



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی هوافضا

گروه سازه‌های هوایی

پایان نامه کارشناسی ارشد

# تعیین پارامترهای موثر بر ارتعاشات پیچشی تیر از جنس آلایژ حافظه‌دار

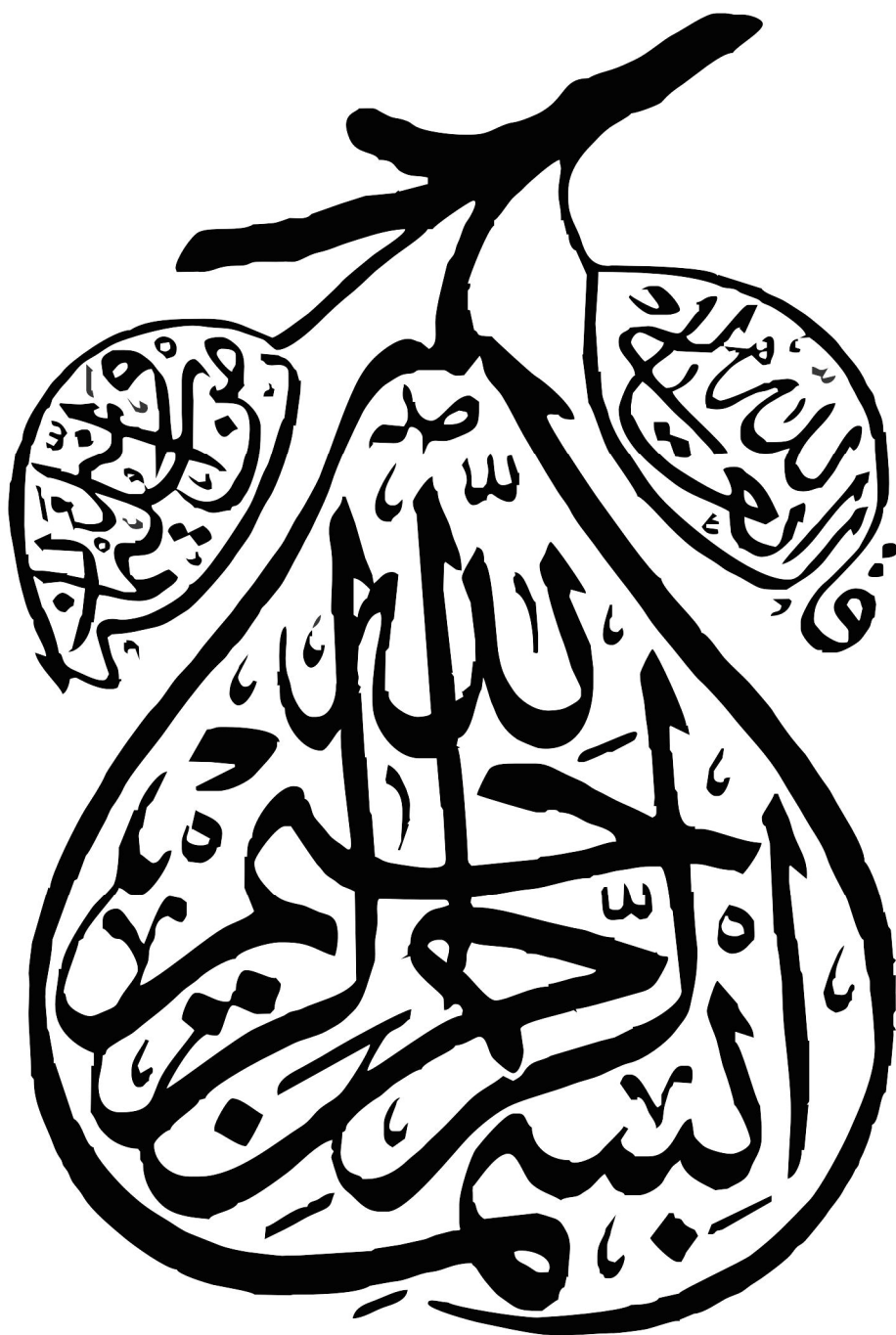
استاد راهنما:

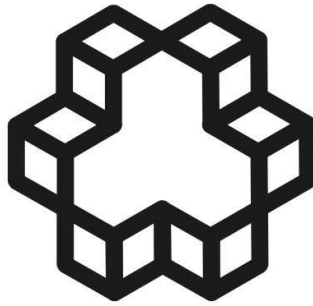
دکتر علی مظفری

دانشجو:

محمد جواد گلابی

زمستان ۱۳۹۰





دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاسیس ۱۳۲۷

دانشکده مهندسی هوا فضا

هیئت داوران پس از مطالعه‌ی پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:  
(تعیین پارامترهای موثر بر ارتعاشات پیچشی تیر از جنس آلایژ حافظه‌دار)) ، توسط محمد جواد گلابی  
صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی هوافضا  
گرایش مهندسی سازه مورد تایید قرار می دهند.

آقای دکتر علی مظفری

۱.استاد راهنما

آقای دکتر سعید ایرانی

۲. ممتحن داخلی

آقای دکتر علی رضا نوین زاده

۳. ممتحن داخلی

## اظہارنامہ

موضوع پایان نامہ : تعیین پارامترهای موثر بر ارتعاشات پیچشی تیر از جنس آلایژ حافظه‌دار

استاد راهنما : آقای دکتر علی مظفری

دانشجو : محمد جواد گلابی

شماره ی دانشجویی : ۸۸۰۴۶۳۴

اینجانب محمد جواد گلابی دانشجوی دوره ی کارشناسی ارشد مهندسی هوا فضا گرایش مهندسی سازه- های هوایی دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می باشد و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ مدرکی یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مطلوب دانشگاه به طور کامل رعایت شده است.

امضاء دانشجو.....

تاریخ.....

## حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱. حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد . هر گونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی هوا فضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع، مجاز نمی باشد.

تقدیم به پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

## چکیده:

آلیاژهای حافظه‌دار گروهی از مواد هوشمند هستند که به دلیل دو خاصیت حافظه‌داری شکلی و سوپراالاستیک، دارای توانایی جذب و کنترل ارتعاشات هستند. به همین دلیل دارای کاربردهای زیادی در صنعت هوافضا، مکانیک، پزشکی و ... هستند. مطالعات موجود در زمینه رفتار سوپراالاستیک در اثر ارتعاش پیچشی این آلیاژ محدود است و اکثر کارهای انجام شده تجربی و یا عددی هستند و حل دقیق ارتعاش پیچشی خالص کمتر انجام شده است. براین اساس در این پایان نامه به بررسی ارتعاشات پیچشی تیر یک سرگیردار SMA با مقطع دایره‌ای می‌پردازیم. در این پروژه ابتدا کسر حجمی مارتنزیتی را برای حالت بارگذاری و باربرداری نوشته و سپس معادله تنش - کرنش به طور کلی محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه سطح مقطع تیر مورد بررسی دایره‌ای است تنش برشی بر حسب شعاع میله و زاویه پیچش بدست می‌آید. در ادامه گشتاور پیچشی را در حالت بارگذاری و باربرداری را نوشته و از طریق آن کار از دست رفته و ضریب فنریت میله بدست می‌آید. سپس معادلات ارتعاشات پیچشی را در حالت آزاد و اجباری محاسبه می‌شود و نمودارهای مربوطه به ازای زاویه پیچش، دما و مواد مختلف رسم می‌شود. در انتها نیز یک استراتژی برای حل ارتعاشات پیچشی سه درجه آزادی میله از جنس آلیاژ حافظه‌دار ارائه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** آلیاژهای حافظه‌دار - خاصیت سوپراالاستیک - ارتعاش پیچشی - حل دقیق - کسر حجمی مارتنزیت

## مراجع

|    |   |       |
|----|---|-------|
| ۱  | فصل اول   | ۱-۱   |
| ۲  | مقدمه   | ۱-۱   |
| ۲  | تاریخچه   | ۲-۱   |
| ۴  | آلیاژهای حافظه دار                              | ۳-۱   |
| ۴  | خصوصیات آلیاژهای حافظه دار                      | ۴-۱   |
| ۵  | اثر حافظه داری (SME)                            | ۱-۴-۱ |
| ۷  | خاصیت سوپرالاستیک                               | ۲-۴-۱ |
| ۸  | تغییر حالت‌های مارتنزیتی و پدیده حافظه دار شدن  | ۵-۱   |
| ۸  | کریستالوگرافی مارتنزیتی                         | ۶-۱   |
| ۱۱ | رفتار ترمومکانیکی                               | ۷-۱   |
| ۱۱ | خاصیت ارتجاعی کاذب                              | ۸-۱   |
| ۱۲ | مزیت های آلیاژهای حافظه دار                     | ۹-۱   |
| ۱۳ | عیوب آلیاژهای حافظه دار                         | ۱۰-۱  |
| ۱۵ | فصل دوم   | ۲-۱   |
| ۱۶ | مقدمه   | ۱-۲   |
| ۱۶ | کاربردهای پزشکی                                 | ۲-۲   |
| ۱۷ | کاربردهای غیرپزشکی                              | ۳-۲   |
| ۱۸ | کاربرد فضای آلیاژهای حافظه دار                  | ۴-۲   |
| ۲۲ | تحقیقات و کارهای انجام شده در زمینه ی هوافضا    | ۵-۲   |
| ۲۵ | تحقیقات انجام شده در زمینه کنترل ارتعاشات       | ۶-۲   |
| ۲۶ | تحقیقات انجام شده در زمینهی مهندسی زلزله و سازه | ۷-۲   |
| ۲۷ | فصل سوم   | ۳-۱   |
| ۲۸ | رفتار مکانیکی عضوهای SMA                        | ۱-۳   |
| ۲۹ | مدل های رفتار تنش- کرنش-دما                     | ۲-۳   |
| ۲۹ | مدل های میکرو                                   | ۱-۲-۳ |
| ۳۰ | مدل های میکرو-ماکرو                             | ۲-۲-۳ |
| ۳۰ | مدل های ماکرو                                   | ۳-۲-۳ |



|    |  |       |
|----|--|-------|
| ۳۸ | رفتار دینامیکی آلیاژهای حافظه دار                                      | ۳-۳   |
| ۳۸ | ارتعاش عرضی  | ۱-۳-۳ |
| ۳۹ | ارتعاش پیچشی   | ۲-۳-۳ |
| ۴۱ | <b>فصل ۴</b>   | -۴    |
| ۴۲ | مقدمه  | ۱-۴   |
| ۴۲ | اهداف  | ۲-۴   |
| ۴۲ | فرضیات   | ۳-۴   |
| ۴۲ | مدل سازی   | ۴-۴   |
| ۴۶ | تبدیل معادلات به معادلات مورد نیاز برای پیچش خالص                      | ۵-۴   |
| ۵۰ | بررسی پیچش خالص میله SMA   | ۶-۴   |
| ۵۴ | ارتعاشات آزاد پیچشی میله از جنس آلیاژ حافظه دار با سطح مقطع دایره ای   | ۷-۴   |
| ۵۵ | ارتعاشات اجباری پیچشی میله از جنس آلیاژ حافظه دار با سطح مقطع دایره ای | ۸-۴   |
| ۵۶ | بررسی ارتعاشات پیچشی سه درجه آزادی                                     | ۹-۴   |
| ۶۰ | <b>فصل پنجم</b>  | -۵    |
| ۶۱ | مقدمه  | ۱-۵   |
| ۶۱ | تاثیر دما و زاویه پیچش بر ضریب دمپینگ                                  | ۲-۵   |
| ۶۳ | ارتعاشات آزاد  | ۳-۵   |
| ۶۵ | ارتعاشات اجباری  | ۴-۵   |
| ۷۰ | نتیجه گیری   | ۵-۵   |
| ۷۱ | پیشنهادات  | ۶-۵   |
| ۷۲ | <b>مراجع</b>   | -۶    |
| ۷۵ | <b>پیوست ۱</b>   | -۷    |

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ سیستم مواد هوشمند [۲] ..... ۲
- شکل ۲-۱ سیکل حرارتی مکانیکی توصیف کننده پدیده حافظه داری شکلی [۳] ..... ۵
- شکل ۳-۱ نمایی از تأثیر گرما در تغییر شکل اولیه سیم‌های دارای حافظه شکلی [۷] ..... ۶
- شکل ۴-۱ اثر حافظه دار یک طرفه [۳] ..... ۶
- شکل ۵-۱ اثر حافظه دار دو طرفه [۳] ..... ۷
- شکل ۶-۱ شمای از رفتار سوپرالاستیک در آلیاژهای حافظه دار [۸] ..... ۸
- شکل ۷-۱ فرآیند تبدیل آستنیت به مارتنزیت در مرحله تغییر فرم شبکه ای، [۳] ..... ۹
- شکل ۸-۱ چگونگی انطباق فاز مارتنزیت بر فاز آستنیت [۳] ..... ۹
- شکل ۹-۱ مرز دوقلویی [۳] ..... ۱۰
- شکل ۱۰-۱ بررسی پدیده حافظهداری در تک کریستال آستنیت [۳] ..... ۱۰
- شکل ۱۱-۱ منحنی تنش - کرنش در دمای متفاوت (A) آستنیت (B) مارتنزیت (C) رفتار الاستیکی کاذب [۳] ..... ۱۱
- شکل ۱۲-۱ مقایسه ی نیرو به وزن اکچویتورهای حافظه دار با اکچویتورهای دیگر [۸] ..... ۱۲
- شکل ۱۳-۱ مقایسه ی قدرت به وزن عملگرهای حافظه دار با دیگر عملگرهای دیگر [۸] ..... ۱۳
- شکل ۱-۲ استنتهای خود انبساط [۱۰] ..... ۱۷
- شکل ۲-۲ عینکهای ساخته شده از آلیاژهای حافظه دار [۱۰] ..... ۱۷
- شکل ۳-۲ فنر محرک حافظه دار برای ساخت تیر اصلی بال هواپیما با سفتی متغییر [۸] ..... ۱۸
- شکل ۴-۲ فنر محرک SMA برای باز کردن محفظه ی آشکارساز [۸] ..... ۱۹
- شکل ۵-۲ یک طرح مفهومی برای کنترل زاویه ی پیچش با SMA [۸] ..... ۱۹
- شکل ۶-۲ تصویر یک دسته سیم SMA و چگونگی کنترل چرخش کوئل توسط سیم SMA [۸] ..... ۲۰
- شکل ۷-۲ دهانه ی ورودی موتور اف-۱۵ و محرک SMA مورد استفاده برای تغییر شکل دهانه ی ورودی موتور [۸] ..... ۲۱
- شکل ۸-۲ بهینه سازی هندسه ی CHEVRON موتور بوئینگ توسط SMA در شرایط پروازی مختلف [۸] ..... ۲۱
- شکل ۹-۲ آنتن های SMA در ماهواره [۱۰] ..... ۲۲
- شکل ۱۰-۲ تصویری از مدل آنتن [۱۳] ..... ۲۴
- شکل ۱۱-۲ نحوه ی قرار گرفتن محرک و سنسور [۱۳] ..... ۲۵
- شکل ۱-۴ شمای از توزیع تنش در میله دایره‌ای ..... ۵۰
- شکل ۲-۴ نمودار گشتاور - زاویه پیچش برای سه دمای مختلف ..... ۵۳
- شکل ۳-۴ نمودار تنش برشی نسبت به شعاع در دمای ۳۱۵ K برای ماده ۱ و به ازای زاویه  $(rad / m) 4/2$  ..... ۵۳
- شکل ۴-۴ نمودار تنش برشی نسبت به شعاع در دمای ۳۱۵ K برای ماده ۱ و به ازای زاویه  $(rad / m) 3$  ..... ۵۳
- شکل ۵-۴ نمایش مکان زاویه های مختلف در حالت رفت و برگشت ..... ۵۷
- شکل ۵-۱ ضریب میرایی برای ماده ۱ بر حسب دماهای مختلف در فاز آستنیت به ازای زاویه پیچش  $(rad / m) 5$  ..... ۶۱
- شکل ۵-۲ ضریب میرایی برای ماده ۲ بر حسب دماهای مختلف در فاز آستنیت به ازای زاویه پیچش  $(rad / m) 5$  ..... ۶۲

- شکل ۵-۳ ضریب میرایی بر حسب دماهای مختلف در فاز آستنیت برای ماده ۲ به ازای زاویه پیچش  $2 \text{ (rad / m)}$  ... ۶۲
- شکل ۵-۴ پاسخ سیستم به ارتعاشات پیچشی آزاد برای ماده ۱ در دمای  $315 \text{ (K)}$  ..... ۶۳
- شکل ۵-۵ پاسخ سیستم به ارتعاشات پیچشی آزاد برای ماده ۲ در دمای  $281/6 \text{ (K)}$  ..... ۶۳
- شکل ۵-۶ مقایسه پاسخ ارتعاش آزاد ماده ۱ برای دو دمای  $T=315 \text{ (K)}$  و  $T=350 \text{ (K)}$  ..... ۶۴
- شکل ۵-۷ مقایسه پاسخ ارتعاش آزاد ماده ۲ برای دو دمای  $T=281/6 \text{ (K)}$  و  $T=292 \text{ (K)}$  ..... ۶۴
- شکل ۵-۸ پاسخ فرکانسی اجباری ماده ۱ برای دو دمای مختلف  $315\text{K}$  و  $350\text{K}$  ..... ۶۵
- شکل ۵-۹ پاسخ فرکانسی اجباری ماده ۲ برای دو دمای مختلف  $281/6\text{K}$  و  $292\text{K}$  ..... ۶۵
- شکل ۵-۱۰ پاسخ فرکانسی بر حسب فرکانس تحریک و دما برای ماده ۱ با زاویه پیچش  $5 \text{ (rad / m)}$  ..... ۶۶
- شکل ۵-۱۱ پاسخ فرکانسی بر حسب فرکانس تحریک و دما برای ماده ۲ با زاویه پیچش  $5 \text{ (rad / m)}$  ..... ۶۶
- شکل ۵-۱۲ پاسخ کامل ارتعاشات (اجباری و آزاد) تیر ماده ۱ تحت تحریک هارمونیک با  $M_0 = 10 \text{ (N.m)}$  ..... ۶۷
- شکل ۵-۱۳ پاسخ کامل ارتعاشات (اجباری و آزاد) ماده ۱ تحت تحریک هارمونیک ..... ۶۷
- شکل ۵-۱۴ مقایسه ارتعاشات پیچشی در دو دمای  $T=315 \text{ K}$  و  $T=350 \text{ K}$  برای ماده ۱ تحت تحریک هارمونیک ..... ۶۸
- شکل ۵-۱۵ پاسخ کامل ارتعاشات (اجباری و آزاد) ماده ۲ تحت تحریک هارمونیک ..... ۶۸
- شکل ۵-۱۶ پاسخ کامل ارتعاشات تیر از جنس ماده ۱ تحت تحریک هارمونیک ..... ۶۹
- شکل ۵-۱۷ سرعت زاویه ارتعاشی برای ماده ۱ تحت تحریک هارمونیک ..... ۶۹

## فهرست علائم

- $A_f$ : دمای پایان فاز آستنیت  
 $A_s$ : دمای شروع فاز آستنیت  
 $E^A$ : مدول یانگ در فاز آستنیت  
 $E^S$ : مدول یانگ در فاز مارتنزیت  
 $G$ : انرژی آزاد گیبس  
 $G_A$ : مدول برشی در فاز آستنیت  
 $G_M$ : مدول برشی در فاز مارتنزیت  
 $H$ : حداکثر کرنش تحول  
 $J$ : ممان اینرسی جرمی  
 $k_i$ : ضریب فنریت  
 $M_f$ : دمای پایان فاز مارتنزیت  
 $M_s$ : دمای شروع فاز مارتنزیت  
 $r_1$ : شعاع ناحیه الاستیک (آستنیت) در حالت رفت  
 $r_2$ : شعاع شروع فاز مارتنزیت  
 $r_1^*$ : شعاع فاز آستنیت در حالت برگشت  
 $r_2^*$ : شعاع پایان فاز مارتنزیت در حالت برگشت  
 $S$ : تانسور نرمی  
 $s_0$ : آنتروپی ویژه  
 $T^+$ : گشتاور در حالت رفت  
 $T^-$ : گشتاور در حالت برگشت  
 $u_0$ : انرژی درونی در حالت مرجع  
 $Y$ : میزان اتلاف انرژی درونی در طول تغییر فاز  
 $\xi$ : کسر حجمی مارتنزیتی  
 $\zeta$ : ضریب دمپینگ معادل  
 $\pi$ : نیروی ترمودینامیکی  
 $\Gamma$ : تابع تحول  
 $\rho$ : چگالی  
 $\alpha$ : تانسور ضریب انبساط حرارتی  
 $\theta^f$ : زاویه پیچش در حالت تغییر فاز کامل  
 $\omega_d$ : فرکانس استهلاك

$\omega_n$ : فرکانس طبیعی سیستم

$f(\xi)$ : تابع سفتی

$\mathcal{E}_{\theta z}$ : کرنش برشی

$\mathcal{E}^t$ : کرنش تحول

$\tau_{\theta z}$ : تنش برشی

$\tau_{\theta z}^f$ : تنش برشی در فاز مارتنزیت کامل

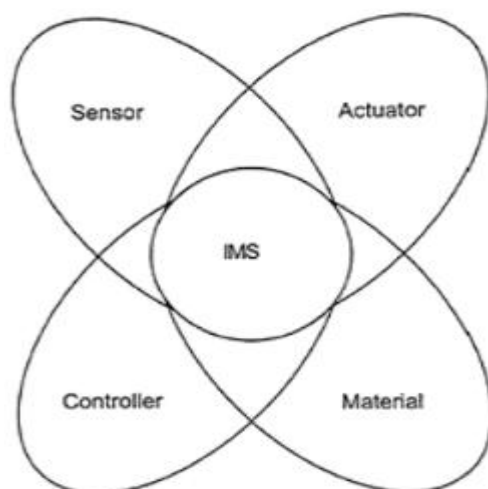
## فصل اول

مقدمه بر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

## ۱-۱ مقدمه

مواد هوشمند آن دسته از موادی هستند که می توانند به تغییرات محیط به بهترین شکل ممکن پاسخ داده و رفتار خود را نسبت به تغییرات تنظیم نمایند. امروزه پنج نوع ماده هوشمند به طور عمده استفاده می شود که شامل ۱- آلیاژهای حافظه دار ۲- سرامیک های پیزوالکتریک ۳- مواد مغناطیسی سخت ۴- مایعات الکترورنولوژیکال ۵- مگنتورنولوژیکال می باشند. این مواد از زمره مواد هوشمند محرک می- باشند. [۱]

برای این مواد، طبقه بندی های مختلفی وجود دارد. نوعی طبقه بندی مناسب برای آن ها، براساس حوزه های است که در آن، محرک به ماده وارد شده و سپس ماده پاسخ خود را در حوزه مکانیکی به معرض نمایش گذارده است. اگر نیروی مکانیکی را به عنوان محرک بگیریم، پاسخ ها در چه حوزه ها و به چه اشکالی ظاهر خواهند شد؟ در واقع، مورد دوم با در نظر گرفتن خصلت حسگری و یا تحریک کنندگی، برای ماده تعریف می شود. اگر پردازش را نیز به ماده هوشمند اضافه کنیم، سیستم یا ساختاری هوشمند خواهیم داشت که استفاده های بیشماری از آن صورت می گیرد (شکل ۱-۱). [۲]



شکل ۱-۱ سیستم مواد هوشمند [۲]

## ۲-۱ تاریخچه

سابقه ی مواد هوشمند به ۳۰۰ سال قبل از میلاد مسیح و دوران کیمیاگری باز می گردد . در آن زمان گرچه توانای تولید طلا وجود نداشت، اما فعالیت های برای تغییر رنگ و خصوصیات فلزهای مختلف صورت گرفت که برخی از موارد استفاده در آن ها را می توان از نوع مواد هوشمند دانست. [۱]

در سال ۱۹۳۲ پدیده‌ی حافظه‌داری شکلی<sup>۱</sup> توسط چانگ<sup>۲</sup> و رید<sup>۳</sup> مشاهده شد. آن‌ها وارون‌پذیری حافظه‌ی شکلی را در کبالت و طلا از طریق مطالعات فلزشناسی و تغییرات مقاومت آلیاژ بررسی کردند. [۳]

در سال ۱۹۳۸ آقای گرینگر<sup>۴</sup> و موردیان<sup>۵</sup> پی بردن که با افزایش و کاهش دما فاز مارتنزیت در آلیاژ مس-روی بوجود می‌آید و از بین می‌رود. [۴]

رفتار ترموالاستیک در فاز مارتنزیت ۱۰ سال بعد توسط خاندروس<sup>۶</sup> و کوردجومور<sup>۷</sup> و در سال ۱۹۵۱ نیز توسط چنج و رید گزارش داده شد. [۵]

در سال ۱۹۵۶ مشاهدات و نتایج مربوط به تز دکترای هوربوچن<sup>۸</sup> در مورد اثر حافظه‌داری در آلیاژ مس و روی منتشر شد. [۳]

در سال ۱۹۶۱ اثر حافظه‌داری شکلی در آلیاژ نیکل و تیتانیوم با درصد اتمی مساوی (۵۰-۵۰٪) توسط بوهرلر<sup>۹</sup> و همکارانش در آزمایشگاه ناوال اوردنانس<sup>۱۰</sup> کشف و تحت نام نیتینول<sup>۱۱</sup> مشهور شد. دو حرف اول نیتینول مربوط به نیکل، دو حرف بعدی مربوط به عنصر تیتانیوم و سه حرف آخر از نام آزمایشگاه ناوال اوردنانس گرفته شده است. در این هنگام تحقیق درباره‌ی متالوژی و کاربردهای عملی آن به طور گسترده آغاز شد. این آلیاژ کاربرد وسیعی و خواص منحصر به فردی از جمله در زمینه‌ی پزشکی، سیستم‌های تحریک حرارتی و مکانیزم‌های خودکار دارد. [۶]

در سال ۱۹۶۷ در کنفرانس بوهرلر، نول<sup>۱۲</sup> و همکارانش تحقیقات گسترده‌ی خود را بر روی نیتینول و کاربردهای تجاری فراوان در صنایع ارائه دادند. از جمله کاربردهای مطرح شده، ساخت کویلینگ توسط شرکت رایچم<sup>۱۳</sup> برای اتصال لوله‌های هیدرولیکی می‌باشد که در صنایع هوایی و نیروی دریایی ایالات متحده و در حوزه‌های نفتی دریای شمال مورد استفاده قرار گرفت. [۳]

در سال ۱۹۸۰ مایکل<sup>۱۴</sup> و هوت<sup>۱۵</sup> با انتشار نتایج تحقیقات خودشان بر روی برنج آن را به عنوان ماده‌ی جدید حافظه‌دار معرفی کردند. [۳] در این سال از آلیاژهای حافظه‌دار در زمینه تعدیل رفتار ایروالاستیسیته آنتن ماهواره‌ها، کنترل ارتعاش سازه‌های فضای، کنترل ارتعاش سطوح کنترل هواپیما و حتی در شبیه‌سازی پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است.

- 
1. Shape memory alloy
  2. Chang
  3. Read
  4. greninger
  5. moordian
  6. khandros
  7. kurdjumor
  8. Horbojen
  9. Buhle
  10. Noval Ordnance lab
  11. Nitinol
  12. Nol
  13. Raychem
  14. Micheal
  15. Hawt



## ۳-۱ آلیاژهای حافظه‌دار

یکی از انواع مواد هوشمند آلیاژهای حافظه‌دار هستند. آلیاژهای حافظه‌دار دارای خواص ترمودینامیکی قدرتمندی همراه با تغییر ناگهانی در ساختار شبکه خود از طریق استحاله مارتنزیتی فعال شده، توسط دما یا تنش هستند.

تا کنون خواص حافظه‌داری در چند سیستم آلیاژی دیده شده است، اما اکثر آنها هنگام فعال‌سازی نیرو یا کرنش بالای ایجاد نمی‌کنند. دو سیستم آلیاژ حافظه‌دار عمده که آن‌ها هنگام فعال‌سازی توانای ایجاد نیروی بالا مشاهده شده است عبارتند از سیستم بر پایه مس (مثلاً آلومینیوم-مس و روی-مس) و سیستم بر پایه نیکل-تیتانیوم.

در این نوع آلیاژها دو نوع فاز کامل وجود دارد. یکی فاز آستنیت و دیگری فاز مارتنزیت، چندین خاصیت فاز آستنیت و مارتنزیت مانند مدول یانگ، مقاومت الکتریکی، ضریب دمپینگ و... با هم تفاوت دارند. در آلیاژ نیکل-تیتانیوم در فاز آستنیت یک ساختار مکعبی که نیکل در مرکز آن و اتم تیتانیوم در گوشه‌های آن قرار دارند وجود دارد در صورتی که فاز مارتنزیت یک شبکه ساختاری لوزی شکل است که اتم‌ها در گوشه‌های لوزی هستند. فاز مارتنزیت داری دو شکل دوقلویی<sup>۱</sup> و غیردوقلویی<sup>۲</sup> است شکل دوقلویی زمانی اتفاق می‌افتد که تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت بر اثر کاهش دما از دمای آستنیت به دمای مارتنزیت باشد (اثر حافظه‌داری) که در این حالت دو بلور جداگانه برخی از نقاط شبکه بلوری مشابه‌شان را به صورت متقارن به اشتراک می‌گذارند. در این حالت تغییر شکل ماکروسکوپی ناچیز است. اگر به مارتنزیت در این حالت باری اعمال شود انواع مارتنزیتی به یک نوع تبدیل می‌شود که به این جهت‌گیری مجدد دوقلویی‌زدایی (غیر دوقلویی) گویند.

تحول فازی مارتنزیتی می‌تواند با بارگذاری خالص مکانیکی در فاز آستنیت تولید شود که در این صورت دوقلویی‌زدایی مارتنزیتی به طور مستقیم از آستنیت توسط اعمال تنش در دمای بالای  $A_s$  تشکیل می‌شود (خاصیت شبه الاستیک). و در این حالت ما یک تغییر شکل ماکروسکوپی مشاهده می‌کنیم. فاز آستنیت دارای تقارن بیشتری نسبت به دو شکل مارتنزیت دارد.

## ۴-۱ خصوصیات آلیاژهای حافظه‌دار

خواص متمایز SMA در نتیجه توانایی تغییر ساختار کریستالوگرافی بین فاز آستنیت با تقارن بالا و مارتنزیت با تقارن پایین در پاسخ به بارهای مکانیکی و یا حرارتی می‌باشد. آلیاژهای حافظه‌دار دارای دو خاصیت عمده هستند یکی خاصیت سوپرالاستیک و دیگری اثر حافظه‌داری شکلی.

- 
1. twining
  2. detwinning

## ۱-۴-۱ اثر حافظه‌داری (SME):

در پدیده‌ی حافظه‌داری، نمونه در دمای پایین در حالت مارتنزیتی به مقدار معینی تغییر فرم داده می‌شود سپس با گرم کردن نمونه و برگشت آن به حالت آستنیتی، شکل نمونه نیز به حالت اول خود باز می‌گردد.



شکل ۲-۱ سیکل حرارتی مکانیکی توصیف کننده پدیده حافظه داری شکلی [۳]

شکل (۲-۱) چگونگی پدیده‌ی حافظه‌داری شکلی را با تبدیل دو فاز آستنیت و مارتنزیت به یکدیگر نشان می‌دهد. بررسی بر روی تغییر حالت متالورژیکی نمونه‌ی جامد، تغییر آرایش اتم‌ها بدون هیچگونه تغییری در ترکیب شیمیایی فاز زمینه را نشان می‌دهد. این تغییر آرایش منجر به ایجاد ساختار کریستالی فاز جدید و پایدار می‌شود. پیشرفت تغییر حالت بدون نیاز به حرکت و جابجایی اتم‌ها به صورت مجزا، را می‌توان مستقل از زمان دانست و به همین دلیل می‌توان وابستگی دما را به عنوان تنها عامل پیشرفت این تغییر نشان داد. [۳]

در فرایند برگشت به شکل اولیه، آلیاژ می‌تواند نیروی زیادی را تولید کند که این نیرو می‌تواند برای تحریک مفید باشد.

مکانیزم اصلی که خواص آلیاژهای حافظه‌دار را کنترل می‌کند، تغییر کریستالی آلیاژ است. به این معنی که ساختار مارتنزیتی در دمای پایین با افزایش دما به ساختار آستنیتی تبدیل می‌شود و در هنگام سرد کردن، فرایند عکس رخ می‌دهد. بسیاری از مواد استحاله‌ی مارتنزیتی دارند اما برتری که آلیاژهای حافظه‌دار را نسبت به آلیاژهای دیگر متمایز می‌کند، قابلیت دوقلویی شدن این آلیاژ در تحول مارتنزیتی می‌باشد. در حالی که مواد دیگر بر اثر لغزش و حرکت نابجای تغییر شکل می‌دهند.

آلیاژهای حافظه‌دار به وسیله‌ی تغییر جهت ساده ساختار کریستال‌های خود و از طریق مرزهای دوقلویی به تنش‌های اعمالی، عکس‌العمل نشان می‌دهد. اگر آلیاژ در دمای پایین هنگامی که فاز مارتنزیتی حاکم است تغییر شکل پلاستیک دهد. ساختار کریستالی دوقلویی در آلیاژ ایجاد می‌شود که ناشی از تغییر فرم پلاستیکی است.

این دسته از فلزات، درست مانند آب که در دماهای مختلف از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌شوند، به این دلیل که مولکول‌های آنها قابلیت چیده‌مان مجدد دارند، از قابلیت بازگشت به شکل اولیه برخوردارند. عاملی که سبب تغییر شکل فلز و یا بازگشت به شکل اولیه آن می‌شود، اختلاف ساختار مولکولی در هر

فاز است.

در شکل (۳-۱) سمت چپ، فلز حافظه‌دار را در حالتی که شکل اولیه خود را در دمای اتاق دارد را نشان می‌دهد. زمانی که بار اعمال می‌شود، فلز تغییر شکل می‌دهد. سپس به محض برداشته شدن بار و اعمال کمی گرما، مولکول‌ها به شکل ساختاری سخت در می‌آیند، به گونه‌ای که به یک ساختار با شبکه‌ای متفاوت مبدل می‌شوند، اما هنوز وضعیت قرارگیری مولکولی معمولی است و همان ساختار فیزیکی در مقیاس ماکرو وجود دارد. [۷]

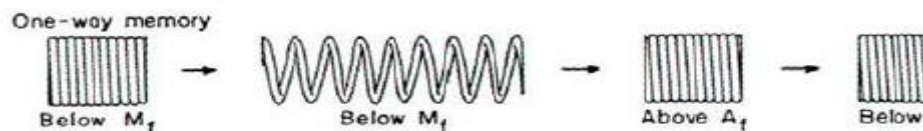


شکل ۳-۱ نمایی از تأثیر گرما در تغییر شکل اولیه سیم‌های دارای حافظه شکلی [۷]

#### ۱-۴-۱ اثر حافظه‌دار یک طرفه و دو طرفه

##### الف) اثر حافظه‌دار یک طرفه

در صورتیکه اثر حافظه‌داری فقط بعد از تغییر شکل در حالت مارتنزیتی و سپس در سیکل گرم کردن مشاهده شود به آن اثر حافظه یک طرفه گفته می‌شود. این بدان معنی است که در این حالت تغییر شکل ایجاد شده، فقط با گرم کردن به حالت اولیه قبل از تغییر شکل باز می‌گردد و چنانچه جسم را دوباره سرد کنیم تغییری در شکل آن حاصل نمی‌شود. این خصوصیت در شکل (۴-۱) نمایش داده شده است.



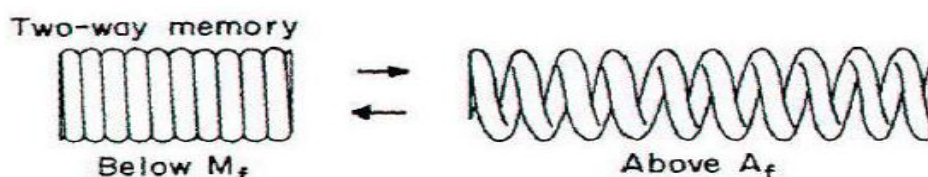
شکل ۴-۱ اثر حافظه دار یک طرفه [۳]

همانطور که در تصویر مشاهده می‌شود ابتدا فنر در دمای  $M_f$  به مقدار معینی تغییر فرم داده می‌شود به صورتیکه تغییر فرم دائمی در آن باقی بماند حال اگر فنر تغییر فرم داده شده را تا دمای  $A_f$  حرارت دهیم مجدداً به شکل اولیه خود برمی‌گردد و در سیکل سرد شدن تا دمای  $M_f$  هیچگونه

تغییر شکلی در فنر مشاهده نمی‌شود.

### ب) اثر حافظه‌دار دوطرفه

برگشت‌پذیری به حالت اولیه خود در اثر سرد و گرم کردن آلیاژهای حافظه‌دار دوطرفه در بازه معینی از دما امکان‌پذیر است. در شکل (۱-۵) یک فنر با اثر حافظه‌دار دوطرفه به صورت باز شده در حالت آستنیت و شکل جمع شده در حالت مارتنزیتی نشان داده شده است.



شکل ۱-۵ اثر حافظه‌دار دو طرفه [۳]

همانطور که مشاهده می‌شود. اگر فنر گرم شود باز شده و در سیکل سرد شدن مجدداً به شکل جمع شده در می‌آید.

باید توجه داشت که آلیاژهای حافظه‌دار برای اینکه اثر حافظه‌دار دوطرفه از خود نشان دهند نیاز به انجام عملیات ترمومکانیکی خاصی بر روی آنها می‌باشد.

#### ۱-۴-۲ خاصیت سوپرالاستیک:

یک نمونه SMA در حالت آستنیت و در دمای بالای  $A_f$  با تنش صفر تنها در آستنیت پایدار است. اگر این نمونه بارگذاری شود در حالی که دما ثابت نگه داشته شده است ماده یک رفتار غیرخطی ناشی از تبدیل آستنیت به مارتنزیت تک متغیره به واسطه‌ی القای تنش، ارائه می‌دهد. با باربرداری در حالیکه مجدداً دما ثابت است یک استحالته‌ی معکوس از مارتنزیت به آستنیت به وقوع می‌پیوندد که نتیجه‌ی ناپایداری فاز مارتنزیت در دمای بالای  $A_f$  است (شکل ۱-۶). در انتهای فرایند بارگذاری و باربرداری هیچ کرنش دائمی وجود نخواهد داشت. مسیرهای باربرداری و بارگذاری برهم منطبق نیستند و تنش در باربرداری کمتر از تنش در بارگذاری است در نتیجه زیر نمودار تنش-کرنش یک ناحیه بسته وجود دارد و بنابراین مسیر تنش-کرنش یک حلقه‌ی هستریسیز بسته خواهد بود.