



بررسی خیز تیر کامپوزیتی موج‌دار به کمک سیم آلیاژ حافظه‌دار

مهدی انصاری^۱، محمد گلزار^{۲*}، امیرحسین بهروش^۳

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 * m.golzar@modares.ac.ir، ۱۱۱-۱۴۱۱۵

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: ۲۵ بهمن ۱۳۹۲
 پذیرش: ۱۴ اسفند ۱۳۹۲
 ارائه در سایت: ۰۸ شهریور ۱۳۹۳
 کلید واژگان:
 آلیاژ حافظه‌دار
 تیر کامپوزیتی موج‌دار
 تغییر شکل
 مدل برینسون

چکیده

در این پژوهش یک تیر کامپوزیتی موج‌دار با سیم آلیاژ حافظه‌دار تحریک شده است. آلیاژ حافظه‌دار بر روی سطح تیر کامپوزیتی قرار داده شد. با افزایش دمای سیم حافظه‌دار، تغییر فاز مارتنزیت به آستنیت در سیم ایجاد شد. پس از تغییر فاز، طول سیم کاهش یافته و تیر تحریک شد. پارامترهای جابجایی تیر، نیرو و جریان الکتریکی اندازه‌گیری و با استفاده از مدل آنالوگ به دیجیتال، به رایانه منتقل شد. برای تعیین دما از معادله دیفرانسیل انتقال حرارت سیم استفاده شده است. همچنین از مدل برینسون به منظور مدل‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار استفاده شد. نتایج نشان داد که رفتار آلیاژ حافظه‌دار در مدل برینسون مشابهت خوبی با نتایج تجربی دارد. اما در دماهای کمتر از شروع استحاله مارتنزیتی، تنش آلیاژ در آزمایش‌های تجربی بر خلاف مدل برینسون به صفر میل کرده است. همچنین با توجه به تأثیر آموزش بر عملکرد آلیاژ حافظه‌دار و نیز آزمون گرماسنج روبشی تفاضلی، دماهای شروع و پایان استحاله در آزمایش‌های تجربی با مدل برینسون اختلاف دارد. نتایج تجربی نشانگر آن است که با ترکیب سازه کامپوزیتی موج-دار و آلیاژ حافظه‌دار می‌توان به سازه هوشمند دست یافت که در راستای موج به واسطه مقاومت خمشی کم تحریک‌پذیر بوده؛ درحالی که مقاومت خمشی سازه راستای عمود بر موج بالا است. این امر سبب نزدیک شدن این سازه‌ها به کاربردهای واقعی می‌گردد.

Evaluation of corrugated composite beam deflection by shape memory alloy wire

Mahdi Ansari, Mohammad Golzar*, Amir Hosein Behravesh

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
 * P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 14 February 2014
 Accepted 05 March 2014
 Available Online 30 August 2014

Keywords:

Shape Memory Alloy
 Corrugated Composite Beam
 Deflection
 Brinson's Model

ABSTRACT

In this study, the corrugated composite beam is actuated by shape memory alloy wire (SMAw). SMAw was placed on the surface of composite beam. Martensite to austenite transformation occurs by increasing of SMAw temperature. After transformation, SMAw length decrease and beam actuated. Beam displacement, force and current are measured and by A/D board transferred to computer. For evaluation of temperature in SMAw, the Heat transfer differential equation is used. Also Brinson's model is used for modeling of SMA behavior. The results show that SMA behavior in Brinson's model is good agreement with experiments. But in lower temperatures than martensitic transformation state, the SMA stress is equal to zero in experiment unlike Brinson's model. Also considering the SMA training and DSC test, for some temperatures in the experimental results, the start and end transformation temperatures are different to Brinson's model. The results show as using SMAw in the corrugated composite, smart structures can be achieved that in corrugation direction is irritable, whereas in Perpendicular to the direction, corrugated composite bending strength is high that lead to using this structure in engineering application.

۱- مقدمه

افزایش قند مانور هواپیماها و نیز روند روبه توسعه سفینه‌ها و ماهواره‌های فضایی از جمله دلایل افزایش تمایل به استفاده از سازه‌های هوشمند است. تقاضا برای سازه‌های سبک و مقاوم با قابلیت‌های مضاعف مهندسی سبب بروز شاخه جدیدی از مواد تحت عنوان مواد هوشمند^۳ شده است. پیروالکترونیک‌ها^۴، الکترواستریکتیوها^۵، پیزومغناطیس‌ها^۶، مگنتواستریکتیوها^۷ و

امروزه با پیشرفت علوم و تکنولوژی و نیز نیاز سازه‌های مهندسی به خواص متفاوت، کاربرد مواد جدید در سازه‌های پیشرفته توسعه یافته است [۱]. این سازه‌ها که به آن‌ها سازه‌های مورفینگ^۱ یا انطباقی^۲ اطلاق می‌شود، شکل و هندسه خود را با توجه به شرایط مختلف تغییر می‌دهند و از این رو عملکرد سازه‌ها افزایش خواهد یافت [۲]. این سازه‌ها در کاربردهای مختلفی از جمله بال هواپیما و سفینه‌های فضایی مورد علاقه طراحان قرار گرفته است [۳].

1. Morphing structure
 2. Adaptive structure

3. Smart materials
 4. Piezoelectric
 5. Electrostrictives
 6. Piezomagnetics
 7. Magnetostrictives

Please cite this article using:

M. Ansari, M. Golzar, A.H. Behravesh, Evaluation of corrugated composite beam deflection by shape memory alloy wire, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 49-58, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

برنولی پرداختند و نتایج حاصله را با آزمایش‌های تجربی صحت‌سنجی کردند. آن‌ها بر خلاف اکثر پژوهش‌ها که برای تحریک سازه از یک سیم آلیاژ حافظه‌دار استفاده می‌شد، از دو سیم به منظور تحریک تیر استفاده کردند و تأثیر سیم حافظه‌دار در حالت غیرفعال را نیز لحاظ نمودند.

سازه‌های هوشمند در اکثر پژوهش‌های یادشده در حال سپری کردن مراحل تحقیقاتی هستند و پژوهش‌های محدودی برای کاربردی ساختن آن‌ها انجام شده است. از جمله دلایل این امر، خواص مکانیکی بالای سازه‌های واقعی است. یکی از راهکارهای کاربردی ساختن این سازه‌ها، استفاده از مواد هوشمند در سازه‌هایی با درجه ناهمسانگردی بالا است. این سازه‌ها، سازه‌هایی هستند که نسبت خواص مکانیکی سازه در دو راستای عمود بر هم بسیار زیاد است. در همین راستا مرگان و همکارانش [۲۶] استفاده از کامپوزیت‌هایی با الیاف منحنی را پیشنهاد کرده‌اند. کامپوزیت‌های با الیاف منحنی مقاومت خمشی بالا و مقاومت کششی پایینی دارند و می‌توان از آن‌ها در سازه‌های مورفینگ استفاده کرد.

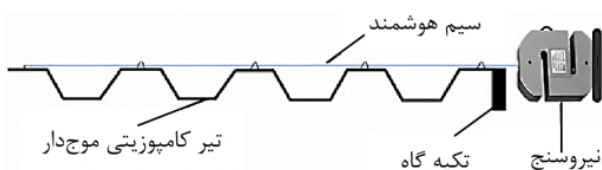
سازه‌های موج‌دار کامپوزیتی سازه‌هایی هستند که در آن‌ها نسبت مقاومت خمشی در راستای موج به راستای عمود بر موج بسیار زیاد است و این نسبت تا ۸۰۰۰ برابر نیز می‌رسد [۲۷]. بنابراین در صورت استفاده از آلیاژ حافظه‌دار برای تحریک سازه در راستای موج، می‌توان به سازه هوشمندی دست یافت که علاوه بر قابلیت تحریک در این راستا، در سایر راستاها مقاومت مکانیکی بالایی داشته باشد.

با توجه به مزیت سازه‌های موج‌دار، در این مطالعه ترکیب آلیاژ حافظه‌دار و تیر کامپوزیتی موج‌دار برای کاربرد مورفینگ پیشنهاد شده است. در این پژوهش پس از آماده‌سازی آلیاژ حافظه‌دار ابتدا تغییر شکل تیر کامپوزیتی موج‌دار به صورت تجربی بررسی گردید. سپس برای شبیه‌سازی رفتار تغییر شکل تیر از مدل برینسون استفاده شده است. همچنین با توجه به مشکلات تجربی اندازه‌گیری دمای سیم از معادلات انتقال حرارت برای تعیین دما استفاده شده است.

۲- تحلیل غیرخطی خیز تیر کامپوزیتی موج‌دار با آلیاژ حافظه‌دار

در این پژوهش سیم حافظه‌دار بر روی سطح تیر در حالت یک سر گیردار قرار داده شده است. شکل ۱ شماتیکی از نحوه قرارگیری سیم را بر روی سطح تیر نشان می‌دهد. برای این‌که پس از تحریک آلیاژ سیم هوشمند بر روی سطح باقی بماند، سیم از میان گیره‌های فلزی متصل به سطح تیر عبور داده شده است. قرار گرفتن سیم بر روی سطح تیر سبب تغییر شکل بیشتر تیر می‌شود [۲۳]. بعلاوه قرار دادن سیم بر روی سطح تیر سبب کوچکی و سادگی طراحی نیز شده است.

قابضی و همکاران [۳۳] خواص مکانیکی تیر موج‌دار کامپوزیتی را به صورت تئوری محاسبه کردند و نشان دادند که می‌توان تیر موج‌دار را با یک تیر تخت معادل‌سازی کرد. آنان نشان دادند که در صورت استفاده از خواص معادل تیر موج‌دار، می‌توان تیر را به صورت یک تیر ساده تخت در نظر گرفت. در این پژوهش خواص معادل تیر موج‌دار طبق مرجع [۳۳] محاسبه و استفاده شده است.



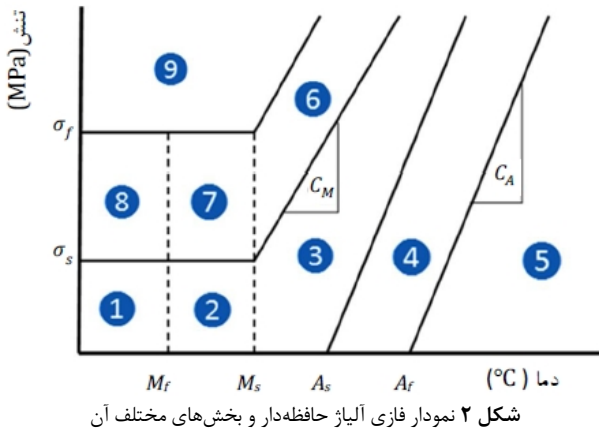
شکل ۱ نحوه قرارگیری سیم هوشمند بر روی سطح تیر

آلیاژهای حافظه‌دار^۱ نمونه‌هایی از مواد هوشمند می‌باشند. آلیاژ حافظه‌دار در بین مواد هوشمند بیش‌ترین چگالی انرژی را دارد که این امر سبب کاربرد این ماده در شرایطی با توان مکانیکی بالا شده است [۱].

دانو و هایر [۴] اولین بار به منظور تحریک ورق‌های کامپوزیتی دوپایا^۲، از آلیاژ حافظه‌دار استفاده کردند. هافن‌باخ و گاد [۵،۶] برای تحریک ورق‌های دوپایا، سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار را در دوطرف ورق کامپوزیتی قرار دادند و بدین ترتیب جهش ورق در دو جهت امکان‌پذیر شد. آنان استفاده از عملگر آلیاژ حافظه‌دار را به صورت تجربی بررسی کردند و هیچ مطالعه‌ای بر روی رفتار آلیاژ حافظه‌دار و نیز حل تحلیلی و عددی تغییر شکل ورق انجام ندادند. در تعدادی از پژوهش‌ها، محققان از قرار دادن آلیاژ حافظه‌دار در داخل لایه‌چینی مواد کامپوزیتی به منظور کنترل شکل این سازه‌ها استفاده کرده‌اند [۷-۱۳]. زو و لیاد [۷] به منظور ایجاد تغییر شکل تیر کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی از عملگر سیم آلیاژ حافظه‌دار استفاده کردند. آن‌ها آلیاژ حافظه‌دار را در داخل لایه‌چینی قرار دادند و مشاهده کردند که در صورت تحریک متناوب تیر به علت تنش برشی ایجادشده در داخل لایه‌چینی، لایه‌ها از یکدیگر جدا شده و تیر و امانده می‌شود. همچنین به واسطه انتقال حرارت پایین پلیمر، سیم در مدت زمان طولانی سرد شد و بسامد تحریک کاهش یافت. داگهی [۱۴] تغییر شکل نمونه‌های کامپوزیتی با سیم‌های حافظه‌دار به‌کاررفته در داخل لایه‌چینی را بررسی کرد. در این حالت به دلیل گشتاور خمشی محدودی که به ورق وارد شد تغییر شکل محدودی در سازه به وجود آمد [۱۵]. لیاند و دامانی‌دیس [۱۶] آلیاژ حافظه‌دار را داخل ورقی از جنس الاستومر قرار دادند و تغییر شکل ورق را بررسی کردند. تورنر و همکارانشان [۱۷] در مرکز تحقیقات ناسا آلیاژ حافظه‌دار را داخل زمینه‌ای از مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف قرار دادند. آنان از این کار برای کاهش صدای موتور جت استفاده کردند. چو و ری [۱۸] به تحلیل اجزای محدود ورق کامپوزیتی تقویت‌شده با آلیاژ حافظه‌دار به صورت غیرخطی پرداختند. هبدا، بلانک و همکارانشان [۱۹،۲۰] به منظور تحریک سازه‌های کامپوزیتی، از سیم‌هایی با خاصیت حافظه‌داری دوطرفه استفاده کردند. آن‌ها برای رسیدن به خاصیت حافظه‌داری دوطرفه آلیاژ را تحت سیکل‌های ترمومکانیکی مشخصی آموزش^۳ دادند.

تعدادی از محققان عملگر آلیاژ حافظه‌دار را در خارج از سازه قرار داده‌اند [۲۱-۲۳]. انصاری و همکاران [۲۱] تغییر شکل تیرهای کامپوزیتی با طول‌های مختلف را بررسی کردند. آنان در پژوهش خود جابجایی پسماند آلیاژ حافظه‌دار را مطالعه کردند. چادری و راگرز [۲۲] به بررسی تحلیل خطی رفتار خمشی یک تیر تحریک‌شده به وسیله سیم آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. آن‌ها در تحلیل‌های خود نیروی سیم را ثابت در نظر گرفتند و از معادلات حاکم بر آلیاژ حافظه‌دار استفاده نکردند. توگو و شیمامورا [۲۳] به حل عددی تغییر شکل تیر الومینیومی تحریک‌شده با آلیاژ حافظه‌دار از طریق ترکیب معادلات ساده تیر و مدل برینسون پرداختند. آن‌ها در معادلات خود فاز میانی موجود در آلیاژ حافظه‌دار را نیز در نظر گرفتند. معلم [۲۴] به بررسی تحریک یک تیر با دو سیم حافظه‌دار به صورت غیرخطی پرداخت. او روابط انتقال حرارت سیم هوشمند و نیز جریان الکتریکی را در محاسبات خود لحاظ کرد ولی تأثیر سیم غیرفعال را در روابط خود در نظر نگرفت. ذاکر زاده و همکاران [۲۵] به مدل‌سازی غیرخطی تغییر شکل تیر آلومینیومی اویلر-

1. Shape memory materials
2. Bistable
3. Training



E_M و E_A به ترتیب مدول یانگ آلیاژ در حالت آستنیتی و مارتنزیتی است. ضریب استحاله فازی (Ω) طبق معادله‌ی (۸) محاسبه می‌شود:

$$\Omega = -\varepsilon_L E(\xi) \quad (8)$$

که ε_L بیشینه کرنش بازیابی آلیاژ است. برینسون و هانگ [۴۱] نشان دادند که معادلات ساختاری را می‌توان به فرم ساده‌شده بصورت رابطه (۹) نیز نوشت:

$$\sigma = E(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_L \xi_S) + \theta(T - T_0) \quad (9)$$

شکل ۲ نمودار فازی مدل برینسون را نشان می‌دهد.

در شکل ۲ دمای آغاز و پایان استحاله آستنیتی در تنش صفر به ترتیب M_f و M_s و دمای آغاز و پایان استحاله مارتنزیتی در تنش صفر با A_s و A_f مشخص شده است. در مدل برینسون تنش آلیاژ برای استحاله آستنیت به مارتنزیت با شیب C_M و برای استحاله مارتنزیت به آستنیت با شیب C_A افزایش می‌یابد که C_M و C_A ضریب استحاله دما-تنش می‌باشند. تنش آلیاژ در دمای کمتر از M_s ثابت و بین دو مقدار σ_s و σ_f است. σ_s و σ_f به ترتیب تنش آغاز و پایان استحاله مارتنزیت حاصل از دما به مارتنزیت حاصل از تنش می‌باشند.

برای تعیین درصد حجمی مارتنزیت در تنش و دماهای مختلف لازم است که فازها و استحاله‌های فازی مربوط به هر یک از قسمت‌های نمودار فازی برینسون شناخته شوند. با توجه به شکل ۲ نمودار فازی را می‌توان به نه بخش تقسیم نمود. فازها و استحاله‌های فازی در این نواحی عبارتند از:

- ناحیه ۱: مخلوط مارتنزیت حاصل از دما یا مارتنزیت حاصل از تنش
- ناحیه ۲: استحاله آستنیت به مارتنزیت حاصل از دما
- ناحیه ۳: مخلوط مارتنزیت حاصل از دما یا تنش و آستنیت
- ناحیه ۴: استحاله مارتنزیت به آستنیت
- ناحیه ۵: آستنیت خالص

ناحیه ۶: استحاله مارتنزیت حاصل از دما یا آستنیت به مارتنزیت حاصل از تنش

ناحیه ۷: استحاله مارتنزیت حاصل از دما یا آستنیت به مارتنزیت حاصل از تنش و استحاله آستنیت به مارتنزیت حاصل از دما

ناحیه ۸: استحاله مارتنزیت حاصل از دما به مارتنزیت حاصل از تنش

ناحیه ۹: مارتنزیت حاصل از تنش

معادلات مربوط به درصد حجمی مارتنزیت در استحاله مارتنزیت به آستنیت به صورت رابطه (۱۰) است:

$$T > A_s \text{ \& } C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_s) \quad (10)$$

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] + 1 \right\}$$

$$\xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi)$$

با توجه به تطابق بیشتر نتایج تئوری غیرخطی نسبت به تئوری خطی، برای تحریک تیر با آلیاژ حافظه‌دار معادله‌ی تغییر شکل تیر در حالت غیرخطی استفاده شده است [۳۴]. معادله‌ی (۱) بیان‌کننده معادله‌ی دیفرانسیل مرتبط با گشتاور خمشی و تغییر شکل تیر است:

$$\kappa = \frac{M}{EI} = \frac{y(x)'''}{(1 + y(x)')^2} \quad (1)$$

در معادله‌ی (۱)، M گشتاور خمشی، E سفتی کششی تیر در راستای موج و I گشتاور دوم سطح تیر تخت معادل با تیر موج‌دار است. با توجه به قرارگیری سیم هوشمند بر روی سطح تیر، گشتاور خمشی وارده بر تیر طبق معادله‌ی (۲) بدست می‌آید.

$$M = Pe = \sigma_w a e \quad (2)$$

در معادله‌ی (۲)، a سطح مقطع سیم حافظه‌دار، P نیرویی کششی سیم حافظه‌دار، σ_w تنش سیم هوشمند و e فاصله سیم از مرکز سطح تیر موج‌دار است. با ترکیب معادلات (۱) و (۲) و حل معادله دیفرانسیل حاصله، رابطه جابجایی تیر بر حسب تنش سیم حافظه‌دار بدست آمد [۳۵]. معادله‌ی (۳) رابطه جابجایی هر نقطه از تیر یک سر گیردار را بر حسب تنش آلیاژ حافظه‌دار بیان می‌نماید.

$$y(x) = \frac{EI}{\sigma_w a e} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_w a e}{EI} \right)^2 x^2} \right\} \quad (3)$$

با بهره‌گیری از روابط هندسی حاکم بر تغییر شکل تیر، رابطه‌ی جابجایی انتهای تیر بر حسب تنش سیم طبق معادله‌ی (۴) بدست آمده است [۳۵].

$$d = \frac{E b h^3}{6 e a \sigma_w} \sin \left(\frac{6 e L a \sigma_w}{E b h^3} \right)^2 \quad (4)$$

۳- روابط ترمومکانیکی حاکم بر استحاله فازی آلیاژ حافظه‌دار

در دهه‌های گذشته مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی ریاضی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار انجام شده است [۳۶-۳۸]. با توجه به پیچیدگی بسیار زیاد و پارامترهای زیاد مدل‌های سه بعدی، از این مدل‌ها به صورت گسترده در کاربردهای مهندسی استفاده نمی‌شود. بنابراین عموماً مدل‌های یک بعدی در کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پرکاربردترین مدل‌های یک بعدی عبارتند از مدل لیانگ و راگرز، تاناکا و مدل برینسون. صیادی و همکارانشان [۳۹] برپایه‌ی آزمایش‌های تجربی نشان دادند که مدل برینسون نسبت به دو مدل دیگر توانایی بهتری در شبیه‌سازی رفتار حافظه‌داری دارد. مدل برینسون به واسطه جدا کردن مارتنزیت (ξ) به دو نوع مارتنزیت حاصل از دما (ξ_T) و مارتنزیت حاصل از تنش (ξ_S)، توانایی توصیف خاصیت حافظه‌داری و فوق کشسانی را دارا است. در این مدل سینتیک استحاله مارتنزیت به صورت کسینوسی است [۴۰].

رابطه درصد حجمی مارتنزیت در مدل برینسون طبق رابطه (۵) عبارت است از:

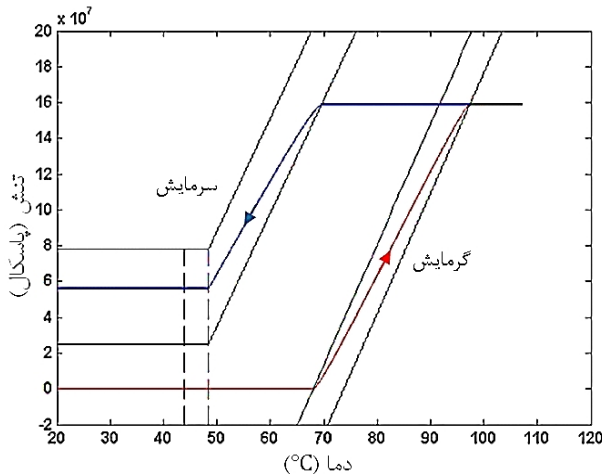
$$\xi = \xi_T + \xi_S \quad (5)$$

معادله ساختاری مدل برینسون رابطه بین تنش، کرنش و دما را بیان می‌کند [۴۰]. این معادله طبق رابطه (۶) عبارت است از:

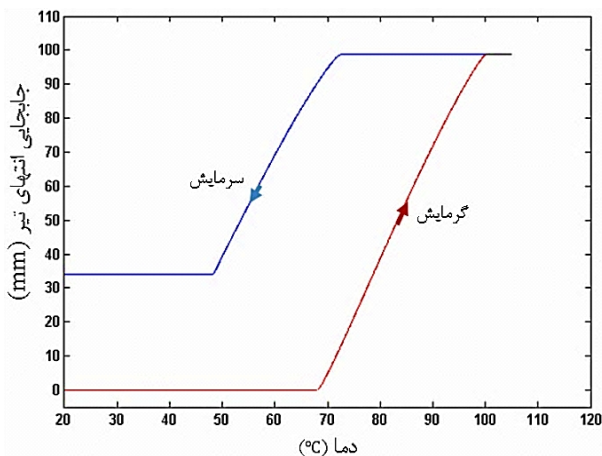
$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)\varepsilon - E(\xi_0)\varepsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_S - \Omega(\xi_0)\xi_{S0} + \theta(T - T_0) \quad (6)$$

که σ ، ε ، E ، Ω ، θ و T به ترتیب تنش، ثابت کشسان، کرنش، ضریب استحاله فازی، معیاری از ضریب انبساط حرارتی و دما می‌باشند. زبرنویس صفر نشان‌دهنده مقادیر در حالت اولیه است. مدول یانگ با توجه به درصد حجمی مارتنزیت طبق معادله (۷) تعیین می‌گردد:

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad (7)$$



شکل ۳ شبیه‌سازی رابطه تنش - دمای سیم حافظه‌دار در تیر کامپوزیتی موج‌دار



شکل ۴ شبیه‌سازی جابجایی انتهای تیر بر حسب دمای سیم حافظه‌دار

۵- اندازه‌گیری دمای سیم با استفاده از معادله انتقال حرارت

با تغییر جریان الکتریکی، دمای سیم هوشمند تغییر می‌کند و استحاله‌های آستنیت به مارتنزیت و بالعکس اتفاق می‌افتد. یکی از راهکارهای تجربی اندازه‌گیری دمای سیم استفاده از ترموکوپل است. اما اتصال مشکل ترموکوپل به سیم حافظه‌دار و نیز کم بودن پاسخ زمانی آن سبب بروز خطا در اندازه‌گیری دما می‌شود. بنابراین در صورتی که بتوان از طریق تابع جریان الکتریکی دمای سیم را بدست آورد، مشکلات ناشی از استفاده ترموکوپل مرتفع می‌گردد.

با بهره‌گیری از معادله دیفرانسیل انتقال حرارت سیم می‌توان دمای سیم را بر حسب جریان اعمالی در زمان‌های مختلف استخراج نمود. همچنین آنجا که اعمال جریان الکتریکی بالا سبب کاهش قابلیت آلیاژ می‌گردد، می‌توان با استفاده از معادله انتقال حرارت محدوده جریان سیم را قبل از آزمایش‌های تجربی تعیین نمود و بنابراین از افزایش بیش از حد دمای سیم جلوگیری کرد [۳۵].

با توجه به مشکلات پیش روی استفاده از ترموکوپل و نیز مزایای بهره‌گیری از معادله انتقال حرارت، در این پژوهش برای تعیین دمای سیم هوشمند از معادله انتقال حرارت حاکم بر آن استفاده شده است.

معادله (۱۸) معادله دیفرانسیل انتقال حرارت سیم آلیاژ حافظه‌دار را بیان می‌کند [۴۳]:

$$C_{v0} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -\frac{4h(T)}{D} [T(x,t) - T_{\infty}] + \rho_e J^2 K \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (18)$$

معادلات مربوط به استحاله آستنیت به مارتنزیت با توجه به دمای M_s به دو قسمت تقسیم می‌شوند. طبق رابطه (۱۱) داریم:

$$T > M_s \text{ \& } \sigma_s + C_M(T - M_s) < \sigma < \sigma_f + C_M(T - M_s)$$

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s - \sigma_f} [\sigma - \sigma_f - C_M(T - M_s)] \right\} + \frac{1 + \xi_{s0}}{2}$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) \quad (11)$$

در مدل اولیه برینسون، درصد حجمی مارتنزیت در محدوده دمای $M_s < T < M_f$ و تنش $\sigma_s < \sigma < \sigma_f$ از صد درصد تجاوز می‌کرد. در سال ۲۰۰۷ میلادی چانگ و همکاران مدل برینسون را اصلاح کردند و این مشکل برطرف گردید [۴۲]. معادلات اصلاح‌شده به صورت زیر می‌باشند. طبق روابط (۱۲) داریم:

$$M_s < T < M_f \text{ \& } \sigma_s < \sigma < \sigma_f$$

$$\xi_s = \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s - \sigma_f} [\sigma - \sigma_f] \right\} + \frac{1 + \xi_{s0}}{2}$$

$$\xi_T = \Delta T_{\varepsilon} - \frac{\Delta T_{\varepsilon}}{1 - \xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) \quad (12)$$

که اگر $T < T_0$ و $M_s < T < M_f$ طبق رابطه (۱۳) داریم:

$$\Delta T_{\varepsilon} = \frac{1 - \xi_{s0} - \xi_{T0}}{2} \left\{ \cos[a_M(T - M_f)] + \frac{1 - \xi_{s0} + \xi_{T0}}{2} \right\} \quad (13)$$

در غیر این صورت طبق رابطه (۱۴) داریم:

$$\Delta T_{\varepsilon} = \xi_{T0} \quad (14)$$

a_M و a_A به صورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌شوند:

$$a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s} \quad , \quad a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f} \quad (15)$$

۴- شبیه‌سازی خیز تیر

در این بخش تغییر شکل تیر کامپوزیتی موج‌دار با استفاده از مدل برینسون شبیه‌سازی شده و رابطه‌ی تنش سیم و جابجایی تیر بر حسب دمای سیم هوشمند بدست آمده است.

دمای محیط آزمایشگاه 20°C فرض شده است. با توجه به نمودار فازی شکل ۲، در استحاله‌ی مارتنزیت به آستنیت مقادیر ξ_{T0} و ξ_{s0} موجود در معادلات (۱۰) پس از آموزش آلیاژ به صورت رابطه (۱۶) می‌باشد:

$$\xi_{s0} = 1 \text{ \& } \xi_{T0} = 0 \quad (16)$$

جزئیات آموزش آلیاژ در قسمت ۷-۲ بیان شده است.

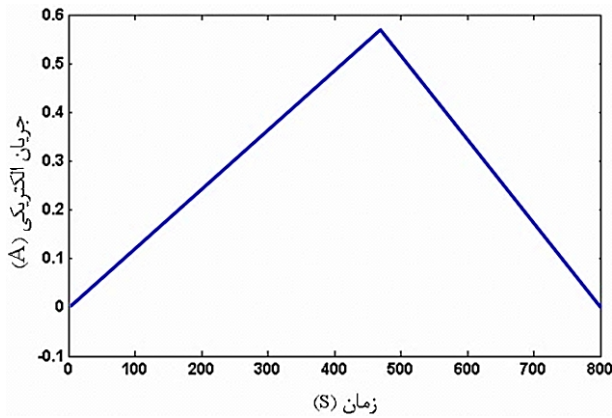
در استحاله آستنیت به مارتنزیت فرض بر این است که استحاله مارتنزیت به آستنیت به صورت کامل انجام شده است و درصد حجمی مارتنزیت و آستنیت به ترتیب برابر ۰ و ۱ می‌شود. بنابراین در پایان استحاله‌ی مارتنزیت به آستنیت طبق رابطه (۱۷) خواهیم داشت:

$$\xi_{s0} = \xi_s = \xi_{T0} = 0 \quad (17)$$

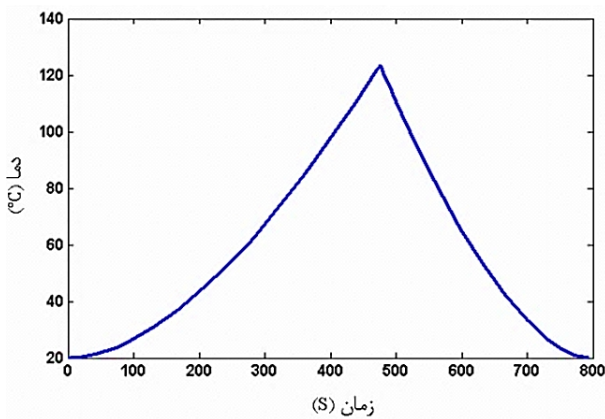
شکل ۳ و شکل ۴ به ترتیب نتیجه‌ی شبیه‌سازی رابطه تنش-دما و جابجایی-دما را برای آلیاژ حافظه‌دار استفاده‌شده در تیر کامپوزیتی موج‌دار نشان می‌دهند.

با اعمال جریان الکتریکی به سیم هوشمند و در نتیجه افزایش دمای آن، سیم در دمای $71/1^{\circ}\text{C}$ کرنش خود را بازیابی کرد. با بازیابی کرنش، تنش سیم افزایش یافت و تیر دچار تغییر شکل شد. بازیابی کرنش تا دمای حدود 100°C ادامه داشته است.

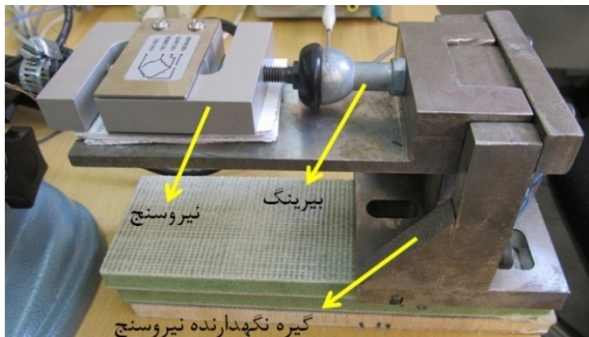
با توجه به شکل ۴، در چرخه سرمایش کاهش جریان سبب کاهش دمای سیم شد و تنش سیم در دمای 72°C شروع به کاهش کرد و به تدریج از تغییر شکل تیر کاسته شد. در دماهای کمتر از 50°C ، جابجایی در حدود mm ۳۴ در انتهای تیر باقی مانده است و کاهش دمای سیم تأثیری در کاهش جابجایی تیر ندارد.



شکل ۵ تابع جریان الکتریکی بر حسب زمان



شکل ۶ تغییرات دما بر حسب زمان برای تابع جریان اعمالی در شکل ۵



شکل ۷ نحوه نگهداری لودسل



شکل ۸ سنسور جریان الکتریکی

برای موقعیت دهی مناسب لودسل، یک گیره با ارتفاع قابل تنظیم ساخته شده است. با توجه به این‌که عدم هم‌محوری نیروی آلیاژ حافظه‌دار و محور نیروسنج سبب تجزیه شدن نیرو و در نتیجه ایجاد خطا می‌گردد، نیروسنج توسط یک بیرینگ به گیره متصل شده است. شکل ۷ جزئیات اتصال نیروسنج به گیره را نشان می‌دهد.

۳-۲-۶ سنسور جریان الکتریکی

برای ثبت جریان الکتریکی ورودی به سیم آلیاژ حافظه‌دار از یک مقاومت

که دمای $T(x, t)$ سیم در زمان t و مکان x ، ظرفیت گرمایی، K ضریب هدایت حرارتی، D قطر سیم، $h(T)$ ضریب انتقال حرارت همرفتی، T_∞ دمای محیط، ρ_e مقاومت الکتریکی (یعنی: $\rho_e = \rho_A + \xi(\rho_M - \rho_A)$) و A چگالی جریان (یعنی: $\frac{1}{A}$) می‌باشد.

شو و همکارانش [۱۵] نشان دادند که در مورد سیم‌های نازک، دمای سیم مستقل از طول سیم و سطح مقطع سیم است، یعنی طبق رابطه (۱۹) داریم:

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = 0 \text{ \& } T(x, t) = T(t) \quad (19)$$

بنابراین معادله (۱۸) به صورت معادله (۲۰) بازنویسی می‌شود.

$$C_{v0} \frac{\partial T(t)}{\partial t} = -\frac{4h(T)}{D} [T(t) - T_\infty] + \rho_e J^2 \quad (20)$$

برای حل معادله (۲۰) لازم است که خواص حرارتی آلیاژ موجود باشد. جدول ۱ خواص حرارتی آلیاژ حافظه‌دار را بیان می‌کند [۲۵].

با توجه به نتایج شبیه‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار در شکل ۳ و شکل ۴، بیشینه دمای آلیاژ حافظه‌دار پس از کامل شدن استحاله آستنیتی ۱۰۴/۶۸ است. به همین منظور تابع جریان اعمالی باید به گونه‌ای باشد که بتواند دمای آلیاژ را مقداری بالاتر از این دما برساند تا استحاله مارتنزیت به آستنیت به صورت کامل انجام شود. شکل ۵ نمونه‌ای از یک تابع جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. برای این‌که حداقل جریان مورد نیاز برای رساندن دمای آلیاژ به دمای ۱۰۴/۶۸ بدست بیاید، آهنگ افزایش جریان الکتریکی در شکل ۵ بسیار کم در نظر گرفته شده است. با بهره‌گیری از معادله دیفرانسیل (۲۰) و جدول ۱، نمودار تغییرات دما بر حسب زمان برای تابع جریان شکل ۵ بدست آمده است. شکل ۶ تغییرات دما بر حسب زمان را برای تابع جریان شکل ۵ نشان می‌دهد.

۶- مواد و تجهیزات آزمایش

۶-۱- آلیاژ حافظه‌دار

آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده در این پژوهش، آلیاژ نایتینول^۱ با نام تجاری فلکسینول^۲ است [۲۸]. آلیاژ به شکل سیم و قطر آن ۰/۲ mm می‌باشد.

۶-۲- وسایل اندازه‌گیری و تجهیزات الکترونیکی

۶-۲-۱- سنسور جابجایی

سنسور جابجایی برای ثبت جابجایی انتهای تیر کامپوزیتی موج‌دار و آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است. محدوده اندازه‌گیری سنسور ۶۵ mm است. سنسور متعلق به شرکت پنی و جیلز^۳ بوده و مشخصات آن در مرجع [۲۹] ذکر شده است.

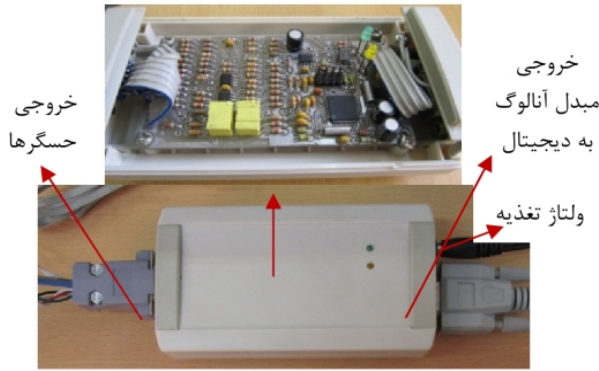
۶-۲-۲- نیروسنج

نیروی آلیاژ حافظه‌دار توسط نیروسنج اندازه‌گیری شده است. محدوده اندازه‌گیری نیروسنج ۲۰ kg است. سایر مشخصات نیروسنج در مرجع [۳۰] آمده است.

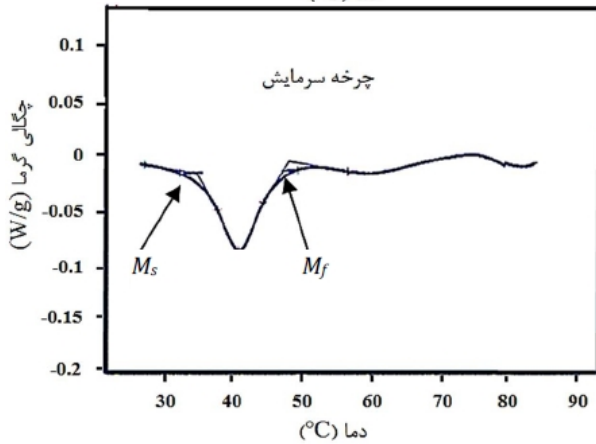
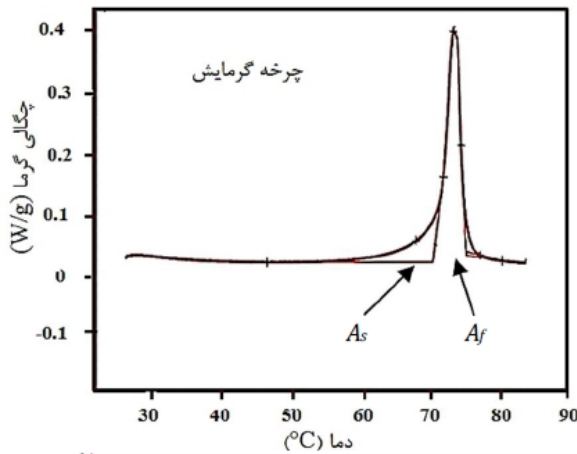
جدول ۱ خواص حرارتی آلیاژ حافظه‌دار [۲۵]

مقادیر	خواص حرارتی
$2/046 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$	C_{v0}
$25 \text{ }^\circ\text{C}$	T_∞
$82 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	ρ_A
$76 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	ρ_M
$-4/034 \times 10^{-7} T^2 + 0/001654 T^3$	$h(T)$
$-0/02586 \times T^2 + 2/071 T + 41/96$	

- Nitinol
- Flexinol@
- Penny and Giles



شکل ۹ مبدل آنالوگ به دیجیتال



شکل ۱۰ نتایج آزمون DSC آلیاژ حافظه‌دار در چرخه سرمایش و گرمایش

جدول ۲ دماهای استحاله آلیاژ حافظه‌دار حاصل آزمون DSC			
$M_f(^{\circ}C)$	$M_s(^{\circ}C)$	$A_s(^{\circ}C)$	$A_f(^{\circ}C)$
۳۳/۶	۴۷/۶	۷۱/۱	۷۶/۲

آموزش باید در بیشینه تنش اعمالی به آلیاژ انجام گیرد [۱]. با توجه به نتایج شبیه‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار در شکل ۳، مشهود است که بیشینه تنش اعمالی به سیم هوشمند ۱۶۰ MPa است، بنابراین آموزش آلیاژ در تنش ۱۶۰ MPa انجام شده است. تنش آموزش از طریق وزنه به سیم اعمال شده است. بر طبق نتایج شبیه‌سازی بخش ۴، جریانی معادل ۰/۵ آمپر به دو انتهای سیم اعمال شد و دمای آن افزایش یافت و سیم به واسطه استحاله مارتنزیت به آستنیت تحریک شد. با قطع جریان الکتریکی و وقوع استحاله آستنیت به مارتنزیت، طول سیم افزایش یافت و سیم دچار کرنش مثبت شد. تکرار این عمل سبب پایدار شدن رفتار آلیاژ حافظه‌دار و آموزش آن شد. مقدار کرنش -

بسیار کوچک (شنت) بر سر مسیر جریان الکتریکی استفاده شده است. همچنین به منظور کاهش نوسانات جریان دو عدد خازن با شنت موازی شده است. شکل ۸ سنسور جریان را نشان می‌دهد.

۴-۲-۶- منبع تغذیه

منبع تغذیه PS 305D به منظور ایجاد جریان الکتریکی (با اختلاف پتانسیل) در سیم هوشمند استفاده شده است. تحریک سیم هوشمند با اعمال جریان الکتریکی و تغییر دمای آن صورت گرفته است.

۵-۲-۶- مبدل آنالوگ به دیجیتال

با توجه به اهمیت ثبت اطلاعات به صورت همزمان، در این پژوهش برای انتقال خروجی سنسورهای جابجایی، نیرو و جریان به رایانه از مبدل آنالوگ به دیجیتال استفاده شده است. این مبدل توسط شرکت ایران ترانیکس ساخته شده است. شکل ۹ تصویر مبدل آنالوگ به دیجیتال را نشان می‌دهد. مبدل مورد استفاده در این پژوهش دارای چهار ورودی آنالوگ است که دو عدد آن‌ها به منبع جریان داخلی مجهز هستند. این مبدل ۱۲ بیتی بوده و سرعت تبدیل آن ۲۰۰ هزار بار در ثانیه است [۳۱]. کالیبراسیون سنسورها با تعیین مقاومت‌های دستگاه یا بصورت دیجیتالی و با تنظیم کردن مقادیر مربوطه در حافظه دستگاه انجام شده است.

۶-۲-۶- نرم‌افزار پردازش اطلاعات

برای کالیبره کردن داده‌ها و نمایش خروجی سنسورها در رایانه، برنامه‌ای کامپیوتری در محیط نرم‌افزار لیبویو^۱ نوشته شده است. از طریق این نرم‌افزار می‌توان تغییرات لحظه به لحظه پارامترهای جابجایی، جریان الکتریکی و نیرو را بر حسب یکدیگر و نیز بر حسب زمان مشاهده نمود.

۷- آزمایش‌های تجربی

۱-۷- آزمون DSC

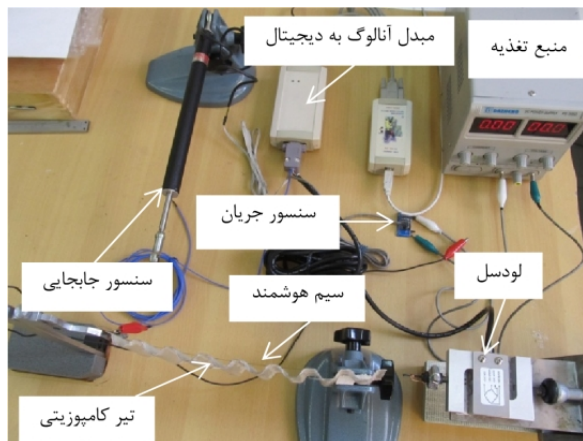
آزمایش گرماسنج رویشی تفاضلی^۲ برای تعیین دماهای استحاله آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است. آزمون DSC در محیط گازی آرگون و با آهنگ تغییرات دمای ۵ min/°C انجام شده است [۱۰، ۲۸]. شکل ۱۰ نتایج آزمون DSC را در چرخه سرمایش و گرمایش نشان می‌دهد.

فاز اولیه آلیاژ حافظه‌دار در دمای محیط مارتنزیت است. با افزایش دما، مارتنزیت به تدریج شروع به تبدیل شدن به آستنیت می‌کند. استحاله مارتنزیت به آستنیت گرماگیر و استحاله آستنیت به مارتنزیت گرماده است. طبق شکل ۱۰ در چرخه گرمایش، شروع و پایان قله به ترتیب متناسب است با A_s و A_f و در چرخه سرمایش، شروع و پایان دوره به ترتیب متناسب است با M_s و M_f . جدول ۲ مقادیر دماهای استحاله را با توجه به نتایج DSC شکل ۱۰ بیان می‌کند.

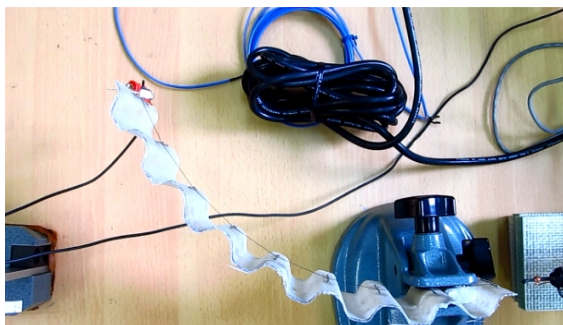
۲-۷- آموزش آلیاژ حافظه‌دار

آلیاژهای حافظه‌دار در تحریک‌های اولیه رفتار منظمی را از خود نشان نمی‌دهند و مقدار کرنش بازیابی آن‌ها منظم نیست [۳۴]. در صورتی که آلیاژ حافظه‌دار به صورت متناوب در معرض تعداد زیادی چرخه ترمومکانیکی، تحت بار ثابت قرار بگیرد، پاسخ عملکردی آلیاژ منظم می‌گردد. این فرآیند آموزش نامیده می‌شود [۱]. در صورتی که بخواهیم از آلیاژ حافظه‌دار به عنوان عملگر استفاده کنیم، آلیاژ باید در بار ثابت آموزش ببیند [۱]. لذا قبل از استفاده، آموزش به منظور پایدارسازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار حائز اهمیت است.

1. Lab VIEW
2. Differential Scanning Calorimeter (DSC)



شکل ۱۳ چیدمان تجهیزات آزمایش



شکل ۱۴ تغییر شکل تیر در نتیجه‌ی تحریک آلیاژ حافظه‌دار. سیم در حالت آستنیتی قرار دارد

۸- تحریک تیر و چیدمان آزمون

تیر کامپوزیتی موج‌دار به صورت یک‌سرگردار موقعیت‌دهی شده و آلیاژ حافظه‌دار بر روی سطح آن قرار داده شده است. شکل ۱۳ چیدمان تجهیزات آزمایش را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۳ تیر کامپوزیتی به صورت یک سرگردار مقید شده است. با افزایش جریان الکتریکی سیم هوشمند تا مقدار ۰/۵۵ آمپر، تیر به تدریج دچار تغییر شکل شد و با کاهش جریان تیر به حالت اولیه خود بازگشت. در قسمت انتهایی تیر، سیم حافظه‌دار به لودسل متصل شد و نیروی آلیاژ حافظه‌دار در هر لحظه اندازه‌گیری شده است. همچنین برای اندازه‌گیری جابجایی تیر، سنسور جابجایی در جلوی تیر قرار داده شد. شنت نیز در مسیر جریان ورودی به سیم هوشمند قرار دارد و وظیفه اندازه‌گیری جریان را بر عهده دارد. در نهایت پارامترهای نیرو، جابجایی و جریان الکتریکی اندازه‌گیری و توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال به رایانه منتقل گردید. شکل ۱۴ وضعیت تیر بعد از تحریک سیم هوشمند را نشان می‌دهد.

۹- بحث و بررسی نتایج

شکل ۱۵ نمودار جریان اعمالی به سیم حافظه‌دار را نشان می‌دهد. برای آن که دمای سیم در هر لحظه در حالت پایدار باشد، جریان الکتریکی با آهنگ بسیار پایینی اعمال شده است.

با افزایش دمای سیم، استحاله‌ی مارتنزیت به آستنیت انجام شد و آلیاژ شروع به بازیابی کرنش کرد. در نتیجه‌ی بازیابی کرنش، نیروی سیم افزایش یافت و تیر دچار تغییر شکل شد. کاهش جریان نیز سبب وقوع استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت گردید و در نتیجه آلیاژ مجدداً دچار کرنش مثبت شد. در این حالت نیروی سیم کاهش یافت و تیر به حالت اولیه خود بازگشت.

بازیابی آلیاژ پس از ۶۰ بار آموزش برابر است با ۴/۷۲٪. تأثیر تنش‌های مختلف آموزش بر روی پدیده حافظه‌داری دوره‌ها و نیز بروز ناپایداری در مورد آلیاژ حافظه‌دار در مرجع [۴۴] بیان شده است.

۷-۳- ساخت تیر کامپوزیتی موج‌دار

مشخصات هندسه و ابعادی قالب ساخت نمونه کامپوزیتی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

رزین مورد استفاده ساخت شرکت اکسون^۱ است. خواص فیزیکی و مکانیکی رزین مورد استفاده در جدول ۳ و جدول ۴ بیان شده است. همچنین خواص الیاف استفاده‌شده در جدول ۵ بیان شده است.

قالب ساخت تیر از جنس اسفنج منبسط‌شده پلی‌استایرن بوده و برای ایجاد هندسه موج‌دار بر روی آن از فرآیند برش سیم داغ^۲ استفاده شده است. نمونه به صورت ۲ لایه و با کسر حجمی ۵۰٪ الیاف ساخته شده است. شکل ۱۲ تصویر تیر کامپوزیتی موج‌دار را نشان می‌دهد.

مشخصات ابعادی و مکانیکی تیر ساخته‌شده در جدول ۶ آورده شده است. به منظور تعیین ثابت کشسان در راستای طولی از آزمون کشش استفاده شده است [۳۲،۳۳]. با استفاده از روابط تئوری مرجع [۳۲،۳۳] نسبت مقاومت خمشی و کششی تیر کامپوزیتی در راستای عمود بر موج به راستای موج به ترتیب برابر است با ۵۳۰ و ۲۴۳۰.

جدول ۳ خواص فیزیکی رزین [۴۵]

رزین	هاردنر	نسبت وزنی	گرانروی در دمای ۲۵°C
EPOLAM 2015	EPOLAM 2015	۱۰۰/۳۲	۷۰ MPa.s

جدول ۴ خواص مکانیکی رزین در دمای ۲۵°C [۴۵]

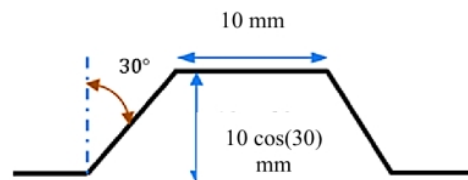
مدول خمشی	استحکام خمشی	استحکام کششی	ازدیاد طول شکست
۲ GPa	۱۲۰ MPa	۷۰ MPa	۶%

جدول ۵ خواص الیاف بکاربرده شده در ساخت کامپوزیت

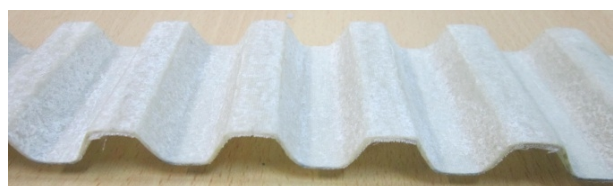
جنس الیاف	نوع بافت	قطر میانگین الیاف	وزن بر واحد مساحت
E-Glass	پارچه بافته‌شده	۱۲ μm	۱۰۰ gr/m ²

جدول ۶ مشخصات هندسی و مکانیکی تیر موج‌دار

ضخامت پوسته (mm)	عرض تیر (mm)	طول تیر (mm)	ثابت کشسان در راستای طول موج E_t (MPa)
۰/۵۷	۶۴/۵	۲۱۰	۱/۳۱



شکل ۱۱ مشخصات هندسی و ابعادی قالب



شکل ۱۲ تصویر تیر کامپوزیتی موج‌دار

1. Axson
2. Hot wire cutting

شکل ۱۶ نتایج تجربی تغییرات تنش سیم بر حسب جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. در جریان الکتریکی ۰/۲۸ آمپر، تنش سیم به تدریج شروع به افزایش کرده است. با افزایش جریان به تدریج از آهنگ افزایش تنش کاسته شده و تنش در جریان‌های بالاتر از ۰/۵ آمپر ثابت شد. در چرخه‌ی سرمایش، تنش آلیاژ تا جریان ۰/۳ آمپر ابتدا به آرامی و سپس با آهنگ بیشتری کاهش یافت. در جریان ۰/۱۵ آمپر تنش سیم برابر با صفر شده است.

علت عدم تطابق مسیر سرمایش و گرمایش در شکل ۱۶ وجود پسماند در رفتار آلیاژ حافظه‌دار است. مقدار پسماند آلیاژ با افزایش جریان الکتریکی (افزایش دما) کمتر شده است و نهایتاً در جریان ۰/۵ آمپر نمودار سرمایش و گرمایش به هم رسیده‌اند.

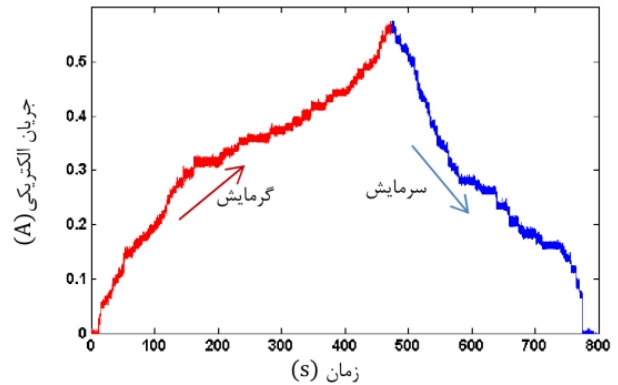
شکل ۱۷ رابطه جابجایی انتهای تیر کامپوزیتی را بر حسب دمای آلیاژ حافظه‌دار به صورت تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۷ تغییر شکل تیر در دمای ۴۸ °C با آهنگ سریع شروع شد و در دمای ۶۶ °C جابجایی تیر با آهنگ کمتری ادامه یافت و در دمای حدود ۱۰۰ °C تغییر شکل تیر متوقف شد. بیشینه خیز تیر در حدود نصف طول تیر شده است. چرخه سرمایش، تیر تمایل به برگشت به حالت اولیه‌ی خود را داشت. بازگشت تیر در دماهای بالاتر از ۶۴ °C با آهنگ ملایم و در دماهای کمتر از ۶۴ °C با سرعت بیشتری انجام گرفت. نهایتاً جابجایی تیر در دمای ۳۶ °C متوقف شد و خیزی در حدود ۴ mm در انتهای تیر باقی ماند.

لازم به ذکر است در تعدادی از آزمون‌ها، تیر کاملاً به مکان اولیه خود بازگشت. در واقع علت خیز ۴ mm به دلیل وزن محدود سیم جریان الکتریکی متصل به انتهای تیر است که سبب جابجایی جزئی تیر شده است. شکل ۱۸ مقایسه نتایج تنش-دمای آلیاژ حافظه‌دار را در دیاگرام فازی به صورت تجربی و مدل‌سازی شده توسط مدل برینسون نشان می‌دهد. در این مورد مشابه در نتایج شکل ۱۷ استحاله‌ی مارتنزیت به آستنیت و بالعکس در نتایج تجربی زودتر از مدل برینسون آغاز شده و دیرتر به پایان رسیده است. بعلاوه، تنش آلیاژ پس از سرمایش و در دمای کمتر از M_s به صفر میل کرده، در حالی که بر اساس مدل برینسون تنش باید در محدوده σ_f و σ_s قرار گیرد.

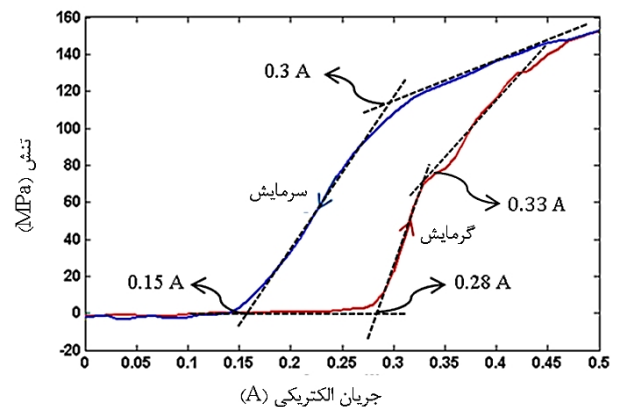
با توجه به مشابهت رفتار آلیاژ در حالت تجربی با مدل برینسون، تفاوت‌هایی نیز در دو نمودار شکل ۱۷ و شکل ۱۸ به چشم می‌خورد. تفاوت اول آن است که با مقایسه نتایج آزمون DSC در جدول ۲ و نیز شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که تغییر شکل تیر در دمای ۴۸ °C شروع شده است و این در حالی است که دمای آغاز استحاله آستنیتی طبق نتایج آزمون DSC برابر با ۷۱/۱ °C بوده است. به عبارت دیگر در آزمایش تجربی و در چرخه گرمایش، شروع تغییر شکل ۲۲ °C زودتر از دمای A_s آغاز شده است که این برخلاف نتایج مدل برینسون است. اما دمای پایان تغییر شکل در دو نمودار تقریباً یکسان است. همچنین در چرخه سرمایش، دمای شروع تغییر شکل در نتایج تجربی زودتر از M_s شروع شد. این در حالی است که دمای پایان تغییر شکل در حدود ۱۲ °C پایین‌تر از نتایج مدل برینسون قرار گرفته است.

یکی از دلایل این اختلاف، متفاوت بودن شرایط آزمایش DSC با شرایط کاری آزمایشگاه است. بعلاوه در شکل ۶ شروع و پایان استحاله‌های آستنیت و مارتنزیت به صورت تدریجی اتفاق افتاده است و نمی‌توان دمای مشخصی را به دماهای استحاله نسبت داد. علت دیگر عدم تطابق دماهای شروع و پایان استحاله با نتایج تجربی را می‌توان در تأثیر آموزش آلیاژ حافظه‌دار و نیز تاریخچه تنش‌های وارده جستجو کرد [۱، ۴۶]. البته تأثیر آموزش در تغییر دماهای استحاله در آلیاژهای حافظه‌دار مختلف، متفاوت است.

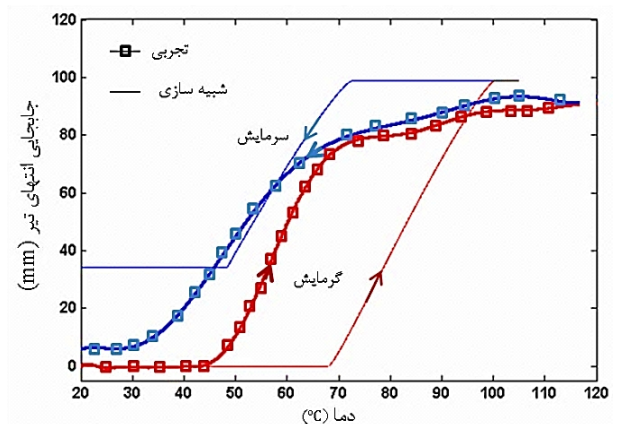
تفاوت دوم آن است که مدل‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار در شکل ۱۷



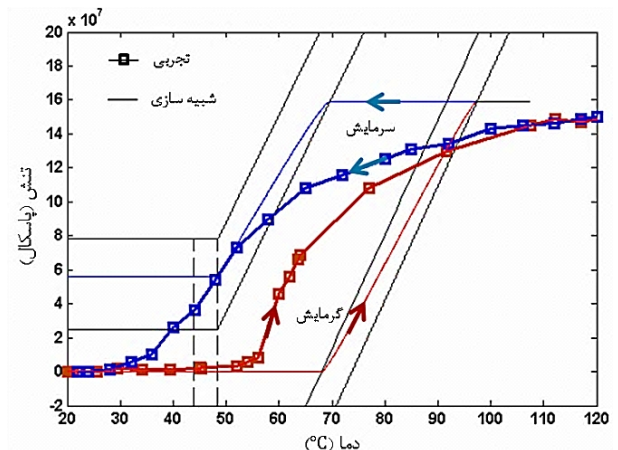
شکل ۱۵ نمودار جریان اعمالی به سیم حافظه‌دار بر حسب زمان



شکل ۱۶ نتایج تجربی تغییرات تنش با جریان الکتریکی



شکل ۱۷ رابطه جابجایی انتهای ورق بر حسب جریان الکتریکی آلیاژ حافظه‌دار



شکل ۱۸ مقایسه نتایج تجربی و مدل‌سازی در دیاگرام فازی برینسون

۱۲- مراجع

- [1] DC. Lagoudas, *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Application*, College Station, USA, Springer, 2008.
- [2] C. Thill JE, I. Bond, K. Potter, P. Weaver, Morphing skins, *aeronautical journal*, Vol. 112, No. 1129, pp. 3216-3239, 2008.
- [3] MM. Schwartz, *Encyclopedia of smart materials*, Wiley, 2002.
- [4] ML. Dano, MW. Hyer, SMA-induced snap-through of unsymmetric fiber-reinforced composite laminates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 22, pp. 5949-5972, 2003.
- [5] W. Hufenbach, M. Gude, L. Kroll, Design of multistable composites for application in adaptive structures, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 16, pp. 2201-2207, 2002.
- [6] W. Hufenbach, M. Gude, Analysis and optimisation of multistable composites under residual stresses, *Composite Structures*, Vol. 55, No. 3, pp. 319-327, 2002.
- [7] G. Zhou, P. Lloyd, Design, manufacture and evaluation of bending behaviour of composite beams embedded with SMA wires, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 13, pp. 2034-2041, 2009.
- [8] SP. Thompson, J. Loughlan, Enhancing the post-buckling response of a composite panel structure utilising shape memory alloy actuators – a smart structural concept, *Composite Structures*, Vol. 51, No. 1, pp. 21-36, 2001.
- [9] SS. Sun, G. Sun, F. Han, JS. Wu, Thermoviscoelastic analysis for a polymeric composite plate with embedded shape memory alloy wires, *Composite Structures*, Vol. 58, No. 2, pp. 295-302, 2002.
- [10] G. Sun, S. Sun, X. Wu, J. Wu, A study on thermomechanical deformation of elastic beam with embedded shape memory alloy wires, *Materials & Design*, Vol. 21, No. 6, pp. 525-528, 2000.
- [11] W. Ostachowicz, M. Krawczuk, A. Żak, Dynamics and buckling of a multilayer composite plate with embedded SMA wires, *Composite Structures*, Vol. 48, No. 1-3, pp. 163-167, 2000.
- [12] K-t. Lau, L-m. Zhou, X-m. Tao, Control of natural frequencies of a clamped-clamped composite beam with embedded shape memory alloy wires, *Composite Structures*, Vol. 58, No. 1, pp. 39-47, 2002.
- A. Baz, T. Chen, J. Ro, Shape control of NITINOL-reinforced composite beams, *Composites Part B Engineering*, Vol. 2190, No.31, 631-642, 2000.
- [13] F. Daghia, *Active fibre-reinforced composites with embedded shape memory alloys*, PhD Thesis, university of Bologna, 2008.
- [14] GS. Shu, D. C. Lagoudas, D. Hugues, J. T Wen, Modeling of a flexible beam actuated by shape memory alloy wires, *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, No. 3, pp. 265-277, 1997.
- [15] J. Lind Robert, C. Doumanidis Charalabos, Active deformable sheets: prototype implementation, modeling, and control, *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 2, pp. 304-316, 2003.
- [16] Travis L. Turner RHC, J. Cano Roberto, A. Fleming Gary, Modeling, Fabrication, and Testing of a SMA Hybrid Composite Jet Engine Chevron Concept, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.17, No. 6, pp. 483-497, 2006.
- [17] HK. Cho, J. Rhee, Nonlinear finite element analysis of shape memory alloy (SMA) wire reinforced hybrid laminate composite shells, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 47, No. 6, pp. 672-678, 2012.
- [18] D. A. Hebda, M. E. Whitlock, J. B. Ditman, S. R.e. Whit, Manufacturing of Adaptive Graphite/Epoxy Structures with Embedded Nitinol Wires, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, No.2, pp. 220-228, 1995.
- [19] J. de Blonk Brett, C. Lagoudas Dimitris, Actuation of elastomeric rods with embedded two-way shape memory alloy actuators, *Smart Mater Struct*, Vol. 7, No. 6, 1998.
- [20] M. Ansari, M. Golzar, A. H. Behraves, Experimental Study on the Effect of Training on Performance of Shape Memory Alloy, *International Conference on Aerospace and Mechanical Systems Engineering*, Dubai, 2013.
- [21] Z. Chaudhry, A. Rogers Craig, Bending and shape control of beams using SMA actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 2, No. 4, pp. 581-602, 1991.
- [22] K. Tohgo, Y. Shimamura, Reciprocating Bending Deformation and Mechanical Response of Shape-control Plate Using NiTi Shape Memory Alloy Wire, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 9, pp. 941-951, 2010.
- [23] M. Moallem, Deflection control of a flexible beam using shape memory alloy actuators, *Smart Mater Struct*, Vol. 12, No. 6, 2003.
- [24] M.R. Zakerzadeh, H. Sayyaadi, Modeling of a Nonlinear Euler Bernoulli Flexible Beam Actuated by Two Active Shape Memory Alloy Actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 11, pp.1249-1268, 2010.

نشان‌گر وجود تغییر شکل پسماندی در حدود ۳۴ mm در انتهای تیر پس از سرمایش آلیاژ و رسیدن دمای آن به دمای محیط است. علت این امر آن است که در مدل برینسون، پس از چرخه‌ی سرمایش، تنش آلیاژ همواره بین σ_s و σ_f باقی می‌ماند. اما با توجه به نتایج تجربی تنش آلیاژ پس از چرخه سرمایش حدوداً صفر شده است.

در مورد عدم فرارگیری تنش آلیاژ در محدوده σ_s و σ_f ، داگهی و همکارانش [۱۴] نشان دادند که تنش آلیاژ حافظه‌دار در چرخه‌ی سرمایش بین مقادیر σ_s و σ_f قرار نگرفته و برابر با صفر شده است. در این پژوهش نیز مشابه پژوهش داگهی و همکارانش مشاهده شد که تنش آلیاژ در چرخه سرمایش برابر با صفر شده است. دلیل این امر را می‌توان در بروز پدیده حافظه‌داری دوراهه در نتیجه آموزش آلیاژ جستجو کرد [۳۵].

پژوهش انصاری و همکاران [۴۴] بر روی آلیاژ حافظه‌دار فلکسینول نشان داد که آلیاژ در برخی از تنش‌های آموزش از خود رفتار حافظه‌داری دوراهه نشان می‌دهد. بازگشت کامل آلیاژ به مکان اولیه خود که برخلاف مدل برینسون است در واقع نشانگر به وجود آمدن خاصیت حافظه‌داری دوراهه در نتیجه آموزش آلیاژ در تنش ۱۶۰ MPa است.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک تیر کامپوزیتی موج‌دار با درجه ناهمسانگردی بالا با عملگر آلیاژ حافظه‌دار تحریک گردید و نتایج زیر حاصل شد:

۱- با ترکیب سازه کامپوزیتی موج‌دار و آلیاژ حافظه‌دار می‌توان به سازه هوشمندی دست یافت که در راستای موج به راحتی تحریک‌پذیر بوده و در راستای عمود بر موج به واسطه مقاومت خمشی بالا توانایی تغییر شکل‌های بزرگ را نداشته باشد. این نوع سازه‌ها به واسطه درجه ناهمسانگردی بالا قابلیت بیشتری را به منظور استفاده در کاربردهای مورفینگ دارند.

۲- آلیاژ حافظه‌دار به خوبی قابلیت ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ را در تیر کامپوزیتی موج‌دار دارد. در این پژوهش خیز انتهای تیر در حدود نصف طول تیر است.

۳- تنش سیم هوشمند در پایان چرخه سرمایش برابر با صفر شده است و تیر تقریباً به مکان اولیه خود بازگشته است. این در حالی است که بر اساس مدل برینسون در پایان چرخه سرمایش مقداری تنش پسماند در سیم باقی می‌ماند و تیر به مکان اولیه خود بازمی‌گردد. نتایج این پژوهش نشان‌گر وابستگی رفتار آلیاژ در چرخه سرمایش و در محدوده تنش σ_s و σ_f به آموزش است. بنابراین لازم است مدل برینسون در این محدوده اصلاح و تأثیر آموزش در رفتار آلیاژ لحاظ گردد.

۴- دماهای تغییر شکل تیر در مدل برینسون مطابقت خوبی با دماهای استتاله حاصل از آزمون DSC ندارد. علت این امر را می‌توان در پیچیدگی رفتار آلیاژ حافظه‌دار و وابستگی دماهای استتاله به آموزش آلیاژ و نیز آزمون DSC جستجو کرد. به عبارت دیگر عوامل ذکرشده سبب تغییر دمای استتاله آلیاژ می‌شود. در این پژوهش دماهای تغییر شکل تیر نسبت به دماهای بدست آمده از آزمون DSC کمتر است. بنابراین لازم است که تأثیر شرایطی مانند آزمون DSC و آموزش را نیز در دماهای استتاله مدل برینسون لحاظ نمود.

۱۱- سپاسگزاری

نویسندگان لازم می‌دانند از زحمات جناب آقای دکتر محمد علی وزیر مدیر موسسه تحقیقات و مهندسی هوانوردی شرکت هسا و نیز دکتر محمدرضا ذاکر زاده عضو هیئت علمی دانشگاه تهران تشکر نمایند.

- [37] QP. Sun, KC. Hwang, Micromechanics modelling for the constitutive behavior of polycrystalline shape memory alloys—I. Derivation of general relations, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-17, 1993.
- [38] H. Sayyaadi, MR. Zakerzadeh, H. Salehi, A comparative analysis of some one-dimensional shape memory alloy constitutive models based on experimental tests, *Scientia Iranica*, Vol. 19, No. 2, pp. 249-257, 2012.
- [39] L.C. Brinson, One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, No. 2, pp. 229-242, 1993.
- [40] L. C. Brinson, M. S. Huang, Simplifications and Comparisons of Shape Memory Alloy Constitutive Models, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, No. 1, pp. 108-114, 1996.
- [41] J. Chung, J.k. Heo, J. Lee, Implementation strategy for the dual transformation region in the Brinson SMA constitutive model, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 1, 2007.
- [42] S. Kakaç, RK. Shah, W. Aung, *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*, New York, Wiley, 1987.
- [43] M. Ansari, M. Golzar, A. H. Behraves, *Experimental studies of training stress effect on NiTi SMA performance in higher and lower stress than training stress*, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 10, pp. 14-24, 2013. (In Persian)
- [44] Axson Inc. Website, *Composite materials*, accessed 5 April 2013, <http://www.axson-na.com>.
- [45] L.P. Chen, N.C. Si, Influence of thermomechanical training deformations on TWSME in TiNiCu alloy spring, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 448, No. 1-2, 10, pp. 219-222, 2008.
- [25] S. Murugan, M.I. Friswell, Morphing wing flexible skins with curvilinear fiber composites, *Composite Structures*. Vol. 99, pp. 69-75, 2013.
- [26] G. Butler, *Investigation of corrugated composite laminates for use in morphing wing skin applications*, Department of Aerospace, University of Bristol, 2007.
- [27] Dynalloy Inc. Website, *Technical Characteristics of Flexinol Actuator Wires*, accessed 5 April 2013, <http://www.flexidynamic.com>.
- [28] Penny and Giles Inc. Website, *Position Measurement and Control Hardware*, accessed 5 April 2013, www.pennyandgiles.com.
- [29] DACELL Co., Ltd. Website, *Load cells*, accessed 5 April 2013, <http://www.dacell.com>.
- [30] Irantronics Inc. Website, *Electronic Equipments*, 2013, www.irantronics.com.
- [31] P. Ghabezi, *Investigation on mechanical behavior (effective elastic constant) of corrugated composite structures glass/epoxy and graphite/epoxy*, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2012. (In Persian)
- [32] P. Ghabezi, M. Golzar, Mechanical Analysis of Trapezoidal Corrugated Composite Skins, *Applied Composite Materials*, Vol. 20, No. 4, pp. 341-353, 2012.
- [33] L.C. Brinson, MS. Huang, C. Boller, W. Brand, Analysis of Controlled Beam Deflections Using SMA Wires, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, pp. 12-25, 1997.
- [34] M. Ansari, *Investigation of Corrugated Composite Skin Deformation Using Shape Memory Alloy*, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2013. (In Persian)
- [35] HN. Yuji Matsuzaki, I. Tadashige, K. Funami, Thermo-mechanical behavior associated with pseudoelastic transformation of shape memory alloys, *Smart Mater Struct*, Vol. 10, No. 5, 2001.
- [36] Y. Ivshin, T. J. Pence, A Thermomechanical Model for a One Variant Shape Memory Material, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, No. 4, pp.455-473, 1994.