بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی مکانیک

# پیاده‌سازی رفتار الکتروترمومکانیکی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در نرم‌افزار ABAQUS

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

**امین علی‌پور**

استاد راهنما

**دکتر محمود کدخدایی**

**۱۳۹۲**

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک رشته مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

آقای امین علی پور تحت عنوان

# پیاده‌سازی رفتار الکتروترمومکانیکی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در نرم‌افزار ABAQUS

در تاریخ ۱۳۹۲/۵/۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱. استاد راهنمای پایان نامه | دکتر محمود کدخدایی |
| ۲. استاد مشاور پایان نامه | دکتر عباس قایی |
| ۳. استاد داور | دکتر محمد مشایخی |
| ۴. استاد داور | دکتر مهدی سلمانی تهرانی |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی | دکتر محمدرضا سلیم‌پور |

اعتراف می‌کنم که نه زبان شکر تو را دارم و نه توان تشکر از بندگان تو، اما بر حسب وظیفه

از خانواده عزیزم و به خصوص پدر و مادر مهربانم که همواره پشتیبان من بوده‌اند صمیمانه تشکر می‌کنم.

از استاد گرامی آقای دکتر کدخدایی که در همه مراحل این تحقیق مرا یاری و راهنمایی نمودند، کمال تشکر را دارم.

از استاد گرامی آقای دکتر قایی که در انجام این تحقیق مرا راهنمایی نمودند، قدردانی می‌نمایم.

از آقای دکتر تابش که راهنمایی‌های ارزشمندی به بنده ارائه دادند، سپاسگزارم.

**کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،**
**ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع**
**این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

تقدیم به:

**ساحت مقدس امام عصر (عج)**

## فهرست مطالب


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| فهرست مطالب | هشت |
| چکیده | ۱ |
| **فصل اول: مقدمه** | |
| ۱- ۱- معرفی آلیاژ حافظه‌دار | ۲ |
| ۱-۱-۱- خاصیت حافظه‌داری | ۷ |
| ۱-۱-۲- خاصیت شبه الاستیک | ۸ |
| ۱-۲- کاربردهای آلیاژ حافظه‌دار | ۹ |
| ۱-۳- مروری بر اقدامات صورت گرفته در زمینه معادلات ساختاری آلیاژهای حافظه‌دار | ۱۴ |
| ۱-۴- حل معادلات ساختاری آلیاژهای حافظه‌دار | ۱۹ |
| ۱-۵- اهداف و ساختار پایان نامه | ۲۲ |
| **فصل دوم: معادلات ساختاری** | |
| ۲-۱- مقدمه | ۲۴ |
| ۲-۲- معادلات ساختاری در حالت استاتیکی | ۲۵ |
| ۲-۳- سینتیک استحاله | ۳۰ |
| ۲-۴- معادلات ساختاری در حالت دینامیکی (رفتار کوپل ترمومکانیکی) | ۳۶ |
| ۲-۵- معادلات ساختاری در حالت الکتروترمومکانیکی | ۴۰ |
| ۲-۶- جمع بندی | ۴۲ |
| **فصل سوم: نتایج و بحث پیرامون آنها** | |
| ۳-۱- مقدمه | ۴۳ |
| ۳-۲- پیاده سازی عددی | ۴۳ |
| ۳-۳- نتایج حالت استاتیکی | ۴۷ |
| ۳-۳-۱- حالت دما ثابت | ۴۷ |
| ۳-۳-۲- حالت تنش ثابت | ۵۳ |
| ۳-۳-۳- حالت کرنش ثابت | ۵۷ |
| ۳-۳-۴- حالت ترکیبی دما ثابت به همراه کرنش ثابت | ۵۹ |
| ۳-۳-۵- عملگر حافظه‌دار | ۶۲ |
| ۳-۳-۶- شبیه‌سازی سازه هوشمند شامل سیم حافظه‌دار | ۶۸ |
| ۳-۴- نتایج حالت دینامیکی (رفتار کوپل ترمومکانیکی) | ۷۳ |
| ۳-۴-۱- بارگذاری و باربرداری مکانیکی | ۷۳ |
| ۳-۴-۲- بارگذاری و باربرداری سیکلیک | ۸۱ |

۳-۴-۳- بررسی اثر در نظر گرفتن گرمای استحاله بر پاسخ عملگرهای حافظه‌دار ..... ۸۲
۳-۵- نتایج حالت الکتروترمومکانیکی ..... ۸۴
۳-۵-۱- اثر پارامترهای مختلف بر رفتار الکتروترمومکانیکی ..... ۸۶
۳-۵-۲- اعمال شر ط مرزی دمایی برای انتهای سیم ..... ۸۹
۳-۶- جمع بندی ..... ۹۰
**فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات**
۴-۱- جمع‌بندی ..... ۹۱
۴-۲- پیشنهادات ..... ۹۳
پیوست الف- فهرست علائم و نشانه‌ها ..... ۹۴
مراجع ..... ۹۵

## چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که ویژگی‌های منحصربه‌فرد حافظه‌داری و شبه‌الاستیسیته را از خود نشان می‌دهند. حافظه-داری قابلیت بازیابی کرنش‌های ماندگار مکانیکی به کمک گرما است، در حالیکه شبه‌الاستیسیته قابلیت بازیابی کرنش‌های بزرگ (تا حد ۸ ٪) در طی یک سیکل بارگذاری- باربرداری مکانیکی است. ویژگی‌های بی‌نظیر حافظه‌داری و شبه‌الاستیسیته به‌خاطر استحاله مارتنزیتی حالت جامد از یک فاز با تقارن و دمای بالا با نام آستنیت، به یک فاز با تقارن کم و دمای پایین با نام مارتنزیت ظاهر می‌شوند. این مواد تازه شناخته شده همچنین از ویژگی‌های دیگری نظیر نسبت نیرو به وزن بالا، زیست سازگاری، پاسخ آرام، عملکرد نرم و طولانی مدت بهره می‌برند که منجر به مورد توجه قرار گرفتن آنها در بسیاری از کاربردهای مهندسی از پزشکی تا صنعت هوافضا به‌صورت چشمگیری گردیده است. با وجود آنکه آلیاژهای حافظه‌دار با شکل‌های متنوعی ساخته می‌شوند، در بسیاری از موارد به شکل سیم یا نوار مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا شبیه‌سازی یک بعدی آن‌ها در بررسی مسائل واقعی، امری ضروری به‌نظر می‌رسد. در سه دهه‌ی اخیر مدل‌های بسیاری توسط محققان برای آلیاژهای حافظه‌دار ارائه شده و روش‌های عددی متنوعی نیز برای پیاده‌سازی این روابط به‌کارگرفته شده است. بسیاری از حل‌های موجود برای سیم حافظه‌دار به‌تنهایی و یا سازه‌های خاص و ساده شامل سیم حافظه‌دار قابل استفاده هستند. با توجه به اینکه سازه‌های هوشمند شامل سیم حافظه‌دار بسیار متنوع و پیچیده هستند، لذا واضح است که این حل‌های خاص جوابگوی نیاز بررسی این گونه مواد در چنین شرایطی نمی‌باشند. در کنار این حل‌های خاص، حل‌های کلی نیز وجود دارند که با مشکلاتی در بررسی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار روبه‌رو هستند.

در این تحقیق به‌منظور ارائه یک راهکار کلی، معادله‌ی یک‌بعدی متداولی برای آلیاژهای حافظه‌دار که هر دو رفتار حافظه‌داری و شبه‌الاستیسیته را در برمی‌گیرد، در نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس به کمک یک زیربرنامه تعریف شده است. یکی از مزیت‌های اساسی این زیربرنامه ترمومکانیکی، توانایی آن در بررسی هر مسیر پیچیده مکانیکی و حرارتی است. در نتیجه این زیربرنامه می‌تواند به‌راحتی در تحلیل اجزای محدود هر سازه‌ی هوشمند پیچیده شامل سیم حافظه‌دار مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این زیربرنامه قابلیت مدل‌سازی رفتار آلیاژهای حافظه-دار تحت شرایط استاتیکی، کوپل ترمومکانیکی (دینامیکی) و الکتروترمومکانیکی را دارد. برای صحت‌سنجی روش عددی ارائه شده، نتایج آن تحت بارگذاری و شرایط مرزی ترمومکانیکی مختلفی، با نتایج تحلیلی، آزمایشگاهی و نتایج حاصل از دیگر روش‌های عددی موثق، مقایسه شده که تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. اثر نرخ افزایش دما، ضریب انتقال حرارت هدایتی و جابجایی بر پاسخ عملگرهای حافظه‌دار در حالت استاتیکی بررسی شده است. همچنین نشان داده شد که وقتی بارگذاری‌های مکانیکی با سرعت‌های نسبتا بالایی اعمال می‌شوند، فرض همدمایی دیگر اعتبار نداشته و هر چه نرخ باگذاری افزایش یابد، اثرات دمایی منجر به تغییرات شدیدتری در روند استحاله خواهند شد. در این حالت تغییرات دما وابسته به پارامترهایی از قبیل نرخ کرنش، ضریب انتقال حرارت جابجایی و قطر سیم است. علاوه بر آن، تاثیر درنظر گرفتن گرمای نهان استحاله بر عملکرد عملگرهای حافظه‌دار به‌صورت عددی بررسی شده و نشان داده شد که گرمای استحاله با کاهش پیشرفت استحاله مارتنزیتی، پاسخ عملگر را ضعیف‌تر می‌کند. در نهایت رفتار الکتروترمومکانیکی و پارامترهای موثر بر آن مورد مطالعه قرار گرفت. در این بخش نشان داده شد که اگر مقاومت ویژه‌ی الکتریکی ثابت و برابر مقدار آن در حالت مارتنزیت در نظر گرفته شود، افزایش دما در طول سیم با روند کندتری صورت می‌گیرد.



## لغات کلیدی

سیم آلیاژ حافظه‌دار، رفتار الکتروترمومکانیکی، شبیه‌سازی اجزای محدود، آباکوس، زیربرنامه

# فصل اول
# مقدمه

## ۱- ۱- معرفی آلیاژ حافظه‌دار

کشف مواد جدید با خواص منحصربه فرد و به کارگیری این خواص در راستای برطرف کردن نیازی خاص، از دیرباز دغدغه انسان‌ها بوده است. این دغدغه تا کنون منجر به کشف مواد و ترکیبات جدید زیادی شده است و هر روز نیز بر تعداد این مواد افزوده می‌شود. آلیاژهای حافظه‌دار[1] یکی از همین مواد می‌باشند که سابقه چندانی نداشته ولی در همین زمان کوتاه قابلیت‌های بی‌نظیری در زمینه‌های مختلف از خود نشان داده ودر بخش‌های بسیار متنوعی به کار گرفته شده-اند.

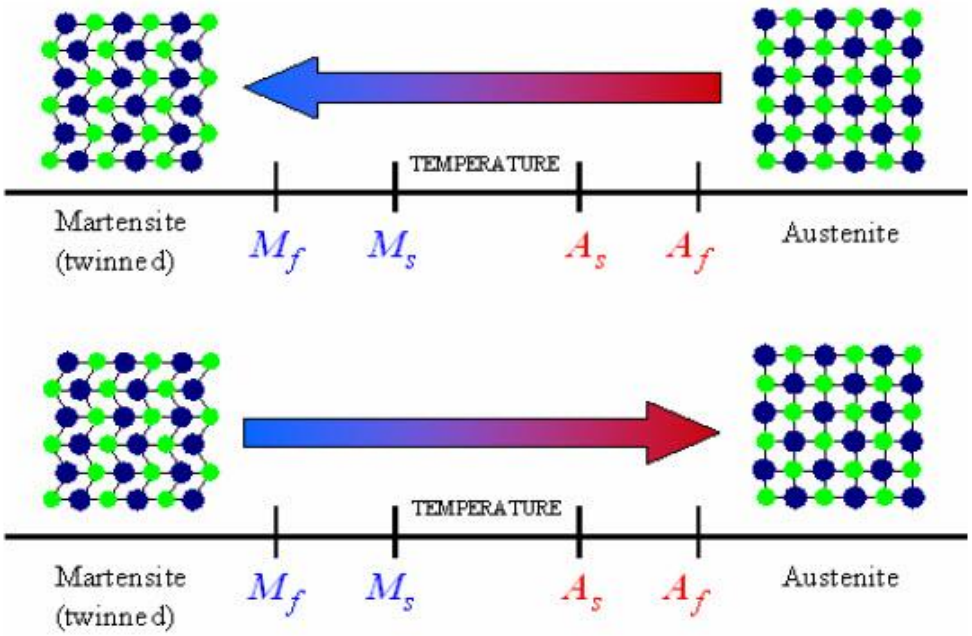
ویژگی مهمی که آلیاژهای حافظه‌دار را به آن می‌شناسند خاصیت بازیابی شکل اولیه خود در اثر گرما پس از ایجاد کرنش‌های ماندگار در آن است. این ویژگی را خاصیت حافظه‌داری[2] می‌نامند و این آلیاژها بر اساس این ویژگی نامگذاری شده‌اند. معروف‌ترین آلیاژ حافظه‌دار نایتینول[3] ترکیب خاص و تقریبا برابری از عناصر نیکل و تیتانیوم است. البته آلیاژهای حافظه‌دار دیگری نیز از قبیل CuZnAl، CuAlNi وFeMnSi شناخته شده‌اند ولی بیش‌ترین تحقیقات هم اکنون بر روی نایتینول انجام می‌شود [۱].

آلیاژهای حافظه‌دار دارای دو فاز پایدار آستنیت و مارتنزیت می‌باشند. این مواد در دماهای بالا به صورت فاز آستنیت که فاز متقارن با انرژی بالا است موجود بوده و در دماهای پایین به صورت فاز مارتنزیت که فاز با تقارن کم و با انرژی پایین

---

[1] Shape Memory Alloy
[2] Shape Memory Effect (SME)
[3] Nitinol (Nickle Titanium Naval Ordnance Laboratory)

است ظاهر می‌شوند. شیوه‌ی متداول تبدیل آستنیت به مارتنزیت استحاله مارتنزیتی[1] در طی سرد کردن آستنیت در عدم حضور تنش می‌باشد. این نوع تغییر فاز کرنش‌های کوچک و قابل اغماضی را پدید می‌آورد. شکل ۱-۱ این فازها و نحوه‌ی تبدیل آن‌ها به یکدیگر را نشان می‌دهد.




شکل ۱-۱- نحوه‌ی تغییر ساختار بلوری فازها در اثر اعمال حرارت [۱]

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که مارتنزیت اشاره شده در بالا با مارتنزیت فولاد متفاوت است. اگر چه هر دو ناشی از تبدیل فاز مارتنزیتی می‌باشند، ولی تفاوت‌های کاملاً مشخصی با هم دارند. مارتنزیت فولاد به دلیل وجود اتم-های نیتروژن و کربن که موانعی برای حرکت نابجایی‌ها محسوب می‌شوند، سخت است ولی مارتنزیت‌های غیرآهنی به طور کلی نرم‌تر از فاز آستنیت خود هستند [۲].

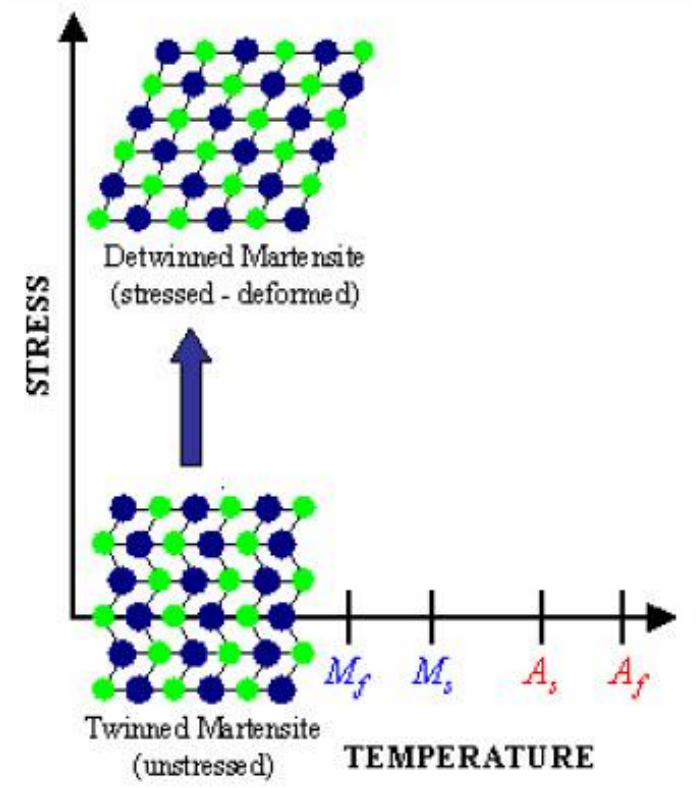
تقارن کم در فاز مارتنزیت به معنای وجود جهت‌گیری‌های مختلف در این فاز می‌باشد که به آن ورینت[2] می- گویند. ورینت‌های مختلف دارای جهت‌گیری‌های محلی مختلفی هستند. زمانی که آلیاژ حافظه دار بدون حضور تنش سرد می-شود، استحاله مارتنزیتی آغاز گشته و ماده از فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در این حالت نحوه‌ی آرایش ورینت‌ها به نحوی است که دارای بهترین حالت از نظر انرژی باشد. این حالت آرایش مارتنزیت را مارتنزیت دوقلو[3] یا مارتنزیت ناشی از حرارت[4] می‌گویند.

در جریان گرم و سرد کردن آلیاژ حافظه‌دار و تغییر فاز بین دو فاز آستنیت و مارتنزیت در عدم حضور تنش چهار دمای

[1] Martensitic Phase Transformation
[2] Variant
[3] Twinned
[4] Temperature-Induced

خاص ظاهر می‌شود. این دماها بصورت $A_s$، $A_f$، $M_s$ و $M_f$ نشان داده می‌شوند. $M_s$ دمایی است که در حین سرد کردن، آستنیت شروع به تبدیل به مارتنزیت می‌کند. $M_f$ دمایی است که در حین سرد کردن، تمام آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. $A_s$ دمایی است که در جریان گرم کردن، مارتنزیت شروع به تبدیل به آستنیت می کند. $A_f$ دمایی است که در طی گرم کردن، تمام مارتنزیت به آستنیت تبدیل می‌شود. این دماها بسته به مواردی از قبیل درصد ترکیب عناصر، عملیات ساخت و پس از ساخت آلیاژ مقادیر متفاوتی را اختیار می‌کنند.

همان طور که گفته شد چنانچه مارتنزیت تنها در اثر سرد کردن آستنیت در حالت بدون تنش بدست آید، مارتنزیت دوقلو حاصل می‌شود. اما همواره مارتنزیت بدین صورت نخواهد بود. در یکی از حالت‌ها چنانچه در دمای پایین‌تر از $M_f$، مارتنزیت دو قلو را تحت تنش قرار دهیم ساختار آن تغییر خواهد کرد و ورینت‌های مارتنزیت مطابق شکل ۱-۲ در راستای تنش مرتب می‌شوند. چنین مارتنزیتی را مارتنزیت غیردوقلو[1] یا مارتنزیت تنش‌دیده[2] می‌نامند.

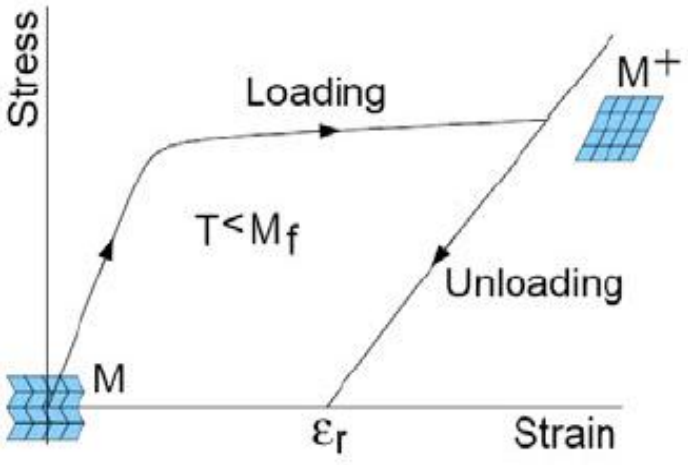



شکل ۱- ۲- تبدیل مارتنزیت دوقلو به مارتنزیت غیر دوقلو در اثر اعمال تنش [۱]

در نتیجه چنین تغییر ساختاری می‌توان کرنش‌های ماکروسکوپیک[3] در جسم مشاهده کرد. در صورتیکه جسم باربرداری

[1] Detwinned
[2] Stress-Induced
[3] Macroscopic Strain

شود، ساختار آن به همان صورت باقی خواهد ماند و بدین ترتیب کرنش های پسماندی[1] در جسم ایجاد خواهد شد. دلیل این امر آن است که بلورهای مارتنزیت دوقلو جهت‌گیری‌های مختلفی[2] داشته و در راستاهای مختلف پراکنده‌اند. با اعمال تنش همه‌ی بلورها در راستای تنش مرتب می‌شوند و شکل منظمی به خود می‌گیرند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که مارتنزیت غیردوقلو از نظر ترمومکانیکی در این ناحیه دمایی، دمای پایین‌تر از $M_f$، پایدار بوده و لذا با حذف تنش بازگشت به مارتنزیت دوقلو اتفاق نمی‌افتد و فقط کرنش‌های الاستیک آزاد می‌شوند. در نتیجه ماده از خود رفتاری شبه پلاستیک[3] نشان می‌دهد. نمودار تنش-کرنش چنین رفتاری را می‌توان در شکل ۱-۳ مشاهده کرد.

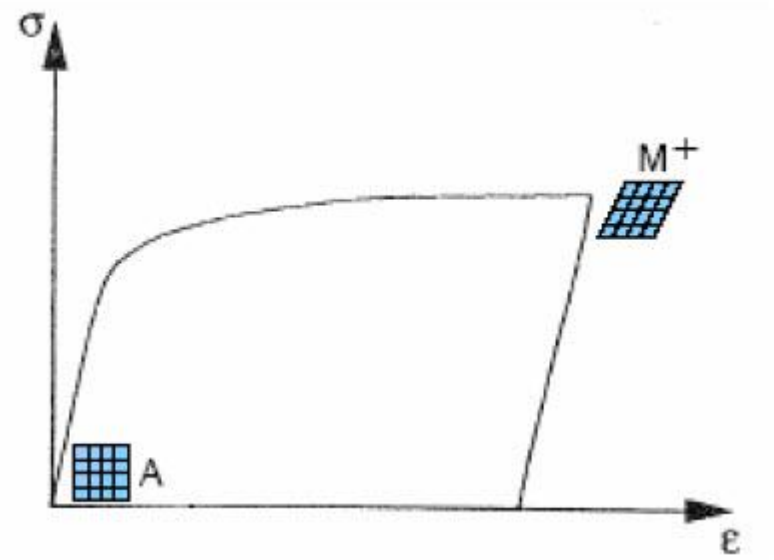



شکل ۱- ۳- رفتار شبه پلاستیکی مارتنزیت در دمای پایین تر از $M_f$ [۱]

چنین رفتار شبه پلاستیکی را می‌توان با شروع از آستنیت، به جای مارتنزیت دوقلو، نیز مشاهده کرد. در صورتی که در دمای بین $M_s$ تا $A_s$، آستنیت را تحت تنش قرار دهیم و به تدریج این تنش را افزایش دهیم، با رسیدن تنش به مقدار خاصی، تنش آغاز استحاله، که به دما و نوع آلیاژ حافظه‌دار بستگی دارد، آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت غیردوقلو می‌کند و با رسیدن به تنش خاص دیگری، تنش پایان استحاله، تماماً به مارتنزیت غیردوقلو تبدیل خواهد شد. در صورت حذف تنش، به دلیل پایدار بودن مارتنزیت غیردوقلو در این محدوده دمایی، عکس این عمل اتفاق نخواهد افتاد. نمودار تنش-کرنش این رفتار را می‌توان در شکل ۱-۴ مشاهده کرد.

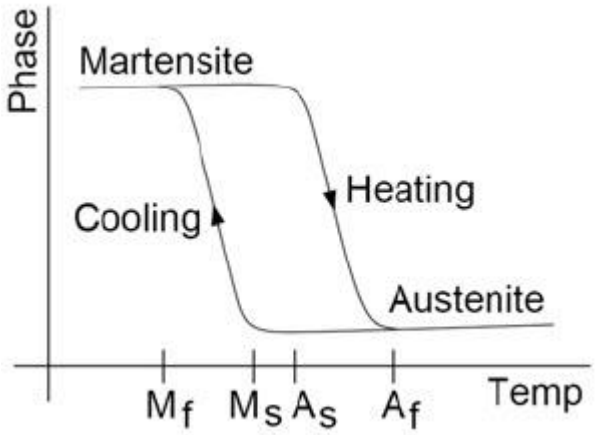
باید توجه داشت که در اینجا $A_s$ بزرگتر از $M_s$ فرض شده است در حالیکه در بعضی موارد ممکن است، $A_s$ کوچک‌تر از $M_s$ شود. ولی به طور کلی می‌توان حالت اولیه را که معمول‌تر است برای آلیاژ حافظه‌دار در نظر گرفت. در این صورت آلیاژ حافظه‌دار را نوع اول[4] می‌نامند.

[1] Residual
[2] Multiple-Variant
[3] Quasi-Plastic
[4] Type I




شکل ۱- ۴- رفتار شبه پلاستیکی آستنیت در تبدیل به مارتنزیت غیر دوقلو در محدوده $M_s < T < A_s$ [۱]

برای مشخص کردن نوع فاز آلیاژ حافظه‌دار در دماهای مختلف در حالت بدون تنش از شکل ۱-۵ کمک می‌گیریم. همان طور که از شکل مشخص است در دماهای بالاتر از $A_f$ و همچنین دماهای پایین تر از $M_f$ ماده تنها می‌تواند یک فاز اختیار کند. بدین ترتیب که در دمای بالاتر از $A_f$ ماده همواره به صورت آستنیت و در دمای پایین‌تر از $M_f$ ماده همواره به صورت مارتنزیت خواهد بود. در دمای بین $M_s$ و $A_s$، بسته به تاریخچه حرارتی، ماده یا به صورت آستنیت کامل و یا به صورت مارتنزیت کامل خواهد بود. چنانچه ماده در سیکل گرم کردن قرار گرفته باشد، به صورت تماماً مارتنزیت، و در صورت قرار گرفتن در سیکل سرد کردن، ماده تماماً آستنیت خواهد بود. در محدوده‌های دمایی $A_s < T < A_f$ و $M_f < T < M_s$ ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت خواهد بود.

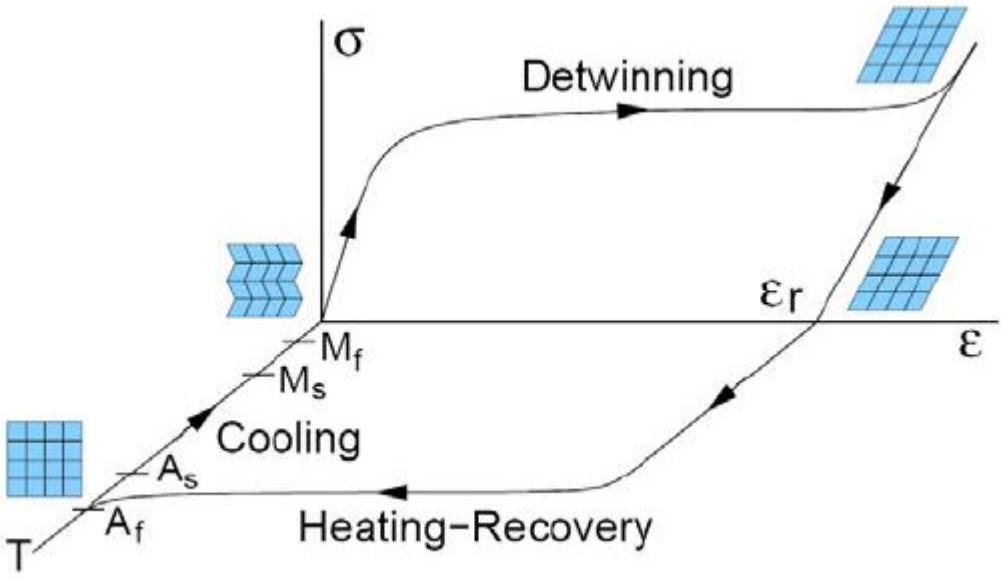



شکل ۱-۵- فاز های مختلف جسم در حالت بدون تنش [۱]

آلیاژ حافظه‌دار دارای دو خاصیت منحصر به فرد می‌باشد؛ یکی خاصیت حافظه‌داری ودیگری خاصیت شبه الاستیک[1] که در ادمه به تشریح هر یک از این خواص می‌پردازیم. لازم به ذکر است که خاصیت شبه الاستیک در بعضی مراجع با عنوان سوپر الاستیک[2] نیز شناخته می‌شود.

### ۱-۱-۱- خاصیت حافظه‌داری

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد چنانچه مارتنزیت دوقلو را در دمای پایین تر از $M_f$ بارگذاری و باربرداری کنیم از خود رفتار شبه پلاستیک نشان می‌دهد و تنها کرنش‌های الاستیک بازیابی شده و مقدار قابل توجهی کرنش پسماند در آن باقی می‌ماند. حال اگر ماده را تا دمای بالاتر از $A_f$ حرارت دهیم، مارتنزیت غیردوقلو به آستنیت تبدیل شده و کرنش‌های پسماند آن آزاد می‌شود و در صورت سرد کردن، ماده به همان حالت اولیه خود یعنی مارتنزیت دوقلو باز می‌گردد. البته باید توجه داشت که مقدار کرنش قابل بازیابی ($\varepsilon_r$) محدودیتی دارد و جز خواص مهم آلیاژ حافظه‌دار محسوب می‌شود. نمودار تنش-کرنش-دما برای شرح این خاصیت در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.




شکل ۱- ۶- نمودار تنش-کرنش-دما برای نمایش خاصیت حافظه داری [۱]

چنانچه روند افزایش تنش را ادامه دهیم پس از عبور از قسمت الاستیک مارتنزیت غیردوقلو، وارد ناحیه پلاستیک شده و کرنش های غیر قابل بازیابی در جسم به وجود می‌آید که با فرایند گرم کردن نیز، قابل آزاد شدن نمی‌باشند.
نکته‌ای قابل توجه این است که حذف کرنش‌های پسماند در اثر گرم شدن[3] به دلیل تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت در

[1] Pseudoelastic
[2] Superelastic
[3] Heating Recovery

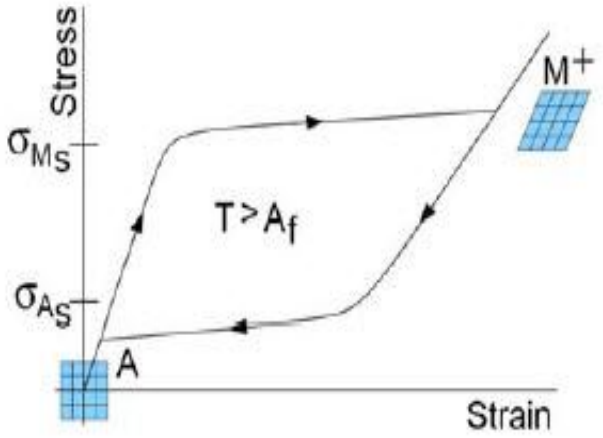
مواد معمولی همچون اغلب فولادها امکان‌پذیر نیست. علت این امر آن است که برش رخ داده در شبکه کریستالی یک آلیاژ حافظه‌دار در حین اعمال بار ناشی از دوقلو شدن می‌باشد، اما در مواد معمولی ناشی از لغزش می‌باشد. این لغزش که همراه با شکل‌گیری و حرکت نابجایی‌ها در فلز می‌باشد موجب تغییر شکل دائم و کارسختی شده که با اعمال حرارت حذف شدنی نیست [۲].

### ۱-۱-۲- خاصیت شبه‌الاستیک

چنانچه در دمای بالاتر از $A_f$ آستنیت را در دمای ثابت تحت تنش قرار دهیم با رسیدن به یک تنش خاص که به دما بستگی دارد، آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت غیردوقلو می‌کند و در تنش خاص دیگری تماماً به مارتنزیت غیردوقلو تبدیل می‌شود. در این حالت چنانچه تنش را حذف کنیم و از جسم باربرداری کنیم عکس این عمل به طور کامل اتفاق می‌افتد و دوباره به آستنیت خواهیم رسید. نمودار تنش-کرنش این فرایند در شکل ۱-۷ آمده است. علت این امر آن است که مارتنزیت در دمای بالاتر از $A_f$ پایدار نبوده و در اثر حذف تنش به فاز پایدار آستنیت باز می‌گردد.

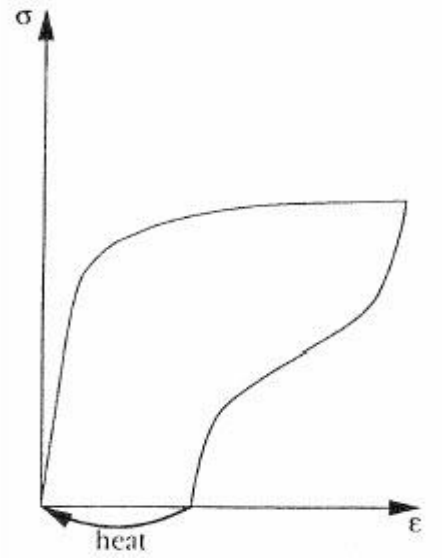
در طی فرایند بارگذاری، کرنش‌های نسبتا بالایی در جسم به وجود می‌آید. ولی مشاهده می‌شود که با باربرداری کرنش‌ها به طور کامل آزاد شده و ماده حالت اولیه خود را به دست آورده است. از این رو این فرایند را شبه- الاستیک نامیده‌اند که تمامی کرنش‌ها با برداشتن تنش، آزاد می‌شوند و به تعبیری می‌توان گفت که شبیه کرنش الاستیک می باشند.

این خاصیت از این رو حائز اهمیت است که کرنش‌های زیادی در طی بارگذاری-باربرداری بازیابی می‌شود. با توجه به شکل ۱-۷ تنش $\sigma_{M_S}$ تنشی است که درآن آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت غیردوقلو می‌کند و تنش $\sigma_{A_S}$ تنشی است که در آن عکس این عمل اتفاق می‌افتد.




شکل ۱- ۷- نمودار تنش-کرنش خاصیت شبه الاستیک [۱]

در صورتیکه در محدوده‌ی دمایی $A_s < T < A_f$ و با در نظر گرفتن آستنیت به عنوان فاز اولیه، همین عملیات بارگذاری و بار برداری را بر روی جسم انجام دهیم به نمودار تنش-کرنش شکل ۱-۸ خواهیم رسید که به آن شبه-الاستیک ناقص می گویند.




شکل ۱- ۸- نمودار تنش-کرنش شبه الاستیک ناقص [۱]

در این حالت با حذف تنش همه مارتنزیت غیردوقلو به آستنیت تبدیل نمی‌شود و به تبع آن مقداری کرنش نیز در جسم باقی خواهد ماند. در این حالت نیز می‌توان با گرم کردن به حالت اولیه، یعنی تماماً آستنیت رسید وکرنش‌های پسماند را آزاد کرد. بر اساس این ویژگی از آلیاژهای حافظه‌دار، بعضاً فاز آستنیت را فاز مادر[۱] و فاز مارتنزیت را فاز محصول[۲] می-نامند.

### ۱-۲- کاربردهای آلیاژ حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که از خود نشان می‌دهند، بصورت گسترده‌ای در صنایع و بخش-های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این آلیاژها می‌توانند هم به عنوان سنسور[۳] و هم به عنوان عملگر[۴] در سیستم‌های مختلف به کارگرفته شوند. همچنین می‌توانند نقش سنسور و عملگر را بصورت همزمان در سیستم‌ها بر عهده بگیرند. از آنجایی که این آلیاژها در بیش تر موارد بصورت عملگر ظاهر می‌شوند، لذا در این تحقیق نیز بخش عملگری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است.

[1] Mother Phase
[2] Product Phase
[3] Sensor
[4] Actuator

عملگر از جنس آلیاژ حافظه‌دار، که اختصاراً به آن عملگر حافظه‌دار نیز گفته می‌شود، دارای نسبت نیرو به وزن بالایی می‌باشد. به عبارت دیگر این عملگرها در سایز کوچک نیز قابلیت تولید نیروهای قابل توجهی را خواهند داشت. در حالیکه در عملگرهای متداول مانند عملگرهای هیدرولیکی و پنوماتیکی با کاهش ابعاد، نیروی تولیدی نیز به شدت کاهش می‌یابد. این خاصیت سبب شده که این دسته از عملگرها جایگاه ویژه‌ای در سیستم‌های با ابعاد کوچک (ابعاد میکرو و حتی نانو) به دست بیاورند. همچنین این خاصیت، نسبت نیرو به وزن بالا، امکان انتقال مستقیم نیرو را فراهم کرده و باعث حذف واسطه‌هایی مثل چرخ دنده که مشکلات خاص خود را دارد، شده است. از دیگر مزیت‌های این دسته از عملگرها می‌توان به عملکرد آرام و بدون سرو صدای آن‌ها اشاره کرد. همچنین آلیاژ حافظه‌دار دارای عملکرد نرم و بدون سایشی می‌باشد که این امر باعث افزایش طول عمر آن می‌شود [۳].

در کنار این مزیت‌ها، عملگرهای حافظه‌دار معایبی نیز دارند که کار را برای استفاده از آن‌ها در سیستم‌های مختلف با مشکلاتی روبه رو می‌کند. از جمله این معایب می‌توان به بازده پایین آن‌ها اشاره کرد. عملگر حافظه‌دار در حقیقت یک ماشین گرمایی است که گرما را به کار تبدیل می‌کند. ماشین‌های گرمایی در بهترین حالت طبق سیکل کارنو[1] عمل می‌کنند و بازده سیکل کارنو در دماهایی که آلیاژ حافظه‌دار به صورت معمول فعالیت می‌کند بسیار پایین و در حدود ۱۰٪ است. از دیگر معایب این آلیاژها می‌توان به سرعت نسبتا پایین آن‌ها اشاره کرد. این امر در سیستم‌هایی که نیاز به پاسخ سریع دارند و باید سیکل‌هایی با فرکانس بالا را دنبال کنند مشکل‌زا خواهد بود. همچنین عملگرهای حافظه‌دار قابلیت کنترل پذیری پایینی دارند. چرا که رفتار آنها به شدت غیرخطی است و این غیر خطی بودن باعث ایجاد حلقه هیسترزیس، انتقال گرمای غیر خطی و غیر خطی کردن همه عوامل دخیل در یک فرآیند خواهد شد [۴].

برای فعال کردن عملگر از جنس آلیاژ حافظه‌دار ، نیاز به فراهم کردن یک منبع حرارتی می‌باشد. به دو صورت می‌توان این منبع حرارتی را برای آن‌ها فراهم کرد. یکی این که محیط اطراف نقش منبع حرارتی را برای این عملگرها داشته باشد [۴]. به عنوان یک نمونه برای این حالت، می‌توان به عملگر حافظه‌داری که برای کنترل دریچه گلخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد اشاره کرد. این عملگر طوری طراحی شده که بر اساس دمای گلخانه جریان هوا را قطع و وصل کند [۲].

روش دوم فراهم کردن منبع حرارتی از طریق جریان الکتریکی است. انرژی الکتریکی می‌تواند با دقت بالایی دما را در نقاط مختلف به صورت کاملا کنترل پذیر تغییر دهد. همچنین سرعت تغییر دما از طریق این روش نیز به صورت قابل ملاحظه‌ای بالاست. با عبور جریان الکتریکی از یک رسانایی که دارای مقاومت الکتریکی است گرمایی در آن ایجاد می‌شود که به آن گرمای ژول می‌گویند. گرمای تولیدی از این روش از طریق قانون ژول طبق رابطه (۱-۱) قابل محاسبه است.

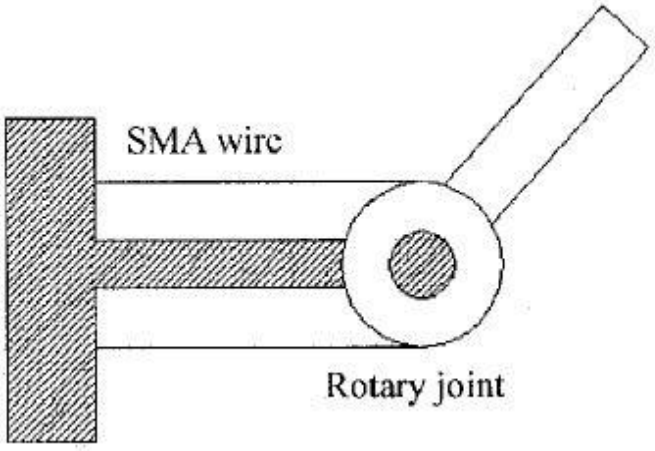
$$P = R\, I^2 \qquad (۱-۱)$$

[1] Carnot

که در آن $P$ گرمای تولیدی، $R$ مقاومت رسانا و $I$ جریان الکتریکی عبوری از رسانا می‌باشد.

در ادامه چند نمونه از کاربردهای عملگر حافظه‌دار آورده شده است.

شکل ۱-۹ نمای ساده‌ای از یک بازوی چرخشی[1] را نشان می‌دهد. این بازوی چرخشی می‌تواند به عنوان مکانیزم پایه در بسیاری از بخش‌های صنایع رباتیک مورد استفاده قرار بگیرد. همان طور که در شکل مشخص است در این سیستم ۲ سیم از جنس آلیاژ حافظه‌دار که یکی به قسمت بالای لولا و دیگری به قسمت پایین آن متصل شده، به کار رفته است.

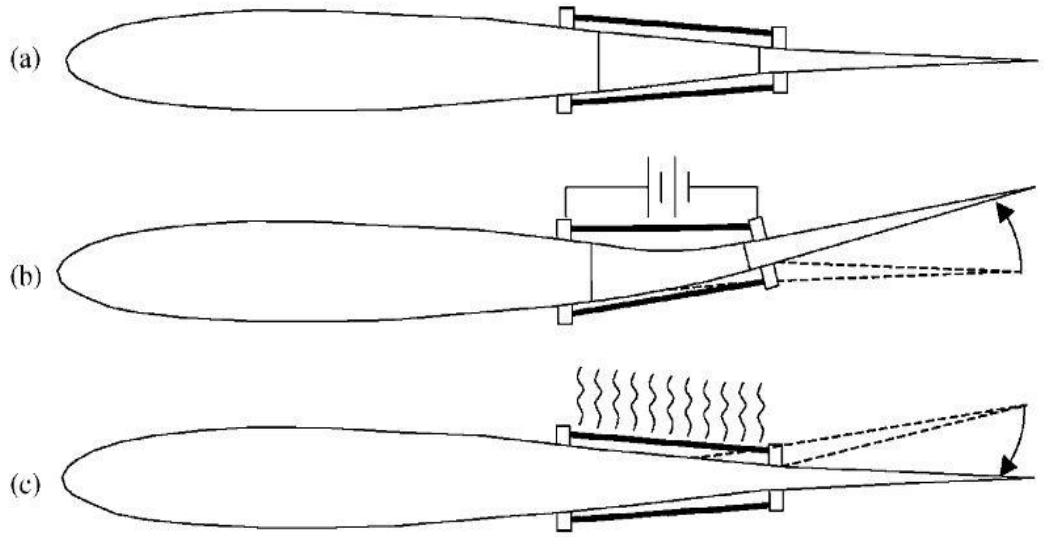



شکل ۱-۹- مکانیزم ساده بازوی چرخشی که بوسیله عمگر حافظه‌دار کنترل می‌شود [۳]

با اعمال جریان الکتریکی به سیم بالایی، در اثر مقاومت الکتریکی سیم، در آن گرما بوجود می‌آید. در اثر این گرما دمای سیم بالا رفته و باعث می‌شود که سیم به دمای استحاله خود برسد. در حین استحاله و تبدیل از مارتنزیت به آستنیت، سیم منبسط شده و طول آن کوتاه می‌شود. که نتیجتا باعث چرخش بازو در جهت پادساعتگرد خواهد شد. با گرم کردن سیم پایینی حرکت ساعتگرد بازو حاصل می‌شود. در اینجا دو سیم حافظه‌دار بصورتی به کار رفته‌اند که در جهت خلاف یکدیگر عمل می‌کنند. این کار به خاطر این است که بتوان حرکت بازو را در هر دو جهت فراهم کرد. به جای دو سیم می توان از یک سیم و یک فنر نیز استفاده کرد [۳].

در وسایل زیر دریایی از باله‌هایی استفاده می‌شود که شکل سطح مقطع خاصی دارند که به آن هیدروفویل[2] می‌گویند. شکل این باله‌ها از ماهی و دیگر موجودات زیردریایی الهام گرفته شده است. یکی از مسائلی که در این زمینه مطرح است، کنترل سطح مقطع این هیدروفویل‌ها می‌باشد. یکی از راهکارهای موجود برای کنترل شکل سطح مقطع، در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است [۵].

[1] Rotary joint
[2] Hydrofoil




شکل۱-۱۰- کنترل سطح مقطع یک هیدروفویل بوسیله عملگر حافظه‌دار [۵]

شکل ۱-۱۰ مکانیزم ساده‌ای از یک هیدروفویل را نشان می‌دهد که توسط عملگرهای حافظه‌دار کنترل می‌شود. برای این کار باله را به دو قسمت تقسیم کرده، دُم و بدنه اصلی، و این دو قسمت توسط یک بخش انعطاف‌پذیر الاستومری به هم متصل شده‌اند. دو سیم آلیاژ حافظه‌دار در بالا و پایین این باله نصب شده است. با اعمال جریان الکتریکی به سیم بالایی، سیم گرم شده، منبسط می‌شود و دم باله را به سمت بالا منحرف می‌کند. با قطع جریان، سیم با محیط انتقال حرارت می‌کند و سرد می‌شود و باله به شکل اولیه خود برمی‌گردد. بدین صورت می‌توان شکل سطح مقطع هیدروفویل را براحتی و با اعمال جریان الکتریکی، کنترل کرد.

هر چه تعداد بیش‌تری سیم آلیاژ حافظه‌دار در هیدروفویل به کارگرفته شود، می‌توان شکل مقطع آن را به نحو دقیق‌تر و متنوع‌تری کنترل کرد. شکل ۱-۱۱ یک هیدروفویل که تعداد زیادی سیم حافظه‌دار در آن به کار رفته است را نشان می‌دهد. با کنترل جریان برروی هر یک از سیم‌های حافظه‌دار در این سازه هوشمند[1] پیچیده، می‌توان تنوع بی‌شماری از سطح مقطع را برای هیدروفویل فراهم آورد.

یکی دیگر از صنایعی که در آن عملگرهای حافظه‌دار بصورت وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، صنعت هوافضا[2] می‌باشد. بالا بردن بازده و کم کردن میزان سوخت یک وسیله هوایی موضوع بسیار مهم و قابل توجهی در این صنعت می‌باشد. برای بالا بردن بازده یک سیستم هوایی باید نسبت نیروی بالا کشنده[3] به نیروی پیش‌ران[4] که توسط موتور هواپیما ایجاد می‌شود را افزایش داد. شکل ایرفویل[5] در این نسبت نیرویی در یک وسیله هوایی بسیار موثر است.

[1] Smart structure
[2] Aerospace industry
[3] Lift force
[4] Trust force
[5] Airfoil