

قلم



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک  
(گرایش طراحی کاربردی)

کنترل محرک‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار و  
کاربرد آن در سیستم‌های نانوالکترومکانیکی  
(NEMS)

توسط

رسول خندان

استاد راهنما:

دکتر مجتبی محزون

۱۳۸۷ / ۲ / ۱۳

اردیبهشت ماه ۱۳۸۷

۱۵۰۹۲۰۴

به نام خدا

کنترل محرک‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار و کاربرد آن در  
سیستم‌های نانوالکترومکانیکی (NEMS)

به وسیله‌ی:

رسول خندان

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی  
از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

مهندسی مکانیک

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر مجتبی محزون، استادیار بخش مکانیک (رئیس کمیته).....

دکتر محمد اقتصاد، دانشیار بخش مکانیک.....

دکتر سید احمد فاضل‌زاده، استادیار بخش مکانیک.....

اردیبهشت ماه ۱۳۸۷

تقدیم به

پدر و مادرم،

آموزگاران عشق و فداکاری و همراهان همیشه زندگیم

و

خواهرم،

مهربانترین یاورم

## سپاسگزاری

سپاس خداوندی را که سخنوران از ستودن او عاجزند و حسابگران از شمارش نعمتهای او ناتوان و تلاشگران از ادای حق او درمانده‌اند. خدایی که افکار ژرفاندیش، ذات او را درک نمی‌کنند و دست غواصان دریای علوم به او نخواهد رسید. خدای را سپاس می‌گوییم تا مرا به این گردآوری سخنان پراکنده، و نزدیک ساختن آنها به یکدیگر در یک مجموعه، توفیق عنایت فرمود، در آغاز کار، برگهای سفید در هر فصل قرار دادم تا به کلام تازه، یا تفسیر جالبی که رسیدم بر آن بیافزایم، تا سخن پوشیده آشکار شود، و آنچه نیافتنی می‌نمود، به دست آید.

از جناب آقای دکتر مجتبی محزون که در این سه سال نه تنها استاد راهنمایی خوب، بلکه معلم اخلاقی بزرگوار، راهنمایی گرانمایه و چراغ راهی برای طی مسیر زندگی آینده‌ام بودند، تشکری خالصانه دارم. برای ایشان طلب عمری طولانی، همراه با سلامتی کامل از خداوند منان مسئلت دارم، باشد که سایر دانشجویان از تلمذ ایشان بهره ببرند.

همچنین از اساتید گرامی آقایان دکتر محمد اقتصاد و دکتر سید احمد فاضل‌زاده به خاطر مشاوره‌های مفید و سازنده‌شان کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر محمد الهی‌نیا استاد دانشگاه Toledo به علت همکاری صمیمانه و استفاده از نتایج و تجربیات ایشان تشکر ویژه دارم، امیدوارم که در تمام مراحل زندگی پیروز و سربلند باشند.

بر خود واجب می‌دانم از پدر و مادر عزیزم خواهر مهربانم و تمام معلمان و اساتید خود که در پرتو زحماتشان گام‌های زندگی‌ام را برداشته‌ام کمال سپاسگزاری را داشته باشم.

از دوستان گرانقدرم که دوستی‌شان را ثروتی بس عظیم و تمام نشدنی می‌دانم و در این پایان نامه و سایر مراحل زندگی همواره یاریم کرده‌اند، آقایان حسین دفتریان، احسان هادی، علی حمصی‌زاده، پدرام ریاحی، علی قاسمی و سایر دوستانم صمیمانه سپاسگزارم.

اکنون که از شهر ناز و راز، شیراز زیبا و همیشه بهاری می‌روم از لسان الغیب بیتی بهر تحفه با خود به یادگار می‌برم.

دشمن به قصد حافظ اگر دم زند چه باک      منت خدای را که نیم شرمسار دوست

## چکیده

# کنترل محرک‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار و کاربرد آن در سیستم‌های نانوالکترومکانیکی (NEMS)

به وسیله‌ی:

رسول خندان

مواد هوشمند به دلیل قابلیت‌های فراوانشان در کاربردهای مهندسی و طراحی، مخصوصاً در علوم مهندسی زیستی، رباتها و محرک‌های کوچک، از سوی محققان به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. آلیاژهای حافظه‌دار که یکی از انواع مواد هوشمند هستند، کرنش‌های بسیار بزرگ و قابل بازگشت دارند و نسبت تولیدی به حجمشان بسیار زیاد می‌باشد. به همین دلیل می‌توان از آنها در کاربردهایی که نیاز به تغییر شکل یا نیروی تولیدی زیادی دارند، استفاده کرد. همچنین آلیاژهای حافظه‌دار بیشترین مقدار کار خروجی در واحد حجم برای یک سیکل را در میان میکرو-نانو محرک‌ها دارند. در این پایان‌نامه، مدل انرژی آزاد برای فیلم نازکی از آلیاژ حافظه‌دار بر پایه مدل میکرومکانیکی بررسی شده و برخی کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار در میکرو و نانو مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

یکی از اولین معادلات متشکله یک بعدی برای مدل ماکرومکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار توسط برینسون ارائه شد که اساس بسیاری از مطالعات بعدی قرار گرفت. در معادله برینسون، چندین تابع پیشنهادی برای به دست آوردن معادله متشکله آلیاژهای حافظه‌دار در نظر گرفته شده است. اخیراً برخی محققان ناهمگونی‌هایی را در مدل برینسون مشاهده کرده و سعی نمودند مدلی ارائه کنند که بر خلاف مدل برینسون، معادلات سازگاری را ارضا کند. با این حال، فرمول بندی آنها علاوه بر حجم زیاد، فاقد صراحت بوده و در برخی موارد روابط درستی برای تانسورهای انتقال ارائه نمی‌کند. در این پایان‌نامه، معادلات متشکله یک بعدی از روابط بنیادی به وسیله یک روش ساده استخراج شده است. تانسورهای انتقال جدید، بدون انجام هیچ فرض اضافه‌ای، از تعاریف اصلی به دست آمده، با تانسورهای مدل برینسون مقایسه گشته و سازگاری مدل اثبات گردیده است. همچنین در این پایان‌نامه، یک محرک از جنس آلیاژ حافظه‌دار که قبلاً توسط محققین دیگری طراحی و ساخته شده، به عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته و رفتار آن به وسیله یک کنترلر فازی-تطبیقی مورد بررسی قرار گرفت.

از آنجا که معادله متشکله آلیاژهای حافظه‌دار به شدت غیرخطی است، پارامترهای آن به طور دقیق قابل اندازه‌گیری نیستند و این مواد در شرایط مختلف، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل، بسیار مهم است که کنترلر قابلیت تطبیق‌پذیری بالایی داشته باشد و به مدل وابسته نباشد. از این رو از کنترلر فازی-تطبیقی استفاده گشته است. در انتها، مساله تعقیب مسیر شبیه‌سازی شده و خطاها با کنترلر PID مقایسه شده است و نشان داده شد که کنترلر فازی-تطبیقی بهتر از انواع پیشین قادر به کنترل یک محرک از جنس آلیاژ حافظه‌دار است.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه
۱	۱-۱- مقدمه‌ای بر مواد هوشمند
۲	۲-۱- مواد پیزوالکتریک
۳	۳-۱- مواد Magnetostrictive
۴	۴-۱- پلیمرهای الکتروفعال
۵	۵-۱- آلیاژهای حافظه‌دار
۶	۶-۱- اهداف و ساختار پایان نامه
۹	فصل دوم: کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در ابعاد بسیار کوچک و مدل حاکم بر آن
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۱	۲-۲- مصارف پزشکی
۱۲	۱-۲-۲- لوله‌های استنت
۱۲	۲-۲-۲- فیلترهای لخته‌گیری خون
۱۴	۳-۲-۲- ASDOS
۱۵	۴-۲-۲- سایر کاربردهای پزشکی
۱۶	۳-۲-۳- مصارف غیرپزشکی
۱۸	۱-۳-۲- رباتیک
۱۸	۲-۳-۲- هوا-فضا
۱۹	۴-۲- کاربرد آلیاژ حافظه‌دار در ابعاد کوچک
۲۰	۵-۲- مدل آلیاژ حافظه‌دار لایه نازک
۲۲	۶-۲- مدل همگن ماده SMA
۲۳	۱-۶-۲- انرژی آزاد
۲۳	۲-۶-۲- تغییرات فاز
۲۹	۳-۶-۲- احتمال تبدیل‌ها
۳۰	۴-۶-۲- تغییرات دمایی
۳۱	۵-۶-۲- کرنش میانگین
۳۲	

۳۳	۷-۲- مدل ناهمگن ماده SMA
۳۶	فصل سوم: معادلات ساختاری آلیاژهای حافظه‌دار
۳۶	۱-۳- مقدمه
۴۰	۲-۳- طبقه‌بندی مدل‌های آلیاژهای حافظه‌دار
۴۰	۳-۳- مدل‌های پدیدار شناختی
۴۳	۴-۳- سایر مدل‌های ارائه شده برای آلیاژ حافظه‌دار
۴۵	۵-۳- مدل برینسون
۵۱	۶-۳- اصلاح مدل برینسون
۵۳	۷-۳- ارائه روشی جدید برای استخراج معادله متشکله یک بعدی آلیاژ حافظه‌دار
۵۷	فصل چهارم: روابط حاکم بر یک محرک آلیاژ حافظه‌دار و مدل آن
۵۷	۱-۴- مقدمه
۵۷	۲-۴- محرک آلیاژ حافظه‌دار
۵۹	۳-۴- مدل محرک آلیاژ حافظه‌دار
۶۰	۱-۳-۴- مدل انتقال حرارت
۶۱	۲-۳-۴- مدل ساختاری سیم
۶۱	۳-۳-۴- مدل تبدیل فاز
۶۱	۱-۳-۳-۴- تبدیل معکوس
۶۲	۲-۳-۳-۴- تبدیل مستقیم
۶۲	۴-۳-۴- مدل سینماتیکی
۶۲	۵-۳-۴- مدل دینامیکی
۶۳	۴-۴- مشخصات مدل
۶۷	۵-۴- شرایط حدی حاکم بر سینتیک تبدیل فاز
۷۹	۶-۴- جمع بندی
۸۲	فصل پنجم: کنترل محرک آلیاژ حافظه‌دار
۸۲	۱-۵- مقدمه
۸۵	۲-۵- کنترل به وسیله PWM
۸۵	۳-۵- کنترلرهای خطی
۸۶	۱-۳-۵- اعمال کنترلر PID بر محرک SMA نمونه
۸۷	۴-۵- کنترلرهای غیرخطی
۸۸	۵-۵- کنترل فازی تطبیقی
۹۵	۱-۵-۵- روابط حاکم بر کنترلر فازی تطبیقی-مقاوم



۱۰۲	۵-۶- اعمال کنترل فازی تطبیقی-مقاوم بر محرک آلیاژ حافظه‌دار نمونه و نتایج شبیه‌سازی آن
۱۱۲	۵-۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی
۱۱۵	فصل ششم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۱۵	۶-۱- جمع‌بندی
۱۱۵	۶-۲- نتیجه‌گیری
۱۱۶	۶-۳- پیشنهادات
۱۱۷	منابع

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان و شماره
۷	جدول ۱-۱ کرنش حداکثر قابل برگشت بر حسب تعداد چرخه
۸	جدول ۱-۲ مقایسه مشخصات برخی مواد هوشمند
۴۹	جدول ۱-۳ مشخصات آلیاژ حافظه‌دار به کار رفته در مدل برینسون
۶۳	جدول ۱-۴ پارامترهای مدل استفاده شده توسط لیانگ
۷۶	جدول ۲-۴ مشخصات ماده Flexinol
۷۷	جدول ۳-۴ مقایسه شرایط حدی تبدیل فاز در چند مدل

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱ نمونه‌ای از یک محرک پیزوالکتریک
۴	شکل ۲-۱ نمونه‌ای از یک کفش تولید کننده جریان الکتریکی با استفاده از پیزوالکتریک
۶	شکل ۳-۱ استفاده از محرک EAP در دست مصنوعی
۶	شکل ۴-۱ استفاده از محرک EAP برای نشان دادن حالات صورت
۱۴	شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از لوله‌های استنت
۱۵	شکل ۲-۲ نمونه‌ای از لخته‌گیر خون و مراحل آن
۱۵	شکل ۳-۲ نمونه‌ای از ASDOS
۱۶	شکل ۴-۲ قطعه تنظیم فاصله بین مهره‌های ستون فقرات
۱۶	شکل ۵-۲ نمایش دستکش‌های فیزیوتراپی عضلات در دو حالت سرد و گرم
۱۷	شکل ۶-۲ نمونه‌ای از دستگاه اندوسکوپی
۱۷	شکل ۷-۲ نمونه‌ای از سیم اورتودنسی از جنس نایتونول
۱۸	شکل ۸-۲ نمونه‌ای از عینک از جنس نایتونول
۱۹	شکل ۹-۲ نمونه‌ای از یک دست با محرک‌های SMA
۱۹	شکل ۱۰-۲ نمونه‌ای از ایرفویل قابل تنظیم با سیم‌های SMA
۲۰	شکل ۱۱-۲ فضاپیمای ICESAT
۲۱	شکل ۱۲-۲ گریپری از جنس نایتونول با ابعاد ۲ میکرون که دهانه آن از چپ به راست با اعمال جریان ۳۰ درجه باز شده است
۲۱	شکل ۱۳-۲ نمونه‌ای از تولید SMA در ابعاد کوچک برای میل‌های جراحی
۲۴	شکل ۱۴-۲ نمای کلی از انرژی پتانسیل
۲۵	شکل ۱۵-۲ نمایش انرژی آزاد هلمهولتز که در آن قسمت‌های خط‌چین بیانگر فازهای ناپایدارند
۲۶	شکل ۱۶-۲ نمایش منحنی تنش-کرنش غیریکنوا
۲۶	شکل ۱۷-۲ انرژی آزاد هلمهولتز و منحنی تنش-کرنش مربوطه در حالت‌های مختلف آلیاژهای حافظه‌دار

- شکل ۲-۱۸ رابطه تنش- کرنش براساس قانون هوک همراه با هیستریزس
- شکل ۲-۱۹ مقایسه مدل آلیاژ حافظه‌دار لایه نازک ناهمگن با یک نمونه آزمایشگاهی
- شکل ۳-۱ دو ویژگی آلیاژ حافظه‌دار
- شکل ۳-۲ رفتار آلیاژ حافظه‌دار در دماهای مختلف
- شکل ۳-۳ نمودار اصلاحی تغییرات تنش بحرانی تغییر فاز برحسب دما
- شکل ۴-۱ یک بازوی یک درجه آزادی که محرک آن سیم های NiTi می‌باشد
- شکل ۴-۲ طرح کلی محرک‌های SMA
- شکل ۴-۳ طرح کلی راه اندازی محرک SMA
- شکل ۴-۴ نتایج مدل و آزمایشگاهی برای دو ورودی ۷ و ۷,۲ ولت
- شکل ۴-۵ نتایج شبیه سازیها برای ورودی ۷,۲ ولت
- شکل ۴-۶ نتایج شبیه سازیها برای ورودی ۷,۳ ولت
- شکل ۴-۷ افت دماهای تبدیل در زاویه‌ای که حداکثر تنش در آن رخ می‌دهد
- شکل ۴-۸ مدل لیانگ یا کنترلر مدهای لغزشی نتوانسته به زاویه مطلوب ۸۵ درجه برسد
- شکل ۴-۹ افزایش ولتاژ باعث می‌شود دما از  $A_f$  فراتر رود
- شکل ۴-۱۰ علیرغم افزایش ولتاژ در مدل لیانگ کسر مارتنزیتی به صفر نمی‌رسد
- شکل ۴-۱۱ هنگامیکه سیم SMA خنک می‌شود، نرخ کاهش دمای سیم و  $A_f$  برابر نیستند
- شکل ۴-۱۲ اثر نرخ کاهش دما بر دماهای تبدیل
- شکل ۴-۱۳ در مدل لیانگ بدون اعمال شرایط ترمودینامیکی پیچیده، بازو زاویه مطلوب را تعقیب می‌کند
- شکل ۴-۱۴ دمای سیم و دماهای تبدیل در مدل لیانگ بدون اعمال شرایط ترمودینامیکی پیچیده
- شکل ۴-۱۵ کسر مارتنزیتی در مدل لیانگ بدون اعمال شرایط ترمودینامیکی پیچیده
- شکل ۴-۱۶ رابطه تنش-دما در مدل لیانگ بدون اعمال شرایط ترمودینامیکی
- شکل ۴-۱۷ مدل الهی‌نیا با کنترلر مدهای لغزشی نتوانسته به زاویه مطلوب ۸۵ درجه برسد
- شکل ۴-۱۸ با افزایش ولتاژ در مدل الهی‌نیا کسر مارتنزیتی به مقدار صفر بسیار نزدیک

- شکل ۴-۱۹ الگوریتم کامل چگونگی رفتار مدل استفاده شده در این تحقیق  
برای محرک SMA
- شکل ۵-۱ طرح کلی محرک نمونه
- شکل ۵-۲ نتایج آزمایشگاهی اعمال کنترلر PID بر محرک نمونه
- شکل ۵-۳ ساختار اصلی سیستم‌های کنترل فازی تطبیقی
- شکل ۵-۴ مقایسه کنترل فازی تطبیقی-مقاوم با کنترل PID برای زاویه مطلوب  
۳۰-درجه
- شکل ۵-۵ مقایسه کنترل فازی تطبیقی-مقاوم با کنترل PID برای زاویه مطلوب  
۱۰-درجه
- شکل ۵-۶ مقایسه کنترل فازی تطبیقی-مقاوم با کنترل PID برای زاویه مطلوب  
۷۰-درجه
- شکل ۵-۷ تغییرات دما برای زاویه مطلوب ۱۰-درجه
- شکل ۵-۸ تغییرات کسر مارتنزیتی برای زاویه مطلوب ۱۰-درجه
- شکل ۵-۹ تغییرات تنش برای زاویه مطلوب ۱۰-درجه

## فصل اول

## ۱- مقدمه

### ۱-۱- مقدمه‌ای بر مواد هوشمند

امروزه در بسیاری از ابزار و وسایل روزمره استفاده از کامپوزیت‌ها جایگزین دیگر مواد شده است. مواد هوشمند<sup>۱</sup> نمونه‌ای از این کامپوزیتها هستند که کاربرد آنها روز به روز در صنایع و شاخه‌های مختلف علم از جمله هوافضا، مکانیک، الکترونیک، عمران، پزشکی و ... افزایش می‌یابد. مواد هوشمند به طیف وسیعی از مواد اطلاق می‌گردد که دارای خواص ساختاری ویژه‌ای باشند. به این صورت که با تحریک آنها به وسیله الکتریسیته، حرارت، میدان مغناطیسی و غیره، ساختار درونی آنها تغییر کرده و منجر به تغییراتی از قبیل تبدیل فاز، تغییر شکل و اندازه در آنها می‌شود.

اگر چه تعاریف متنوعی که برای مواد هوشمند ارائه شده کلی بوده و تنها دارا بودن خواص فوق‌الذکر در آنها عنوان می‌شود با این حال می‌توان دقیق‌ترین تعریف از این گونه مواد را به این صورت دانست که مواد هوشمند قادر به تبدیل انرژی‌هایی از قبیل الکتریکی، مغناطیسی و حرارتی به انرژی مکانیکی می‌باشند [۱].

امروزه مواد هوشمند زیادی موجود است و تحقیقات گسترده‌ای توسط دانشمندان بر روی آنها صورت می‌پذیرد که از آن جمله می‌توان پیزوالکتریک<sup>۲</sup>، مواد Magnetostrictive<sup>۳</sup>، پلیمرهای الکتروفعال<sup>۴</sup> و آلیاژهای حافظه‌دار<sup>۵</sup> را نام برد که همگی در زمره مواد هوشمند قرار می‌گیرند [۲]. در ادامه به طور مختصر به توضیح برخی از این مواد پرداخته می‌شود.

---

<sup>1</sup> Smart Materials

<sup>2</sup> Piezoelectric

<sup>3</sup> Magnetostrictive Materials

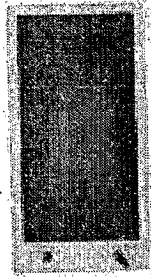
<sup>4</sup> Electroactive polymers (EAP)

<sup>5</sup> Shape Memory Alloys (SMA)

## ۱-۲- مواد پیزوالکتریک

مواد پیزوالکتریک در سال ۱۸۸۰ توسط برادران Pierre Curie و Jaques Curie کشف شدند. با کشف زیرکونات تیتانیوم<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۰ تحول عمده‌ای در استفاده از این مواد رخ داد. PZT خواص دی‌الکتریک و پیزوالکتریک را به خوبی از خود نشان می‌داد لذا به سرعت اصلی‌ترین ماده پیزوالکتریک گشت [۳]. در پیزوالکتریک‌ها دو اثر مستقیم و معکوس وجود دارد. در اثر پیزوالکتریک مستقیم با افزایش کرنش یک جریان کم ولی قابل اندازه‌گیری الکتریکی در ماده ایجاد می‌شود، درحالی‌که در اثر پیزوالکتریک معکوس هنگامیکه از ماده جریان الکتریکی بگذرانیم دچار افزایش ابعاد می‌گردد. علیرغم این تفاوت در مقیاس ماکروسکوپی حجم ماده پیزوالکتریک در دو حالت ثابت می‌ماند.

این دو حالت باعث می‌شود که از مواد پیزوالکتریک بتوان هم به عنوان حسگر برای اندازه‌گیری چگالی سیال، ویسکوزیته سیال و نیروی ضربه و هم به عنوان محرک استفاده کرد. یک نمونه بارز و مورد استفاده مواد پیزوالکتریک در حسگر کیسه هوا اتومبیل می‌باشد. حداکثر کرنش در مواد پیزوالکتریک نسبت به دیگر مواد هوشمند مانند آلیاژهای حافظه‌دار کوچک می‌باشد و در حدود دوازده تا هجده درصد است که این مقدار توسط اثرات اشباع و قطبش‌زدایی<sup>۲</sup> محدود می‌گردد [۴]. از لحاظ فنی در جریان الکتریکی یک کیلو ولت و فرکانس حداکثر صد کیلو هرتز در حدود یک درصد کرنش برای PZT پیش‌بینی می‌شود. در شکل‌های ۱-۱ و ۱-۲ نمونه‌هایی از کاربردهای پیزوالکتریک‌ها دیده می‌شود.

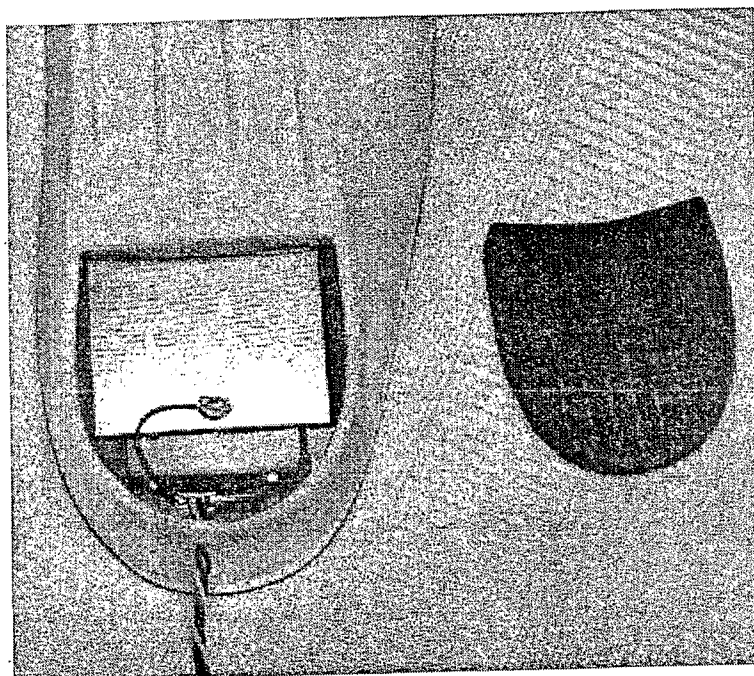


شکل ۱-۱ نمونه‌ای از یک محرک پیزوالکتریک [۵].

<sup>۱</sup> Piezoelectric Zirconate Titanate (PZT)

<sup>۲</sup> Depolarization





شکل ۱-۲ نمونه‌ای از یک کفش تولید کننده جریان الکتریکی با استفاده از پیزوالکتریک [۶].

### ۱-۳- مواد Magnetostrictive

اثر Magnetostrictive در سال ۱۸۴۲ توسط James Prescott Joule در نیکل کشف شد. این اثر در سالهای بعد در مواد دیگری مانند کبالت، آهن و آلیاژهای آن نیز مشاهده شد. حداکثر کرنش در این مواد ۰/۰۰۵٪ بود. در ابتدای سال ۱۹۷۰ یک گروه در آزمایشگاه Naval Ordonance ماده ترفنول-دی<sup>۱</sup> را کشف کردند که این ماده حداکثر کرنشی در حدود ۰/۱٪-۰/۲٪ از خود نشان می‌داد. کرنش‌های عملی به دست آمده از محرک‌های ترفنول-دی در رفتارهای شبه‌خطی، در بازه ۰/۱-۰/۰۷۵٪ قرار دارند [۷].

ترفنول-دی شامل آهن و کمی تربیوم<sup>۲</sup> و دیسپروسیوم<sup>۳</sup> می‌باشد و به طور معمول به صورت میله با قطرهای متفاوت در دسترس است. در خارج از میدان مغناطیسی جفت‌های کریستالی ماده به صورت تصادفی جهت‌دهی شده‌اند، اما زمانیکه تنش ناشی از میدان مغناطیسی به آنها وارد شود اکثر آنها در جهت محور طولی میله جهت‌دهی می‌شوند که این جهت‌گیری سبب افزایش طول در میله می‌گردد. در ابعاد ماکروسکوپی یک این تغییر طول تغییری در حجم ماده ایجاد نمی‌کند و این به آن معنی است که با افزایش طول قطر میله کمی کاهش می‌یابد.

<sup>۱</sup> Terfenol-D

<sup>۲</sup> Terbium

<sup>۳</sup> Dysprosium

با توجه به چگالی بیشتر و نیاز به جایگاه<sup>۱</sup>، محرک‌های مواد Magnetostrictive ۱۰ تا ۲۰ بار سنگین‌تر از PZT می‌باشند لذا علیرغم رفتار بهتر این مواد در ساختارهای هوشمند<sup>۲</sup> به طور معمول از PZT استفاده می‌شود.

#### ۴-۱- پلیمرهای الکتروفعال

اثر پلیمرهای الکتروفعال در سال ۱۸۸۰ توسط Wilhelm Conrad Roentgen مشاهده شد. او در یک آزمایش از یک نوار  $۱۰۰ \times ۱۶$  سانتیمتری لاستیک استفاده کرد و یک جرم ثابت به انتهای آزاد آن متصل کرد. با این عمل او توانست با تحریک الکتریکی، کرنش منتهی به اندازه-گیری کند [۸].

تا سال ۱۹۹۰ بسیاری از پلیمرهای جدید شناخته شدند که به تحریک الکتریکی به صورت تغییر شکل یا ابعاد واکنش نشان می‌دادند. این مواد به علت شباهت رفتاری به عضلات بدن، بیشتر به عنوان عضله‌های مصنوعی<sup>۳</sup> شناخته می‌شوند. EAP به دو گروه عمده تقسیم‌بندی می‌شود: الکتریکی (تحریک به وسیله میدان الکتریکی یا نیروی کولمب<sup>۴</sup> صورت می‌گیرد)، یونی (نیاز به تحریک و شارژ یونها دارد). پلیمرهای الکتروفعال الکتریکی به میدان الکتریکی در حدود ۱۵۰ کیلوولت بر میلیمتر نیاز دارند. آنها پاسخ‌های سریعی به تحریک می‌دهند. پلیمرهای الکتروفعال یونی با ولتاژ کمتری تحریک می‌شوند اما پاسخ‌های کندتری به تحریک دارند [۹]. دو نمونه از این مواد که به صورت محرک استفاده شده‌اند در شکل‌های ۱-۳ و ۱-۴ آورده شده است.

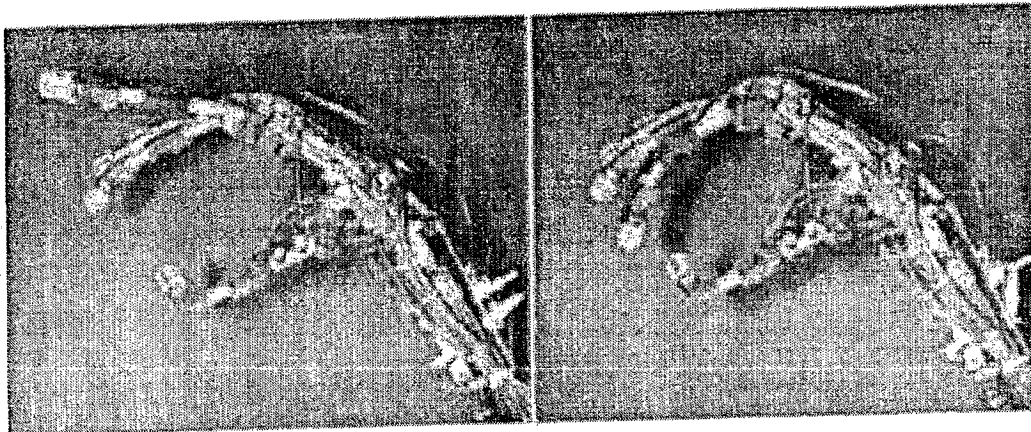
---

<sup>1</sup> Housing

<sup>2</sup> Smart Structures

<sup>3</sup> Artificial Muscles

<sup>4</sup> Coulomb Forces



شکل ۳-۱ استفاده از محرک EAP در دست مصنوعی [۷].



شکل ۴-۱ استفاده از محرک EAP برای نشان دادن حالات صورت [۹].

## ۱-۵- آلیاژهای حافظه‌دار

در سال ۱۹۳۲ فیزیکی‌دان سوئدی Arne Olander یک پدیده جالب در مورد آلیاژ طلا و کادمیم کشف کرد [۱۰]. این آلیاژ می‌توانست هنگامیکه گرم و سرد می‌شود، تغییر شکل پلاستیک داده و سپس به حالت اصلی برگردد. این اثر امروزه به نام اثر حافظه‌داری شناخته می‌شود و آلیاژهایی که این خاصیت را دارند آلیاژهای حافظه‌دار یا به اختصار SMA نامیده می‌شوند.

در سال ۱۹۶۱ یک گروه آمریکایی در آزمایشگاه Naval Ordnance به رهبری فردی به نام William Beuhler یک کشف قابل ملاحظه در زمینه این آلیاژها انجام دادند. هنگامیکه یک آلیاژ شامل نیکل و تیتانیوم برای آزمایش مقاومت خوردگی در مقابل گرما قرار گرفت، آنها یافتند که این آلیاژ، خاصیت حافظه‌داری زیادی از خود نشان می‌دهد.

همانگونه که اشاره شد آلیاژهای حافظه‌دار جزء مواد هوشمند هستند. این مواد هنگامی که دمای مناسب به آنها داده شود، توانایی برگشت به شکل اولیه خود را دارند. برخی از این آلیاژها عبارتند از: [۱۱]

Ag-Cd, Au-Cd, Cu-Al-Ni, Cu-Sn, In-Ti, Ni-Al, Ni-Ti, Fe-Pt, Mn-Cu, Fe-Mn-Si  
 نیکل-تیتانیوم ارزان‌تر، ساده‌تر، کار با آن راحت‌تر و آلودگی زیست محیطی کمتری نسبت به سایر آلیاژهای کشف شده قبلی داشت، لذا تحقیق روی آن ادامه پیدا کرد و تلاش برای استخراج معادلات ساختاری آن شروع شد.

ویژگی اثر حافظه‌داری<sup>۱</sup> این آلیاژها به علت تغییر دما و تنش رخ می‌دهد. به علت این تغییر دما و تنش، ساختار کریستالی ماده بین دو فاز مارتنزیت (در دماهای بالا) و آستنیت (در دماهای پایین) تغییر می‌کند. ساختار کریستالی آستنیت یک ساختار مکعبی ساده می‌باشد که تنها یک فاز والد برای آن وجود دارد در حالیکه فاز مارتنزیت یک ساختار لوزی شکل پیچیده با مجموع ۲۴ صفحه کریستالوگرافی معادل است.

زمانیکه نیکل تیتانیوم در دمای پایین و فاز مارتنزیت باشد به راحتی شکل پذیر و انعطاف پذیر می‌باشد اما هنگامیکه به فاز آستنیت برود به شکل اولیه خود برمی‌گردد و انعطاف پذیری خود را هم از دست می‌دهد. این اثر را اثر یک جانبه یا یک طرفه حافظه‌داری<sup>۲</sup> می‌نامند. توانایی آلیاژهای حافظه‌دار برای برگشت به شکل اولیه خود پس از گرم شدن تا بیش از دمای تبدیل و سپس برگشت به شکل قابل تغییر در اثر سرد کردن را با نام اثر دو جانبه یا دو طرفه حافظه‌داری<sup>۳</sup> می‌شناسند. انجام چند باره این پروسه را تربیت<sup>۴</sup> می‌نامند. تربیت معمولاً عبارت از چند چرخه تغییر شکل برای رسیدن به شکل نهایی مطلوب است.

کرنش مناسب در حافظه‌داری دو جانبه به شدت به تعداد چرخه‌ها وابسته می‌باشد. در جدول ۱-۱ یک راهنما کلی برای رابطه تعداد چرخه‌ها و حداکثر کرنش آلیاژ نیکل تیتانیوم دوتایی استاندارد<sup>۵</sup> ارائه شده است.

جدول ۱-۱ کرنش حداکثر قابل برگشت برحسب تعداد چرخه [۵].

تعداد چرخه	حداکثر کرنش %
تا ۱	۸
تا ۱۰۰	۵
تا ۱۰۰۰۰۰	۳
بیشتر از ۱۰۰۰۰۰	۲

<sup>۱</sup> Shape Memory Effect

<sup>۲</sup> One Way Shape Memory Effect

<sup>۳</sup> Two Way Shape Memory Effect

<sup>۴</sup> Training

<sup>۵</sup> Standard Binary NiTi