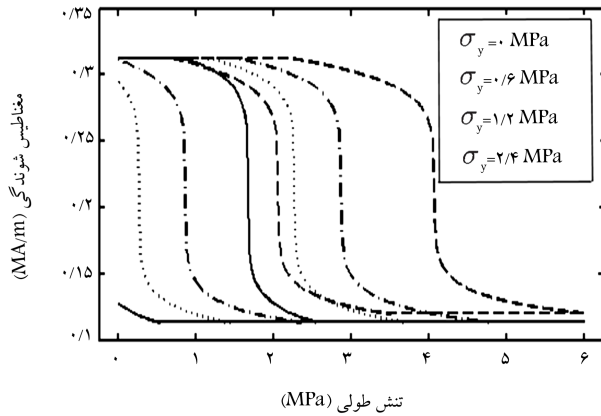


شکل ۵. منحنی مغناطیس‌شوندگی نسبی - تنش در میدان مغناطیسی ثابت حاصل از مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی [۱].

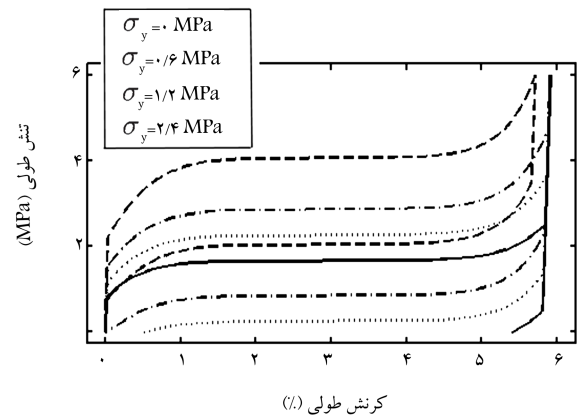


شکل ۶. منحنی تنش - کرنش در تنش جانبی ثابت حاصل از مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی [۱۰].

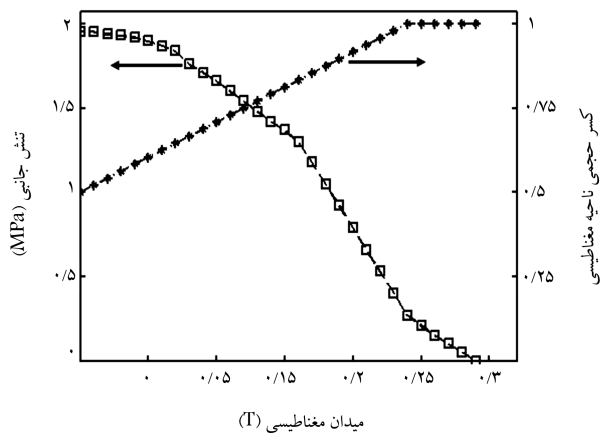
دوم، به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ رسم و نشان داده شده، و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. در شکل ۵ مغناطیس‌شوندگی نسبی به صورت نسبت مقدار مغناطیس‌شوندگی در جهت عرضی به مغناطیس‌شوندگی اشباع (M^{sat}) که مقدار آن ثابت و مشخص است، تعریف می‌شود. چنان که از این اشکال استنباط می‌شود، برای هر دو حالت، مدل ریاضی دقت نسبتاً خوبی دارد و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی حالتی که هم تنش عرضی و میدان عرضی به صورت هم‌زمان اعمال می‌شوند، استفاده کرد.



شکل ۹. منحنی مغناطیس‌شوندگی در جهت جانبی بر حسب تنش طولی در تنش‌های بایاس متفاوت.



شکل ۸. منحنی تنش - کرنش در جهت طولی در تنش‌های بایاس متفاوت.



شکل ۱۰. منحنی تنش جانبی و کسر حجمی ناحیه‌ی مغناطیسی بر حسب میدان مغناطیسی.

مغناطیسی از مقدار صفر تا ۰/۲۹ تسلا با گام ۰/۰۱ تغییر پیدا کرده و در هر حالت به منظور کامل شدن چرخه و برگشت آلیاژ به نقطه‌ی اول، تنش جانبی لازم به دست آمده است. در هر حالت کرنش در جهت طولی به مقدار بیشینه ۵/۹ درصد می‌رسد. همان‌طور که مشخص است برای مقادیر میدان کمتر از ۰/۰۵ تسلا، نقش میدان در بازگرداندن نمونه آلیاژ ناچیز بوده تنش جانبی مورد نیاز تغییر چندانی نمی‌کند و از مقدار میدان ۰/۱۵ تا ۰/۲۴ تسلا، افزایش میدان باعث کاهش سریع در مقدار تنش جانبی مورد نیاز می‌شود. همچنین در هر مقدار میدان، کسر حجمی ناحیه‌ی مغناطیسی و رینت دوم به دست آمده است. با توجه به رابطه‌ی ۱۴ مقدار کسر حجمی در طول چرخه ثابت می‌ماند زیرا تنها تابعی از میدان است. این متغیر تا میدان ۰/۲۴ تسلا به صورت خطی افزایش می‌یابد و از آن پس به حد اشباع رسیده و ثابت می‌ماند. برای حالتی که میدان صفر باشد، نمونه تحت بارگذاری مکانیکی فشاری دوجته^[۷] تبدیل می‌شود و تنش جانبی می‌تواند نمونه را به حالت اولیه برگرداند؛ اما چون کسر حجمی در این نقطه برابر ۰/۵ است، نمونه‌ی آلیاژ از لحاظ مغناطیسی خنثی است و با توجه به رابطه‌ی ۱۰ مغناطیس‌شوندگی کل در جهت جانبی صفر می‌شود.

در شکل ۱۱ نوع بارگذاری برحسب زمان است که به صورت سه نیم‌چرخه‌ی سینوسی متناوب است. دلیل اعمال نشدن چرخه‌ی کامل سینوسی این است که در آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی، به دلیل ترد بودن ماده همیشه نمونه تحت فشار

ورینت‌ها ناقص است. با توجه به رابطه‌ی ۱۰، مقدار ناکافی تنش جانبی باعث می‌شود اختلاف نیروی محرکه‌ی مؤثر (سمت راست رابطه) قبل از این که کاملاً برگردد کوچک‌تر از سمت چپ شود و سازوکار چرخش ورینت‌ها متوقف شود. با کمتر شدن این تنش، توقف زودتر صورت می‌گیرد. برای مقادیر بزرگتر از مقدار مناسب، برگشت ورینت‌ها کامل است ولی نرسیدن ورینت‌ها به حالت نهایی، باعث کاهش اختلاف مغناطیس‌شوندگی است. باز هم با توجه به رابطه‌ی ۱۰، مازاد تنش جانبی باعث می‌شود که تنش طولی قادر به ایجاد اختلاف نیروی محرکه‌ی مؤثر به مقدار کافی نباشد و سازوکار چرخش ورینت‌ها - پیش از رسیدن به مقدار نهایی - زودتر متوقف شود. این رفتارها صعود منحنی‌ها به نقطه‌ی پیشینه و بعد نزول آن‌ها را توجیه می‌کند. همچنین در تمام منحنی‌ها، قبل از نقطه‌ی پیشینه‌ی مغناطیس‌شوندگی نسبی، با تغییر مقدار تنش جانبی، مقدار مغناطیس‌شوندگی نسبی افزایش محسوس پیدا می‌کند. در واقع حساسیت آن به تغییرات تنش جانبی بالاست ولی این حساسیت بعد از نقطه‌ی پیشینه، پایین است و بر اثر تغییر تنش جانبی، تغییر جزئی داشته است.

در شکل ۸ نمودارهای تنش برحسب کرنش در جهت x یا همان جهتی که بارگذاری سینوسی اعمال می‌شود، رسم شده است. ۷ نمودار مختلف مطابق با مقادیر تنش بایاس متفاوت در جهت جانبی هستند. میدان بایاس برابر ۰/۱۵ تسلا در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که در غیاب تنش جانبی، بازچینی ورینت‌ها تقریباً اتفاق نیفتاده و بعد از باربرداری کرنش غیرکشسان در ماده باقی مانده است. با افزایش تنش بایاس، خاصیت شبه‌کشسانی مشاهده می‌شود و در نهایت در تنش جانبی ۱/۲ مگاپاسکال در یک چرخه‌ی رفت و برگشتی مقدار کرنش دوباره به صفر می‌رسد. با افزایش بیشتر مقدار تنش جانبی، تنش ناشی از بارگذاری قابلیت رساندن ماده به بیشینه‌ی کرنش طولی را ندارد. همچنین با افزایش مقادیر تنش جانبی، نمودارها به سمت بالا جابه‌جا می‌شوند.

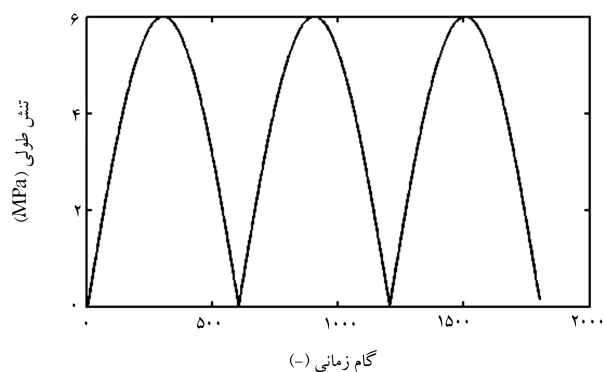
در شکل ۹ نمودارهای مغناطیس‌شوندگی برحسب تنش اعمالی طولی، در مقادیر مختلف تنش در جهت جانبی، رسم شده است. میدان بایاس ۰/۱۵ تسلا در نظر گرفته شده است. در مقادیر تنش جانبی کم، مغناطیس‌شوندگی چرخه‌ی کاملی را طی نمی‌کند و در مسیر برگشت در نقطه‌ی پایین‌تر از نقطه‌ی شروع توقف می‌کند؛ ولی با افزایش تنش جانبی، چرخه‌ی رفت و برگشتی مغناطیس‌شوندگی کامل می‌شود. همچنین با افزایش تنش جانبی نمودارها به سمت راست جابه‌جا می‌شوند.

در شکل ۱۰ به منظور بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر تنش جانبی و متغیر حالت کسر حجمی ناحیه‌ی مغناطیسی و رینت دوم α_2 ، رسم شده است؛ میدان

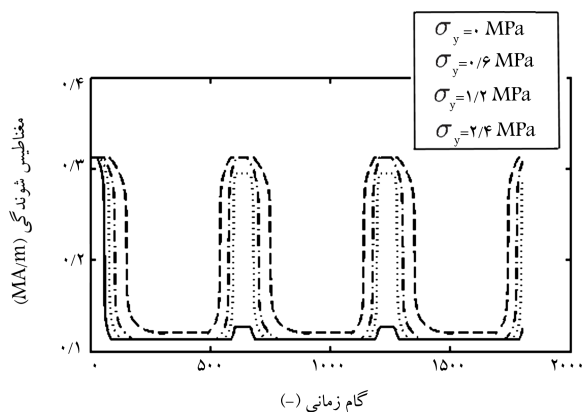
در عمل دشوار باشد. به علاوه، با وجود این که اختلاف مغناطیس‌شوندگی در تنش $2/4$ مگاپاسکال کمتر از تنش $1/2$ مگاپاسکال است، تغییر مغناطیس‌شوندگی در مدت زمان بیشتری صورت می‌گیرد. در نتیجه تغییر شار در مدار ملایم‌تر است که این مسئله می‌تواند در ملاحظات طراحی مهم باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر تنش فشاری در جهت عمود بر بارگذاری بر یک تک‌کریستال آلایژ نیکل - منگنز - گالیوم مورد بررسی قرار گرفت. هدف از اضافه کردن این تنش این بود که چون سازوکارهای برگشت متداول در سیستم‌های برداشت انرژی که از یک میدان مغناطیسی بایاس استفاده می‌کنند، نواقصی دارند که برای ایجاد این میدان مغناطیسی نیازمند تعبیه‌ی یک آهن‌ربای دائمی در دستگاه است. بدین ترتیب، ناخواسته حجم دستگاه بالا می‌رود و گاهی تأمین میدان‌های بایاس مورد نیاز با استفاده از آهن‌ربا امکان‌پذیر نیست. همچنین مشکلات سیم‌پیچ میدان بایاس و حرارت تولید شده از دیگر مشکلات این روش است. با اضافه کردن تنش جانبی بر نمونه آلایژ، عمل برگشت نمونه به حالت اولیه تسهیل می‌شود. نکته‌ی قابل توجه در این مسئله این است که حذف کامل میدان بایاس امکان‌پذیر نیست زیرا کسر حجمی ناحیه‌های مغناطیسی که از متغیرهای داخلی مدل به حساب می‌آید فقط به میدان مغناطیسی وابسته است و بارگذاری مکانیکی تأثیری بر مقدار آن ندارد. از آنجا که این متغیر بر مغناطیس‌شوندگی ماده تأثیر می‌گذارد، بدون وجود میدان مغناطیسی، ماده از لحاظ مغناطیسی همواره خنثی می‌ماند و قابلیت تولید ولتاژ در یک مدار الکتریکی را ندارد. بدین منظور مقدار بهینه‌ی از میدان مغناطیسی مورد نیاز است. بیشترین میزان اختلاف مغناطیس‌شوندگی در راستای عمود بر بارگذاری (جهت جانبی) در یک چرخه‌ی بارگذاری در میدان مغناطیسی بایاس $0/24$ تسلا به دست می‌آید که در این میدان مغناطیسی به تنش فشاری جانبی $0/3$ مگاپاسکال برای برگرداندن کامل ورینت‌ها و از بین بردن کرنش‌های باقی‌مانده نیاز است. به همین ترتیب برای میدان‌های بایاس کوچکتر به تنش‌های فشاری بالاتری نیازمندیم ولی به طور کلی وارد کردن تنش‌های بیشتر از میزان لازم برای برگشت ورینت‌ها اثر معکوس دارد و اختلاف مغناطیس‌شوندگی در یک چرخه کاهش می‌یابد. همچنین کاهش اختلاف مغناطیس‌شوندگی در مقادیر تنش فشاری کمتر و بیشتر از مقدار بهینه ناشی از علل متفاوتی است. به طور مثال در نمودار مغناطش برحسب تنش مشاهده می‌شود که در میدان بایاس $0/15$ تسلا و تنش‌های فشاری کمتر از مقدار بهینه، کاهش اختلاف مغناطیس‌شوندگی در یک چرخه ناشی از عدم کامل شدن چرخه‌ی مغناطیس‌شوندگی است ولی در تنش‌های بالاتر از مقدار بهینه، با وجود کامل بودن چرخه‌ی مغناطیس‌شوندگی، افزایش حداقل مقدار مغناطیس‌شوندگی در یک چرخه، باعث کاهش اختلاف بین بیشینه و کمینه مغناطیس‌شوندگی می‌شود.



شکل ۱۱. منحنی تنش طولی بر حسب گام‌های زمانی.



شکل ۱۲. منحنی مغناطیس‌شوندگی بر حسب گام‌های زمانی در تنش‌های بایاس متفاوت.

قرار می‌گیرد. در شکل ۱۲ نمودار مغناطیس‌شوندگی بر حسب زمان، متناسب با این نوع بارگذاری در میدان بایاس $0/15$ تسلا نشان داده شده است. مقدار مغناطیس‌شوندگی در تنش‌های جانبی $0/6$ و $1/2$ مگاپاسکال هیچ وقت به مقدار اولیه نمی‌رسد؛ که دلیل آن کمتر بودن این تنش‌ها از تنش مورد نیاز و برگشت ناقص ورینت‌هاست. برای تنش جانبی $2/4$ مگاپاسکال، مقدار مغناطیس‌شوندگی در انتهای چرخه به مقدار اولیه می‌رسد ولی به دلیل حاصل نشدن بیشینه کرنش و کسر حجمی ورینت طولی (ورینت ۱) قابل دستیابی، مقدار مغناطیس‌شوندگی به کمترین حد نمی‌رسد. در تمام حالات، منحنی‌ها در چرخه‌های دوم به بعد به تناوب تکرار می‌شوند. همچنین در صورتی که نمونه آلایژ در یک مدار مغناطیس قرار گیرد، قسمت‌هایی از منحنی مغناطیس‌شوندگی که یکنواخت است، مفید نیست چون باعث تغییر شار مدار نمی‌شود. به همین دلیل می‌توان با تغییر شکل بارگذاری (شکل ۱۱)، قسمت‌های یکنواخت را کم کرد یا از بین برد؛ این امر ممکن است

منابع (References)

1. Heczko, O. "Magnetic shape memory effect and magnetization reversal", *J. Magnetism and Magnetic Materials*,

290, pp. 787-794 (2005).

2. Kiefer, B. and Lagoudas, D. C. "Applicatin of a magnetic SMA constitutive model in the analysis of magnetomechanical boundary value problems", *Proceeding Volume*

6170: *Smart Structures and Materials 2006: Active Materials: Behavior and Mechanics*, United states, California, San diego (2006).

3. Tickle, R. "Ferromagnetic shape memory materials", PhD Thesis, University of Minnesota, Minneapolis (2000).
4. Sayyadi, H., Rostami, H. and Askari, M. A. "Investigation on effectiveness of dimension on magnetic shape memory alloy based energy harvester with two different configurations", *J. Modares Mechanical Engineering*, **17**, pp. 136-144 (In Persian) (2016).
5. Krevet, B., Pinneker, V. and Kohl, M. A. "Magnetic shape memory foil actuator loaded by a spring", *J. Smart Materials and Structures*, **21** (2012).
6. Schluter, K., Holz, B. and Raatz, A. "Principle design of actuators driven by magnetic shape memory alloys", *J. Advanced Engineering Materials*, **14**, pp. 682-686 (2012).
7. Kiefer, B. "Phenomenological modeling of ferromagnetic shape memory alloys", *Proceedings Volume 5387, Smart Structures and Materials 2004: Active Materials: Behavior and Mechanics*, United states, California, San diego (2004).
8. Shirani, M. and Kadkhodayei, M. "Constitutive modeling of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys under biaxial compression", *J. Intelligent Material Systems and Structures*, **27**, pp. 1547-1564 (2016).
9. Lamaster, D. H., Feigenbaum, H. P., Ciocanel, C. and Nelson, I. D. "A full 2D thermodynamic-based model for magnetic shape memory alloys", *J. Applied Mechanics*, **81**, pp. 663-679 (2014).
10. Chen, X., Mounmi, Z. and He, Y. J. "A three-dimensional model of magneto-mechanical behaviors of martensite reorientation in ferromagnetic shape memory alloys", *J. Mechanics and Physics of Solids*, **64**, pp. 249-286 (2014).
11. Mousavi, M. R. and Arghavani, J. "A three-dimensional constitutive model for magnetic shape memory alloys under magneto-mechanical loadings", *J. Smart Materials and Structures*, **26** (2016).
12. Staraka, L. and Heczko, O. "Magnetic anisotropy in Ni-Mn-Ga martensites", *Applied Physics*, **93**, pp. 8636-8638 (2003).
13. Karaka, H. E. "Magnetic field-induced phase transformation and variant reorientation in Ni₂MnGa and NiMnCoIn magnetic shape memory alloy", PhD Thesis, Texas A&M University, Texas (2007).
14. Sarawate, N. N. "Characterization and modeling for the ferromagnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga for sensing and actuation", PhD Thesis, Ohio State University (2008).
15. Staraka, L. and Heczko, O. "Reversible 6% strain of Ni-Mn-Ga martensite using opposing external stress in static and variable magnetic fields", *J. Magnetism and Magnetic Materials*, **290**, pp. 829-831 (2004).