

# مدل سازی نموی رفتار مغناطیسی-مکانیکی تک کریستال های آلیاژ حافظه دار مغناطیسی NiMnGa

حسام خواججه سعید (دانشجوی دکتری)

رضا نقدآبادی (استاد)

سعید سهراب پور (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار با استفاده از روش نموی، که از روش های رایج و کارآمد در تحلیل رفتار غیرخطی مواد است، رفتار آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی بررسی و مدلی بر همین اساس ارائه شده است. مدل سازی نموی برای نواحی مختلف نمودار تنش - کرنش، از مدول های سکانت متفاوت استفاده می کند. در این نوشتار برای تقریب نمودار تنش-کرنش آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی، رابطه یی تحلیلی ارائه شده است که پارامترهای به کار رفته در آن از طریق نمودار تجربی قابل دسترس اند. از مدل سازی نموی برای محاسبه ی کرنش حاصل از میدان مغناطیسی در حضور - و یا در غیاب - تنش مکانیکی استفاده شده است. به منظور مدل سازی رفتار فوق کشسان (سوپرلاستیک) آلیاژهای مذکور، اصلاحاتی در محاسبه ی تنش معادل میدان مغناطیسی انجام گرفته و بدین طریق رفتار آلیاژ تحت میدان ثابت و تنش متغیر مدل سازی شده است. مدل سازی نموی در پیش بینی کیفی رفتار آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی از دقت بالایی برخوردار است. این روش به ویژه در پیش بینی کرنش بیشینه ی حاصل از میدان، خطایی کم تر از ۱٪ دارد که در مقایسه با مدل های یک و سه تکه یی مقدار خطای بسیار کم تری است.

واژگان کلیدی: آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی، رفتار فوق کشسان، کرنش حاصل از میدان مغناطیسی، مدل سازی نموی.

## ۱. مقدمه

بالا (در حدود ۳۰ تسلا) تاکنون استفاده ی چندانی نشده است.<sup>[۱]</sup> سازوکار دیگر، تبدیل متغیرهای (واربانت) مارتنزیتی بر اثر حرکت مرزهای دوقلو است.<sup>[۵-۷]</sup> فاز مارتنزیت در این آلیاژها متشکل از چند نوع متغیر است که به وسیله ی مرزهای دوقلو از یکدیگر جدا می شوند. در تغییر شکل های صفحه یی می توان فاز مارتنزیت را متشکل از دو نوع متغیر در نظر گرفت (شکل ۱). در شکل ۱،  $a$ ،  $c$  و پارامترهای شبکه ی کریستالی آلیاژ حافظه دار مغناطیسی اند.

متغیرهای مارتنزیتی ذاتاً دارای خاصیت مغناطیسی هستند.<sup>[۸-۱۰]</sup> فاز مارتنزیت در این آلیاژها اغلب به صورت چهاروجهی پنج لایه<sup>۲</sup> و در برخی موارد به صورت راست گوشه ی هفت لایه<sup>۴</sup> و چهاروجهی تعدیل نیافته<sup>۵</sup> مشاهده می شود. بردار مغناطیسی موضعی در هر متغیر فرومغناطیسی، در یک راستای ترجیحی به نام محور آسان مغناطیسی<sup>۶</sup> قرار دارد که در مورد واحدهای چهاروجهی، این راستا در امتداد وجه کوتاه تر (c) است. بردار مغناطیسی ممکن است در جهت مثبت یا منفی این محور قرار گیرد. چنانچه آلیاژ تحت اثر میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، بردارهای مغناطیسی متغیرها به هم راستاشدن با میدان مغناطیسی خارجی متمایل خواهند شد. با توجه به این که راستای ترجیحی در متغیرهای مختلف دو به دو بر هم عمودند، میدان مغناطیسی نوع خاصی از متغیرها را که راستای ترجیحی آن هم راستا با میدان است،

آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی<sup>۱</sup> نوع جدیدی از مواد هوشمندند که به واسطه ی داشتن ویژگی های منحصر به فرد - از جمله قابلیت ایجاد کرنش های بزرگ (حدود ۶٪) بر اثر میدان مغناطیسی<sup>[۱]</sup> - اخیراً به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته اند. مزیت آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی نسبت به سایر آلیاژهای حافظه دار این است که عملکرد آلیاژهای مغناطیسی سریع (تا فرکانس ۱ کیلوهرتز) است، در حالی که عملکرد آلیاژهای حافظه دار معمولی - به دلیل زمان مورد نیاز برای تبادل حرارت - بسیار کند است (تا فرکانس ۱۰ هرتز).<sup>[۲]</sup> پایین بودن تنش مسدودکننده<sup>۲</sup> (حدود ۶ تا ۱۰ مگاپاسکال) و نیز پایین بودن تنش خروجی (حدود ۱۰ مگاپاسکال) از جمله محدودیت های عمده در کاربرد این مواد است.<sup>[۳]</sup> مجموعه ی عوامل یادشده، آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی را به عنوان گزینه یی مناسب برای کاربرد در حساسه ها (سنسورها) و عملگرها مطرح کرده است.

ایجاد کرنش حاصل از میدان در آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی طی دو سازوکار متفاوت صورت می پذیرد. یکی از این سازوکارها تغییر فاز مارتنزیت به آستنیت (مانند آلیاژهای حافظه دار معمولی) است. از این سازوکار به دلیل نیاز به میدان مغناطیسی

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۶/۲۴، اصلاحیه ۱۳۸۹/۸/۱۸، پذیرش ۱۳۹۰/۱/۳۱.

بی‌رویه‌ی میدان مغناطیسی نمی‌توان همواره شاهد افزایش کرنش بود. لیخاچف و اولاکو رابطه‌ی تحلیلی برای نمودار تنش-کرنش آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی پیشنهاد کردند و با معرفی قانون عمومیت<sup>۹</sup>، اثر میدان مغناطیسی و اعمال تنش مکانیکی را در ایجاد نیروهای محرک بر مرزهای دوقلو یکسان دانستند.<sup>[۱۶]</sup> در سال ۲۰۰۳ نیز محققین با فرض خطی بودن منحنی‌های مغناطیس‌شوندگی<sup>۱۰</sup> روابطی برای محاسبه‌ی تنش مکانیکی معادل با اثر میدان مغناطیسی ارائه کردند.<sup>[۱۷]</sup> پس از آن در سال ۲۰۰۴، با استفاده از پژوهش‌های قبلی، مدل‌های سه‌تکه و یک‌تکه‌ی را که با روش المان محدود سازگاری کامل داشت، معرفی کردند و توانستند میان میدان مغناطیسی و کرنش حاصل از آن در تک‌کریستال‌های آلیاژ NiMnGa رابطه‌ی بی‌دست آورند.<sup>[۱۸]</sup>

در این نوشتار با استفاده از روش نموی که از روش‌های رایج و کارآمد در تحلیل رفتار غیرخطی مواد است، رفتار تک‌کریستال‌های آلیاژ NiMnGa بررسی و مدلی بر همین اساس ارائه می‌شود. مدل‌سازی نموی قابلیت کاربرد در روش المان محدود را دارد و از این رو گستره‌ی وسیعی از مسائل مربوط به آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی را در بر می‌گیرد. علاوه بر این، برای تقریب نمودار تنش-کرنش آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، رابطه‌ی تحلیلی ارائه می‌شود که پارامترهای به‌کار رفته در آن، از نمودار تجربی قابل حصول‌اند. از مدل‌سازی نموی برای محاسبه‌ی کرنش حاصل از میدان مغناطیسی در حضور تنش مکانیکی و در غیاب آن استفاده می‌شود. به‌منظور مدل‌سازی رفتار فوق‌کشسان آلیاژهای مذکور، اصلاحاتی در محاسبه‌ی تنش معادل میدان مغناطیسی انجام گرفته و بدین طریق رفتار آلیاژ تحت میدان ثابت و تنش متغیر مدل‌سازی خواهد شد.

## ۲. مبانی مدل‌سازی آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی

بر اساس مدل ترمودینامیکی لیخاچف و اولاکو، با استفاده از منحنی‌های مغناطیس‌شوندگی، انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی طبق رابطه‌ی ۱ به‌صورت تفاضل انرژی آزاد مغناطیس‌شوندگی در دو راستای آسان<sup>۱۱</sup> و سخت<sup>۱۲</sup> تعریف می‌شود:<sup>[۱۶]</sup>

$$\Delta E_{mag} = g_t(h) - g_a(h) = \int_0^h m_a(h) dh - \int_0^h m_t(h) dh \quad (1)$$

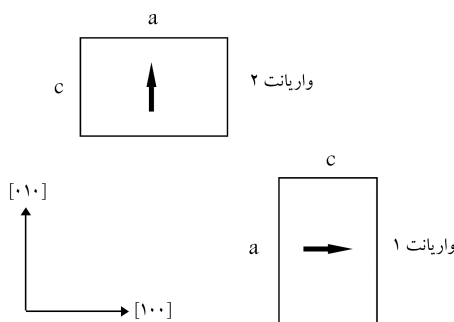
که در آن  $\Delta E_{mag}$  انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی،  $g_t$  و  $g_a$  به‌ترتیب انرژی آزاد مغناطیس‌شوندگی در راستاهای آسان و سخت،  $h$  میدان مغناطیسی و  $m_a(h)$  و  $m_t(h)$  به‌ترتیب مغناطیس‌شوندگی در راستاهای آسان و سخت هستند. از طرفی انرژی آزاد مغناطیسی در حضور ساختار دوقلوی دو متغیره عبارت است از:<sup>[۱۶]</sup>

$$g_{mag}(h, x) = xg_a(h) + (1-x)g_t(h) \quad (2)$$

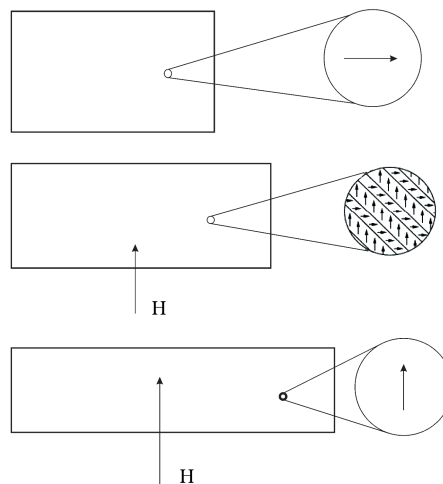
که در آن  $x$  کسر حجمی متغیری است که محور  $c$  آن در راستای میدان مغناطیسی قرار دارد. نیروی محرکی که بر مرزهای دوقلو وارد آمده و موجب بازچینی متغیرهای مارتنزیتی می‌شود، عبارت است از:<sup>[۱۶]</sup>

$$f_{mag}(h) = -\left[\frac{\partial}{\partial x} g_{mag}(h, x)\right]_h = g_t(h) - g_a(h) \quad (3)$$

که در آن  $f_{mag}$  نیروی محرک ناشی از میدان مغناطیسی است. چنانچه طبق قانون عمومیت، نیروی محرک ناشی از میدان مغناطیسی را با نیروی محرک حاصل از تنش



شکل ۱. متغیرهای فاز مارتنزیت در حالت صفحه‌ی.

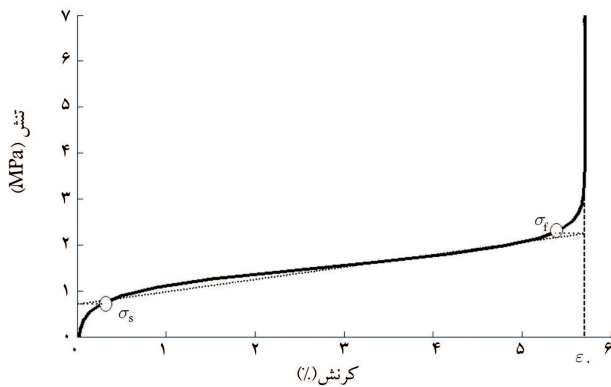


شکل ۲. بازچینی متغیرهای مارتنزیتی بر اثر میدان مغناطیسی خارجی.

بر سایر متغیرها غالب خواهد ساخت. با افزایش کسر حجمی یک نوع متغیر و کاهش کسر حجمی متغیرهای دیگر، شاهد ایجاد کرنش‌های ماکروسکوپی در آلیاژ خواهیم بود. در شکل ۲ بازچینی متغیرهای مارتنزیتی بر اثر میدان مغناطیسی خارجی ( $H$ ) نشان داده شده است.

تبدیل مارتنزیتی در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی برای اولین بار در آلیاژ Ni<sub>2</sub>MnGa مشاهده و گزارش شد.<sup>[۱۷]</sup> سپس ساختار کریستالی مارتنزیت در آلیاژهای Ni<sub>2</sub>MnGa به‌دقت مورد مطالعه قرار گرفت.<sup>[۱۲]</sup>

محققین در سال ۱۹۶۶، برای اولین بار امکان کنترل مغناطیسی اثر حافظه‌دار بودن را در این آلیاژها پیشنهاد کردند و توانستند کرنش‌هایی تا میزان ۲٪ (در اثر میدان مغناطیسی) را در آزمایش‌هایی روی تک‌کریستال Ni<sub>2</sub>MnGa و در غیاب تنش مکانیکی مشاهده کنند.<sup>[۱۳]</sup> در ادامه‌ی این مطالعات، کرنش‌هایی تا میزان ۶٪ در همین آلیاژ گزارش شد.<sup>[۱۴]</sup> اما بالاترین کرنش حاصل از میدان مشاهده شده در تک‌کریستال‌های آلیاژ NiMnGa در حدود ۱۰٪ بوده است.<sup>[۱۵]</sup> در سال ۲۰۰۰ پژوهش‌گران اولین فرمول‌بندی را در ارتباط با رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی ارائه کردند.<sup>[۱۶]</sup> آن‌ها با مطالعه‌ی تراکنش میدان مغناطیسی و تنش مکانیکی و همچنین با بررسی اثرات هرکدام از آن‌ها، اعمال میدان مغناطیسی را معادل با اثر تنش فشاری در همان راستای میدان برشمردند و در همین رابطه معادلاتی ارائه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نیروی محرک مغناطیسی<sup>۷</sup> وارد بر مرزهای دوقلو همیشه یک کران بالا دارد که مقدار نیرو نمی‌تواند از آن فراتر رود. همچنین مقدار این کران مستقل از مقدار میدان مغناطیسی است و با ثابت ناهمسانگردی مغناطیسی<sup>۸</sup> آلیاژ تناسب دارد؛ در حالی که خود نیروی محرک بستگی به مقدار میدان دارد. در نتیجه با افزایش



شکل ۳. تعیین مقادیر مشخصه‌ی نمودار تنش - کرنش.

محاسبه است:

$$\gamma = 1,052, \quad \lambda = 1,06 \quad (10)$$

حال باید با استفاده از رابطه‌ی ۷، مدول سکانت برای نواحی مختلف نمودار تنش - کرنش تعیین شود. بدین منظور تنش متناظر با  $\epsilon_0$  را که از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید، (تنش بیشینه) می‌نامیم.

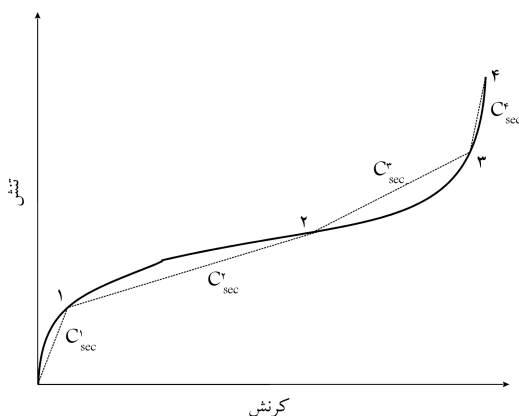
$$\sigma_{max} = a \operatorname{tg}\left(\frac{\epsilon_0 - b}{c}\right) + d \quad (11)$$

تنش بیشینه را به چند قسمت مساوی (برابر با تعداد نواحی مورد نظر در مدل‌سازی نمودار) تقسیم کرده و به وسیله‌ی رابطه‌ی ۷ کرنش مربوط به هر کدام از تنش‌های به دست آمده را محاسبه می‌کنیم. بدین ترتیب نقاطی به صورت  $(\sigma_i, \epsilon_i)$  روی نمودار تنش - کرنش مشخص می‌شود که با متصل کردن این نقاط به یکدیگر، مدول سکانت برای هر قسمت از نمودار طبق رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

$$C_{sec}^i = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\epsilon_i - \epsilon_{i-1}} \quad (12)$$

که در آن  $\sigma_i$  و  $\epsilon_i$  و  $C_{sec}^i$  تنش، کرنش و مدول سکانت نام هستند. به عنوان مثال، در شکل ۴ نحوه‌ی تعیین مدول سکانت برای نواحی مختلف نمودار تنش - کرنش، با استفاده از چهار نمو ( $n = 4$ ) نشان داده شده است.

برای این که ورود تغییرات مدول کشسان در محاسبات ممکن شود، بارگذاری باید به صورت مرحله‌ی انجام پذیرد. به عبارت دیگر مقدار بار وارد شده بر آلیاژ، معیاری



شکل ۴. تعیین مدول سکانت برای قسمت‌های مختلف نمودار تنش - کرنش در حالت  $n = 4$ .

مکانیکی ثابت - که از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود - برابر بگیریم، تنش مکانیکی معادل با میدان مغناطیسی به صورت رابطه‌ی ۵ خواهد بود.<sup>[۱۶]</sup>

$$f_{mec}(\sigma) = \epsilon_0 \sigma \quad (4)$$

$$\sigma_{mag}(h) = \frac{g_t(h) - g_a(h)}{\epsilon_0} = \frac{\int_0^h m_a(h)dh - \int_0^h m_t(h)dh}{\epsilon_0} \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۴،  $f_{mec}$  نیروی محرک حاصل از تنش مکانیکی و  $\sigma$  تنش فشاری ثابت در راستای اعمال میدان مغناطیسی است و در رابطه‌ی ۵،  $\sigma_{mag}$  تنش معادل حاصل از عملکرد میدان مغناطیسی است.  $\epsilon_0$  حد کرنش بلورشناختی (کریستالوگرافیکی) است و از پارامترهای شبکه‌ی کریستالی (a) و (c) به صورت رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{c}{a} \quad (6)$$

### ۳. مدل‌سازی نمودار رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی

در این بخش، مدل‌سازی نمودار تنش - کرنش محوری شبه استاتیکی در نمونه‌های تک‌کریستالی آلیاژ NiMnGa ارائه می‌شود. برای به دست آوردن کرنش به وجود آمده در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی تحت بارگذاری‌های مختلف، ضریب سختی آلیاژ باید معلوم باشد؛ و چون آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند، این ضریب در نواحی مختلف نمودار تنش-کرنش متفاوت است. برای این که بتوان مقدار ضریب سختی را برای قسمت‌های مختلف نمودار تنش - کرنش محاسبه کرد، باید رابطه‌ی تحلیلی برای تقریب این نمودار داشته باشیم. یادآور می‌شود رابطه‌ی که در برخی مراجع پیشنهاد شده<sup>[۱۶]</sup> و در مقالات متعدد به کار گرفته شده، صرفاً برای تقریب زدن نمودار تنش-کرنش بوده و مبنای فیزیکی ندارد. برای بهبود بخشیدن به دقت مدل‌سازی، در این نوشتار رابطه‌ی دیگری برای تقریب زدن نمودار تنش-کرنش به صورت رابطه‌ی ۷ ارائه می‌شود که دقت بسیار بهتری نسبت به رابطه‌ی یادشده<sup>[۱۶]</sup> دارد:

$$\sigma = a \operatorname{tg}\left(\frac{\epsilon - b}{c}\right) + d \quad (7)$$

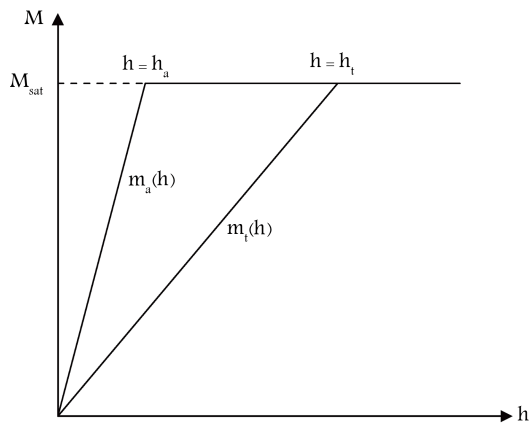
در این رابطه  $a, b, c$  و  $d$  پارامترهایی هستند که باید از نمودار تجربی تنش-کرنش تعیین شوند. سه مقدار مشخصه که از نمودار تجربی تنش - کرنش قابل حصول اند ( $\sigma_s, \sigma_f$  و  $\epsilon_0$ )، در شکل ۳ نشان داده شده‌اند و پارامترهای رابطه‌ی ۷ باید با استفاده از سه مقدار مذکور تعیین شوند.

در شکل ۳،  $\sigma_s$  و  $\sigma_f$  به ترتیب نشان‌گر تنش مربوط به آغاز و اتمام فرایند دوقلوبی شدن هستند. پارامترهای  $a$  و  $d$  دارای بعد تنش‌اند و لذا به  $\sigma_s$  و  $\sigma_f$  مرتبط می‌شوند. اما  $c$  همانند کرنش، بی‌بعد هستند و به  $\epsilon_0$  مرتبط می‌شوند. در روابط ۸ و ۹ مقادیر تقریبی پارامترهای رابطه‌ی ۷ برحسب مقادیر مشخصه‌ی نمودار تنش - کرنش ارائه شده که در اغلب موارد دارای دقت بسیار بالایی هستند.

$$a = \frac{\sigma_f - \sigma_s}{4}, \quad d = \sigma_s + \frac{\sigma_f}{4} \quad (8)$$

$$b = \frac{\gamma \epsilon_0}{\pi}, \quad c = \frac{\lambda \epsilon_0}{\pi} \quad (9)$$

در روابط ۹ و ۸ ضرایبی هستند که برای تصحیح پارامترهای  $b$  و  $c$  و همچنین تطبیق رابطه‌ی ۷ بر نتایج تجربی به کار برده شده‌اند و مقدار آن‌ها از روابط ۱۰ قابل



شکل ۶. منحنی مغناطیس‌شوندگی برحسب میدان مغناطیسی برای آلیاژ حافظه‌دار در راستاهای آسان و سخت متغیر. [۱۷]

در مدل‌سازی نموی، اثر میدان مغناطیسی به صورت تنش مکانیکی معادل در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از تقریب خطی منحنی‌های مغناطیس‌شوندگی (شکل ۶)، مقادیر مغناطیس‌شوندگی در راستاهای آسان و سخت طبق روابط ۱۵ و ۱۶ است، و چنانچه اثر میدان به صورت تنش مکانیکی ثابت در نظر گرفته شود، مقدار تنش معادل میدان مغناطیسی از رابطه ۱۷ به دست می‌آید. [۱۷]

$$m_a = \begin{cases} \frac{h}{h_a} M_{sat} & \text{for } 0 < h < h_a \\ M_{sat} & \text{for } h > h_a \end{cases} \quad (15)$$

$$m_t = \begin{cases} \frac{h}{h_t} M_{sat} & \text{for } 0 < h < h_t \\ M_{sat} & \text{for } h > h_t \end{cases} \quad (16)$$

$$\sigma_{mag}(h) = \begin{cases} \frac{1}{V} M_{sat} h^2 \left( \frac{1}{h_a} - \frac{1}{h_t} \right); & 0 < h < h_a \\ -\frac{1}{V} M_{sat} h_a + M_{sat} h - \frac{1}{V h_t} M_{sat} h^2; & h_a < h < h_t \\ -\frac{1}{V} M_{sat} h_a + \frac{1}{V} M_{sat} h_t; & h_t < h \end{cases} \quad (17)$$

در روابط ۱۵ و ۱۶، به ترتیب میدان مغناطیسی اشباع‌کننده در راستاهای آسان و سخت‌اند و  $M_{sat}$  نیز مغناطیس‌شوندگی اشباع است. لازم به توضیح است که میدان مغناطیسی اشباع‌کننده به شدت میدانی اطلاق می‌شود که آلیاژ را در جهت مورد نظر، به بالاترین مقدار مغناطیس‌شوندگی ممکن می‌رساند، در حالی که مغناطیس‌شوندگی اشباع بالاترین مقدار مغناطیس‌شوندگی در آلیاژ است.

هنگامی که علاوه بر میدان مغناطیسی، تنش فشاری عمود بر میدان نیز وجود داشته باشد، نیروی محرک حاصل از میدان و تنش خارجی در جهت عکس یکدیگر عمل می‌کنند و لذا باید از جمع جبری تنش حاصل از میدان و تنش خارجی استفاده کرد. تا زمانی که تنش معادل میدان از مقدار تنش خارجی کم‌تر باشد، کرنشی در آلیاژ ایجاد نمی‌شود. اما اگر میدان مغناطیسی به حدی افزایش یابد که تنش معادل آن از تنش خارجی فراتر رود، کرنش در آلیاژ ایجاد خواهد شد. چنانچه اعمال میدان مغناطیسی در هر مرحله از فرایند متوقف شود، تنش فشاری خارجی موجب بازگشت کرنش ایجاد شده خواهد شد اگرچه، مقدار کرنش بازبافتی بستگی به بزرگی تنش خارجی دارد.

برای تعیین مدول کشسان آلیاژ است. در صورتی که تنش وارده از مقدار  $\sigma_{i-1}$  بزرگ‌تر و از مقدار  $\sigma_i$  کوچک‌تر باشد، طبق رابطه‌ی ۱۳  $C_{sec}^i$  به عنوان مدول کشسان در مرحله‌ی بعدی بارگذاری خواهد بود.

$$\sigma_{i-1} < \sigma^{applied} \leq \sigma_i \rightarrow E = C_{sec}^i \quad (13)$$

اگر در طول یک مرحله از بارگذاری مدول کشسان ثابت بماند، مقدار محاسبه‌شده برای کرنش برابر با مقدار واقعی خواهد بود. اما اگر در طول یک مرحله از بارگذاری مدول کشسان دچار تغییر شود، مقدار کرنش با استفاده از مدول کشسانی محاسبه می‌شود که آلیاژ قبل از آن مرحله از بارگذاری داشته است و در نتیجه، مقدار محاسبه‌شده دارای خطا خواهد بود. برای رفع این نقیصه دو روش وجود دارد؛ یک روش این است که نمونه‌های بارگذاری به حدی کوچک باشند که تقریباً در کل مرحله‌ی بارگذاری، مدول کشسان آلیاژ تغییر نکند. این روش به دلیل افزایش تعداد مراحل بارگذاری به افزایش زمان محاسباتی منجر خواهد شد. روش دوم، اصلاح مقادیر محاسبه‌شده برای کرنش است که چون زمان محاسباتی را افزایش نمی‌دهد، روش مناسب‌تری به نظر می‌رسد.

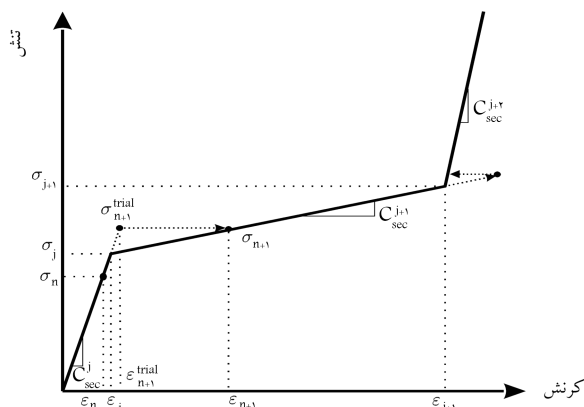
فرض کنیم در طول یک مرحله از بارگذاری، مدول کشسان آلیاژ دچار تغییر شود. اگر  $C_{sec}^j > C_{sec}^{j+1}$  باشد، کرنش محاسبه‌شده کم‌تر از مقدار واقعی خواهد بود و اگر  $C_{sec}^j < C_{sec}^{j+1}$  باشد، کرنش محاسبه‌شده بیشتر از مقدار واقعی خواهد بود (شکل ۵). بنابراین در هر دو حالت فوق، اصلاح مقدار کرنش ضروری است. رابطه‌ی ۱۴ نشان‌دهنده‌ی الگوریتم حاکم بر فرایند اصلاح کرنش‌ها در مدل‌سازی نموی آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی است.

$$E = C_{sec}^j, \quad \varepsilon_{n+1} = \varepsilon_{n+1}^{trial}; \quad \sigma^{applied} < \sigma_j$$

$$E = C_{sec}^{j+1}, \quad \varepsilon_{n+1} = \varepsilon_j + \frac{\sigma_{n+1} - \sigma_j}{C_{sec}^{j+1}}; \quad \sigma^{applied} \geq \sigma_j \quad (14)$$

### ۱.۳. کرنش حاصل از القای میدان مغناطیسی

برای به دست آوردن کرنش حاصل از القای میدان مغناطیسی با استفاده از مدل‌سازی نموی، فرض می‌شود که در حالت اولیه، محور آسان کلیه‌ی متغیرها عمود بر راستای ترجیحی میدان مغناطیسی است. لذا میدان مغناطیسی سعی در هم‌راستا کردن محور آسان متغیرها با راستای خود خواهد داشت. بنابراین بر اثر القای میدان مغناطیسی، در آلیاژ کرنش ایجاد می‌شود اما هنگام حذف میدان، کرنش‌ها برنمی‌گردند.



شکل ۵. نحوه‌ی اصلاح کرنش در مواقعی که در حین یک مرحله از بارگذاری، آلیاژ دچار تغییر در مشخصات مکانیکی شود.

## ۲.۳ رفتار فوق کَشسان و رفتار فوق کَشسان جزئی

به منظور دست یابی رفتار فوق کَشسان در آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی، میدان مغناطیسی و تنش خارجی باید در راستای عمود برهم وارد شوند. در این حالت مقدار میدان مغناطیسی ثابت و مقدار تنش خارجی متغیر است و میدان و تنش در جهت خلاف یکدیگر عمل می کنند. فرض بر این است که محور آسان کلیه متغیرها در حالت اولیه هم راستا با میدان مغناطیسی است.

اگر تنش وجود نداشته باشد و میدان به تنهایی اعمال شود، و نیز چنانچه میدان و تنش در یک راستا اعمال شوند، پس از باربرداری شکل اولیه بازیابی نخواهد شد و رفتار فوق کَشسان حاصل نخواهد شد. در این حالت برای برگرداندن آلیاژ به شکل اولیه (رفتار حافظه داری نه رفتار فوق کَشسان)، می بایست تنش فشاری در راستای میدان قبلی اعمال شود تا ماده شکل اولیه خود را بازیابد.

دقت در نتایج تجربی بیان گر این واقعیت است که میدان مغناطیسی نه به عنوان مانعی در برابر تنش، بلکه به عنوان عاملی در راستای سخت شونده آلیاژ عمل می کند. به بیان دیگر، شدت میدان هر قدر هم که بالا باشد با شروع اعمال تنش، ایجاد کرنش در آلیاژ شروع می شود و نیازی نیست که برای شروع تغییر شکل، تنش مکانیکی از حد معینی فراتر رود. از سوی دیگر، اگر تمامی متغیرها در راستای ترجیحی میدان باشند اعمال میدان مغناطیسی هر قدر هم که شدید باشد، کرنشی در آلیاژ ایجاد نمی کند. دلیل این اتفاق را باید در ویژگی های ماهوی آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی جست و جو کرد. هر یک از این متغیرها را می توان به عنوان یک دوقطبی مغناطیسی<sup>۱۴</sup> در نظر گرفت که ممان مغناطیسی مشخصی دارند. اعمال میدان مغناطیسی خارجی موجب وارد شدن گشتاور به هر یک از دوقطبی ها شده و به هم راستا شدن ممان مغناطیسی دوقطبی با راستای میدان خواهد انجامید. اگر تمامی متغیرها در راستای ترجیحی میدان باشند، ممان مغناطیسی متغیرها موازی میدان خواهد بود و لذا هیچ گشتاوری بر متغیر وارد نمی شود. اما هنگامی که بر اثر تنش خارجی تبدیل متغیرها از یک نوع به نوع دیگر آغاز می شود، تأثیر میدان مغناطیسی نیز پدیدار خواهد شد. با توجه به مطالب فوق، در بررسی رفتار فوق کَشسان آلیاژهای حافظه دار مغناطیسی (تحت بارگذاری بیان شده)، تنش معادل میدان مغناطیسی مقدار ثابتی نخواهد داشت، بلکه ابتدا دارای کم ترین مقدار خود بوده و به تدریج با ایجاد کرنش در آلیاژ، مقدار آن افزایش می یابد. بنابراین طبق رابطه ۱۸، تنش حاصل از میدان مغناطیسی تابعی از کسر حجمی متغیر ترجیحی تنش مکانیکی (ξ) و به عبارتی، تابعی از کرنش ایجاد شده در آلیاژ خواهد بود:

$$\begin{cases} \sigma_{mag} = \sigma_{mag}(h, \xi) \\ \xi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \end{cases} \Rightarrow \sigma_{mag} = \sigma_{mag}(h, \varepsilon) \quad (18)$$

علاوه بر این، تابعی که برای توصیف تنش حاصل از میدان مغناطیسی به کار می رود باید معادلات ۱۹ و ۲۰ را ارضاء کند.

$$\int_0^{\varepsilon_0} \sigma_{mag}(h, \varepsilon) d\varepsilon = \Delta E_{mag}(h) \quad (19)$$

$$\sigma_{mag}(h, 0) = 0, \quad \sigma_{mag}(h, \varepsilon_0) = \sigma_{mag}^{max} \quad (20)$$

در رابطه ۲۰،  $\sigma_{mag}^{max}$  بیان گر تنش بیشینه حاصل از میدان مغناطیسی است.

## ۴. حل مثال های کاربردی و ارائه ی نتایج

### ۴.۱. کرنش حاصل از القای میدان مغناطیسی

برای محاسبه کرنش حاصل از القای میدان مغناطیسی، نمونه یی از آلیاژ  $Ni_{28}Mn_{30}Ga_{42}$  را با فرض این که قبل از بارگذاری، محور آسان کلیه ی متغیرها در راستای [۱۰۰] باشد، در نظر گرفته و نمونه را تحت اثر میدان مغناطیسی در راستای [۰۱۰] قرار می دهیم. پارامترهای مغناطیسی و نیز مشخصات مکانیکی آلیاژ در عدم حضور میدان مغناطیسی<sup>[۱۶]</sup> در جدول ۱ نشان داده شده است.

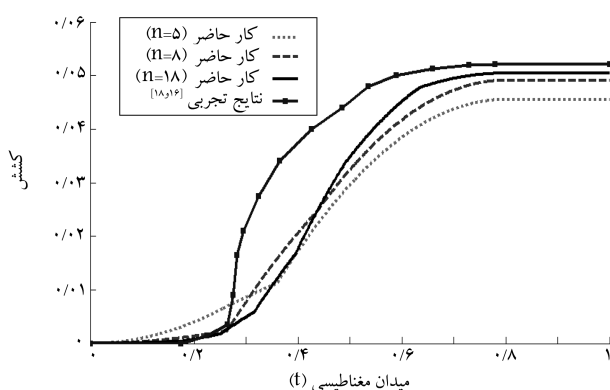
به کمک مدل سازی نوی در سه حالت مختلف ( $n = 5, 8, 18$ ) کرنش را در راستای [۰۱۰] محاسبه می کنیم. نتایج حاصل از مدل سازی نوی در شکل ۷ نشان داده شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

چنان که در شکل ۷ مشاهده می شود، با افزایش تعداد نموا نتایج مدل سازی به نتایج تجربی نزدیک تر می شود. اما افزایش تعداد نموا به بیشتر از ۱۸ عدد، تأثیر چشمگیری در نتایج مدل سازی ایجاد نمی کند. در شکل ۸ مقایسه ی نتایج مدل نوی، نتایج تجربی و نتایج مدل سه تکه<sup>[۱۸]</sup> ارائه شده است.

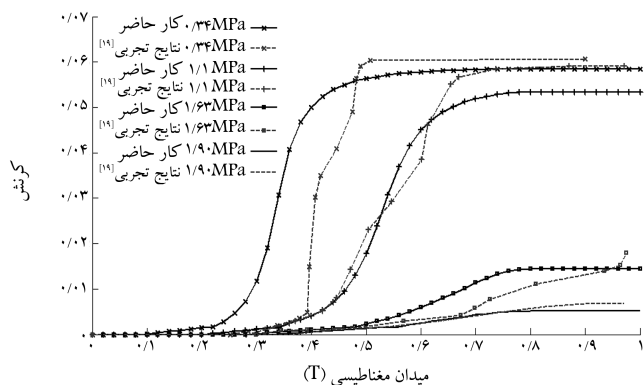
حد کرنش بلورشناختی برای آلیاژ مذکور برابر ۵/۸٪ است که بر اثر تنش تقریبی ۳ مگاپاسکال حاصل می شود. اما بیشترین کرنش نشان داده شده در شکل ۸، هم در نتایج تجربی و هم در نتایج مدل سازی نوی، کم تر از ۵/۸٪ است. دلیل این امر آن است که با توجه به خواص مغناطیسی آلیاژ، بیشترین تنش حاصل از میدان مغناطیسی در آلیاژ فوق برابر ۲/۲۷ مگاپاسکال است. خطای مدل سازی نوی در پیش بینی بیشینه کرنش حاصل از میدان مغناطیسی برابر ۳٪ است که در مقایسه با خطای ۱۱٪ مدل سه تکه، بسیار کم تر است. مقایسه ی نمودارهای شکل ۸ نشان می دهد که به طور کلی مدل سازی نوی تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و مغناطیسی آلیاژ  $Ni_{28}Mn_{30}Ga_{42}$ <sup>[۱۶]</sup>

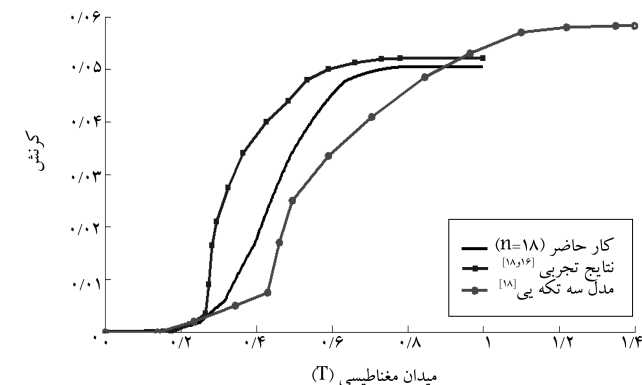
مقدار	نماد و واحد	نام پارامتر
۰٫۳	$h_a (T)$	میدان اشباع کننده در راستای محور آسان
۰٫۸	$h_t (T)$	میدان اشباع کننده در راستای محور سخت
۰٫۵۶۵	$M_{sat} (T)$	مغناطیس شونده اشباع
۵٫۸	$\varepsilon_0 (\%)$	حد کرنش بلورشناختی
۱٫۰۴	$\sigma_s (MPa)$	تنش آغاز دوقلویی شدن
۲٫۱۲	$\sigma_f (MPa)$	تنش اتمام دوقلویی شدن



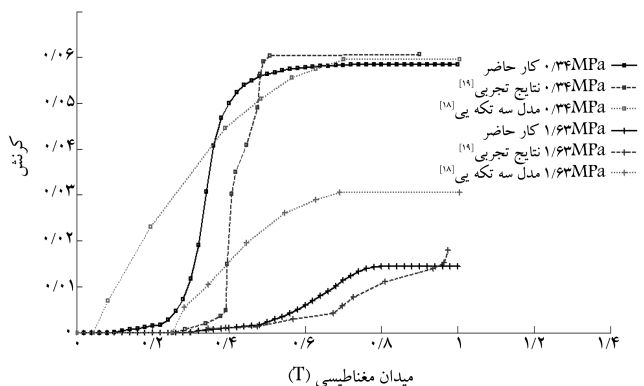
شکل ۷. مقایسه ی نمودار کرنش- میدان مغناطیسی حاصل از مدل سازی نوی در حالات ۵، ۸، ۱۸ با نتایج تجربی موجود<sup>[۱۸، ۱۶]</sup> برای آلیاژ  $Ni_{28}Mn_{30}Ga_{42}$ .



شکل ۹. مقایسه‌ی نمودار کرنش- میدان مغناطیسی در حضور تنش خارجی حاصل از نموی با نتایج تجربی [۱۹] برای آلیاژ  $\text{Ni}_{49.8}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.7}$ .



شکل ۸. مقایسه نمودار کرنش- میدان مغناطیسی حاصل از مدل نموی با نتایج تجربی [۱۸] و نتایج مدل سه تکه [۱۸] برای آلیاژ  $\text{Ni}_{48}\text{Mn}_{30}\text{Ga}_{22}$ .



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نمودار کرنش- میدان مغناطیسی (در حضور تنش) حاصل از مدل نموی با نتایج تجربی [۱۹] و نتایج مدل سه تکه [۱۸] برای آلیاژ  $\text{Ni}_{49.8}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.7}$ .

## ۲.۴. محاسبه‌ی کرنش حاصل از القای میدان مغناطیسی در حضور تنش مکانیکی به روش مدل سازی نموی

برای محاسبه‌ی کرنش حاصل از میدان مغناطیسی در حضور تنش مکانیکی خارجی عمود بر میدان، نمونه‌ی از آلیاژ  $\text{Ni}_{49.8}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.7}$  را با فرض این که قبل از بارگذاری، محور آسان کلیه‌ی متغیرها در راستای  $[100]$  بوده و نمونه تحت اثر میدان مغناطیسی متغیر در راستای  $[010]$  و تنش مکانیکی ثابت عمود بر میدان (در راستای  $[100]$ ) قرار داشته باشد، در نظر می‌گیریم. پارامترهای مغناطیسی و نیز مشخصات مکانیکی آلیاژ در عدم حضور میدان مغناطیسی با استفاده از منابع موجود [۱۹] در جدول ۲ نشان داده شده است.

در چهار مقدار مختلف برای تنش، به کمک مدل سازی نموی کرنش را در راستای  $[010]$  محاسبه می‌کنیم. نتایج حاصل از مدل سازی در شکل ۹ نشان داده شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

چنان که در شکل ۹ نشان داده شده است، در تنش  $1.9$  مگاپاسکال نتایج مدل سازی نموی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. در تنش  $1.1$  مگاپاسکال، اگرچه مدل سازی نموی در پیش‌بینی بیشینه کرنش حاصل از میدان  $10\%$  خطا دارد، تطابق نتایج مدل سازی با نتایج تجربی در سایر نواحی نمودار مشهود است. برای تنش‌های  $0.34$  و  $1.63$  مگاپاسکال، در برخی از نواحی نمودار میان نتایج تجربی و نتایج مدل سازی اختلاف وجود دارد، اما رفتار آلیاژ به لحاظ کیفی به خوبی مدل سازی شده است. در شکل ۱۰ نتایج مدل نموی و نتایج مدل سه تکه [۱۸] برای تنش‌های  $0.34$  و  $1.63$  مگاپاسکال نشان داده شده است که بیانگر دقت بیشتر مدل نموی نسبت به مدل سازی سه تکه است.

## ۳.۴. پیش‌بینی رفتار فوق کشسان و رفتار فوق کشسان جزئی آلیاژ حافظه دار مغناطیسی

برای محاسبه‌ی کرنش حاصل از تنش مکانیکی در حضور میدان مغناطیسی، نمونه‌ی از آلیاژ  $\text{Ni}_{49.8}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.7}$  را در نظر می‌گیریم. پارامترهای مغناطیسی و نیز مشخصات مکانیکی آلیاژ در عدم حضور میدان مغناطیسی، از منابع موجود استخراج شده [۱۷] و در جدول ۳ نشان داده شده است.

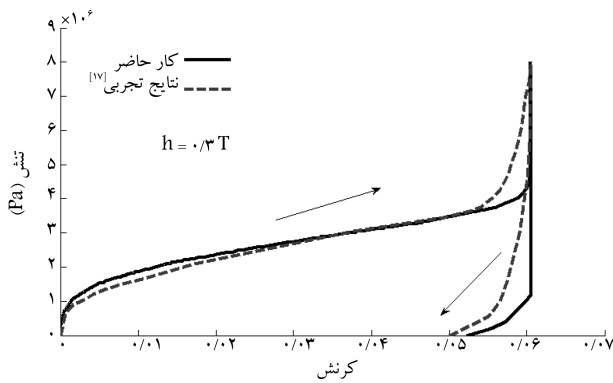
فرض می‌کنیم که قبل از بارگذاری، محور آسان کلیه‌ی متغیرها در راستای  $[100]$  است. نمونه را تحت اثر تنش فشاری متغیر در راستای  $[010]$  و میدان مغناطیسی ثابت عمود بر تنش (در راستای  $[100]$ ) قرار می‌دهیم و می‌خواهیم در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی، به کمک مدل سازی نموی کرنش را در راستای  $[010]$  محاسبه کنیم.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی و مغناطیسی آلیاژ  $\text{Ni}_{49.8}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.7}$  [۱۹]

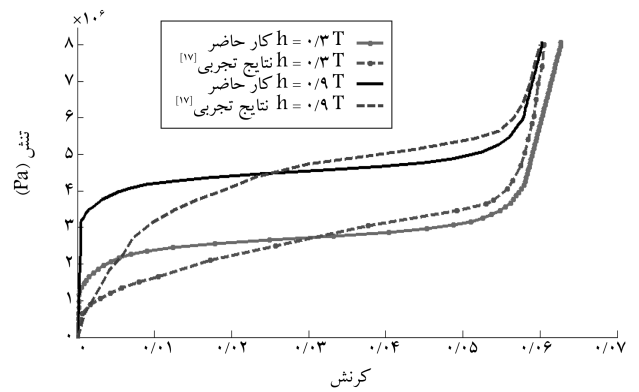
نام پارامتر	نماد و واحد	مقدار
میدان اشباع‌کننده در راستای محور آسان	$h_a (T)$	$0.1$
میدان اشباع‌کننده در راستای محور سخت	$h_t (T)$	$0.75$
مغناطیس شونده‌ی اشباع	$M_{sat} (T)$	$0.671$
حد کرنش بلورشناختی	$\varepsilon_c (\%)$	$6.10$
تنش آغاز دوقلویی شدن	$\sigma_s (MPa)$	$1.14$
تنش اتمام دوقلویی شدن	$\sigma_f (MPa)$	$1.84$

جدول ۳. مشخصات مکانیکی و مغناطیسی آلیاژ  $\text{Ni}_{49.8}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.7}$  [۱۷]

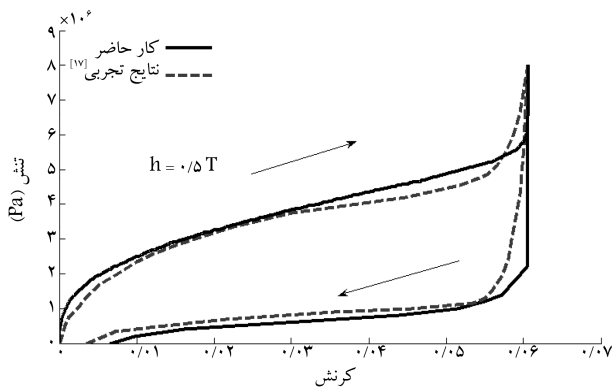
نام پارامتر	نماد و واحد	مقدار
میدان اشباع‌کننده در راستای محور آسان	$h_a (T)$	$0.25$
میدان اشباع‌کننده در راستای محور سخت	$h_t (T)$	$0.89$
مغناطیس شونده‌ی اشباع	$M_{sat} (T)$	$0.716$
حد کرنش بلورشناختی	$\varepsilon_c (\%)$	$5.71$
تنش آغاز دوقلویی شدن	$\sigma_s (MPa)$	$0.99$
تنش اتمام دوقلویی شدن	$\sigma_f (MPa)$	$2.07$



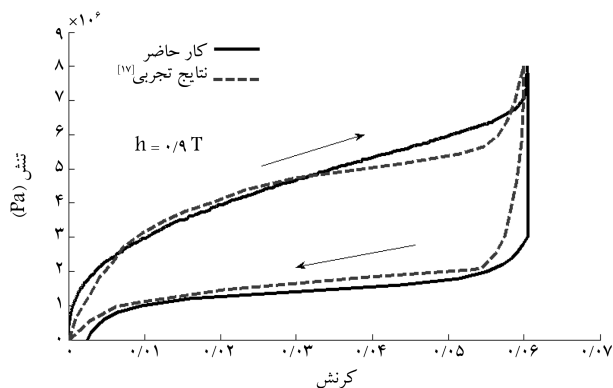
شکل ۱۲. مقایسه‌ی نمودار تنش - کرنش اصلاح شده (در حضور میدان مغناطیسی  $h = 0.3 T$ ) حاصل از مدل‌سازی نموی با نتایج تجربی [۱۷] برای آلیاژ  $.Ni_{49.7}Mn_{29.1}Ga_{21.2}$ .



شکل ۱۱. مقایسه‌ی نمودار تنش - کرنش (در حضور میدان مغناطیسی  $h = 0.3 T$  و  $h = 0.9 T$ ) حاصل از مدل‌سازی نموی با نتایج تجربی [۱۷] برای آلیاژ  $.Ni_{49.7}Mn_{29.1}Ga_{21.2}$ .



شکل ۱۳. مقایسه‌ی نمودار تنش - کرنش اصلاح شده (در حضور میدان مغناطیسی  $h = 0.5 T$ ) حاصل از مدل‌سازی نموی با نتایج تجربی [۱۷] برای آلیاژ  $.Ni_{49.7}Mn_{29.1}Ga_{21.2}$ .



شکل ۱۴. مقایسه‌ی نمودار تنش - کرنش اصلاح شده (در حضور میدان مغناطیسی  $h = 0.9 T$ ) حاصل از مدل‌سازی نموی با نتایج تجربی [۱۷] برای آلیاژ  $.Ni_{49.7}Mn_{29.1}Ga_{21.2}$ .

باید آلیاژ تحت اثر میدان مغناطیسی بالاتر و یا تنش مکانیکی در راستای [۱۰۰] قرار گیرد تا اثر حافظه‌داری ظاهر شود.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که تحت میدان  $0.5 T$ ، تسلای بازیابی کرنش آغاز می‌شود ولی به دلیل کافی نبودن اندازه میدان، فرایند بازیابی به صورت کامل انجام نمی‌شود (رفتار فوق کشسان جزئی). شکل ۱۴ بیان‌گر آن است که میدان  $0.9 T$  تسلای بازیابی

چنان که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، اگر میدان مغناطیسی را به عنوان مانعی در برابر تنش خارجی فرض کنیم -- گرچه تحت میدان‌های مغناطیسی پایین در فرایند بارگذاری تفاوت زیادی در نتایج مدل‌سازی به وجود نمی‌آید -- با افزایش شدت میدان تفاوت چشم‌گیری در نتایج تجربی و نتایج مدل‌سازی ایجاد می‌شود. در مورد فرایند باربرداری، ایجاد کرنش در اثر میدان مغناطیسی صورت می‌پذیرد و بنابراین همانند آنچه که در بخش‌های پیشین (بخش ۱.۴) گفته شد، تنش نقش بازدارنده داشته و به صورت آنی اعمال می‌شود.

اگر میدان مغناطیسی را نه به عنوان مانعی در برابر تنش، بلکه به عنوان عاملی در راستای سخت‌شوندگی آلیاژ در نظر بگیریم، شدت میدان هر قدر که بالا باشد، با شروع اعمال تنش، ایجاد کرنش در آلیاژ شروع می‌شود و نیازی نیست که برای شروع تغییر شکل تنش مکانیکی از حد معینی فراتر رود. با توجه به این که نیروی مغناطیسی وارده بر متغیرها (که همان مغناطیسی دارند) متناسب با سینوس زاویه‌ی بین بردار میدان و بردار ممان مغناطیسی متغیر است، تنش حاصل از میدان باید به صورت تابع سینوسی باشد:

$$\sigma_{mag}(h, \varepsilon) = a_{(h)} \sin\left(\frac{\pi \varepsilon}{2 \varepsilon_0}\right) \quad (21)$$

در رابطه‌ی ۲۱، ضریب  $a_{(h)}$  باید به گونه‌ی تعیین شود که رابطه‌ی ۱۹ ارضا شود (زیرا کار انجام‌شده توسط تنش معادل میدان در تغییر شکل به اندازه‌ی  $\varepsilon_0$  باید برابر با  $\Delta E_{mag}$  باشد). استفاده از رابطه‌ی ۲۱ تفاوت نسبتاً محسوسی میان نتایج مدل‌سازی و نتایج تجربی ایجاد می‌کند و لذا به منظور بهبود نتایج مدل‌سازی، از رابطه‌ی دیگری که تفاوت اندکی با رابطه‌ی ۲۱ در محدوده‌ی مورد نظر دارد، استفاده می‌شود (رابطه ۲۲):

$$\sigma_{mag}(h, \varepsilon) = a_{(h)} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} \quad (22)$$

برای این که رابطه‌ی ۲۲ شرایط معادله‌ی ۱۹ را ارضا کند، مقدار  $a_{(h)}$  باید به صورت رابطه‌ی ۲۳ باشد:

$$a_{(h)} = \frac{3 \Delta E_{mag}(h)}{2 \varepsilon_0} \quad (23)$$

چنانچه در مدل‌سازی نموی، تنش معادل میدان مغناطیسی از رابطه‌ی ۲۲ محاسبه شود، نتایج حاصل به صورت شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ خواهد بود.

در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که کرنش به وجود آمده در آلیاژ به دلیل کم بودن اندازه‌ی میدان مغناطیسی، با حذف تنش بازیابی نمی‌شود. لذا برای بازیابی کرنش

و تکمیل فرایند بازیابی کرنش کافی است (رفتار فوق کشسان). با توجه به شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، تطابق نتایج مدل‌سازی نموی با نتایج تجربی هم در فرایند بارگذاری و هم در فرایند باربرداری کاملاً مشهود است.

## ۵. نتیجه‌گیری

مدل‌سازی نموی به‌عنوان تکامل‌یافته‌ی مدل‌های تکه‌یی که از مدل‌های سکانت متفاوت برای نواحی مختلف نمودار تنش - کرنش بهره می‌برند، معرفی شد. برای تقریب نمودار تنش-کرنش آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، رابطه‌ی پیشنهاد شد که پارامترهای به‌کار رفته در آن، از نمودار تجربی تنش - کرنش قابل حصول‌اند. برای پیش‌بینی کرنش حاصل از میدان مغناطیسی، هم در حضور تنش و هم در غیاب آن، از مدل‌سازی نموی استفاده شد. تحلیل انجام شده بر روی دو آلیاژ متفاوت بیان‌گر این بود که اگرچه گاهی نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی اندکی تفاوت دارد، در مقیاس کلی و به‌ویژه در پیش‌بینی کرنش بیشینه‌ی حاصل از میدان، خطای مدل‌سازی نموی کم‌تر از ۱۰٪ است؛ این مقدار خطا در مقایسه با مدل‌های یک و سه‌تکه بسیار کم‌تر

است. افزایش تعداد نموها در مدل‌سازی نموی، محدودیتی نداشته و موجب پیچیدگی فرمول‌بندی نمی‌شود؛ برخلاف مدل سه‌تکه‌یی معرفی شده در برخی منابع<sup>[۱۲]</sup> که افزایش تعداد نموها به افزایش مرتبه‌ی جملات موجود در فرمول‌بندی و پیچیدگی آن می‌انجامد.

اگرچه برای به دست آوردن کرنش حاصل از تنش مکانیکی اعمال تدریجی اثر میدان مغناطیسی ضروری به نظر می‌رسد، اما برای تعیین کرنش حاصل از میدان مغناطیسی اعمال ناگهانی اثر تنش خطای قابل ملاحظه‌یی ایجاد نمی‌کند. از مدل‌سازی نموی در تحلیل رفتار فوق کشسان آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی نیز استفاده شد. در همین راستا، برخلاف مطالعات قبلی، تنش معادل میدان مغناطیسی به‌صورت یک تنش متغیر در نظر گرفته شد. نتایج حاصله نشان داد که این مدل‌سازی دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی رفتار فوق کشسان آلیاژهای مذکور دارد، دقتی که در هیچ‌یک از تحقیقات مشابه قبلی مشاهده نمی‌شود.

علاوه بر مطالب فوق، با توجه به سازگاری این مدل‌سازی با فرمول‌بندی المان محدود می‌توان گستره‌ی وسیعی از مسائل مربوط به این آلیاژها را با استفاده از مدل‌سازی نموی حل کرد. به‌عنوان مثال، مدل‌سازی نموی می‌تواند در بارگذاری‌های خمشی (که تاکنون مورد استفاده تجاری پیدا نکرده است) مورد استفاده قرار گیرد.

## پانویس

1. magnetic shape memory alloys
2. blocking stress
3. five-layered tetragonal
4. seven-layered orthorhombic
5. non-modulated tetragonal (NM)
6. magnetization easy axis
7. magnetic driving force
8. magnetic anisotropy constant
9. universality rule
10. magnetization curves
11. easy axis
12. hard axis
13. magnetic-field-induced strain (MFIS)
14. magnetic dipole

## منابع

1. Straka, L. and Heczko, O. "Reversible 6% strain of Ni-MnGa martensite using opposing external stress in static and variable magnetic fields", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **290-291**, p. 829 (2000).
2. Tan, H. and Elahinia, M.H. "A nonlinear model for ferromagnetic shape memory alloy actuators", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **292**, p. 1917 (2008).
3. Karaca, H.E.; Karaman, I.; Basaran, B.; Lagoudas, D.C.; Chumlyakov, Y.I. and Maier, H.J. "On the stress-assisted magnetic-field-induced phase transformation in NiMnGa ferromagnetic shape memory alloys", *Acta Materialia*, **55**, p. 4253 (2007).
4. Karaca, H.E.; Karaman, I.; Basaran, B.; Lagoudas, D.C.; Chumlyakov, Y.I. and Maier, H.J. "One-way shape memory effect due to stress-assisted magnetic field-induced phase transformation in NiMnGa magnetic shape memory alloys", *Scripta Materialia*, **55**, p. 803 (2006).
5. Heczko, O.; Sozinov, A. and Ullakko, K. "Giant field-induced reversible strain in magnetic shape memory NiMnGa", *IEEE Transactions On Magnetics*, **36**(5), p. 3266 (2000).
6. Likhachev, A.A.; Sozinov, A. and Ullakko, K. "Different modelling concepts of magnetic shape memory and their comparison with some experimental results obtained in NiMnGa", *Materials Science & Engineering, A* **378**, p. 513 (2004).
7. Zhu, Y. and Dui, G. "Micromechanical modelling of the stress-induced superelastic strain in magnetic shape memory alloy", *Mechanics of Materials*, **39**, p. 1025 (2007).
8. Cullity, B.D., *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley, Reading, MA (1972).
9. O'Handley, R.C., *Modern Magnetic Materials*, John Wiley & Sons, New York (2000).
10. Kittel, C., *Introduction to Solid State Physics*, 7th Edition, John Wiley & Sons, New York (1996).
11. Webster, P.J.; Ziebeck, K.R.A.; Town, S.L. and Peak, M.S. "Magnetic order and phase transformation in Ni<sub>2</sub>MnGa", *Philosophical Magazine, B* **49**(3), p. 295 (1984).
12. Martynov, V.V. and Kokorin, V.V. "The crystal structure of thermally and stress induced martensites in Ni<sub>2</sub>MnGa single crystals", *Journal de Physique III France*, **2**, p. 739 (1992).



13. Ullakko, K.; Huang, J.K.; Kantner, C. and O'Handley, R.C. "Large magnetic-field-induced strains in Ni<sub>2</sub>MnGa single", *Appl. Phys.Lett.*, **69**(13), p. 1966 (1996).
14. Heczko, O.; Sozinov, A. and Ullakko, K. "Giant field-induced reversible strain in magnetic shape memory NiMnGa alloy", *IEEE Transactions on Magnetism*, **36**(5), p. 3266 (2000).
15. Sozinov, A.; Likhachev, A.A.; Lanska, N. and Ullakko, K. "Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase", *Applied Physics Letters*, **80**, p. 1746 (2002).
16. Likhachev, A.A. and Ullakko, K. "Magnetic-field-controlled twin boundaries motion and giant magneto-mechanical effects in NiMnGa shape memory alloy", *Phys. Lett., A* **275**, p. 142 (2000).
17. Straka, L. and Heczko, O. "Superelastic response of NiMnGa martensite in magnetic fields and a simple model", *IEEE Transactions on Magnetism*, **39**(5), p. 3402 (2003).
18. Kiang, J. and Tong, L. "Modelling of magneto-mechanical behaviour of NiMnGa single crystals", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **292**, p. 394 (2005).
19. Murray, S.J., *Magneto-Mechanical Properties and Applications of NiMnGa Ferromagnetic Shape Memory Alloy*, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (2000).

