



## تعیین خواص ترمومکانیکی و ترموالکتریکی آلیاژ حافظه‌دار

## تیتانیوم نیکل بمنظور طراحی سیستم‌های تحریک

غلامرضا رثوفی - استادیار دانشکده مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف - تهران

غلامحسین الاسلام صدرنژاد - دانشیار دانشکده متالورژی - دانشگاه صنعتی شریف - تهران

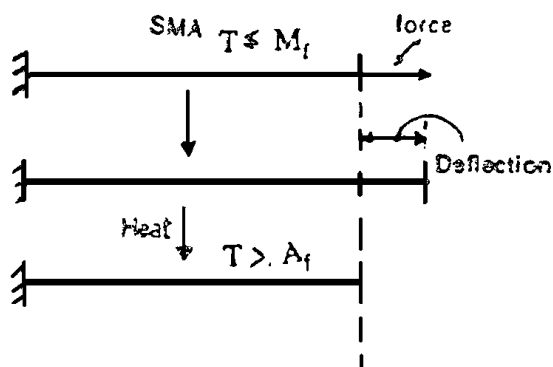
شاهحسین شریانی - کارشناس ارشد - بیومکانیک

برای تعیین رفتار ترمومکانیکی آلیاژ حافظه‌دار تیتانیوم نیکل آزمایشات تجربی بر روی یک نوع آلیاژ حافظه‌دار سیمی شکل انجام شده است. تاثیر متقابل دما، تنش و کرنش بر رفتار آلیاژ حافظه‌دار بدست آمده است. با روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی دماهای انتقال فاز آلیاژ بدست آمده است. در هر مورد نتایج حاصل بحث شده است. طراحی و ساخت یک نمونه مکانیزم یک درجه آزادی دست مصنوعی که از آلیاژ حافظه‌دار بعنوان سیستم تحریک استفاده گردیده معرفی شده است [۹]. در نهایت با توجه به خواص منحصر بفرد آلیاژ حافظه‌دار، روش کنترلی همزمان جابجایی و نیرو در مکانیزم سرو بدون نیاز به مبدل نیرو ارائه شده است و صحت آن با آزمایشات اثبات شده است.

## (۱) معرفی

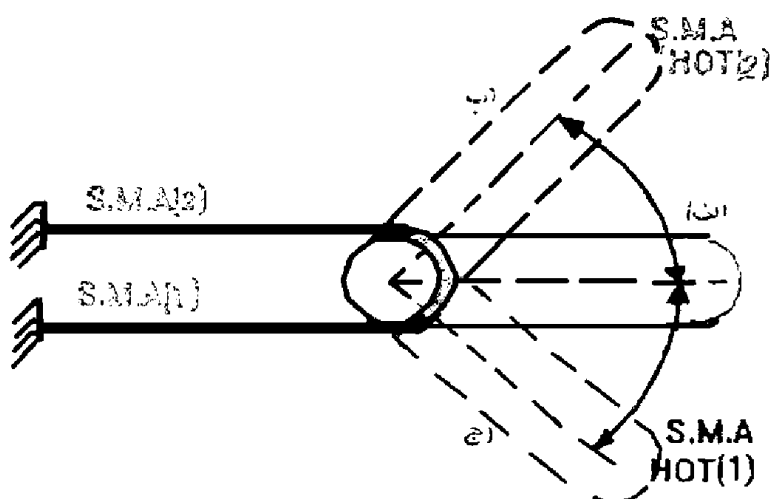
آلیاژهای حافظه‌دار گروه جدیدی از مواد هستند که قابلیت تبدیل انرژی گرمایی (یا الکتریکی) به انرژی مکانیکی را دارند. اگر سرد و گرم شدن این آلیاژ با جریان الکتریکی کنترل گردد، می‌توان حرکت‌های سیکلی با قابلیت تکرار در دفعات متوالی ایجاد کرد و بدین ترتیب از آلیاژهای فوق در ساخت محرک‌های ترمومکانیکی استفاده کرد. چنین محرک‌هایی دارای مشخصات منحصر بفردی مانند نسبت توان به وزن بالا، حرکت نرم و آرام، عدم نیاز به سیستم کاهنده سرعت و عدم نیاز به حس‌کننده‌ها و مبدل‌های پیچیده هستند [۱ و ۲] و به این دلیل جای ویژه‌ای برای خود در مکانیزم‌های رباتیک و گیرنده‌های انتهایی قابل انعطاف با مفاصل متعدد اختیار کرده‌اند [۲].

اصی که موجب خاصیت حافظه‌داری در آلیاژهای خاص می‌گردد، انتقال فاز متالورژیکی در اثر دما می‌باشد. به این صورت که آلیاژ در دماهای کمتر از دمای انتهای مارتریت ( $M_f$ ) در اثر اعمال نیروی کم براحتی تغییر شکل می‌دهد (شکل ۱). وقتی آلیاژ تا دمای بالاتر از انتهای آستنیت ( $A_f$ ) گرم می‌شود، شکل اولیه خود را باز می‌یابد. میزان کرنش بازیابی شده در آلیاژ می‌تواند به ۱۰٪ نیز برسد که البته با افزایش کرنش عمر خستگی کاهش می‌یابد. در آلیاژهای حافظه‌دار از نوع تیتانیوم - نیکل برای کرنش‌های کمتر از ۱٪ می‌توان عمر خستگی تا ۱۰ میلیون بار را نیز انتظار داشت [۶]. تنش بازیابی شده در حین بازیابی شکل اولیه در این آلیاژ تا  $50 \text{ kgf/mm}^2$  می‌رسد. در حالیکه تنش لازم برای تغییر شکل اولیه حدود  $5 \text{ kgf/mm}^2$  است.



شکل (۱) فرآیند بازیابی شکل در آلیاژ حافظه‌دار سیمی شکل

در شکل‌های زیر دو نمونه از مکانیزم‌های حرکتی نوع مفصلی و خطی ارائه شده است که از آلیاژ حافظه‌دار بعنوان سیستم تحریک استفاده کرده است.



شکل (۲) نمونه‌های مکانیزم با محرک آلیاژ حافظه‌دار (الف) حرکت خطی (ب) حرکت دورانی

اخیراً مقالات زیادی در مورد محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار که دارای کاربرد در زمینه‌های رباتیک و مفاصل دست مصنوعی هستند ارائه شده است. س. هیروز (S. Hirose) و همکارانش ترکیب خاصی از کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار را ارائه کردند و آن را آرایه  $\epsilon$  نامیدند. آنها از فنرهای سیمی آلیاژ حافظه‌دار که طریقه اتصال آنها از لحاظ مکانیکی سری و از لحاظ الکتریکی سری بود، استفاده کردند [۳]. ترکیب آرایه  $\epsilon$  توسط ک. ایکوتا (K. Ikuta) و همکارانش نیز استفاده شد [۷]. این ترکیب در یک اندوسکوپ فعال با کنترل سرو با فیدبک مقاومت الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. در مقاله دیگری که توسط هاشیموتو (Hashimoto) و همکارانش ارائه شد [۴]، روش‌های مختلف سرعت بخشیدن به سرمایش آلیاژ (سرد

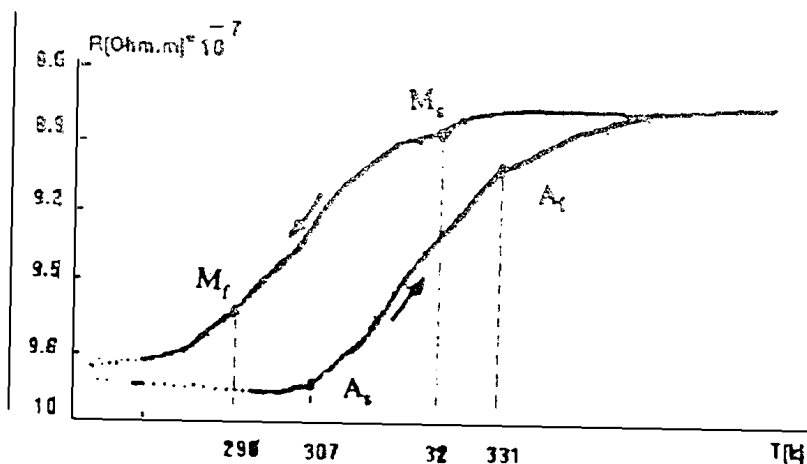
شدن در هوا، سرد شدن در آب، استفاده از چاه حرارتی و . . .) مورد آزمایش قرار داده شد. کوری -باشی (K. Kuribayashi) از آلیاژ حافظه‌دار سیمی شکل برای باز و بسته کردن مفاصل دورانی استفاده کرد [۸]. مدل ریاضی محرك و سیستم کنترل توسط او بدست آمده و اعتبار مدل با آزمایشات تجربی تحقیق شد. ی. ناکانو (Y. Nakano) و همکاران یکی از کاملترین سیستم‌های تحریک را که تاکنون با آلیاژهای حافظه‌دار طراحی و ساخته شده است را ارائه دادند [۵]. وی از این سیستم در ایجاد حرکت مفاصل بین انگشتان و مج دست رباتیک هیتاچی استفاده کرد.

## ۲) آزمایشات تجربی

یکی از دیدگاههای این تحقیق حصول مهارت و دانش بر روی آلیاژ حافظه‌دار و خواص ذاتی آن در طراحی سیستم‌های تحریک استوار است. براساس چنین دیدگاهی مجموعه‌ای از آزمایشات که توانایی پیش‌بینی رفتار ترمومکانیکی و الکتریکی المان فعال آلیاژ حافظه‌دار را داشته باشد، انجام شده است. نتایج حاصل از آزمایشات فوق در تحقیق عملی سیستم‌های تحریک مورد بحث قرار گرفته است. آلیاژ حافظه‌دار مورد استفاده در آزمایشات به صورت سیمی شکل و از نوع تیتانیوم - نیکل به قطر 0.25 mm بوده است.

### ۲-۱) اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بر حسب دما

یکی از آزمایشات اساسی در شناخت خواص آلیاژ حافظه‌دار و در طراحی سیستم‌های تحریک اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی آلیاژ با تغییرات دما می‌باشد. باتوجه به اینکه اساس حافظه‌داری و تغییرات خواص مکانیکی، انتقال فاز متالورژیکی از فاز مارتنزیت (دمای پایین) به فاز آستنیت (دمای بالا) و بالعکس می‌باشد، اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی آلیاژ بر حسب دما می‌تواند دمای انتقال فاز آلیاژ، پهنای هیستریزس آلیاژ و دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی آلیاژ را تعیین سازد. براین اساس اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب دما انجام شده است و نتیجه آزمایش در منحنی شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳) منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب دما

نتایج آزمایش :

دماهای انتقال :

دمای شروع فاز مارتنزیت در سرد شدن	$M_s: 321^\circ \text{K}$
دمای انتهای فاز مارتنزیت در سرد شدن	$M_f: 298^\circ \text{K}$
دمای شروع فاز آستنیت در گرم کردن	$A_s: 307^\circ \text{K}$
دمای انتهای فاز آستنیت در گرم کردن	$A_f: 331^\circ \text{K}$

مقاومت الکتریکی مخصوص ( $\rho$ ):

حالت مارتنزیت	$9.98 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
حالت آستنیت	$8.87 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

نکات مورد استفاده در طراحی سیستم تحریک :

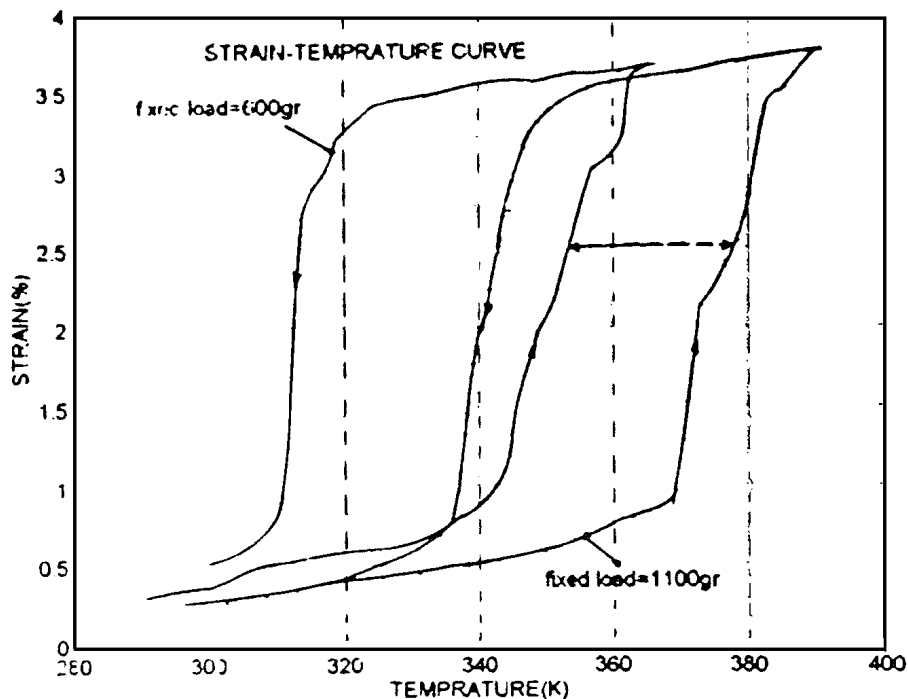
آلیاژ در دماهای کمتر از  $298^\circ \text{K}$  ( $25^\circ \text{C}$ ) کاملاً "مارتنزیت" است که برای طراحی سیستم‌های تحریک در دمای محیط مناسب بنظر می‌رسد. البته می‌توان با ایجاد یک تنش یا کرنش اولیه دمای انتقال مارتنزیت را بالاتر نیز برد.

پهنای هیستریزس آلیاژ زیاد و حدود  $30^\circ \text{C}$  است. یعنی سیستم تحریک بمقدار زیادی رفتار غیرخطی دارد و انتظار می‌رود سرعت تنظیم مجدد و برگشت به حالت سرد اولیه در سیستم تحریک کند باشد. با توجه به نحوه ارتباط و میزان تغییر مقاومت الکتریکی به انتقال فاز آلیاژ حافظه‌دار، از مقاومت الکتریکی می‌توان بعنوان پارامتر کنترل‌کننده انتقال فاز در آلیاژ حافظه‌دار استفاده کرد، که این متناظر با کنترل خواص مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار بعنوان سیستم تحریک می‌باشد.

## ۲-۲) اندازه‌گیری کرنش بر حسب دما

در این آزمایش سیم آلیاژ حافظه‌دار تحت بارها (تنش‌ها)ی ثابت و متفاوت قرار گرفت. در هر مرحله با تغییرات تدریجی دما در یک مرحله گرم و سرد کردن کرنش بازیابی شده اندازه‌گیری شد. بدینوسیله اثرات تنش خارجی در میزان تغییر طول واحد (کرنش) اندازه‌گیری شد. همچنین اثر تنش خارجی در افزایش دمای انتقال فاز، پهنای هیستریزس و حداقل تنش خارجی برای تنظیم مجدد آلیاژ در سرد شدن بدست آمد.

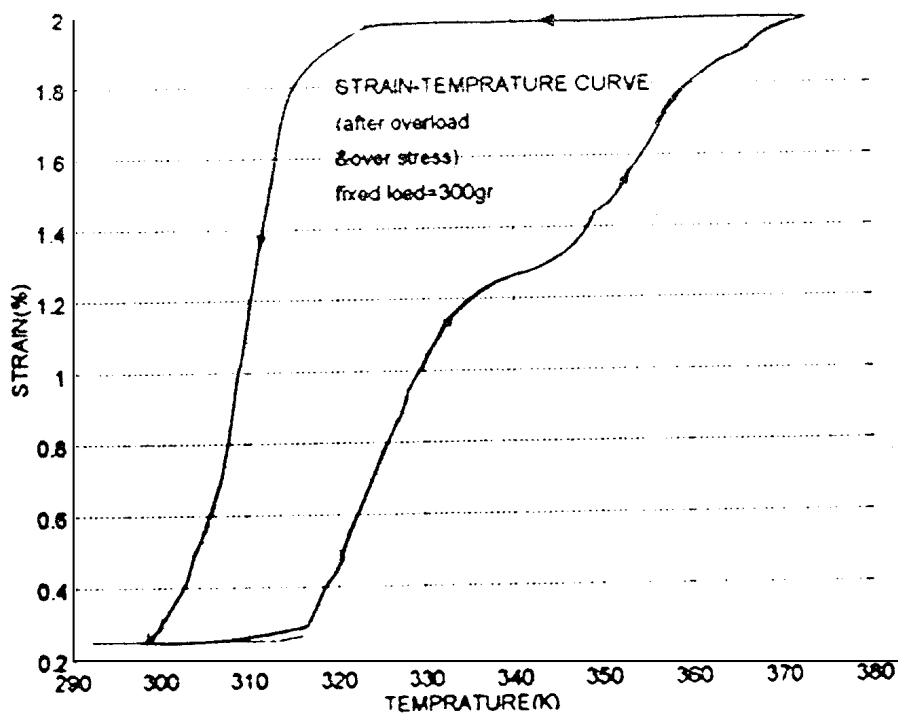
در شکل ۴ نتایج در دو مرحله تحت بارها (تنش‌ها)ی ثابت 600 گرمی (116 MPa) و 1100 گرمی (213 MPa) نشان داده شده است.



شکل ۴) منحنی تغییرات کرنش برحسب دما در تنش ثابت

نتایج آزمایش:

با افزایش تنش خارجی (از 117 MPa به 213 MPa) دماهای انتقال حدود  $24^{\circ}\text{C}$  به سمت دماهای بالاتر منتقل شده‌اند. یعنی با افزایش تنش خارجی اعمال شده میزان انرژی گرمایی لازم برای تحریک آلیاژ افزایش خواهد یافت.



شکل ۵) منحنی کرنش برحسب دما در همان آلیاژ بعد از اعمال تنش و گرمایش بیش از حد

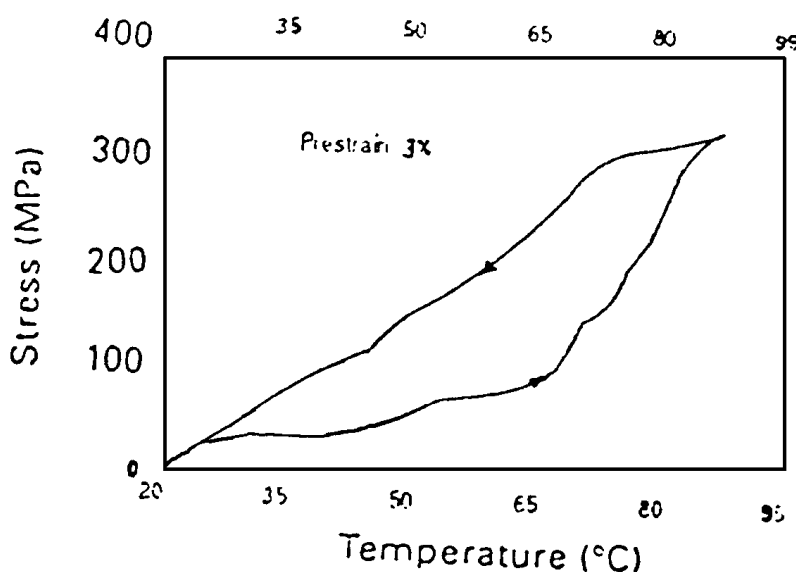
در این آزمایش نیز پهنای هیستریزس بدست آمده نزدیک  $32^{\circ}\text{C}$  است. حداکثر تغییر طول واحد کرنش) نزدیک 4 " می باشد. بنابراین کرنش های طراحی سیستم تحریک موردنظر با این آلیاژ بایستی سیستم تحریک موردنظر با این آلیاژ حداکثر 4% یا کمتر از آن باشد.

با انجام چند مرحله آزمایش و کاهش تدریجی وزنه های ثابت مشاهده گردید که اگر آلیاژ تحت تنش های کمتر از  $5\text{ kgf/mm}^2$  قرار گیرد. درحین سرد شدن بازیابی شکل و تنظیم مجدد آلیاژ انجام نخواهد شد. در مرحله دیگر برای تعیین اثرات اعمال تنش و گرمایش بیش از حد در آلیاژ آن را بمدت طولانی (نزدیک 30 دقیقه) تحت تنش ثابت 425 MPa (وزنه 2.2 کیلوگرمی) در دماهای پائین (دمای  $50^{\circ}\text{C}$ ) نگاه داشته شد و سپس طی چند مرحله دمای آن بدون اعمال تنش خارجی به  $100^{\circ}\text{C}$  رسانده شد. از چنین آلیاژی مجدداً تحت بار ثابت 300 گرمی (58 MPa) آزمایش کرنش برحسب دما انجام گرفت (شکل 5). دیده می شود که کرنش قابل بازیابی به 2% کاهش یافته است و شکل هیستریزس به حالت نامتقارن درآمده است. یعنی در اثر اعمال تنش های اضافی و گرمایش بیش از حد اثر حافظه داری تا حد زیادی تخریب گردیده است.

### ۲-۳) اندازه گیری تنش برحسب دما

اندازه گیری تنش برحسب دما تحت پیش کرنش اولیه در مراحل زیر انجام گرفت.

- کرنش اولیه مشخصی در حالت مارتنزیت به آلیاژ اعمال گردید و این کرنش در طول سیکل گرم سرد کردن آزمایش ثابت نگاه داشته شد.
  - با دادن گرما دمای انتهای آستنیت ( $A_1$ ) افزایش داده شده و تغییرات تنش بوجود آمده در آلیاژ اندازه گیری گردید.
  - آلیاژ مجدداً تحت کرنش اولیه ثابت، سرد گردید تا به دمای حالت مارتنزیت ( $M_1$ ) برسد. ضمن اینکه بازیابی تنش در آلیاژ اندازه گیری شد.
- در شکل 6 منحنی تنش- دما تحت کرنش ثابت 3% دیده می شود.

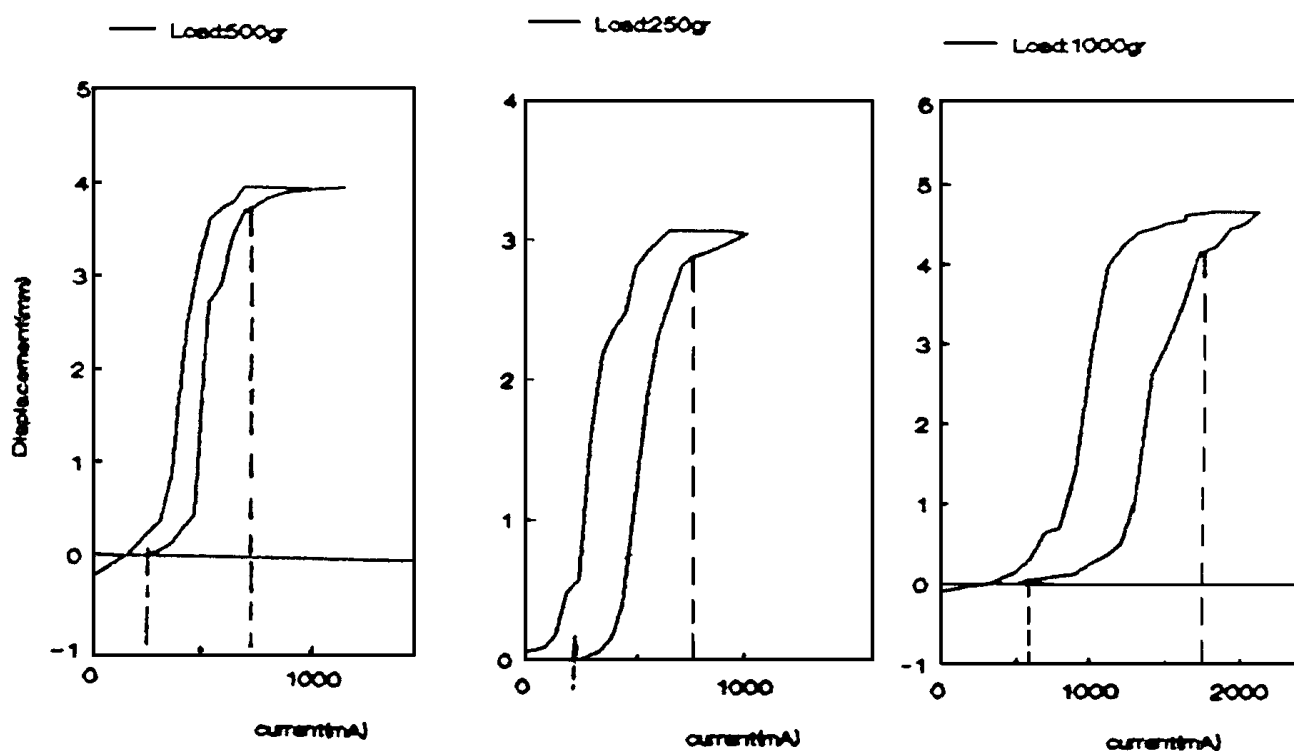


شکل 6) منحنی تنش برحسب دما تحت کرنش ثابت

از این آزمایش می‌توان چنین نتیجه گرفت که با گرم شدن آلیاژ انتقال فاز انجام گرفته و موجب تغییر خواص مکانیکی آلیاژ منجمله مدول الاستیسیته آن شده است. بدلیل ثابت نگاه داشته شدن طول سیم بین دو نقطه ثابت و تحت کرنش اولیه، بازیابی تنش انجام شده است. با افزایش دمای آلیاژ میزان تنش بازیابی شده نیز افزایش یافته است و به 330 MPa رسیده است. همچنین دیده می‌شود که حین بازیابی تنش با کرنش ثابت {3% دمای انتقال آلیاژ نسبت به حالت آزاد آن (در آزمایش مقاومت الکتریکی برحسب دما) افزایش زیادی یافته است و دمای انتهای آستینیت ( $A_p$ ) از  $58^\circ\text{C}$  به  $85^\circ\text{C}$  رسیده است.

#### ۴-۲) اندازه‌گیری کرنش برحسب جریان الکتریکی مصرفی (تحت بار ثابت)

همانطور که آزمایشات کرنش برحسب دما (شکل ۵) نشان می‌دهد، دمای انتقال فاز آلیاژ متناسب با تنش اعمالی افزایش می‌یابد. یعنی برای تحریک انقباضی آلیاژ با وجود تنش خارجی بزرگتر به دماهای بالاتر نیاز داریم. چون عمل گرمایش آلیاژ معمولاً با اعمال جریان الکتریکی انجام می‌شود، می‌توان به این نتیجه رسید که برای رسیدن به دماهای بالاتر نیاز به اعمال جریان الکتریکی بیشتر می‌باشد. برای تحقیق در مورد نحوه تاثیر تنش اعمالی در میزان جریان الکتریکی مصرفی با اعمال تنش ثابت در چند مرحله، میزان کرنش بازیابی شده اندازه‌گیری شده است. نتایج آزمایش در شکل ۷ الف، ب و ج دیده می‌شوند.



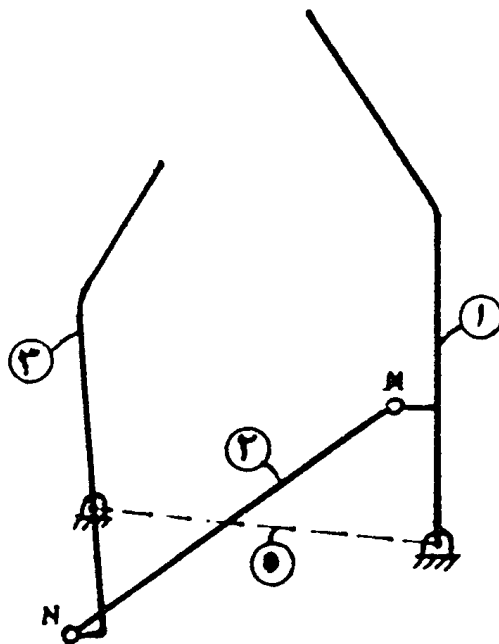
شکل ۷) منحنی کرنش برحسب جریان الکتریکی مصرفی تحت بارها (تنش‌های) ثابت  
 الف: بار اعمالی 250 گرم، ب: بار اعمالی 500 گرم، ج: بار اعمالی 1100 گرم

- جریان الکتریکی تحریک اولیه با افزایش تنش اعمالی بیشتر شده است.
- میزان کرنش قابل بازیابی با افزایش تنش اعمالی بیشتر می‌گردد (3.3% برای بار 250 گرم و 4.8% برای بار 1100 گرم)
- حداکثر جریان الکتریکی مصرفی با افزایش تنش اعمالی بیشتر شده است. (700 MA برای بار 250 گرمی و 850 MA برای بار 500 گرمی و 1100 MA برای بار 1100 گرمی)
- در طراحی سیستم تحریک موردنظر اگر حداکثر بار (تنش) مجاز را 1100 گرم (213 MPa) و حداکثر کرنش اعمال را 1% در نظر بگیریم (طبق شکل ۷-ج) به حداکثر 1300 MA جریان الکتریکی مصرفی خواهیم داشت. بنابراین طراحی یک محدودکننده جریان الکتریکی و یک محدودکننده بار خارجی برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد یا تنش‌های غیر مجاز لازم است و موجب افزایش عمر خستگی می‌گردد.
- باتوجه به جریان الکتریکی مصرفی زیاد (1300 MA)، مسئله منبع تغذیه جریان مستقیم با ظرفیت زیاد بایستی مورد بررسی قرار گیرد.

### ۳) طراحی و ساخت یک گیرنده دست مصنوعی

در این قسمت یک گیرنده دست مصنوعی با یک درجه آزادی که از آلیاژ حافظه‌دار سیمی شکل به‌عنوان سیستم تحریک استفاده شده است معرفی می‌شود. مکانیزم طراحی شده اساساً یک مکانیزم چهار میله‌ای است (شکل ۸) که ایده آن از پروتز دست مصنوعی otto bock آلمان گرفته شده است.

پایه دست	: میله صفر:
انگشت نشان و وسط بصورت مجموعه یکپارچه	: میله یک:
میله واسط منتقل کننده حرکت و نیرو	: میله دو:
انگشت شست	: میله سه:



شکل ۸) شمای مکانیزم چهار میله‌ای دست مصنوعی



سیمهای محرك حافظه دار (شکل ۹) در دو جهت مخالف هم بسته شده اند و عمل تحریک روی میله یک که شامل انگشت نشان و شست است انجام می گیرد. دو قرقره به نقاط D و C به صورت ثابت قرار داده شده اند (به شعاع  $R_1$  و  $R_2$ ). سیمهای محرك از قرقره عبور داده شده و در خلاف جهت یکدیگر بواسطه قرقره های دیگری در مفصل انگشت (به شعاع R) عبور می کنند. در انتها دو سر هر کدام از سیم ها در پایه مکانیزم ثابت می شوند و عمل تحریک برای باز کردن و بستن مکانیزم با گرم کردن هر کدام از سیمهای حافظه دار توسط اعمال جریان الکتریکی انجام می گیرد. برای بستن دست سیم حافظه دار ۱ با عبور جریان الکتریکی گرم می شود. نتیجه گرمایش انقباض سیم و بسته شدن دست است. بالعکس برای باز کردن دست جریان الکتریکی عبوری از سیم حافظه دار ۱ قطع می شود تا شروع به سرد شدن کند و بلافاصله سیم حافظه دار ۲ با جریان الکتریکی تحریک و منقبض می شود. این انقباض موجب حرکت مکانیزم در خلاف جهت، یعنی باعث باز شدن دست می گردد.

### ۳-۱) معیارهای طراحی

با توجه به طراحی سیستم برای سیکل های کاری زیاد:

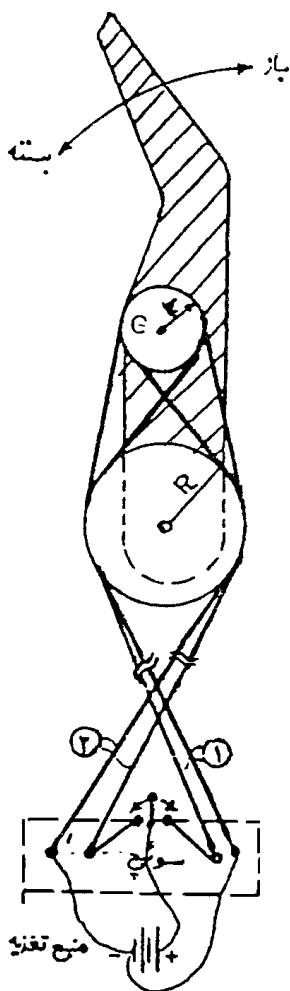
- حداکثر کرنش طراحی مجاز مورد نظر: ۱%
- حداکثر نیروی اعمالی مجاز: 1100 gf که طبق محاسبات نیروی موثر بین دو سر انگشتان N 3 خواهد بود.

- محیط کاری: بدون وزش هوا و دمای معمولی اطاق

- سرعت تنظیم مجدد: حداکثر ۲ ثانیه برای برگشت به حالت کاملاً باز

- منبع تغذیه: باتری معمولی ۱۲ ولت

- حتی الامکان سبک، ساده و جمع و جور



شکل ۹) شمای مربوط به نحوه اتصال سیمهای حافظه دار انگشت محرك

یکی از محدودیت‌های استفاده از محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار کندی در زمان سرد شدن یا سرعت تنظیم محدود در آنهاست. درحالی‌که زمان گرم کردن را می‌توان با افزایش شدت جریان الکتریکی اعمالی بسیار کاهش داد (درحد میلی ثانیه). البته با روشهای خاصی مانند قراردادن آلیاژ در آب سرد، وزش هوا یا استفاده از چاههای حرارتی می‌توان به مشکل کند بودن تنظیم مجدد غلبه کرد، که همراه با مشکل کاهش راندمان به میزان بسیار قابل ملاحظه‌ای است. چون منبع تغذیه موردنظر باتری معمولی با ظرفیت محدود است استفاده از روشهای مذکور ممکن نیست. با توجه به اینکه هیستریزس دمای آلیاژ حدود  $32^{\circ}\text{C}$  است و سیستم بایستی در دمای محیط و بدون وزش هوا عمل کند طبق اندازه‌گیری انجام شده [۹] در این حالت زمان پاسخ در سرد شدن 5.5 ثانیه است. بنابراین برای داشتن سرعت تنظیم مجدد ۲ ثانیه در طراحی موردنظر روش خاصی در نظر گرفته شده است.

برای تنظیم و بازکردن سیستم تحریک جریان الکتریکی سیم محرک عامل بستن را در ابتدا قطع می‌کنیم تا سیم شروع به سرد شدن نماید. بعد از ۱ تا  $1/5$  ثانیه جریان الکتریکی سیم حافظه‌دار عامل بستن را به جگالی نسبتاً زیاد (مثلاً  $1/5$  آمپر) را مدت نیم ثانیه اعمال می‌کنیم تا موجب باز شدن دست گردد.

#### ۴) سیستم کنترل و ارائه روش

کنترل سیستم‌های تحریک آلیاژ حافظه‌دار و مکانیزم مرتبط با آن می‌تواند با اندازه‌گیری و پس‌خور پارامترهای داخلی آلیاژ حافظه‌دار چون دمای آلیاژ (T) و مقاومت الکتریکی (R) آن انجام گیرد و یا با اندازه‌گیری و پس‌خور پارامترهای خارجی مانند نیرو (یا تنش) و جابجایی (یا کرنش) حین انتقال فاز این عمل انجام می‌شود.

با توجه به اینکه رفتار ترمومکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار تابع پارامترهای دما (T) و تنش ( $\sigma$ ) و کرنش ( $\epsilon$ ) به‌طور وابسته می‌باشد، لازم است برای کنترل سیستم تحریک آلیاژ حافظه‌دار دو پارامتر مستقل اندازه‌گیری و بکار گرفته شوند، مگر اینکه یکی از پارامترهای تنش، کرنش یا دما حین عملکرد سیستم تحریک ثابت نگاه داشته شوند.

بدلائل مختلف چون جابجا شدن دماهای انتقال تحت شرایط مختلف و نازک بودن سیم‌های حافظه‌دار اندازه‌گیری دقیق و مستقیم دما بسیار مشکل بوده و کارایی عملی مناسبی نیز ندارد. اندازه‌گیری نیرو نیز نیاز به مبدل‌های حجیم و پیچیده مانند "لودسل" (Load cell) دارد. چون هدف در طراحی دست موردنظر سبکی، جمع و جور بودن و سادگی آن است، در قسمت بعد روش کنترلی خاصی برای سیستم تحریک آلیاژ حافظه‌دار و مکانیزم مربوطه ارائه می‌شود.

#### ۴-۱) روش کنترل

تحقیقات ری، آزمایشات تجربی نشان داده است که درصد انتقال فاز یا میزان فازهای موجود در آلیاژ متناسب با مقاومت الکتریکی آن است [۱]. از طرفی هرکدام از فازهای موجود در آلیاژ رفتار مکانیکی متفاوتی دارند. فاز مارتزیت دارای ساختار نرم بوده و مدول الاستیسیته پائینی دارد. از طرفی فاز آستنیت دارای استحکام مکانیکی زیاد و مدول الاستیسیته بالایی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدول الاستیسیته (یا ضریب سختی) آلیاژ حافظه‌دار با درصد فازهای موجود در آن متناسب است.

بنابراین با در نظر گرفتن نسبت خطی بین مقاومت الکتریکی آلیاژ (R) و درصد حجمی فاز آستنیت (P) می‌توان نوشت:

$$P = C_1 R + C_2 \quad (1)$$

و از طرفی رابطه بین ضریب سختی آلیاژ حافظه‌دار (K) با درصد حجمی فاز آستیت به صورت زیر قابل بیان است:

$$K = C_3 P + C_4 \quad (2)$$

که با ترکیب روابط (۱) و (۲) می‌توان رابطه زیر را بدست آورد:

$$K(R) = aR + b \quad (3)$$

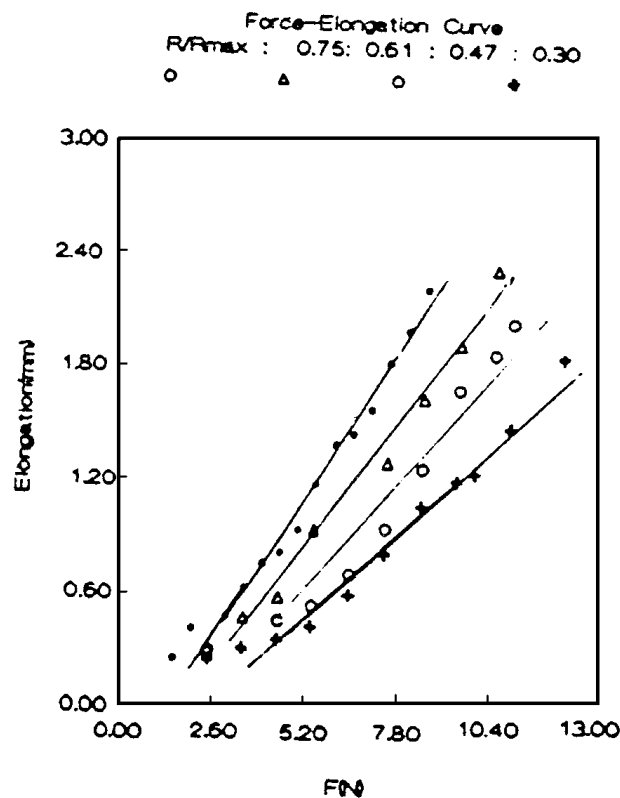
که  $a$  و  $b$  اعداد ثابتی هستند و به‌طور تجربی بدست می‌آیند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی آلیاژ می‌توان در هر لحظه ضریب سختی آلیاژ را تعیین کرد و ضیق رابطه هوک

$$F = K(R) \cdot X \quad (4)$$

با اندازه‌گیری همزمان مقاومت الکتریکی و جابجایی آلیاژ حافظه‌دار عمل کنترل نیرو بدون نیاز به حس کننده را انجام داد:

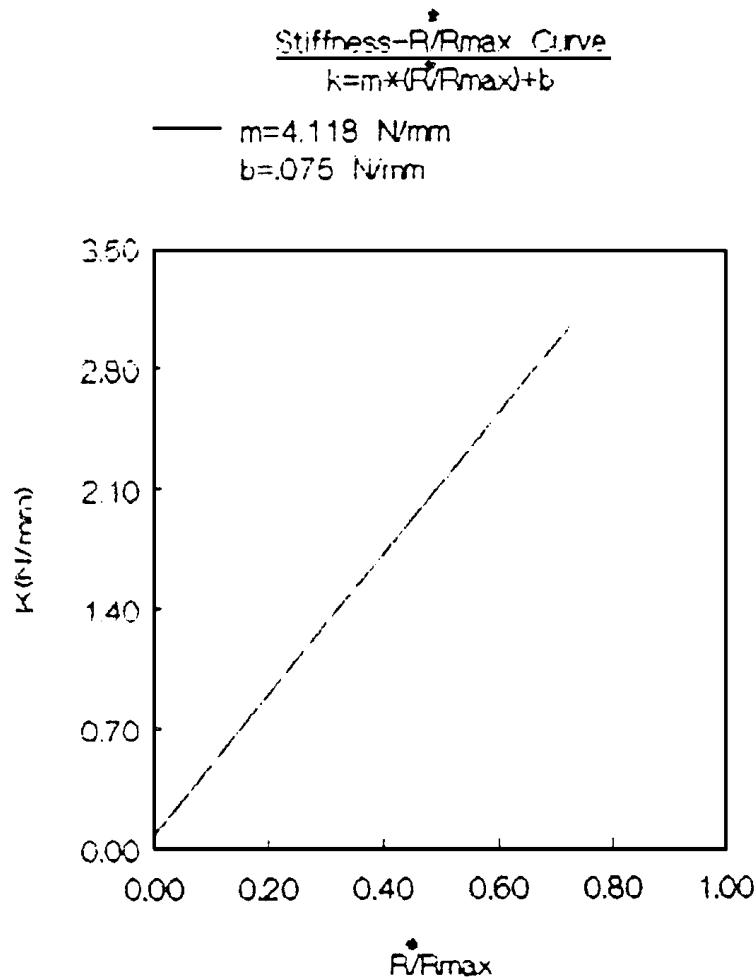
(۴-۱) آزمایش

برای بررسی درستی رابطه (۳) در چند مرحله مقاومت الکتریکی آلیاژ حافظه‌دار در مقادیر ثابت نگاه داشته شد: و با اعمال نیرو میزان تغییر طول در سیم حافظه‌دار اندازه‌گیری می‌شود که حاصل آن در شکل (۱۰) دیده می‌شود.



شکل (۱۰) منحنی های نیرو بر حسب جابجایی تحت مقاومت های الکتریکی ثابت

همانطور که در شکل دیده می‌شود، در مقاومت‌های الکتریکی ثابت بین نیرو و تغییر شکل در آلیاژ تقریباً رفتار خطی دیده می‌شود. طبق قانون اهم با تغییر طول هادی‌ها مقاومت الکتریکی آنها به اندازه  $\Delta R = \rho \Delta l / A$  تغییر می‌کند که  $\Delta R$  تغییر در مقاومت الکتریکی،  $\rho$  مقاومت الکتریکی ویژه،  $\Delta l$  تغییر طول در سیم و  $A$  سطح مقطع سیم است. با اعمال مقدار تصحیحی لازم بدلیل این تغییرات می‌توان رفتار کاملاً خطی را انتظار داشت که در شکل ۱۱ رفتار خطی بین ضریب سختی آلیاژ حافظه‌دار و مقاومت الکتریکی دیده می‌شود.



شکل ۱۱) منحنی خطی تغییرات ضریب سختی آلیاژ به مقاومت الکتریکی

## ۵) نتایج کلی

رفتار ترمومکانیکی و ترموالکتریکی آلیاژهای حافظه‌دار سیمی شکل براساس مجموعه‌ای از آزمایشات انجام شده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و در هر مورد چگونگی استفاده از نتایج بدست آمده در طراحی سیستم‌های تحریک آلیاژ حافظه‌دار ذکر شد. یک نمونه مکانیزم یک درجه آزادی دست مصنوعی که از سیستم تحریک آلیاژ حافظه‌دار استفاده می‌کرد، معرفی شد. در نهایت روش کنترل همزمان جابجانی و نیرو، بدون نیاز به مبدل نیرو ذکر شده و با آزمایشات لازم صحت روش ذکر شده اثبات گردید.

1. K. Ikuta, "Micro miniature shape memory Alloy actuator", Proc. IEEE, Int. Conf. on Robotic & Automation, Vol 3, PP 2156-2161, 1990
2. T.W. Duerig, K.N. Melton, D. Stoker, C.M. Wayman, "Engineering Aspects of Shape Memory Alloy", Butter Worth-Heinemann Publisher, 1990.
3. S. Hirose, K. Ikuta, Y. Umetani, "A New Design Method of Servo Actuators Based on the Shape Memory Effect", proc. of RoxManSy. 84, the Fifth CISM IFTOMM Symposium, Hermes Publishing, PP 339-349, 1985
4. M. Hashimoto, M. Takeda, H. Sagawa, I. Chiba, K. Sato, "Application of Shape Memory Alloy to Robotic Actuators." Journal of Robotic Systems Vol 2, No.1. PP. 3-25, 1985.
5. Y. Nakano, M. Fugie, Y. Hosoda, "Hitachi's Robot Hand", Robotics Age, Vol 6, No. 7, PP. 18-22, 1984.
6. Dinalloy, Inc. "Technical Data". 1991
7. K. Ikuta, M. Tsukamoto, M. Takeda, H. Sagawa, I. Chiba, K. Sato "Application of Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application of Active Endoscope" proc. of IEEE on Robotics & Automation, PP. 427-430, Philadelphia, PA., 1987.
8. K. kuribayashi, "Anew Actuator of a Joint Mechanism Using TiNi Alloy Wire" Int. J. Robotic Res., Vol 4, No.4, PP. 47-58, 1986.

غلامرضا وثوقی، خطیب‌الاسلام صدرنژاد، هاشم غریلو "تعیین خواص ترمومکانیکی و ترموالکتریکی آلیاژ حافظه‌دار تیتانیوم نیکل و نگرشی بر طراحی و ساخت پروتزهای دست مصنوعی"، پروژه کارشناسی ارشد بیومکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مکانیک، تابستان ۷۴